

CONTROL AUTOMÁTICO PARA UN EMULADOR DE ENERGÍA EÓLICA

JUAN CAMILO MONSALVO SEGOVIA

DAVID ALEJANDRO VARGAS QUINTERO

DIRIGIDO POR:

ING. RAFAEL FERNANDO DÍEZ MEDINA, Ph.D.

ING. CAMILO ALBERTO OTÁLORA SÁNCHEZ, M. Sc



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

BOGOTÁ D.C

JUNIO 2018

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	MARCO TEÓRICO.....	1
1.	La velocidad del viento y su distribución de energía.....	1
2.	Potencia Extraída por el Viento.....	2
3.	Área barrida por el rotor.....	4
4.	Sistema de Energía Eólica.....	4
4.1	Operación de Velocidad Variable.....	5
4.2	Coefficiente de Potencia ( $C_p$ ).....	5
5.	Generador Sincrónico .....	6
III.	OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	7
1.	OBJETIVO GENERAL.....	7
2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	7
IV.	DESARROLLO.....	7
1.	Diagrama de bloques inicial del sistema.....	7
2.	Comunicación Computador-Micromaster 440.....	10
3.	Resultados del sistema a Malla abierta.....	11
4.	Diagrama de bloques a diseñar.....	12
5.	Adquisición de datos de Voltaje y Corriente a la salida del sistema.....	12
5.1	Medida de Voltaje.....	13
5.2	Medida de Corriente.....	13
6.	Filtro Anti Alias.....	14
7.	Lectura de datos y su procesamiento.....	15
7.1	Utilización de Labview.....	15
7.2	Control del Micromaster 440.....	16
8.	Resultados de la configuración.....	17
9.	Simulación del Modelo del Sistema.....	20
10.	Creación de la información de mando.....	20
11.	Interfaz de Usuario.....	21
V.	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	21
VI.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	22
1.	Curvas Potencia vs Resistencia.....	22
2.	Curva Máxima Potencia vs Viento Simulado.....	25
3.	Comparación con reporte técnico del Air X 400.....	26
VII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
1.	Recomendaciones.....	27
2.	Conclusiones .....	27
3.	Oportunidades de mejora.....	27
VIII.	BIBLIOGRAFIA.....	27
IX.	ANEXOS.....	28

## I. Introducción

En la actualidad la principal fuente de suministro de energía a nivel global está basada en los combustibles fósiles. Debido a que este recurso no es renovable y, además tiene una alta demanda en el mercado, en un futuro no muy lejano se espera que éste incremente su costo, haciendo que su utilización sea menos asequible y adicionalmente a la problemática anterior, la explotación de este recurso contribuye directamente a la contaminación. Por esta razón el interés por las energías renovables y limpias ha aumentado considerablemente en las últimas décadas. Dado al gran interés por las energías renovables y a la necesidad de detener el deterioro del medio ambiente, el emulador eólico, planteado en este trabajo de grado, busca generar conocimientos acerca de la energía eólica y ayudar en investigaciones orientadas a la inserción de pequeños generadores eólicos en zonas no interconectadas del país.

En la facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, antes de iniciar el presente trabajo de grado, se tenía un sistema que consistía en un variador de velocidad controlando un motor de inducción y éste a su vez, acoplado mecánicamente, por el eje, al generador de una turbina eólica. Mediante el variador de velocidad se controla, de una forma manual, el motor de inducción, haciéndolo girar a unas revoluciones por segundo deseadas por el usuario generando una potencia en la turbina eólica. Este sistema no presenta la funcionalidad de un emulador eólico, debido a que la velocidad del sistema no se ve afectada ante variaciones en la carga.

En el presente trabajo de grado se diseñó un control automático, para el sistema descrito anteriormente, generando un comportamiento cercano a la realidad, el cual consiste en fijar la velocidad de giro del grupo motor-generator, en función de la velocidad del viento, el *pitch* de las aspas y de la carga eléctrica que tenga el generador. El operario del equipo selecciona, mediante una interfaz de usuario, la velocidad del viento y el *pitch*. Mediante medidas de voltaje y corriente a la salida del generador se estima la carga y, por medio de un algoritmo se determina la velocidad de giro, emulando el comportamiento de un generador eólico. Con las medidas eléctricas también se determina la potencia eléctrica entregada por el generador.

## II. Marco Teórico

En este capítulo se realizará una explicación de la terminología y la teoría de operación de un generador eólico. Para comenzar, una turbina eólica captura la energía cinética del viento en un rotor el cual consta de dos o más aspas acopladas mecánicamente a un generador eléctrico. La turbina es instalada en una torre de gran altura para mejorar la energía capturada ya que la velocidad del viento aumenta con la altura. A continuación, se trata de explicar el proceso de transformación de energía cinética del viento a energía eléctrica entregada por el generador.

### 2.1 [1] La velocidad del viento y su distribución de energía.

La energía cinética generada por un fluido de aire de masa “m” moviéndose con velocidad “V” es dada por la siguiente ecuación en unidades SI (Sistema Internacional de Unidades):

$$\text{Energía Cinética} = \frac{1}{2} m V^2 \text{ Joules (1)}$$

La potencia en movimiento del aire es la proporción de flujo de aire de energía cinética por segundo.

Por lo tanto:

$$\text{Potencia} = \frac{1}{2} * (\text{flujo de masa por segundo})V^2 \text{ (2)}$$

Donde P = Potencia Mecánica por el movimiento de aire.

$\rho$  = Densidad del aire, en  $\text{kg/m}^3$

$A$  = Área barrida por las aspas del rotor, en  $\text{m}^2$

$V$  = Velocidad del aire, en  $\text{m/s}$

El flujo de volumen es  $A \cdot V$  y el flujo de masa en el aire en kilogramos por segundo es  $\rho \cdot A \cdot V$ , por lo tanto la potencia es dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{1}{2}(\rho AV)V^3 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \text{ Watts} \quad (3)$$

## 2.2 Potencia extraída del viento.

Ahora, dado que la turbina eólica no obtiene toda la potencia que podría entregar el viento a una determinada velocidad, la potencia real extraída por las aspas del rotor es la diferencia entre la potencia de los vientos “upstream” y “downstream”:

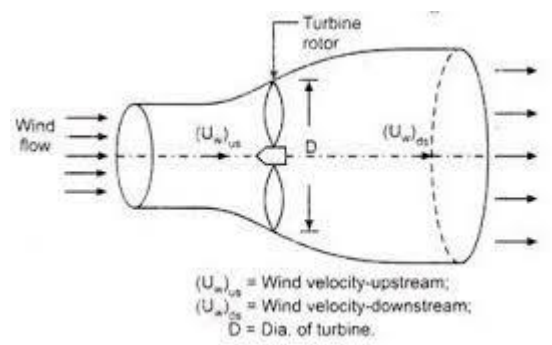


Figura 1 Potencia Extraída del viento. Tomada de [2]

$$P_o = \frac{1}{2} \text{porción de flujo de masa por segundo} \{V^2 - V_o^2\} \quad (4)$$

Donde  $P_o$  = Potencia Mecánica extraída por el rotor, es decir, la potencia de salida de la turbina.

$V$  = Velocidad de viento “Upstream” a la entrada del rotor.

$V_o$  = Velocidad de viento “downstream” a la salida del rotor.

[Traducción de [1]]: “La velocidad del aire es discontinua de  $V$  a  $V_o$  en el “plano” de las aspas del rotor en un sentido macroscópico. La proporción de flujo del aire a través de las aspas rotativas del rotor es además derivada de la multiplicación de la densidad con la velocidad promedio. La cual es:”

$$\text{Proporción de flujo de masa} = \frac{\rho A(V+V_o)}{2} \quad (5)$$

La potencia mecánica extraída por el rotor, la cual utiliza el generador eléctrico, es:

$$P_o = \frac{1}{2} \left[ \rho A * \frac{V+V_o}{2} \right] (V^2 - V_o^2) \quad (6)$$

Donde la ecuación [6] puede ser algebraicamente organizada:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho AV^3 \frac{(1+\frac{V_o}{V})[1-(\frac{V_o}{V})^2]}{2} \quad (7)$$

La potencia extraída por las aspas es típicamente expresada como una fracción de la potencia del viento “upstream” de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (8)$$

Donde

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_o}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{v_o}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (9)$$

$C_p$  se define como la fracción de la potencia de viento “*upstream*”, el cual es capturado por las aspas del rotor. La potencia restante es perdida en el viento “*downstream*”. La constante  $C_p$  es llamada coeficiente de eficiencia del rotor o la eficiencia del rotor.

Para un viento *upstream*, el valor de  $C_p$  depende del radio del rotor. La gráfica del coeficiente versus la relación entre las velocidades antes y después de las aspas ( $V_o/V$ ) (Figura 2) muestra como  $C_p$  es una función con un único valor máximo, este es 0,59 cuando ( $V_o/V$ ) es un tercio. Por lo tanto, la máxima potencia extraída, a una velocidad de viento determinada, está dada por la ecuación:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A V^3 0,59 \quad (10)$$

El máximo valor teórico de  $C_p$  es 0,59. En la práctica, el máximo valor de  $C_p$  está por debajo de 0,5 para altas velocidades, en una turbina de dos aspas; entre 0,2 y 0,4 para turbinas de baja velocidad con más aspas (Figura 3). Si se toma 0,5 en la práctica como el valor máximo de la eficiencia del rotor, la potencia máxima de una turbina eólica se convierte en una simple expresión:

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho V^3 \text{ Vatios por } m^2 \text{ del area barrida} \quad (11)$$

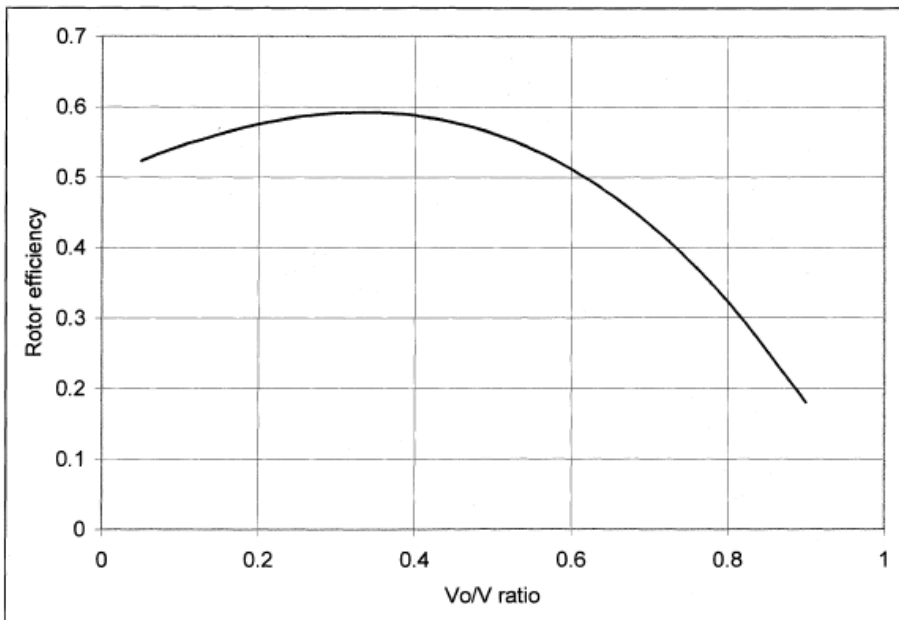


Figura 2 Eficiencia del Rotor vs proporción  $V_o/V$  Tomada de [1]

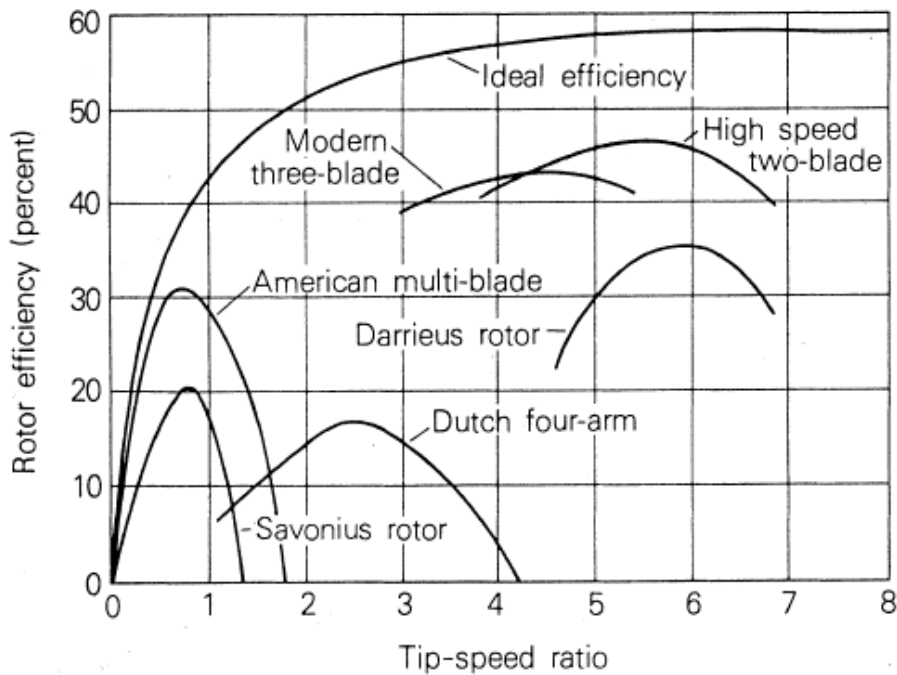


Figura 3 Porcentaje de eficiencia del Rotor vs Tip-Speed Ratio. Tomado de [1].

### 2.3 Área barrida por el rotor

Dentro de las ecuaciones anteriores, es importante hallar el área barrida por el rotor, para encontrar la potencia que puede producir la turbina, desde un punto de vista mecánico [Ecuación 8]. Para turbinas de eje horizontal, el este área barrida se encuentra mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (12)$$

Donde D es el diámetro de un aspa del rotor en metros,

### 2.4 [3] Sistema de Energía Eólica.

Anteriormente se hace una explicación de la energía que puede recuperar una turbina eólica. Sin embargo, un sistema de energía eólica no sólo contiene la parte mecánica. En su totalidad está conformado por los siguientes componentes, que se ilustran en la Figura 4:

- Torre
- Turbina eólica con dos o más aspas
- Mecanismo de orientación
- Engranaje mecánico
- Generador eléctrico
- Sensores y control de velocidad

El sistema moderno tiene a menudo los siguientes componentes adicionales:

- Electrónica de potencia
- El control electrónico, usualmente es un software de un computador.

- La carga de la batería para la mejora de la disponibilidad en modo autónomo
- El enlace de transmisión que conecta con el área “grid”.

