



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Banco de pruebas didáctico para sistema de energía eólica

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Autor:

RODDY BISMARCK AGUILAR LOAYZA

Director:

FRANCISCO EUGENIO VÁSQUEZ CALERO

CUENCA, ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Cada momento compartido con ellos es una bendición, y no existen palabras para describir lo agradecido que estoy por haberme brindado la oportunidad de superarme.

Ellos son mi apoyo, mi consuelo y a veces hasta mis reproches, ellos son mis padres que han estado siempre en las buenas y en las malas, en las alegrías y en las penas.

Por eso y mucho más, este momento, esta alegría de mi vida se lo dedico a ellos, a Pacífica y Mario, gracias por formar parte de mi vida.

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento rotundo al que todo lo ve y todo lo oye, al que de arriba nos alienta, le agradezco a Dios por haberme puesto a las personas indicadas en este camino lleno de altibajos.

A mi hermana, que, aunque no siempre estamos de buenas, me ha apoyado en esta etapa de la vida, gracias Dixiana.

Le agradezco también a la chica que, aunque me vea estresado y pesado, me apoya, me alienta y me hace sentir el hombre más importante del mundo, le agradezco a mi negrita por haberme apoyado en este momento de mi vida, le agradezco a mi Economista, Andrea Martínez.

Un agradecimiento especial a Paco, que supo confiar en mí y me dio la oportunidad de crecer a nivel profesional dentro del lugar en el cual trabajo que es simple y sinceramente un gran escalón en el camino a mis sueños.

Le agradezco a mi familia y amigos que siempre han estado pendientes y apoyándome en cada paso que he dado.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | ix |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | vi |
| ÍNDICE DE ANEXOS..... | x |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT | xii |
| | |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| CAPÍTULO 1: INVESTIGACIÓN | 3 |
| | |
| 1.1. Marco Teórico..... | 3 |
| 1.1.1.Energías Renovables | 3 |
| 1.1.2.Energía Eólica | 4 |
| 1.1.3.Aerogeneradores | 5 |
| 1.1.4.Túnel de Viento..... | 8 |
| 1.1.5.Anemómetro..... | 9 |
| 1.1.6.Límite de Betz | 9 |
| 1.1. Diseño de Túnel de Viento..... | 11 |
| 1.2.1. Fórmulas..... | 13 |
| 1.2.2. Cálculo | 14 |
| 1.2.3. Diseño Proyectado | 22 |
| 1.2. Equipos a Utilizar..... | 25 |
| 1.3.1. Aerogenerador..... | 25 |
| 1.3.2. Palas para Aerogenerador | 26 |
| 1.3.3. Anemómetro..... | 27 |
| 1.3.4. Ventilador..... | 28 |
| 1.3.5. Controlador para Ventilador | 29 |
| 1.3.6. DAQ..... | 29 |
| 1.3.7. LabVIEW | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 1.3.8. Sensor de Corriente | 30 |
| 1.3.9. Sensor de Voltaje | 32 |
| 1.3.10. Computadora..... | 32 |
| CAPÍTULO 2: CONSTRUCCIÓN | 33 |
| 2.1. Banco de Pruebas | 33 |
| 2.2. Construcción del túnel de viento | 33 |
| 2.3. Placa de circuitos | 36 |
| 2.4. Programa LabVIEW..... | 50 |
| 2.5. Generador Eólico | 73 |
| 2.6. Configuración del Motor | 74 |
| 2.7. Configuración del Variador de Frecuencia | 75 |
| 2.8. Integración..... | 81 |
| CAPÍTULO 3: PRUEBAS..... | 85 |
| 3.1. Pruebas de eficiencia..... | 85 |
| 3.1.1. Tripala | 85 |
| 3.1.2. Bipala | 87 |
| 3.1.3. Monopala | 89 |
| CAPÍTULO 4: PRÁCTICAS | 91 |
| 4.1. Práctica 1 | 91 |
| 4.2. Práctica 2 | 93 |
| CONCLUSIONES | 95 |
| RECOMENDACIONES..... | 97 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 98 |
| ANEXOS | 99 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1. Distancias entre palas..... | 8 |
| Fig. 1.2. Túnel de Viento. | 8 |
| Fig. 1.3. Anemómetro. | 9 |
| Fig. 1.4. Túnel de Viento abierto. | 11 |
| Fig. 1.5. Túnel de Viento cerrado. | 11 |
| Fig. 1.6. Túnel de Viento Soplado. | 12 |
| Fig. 1.7. Túnel de Viento Aspirado..... | 12 |
| Fig. 1.8. Límite de Betz..... | 16 |
| Fig. 1.9. Eficiencia del diámetro del rotor. | 21 |
| Fig. 1.10. Vistas Laterales..... | 22 |
| Fig. 1.11. Vista Superior | 23 |
| Fig. 1.12. Vista Inferior..... | 23 |
| Fig. 1.13. Vista lateral Derecha..... | 24 |
| Fig. 1.14. Vista lateral Izquierda..... | 24 |
| Fig. 1.15. Ventilador | 25 |
| Fig. 1.16. Generador Eólico. | 25 |
| Fig. 1.17. Generador Eólico Foto..... | 26 |
| Fig. 1.18. Tripala..... | 26 |
| Fig. 1.19. Bipala. | 27 |
| Fig. 1.20. Monopala. | 27 |
| Fig. 1.21. Anemómetro. | 28 |
| Fig. 1.22. Motor 1HP Siemens..... | 28 |
| Fig. 1.23. Aspas..... | 28 |
| Fig. 1.24. Controlador para ventilador. | 29 |
| Fig. 1.25. CompactDAQ cDAQ-9174..... | 29 |
| Fig. 1.26. Módulo DAQ NI9205..... | 30 |
| Fig. 1.27. Módulo DAQ NI9401..... | 30 |
| Fig. 1.28. Sensor 100A..... | 31 |
| Fig. 1.29 Sensor 5A..... | 31 |
| Fig. 1.30 Computadora Lenovo Y50-70. | 32 |
| Fig. 2.1 Construcción túnel 1. | 34 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2.2 Construcción túnel 2. | 34 |
| Fig. 2.3 Construcción túnel 3. | 35 |
| Fig. 2.4 Construcción túnel 4. | 35 |
| Fig. 2.5 Construcción túnel 5. | 36 |
| Fig. 2.6 Circuito sensor de corriente 100A. | 37 |
| Fig. 2.7 Circuito sensor de corriente 5A. | 39 |
| Fig. 2.8 Circuito del Anemómetro. | 40 |
| Fig. 2.9 Circuito de Voltaje. | 40 |
| Fig. 2.10 Circuito fuentes de alimentación. | 41 |
| Fig. 2.11 Circuito conversor digital analógico. | 46 |
| Fig. 2.12 Circuito botón de emergencia. | 49 |
| Fig. 2.13 Programa Entradas Analógicas. | 51 |
| Fig. 2.14 Programa Anemómetros. | 52 |
| Fig. 2.15 Programa Sensor de corriente 5A. | 52 |
| Fig. 2.16 Programa Sensor de Voltaje. | 53 |
| Fig. 2.17 Programa Sensor de corriente 100A. | 53 |
| Fig. 2.18 Enlace programas EntradaAnalógica-Final. | 54 |
| Fig. 2.19 Programa Salida Digital. | 54 |
| Fig. 2.20 Enlace programas Salida Digital-Final. | 55 |
| Fig. 2.21 Modo Manual. | 55 |
| Fig. 2.22 Modo Automático. | 56 |
| Fig. 2.23 Programa Final. | 57 |
| Fig. 2.24 Entradas Analógicas. | 57 |
| Fig. 2.25 Fórmula Corriente del Generador Eólico. | 58 |
| Fig. 2.26 Fórmula de Anemómetro. | 58 |
| Fig. 2.27 Fórmula Corriente Fase 1. | 59 |
| Fig. 2.28 Fórmula Corriente Fase 2. | 59 |
| Fig. 2.29 Control de Pestañas. | 59 |
| Fig. 2.30 Modo Manual. | 60 |
| Fig. 2.31 Modo Manual, sin pulsar Inicio. | 61 |
| Fig. 2.32 Modo Manual, pulsado Inicio. | 62 |
| Fig. 2.33 Ecuación de Velocidad de Viento. | 65 |
| Fig. 2.34 Modo Automático. | 65 |
| Fig. 2.35 Modo automático, sin pulsar Inicio. | 66 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2.36 Modo automático, pulsado Inicio. | 67 |
| Fig. 2.37 Impresión de reporte en Excel. | 71 |
| Fig. 2.38 Tabla de conexiones de Generador eólico. | 73 |
| Fig. 2.39 Conexión para 12V del generador Eólico. | 73 |
| Fig. 2.40 Circuito rectificador de Voltaje para el generador Eólico. | 74 |
| Fig. 2.41 Conexiones Estrella y Doble Estrella. | 74 |
| Fig. 2.42 Conexión Doble Estrella. | 75 |
| Fig. 2.43 Datos del Motor. | 75 |
| Fig. 2.44 Variante Analógica. | 76 |
| Fig. 2.45 Conexiones del Variador de Frecuencia. | 76 |
| Fig. 2.46 Terminales de Frecuencia. | 77 |
| Fig. 2.47 Panel BOP. | 77 |
| Fig. 2.48 Ejemplo de cambio de parámetros. | 78 |
| Fig. 2.49 Puesta en marcha rápida. | 79 |
| Fig. 2.50 Esquema de Configuración. | 81 |
| Fig. 2.51 Proyecto unificado. | 81 |
| Fig. 2.52 Pruebas. | 82 |
| Fig. 2.53 Variador de Frecuencia. | 82 |
| Fig. 2.54 Circuitos. | 83 |
| Fig. 2.55 PCB. | 84 |
| Fig. 2.56 Conexiones. | 84 |
| Fig. 3.1 Pruebas Tripala. | 85 |
| Fig. 3.2 Pruebas Monopala. | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. MW Instalados en América Latina. | 5 |
| Tabla 1.2. Rendimientos típicos..... | 7 |
| Tabla 1.3. Potencias. | 15 |
| Tabla 1.4. Número Reynolds. | 16 |
| Tabla 2.1 Formato preestablecido Excel..... | 72 |
| Tabla 2.2 Configuración del Variador. | 80 |
| Tabla 3.1 Datos de prueba Tripala. | 86 |
| Tabla 3.2 Datos de prueba Bipala. | 88 |
| Tabla 3.3 Datos de prueba Monopala. | 90 |

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo. 1. Motor Especificaciones
- Anexo. 2. G110 Siemens Instrucciones de servicio resumidas
- Anexo. 3. Whisper 100 Especificaciones
- Anexo. 4. Hoja de datos de regulador LM78XX
- Anexo. 5. Hoja de datos de regulador LM79XX
- Anexo. 6. Hoja de datos del convertidor analógico-digital DAC0808
- Anexo. 7. Hoja de datos del Relee

BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA

RESUMEN

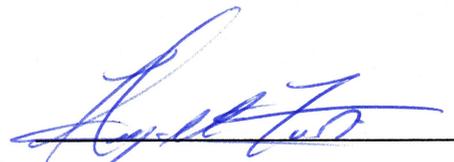
En este proyecto de titulación se plantea la elaboración de un sistema didáctico para la comprobación de aerogeneradores, éste banco de pruebas permitirá medir la potencia en el aerogenerador a velocidades constantes, de acuerdo con el volumen de viento que se le inyecte; Así mismo la construcción del túnel de viento permitirá hacer una demostración sobre cómo actúa el aerogenerador en diferentes velocidades de viento, además de la modificación de los tipos de palas, “monopala, bipala, tripala”, para cálculos de eficiencia. Dentro del proyecto se hace énfasis a la investigación, donde se detalla su historia, sus componentes y diseños.

Palabras Clave:

Túnel de viento, generador eólico, monopala, bipala, tripala.



Francisco Eugenio Vásquez Calero
Director del Trabajo de Titulación



Hugo Marcel Torres Salamea
Director de Escuela



Roddy Bismarck Aguilar Loayza

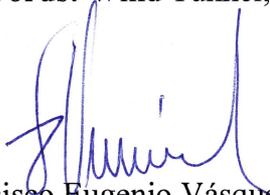
Autor

DIDACTIC TEST BANK FOR WIND ENERGY SYSTEM

ABSTRACT

The following project proposes to develop a didactic system for the verification of aerogenerators. This test bank will allow the measurement of power in the aerogenerator at constant speeds according to the volume of wind that is injected into it. The construction of the wind tunnel will also enable a demonstration of how the aerogenerator performs at different air speeds, as well as the modification of types of blades, "single-blade, bi-blade, tri-blade" for efficiency calculations. The project emphasizes research, detailing its history, components and designs.

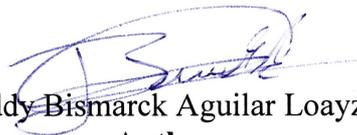
Keywords: Wind Tunnel, Wind Generator, Single-Blade, Bi-Blade, Tri-Blade



Francisco Eugenio Vásquez Calero
Thesis Director



Hugo Marcel Torres Salamea
School Director



Roddy Bismarck Aguilar Loayza
Author



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

Aguilar Loayza Roddy Bismarck
Trabajo de Titulación
Ing. Francisco Eugenio Vásquez Calero
Enero, 2017.

BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA

INTRODUCCIÓN

A través de la historia se observa la evolución que han tenido los sistemas de energía eólica, los mismos que han ido desarrollándose de manera progresiva en América Latina. En la actualidad y con el cambio de la matriz energética en el que se encuentra el país, la falta de conocimiento sobre este tipo de sistemas de generación de energía, se convierte en un problema fundamental para el desarrollo. Esto nos permite plantearnos la siguiente pregunta: ¿es posible desarrollar equipos didácticos para conocer los principios básicos de la energía eólica?

El objetivo principal de este proyecto es mejorar los conocimientos de los estudiantes en el campo de la energía eólica para que puedan enfrentar los retos profesionales, a través de la implementación de un sistema didáctico, que permita comprobar el funcionamiento de los aerogeneradores, su curva característica y a diferentes tipos de palas; Al momento de hablar de diferentes tipos de palas, nos referimos a sistemas, el sistema monopala, bipala y tripala; cada uno de estos sistemas tiene su propia eficacia en diferentes condiciones ambientales, por lo que es necesario estudiarlos y garantizar su validez. Para lograr demostrar el funcionamiento tanto del generador eólico, como de los sistemas monopala, bipala y tripala, se realizó la construcción de un túnel, que a través de un ventilador permite modificar las velocidades del viento; este ventilador esta comandado a través de una tarjeta de adquisición de datos DAQ y de un programa realizado en la plataforma LABVIEW. Esta combinación DAQ-LABVIEW sirve para obtener los datos arrojados por el generador eólico, como son: velocidades, voltaje y corriente.

Una vez terminada la construcción del túnel de viento, fue necesario hacer pruebas del equipo, así como de los varios sistemas de palas, lo que nos permite demostrar el rendimiento y la eficacia en cada uno de éstos.

Se realizaron varias prácticas en las cuales se puede comprobar y corroborar el funcionamiento del generador eólico, de una manera fácil y eficaz.

CAPÍTULO 1

INVESTIGACIÓN

1.1. Marco Teórico

“Las energías renovables, fueron aprovechadas desde la antigüedad en variantes muy concreta, como son algunos de los ejemplos que se citan a continuación:

-) Las hogueras para calentarse, cocinar y alumbrarse. Primeramente de ramas y leña (biomasa) y después también con carbón.
-) Aplicando la arquitectura solar pasiva, desde 500 años d C, aprovechan el calor del sol para calentar ciertos locales y dependencias de la casa en la época de frío-invierno.
-) Molinos accionados por la fuerza del viento, desde hace 3000 años.
-) Norias hidráulicas, para extracción de agua, desde hace 2000 años
-) Navegación por mares y ríos de barcos empujados por la fuerza del viento desde la antigüedad.
-) Aprovechamiento de las mareas, el calor del sol, la fuerza del agua de los ríos, etc.

Cuando llegó la máquina a vapor y posteriormente el motor eléctrico se abandonó el uso de ciertas energías alternativas. Ha sido a partir de los 70 del pasado siglo XX, cuando por causas de problemas energéticos en el mercado mundial (precio y suministros), se ha visto un renacer de las energías renovables y alternativas, pero ahora con nuevas tecnologías que hacen que sus rendimientos sean mejores y más competitivos” (Roldan 2013).

1.1.1. Energías Renovables

“Las Energías renovables, que usan fuentes en principio no finitas y que no emiten dióxido de carbono, tienen una posición de ventaja sobre las energías generadas con combustibles fósiles, de hecho, pueden solucionar el problema del abastecimiento eléctrico de la sociedad sin generar un cambio climático ni depender de recursos externos” (Jarauta 2014).

Entre las más importantes y que generan una mayor cantidad de energía dentro de las renovables tenemos: Solar, Eólica, a partir de biomasa, Hidráulica, Mareomotriz, a partir de Oleaje.

1.1.2. Energía Eólica

“Los vientos son movimientos del aire, o corrientes convectivas, que se originan por el calentamiento diferencial producido en distintos puntos geográficos que reciben cantidades diferentes de radiación solar. En los lugares en que se alcanzan mayores temperaturas, debido a que reciben mayor cantidad de radiación, el aire en contacto con la tierra o el mar se calienta más, y, en consecuencia, se expande, su densidad disminuye y se eleva dejando un vacío que es ocupado por masas de aire más frío. Este aire frío proviene de zonas que reciben menor cantidad de radiación solar y alcanzan menores temperaturas, por lo que el aire en contacto con ellas se expande menos y, al tener mayor densidad, se traslada por las capas bajas de la atmósfera hasta ocupar el lugar dejado libre por el aire caliente que asciende. En este sentido puede afirmarse que la energía eólica es energía solar que se almacena en la atmósfera en forma de calor distribuido de modo no homogéneo, lo que pone en marcha las corrientes convectivas antes aludidas. Por lo tanto, puede considerarse que la energía eólica es energía solar indirecta” (González 2009).

“La energía eólica es una de las fuentes de energía renovables para la que se dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, en unas condiciones de producción y coste competitivas con las fuentes de energía tradicionales (hidráulica, térmica clásica o termonuclear)” (Villarrubia 2004).

A continuación, se muestra en la tabla 1 el total de plantas eólicas instaladas en América Latina, a finales de 2010 y el incremento que se ha dado hasta finales del 2014.

Tabla 1.1. MW Instalados en América Latina.

| País | Capacidad Total en 2010 (MW) | Capacidad Total en 2011 (MW) | Capacidad Total en 2012 (MW) | Capacidad Total en 2013 (MW) | Capacidad Total en 2014 (MW) |
|-----------------|---|---|---|---|---|
| Brasil | 930 | 1429 | 2507 | 3466,1 | 5961,6 |
| México | 521 | 929 | 1348 | 1992 | 2551 |
| Chile | 170 | 190 | 190 | 335 | 836 |
| Uruguay | 30,5 | 40,5 | 55,7 | 59,3 | 529,4 |
| Argentina | 54 | 129,2 | 140,9 | 217,1 | 271 |
| Costa Rica | 123 | 148,2 | 148,2 | 148,2 | 198 |
| Nicaragua | 63 | 63 | 102 | 141,6 | 186 |
| Honduras | 0 | 70 | 102 | 102 | 152 |
| Perú | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 148 |
| Puerto Rico | 0 | 0 | 125 | 125 | 125 |
| Rep. Dominicana | 0,2 | 33,6 | 33,6 | 85,3 | 85,3 |
| Venezuela | 0 | 0 | 30 | 30 | 30 |
| Colombia | 19,5 | 19,5 | 19,5 | 19,5 | 19,5 |
| Ecuador | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 19 | 19 |
| Guyana | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 | 13,5 |
| Cuba | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 |
| Bolivia | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

Fuente: [Http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_half_year_report_2014.pdf).

1.1.3. Aerogeneradores

“Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica” (Itcanarias 2011).

“El rendimiento de un aerogenerador. - En los aerogeneradores que funcionan en isla, es decir, que no están conectados a la red eléctrica, la energía eléctrica no se puede utilizar de forma directa, sino que necesita ser almacenada en baterías o acumuladores.

Llamemos instalación eólica al conjunto formado por el rotor, cojinetes, engranaje, cables, baterías y otros dispositivos eléctricos o mecánicos.

Sean $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ los rendimientos de los diferentes componentes de esta cadena alimentada por el rotor de rendimiento η_w : La potencia al final de la cadena será la potencia útil P de toda la instalación eólica:

$$P = 0,37 \cdot \eta \cdot F \cdot v^3 \quad [\text{W}]$$

Siendo

$$\eta = \eta_w \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \dots \eta_n$$

Dónde:

P = Potencia útil

η = Rendimiento

F = Superficie de análisis

v = Velocidad del aire

Es decir, el rendimiento de toda la instalación es igual al producto de los rendimientos de todos los componentes que la integran.

El factor de potencia C_p de la instalación también puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$c_p = 0,5926 \cdot \eta$$

La tabla a continuación contiene algunos rendimientos típicos:

Tabla 1.2. Rendimientos típicos.

| Denominación | Rendimiento (%) |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Rotor eólico | 30-80 |
| Engranaje | 50-80 |
| Generador eléctrico (alternador) | 50-92 |
| Bomba a pistón | 60-80 |
| Sistema acumulador | |
| Eléctrico: | |
| Condensador | Hasta 50 |
| Electroquímico | |
| Batería | 60-80 |
| Químico: | |
| Hidrógeno H ₂ (gas) | 20-50 |
| Hidrógeno H ₂ (líquido) | 20-40 |
| Mecánico: | |
| Volante de inercia | 85-95 |
| Aire comprimido | Hasta 65 |

Velocidad específica de un rotor eólico. - Una característica óptica es la distancia entre las palas, que aumenta con la velocidad específica nominal. Los típicos rotores lentos, como las llamadas turbinas americanas, que tanto se utilizaron en la agricultura del siglo 19 y principios del 20 para bombear agua, tienen muchas palas (es decir, pequeñas distancias entre las mismas).

Los rotores modernos de alta tecnología pueden llegar a tener una sola pala con un contrapeso.

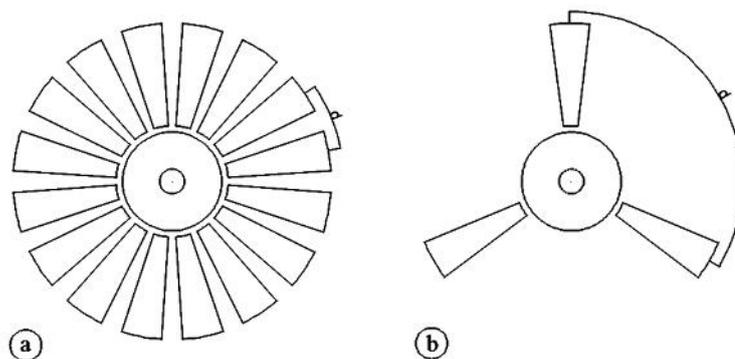


Fig. 1.1. Distancias entre palas.

a) Rotor 'lento': pequeña distancia entre las palas.

b) Rotor 'rápido': gran distancia entre las palas" (Franquesa 2009).

1.1.4. Túnel de Viento

“El Túnel de Viento es una instalación en la que se obtiene un flujo de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada en la cámara de ensayos. En ésta se sitúan objetos reales o maquetas de los mismos para observar el efecto real que el viento ejerce sobre ellos, de manera que puedan evaluarse o diseñarse soluciones que puedan ser necesarias.

En lo que respecta a las Energías Renovables, el túnel puede ser utilizado para el desarrollo de componentes de aerogeneradores, así como para el estudio de cargas sobre los mismos y la calibración de anemómetros” (Iter 2016).



Fig. 1.2. Túnel de Viento.

Fuente: https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRvtmNSe67daXto5do81OBLcxuj25-7c3ZRuomiZI_VWiXNkph.

1.1.5. Anemómetro

“Es un instrumento que sirve para medir la velocidad, dirección y fuerza del viento. Puede ser de rueda de paletas, que consiste en un rodete con álabes oblicuos, o bien el denominado de Robinson, que consta de cuatro cazoletas de forma de hemisferio fijados a cuatro brazos radiales.

Al soplar el viento hace girar la rueda de paletas o el eje de la rueda de paletas con velocidad proporcional a la del viento. Este movimiento se transmite a algún mecanismo capaz de indicar esta velocidad sobre una escala graduada” (Conocimientosweb 2013).

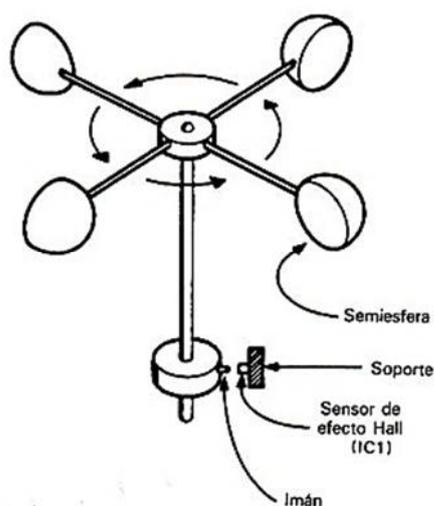


Fig. 1.3. Anemómetro.

Fuente: <http://miajas.com/intercom/Anemometro/dibujo1.jpg>

1.1.6. Límite de Betz.

El límite de Betz se explica con la siguiente pregunta, ¿Cuanta energía se puede extraer del viento?, es decir es el porcentaje de energía que se puede extraer del Viento.

La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919. Su libro "Wind-Energie", publicado en 1926, proporciona buena parte del conocimiento que en ese momento se tenía sobre energía eólica y aerogeneradores

“Potencia eólica disponible y potencia eólica aprovechable. - Se define la potencia eólica disponible como la energía ligada al viento que fluye por unidad de tiempo:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^2 \cdot v_1 \cdot A = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \cdot A$$

Dónde:

P_d = Potencia eólica

ρ = Densidad del aire

A = Área del lugar de trabajo

v = Velocidad del aire

Se define como energía eólica aprovechable la parte de energía eólica que puede capturar el rotor del aerogenerador por unidad de tiempo:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot A \cdot C_p$$

Dónde:

P_a = Potencia aprovechable

ρ = Densidad del aire

A = Área del lugar de trabajo

v = Velocidad del aire

C_p = Coeficiente de potencia del aerogenerador

C_p es el coeficiente de potencia del aerogenerador. Su valor oscila entre 0 y 0,5925; y se define como el rendimiento con el cual funciona el aerogenerador, e indica la potencia que captura el rotor respecto la potencia total que posee el viento incidente” (Díaz 2013).

1.1. Diseño de Túnel de Viento

En este apartado se reúne la información correspondiente para la elaboración del túnel de viento, tanto sus fórmulas, pérdidas y esquemas; esta información servirá para la elaboración física del banco de pruebas.

A nivel general existen varios tipos de túneles de viento, lo cuales dependen de varios factores como son: la circulación de aire, la disposición de los ventiladores dentro del túnel, y la configuración de la cámara de ensayo.

Para la circulación de aire existen de tipo abierto y cerrado:

-) Abierto. – Hace referencia a túneles que toman el aire atmosférico para su funcionamiento, luego de pasar por la cámara de ensayos se envía el aire nuevamente a la atmósfera.

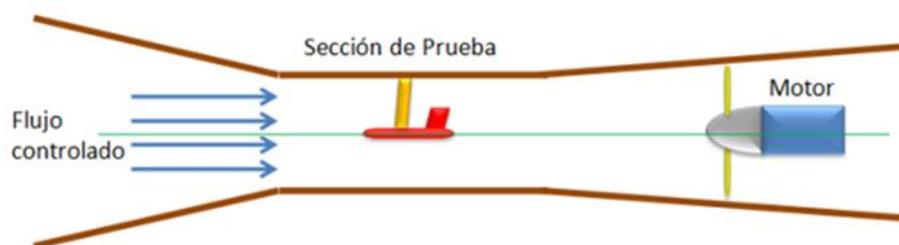


Fig. 1.4. Túnel de Viento abierto.

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3a/Tipo_de_t%C3%BAneles_entorno.png/600px-Tipo_de_t%C3%BAneles_entorno.png

-) Cerrado. – Es un túnel que tiene conectada la salida del aire al ingreso del mismo, esto quiere decir que el aire que se empuja con el ventilador volverá a ser utilizado una vez que regrese al punto de inicio, haciendo recircular el aire.

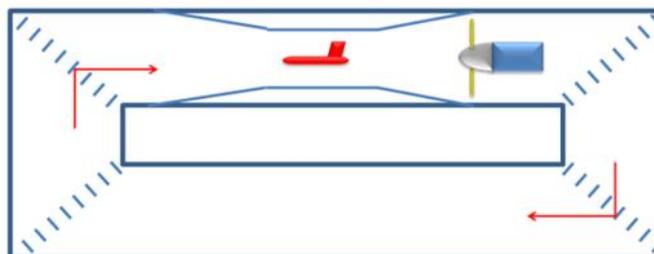


Fig. 1.5. Túnel de Viento cerrado.

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3a/Tipo_de_t%C3%BAneles_entorno.png/600px-Tipo_de_t%C3%BAneles_entorno.png

Para la disposición de los ventiladores dentro del túnel se tiene:

-) Soplados. – El ventilador está ubicado al inicio del túnel y empuja el aire hacia el interior del túnel, pasando por la cámara de ensayos.

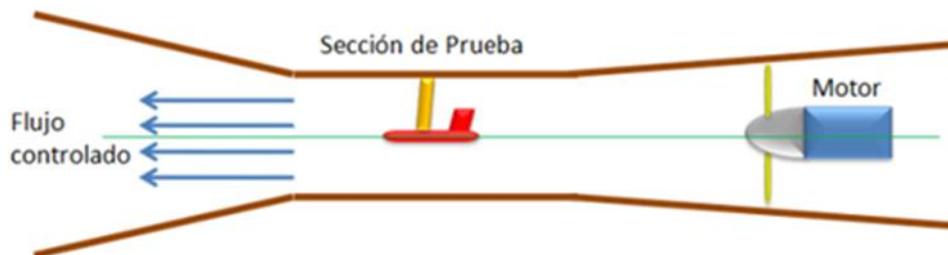


Fig. 1.6. Túnel de Viento Soplado.

Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3a/Tipo_de_t%C3%B1eles_entorno.png/600px-Tipo_de_t%C3%B1eles_entorno.png

-) Aspirados. – El ventilador está ubicado al final del túnel y absorbe el aire que atraviesa el interior del túnel, pasando por la cámara de ensayos.

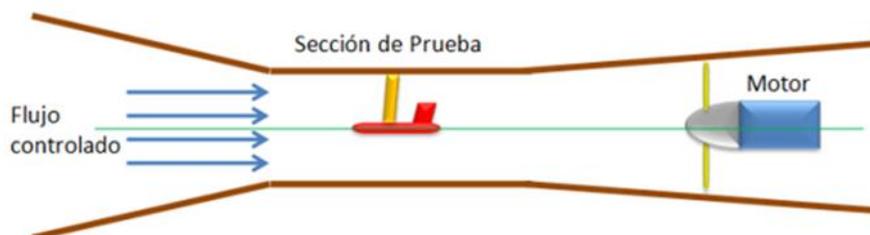


Fig. 1.7. Túnel de Viento Aspirado.

Fuente:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3a/Tipo_de_t%C3%B1eles_entorno.png/600px-Tipo_de_t%C3%B1eles_entorno.png

Para la configuración de la cámara de ensayos se tiene:

-) Abierta. – Se utiliza cuando se tiene modelos más grandes, la desventaja principal es que no se va a poder controlar el flujo de aire.
-) Cerrada. - Es la más común, se utiliza para modelos más pequeños.

Para este proyecto se toma como referencia varios aspectos de cada tipo de túneles, y de esta manera seleccionar el que mejor se adapte al túnel, por ejemplo:

Para la circulación de aire, lo más recomendable es utilizar de tipo abierto, ya que se va a medir tanto el aire en el interior como el exterior del túnel, no se va a reutilizar el aire que pasa por el generador eólico.

Para la disposición de los ventiladores se utiliza soplados, debido a que se puede alcanzar más velocidades en el aerogenerador.

Pese a que va ser complicado manejar el flujo del aire, se optó por cámara de pruebas abierta, debido a que se va a medir la velocidad de viento una vez pase por el generador eólico.

1.2.1. Fórmulas

Potencia de Viento. - Es la rapidez con que la energía puede ser convertida a través de la siguiente formula:

Ecuación 1.
$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Dónde:

P_v = Potencia de viento

ρ = Densidad del aire

A = Área del lugar de trabajo

V = Velocidad del aire

Potencia de Turbina. - Es la cantidad de energía que una turbina convierte en energía mecánica.

Ecuación 2.
$$P_t = C_p * \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Dónde:

P_t = Potencia de turbina

C_p = Coeficiente de potencia de la turbina

Número de Reynolds:

Ecuación 1.
$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Dónde:

Re = Número Reynolds

V = Velocidad (m/s)

ν = Viscosidad cinemática (m²/s)

L = Dimensión que depende de la característica a analizar (m)

1.2.2. Cálculo

Considerando los parámetros del aire según la situación geográfica local.

Presión Atmosférica $p=101.4$ kPa

Temperatura atmosférica $T=16$ °C=289.15 K

Altura sobre nivel del mar $z=2550$ m.s.n.m

Densidad $=1.2147$ kg/m³

Constante de Aire $R= 287$ J/Kg (K)

Calor específico $C_{esp}= 1005$ J/Kg (K)

Coeficiente adiabático $k= 1.4$

Viscosidad cinemática $\nu= 1.46 \times 10^{-5}$ m²/seg

Cálculos en el túnel:

Potencia de Viento

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Siendo

$$= 1.2147$$

$$A = \frac{0.6^2}{4} = 0.2826$$

Potencia de Turbina

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Siendo:

ρ = Densidad del aire

A = Área del lugar de trabajo

V = Velocidad del aire

La tabla a continuación se compone de los resultados de la potencia de viento y la potencia de la turbina para cada velocidad.