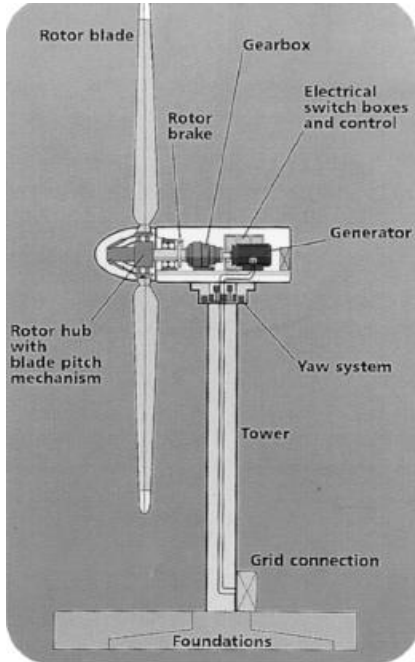


Figura 4: Componentes de una turbina eólica. Tomada de [1].

#### 2.4.1 Operación de velocidad Variable.

Dado que la velocidad del viento puede variar de cero a una alta ráfaga en un determinado sitio, la distribución estática de Rayleigh es la mejor aproximación que representa la velocidad del viento en varios lugares. La cual varía en un amplio intervalo. Se define el *Tip-speed ratio (TSR)* como:

$$TSR = \frac{\text{Velocidad lineal del aspa}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{\omega R}{V} \quad (13)$$

Donde  $R$  y  $\omega$  son el radio y la velocidad angular del rotor, respectivamente.

Para una velocidad del viento dada, la eficiencia del rotor  $C_p$  varía con el  $TSR$  como se muestra en la figura 5. El valor máximo de  $C_p$  ocurre aproximadamente en la velocidad del viento donde se obtiene el pico de potencia en la distribución de la curva de potencia. Para capturar la máxima potencia en una alta velocidad de viento, el rotor debe girar también a una alta velocidad, manteniendo el  $TSR$  constante en un nivel óptimo.

#### 2.4.2 Coeficiente de Potencia ( $C_p$ )

Como se presenta en la referencia [4]:” La *fracción de potencia extraída por la turbina es llamada el coeficiente de potencia, el cual depende de la velocidad del viento, la velocidad del eje y los parámetros mecánicos, como la forma y el ángulo de inclinación (pitch) de las aspas. El coeficiente de potencia es esencialmente la eficiencia de la energía disponible del viento con respecto a la producida por los ejes de la turbina*”. El máximo valor de  $C_p$  teóricamente es dado por el límite de Betz como 0,593. Su función depende del *Tip-Speed ratio (TSR)* que también es llamado  $\lambda$  el cual está definido por la ecuación [5]. La aproximación numérica del coeficiente de potencia está dada por:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left( \frac{116}{\lambda} - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda}} + 0,0068\lambda \quad (14)$$

Donde

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (15)$$

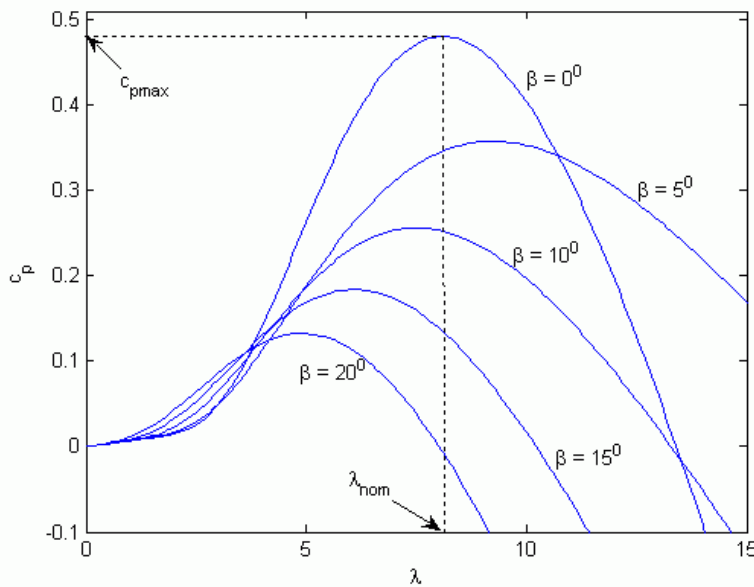


Figura 5  $C_p$  vs  $\lambda$ . Tomado de [5]

La potencia aerodinámica de una turbina está dada por la multiplicación de la ecuación (6) con (3):

$$P_o = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3 \quad (16)$$

$A$  es el área barrida por el rotor. El  $Area = \pi R^2$ , donde  $R$  es el radio del rotor,  $\rho$  es la densidad de aire,  $V$  es la velocidad del viento y  $C_p$  el coeficiente de potencia.

Teniendo en cuenta la parte teórica se procederá a plantear objetivos y desarrollo de los mismos para emular el comportamiento de una turbina eólica explicada anteriormente.

## 2.5 Generador Sincrónico.

La turbina eólica, tiene por especificaciones un generador sincrónico el cual utiliza la potencia mecánica del viento y la convierte en potencia eléctrica. En un generador sincrónico se aplica una corriente DC al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador mediante un motor primario produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador.

Un rotor de generador sincrónico consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta a cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la tasa de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la ecuación:

$$f_e = n \frac{P}{120} \quad (17)$$

Donde  $f_e$  es la frecuencia eléctrica en Hertz,  $n$  es la velocidad mecánica del campo magnético en RPM y  $P$  es número de polos del generador.

Para lograr realizar un emulador eólico en el presente trabajo de grado, se definieron en un principio los siguientes objetivos:



### **III. Objetivos del Proyecto**

#### **1. Objetivo General**

3.1.1 Concebir, diseñar e implementar un sistema embebido, capaz de realizar una acción de control sobre un emulador de energía eólica el cual tiene un control manual.

#### **2. Objetivos Específicos.**

3.2.1 Examinar y probar el comportamiento del sistema variador-motor-generator (VMG) con control manual y cambios en la carga para obtener las especificaciones iniciales y poder realizar una comparación posterior contra [6], [7] y contra el sistema controlado.

3.2.2 Diseñar e implementar el circuito de adquisición y adecuación de las señales a controlar (Voltaje y corriente a la salida de la turbina).

3.2.3 Diseñar e implementar el sistema de control con un algoritmo digital correspondiente de la velocidad del variador en función de la velocidad del viento y de la carga del generador.

3.2.4 Validar el funcionamiento del sistema, comparándolo contra el comportamiento de una turbina real [7].

Como se mostrará en el desarrollo, algunos de estos objetivos cambiaron para poder dar mayor funcionalidad al emulador eólico, como la realización de una interfaz de usuario, que permite fijar la velocidad del viento, el *pitch*, así como la visualización de variables eléctricas como la potencia de salida, permitiendo ver si una carga está ubicada en el punto de máxima potencia o no.

### **IV. Desarrollo**

En el presente trabajo de grado, siguiendo los lineamientos de los objetivos, se procedió a obtener la función de transferencia en malla abierta del sistema (variador-motor-generator), posteriormente se implementó un modelo (en simulación) mecánico-eléctrico lo más aproximado a la turbina con la cual se trabajará; donde se obtuvo una relación entre la Potencia y la Resistencia de salida de la turbina eólica. Una vez obtenida dicha relación se diseñó un control automático tal que cumpla con el comportamiento de una turbina eólica.

Como se mencionó anteriormente, en adición a los objetivos descritos en el capítulo anterior se diseñó una interfaz de usuario para que se pueda escoger la velocidad del viento y el ángulo de inclinación de las aspas con el cual desea trabajar. Por lo tanto, se generó una tabla con la información de la relación Potencia vs Resistencia de salida a diferentes velocidades de vientos, teniendo como opción tres diferentes *pitches* (0°, 10° y 20°).

#### **4.1 Diagrama de bloques inicial del sistema.**

El sistema de energía eólica con el cual se empezó a trabajar está descrito por el siguiente diagrama de bloques. Este sistema para realizar pruebas en malla abierta permite caracterizar los diferentes elementos, y así poder efectuar las simulaciones del generador eólico. Estas simulaciones serán quienes determinen el comportamiento del sistema en malla cerrada, es decir, cuando la velocidad del conjunto motor-generator varía en función de la carga eléctrica.

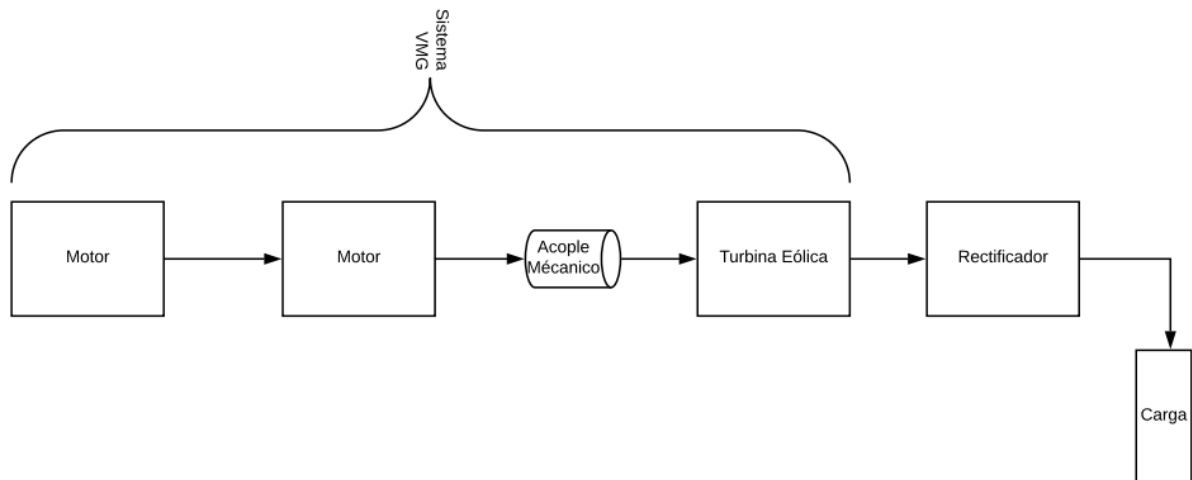


Figura 6 Diagrama de Bloques Inicial del Sistema.

Este diagrama consta de un acople entre un variador de velocidad, un motor y un generador eólico, como se muestra en la figura 6, el cual tiene conectado a su salida un puente rectificador de diodos. A continuación, se explicarán los bloques por separado:

- El variador usado es el Micromaster 440 de la marca Siemens. El variador tiene como entrada la línea trifásica, 200-240 V entre 47-63 Hz, con un factor de potencia de 95% y una eficiencia entre 96-98%, la máxima frecuencia de salida es de 650 Hz para el control de velocidad, capacidad de sobrecarga del 150% de la corriente nominal durante 60 segundos cada 5 minutos para torque constante.
- El motor de corriente alterna trifásico y asíncrono Tipo 1LAY 080-6YC60, Potencia 0,6 Hp, 0,45 kW, Corriente nominal 2,40 A, 220 V, eficiencia 63% Factor de Potencia 0,82, Velocidad Nominal 1080 RPM y Torque Nominal 3,96 Nm.
- Un acople flexible, el cual fue implementado en el trabajo de grado de Maestría de Antonio Ávila [6] donde dice exactamente:” El motor se ensambla al generador con un acople flexible para evitar vibraciones; se fija el motor y el aerogenerador a una base que sostiene a los dos, como se observa en la figura 26, donde 1 es el motor, 2 es el acople mecánico flexible y 3 el aerogenerador. El acople es de cruceta en hierro de la compañía ACOPLES Ltda., referencia L90. Se utiliza para transmisión de fuerza en montajes industriales (...). El acople alivia la carga de arranque y compensa las variaciones de horizontabilidad, su empaque de caucho presenta resistencia y aminora ruidos. Para acoplar el motor se utilizó un orificio roscado de 5/8 de pulgada con cuña y para unir el aerogenerador se utilizó un orificio roscado de 5/8 de pulgada rosca fina.”



Figura 7: Acople de Cruceta. Tomado de [6]

- Un aerogenerador Air X 400, el cual tiene las siguientes especificaciones:

Rotor Diameter:	46 inches (1.15m)
Weight:	13 lbs (5.85kg) (Shipping: 27"x15"x9" (686x38x228mm) / 17 lbs (7.7kg))
Mount:	1.5" schedule 40 pipe (1.9" OD, 48 mm)
Start-up wind speed:	7 mph (3.13 m/s)
Voltage:	12 and 24 VDC (36 and 48 VDC available soon)
Rated Power:	400 watts at 28mph (12.5m/s)
Controller:	Microprocessor-based smart internal regulator with Peak Power Tracking
Blades:	Carbon Fiber Composite
Body:	Cast aluminum (Air-X Marine is powder coated for corrosion protection)
Energy Production:	38 kWh/mo @12mph (5.4m/s)
Warranty:	3 Year Limited Warranty
Survival Wind speed	110 mph (49.2 m/s)
Over-speed Protection:	Electronic torque control
Battery Bank Minimum	100 amp hours @ 12V, 50 amp hours @ 24V

Figura 8 Especificaciones de la Turbina. Tomado del manual del Air X 400.

Y el cual tiene el siguiente rendimiento:

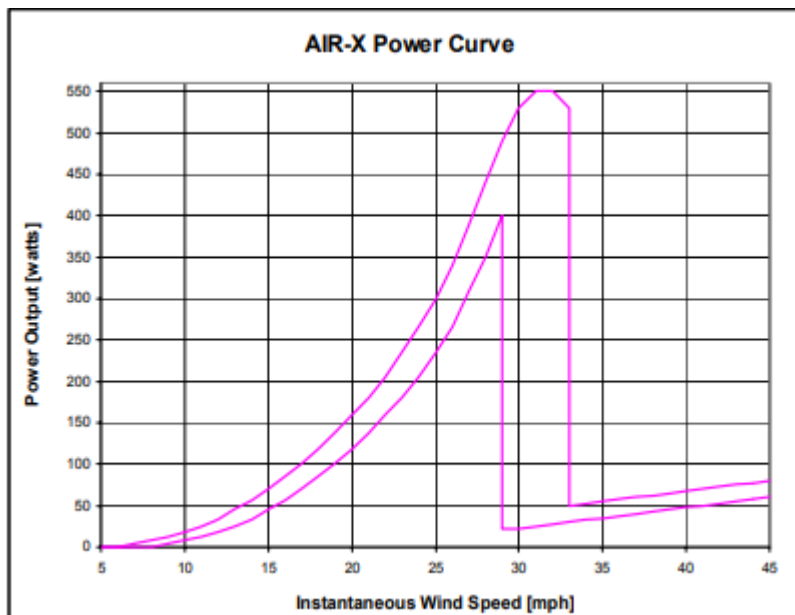


Figura 9 Rendimiento de la Turbina Tomada de: Manual del Air X 400.