Tabla 1.3. Potencias.

| Potencia de la Turbina (W) | Potencia de Viento(W) | Velocidad (m/s) | Densidad | Área | Cp |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|----------|-------|-------|
| 0.142 | 4.634 | 3.000 | 1.215 | 0.283 | 0.031 |
| 0.880 | 6.168 | 3.300 | 1.215 | 0.283 | 0.143 |
| 0.905 | 8.008 | 3.600 | 1.215 | 0.283 | 0.113 |
| 2.480 | 10.181 | 3.900 | 1.215 | 0.283 | 0.244 |
| 4.430 | 12.716 | 4.200 | 1.215 | 0.283 | 0.348 |
| 5.675 | 15.640 | 4.500 | 1.215 | 0.283 | 0.363 |
| 7.255 | 18.982 | 4.800 | 1.215 | 0.283 | 0.382 |
| 9.446 | 22.768 | 5.100 | 1.215 | 0.283 | 0.415 |
| 12.295 | 27.027 | 5.400 | 1.215 | 0.283 | 0.455 |
| 14.290 | 31.786 | 5.700 | 1.215 | 0.283 | 0.450 |
| 17.053 | 37.074 | 6.000 | 1.215 | 0.283 | 0.460 |
| 18.639 | 42.917 | 6.300 | 1.215 | 0.283 | 0.434 |
| 20.396 | 49.345 | 6.600 | 1.215 | 0.283 | 0.413 |
| 23.649 | 56.384 | 6.900 | 1.215 | 0.283 | 0.419 |
| 27.951 | 64.063 | 7.200 | 1.215 | 0.283 | 0.436 |
| 29.032 | 72.409 | 7.500 | 1.215 | 0.283 | 0.401 |
| 32.907 | 81.451 | 7.800 | 1.215 | 0.283 | 0.404 |
| 38.402 | 91.215 | 8.100 | 1.215 | 0.283 | 0.421 |
| 42.909 | 101.730 | 8.400 | 1.215 | 0.283 | 0.422 |
| 52.058 | 113.024 | 8.700 | 1.215 | 0.283 | 0.461 |

Número de Reynolds (Re) para esto utilizaremos la ecuación 1

Ecuación 1
$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

A continuación, se muestra en la siguiente tabla los resultados de los cálculos a diferentes velocidades:

Tabla 1.4. Número Reynolds.

| Número Re | Velocidad(m/s) | Viscosidad(m ² /s) | Diámetro(m) |
|-----------|----------------|-------------------------------|-------------|
| 123698.63 | 3 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 144315.07 | 3.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 164931.51 | 4 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 185547.95 | 4.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 206164.38 | 5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 226780.82 | 5.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 247397.26 | 6 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 268013.70 | 6.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 288630.14 | 7 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 309246.58 | 7.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 329863.01 | 8 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 350479.45 | 8.5 | 1.46E-05 | 0.602 |
| 371095.89 | 9 | 1.46E-05 | 0.602 |

Cálculo de Límite de Betz:

Para demostrar el límite de Betz, resumiremos el fenómeno físico en la siguiente gráfica:

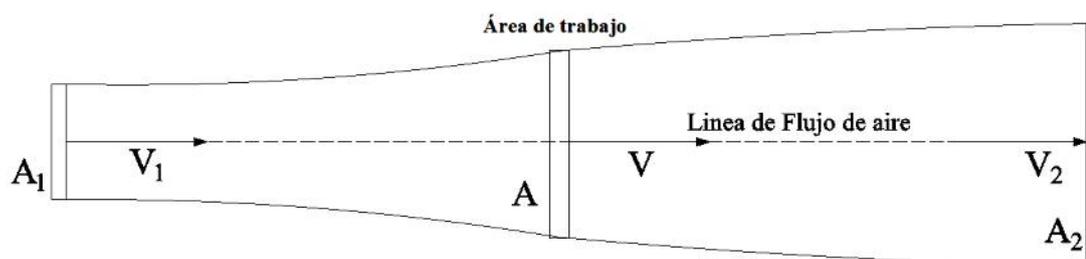


Fig. 1.8. Límite de Betz

Para encontrar la Potencia Útil tenemos dos formas de lograrlo, que se muestran a continuación:

Potencia Útil, dependiendo de la Energía Cinética del viento al pasar por el rotor del generador eólico.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{útil}} &= \frac{-E_k}{t} \\
 &= \frac{E_{k1} - E_{k2}}{t} \\
 &= \frac{\frac{1}{2} A d (v_1^2 - v_2^2)}{t} \\
 P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} \frac{d}{t} A (v_1^2 - v_2^2)
 \end{aligned}$$

Dónde:

$P_{\text{útil}}$ = Potencia útil

E_k = Energía Cinética

d = Densidad del aire

A = Área

v = Velocidad del Viento

La ecuación de la Potencia Útil es [2]:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} A v (v_1^2 - v_2^2)$$

Y Potencia Útil, también puede ser representada por:

$$P_{\text{útil}} = F_1 v$$

Dónde:

F = Fuerza del Viento

$$F = m * \text{acel}$$

Y:

m = masa

acel = aceleración

F_1 = Fuerza sobre el Viento

$$F_1 = m \cdot (-a_{cel})$$

Dónde:

$$m = \rho \cdot \text{Volumen} = \rho \cdot A \cdot d$$

Y:

$$a_{cel} = \frac{v}{t} = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

$$-a_{cel} = \frac{v_1 - v_2}{t}$$

Entonces:

$$F_1 = \rho A d \frac{v_1 - v_2}{t}$$

La ecuación de la Potencia Útil es [3]:

$$\begin{aligned} P_{\text{útil}} &= \frac{\rho A d (v_1 - v_2)}{t} v \\ &= \frac{d}{t} \rho A v (v_1 - v_2) \\ P_{\text{útil}} &= \rho A v^2 (v_1 - v_2) \end{aligned}$$

se iguala las ecuaciones [2] y [3] se obtiene [4]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) &= \rho A v^2 (v_1 - v_2) \\ v &= \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \end{aligned}$$

Esto indica que, para que las ecuaciones anteriores sean consistentes entre sí, la velocidad del viento en el rotor del generador eólico es la media de las velocidades antes y después del mismo.

Factor de ralentización, denominado por Betz como [5]:

$$a = \frac{v}{v_1}$$

$$v = a \cdot v_1$$

Remplazamos [4] y [5] en [2] Obteniendo la ecuación [6]:

$$\begin{aligned} P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} A v (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{2} (v_1 + v_2) \right) (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{2} \right) (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{2} \right) (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) \\ &= \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{2} \right) (v_1 + 2v - v_1)^2 (v_1 - 2v + v_1) \\ &= \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{2} \right) 4v^2 (2v_1 - 2v) \\ &= \frac{1}{2} A (4) (av_1)^2 (v_1 - av_1) \\ &= \frac{1}{2} A v_1^3 (4) a^2 (1 - a) \\ P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} A v_1^3 (4a^2 - 4a^3) \end{aligned}$$

Calculando el máximo factor de ralentización mediante $P_{\text{útil}} / a = 0$, obtenemos:

$$0 = 8a - 12a^2$$

$$0 = 4a(2 - 3a)$$

Entonces las posibles soluciones para esta ecuación son:

$$a = 0, \quad \text{No válida}$$

$$a = \frac{2}{3}, \quad \text{Correcta}$$

Remplazamos en la ecuación [6]:

$$\begin{aligned} P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} A v_1^3 (4) \left(\frac{4}{9} \right) \left(1 - \frac{2}{3} \right) \\ &= \frac{1}{2} A v_1^3 \left(\frac{16}{27} \right) \end{aligned}$$

$$P_{\text{útil}} = \left(\frac{16}{27}\right) \frac{1}{2} A v_1^3$$

La Potencia de viento se representa mediante la siguiente ecuación:

$$P_o = \frac{1}{2} A v_1^3$$

Entonces tenemos que:

$$P_{\text{útil}} = \left(\frac{16}{27}\right) P_o$$

$$P_{\text{útil}} = (0.5925) P_o$$

$$P_{\text{útil}} = (59.25\%) P_o$$

Entonces el coeficiente de potencia Máximo es:

$$C_{p \text{ max}} = 0.5925$$

Esto indica que el rotor del generador eólico solo podría aprovechar el 59.25% de la potencia proveniente del viento.

Eficiencia del diámetro del rotor. - Tomando como referencia el rotor ideal y bajo condiciones normales:

Temperatura = 10° C

Presión = 1 bar

La densidad del aire sería igual a $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$

Siendo la potencia máxima de un rotor igual al coeficiente de potencia máxima por la potencia de viento:

$$P_{w \text{ max}} = C_{p \text{ max}} * P_o$$

$$P_{w \text{ max}} = 0.5925 * \left(\frac{1}{2} * \rho * A * v^3\right)$$

$$P_{w \text{ max}} = 0.37 * \rho * A * v^3$$

A continuación, se muestra la diferencia que puede existir al variar el diámetro de las aspas:

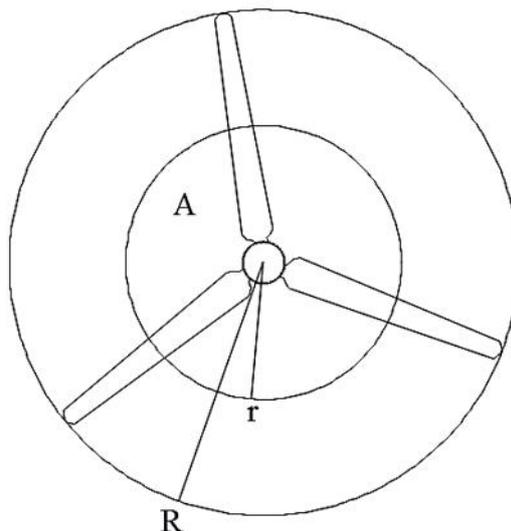


Fig. 1.9. Eficiencia del diámetro del rotor.

A continuación, se realiza el cálculo para los 2 radios del rotor, de esta manera se demuestra que área aporta mayor potencia al rotor.

Para el radio r:

$$P_{w_r} = 0.37 * r^2 * v^3$$

Colocamos el radio de las palas fabricadas para nuestro rotor $r = 0.3m$

$$P_{w_r} = 0.104 * v^3$$

Para el radio R:

$$P_{w_R} = 0.37 * R^2 * v^3$$

Colocamos el radio de las palas originales de nuestro rotor $R = 1.05m$

$$P_{w_R} = 1.285 * v^3$$

Ahora bien, dividimos las ecuaciones para obtener una relación y comparamos los resultados:

$$\frac{P_{w_r}}{P_{w_R}} = \frac{0.37 * r^2 * v^3}{0.37 * R^2 * v^3}$$

$$\frac{P_{w_r}}{P_{w_R}} = \frac{r^2}{R^2}$$

Remplazando los resultados de nuestro rotor tenemos que:

$$\frac{P_{wr}}{P_{wR}} = \frac{0.3^2}{1.05^2} = 0.081$$

Esto significa que nuestra configuración de palas solo puede alcanzar un 8.16% del rotor original, en condiciones ideales, sin tomar en cuenta las dimensiones, grosor, diseño y peso de las palas.

1.2.3. Diseño Projectado

Se ha optado por equipos de no muy extensa velocidad como ventilador con motor de 1HP que mueve un generador eólico de 900W, con una carga de 20ohm (resistencias de potencia con disipadores) para la comprobación de la corriente.

Como se mencionó en el apartado 1.2, se optó por utilizar un túnel de tipo abierto soplado con cámara de pruebas abierta.

A continuación, se muestran los diseños hechos en AutoCAD en donde se especifica cada parte y medidas:

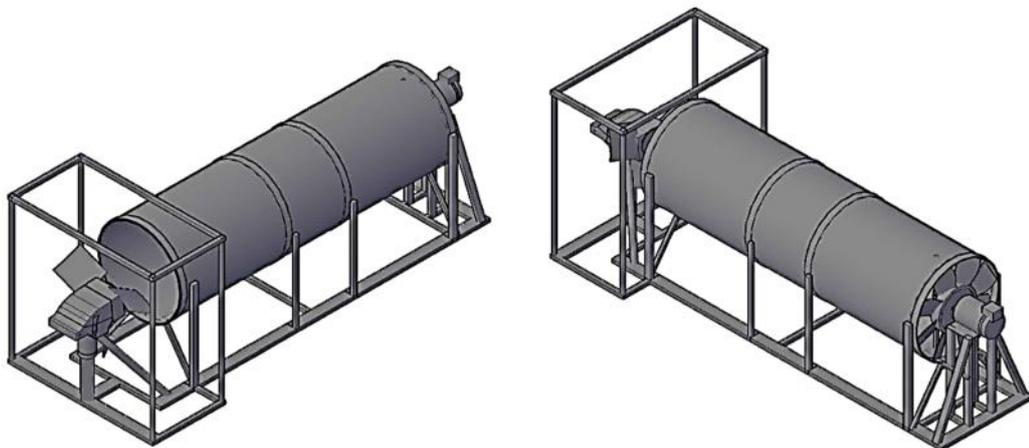


Fig. 1.10. Vistas Laterales

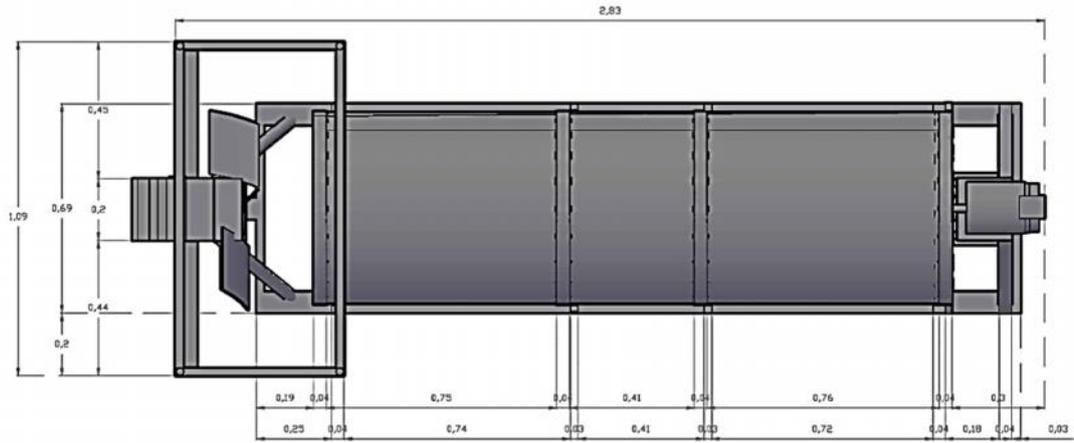


Fig. 1.11. Vista Superior

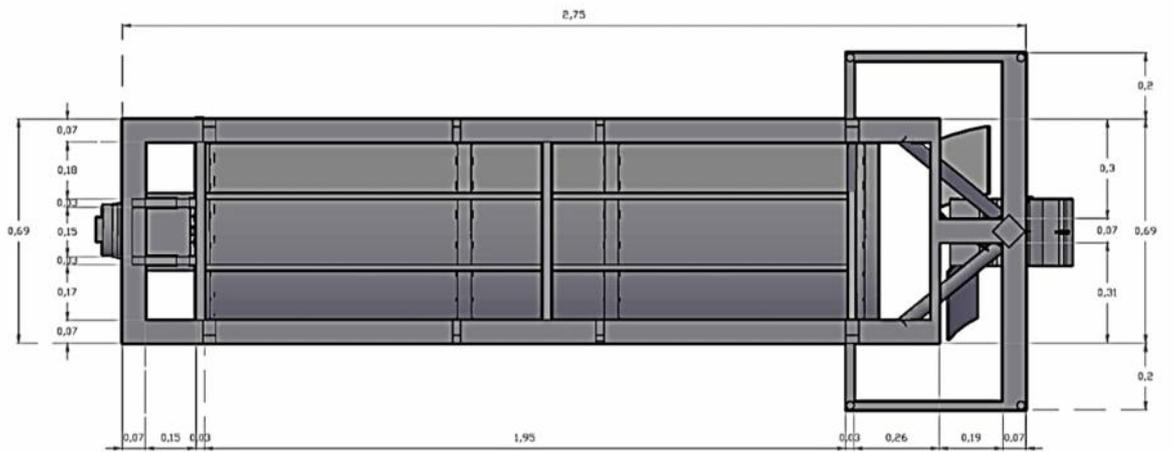


Fig. 1.12. Vista Inferior

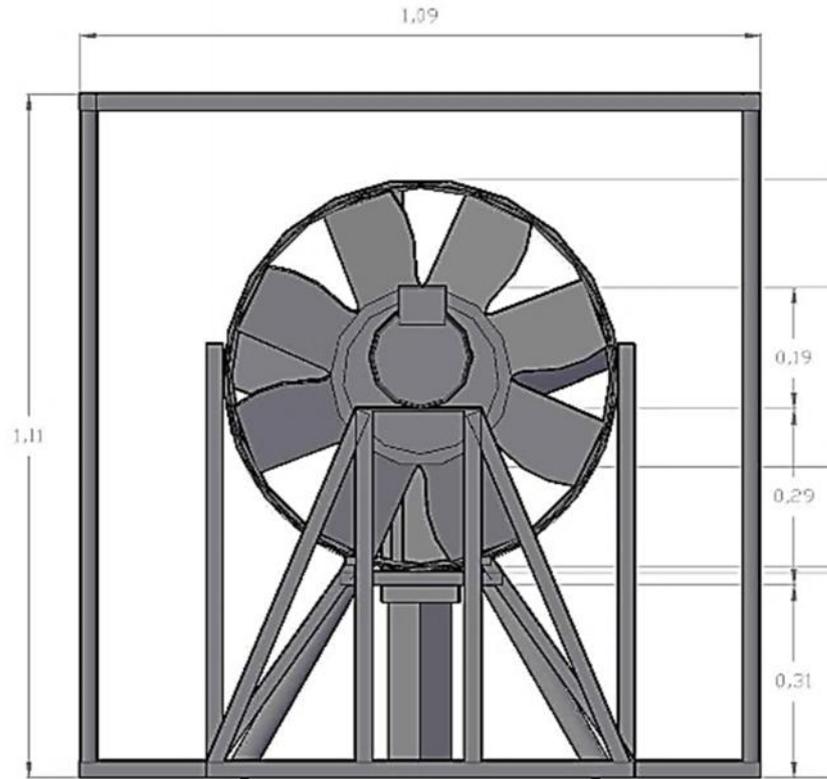


Fig. 1.13. Vista lateral Derecha

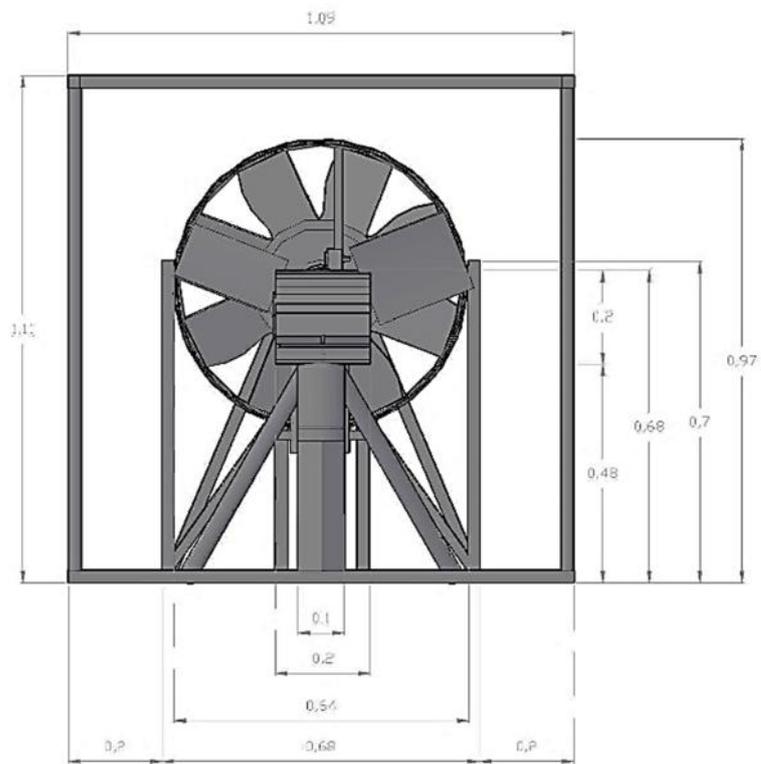


Fig. 1.14. Vista lateral Izquierda

Ventilador, compuesto por un motor de 1HP y aspas obtenidas de otro ventilador.

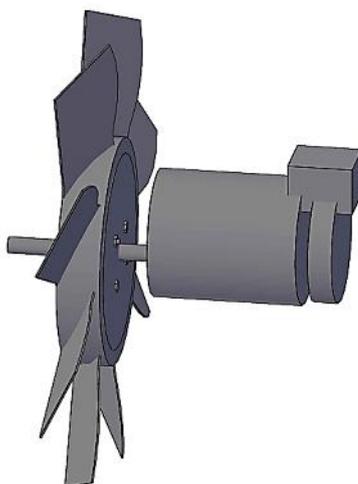


Fig. 1.15. Ventilador

Generador Eólico, éste es un modelo adquirido, se especifica las características en el siguiente apartado.

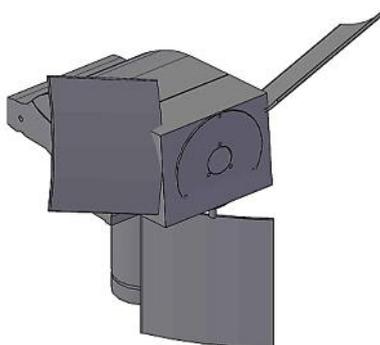


Fig. 1.16. Generador Eólico.

1.2. Equipos a Utilizar

A continuación, se detallan los equipos que se utilizan en el proyecto.

1.3.1. Aerogenerador

Se utilizó un mini generador eólico Whisper 100, que tiene las siguientes características:

| | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| La energía potencial: | 100 kWh / mes a 5.4 m / s |
| Diámetro del rotor: | 2,1 m |
| Voltaje: | 12, 24, 36, 48 VDC |
| Start-Up Wind Speed: | 3.4 m/s |
| Potencia nominal: | 900 vatios en 28 mph (12,5 m / s) |



Fig. 1.17. Generador Eólico Foto.

Fuente: <https://www.emarineinc.com/Whisper-100-Land-with-multi-voltage-Controller>

Las especificaciones técnicas se las puede encontrar en el Anexo 3.

1.3.2. Palas para Aerogenerador

El generador eólico viene de fábrica con aspas muy grandes (2.1m de diámetro), y analizando el diámetro del túnel de viento que es de 0.6m, se elaboraron aspas que soporten la velocidad de viento y a su vez permitan ser modificadas en ángulo y número. A continuación se muestran:

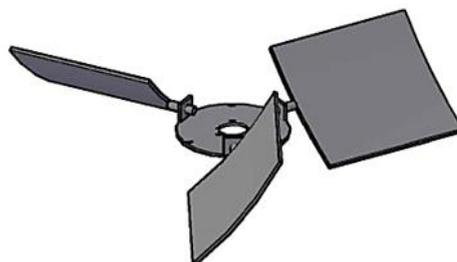


Fig. 1.18. Tripala.

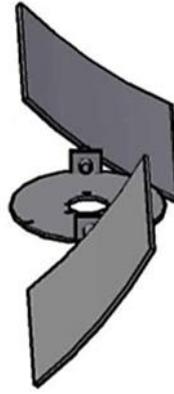


Fig. 1.19. Bipala.



Fig. 1.20. Monopala.

1.3.3. Anemómetro

Este equipo se utilizó en la calibración del túnel de viento el cual arrojó velocidades de viento directamente desde el motor; posteriormente se colocó en la parte trasera del aerogenerador, de esta manera se mide la velocidad que resulta después de la generación, las especificaciones del equipo se detallan a continuación:

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Rango de medición: | 0~30m/s ($\pm 5\%$) |
| Temperatura: | -10~45° C ($\pm 2^\circ$ C) |
| Función de iluminación de pantalla: | AUTOMÁTICA |



Fig. 1.21. Anemómetro.

Fuente: http://es.aliexpress.com/store/product/1pc-Digital-Air-velocity-Air-temperature-Anemometer-30M-S-LCD-Digital-Wind-Speed-Meter-Measuring-Instruments/226011_32427969922.html

1.3.4. Ventilador

Para este equipo se utilizó un motor de 1HP Siemens de dos polos (1LA7 073-2yA60), para una mayor velocidad y aspas de un ventilador:



Fig. 1.22. Motor 1HP Siemens

Fuente: Imagen obtenida del Catálogo Siemens

Las especificaciones técnicas se las puede encontrar en el Anexo 1.



Fig. 1.23. Aspas.

1.3.5. Controlador para Ventilador

Se utilizó un Controlador Siemens G110 el cual permite un manejo más estable sobre la frecuencia del motor y a su vez otorga una protección continua.



Fig. 1.24. Controlador para ventilador.

Fuente: <http://w3.siemens.com/mcsm/mc-drives/en/low-voltage-inverter/PublishingImages/g110.jpg>

1.3.6. DAQ

Se utilizó una CompactDAQ cDAQ-9174 la cual viene con cuatro sockets para módulos:



Fig. 1.25. CompactDAQ cDAQ-9174.

Este equipo forma parte del laboratorio de Energías Renovables de la Universidad del Azuay, el cual ha sido prestado para este proyecto.

En este equipo van incluidos 2 módulos: NI9205 (Entradas Analógicas) y NI9401 (entradas/salidas digitales).



Fig. 1.26. Módulo DAQ NI9205.



Fig. 1.27. Módulo DAQ NI9401.

1.3.7. LabVIEW

Se cuenta con LabVIEW 2011 el cual es suministrado por la Universidad del Azuay con una licencia estudiantil del mismo laboratorio de energías renovables, en éste se desarrolla todo el control y automatización del equipo, a su vez permite la toma de datos y posterior análisis de los mismos.

1.3.8. Sensor de Corriente

Para este proyecto se ha utilizado dos tipos de sensores de corriente, uno de 100A y dos de 5A, estos permiten visualizar cuanta potencia se está tomando de la red eléctrica, a su vez permite saber cuánta potencia está generando el generador eólico, se detallan a continuación:

100A.- Es un sensor de corriente de tipo no invasivo, que va conectado a la salida de tensión del aerogenerador, de esta manera se obtiene la corriente generada.

Especificaciones:

-) Input Current: 0~100A AC
-) Output Mode: 0~50mA
-) Non-linearity: $\pm 3\%$
-) Turn Ratio: 100A:0.05A
-) Resistance Grade: Grade B
-) Work Temperature: $-25^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$
-) Dielectric Strength(between shell and output): 1000V AC/1min 5mA
-) Leading Wire in Length: 1m
-) Open Size: 13mm x 13mm



Fig. 1.28. Sensor 100A.

Fuente: <http://www.electrodragon.com/product/yhdc-non-invasive-ac-current-sensor-100a30a/>

5A.- Sensor ACS712ELCTR-05B-T, se utiliza para medir la corriente que va al motor, de esta manera se sabe cuánta corriente está ocupando el ventilador, se va a tener dos sensores de este tipo debido a que la alimentación del ventilador es de 220V, o sea 2 fases de 110V.

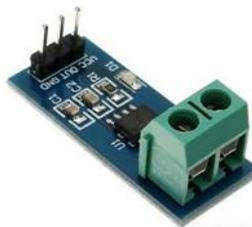


Fig. 1.29 Sensor 5A.

Fuente: http://www.electronicoscaldas.com/2036-thickbox_default/modulo-sensor-de-corriente-gy-712-con-ac-712elctr-05b-t.jpg

1.3.9. Sensor de Voltaje

Para este sensor, se utiliza un divisor de tensión a la mitad, colocando un partidor de tensión, con su voltaje de 12V nos envía una señal de 6V hacia la DAQ.

1.3.10. Computadora

Se cuenta con una Lenovo Y50-70, una máquina de alto rendimiento y velocidad, sus principales características son las siguientes:

Almacenamiento: 128Gb SSD

Memoria ram: 8.0GB PC3L-12800 DDR3L SDRAM 1600 MHz

Procesador: Intel® Core™ i7-4720HQ Processor (2.60GHz 1600MHz 6MB)

Gráficos: NVIDIA® GeForce GTX 960M 2GB

Pantalla: 15.6" FHD (1920 x 1080) display



Fig. 1.30 Computadora Lenovo Y50-70.

Fuente: <http://shop.lenovo.com/us/en/laptops/lenovo/y-series/y50/>

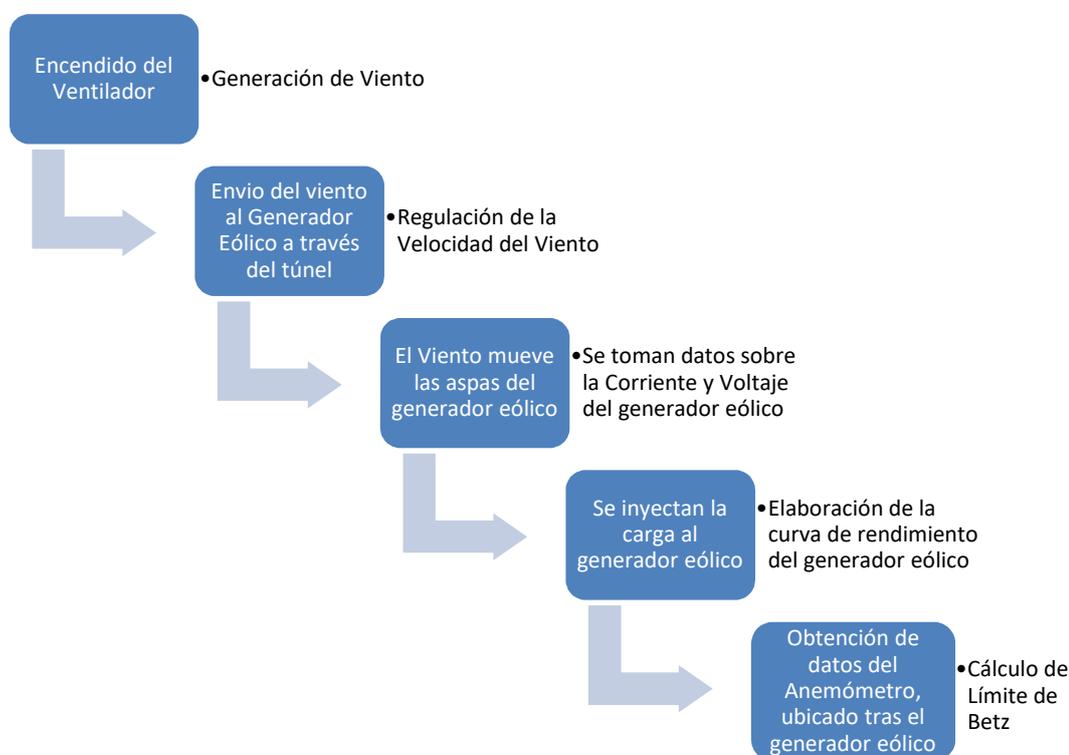
CAPÍTULO 2

CONSTRUCCIÓN

2.1. Banco de Pruebas

El banco de pruebas está diseñado para generar viento que permita mover un generador eólico, de esta manera se comprobará la eficiencia de diferentes diseños de aspas.

En el siguiente esquema se muestra los procesos para su funcionamiento:



2.2. Construcción del túnel de viento

Tomamos como referencia el punto anterior, en el que se detallan los esquemas de construcción del túnel de viento.

La estructura está elaborada con varillas de hierro en puntos estratégicos de tal forma que soporten la fuerza generada por el ventilador, ya que, debido a éste, existe una fuerte vibración, como se puede observar en la figura a continuación:



Fig. 2.1 Construcción túnel 1.

Su forma cilíndrica está hecha de planchas de acero y las uniones de estas planchas fueron tratadas para que quedaran lo más lisas posibles, con el objetivo de evitar las pérdidas por rozamiento generadas en su interior.



Fig. 2.2 Construcción túnel 2.

Para direccionar el viento se colocó dos barras verticales en el centro del túnel separadas a 20 cm de distancia, de esta manera no se tendrá mucha pérdida por fricción, en la siguiente imagen se pueden observar las mismas:



Fig. 2.3 Construcción túnel 3.

Para ejercer más presión dentro del túnel se dejó un espacio mínimo de 3mm entre las aspas del ventilador y el cilindro del túnel, hay que tener en cuenta que al momento de reducir el espacio entre estos, la misma vibración del ventilador puede provocar que las aspas toquen el cilindro y exista pérdidas considerables en el motor, esto puede provocar que se forcé el motor y ocurra un alto riesgo de quemarse; para llegar a la conclusión de separar los 3mm, se ejecutó varias pruebas las cuales permitieron identificar esta distancia mínima.



Fig. 2.4 Construcción túnel 4.

En el otro extremo se colocó el generador eólico en el cual tiene una separación desde las aspas al cilindro de 10cm, esto es necesario debido a que las aspas pueden girar sobre su mismo eje y esto disminuye la distancia de separación con el cilindro.



Fig. 2.5 Construcción túnel 5.

2.3. Placa de circuitos

Para la elaboración del banco de pruebas didáctico fue necesaria la utilización de la CompactDAQ National Instrument (9174), que nos permite obtener datos de los sensores colocados en el banco de pruebas. Esta tarjeta cuenta con dos módulos:

NI-9205.- Este módulo tiene como característica principal la adquisición de datos analógicos, los cuales son empleados para obtener los distintos valores de cada circuito. A continuación, se detallan los sensores y circuitos utilizados en el proyecto:

-) SCT013.- Es un sensor de corriente no invasivo utilizado para la obtención de la corriente del mini generador eólico.
-) SENSOR DE CORRIENTE 5A.- Este sensor mide la corriente que circula por cada fase del motor, de esta manera se podrá saber cuánta potencia se está utilizando para generar el viento dentro del túnel.
-) ANEMÓMETRO. - Sirve para medir la velocidad del viento y será colocado en la parte posterior del generador eólico. Este sensor tiene también la función de calibración, es decir, que por medio de este equipo se va a calibrar el ventilador

para que genere directamente la velocidad del viento sin la necesidad de colocar un anemómetro adicional para saber su potencia.

Ahora bien, teniendo tanto la velocidad de viento interna (dentro del túnel), como la externa (posterior al generador eólico) se puede calcular el límite de Betz.

Para la recolección de datos de estos sensores se necesitará sus respectivos circuitos que se detallan a continuación:

CIRCUITO DE SCT013.- Ya que la salida de este sensor está en mA (miliamperios), se convierte la señal en voltaje para poder tratarla de manera más fácil.

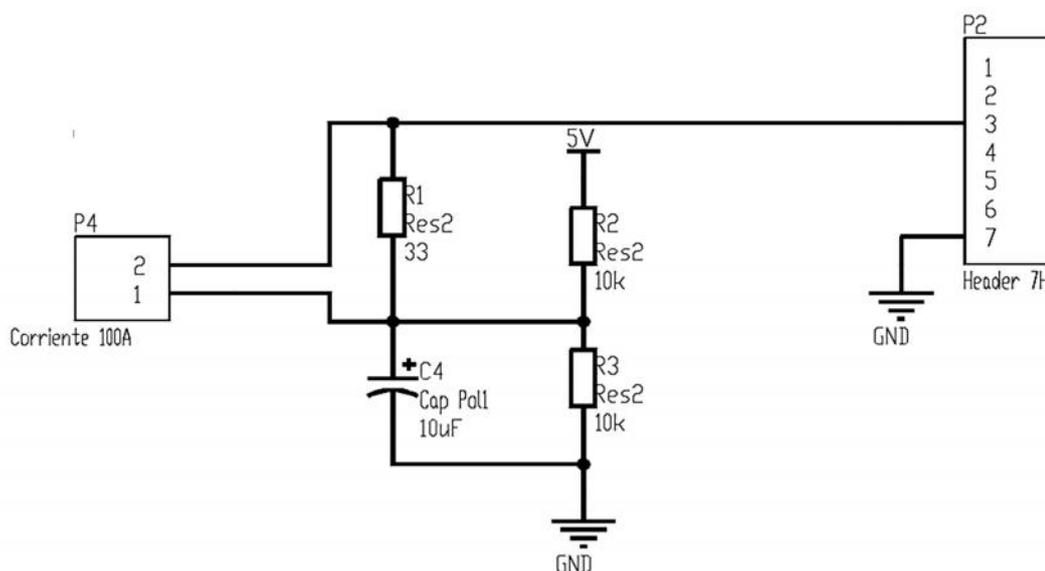


Fig. 2.6 Circuito sensor de corriente 100A.

➤ Cálculo. - Antes de hacer algún cálculo se debe tomar en cuenta los rangos de medición que se requieren, como este sensor tiene un rango máximo de 100A, utilizaremos este rango, en caso de requerir rangos menores se puede modificar los datos.

$$I_{pp} = I_{prim} * \sqrt{2} = 100 * \sqrt{2} = 141.42A$$

Dónde:

I_{pp} = Corriente pico en el primario.

I_{prim} = Corriente en el primario.

El rango de medición máximo es de 100A en el primario y 50mA en el secundario. El número de vueltas en el primario es 1, con esto se puede calcular el número de vueltas en el bobinado secundario.

$$I_{\text{pri_max}} * N_{\text{prim}} = I_{\text{Sec_max}} * N_{\text{Sec}}$$

$$100 * 1 = 0.05 * N_{\text{Sec}}$$

$$N_{\text{Sec}} = 2000$$

Dónde:

$I_{\text{pri_max}}$ = Corriente máxima en el primario.

N_{prim} = Número de vueltas en el primario.

$I_{\text{Sec_max}}$ = Corriente máxima en el secundario.

N_{Sec} = Número de vueltas en el secundario.