El acople entre el motor y la turbina se puede observar en la siguiente figura:

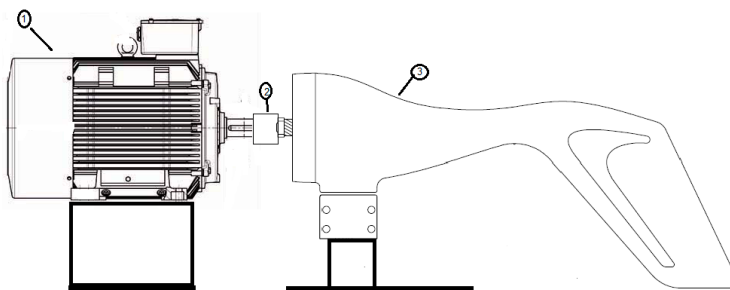


Figura 10: Acople del motor con el generador. Tomado de [6].

Una vez leídos y entendidos los manuales de los equipos con los cuales se iba a trabajar, se procedió a encontrar la función de transferencia en malla abierta del sistema cumpliendo el primer objetivo específico, para ello comunicamos el variador con un computador.

#### 4.2 Comunicación Computador-Micromaster 440.

Para obtener la caracterización de la turbina y como primera tarea se comunicó el variador de velocidad Micromaster 440 con un computador. Para ello se descargó el software “Starter” el cual es gratuito en la página de Siemens y se realizó una conexión con los pines 29 y 30 del variador y un módulo conversor “USB a RS485” como se observa en la siguiente figura:

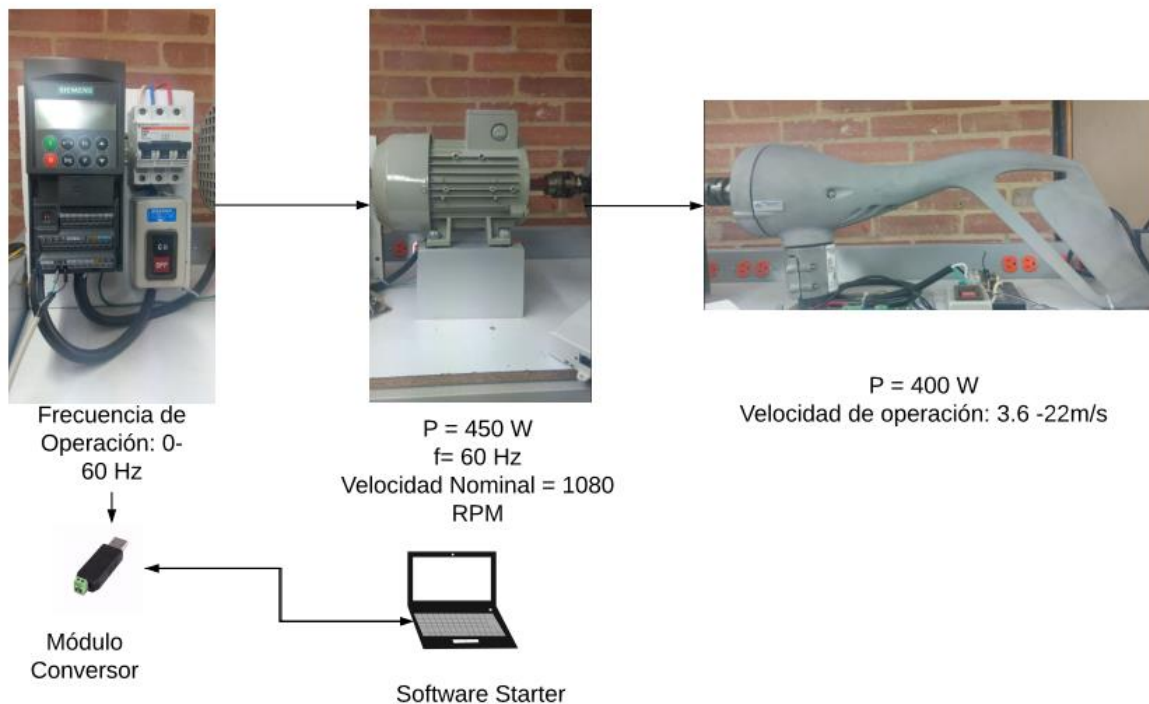


Figura 11: Tipos de Comunicación Serial con el Micromaster 440 y el módulo conversor RS485.

Para realizar la comunicación Software Starter y un computador, referirse al anexo 9.

Una vez conectado el Micromaster 440 con el computador se configuró el variador de velocidad con los parámetros de la tabla 4.1 para obtener la constante del motor, se obtuvieron los resultados de la Figura 12 y 13:

PROGRAMA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD MICROMASTER 440		
PARAMETRO	DESCRIPCION	VALOR
P0003	Nivel de acceso de usuario	2(nivel extendido)
P0010	Guía básica programada	1
P0100	Frecuencia del variador	2 (norteamericana)
P0300	Tipo de motor	1 (asincrónico)
P0304	Tensión nominal del motor	220 Voltios A.C.
P0305	Corriente Nominal del Motor	2,4 A
P0307	Potencia Nominal del Motor	0,45 Kilovatios (0,6 Hp)
P0308	Factor de Potencia	0,82
P0310	Frecuencia Nominal del Motor	60 Hz
P0311	Velocidad nominal del motor	1080 RPM
P0700	Fuente de ordenes	5 (USS on COM link )
P1000	Selección de frecuencia	5 (Uss on COM link)
P1080	Frecuencia Mínima de trabajo	5 Hz
P1082	Frecuencia Máxima de Trabajo	100 Hz
P1120	Tiempo de aceleración	10 segundos
P1121	Tiempo de desaceleración	10 segundos
P1300	Modo de regulación de velocidad	0 (lineal)
P3900	Carga de Parámetros	1

Tabla 4.1: Programación básica del Variador de velocidad

\*Donde P0700 y P1000 puede tener el comando 2 para que se pueda operar desde el BOP (Basic Operation Panel).

Una vez configurado el variador de velocidad, con una carga de  $10 \Omega$  y cambiando la velocidad del motor mediante el variador, se procedió a obtener la función de transferencia en malla abierta del sistema para ello se necesitaban las constantes de voltaje y corriente, las cuales son iguales numéricamente.

### 4.3 Resultados del Sistema en Malla Abierta

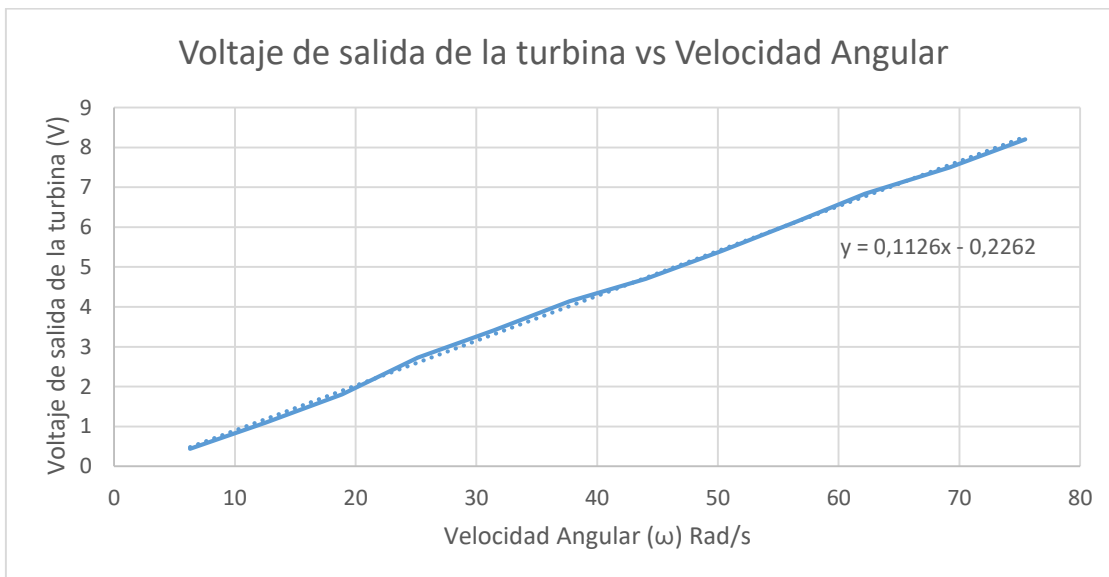


Figura 12 Voltaje de Salida vs  $\omega$  [rad/s].

Dada la ecuación  $V = kt \omega$  (4.1).  $V$  es voltaje,  $kt$  la constante de velocidad del motor.

La Figura 12 demuestra la relación lineal que se espera entre el voltaje de salida del generador y la velocidad angular del motor. Con una pendiente dada por la constante del motor  $kt = 0,1123$ .

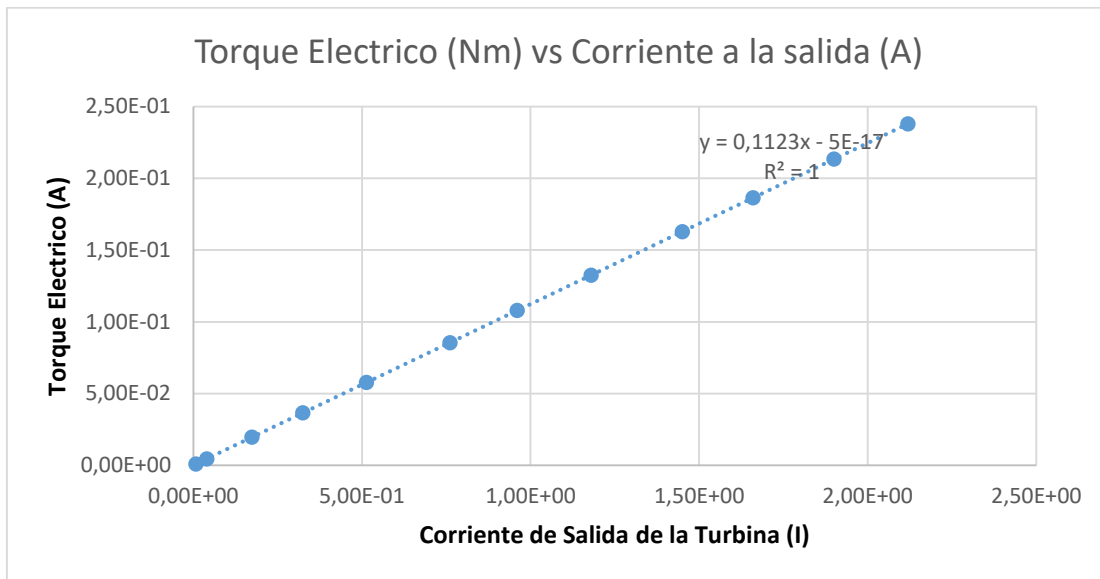


Figura 13 Torque Eléctrico [N·m] vs Corriente de Salida [A]

Dada la ecuación  $\tau = ki I$  (4.2)  $\tau$  es el torque del motor [Nm], e  $I$  la corriente en amperios y la  $ki$  la constante de torque del motor.

La Figura 13 muestra la relación lineal esperada entre el torque eléctrico del motor y la corriente de salida dl generador.

Como se observó en las Figura 12 y 13 las constantes  $kt$  y  $ki$  son iguales numéricamente demostrando la correcta caracterización del generador de la turbina eólica.

#### 4.4 Diagrama de bloques a diseñar.

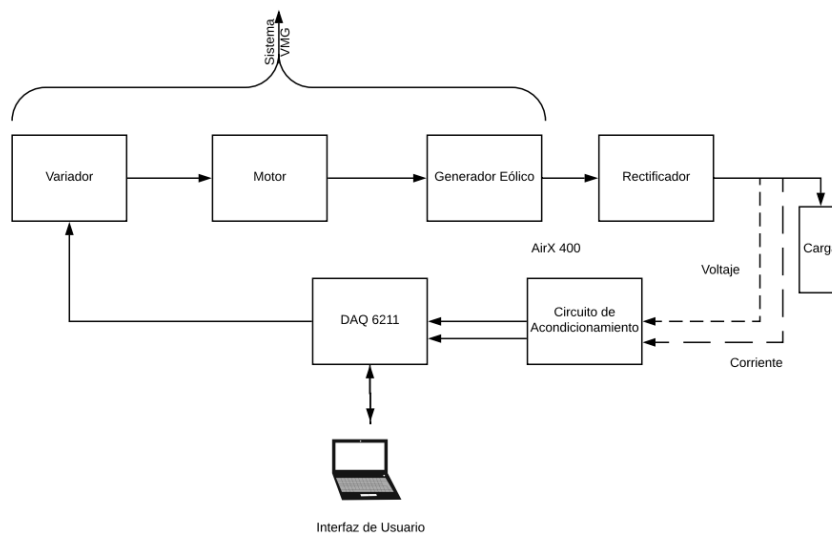


Figura 14 Diagrama de Bloques a realizar del Trabajo de Grado. Realizada por Autores.

Una vez teniendo la función de transferencia en malla abierta, se procedió a leer el valor de corriente y voltaje a la salida de la turbina para poder procesarlos debidamente. Se seleccionó un DAQ 6211 de National Instruments el cual adquiere los valores de voltaje y corriente y por medio de Labview se diseñó el control automático que cambia la velocidad del motor dependiendo de la carga que tenga el generador y el viento y el pitch que seleccione el usuario. Para no causar daños al momento de la lectura de datos, se diseñó un circuito de acondicionamiento, los bloques del sistema a diseñar se observan en la figura 14.

#### 4.5 Adquisición de datos de Voltaje Y Corriente a la Salida

Para la medida de voltaje se diseñó un divisor resistivo y para la medición de corriente se utilizó el sensor de corriente LA 55-P.