Entonces tenemos que, la corriente pico en el bobinado secundario es:

$$I_{\text{ps}} = \frac{I_{\text{pp}}}{2000} = \frac{141.42}{2000} = 0.0707 \text{ A}$$

Dónde:

I_{ps} = Corriente pico en el secundario.

Como se puede observar en el diagrama anterior, tanto R2 como R3 hacen un partidor de tensión a la mitad:

$$R_2 = R_3$$

Entonces:

$$V_{\text{ref}} = \frac{V * R_3}{R_2 + R_3} = V * \frac{R_3}{2R_3} = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ V}$$

Dónde:

R_3, R_2 = Resistencias del partidor .

V_{ref} = Voltaje de referencia.

V = Voltaje de alimentación (5V).

Ahora bien, se determina la resistencia (R1).

$$R_1 = \frac{V_{ref}}{I_{ps}} = \frac{2.5}{0.0707} = 35.36 \text{ ohm}$$

Dónde:

R_1 = Resistencia de carga ideal .

Como no existe en el mercado una resistencia de ese valor, se toma la más próxima, en este caso 33 ohm.

CIRCUITO DE SENSOR DE CORRIENTE 5A.- Para la conexión de estos sensores, hay que alimentarlos con 5V, y el circuito integrado del mismo sensor se encarga de darnos una señal optimizada.

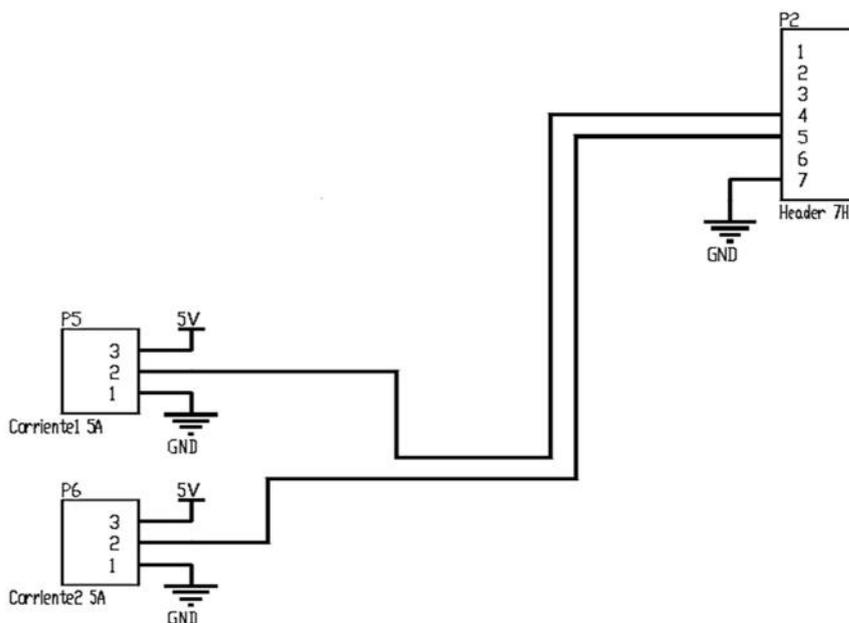


Fig. 2.7 Circuito sensor de corriente 5A.

- Cálculo. - Estos sensores no requieren un circuito aparte ya que su rectificación y linealización vienen incluidos en los mismos.

CIRCUITO DEL ANEMÓMETRO. - Para este equipo la conexión es directa, debido a que el equipo nos da una onda cuadrada, el tratamiento de la señal se lo hace mediante software; en principio se tenía pensado colocar 2 anemómetros, por ese motivo se tiene 3 conectores.



Fig. 2.8 Circuito del Anemómetro.

- Cálculo. - Estos sensores no requieren un circuito aparte ya que su rectificación y linealización vienen incluidos en los mismos.

CIRCUITO DE VOLTAJE DE GENERADOR EÓLICO. - Debido a que la tensión del generador eólico es de 12V (circuito cerrado) y 18V (circuito abierto) únicamente colocamos un partidor de tensión para que no envíe datos mayores a 10v al módulo DAQ, siendo así para la tensión máxima de 18V el envío de la señal de 9V.

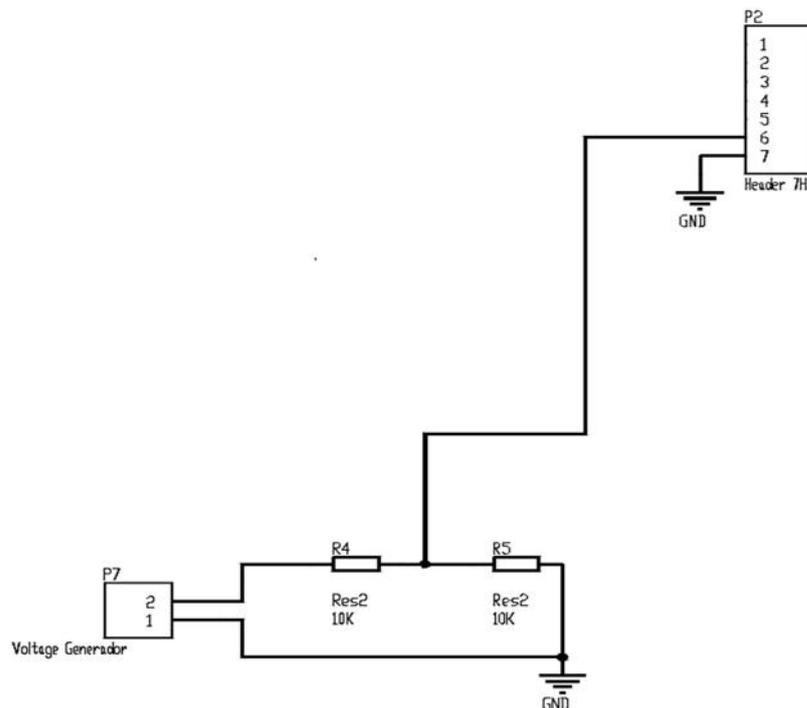


Fig. 2.9 Circuito de Voltaje.

- Cálculo. - Para la medición de este dato, se utiliza un partidor debido a que el voltaje que se necesita leer es alto en comparación con lo permitido con la tarjeta DAQ.

Tanto R4 como R5 hacen un partidor de tensión a la mitad:

$$R_4=R_5$$

Entonces:

$$V_{out}=V_{in} * \frac{R_5}{R_4+R_5} = V_{in} * \frac{R_5}{2R_5} = V_{in}/2$$

Dónde:

R₄, R₅=Resistencias del partidor .

V_{out}=Voltaje de salida.

V_{in}=Voltaje de ingreso.

FUENTES DE PODER. - Adicional a esto se elaboró tres fuentes de alimentación de corriente continua (+12, -12, +5) las cuales son utilizadas para alimentación de sus componentes.

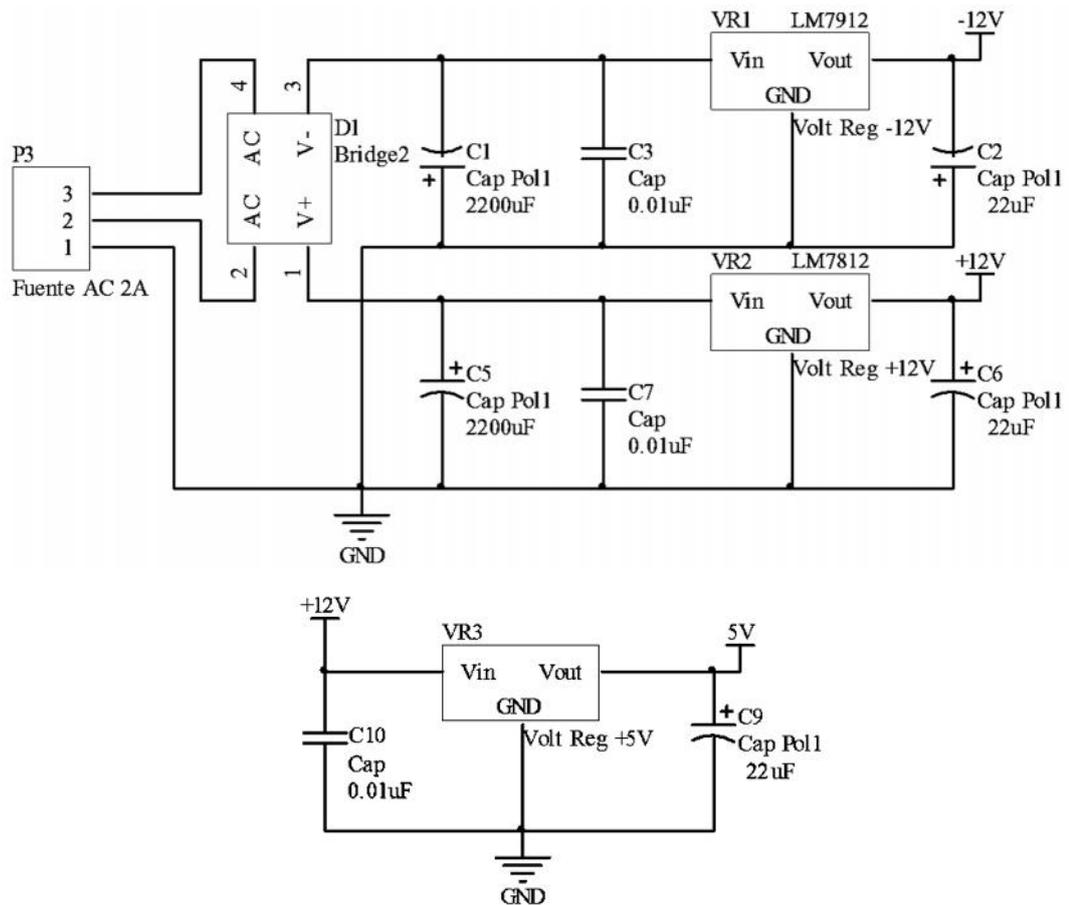


Fig. 2.10 Circuito fuentes de alimentación.

➤ Cálculo. - Las fuentes están conformadas de un circuito en el cual se detalla, la transformación, rectificación, filtro y regulación.

Transformador:

Para que la fuente funcione de manera óptima, se utiliza un transformador con un voltaje superior al requerido, 110-15VAC, a su vez se utiliza un transformador de toma central debido a que se utiliza tanto los voltajes negativos como los positivos, -12v +12v.

Cálculo de Fuente Fija de +12V:

Datos:

-) Voltaje RMS Principal del transformador: $V_{Prms}=125,5V$
-) Voltaje RMS Secundario del transformador: $V_{rms}=15,13V$
-) Corriente Secundario del transformador: $I=1000mA$
-) Caída de tensión de cada diodo es: $V_d=0,7V$
-) Frecuencia de la red: $F_r = 60Hz$
-) Corriente de consumo: $I_c=500mA$

Rectificador:

Como en el rectificador de puente conducen 2 diodos al mismo tiempo, la caída de estos se suma, entonces tenemos que $V_d=1,4V$

$$V_{max}=(V_{rms}*\sqrt{2})-V_d=21,4-1,4=20V$$

Dónde:

V_{max} =Es la tensión pico de salida del puente rectificador

Filtro:

Condensador C5. - Se calcula el valor del condensador según la regla del 10%, esto hará que su tensión de rizado sea del 10% o menor.

$$C_5=\frac{5*I_c}{F_r*V_{max}}=\frac{5*0,5}{60*20}=\frac{2,5}{1200}=0,002083=2083\mu F$$

Se toma el condensador con un valor superior lo más aproximado posible, en este caso 2200uF.

Regulador:

El condensador C7. - Filtra el ruido que puede producirse en la pista que los une, para esto se utiliza 0,01uF.

El Regulador LM7812. – Estabiliza el voltaje a 12V, según la hoja de datos, la tensión de ingreso debe ser mayor en 2V (V_D) para que funcione adecuadamente. (Ver Anexo 4).

$$V_{ppr}=10\% * V_{max}=0.1 * 20=2V$$

$$V_{min}=V_{max}-V_{ppr}=20-2=18V$$

Dónde:

V_{ppr} =Es la tensión pico pico rizada.

V_{min} =Es la tensión mínima a la entrada del regulador.

Como la entrada del regulador debe ser $V_{ent}=12+2=14V$, que es lo recomendable, entonces se debe cumplir la siguiente condición:

$$\begin{array}{l} |V_{min}| > |V_{ent}| \\ 18V > 14V \end{array}$$

Dónde:

V_{ent} =Es la tensión de entrada recomendada para el regulador.

Esto quiere decir que el regulador LM7812 trabajará en óptimas condiciones.

El condensador C6. - Se usa para mejorar el rizado de la rectificación, el rango puede estar entre 10 y 47uF, el utilizado es de 22uF.

Cálculo de Fuente Fija de -12V:

Esta fuente se la calcula de la misma forma que la fuente de +12V, la diferencia es que se toma los valores negativos del Puente de Gretz.

Rectificador:

Conducen 2 diodos al mismo tiempo, la caída de estos se suma, entonces tenemos que $V_d = -1,4V$.

$$V_{\max} = (V_{\text{rms}} * \sqrt{2}) - V_d = -21,4 + 1,4 = -20V$$

Filtro:

Condensador C1. - Se calcula el valor del condensador según la regla del 10%, esto hará que su tensión de rizado sea del 10% o menor.

$$C_5 = \frac{5 * I}{F_r * V_{\max}} = \frac{5 * 0,5}{60 * (-20)} = - \frac{2,5}{1200} = -0,002083 = -2083 \mu F$$

El valor negativo significa que el condensador va invertido.

Se toma el condensador con un valor superior lo más aproximado posible, en este caso 2200 μF .

Regulador:

El condensador C3. - Filtra el ruido que puede producirse en la pista que los une.

El Regulador LM7912. – Estabiliza el voltaje a -12V, según la hoja de datos, la tensión de ingreso debe ser mayor en 1,1V (V_D) para que funcione adecuadamente. (Ver Anexo 5).

$$V_{\text{ppr}} = 10\% * V_{\max} = 0,1 * -20 = -2V$$

$$V_{\min} = V_{\max} - V_{\text{ppr}} = -20 + 1,1 = -18,9V$$

Como la entrada del regulador debe ser $V_{\text{ent}} = -12 - 2 = -14V$, que es lo recomendable, entonces se debe cumplir lo siguiente:

$$|V_{\min}| > |V_{\text{ent}}|$$

$$18,9V > 14V$$

Esto quiere decir que el regulador LM7912 trabajará en óptimas condiciones.

El condensador C2. - Se usa para mejorar el rizado de la rectificación.

Cálculo de Fuente Fija de +5V:

Para esta fuente se utiliza el Voltaje +12V, que ya se lo rectificó y reguló anteriormente.

Regulador:

El condensador C10. - Filtra el ruido que puede producirse en la pista que los une, para esto se utiliza 0,01uF.

El Regulador LM7805. – Estabiliza el voltaje a 5V, según la hoja de datos, la tensión de ingreso debe ser mayor en 2V (V_D) para que funcione adecuadamente. (Ver Anexo 4).

Tensión de entrada: $V_{in}=+12V$

Como la entrada del regulador debe ser $V_{ent}=5+2=7V$, que es lo recomendable, entonces se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{|V_{in}|}{|V_{ent}|} > \frac{12V}{7V}$$

Dónde:

V_{ent} = Es la tensión de entrada recomendada para el regulador.

Esto quiere decir que el regulador LM7805 trabajará en óptimas condiciones.

El condensador C9. - Se usa para mejorar el rizado de la rectificación, el rango puede estar entre 10 y 47uF, el utilizado es de 22uF.

MODULO NI-9401.- Este módulo cuenta con ocho salidas/entradas digitales, las cuales nos permiten controlar el motor desde la PC y a su vez accionar el botón de emergencia. A continuación se detallan los circuitos empleados:

CIRCUITO CONVERSIONER DIGITAL ANALÓGICO. - Este circuito sirve para controlar la velocidad del ventilador, cuenta con una resolución de 8 bits que es enviada desde la computadora hasta el integrado DAC (0808) el cual transforma la salida digital en una salida analógica para de esta forma controlar el ventilador.

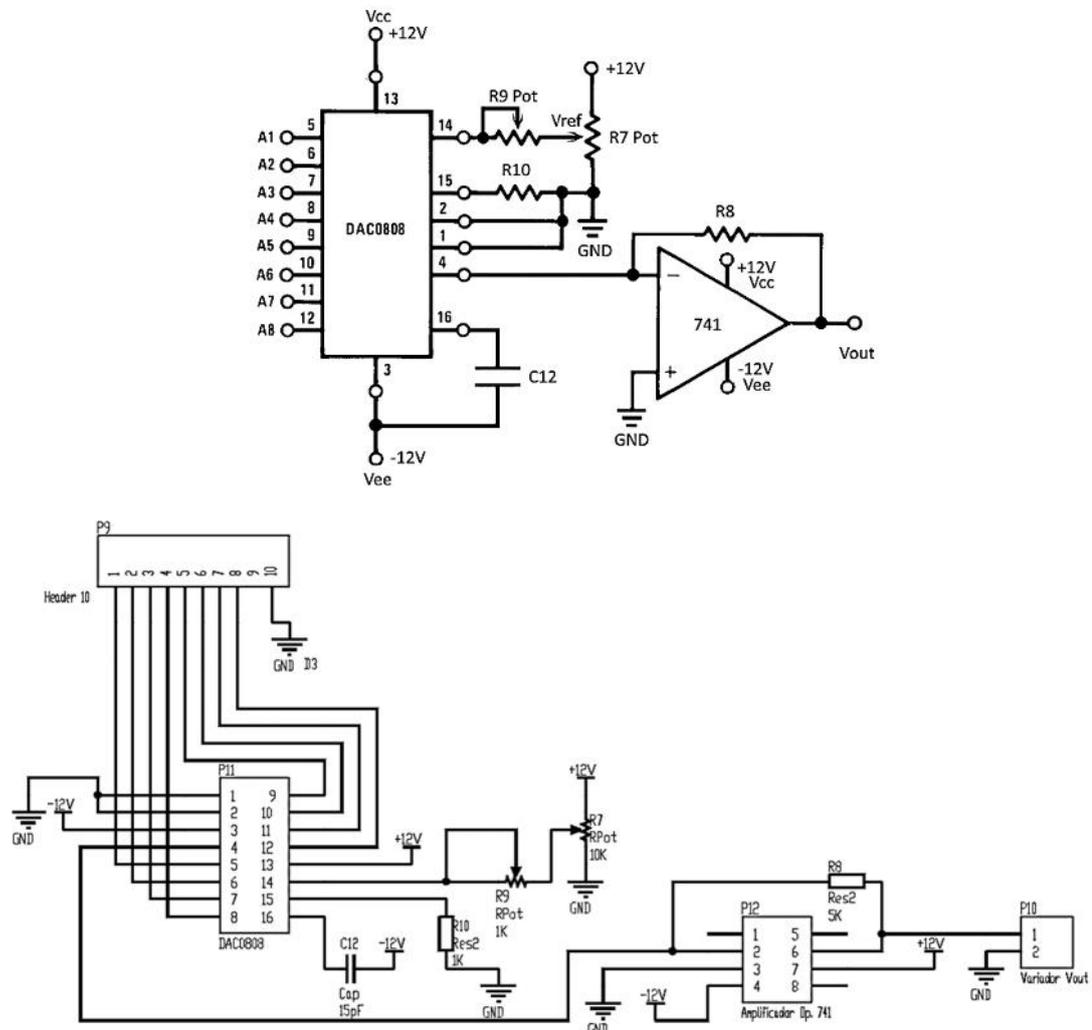


Fig. 2.11 Circuito conversor digital analógico.

➤ Cálculo. - El circuito está basado en las hojas de datos del DAC0808 (ver Anexo 6), con modificaciones para variar el voltaje de referencia (Vref), y obtener una salida máxima de 10V (Vout).

Datos:

Convertidor Digital-Analógico de 8 bits: DAC0808, se utiliza solo los 7 bits menos significativos.

$A_N = 0$ si está en un nivel lógico bajo, y 1 si está en un nivel lógico alto.

Las siguientes formulas están extraídas de la hoja de datos del componente DAC0808.

$$I_{out} = K \left(\frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \frac{A3}{8} + \frac{A4}{16} + \frac{A5}{32} + \frac{A6}{64} + \frac{A7}{128} + \frac{A8}{256} \right); F1$$

$$K \cong \frac{V_{ref}}{R9}; F2$$

$$V_{out} = R8 * I_{out}$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R8}; F3$$

Dónde:

I_{out} = Corriente de salida.

A_N = Nivel lógico de cada bit.

V_{ref} = Voltaje de referencia, depende directamente del potenciómetro R7.

R9 = Resistencia de referencia.

V_{out} = Voltaje de salida.

R8 = Resistencia de realimentación.

Ahora bien, reemplazamos F2 y F3 en F1:

$$\frac{V_{out}}{R8} = \frac{V_{ref}}{R9} * \left(\frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \frac{A3}{8} + \frac{A4}{16} + \frac{A5}{32} + \frac{A6}{64} + \frac{A7}{128} + \frac{A8}{256} \right)$$

Despejando V_{out}

Debido a que se utiliza sol 7 bits, $A1=0$; entonces:

$$V_{out} = \frac{V_{ref} * R8}{R9} * \left(0 + \frac{A2}{4} + \frac{A3}{8} + \frac{A4}{16} + \frac{A5}{32} + \frac{A6}{64} + \frac{A7}{128} + \frac{A8}{256} \right)$$

$R8 = 5k\Omega$

$$V_{out} = \frac{V_{ref} * 5k}{R9} * 0,496$$

Tenemos 2 maneras de limitar el voltaje V_{out} , mediante el potenciómetro $R9=1k$ y el voltaje de referencia que depende directamente del potenciómetro R7.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de V_{out} , variando el voltaje de referencia con $R_9=1\text{kohm}$.

| | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|
| $V_{out}(V)$ | 2,48 | 4,96 | 7,44 | 9,92 | 12,4 | 14,88 |
| $V_{ref}(V)$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |

V_{out} con $R_9=0,5\text{kohm}$.

| | | | |
|--------------|------|------|-------|
| $V_{out}(V)$ | 4.96 | 9,92 | 14,88 |
| $V_{ref}(V)$ | 1 | 2 | 3 |

Como el ingreso máximo de la tarjeta de adquisición de datos NI-9401 es de 10V, se da valores de V_{out} y R_9 que en sus cálculos no sobrepasen este voltaje:

$$R_9 = 1\text{kohm}$$

$$V_{ref} = 4V$$

$$V_{out} = 9,92V$$

CIRCUITO DE BOTÓN DE EMERGENCIA. - Este circuito necesita un ingreso digital desde la computadora, el cual hará que se corte el suministro de energía del ventilador, provocando que se detenga el mismo.

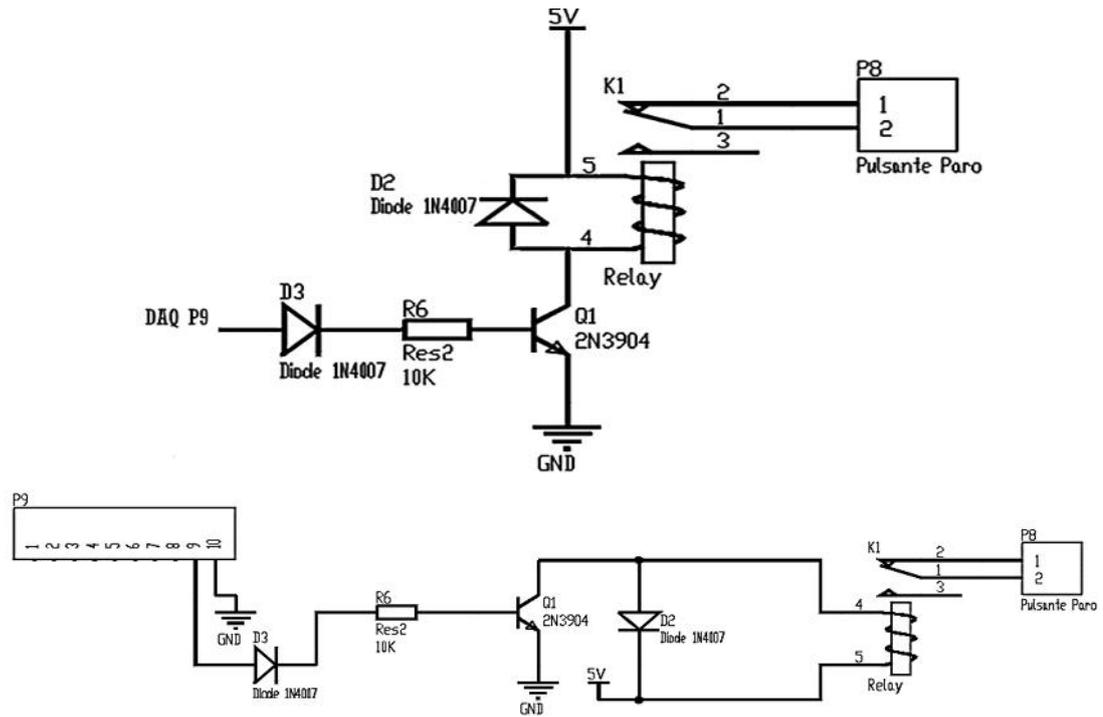


Fig. 2.12 Circuito botón de emergencia.

- Cálculo. - Estos cálculos se los realiza mediante la suma de los voltajes entre la base y el emisor del transistor Q1, y sabiendo la corriente que se utiliza por parte del relay para su activación, esto se puede observar en la hoja de datos del mismo (Anexo 7).

$$V_D = V_{D3} + V_B + I_B * R_6$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}}$$

Dónde:

$V_{DAQ}=5\text{ V}$; Voltaje a la salida del DAQ, 0V nivel lógico bajo y 5V nivel lógico alto.

$V_{BE}=0,7\text{ V}$; Caída de tensión entre la Base y el Emisor.

$V_{D3}=0,7\text{ V}$; Caída de tensión en el diodo D3.

R_6 ; Resistencia en la Base del transistor.

I_B ; Corriente que circula por la resistencia R_6 .

$I_C=0,0714\text{ A}$ 0.08A ; Corriente necesaria para que trabaje el Relay K_1 .

$h_{FE}=253$; Ganancia de corriente del transistor Q_1 .

$$V_{DAQ}=V_{D3}+V_{BE}+\frac{I_C}{h_{FE}}*R_6$$

$$R_6 = \frac{V_{DAQ} - V_{BE} - V_{D3}}{\frac{I_C}{h_{FE}}} = \frac{5 - 0,7 - 0,7}{\frac{0,08}{253}} = 11385 \text{ ohm}$$

El valor de la resistencia para el circuito es de 11,38 Kohm, se toma un valor lo más aproximado posible, en este caso 10Kohm, sabiendo que a más baja resistencia, mayor será la corriente en I_C .

Conexiones DAQ National Instrument a Circuitos. - Estas conexiones se realizan mediante cable plano a los diferentes pines de la tarjeta DAQ National Instrument.

2.4. Programa LabVIEW

Para esto se ha creado un proyecto nuevo el cual va a estar enlazado con los programas anteriores del Laboratorio de Energías Renovables, este proyecto tiene tres programas, los cuales se detallan a continuación:

Entrada Analógica. - En este programa se adquieren los datos de todos los sensores que se van a conectar a la Pc, para esto se utiliza la tarjeta de adquisición de datos NI9205 de National Instrument, a continuación se detallan los componentes que forman cada sensor, en el siguiente orden:

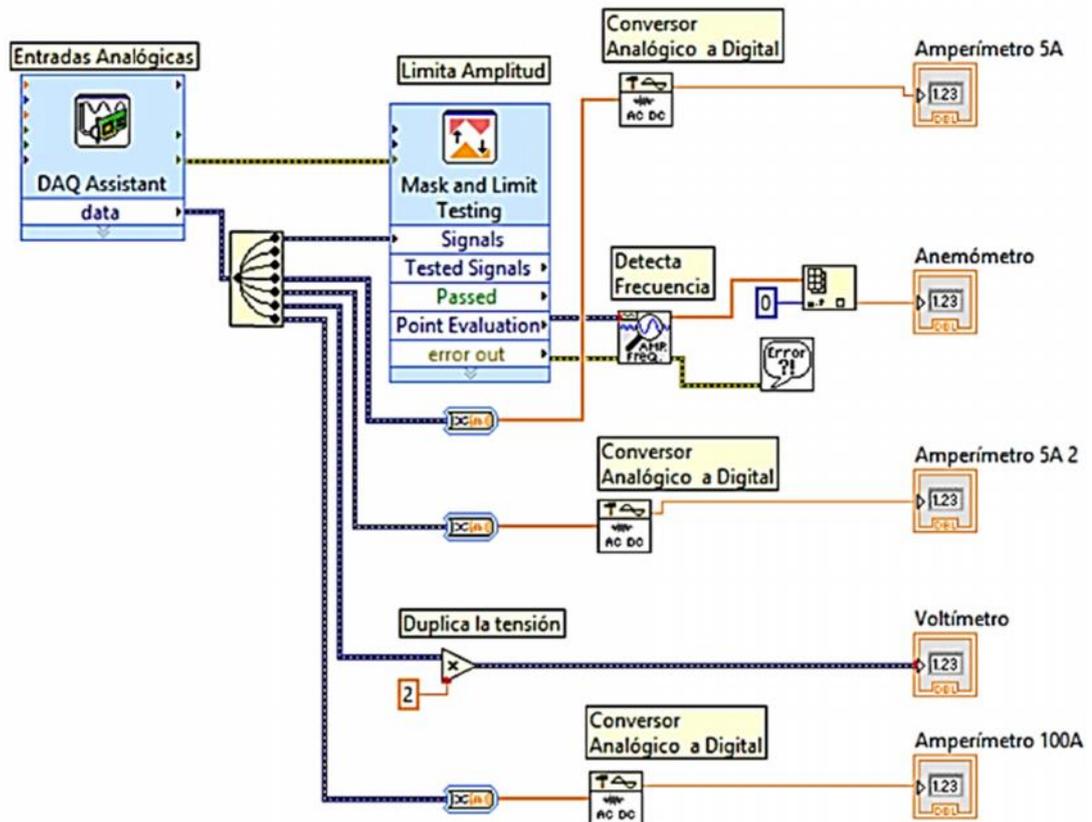


Fig. 2.13 Programa Entradas Analógicas.

-) Anemómetro #1.
-) Anemómetro #2 (NO CONECTADO).
-) Sensor de corriente 100A #1 (NO CONECTADO).
-) Sensor de corriente 5A #1.
-) Sensor de corriente 5A #2.
-) Sensor de Voltaje.
-) Sensor de corriente 100A #2.

Anemómetros.- Antes de comenzar el tratamiento de estas señales hay que tomar en cuenta que este sensor envían datos en forma de onda cuadrada, el problema de este sensor es que los datos se recolectan a través de un puerto analógico, el cual además de la onda cuadrada de 0 a 5V, también adquiere el ruido generado en los picos tanto de 0 y 5V; para esto se utiliza un limitador de amplitud, esto quiere decir que se limita tanto los picos altos como los bajos, es decir todo valor menor a 1V va arrojar 0V y todo dato entre 4.5V y 5.5V será igual a 5V.

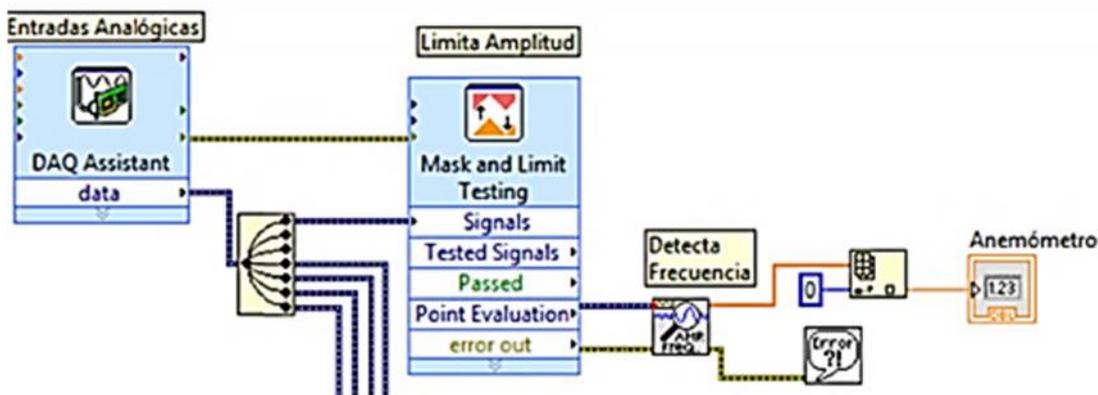


Fig. 2.14 Programa Anemómetros.

A continuación se detecta la frecuencia de la onda, en este resultado se obtiene un arreglo de datos, por lo que se procede a separar el dato con un Index array, y mostrarlo en un Indicador Numérico.

Sensores de corriente de 5A.- Para estos sensores solo es necesaria la conversión de señal alterna (AC) a continua (DC) y se muestra en un Indicador Numérico.

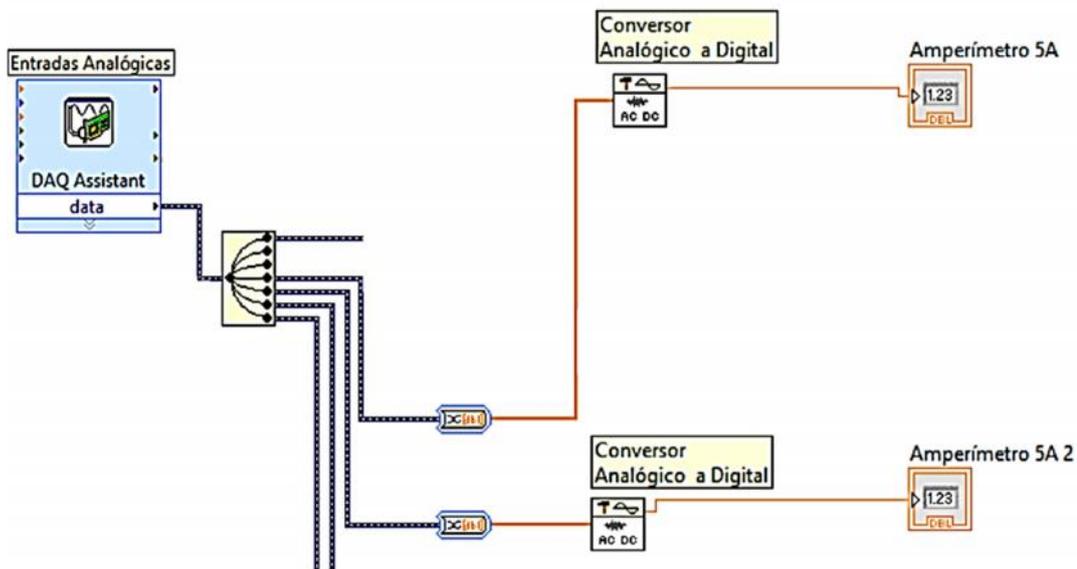


Fig. 2.15 Programa Sensor de corriente 5A.

Sensor de Voltaje.- Teniendo en cuenta que se colocó un divisor de tensión en el circuito de la placa, en el procesamiento se tiene que recuperar esta división, por lo que se multiplica por dos y se muestra en un Indicador Numérico.