##### 4.5.1 Medida de Voltaje

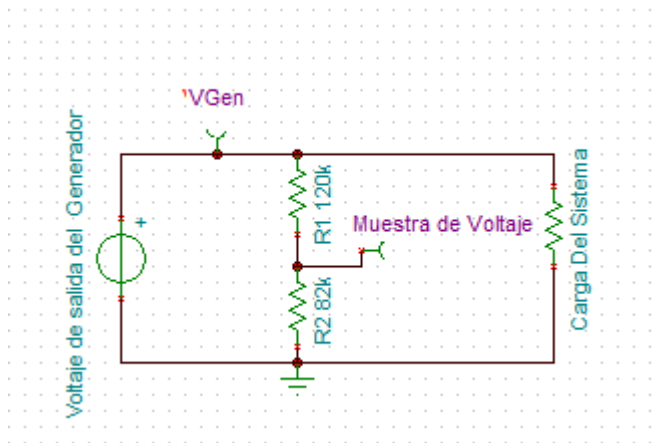


Figura 15 Medición de Voltaje. Realización en Software Tina Instruments por autores

Donde la muestra de voltaje está dada por la ecuación:

$$Muestra\ de\ Voltaje = V_{gen} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_{gen}(82k)}{82k + 120k} = 0,4059 V_{gen}$$

Se escogieron resistencias de precisión para que la tolerancia no sea mayor al 1% para una medición con mayor precisión y el valor de las resistencias fue dado para que la muestra de voltaje no supere 10 V, el cual es el máximo valor que se le puede aplicar a el DAQ 6211. El máximo valor que puede entregar el motor son 24V, para el caso particular que  $V_{gen} = 24V$ , el DAQ leerá 9,74 V.

##### 4.5.2 Medida de Corriente

Para la muestra de corriente, se utilizó el sensor LA 55-P como se dijo anteriormente. El sensor mide corriente DC, AC, pulsada ..., contiene un aislamiento galvánico entre el circuito primario (alta potencia) y el circuito secundario (circuito electrónico). El sensor esta compensado y es un transductor de corriente usando el efecto Hall.

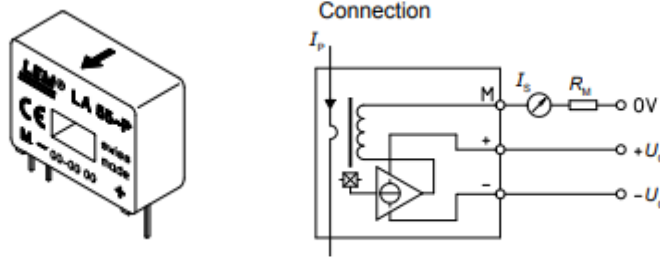


Figura 16 Conexión del LA 55-P. Imagen tomada del Datasheet del componente

Dado que la máxima corriente que pasará por el primario del sensor es 33 amperios (400 Vatios / 12 Voltios). El máximo valor de corriente por el secundario del sensor será 16,5 m amperios.

Dado que la salida del sensor es en Voltaje que cumple  $V_{sensor} = I_s * R_m$  para que el voltaje no fuera mayor a 2.5 V:

$$R_m = \frac{\text{Voltaje Max Sensor}}{I_s} = \frac{2,5 V}{16,5m A} = 151 \Omega$$

Y por limitaciones de proveedores se seleccionó una resistencia de sensado  $R_m$  de valor 140  $\Omega$ . (Observe la figura 16).

#### 4.6 Filtro Anti alias.

Dado que el voltaje y corriente tiene un rizado de un valor máximo de 1 voltio pico a pico con una frecuencia máxima de un 1k Hz y el DAQ es un sistema digital que cuenta con un ADC de 16 bits y 250k Samples por segundo, se seleccionó una frecuencia de muestreo de 10 kHz.

Dada la ecuación:

$$N = \frac{RD}{6 \log_2\left(\frac{f_s}{2BW}\right)} = \frac{60}{6 \log_2\left(\frac{10k}{2 * 100}\right)} = 1,77 \approx 2$$

Donde N es el orden del filtro, RD rango dinámico,  $f_s$  la frecuencia de muestreo del ADC y BW el ancho de banda del filtro.

Se diseñó un filtro anti alias de ancho de banda de 100 Hz (100 décadas menor a la frecuencia de muestreo) de segundo orden para tener un rango dinámico de 60 dB, topología Butterworth, con el propósito de evitar el solapamiento de las señales que se producen en el muestreo. Dado a que la alimentación del sensor de corriente es  $\pm 15$  V, la alimentación de filtro se definió igualmente, se seleccionó el Amplificador Operacional TL072 debido a que es de bajo ruido ( $43nV/\sqrt{Hz}$  a 10 Hz) y es sencillo de conseguir dentro del mercado colombiano.



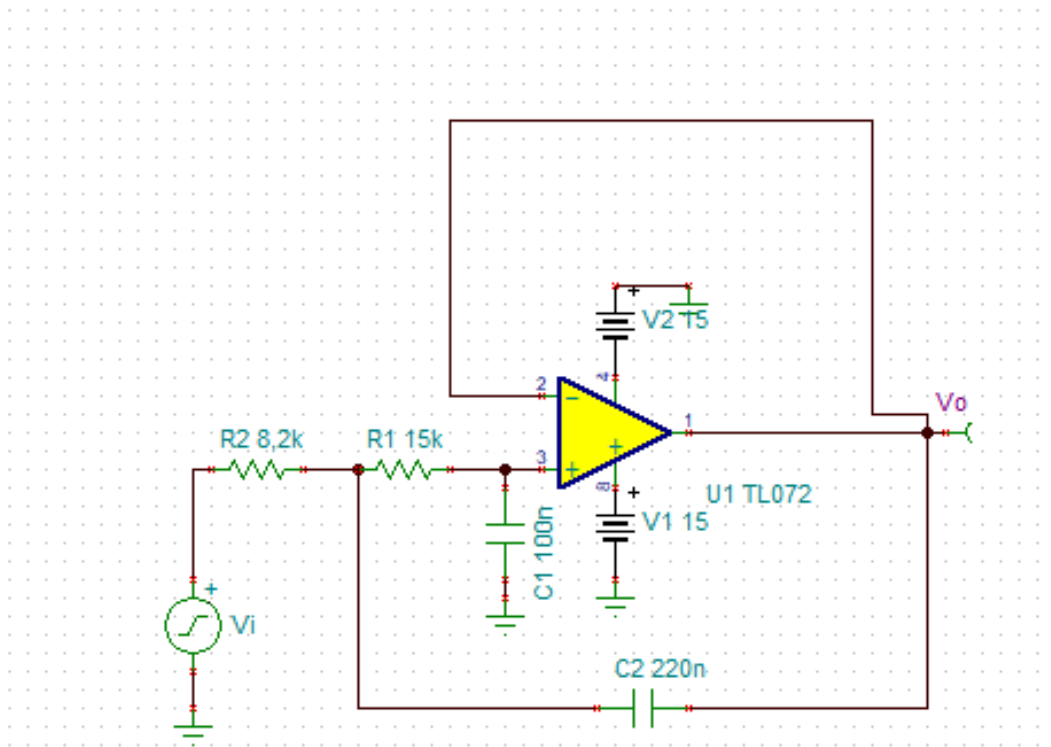


Figura 17 Filtro Anti alias – Realización Autores. Software: Tina Instruments.

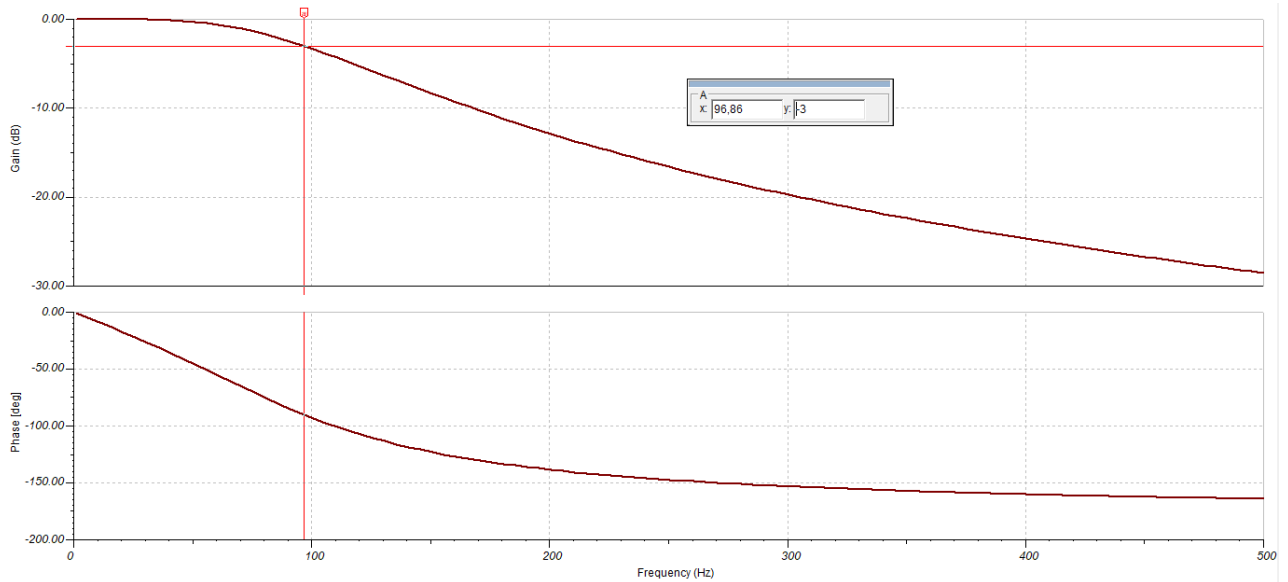


Figura 18 Bode filtro anti alias. Realizada por autores. Software: Tina Instruments.

Se observa entonces que a la frecuencia deseada (100Hz), la magnitud del diagrama de Bode cayó -3dB por lo que el diseño funciona correctamente. Dada esa frecuencia de corte, el filtro bloqueará las copias que genera el muestreo.

Una vez diseñado el circuito de acoplamiento de las señales, se procedió a leer los datos (Voltaje y corriente a la salida de la turbina) para poder visualizarlos y poder trabajar con ellos.

#### 4.7 Lectura de los Datos y su procesamiento.

Como se puede observar en la Figura 14 para la lectura de datos y su procesamiento se utilizó el DAQ 6211, fue conveniente utilizar el Software Labview para el procesamiento de datos y permitió la creación de una interfaz de usuario, el cual permite que el sistema sea mucho más fácil de utilizar.

##### 4.7.1 Utilización de Labview.

Como se observa en la Figura 19, el sistema mide voltaje y corriente de la carga, con el fin de obtener el valor de la resistencia de carga, y su potencia. Dependiendo de la velocidad del viento, el pitch y de resistencia obtenida, el generador girará a una velocidad que se selecciona en la tabla generada por medio del modelo de simulación, la generación de esta se explicará en el capítulo 4.10. Según la figura 21, dependiendo de la velocidad que se quiera, el DAQ tomará la decisión de mandar un voltaje DC tal que el Micromaster trabaje a la velocidad deseada. Su programación se explicará a continuación.

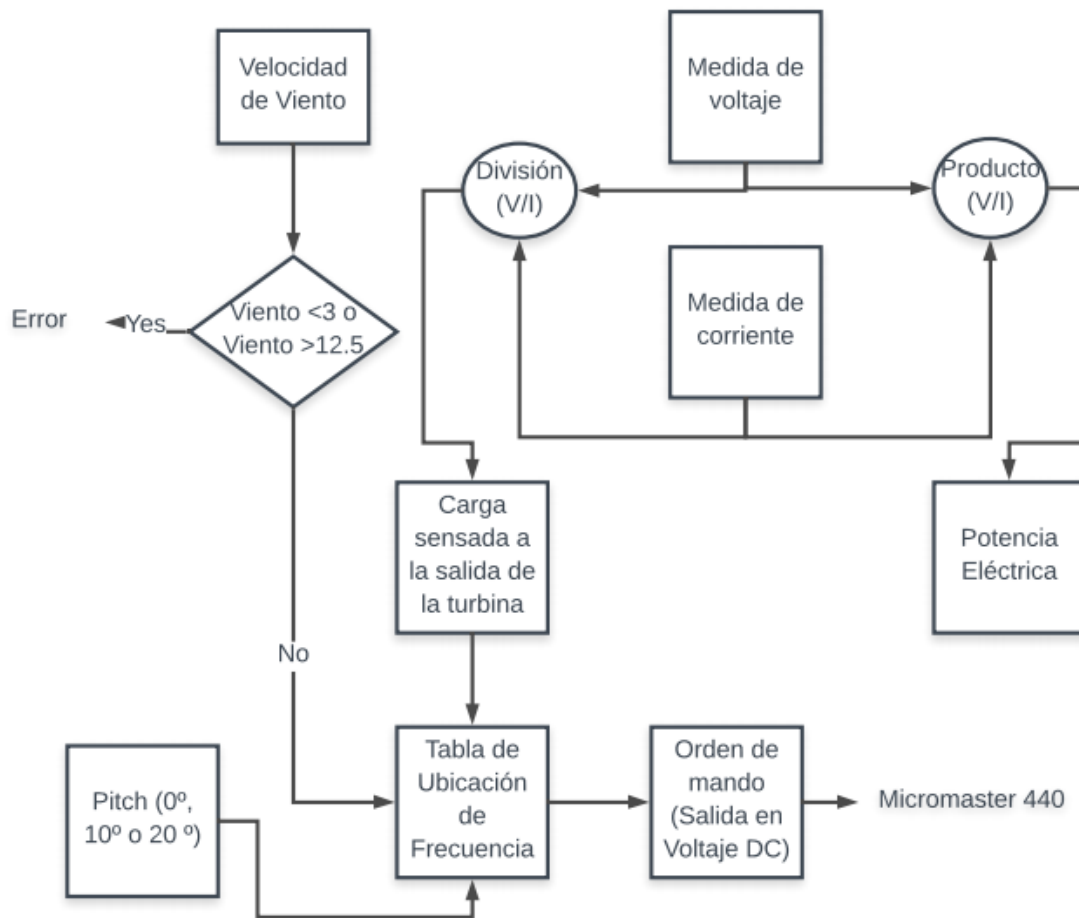


Figura 19 Algoritmo de control de velocidad de giro implementado en Labview.

##### 4.7.2 Control del Micromaster 440.

Debido a que se desea generar un sistema de control para que el variador tenga una relación directa con la carga, con un algoritmo realizado en Labview dado y gracias a que el DAQ tiene una salida de voltaje

analógica, se configuró el variador de velocidad de manera que a una entrada analógica tenga una velocidad respectiva.

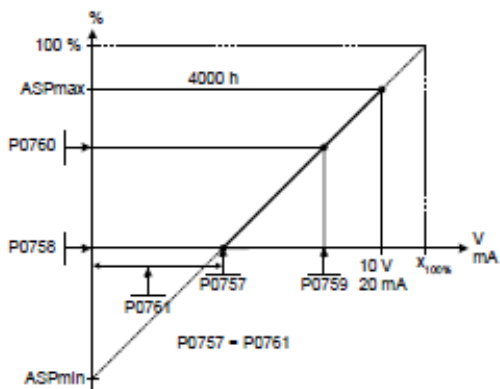


Figura 20 Parámetros y comportamiento del variador con respecto a una entrada analógica.