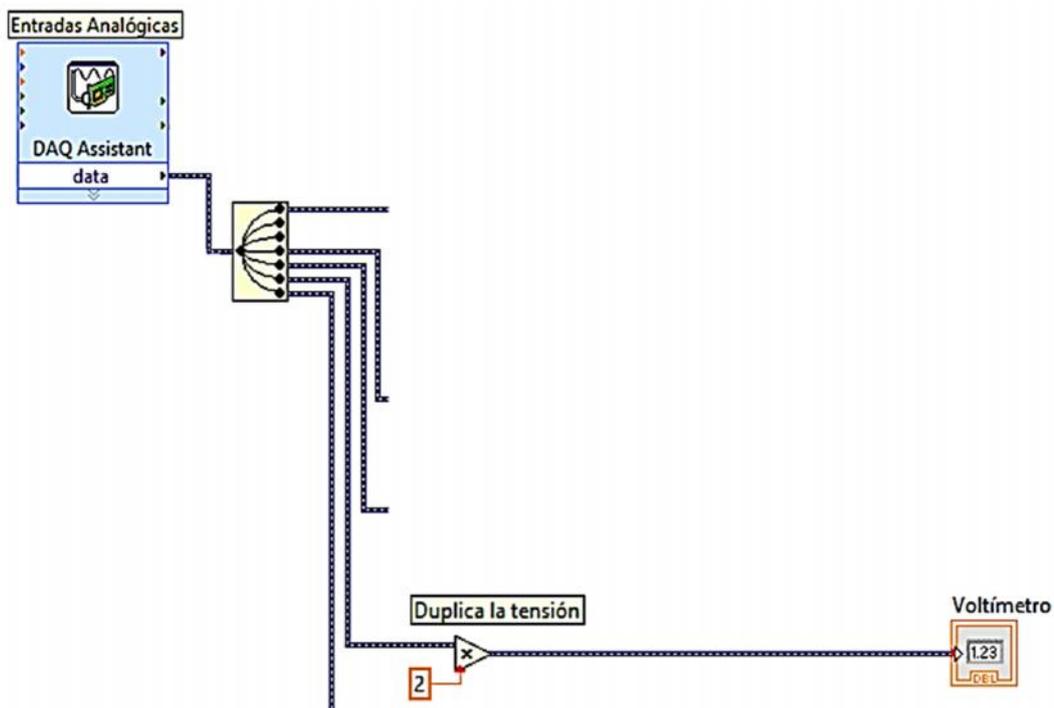


Fig. 2.16 Programa Sensor de Voltaje.

Sensor de corriente 100A #2.- Para este sensor solo es necesario la conversión de señal alterna (AC) a continua (DC) y se muestra en un Indicador Numérico.

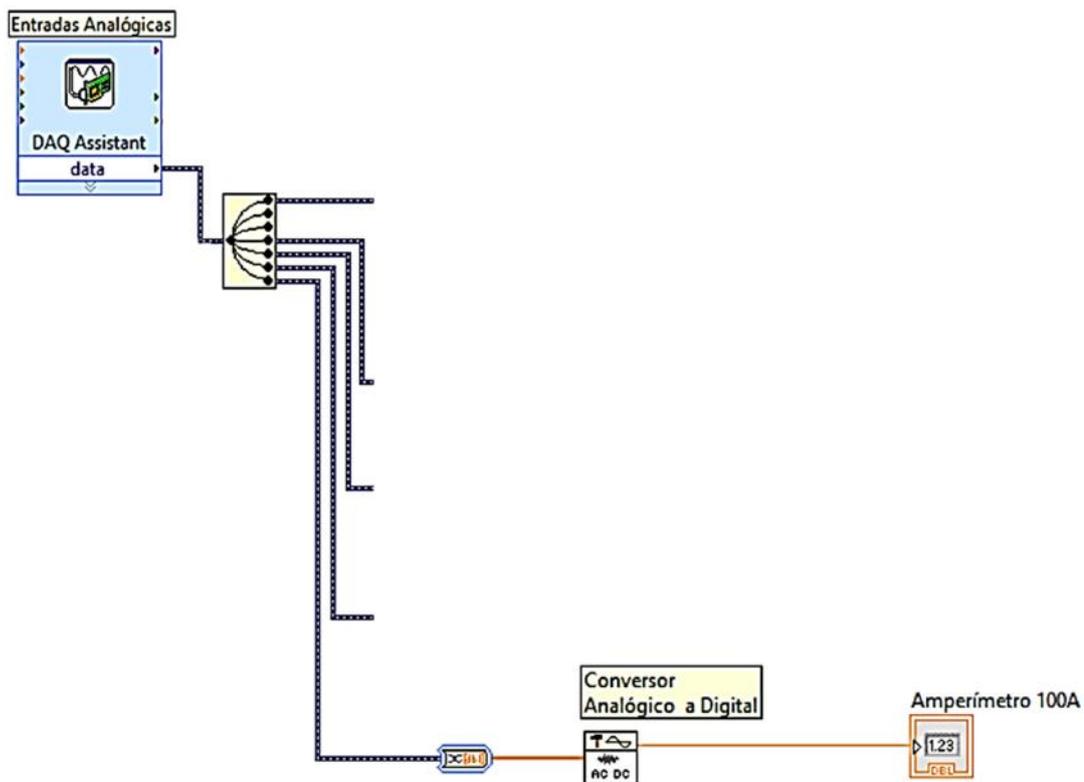


Fig. 2.17 Programa Sensor de corriente 100A.

Para enlazar este programa con el programa final se crean enlaces de los Indicadores Numéricos de todos los sensores utilizados, evitando los sensores no conectados.

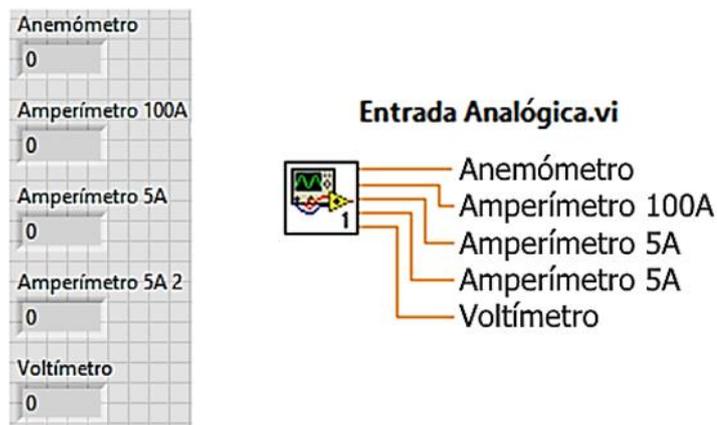


Fig. 2.18 Enlace programas EntradaAnalógica-Final.

Salida Digital.- En este programa se va a manejar el ventilador mediante salidas digitales con una resolución de 6 bits, de esta manera puede hacer una conversión de Digital a Analógico con circuitos, utilizando un DAC0808, aunque este DAC tiene la resolución de 8bits, solo se va a utilizar 6, la conexión del DAC se muestra como sigue:

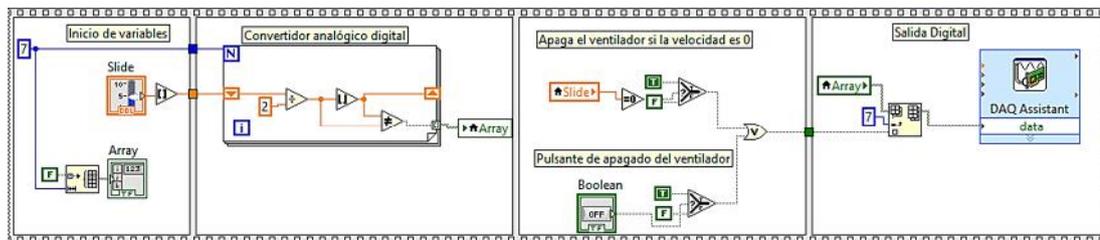


Fig. 2.19 Programa Salida Digital.

Ese programa va a constar de 4 frames, el primero iniciara un arreglo de 7 valores y un Slide en el que se va a variar la velocidad del ventilador; para el segundo frame se hará la conversión analógica digital; en el tercer frame se coloca el pulsante de paro del ventilador, y se adjunta una regla la cual señala, si el valor analógico es cero, el ventilador se apaga; para el cuarto y último frame se integra el pulsante de paro al arreglo del conversor analógico digital y luego se procede a enviar a la salida digital del DAQ.

Para enlazar este programa con el programa Final se crean enlaces del pulsante de paro y del slide de velocidad de viento.

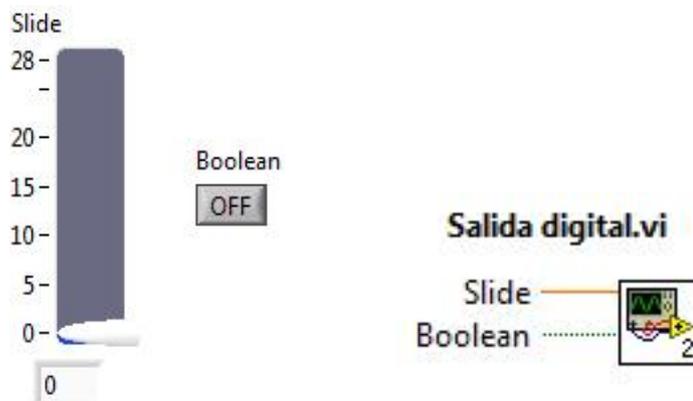


Fig. 2.20 Enlace programas Salida Digital-Final.

Final.- En este programa se enlazan los programas Entrada Analógica y Salidas Digitales, de esta manera se organiza el proyecto total y le da una mejor presentación.

A continuación se muestran las pantallas principales del proyecto:

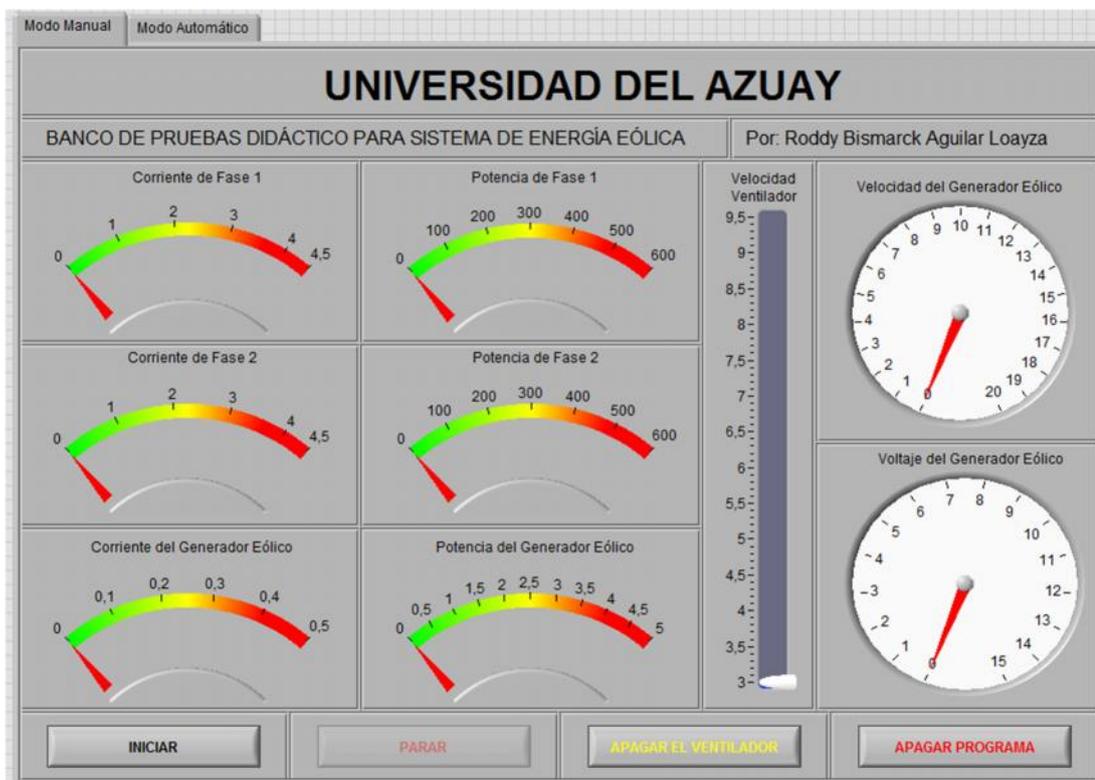


Fig. 2.21 Modo Manual.

Fig. 51, este modo está previsto para pruebas a determinadas velocidades, se puede dar rangos de viento desde 3 hasta 9.5 m/seg, según la necesidad que se plantee, obteniendo todas las mediciones de los sensores: corriente y potencia de fases, corriente, voltaje y potencia del generador eólico, velocidad de viento en el generador eólico.

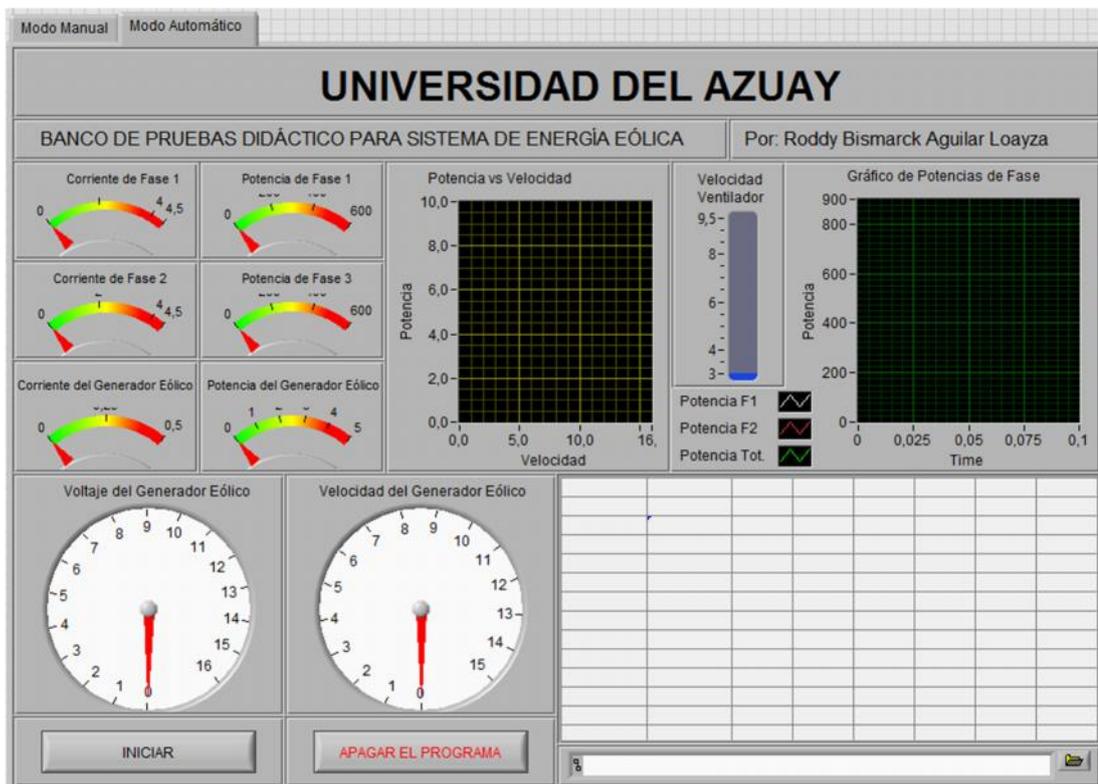


Fig. 2.22 Modo Automático.

Fig. 52, este modo está previsto para las pruebas automáticas, al dar iniciar, se incrementará la velocidad del viento en el túnel en rangos de 3 segundos, al igual que en el modo manual, se tendrá la verificación gráfica de cada sensor, además de esto está programado para que arroje un reporte en tabla de datos de todos los sensores medidos.

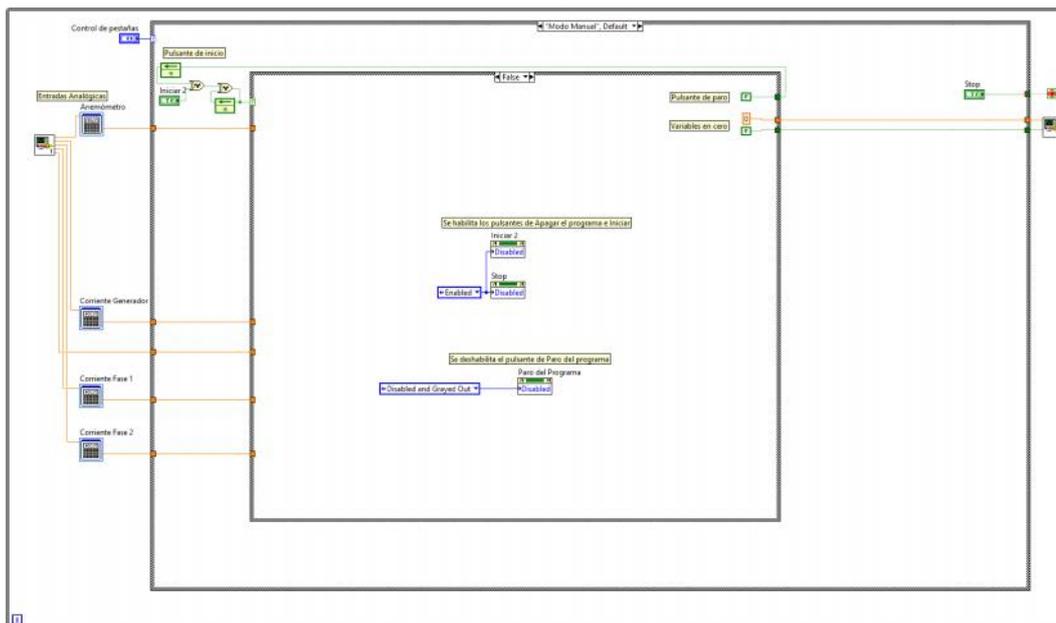


Fig. 2.23 Programa Final.

Como el programa es un poco extenso se lo dividirá en varias partes:

Entradas Analógicas. - En esta parte del programa se obtienen las variables correspondientes del programa Entradas Analógicas, luego de esto se procesa las señales haciéndolas lineales.

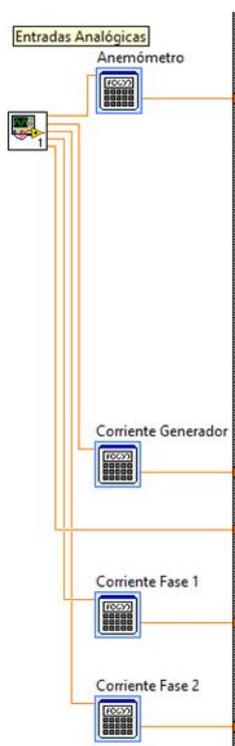


Fig. 2.24 Entradas Analógicas.