Como se observa en la figura 20 el comportamiento es lineal, es decir, a mayor voltaje más velocidad tendrá el motor, en el eje Y se tiene el porcentaje del parámetro P2000, el cual es frecuencia y el eje X es el voltaje de entrada, con una respectiva “Deadband”.

Parámetro	Descripción	Valor
P1000	Selección del Setpoint de frecuencia	[2]Analog Setpoint
P0756	Tipo del ADC	[0] Unipolar voltage input(0 to +10 V)
P2000	Frecuencia de Referencia	100 Hz
P0757	Valor x1 del ADC [V]	2 V
P0758	Valor Y1 del ADC	10 %
P0759	Valor x2 del ADC [V]	7.5 V
P0760	Valor y2 del ADC	100 %
P0761	“Deadband” del ADC	2 V
P0762	Tiempo de Delay para tomar una acción	10 ms
P0700	Fuente de comando	[1]BOP

Tabla 4.2. Configuración del Variador para operar con el ADC del sistema.

Cabe resaltar que las especificaciones del motor ya fueron programadas anteriormente (tabla 4.1) y que el sistema toma decisiones cada 10ms.

#### 4.8 Resultados de la configuración.

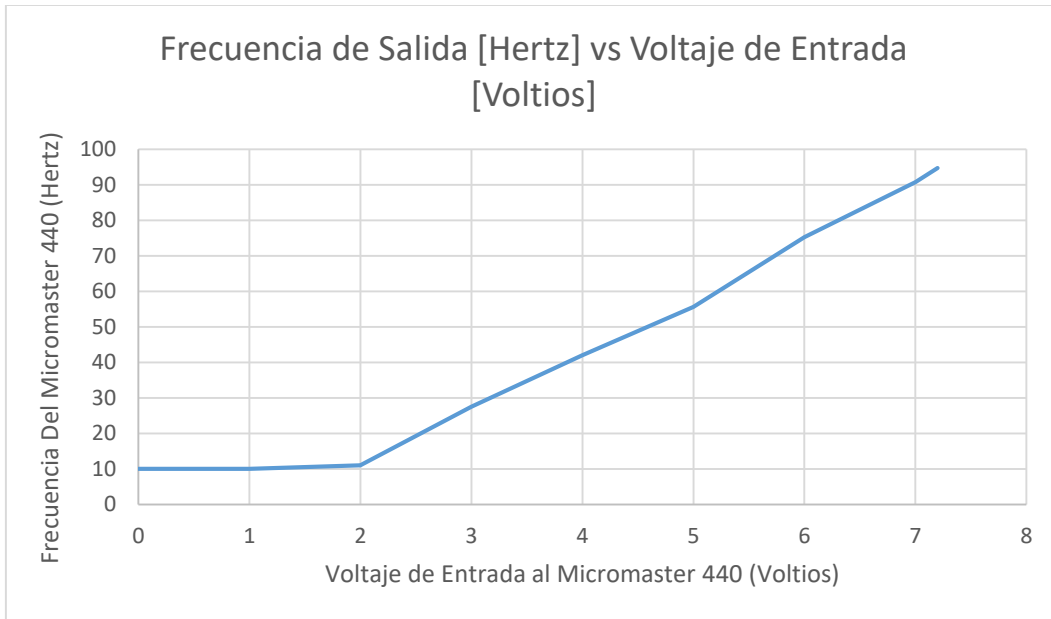


Figura 21 Frecuencia de salida del Variador vs Voltaje de entrada.

Donde se observa que la figura 21 tiene un comportamiento similar a la figura 20, lo cual indica que la configuración del Variador de velocidad fue correcta.

Gracias a la configuración del Variador como se mostró anteriormente se pudo obtener el número de polos del generador de la turbina eólica (el cual es un generador sincrónico de imanes permanentes dado por las especificaciones del fabricante), donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Voltaje	Frecuencia	RPM	Numero de Polos
1,3	6,34	128,24	6
2	9,27	185,58	6
2,7	12,44	249,07	6
3,4	15,46	309,12	6
3,9	18	360,66	6
4,6	21,11	422,77	6
5,3	24,15	483,04	6
5,9	26,61	532,36	6
11,025	49,4	987,87	6

Para hallar el número de polos se utilizó la ecuación:

$$n = 120 \frac{fe}{P} \quad \rightarrow \quad fe = \frac{nP}{120}$$

Donde n es la velocidad en RPM, obtenidas en el software Starter por medio del comando R22, fe es la frecuencia del sistema y P el número de polos.

## 4.9 Simulación del Modelo del Sistema.

Una vez caracterizado el generador obteniendo la constante de voltaje y el número de polos del generador se procedió a crear un modelo de la turbina en el software Matlab-Simulink para obtener la función de transferencia Potencia vs Resistencia de salida.

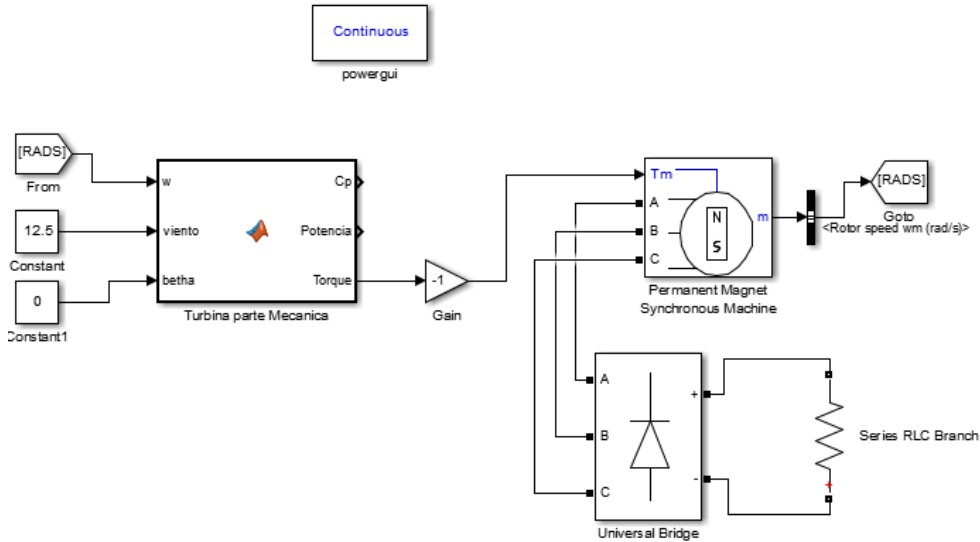


Figura 22 Simulación del Modelo de la Turbina Eólica. Realizada por Autores.

El Bloque “Wind Turbine” está dado por el código:

```
function [Cp,Potencia,Torque]= fcn(w,viento,betha)

Cp1 = 0;
c1 = 0.5176;
c2 = 116;
c3 = 0.4;
c4 = 5;
c5 = 21;
c6 = 0.0068;
lamna = 0.585*w/(viento);
A = 1/(lamna+0.08*betha)-0.035/(betha^3+1);
lamnai = 1/A;
Cp = c1*(c2/lamnai-c3*betha-c4)*exp(-c5/lamnai)+c6*lamna;

if Cp < 0
    Potencia = Cp1*(viento^3)*(1/2)*(1.225)*(1.07);
else Potencia = Cp*(viento^3)*(1/2)*(1.225)*(1.07^2*pi/4)*0.69;
end
Torque = -Potencia/w;

end
```

Figura 23 Bloque “Wind Turbine”. Realizado por Autores.

El torque debe ser negativo para que el generador de imanes permanentes del modelo funcione como generador.

Se buscó generar la relación entre potencia vs resistencia de salida de la turbina y se obtuvo el siguiente comportamiento:

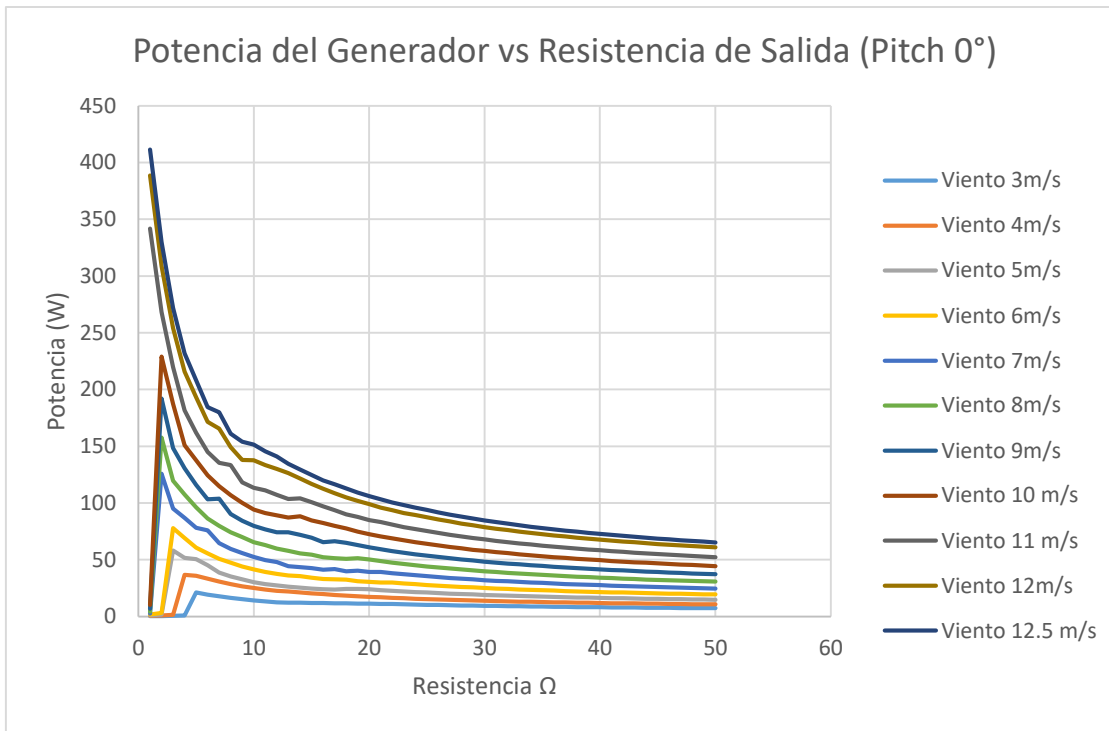


Figura 24 Potencia del Generador vs Resistencia de Salida.

Como se observa en la figura 24, la gráfica tiene un comportamiento no lineal.

Tomando la máxima potencia que la turbina genera a un determinado viento para un pitch de 0° se construyó la siguiente gráfica:

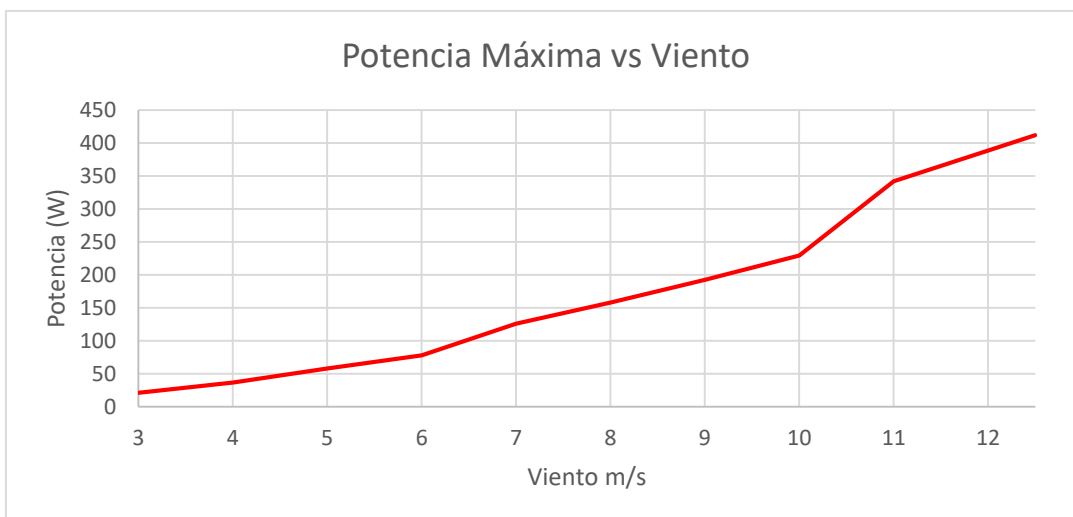


Figura 25 Potencia (W) vs Viento m/s

Se puede observar que la Figura 24 tiene un comportamiento similar a la gráfica del fabricante Figura 9. No se puede simular la velocidad del viento a partir de 12,5m/s debido a que la turbina en la realidad tiene un frenado de protección a partir del valor máximo de potencia, dicha información se puede observar en el manual del fabricante.

#### 4.10 Creación de la información de mando.

Como se observa en la Figura 24 para cada resistencia corresponde un punto de potencia, ya sea alta o baja y para cada valor de potencia existe un valor al que el aerogenerador girará, conociendo la resistencia y la velocidad del viento es posible determinar la velocidad angular de giro y por consiguiente la potencia necesaria para dicha carga por lo tanto se obtuvo la siguiente gráfica:

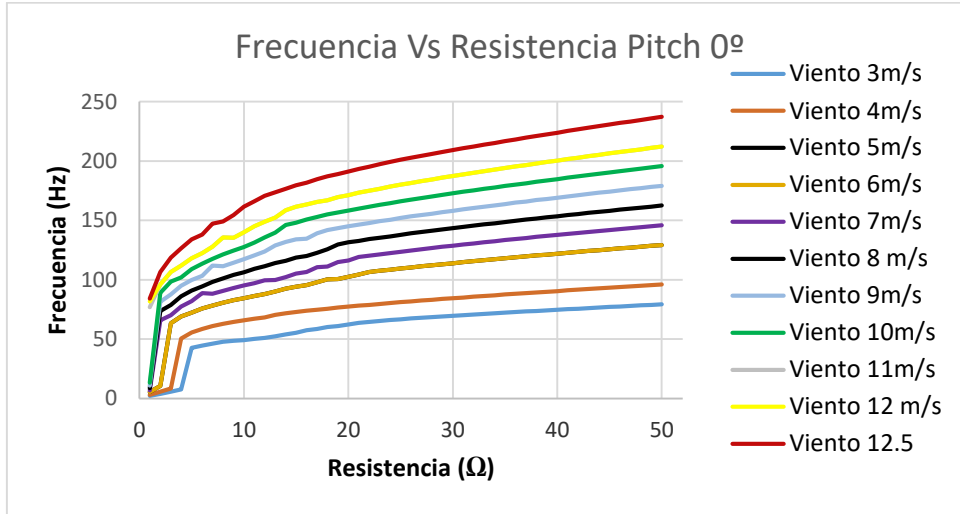


Figura 26 Frecuencia (Hz) vs Resistencia de Salida del Generador(Ω)

En la Figura 26 se observa que teóricamente a resistencias grandes hay frecuencias de más de 100 Hz aun así el aerogenerador Air X 400 tiene como RPM máxima 1800 rpm lo que corresponde a una frecuencia de 100 Hz, este valor fue limitado con el variador de velocidad, dado el parámetro P1082 (Frecuencia Máxima de Trabajo).

Con la información brindada en la Figura 26 se generó una tabla donde para una determinada velocidad del viento, *pitch* y resistencia de salida de la turbina se tendrá un valor de frecuencia.

El usuario tiene dos grados de libertad, él puede escoger la velocidad de viento y el pitch en la cual desea trabajar mediante una interfaz de usuario que se explicará a continuación, y dependiendo de la carga en la salida que lea el algoritmo, este buscará en la tabla que se generó, una frecuencia que es en la que debe girar el motor acoplado a la turbina para así tener un comportamiento cercano a la realidad.

## 4.11 Interfaz de Usuario.

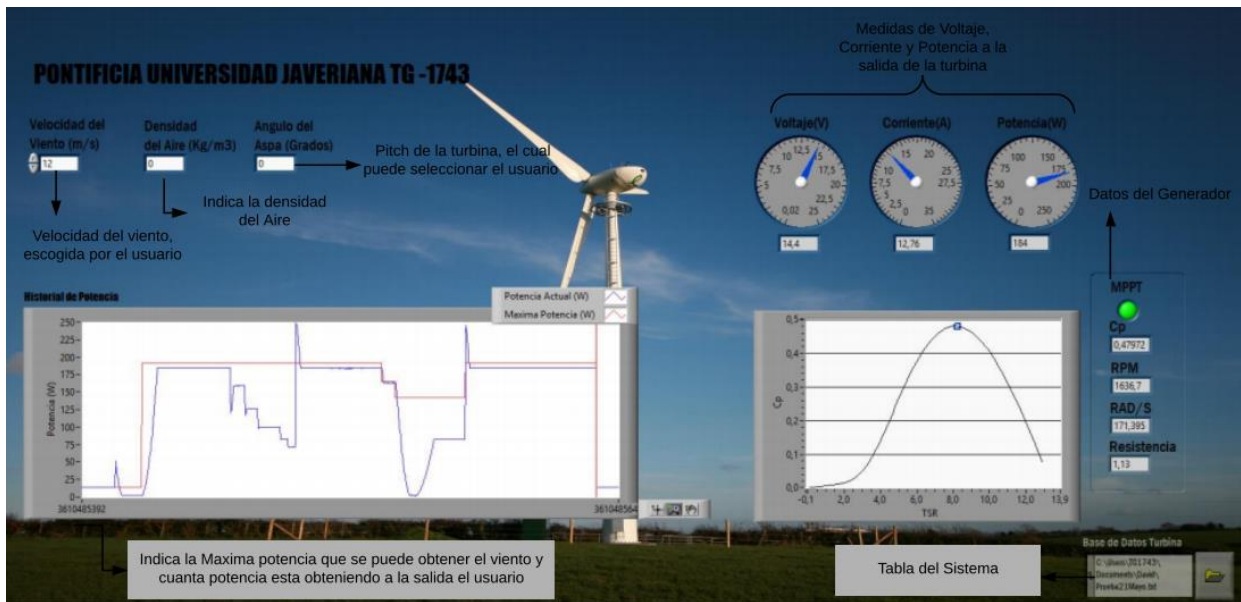


Figura 27 Interfaz de Usuario realizada por autores.

El manual de uso se encuentra en el anexo C.

Como se puede observar en la Figura 27, el usuario puede seleccionar la velocidad del viento y en Pitch con la que desea trabajar, la interfaz le brindará información de voltaje, corriente y potencia a la salida de la turbina. Brindará los datos de coeficiente de eficiencia  $C_p$ , una estimación de la velocidad del generador en RPM y en rad/s y la resistencia que el sistema lee a la salida.

En las gráficas se puede observar el historial de potencia donde el usuario sabrá si está utilizando la máxima potencia generada a una determinada velocidad de viento y si el sistema se encuentra en el máximo punto de potencia (MPPT).

## 5 Protocolo de Pruebas

Para evaluar el funcionamiento, se probaron los bloques del sistema a realizar por separado para un fruncimiento correcto de cada uno de ellos (Véase Figura 14). Por lo tanto, se realizaron las siguientes pruebas:

Para el circuito de acondicionamiento:

- Verificación del correcto funcionamiento (Comparación entre datos de voltaje y corriente obtenidos por el sistema y datos medidos mediante instrumentos de laboratorio.)

Parte Software (Algoritmo de Labview):

- Verificación de la correcta lectura de voltaje y corriente de la carga.
- Verificación de la correcta ubicación de la base de datos (A una carga para un viento específico se tenga una velocidad angular correspondiente a un punto de potencia.)
- Sin conectar al variador de velocidad, la salida de voltaje analógico del DAQ.

Una vez realizadas las tareas anteriores, se procedió a conectar el DAQ con el Micromaster 440.



- Se verificó que, a un cambio de carga, se tenga un cambio de voltaje de salida del DAQ y por ende un cambio de velocidad del motor controlado por el variador
- Se verificó que ese cambio correspondiera a un cambio de velocidad correspondiente a la base de datos
- Se comprobó que el sistema tenga el comportamiento de una turbina eólica

## 6 Análisis de Resultados

### 6.1 Curva Potencia vs Resistencia Experimental.

Una vez generada la tabla para una carga específica se tendrá una frecuencia con un límite de entre 10Hz y 100Hz. Utilizando como carga una carga electrónica programable, valga la redundancia, BK Precision 8502 con las siguientes especificaciones 500Voltios, 15Amperios, 300Watts. En modo R-Set, el cual es una Resistencia constante, donde se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 28:

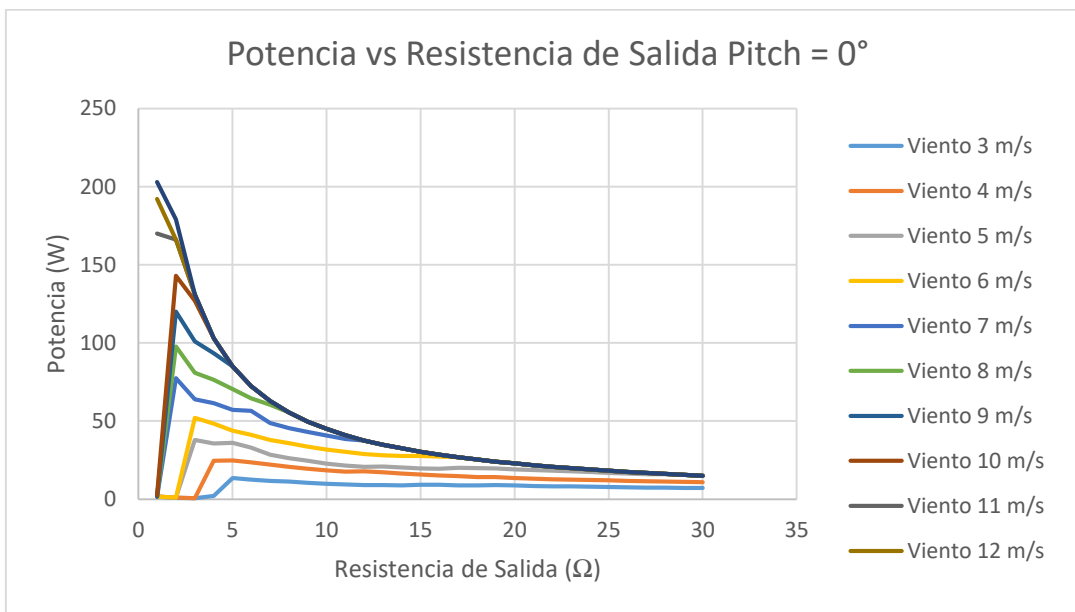


Figura 28 Potencia del Generador vs Resistencia de Salida.

Donde se puede observar que a vientos menores de 10m/s presenta el salto de valores, haciendo la función de potencia vs Resistencia no lineal.

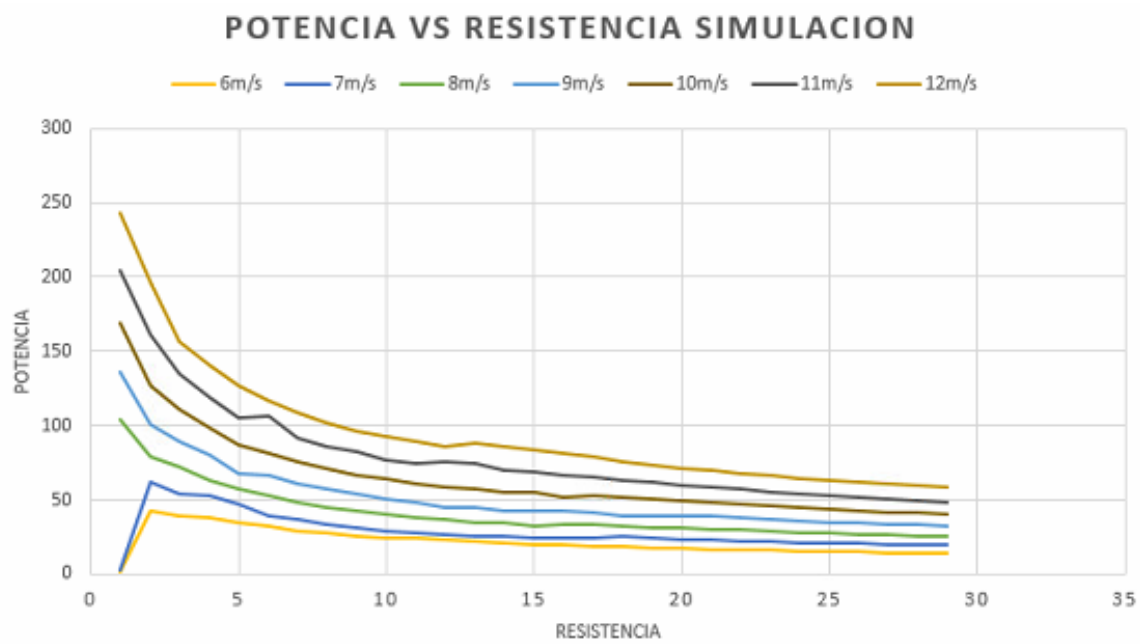


Figura 29. Potencia vs Resistencia en simulación teniendo en cuenta la eficiencia del motor (0,69).

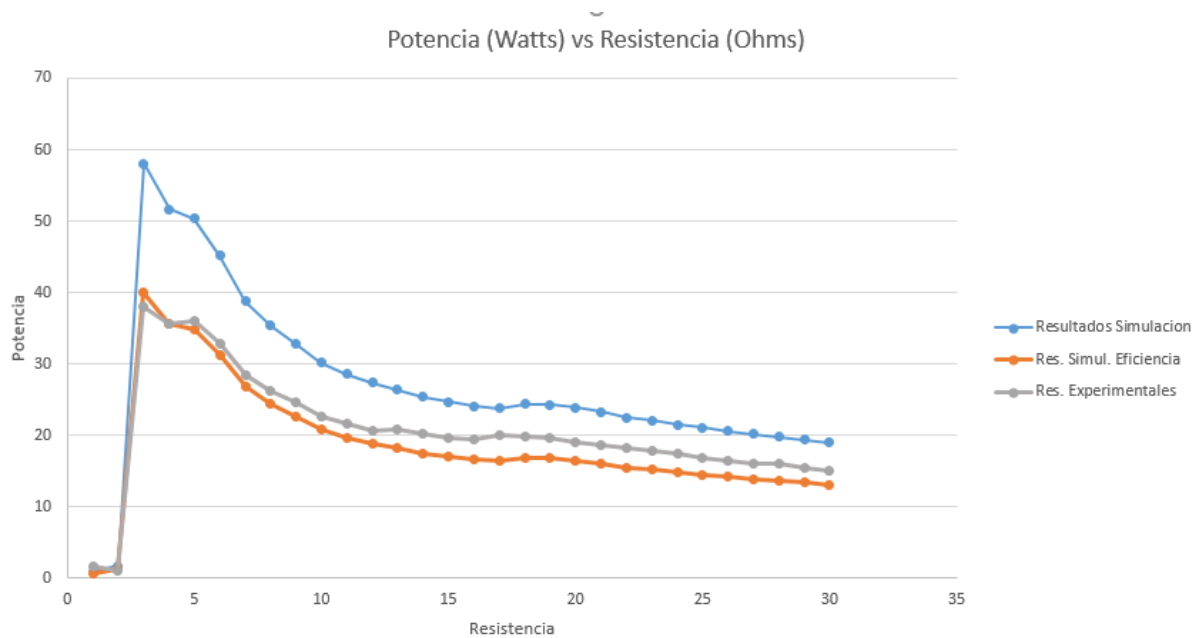


Figura 30. Comparación entre curvas de simulación y experimentales.

En la Figura 30 se observa que se tuvo un comportamiento similar entre los resultados simulados con los experimentales.

Teniendo en cuenta el ángulo de las aspas (pitch) se procede a hacer las siguientes pruebas:

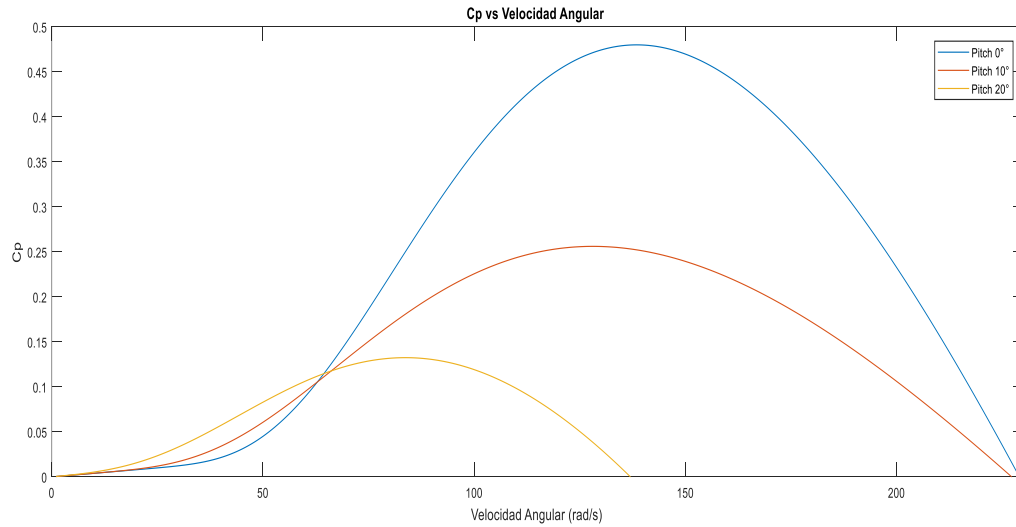


Figura 31 Cp vs Velocidad Angular para diferentes Pitch. Realizada por Autores

En la anterior grafica se observa como para algunas velocidades (diferente TSR) el pitch 10 llega a ser mayor que el pitch 0, este comportamiento se logró en el emulador, con lo cual el emulador tiene otro grado de cumplimiento en su funcionamiento. Teniendo en cuenta esto se realizaron pruebas para observar los resultados Potencia vs Resistencia y su relación con respecto al ángulo de las aspas (Pitch).

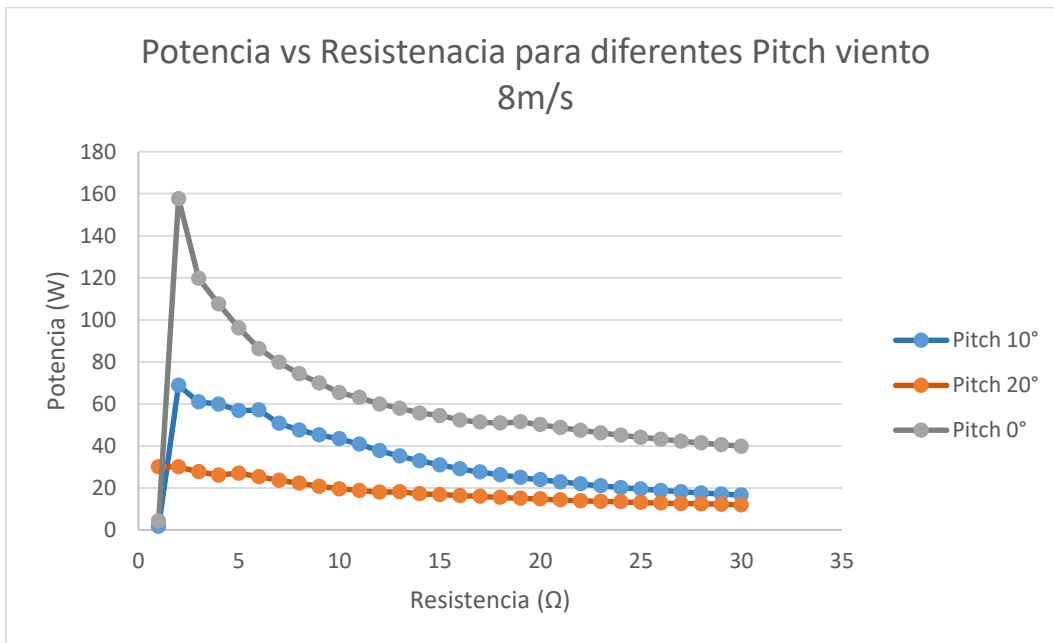


Figura 32 Potencia vs Resistencia experimentales a diferentes Pitch.

Como se observa en la figura 32, con un viento de 8 m/s, a mayor el pitch menor potencia este comportamiento se ve reflejado en la Figura 6.3

### Potencia vs Resistencia para diferentes Pitch viento 8m/s

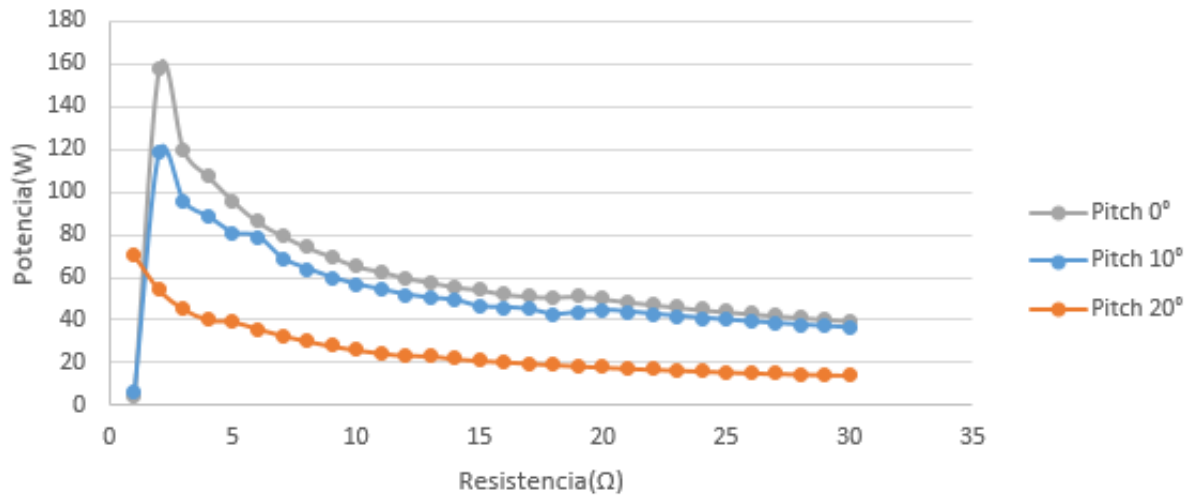


Figura 33 Potencia vs Resistencia simulados a diferente Pitch.

Donde se puede observar que el comportamiento del sistema simulado y experimental (Figura 32 y 33) teniendo en cuenta en pitch para una velocidad de viento de 8m/s, es bastante similar.

#### 6.2 Potencia Máxima vs Velocidad de Viento.

Como se observa en la figura 28 a una respectiva resistencia se presenta la potencia máxima con respecto a un viento, tomando los valores donde se presentó dicha potencia, se generó de la Figura 34 donde se presenta la máxima potencia(W) vs un respectivo viento (m/s).

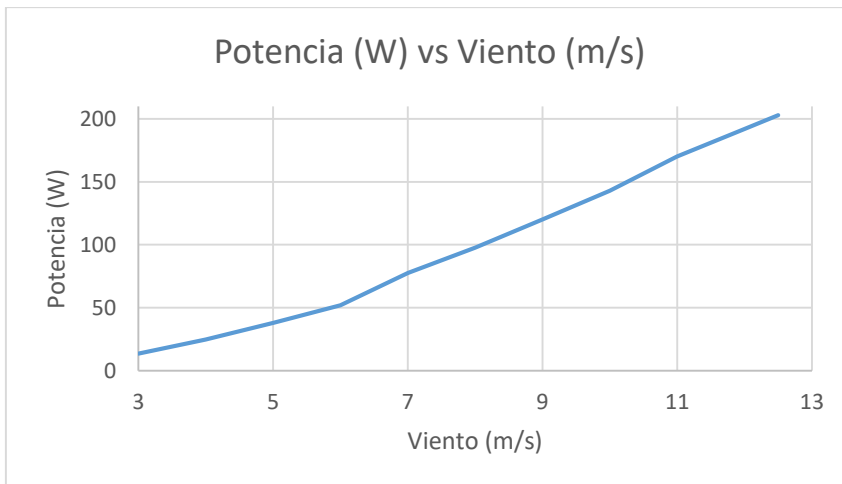


Figura 34 Potencia Máxima (W) vs Viento (m/s).

En la Figura 34, la máxima potencia, obtenida para la velocidad de viento donde según el proveedor la potencia es máxima, es aproximadamente 200W.

Se conoció un reporte técnico [7] de la turbina Air X 400 donde la prueba se realizó en Northeast Wisconsin Technical College (NWTC), aproximadamente a 8 km sur de Boulder, Colorado. Fue instalada a aproximadamente 1850m sobre el nivel del mar. Durante la prueba, la turbina está instalada en una torre de 13.1m. Donde se obtuvo el comportamiento mostrado en la Figura 35:

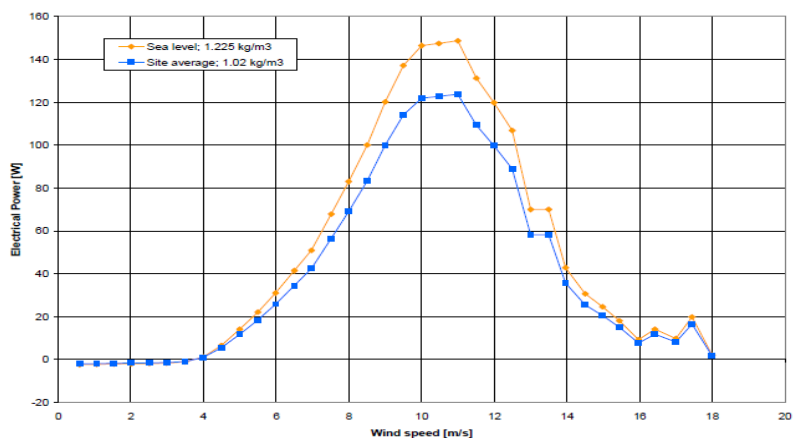


Figura 35 Potencia Eléctrica vs Velocidad del Viento según [7].

Donde la figura 6.5 la densidad de aire del sitio fue de  $1,02 \text{ kg/m}^3$  y el nivel de densidad de aire al nivel del mar ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ).

### 6.3 Comparación con reporte técnico del Air X 400

La comparación se realizó con la gráfica que posee una densidad de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Como se puede observar en la figura 34 la turbina no entrega  $400\text{W}$ , como indica el proveedor, donde en el reporte técnico [7] se comprueba que efectivamente la turbina no entrega más de  $200\text{W}$ . Cabe resaltar que la turbina real posee un sistema de protección a velocidades superiores a  $12,5 \text{ m/s}$  cosa que no se tuvo en cuenta en el emulador debido a esto para el emulador, la Figura 6.2 de Potencia vs Viento no posee una disminución de la potencia después del valor de viento  $10\text{m/s}$ .

Comparando las figuras 34 con la figura 35, los dos sistemas, tanto el real como el simulado comienza a trabajar a una velocidad de viento de aproximadamente  $3\text{m/s}$ , también se obtiene que el máximo punto de potencia es a  $12,5\text{m/s}$ , con un comportamiento similar. Aun así, el emulador eólico entrega más potencia, que el sistema real, dado que la máxima potencia real que entrega es aproximadamente  $150\text{W}$ , la emulación de la turbina puede entregar hasta  $200\text{W}$  lo cual es un error del  $25\%$ .

### Comparación de Comportamientos

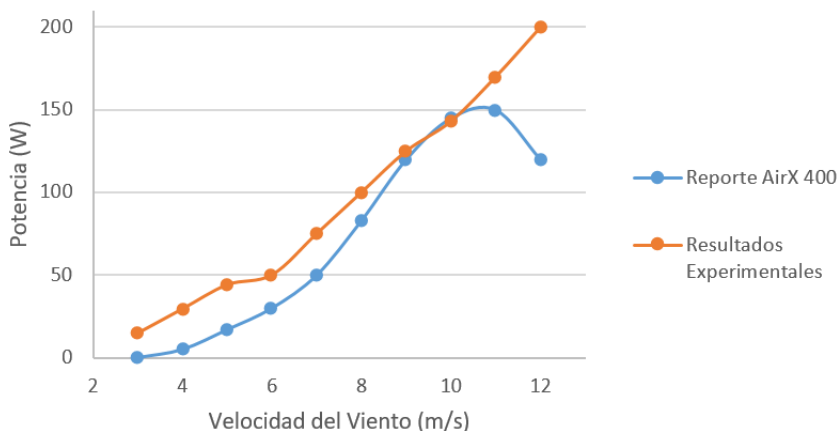


Figura 36 Comparación entre Reporte Técnico y los resultados experimentales.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Recomendaciones

- Se debe tener cuidado en donde se coloca el equipo, dado que esta gira a velocidades altas causando vibraciones, y este se puede llegar a caer si está en lugar alto. En este último caso, el equipo debería ser anclado.
- Si se va a trabajar con el equipo se recomienda ocultar las partes rotativas o tomar 10 minutos de descanso cada hora de uso, debido al constante giro del motor puede provocar mareo al operario del sistema.
- Se recomienda leer el manual adjunto en anexos antes del uso del equipo.
- A mayor potencia habrá mejor resolución en el sistema, es decir, a mayor viento más precisión en los datos

### 7.2 Conclusiones

- Con respecto al objetivo general, no se implementó un sistema embebido dado que no se vio necesario, puesto que el sistema funciona de una manera correcta con el DAQ 6211 de National Instruments
- Dado que el sistema funciona dependiendo del cambio de carga, este puede ser de ayuda para el diseño de fuentes de conmutación en el campo de electrónica de potencia ayudando a la investigación en el campo de energías renovables en ciudades no asequibles a esta fuente de energía y generando conocimiento acerca de la energía eólica.

### 7.3 Oportunidades de mejora

- Dado que se usaron fuentes de potencia regulada de laboratorio para alimentar, lo ideal sería la eliminación de ellas para el fácil transporte del equipo.
- Mejorar la interfaz de usuario, para brindarle mayor manejo en cuanto a personalizar un perfil de viento para sus pruebas.
- 

## 8 Bibliografía

- [1] M.R.Patel. Wind and Solar Power Energy System. New York: Kings Point, First Edition, Chapter 4.
- [2] A.Vidya. Design of Wind Turbine Rotor (With Diagram).” [Online].Available: <http://www.geographynotes.com/energy-management-2/wind-energy/design-of-wind-turbine-rotor-with-diagram-wind-energy-energy-management/4281>
- [3] M.R.Patel. Wind and Solar Power Energy System. New York: Kings Point, First Edition, Chapter 5.
- [4] Hinami and R. Dahiya, “Development of Wind Turbine Emulator for Standlone Wind Energy Conversion System”, *IEEE 6<sup>th</sup> International Conference of Power Systems*, 2016.
- [5] Matlab, Wind Turbine, [Online] Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html>
- [6]A. Ávila, “Diseño de un convertidor estático DC-DC de tipo Buck-Boost Empleado como regulador del Generador Eólico Air X 400”, M.S tesis, Cundinamarca, PUJ, Bogotá, 2013.
- [7] J.Van Dam, M.Meadros, H. Link and P.Migliore, “Power Performance Test Report for the Southwest Wind power AIR-X Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401-3393, Tech. Rep, 2003.

## 9 Anexos

### Anexo A.

Si se desea cambiar la configuración del variador de velocidad se recomienda que se haga desde el BOP (Basic Operator Panel) seleccionando los parámetros observados en la tabla 4.1 del documento, es importante que se escriba bien las especificaciones de motor y se seleccione el parámetro final P3900 = 1 (Carga de datos), se dará cuenta que se cambió la configuración porque en la pantalla del BOP se visualizará “busy”.

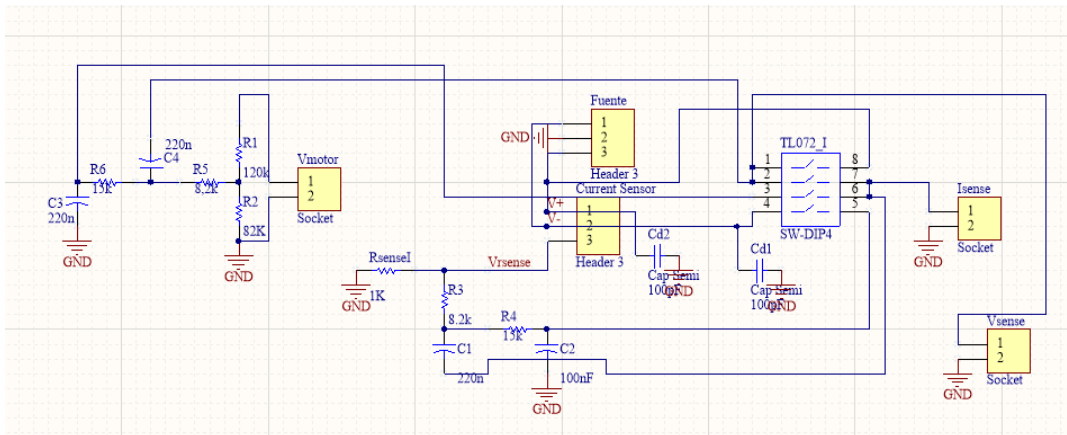
Una vez realizada la función anterior se procederá a hacer la conexión Variador-Convertidor-Computador (como se observa en el capítulo 4.2). Una vez hecha la correcta conexión abra el Starter

Para la conexión con el Starter se recomienda ver el siguiente video: <https://www.youtube.com/watch?v=S3hX2lokiY> y siga los pasos mostrados en el para una correcta comunicación Variador-Computador.

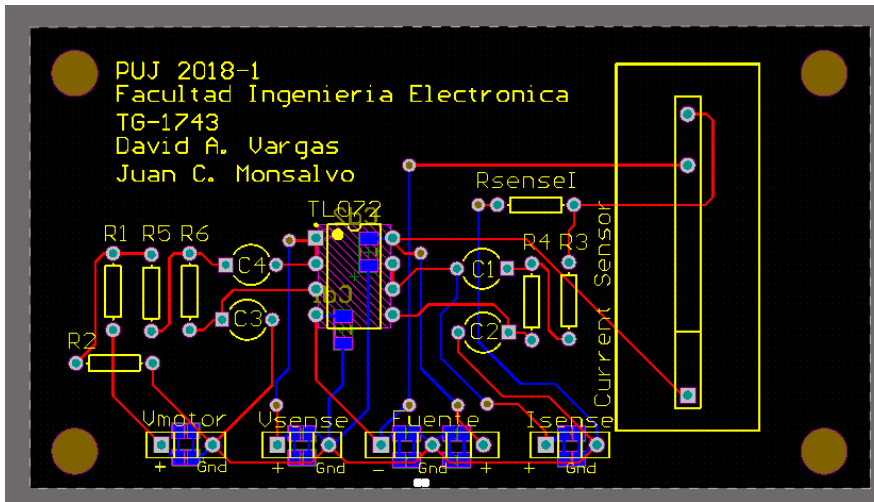
Una vez conectada puede configurar el variador a su gusto desde el Software Starter.

### Anexo B

Circuito de acondicionamiento de la señal:



## Plano Circuito Impreso



### Anexo C.

#### Manual de Conexiones

Antes de utilizar el emulador se recomienda leer el manual, hojas de especificaciones y recomendaciones de las diferentes partes del emulador, recuerde que está trabajando con corriente trifásica y la seguridad es primero, tenga conocimiento de en donde se encuentran los *breakers* del área en donde va a trabajar.

1. Pedir al laboratorio el emulador eólico, el emulador está compuesto por: Un variador Micromaster440 marca Siemens, un motor 1LAY 080-6YC60, una turbina Air X 400, un puente rectificador de diodos, y un circuito de adquisición de datos como se observa en la ilustración 1. Adicional a esto debe tener 3 cables blindados que ayudaran en las conexiones del emulador. También necesitará un DAQ 6211 de National Instruments y un cable para conectar el DAQ al computador y una fuente que entregue  $\pm 15$  V.
2. Descargue el archivo de LabView (Necesitará LabView 2017) y la base de datos del siguiente link <https://www.dropbox.com/sh/j4mow0zuoz3fai3/AABSsJwwekqKaoVhIxI0tMuNa?dl=0>. Asegúrese que la interfaz sea similar a la de la Ilustración 5. A continuación de un *click* en el icono



de la carpeta posterior a esto podrá utilizar la flecha que se ve en la parte superior izquierda de la interfaz

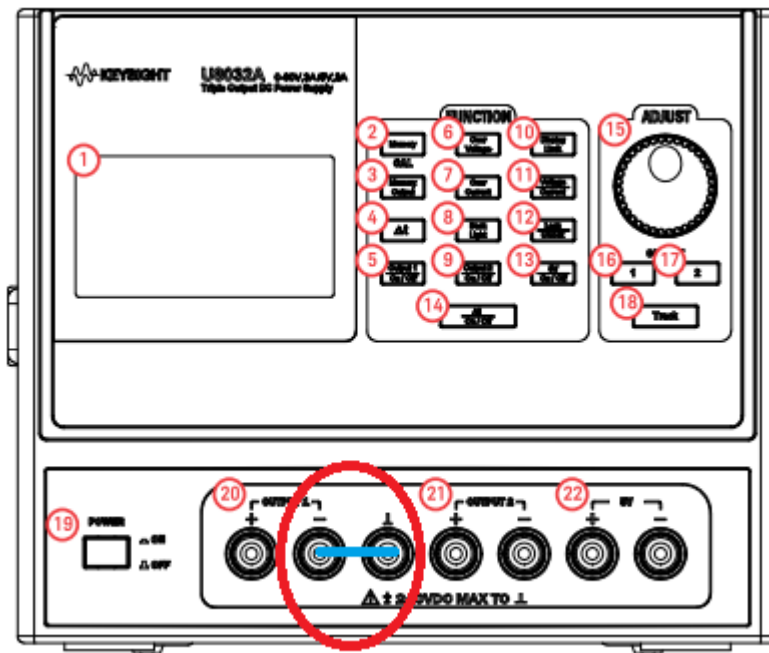


, en este momento podrá cambiar la velocidad del viento y pitch del emulador. Al terminar todas las conexiones el sistema estará listo para emular las condiciones deseadas.

3. Para poder utilizar el variador es necesario conectarlo a una toma trifásica, asegúrese que tenga una asequible, es necesario conectar las 3 fases y además la tierra, si es necesario pida al laboratorio unas borneras que tienen para este propósito. Conecte el variador, vea que los *breakers* (Ilustración 2) estén encendidos y presione el interruptor para estar seguro que el variador está bien conectado.



4. El circuito de adquisición necesita alimentación, por eso se necesita una fuente con  $\pm 15$  V, la conexión de fuentes en el circuito de adquisición es la bornera azul, la fuente de  $-15$  V va al pin izquierdo de la bornera, tierra en el centro y  $+15$  V a la derecha de la bornera
5. La conexión entre el circuito de adquisición y el DAQ es la siguiente:
  - a. El pin 15 del DAQ va al pin + de la bornera I.
  - b. El pin 16 del DAQ va al pin - de la bornera I.
  - c. El pin 17 del DAQ va al pin + de la bornera V.
  - d. El pin 18 del DAQ va al pin - de la bornera V.
6. Las conexiones entre el variador y el DAQ es la siguientes:
  - a. El pin 12 del DAQ va al pin número 3 del variador.
  - b. El pin 14 del DAQ va al pin número 4 del variador.
7. Para conectar la carga y el sistema se adecuo una bornera plástica (Ilustración 4) en la cual puede colocar la carga y asegurarla.
8. Debe colocar una de las tierras de la fuente en corto con la tierra de la lineal, tal como se muestra en la siguiente figura



Este ejemplo se realizó con una fuente regulada Keysight U8031A (Imagen tomada del manual del equipo).

9. Posteriormente se recomienda que se haga una prueba para verificar el comportamiento del emulador, para esto configure en la interfaz de usuario una velocidad de viento de  $3\text{ m/s}$ , un pitch de  $0^\circ$  y coloque una carga de  $10\ \Omega$ , tenga en cuenta que la potencia es aproximadamente  $10\ \text{W}$  con lo cual una resistencia comercial probablemente se quemará (Se recomienda para hacer pruebas tener una carga electrónica programable). El variador debería entonces programar su velocidad automáticamente a aproximadamente  $49.1\ \text{Hz}$ , de no ser así se recomienda revisar el manual (Anexo A) donde se explica cómo configurar y probar el variador.
10. Finalmente podrá utilizar el emulador eólico si la prueba anterior fue exitosa.

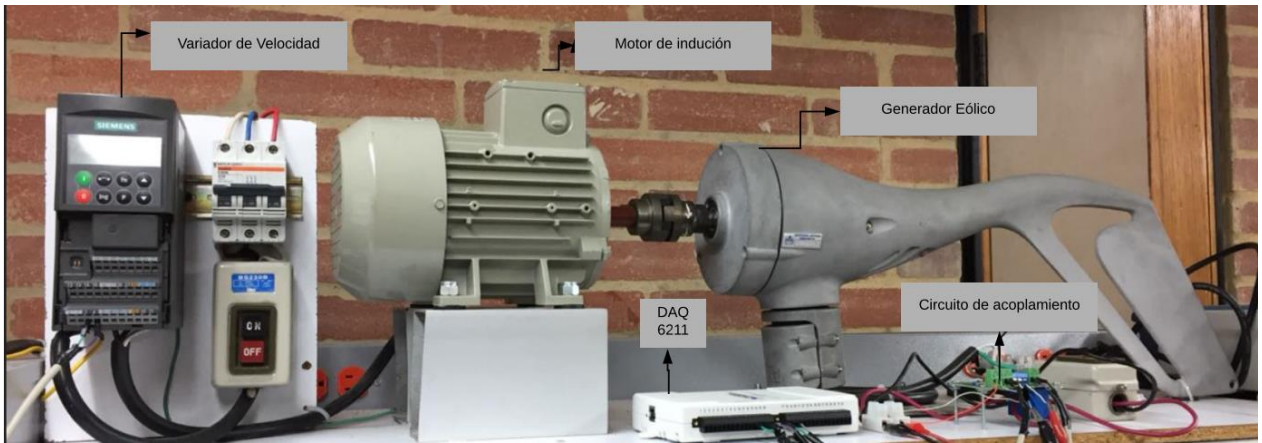


Ilustración 1. Emulador Eólico



Ilustración 2. Variador con su Breaker e Interruptor



Ilustración 3. DAQ 6211.

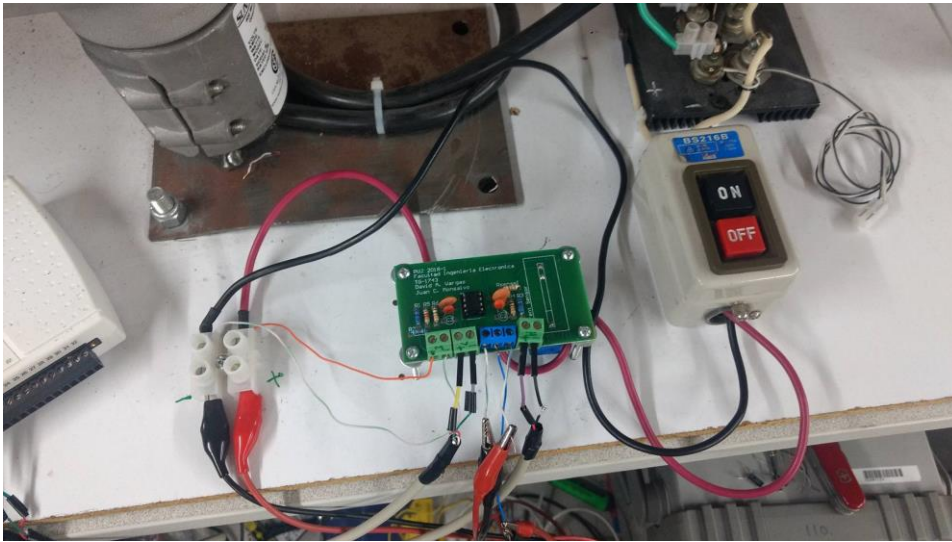


Ilustración 4. Circuito de adquisición, Bornera para carga e Interruptor de Salida

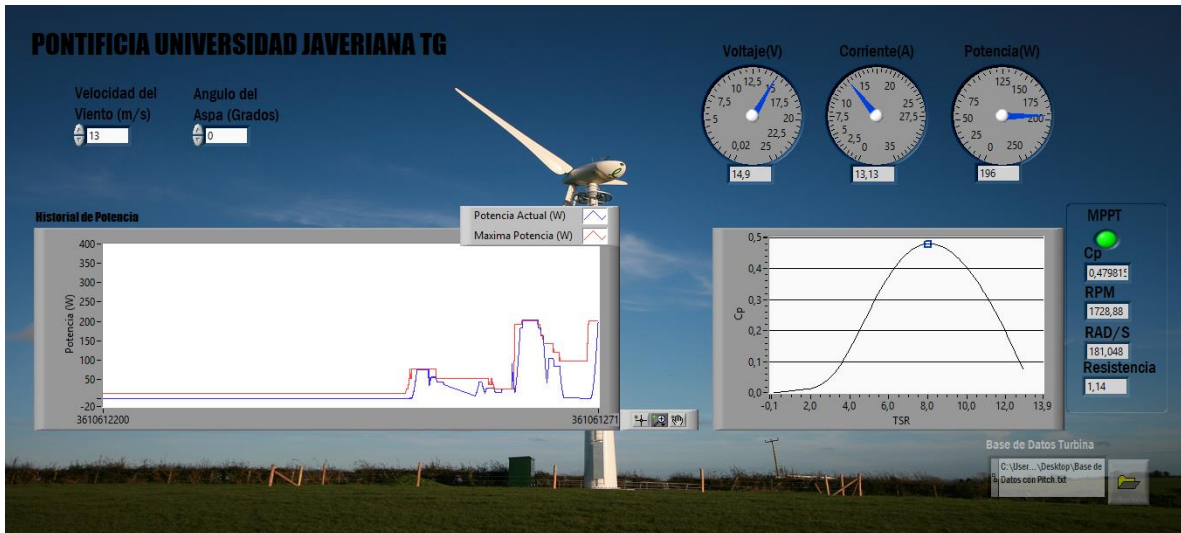


Ilustración 5. Interfaz de Usuario LabView.