Fórmula Corriente del Generador Eólico.- Esta fórmula se determinó por medio de un Amperímetro conectado en serie al sensor de Corriente 100A.

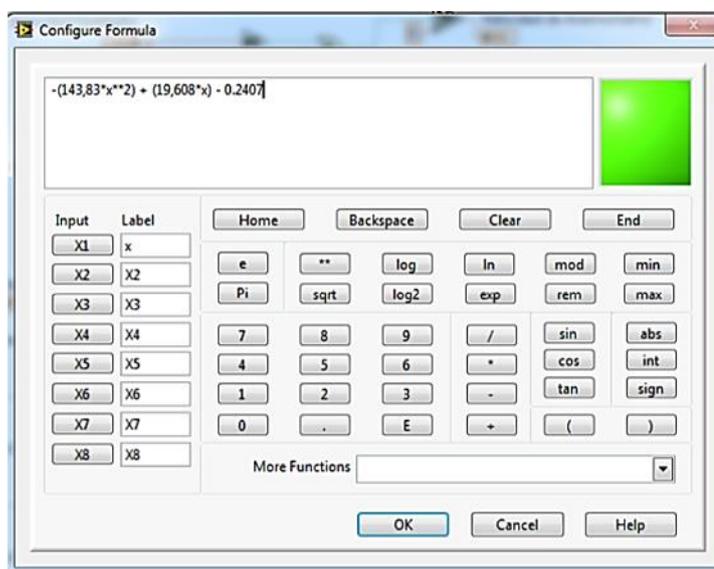


Fig. 2.25 Fórmula Corriente del Generador Eólico

Fórmula de Anemómetro.- Esta fórmula se determinó por medio de un anemómetro externo, para esto se obtuvo datos de forma manual del anemómetro.

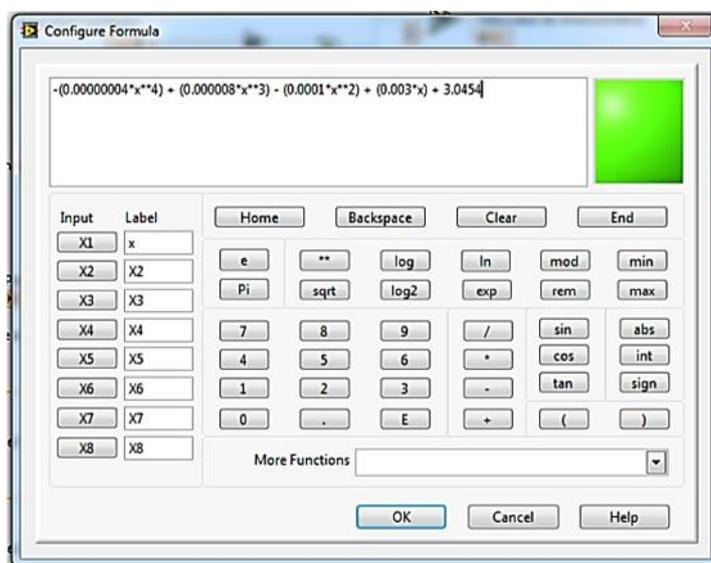


Fig. 2.26 Fórmula de Anemómetro

Fórmula Corriente Fase 1.- Esta fórmula se determinó por medio de un Amperímetro conectado en serie al sensor de Corriente 5A.

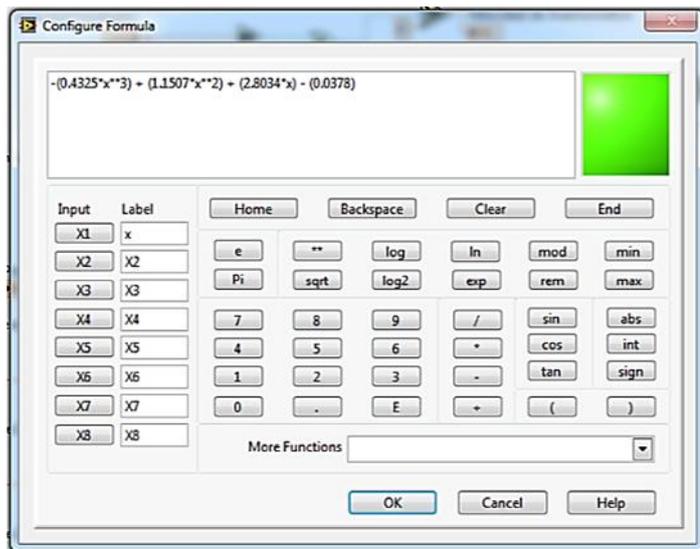


Fig. 2.27 Fórmula Corriente Fase 1

Fórmula Corriente Fase 2.- Esta fórmula se determinó por medio de un Amperímetro conectado en serie al sensor de Corriente 5A.

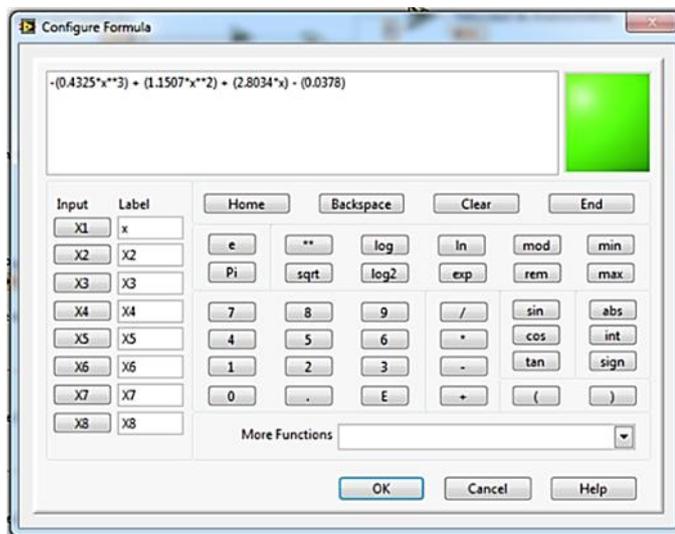


Fig. 2.28 Fórmula Corriente Fase 2

Control de Pestañas.- En las que se visualizan y escogen los modos de funcionamiento: Modo Manual y Modo Automático



Fig. 2.29 Control de Pestañas

Modo Manual. - En esta parte del programa se muestra todas las variables recolectadas por los sensores, a su vez se tiene los controles manuales del sistema; a continuación, se explica cada una de las conexiones.

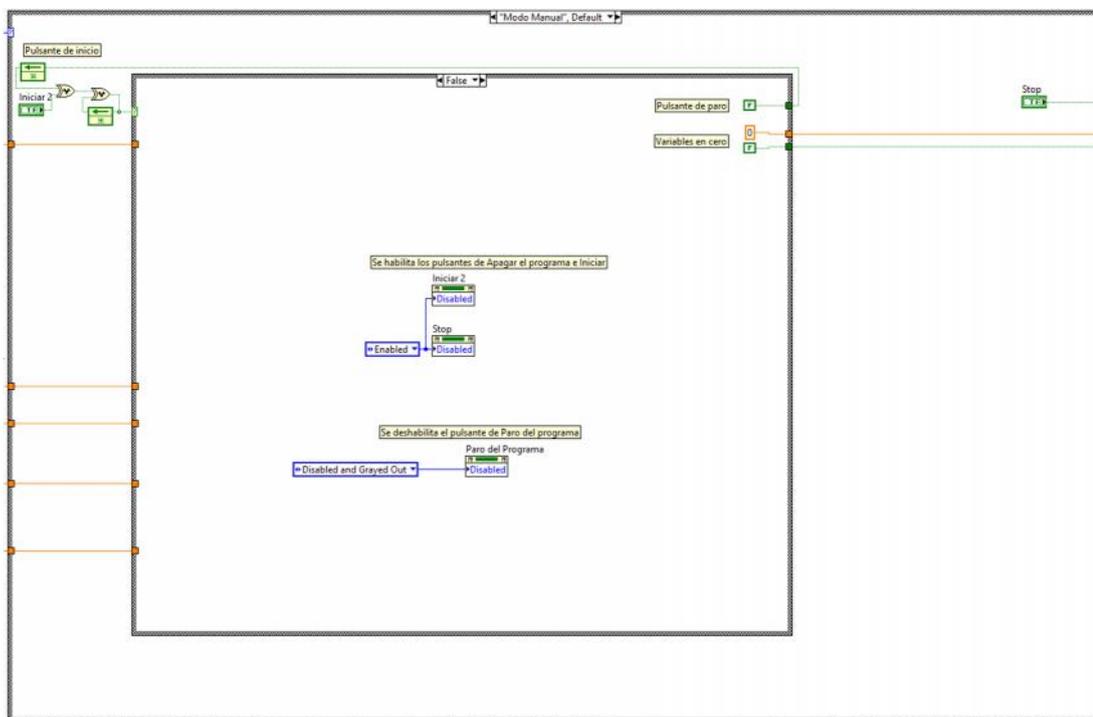
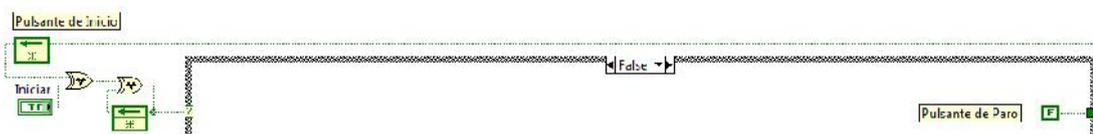


Fig. 2.30 Modo Manual

Explicación:

Es la configuración del pulsante de “Inicio”, hay que tener en cuenta que aquí se podía poner un interruptor que remplace todas las conexiones, pero se da una mejor presentación con solo el pulsante, su función es mantener activado el programa en Modo manual hasta que se presione el pulsante de “Paro”.



En esta primera parte del Modo Manual se explica el caso “FALSE”, o sea cuando aún no se ha pulsado “Iniciar”.

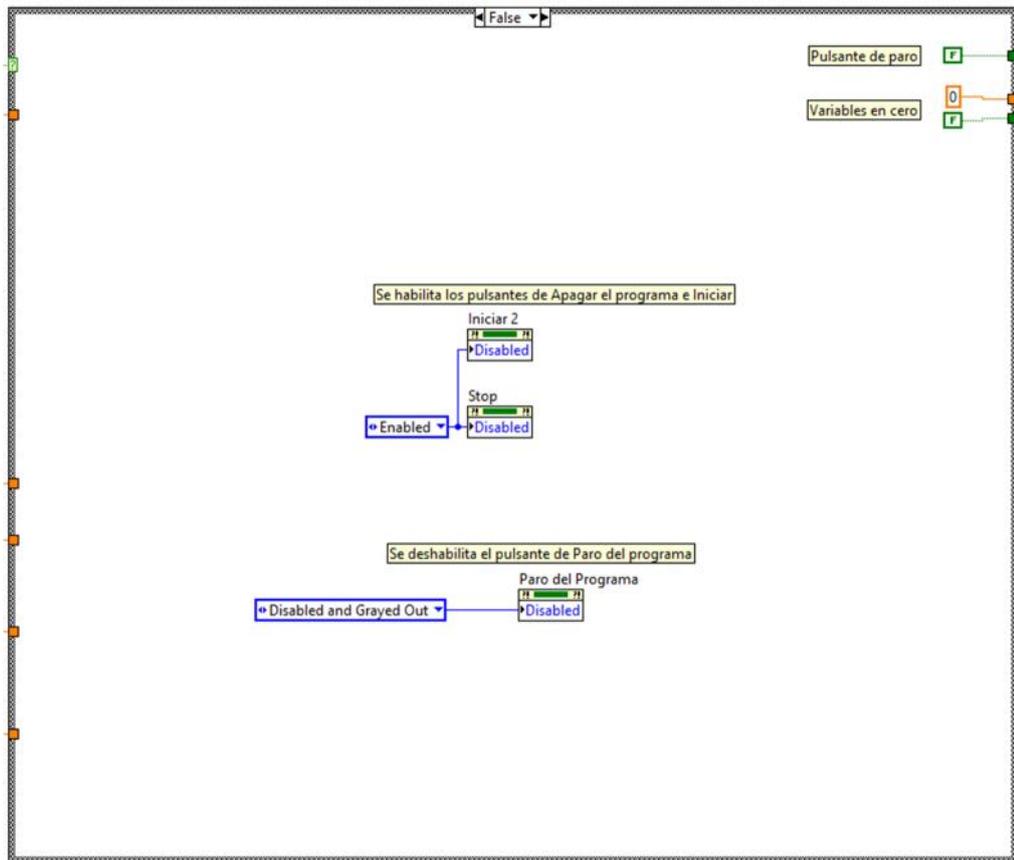
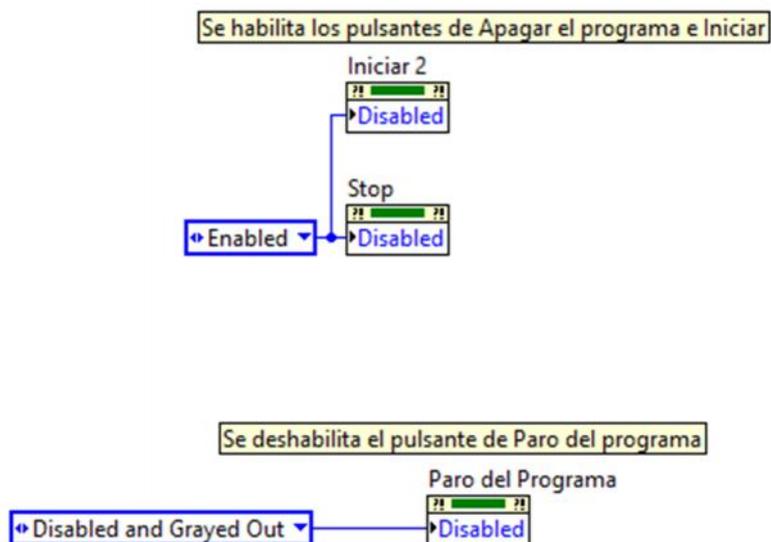


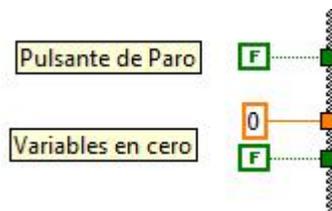
Fig. 2.31 Modo Manual, sin pulsar Inicio.

Explicación:

En éste se van a habilitar los pulsantes “Iniciar” y “Apagar el Programa” y deshabilitar el pulsante de “Paro”, de esta manera mientras no está funcionando solo se deja la opción de Iniciar y Apagar el Programa.



Una parte fundamental es el establecimiento de las variables “Control de Velocidad de Ventilador y Apagar el Ventilador” en cero o False.



A continuación se explica el caso “TRUE”, esto es cuando ya se ha pulsado “Iniciar”.

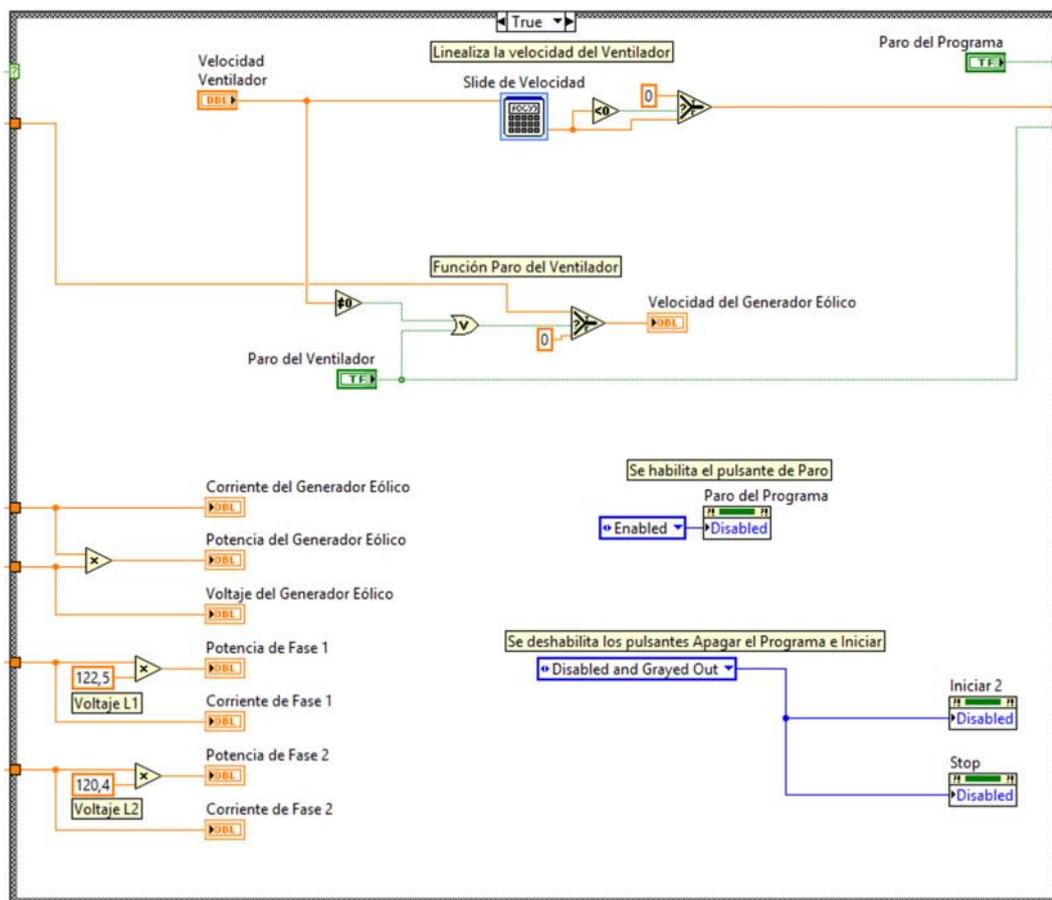
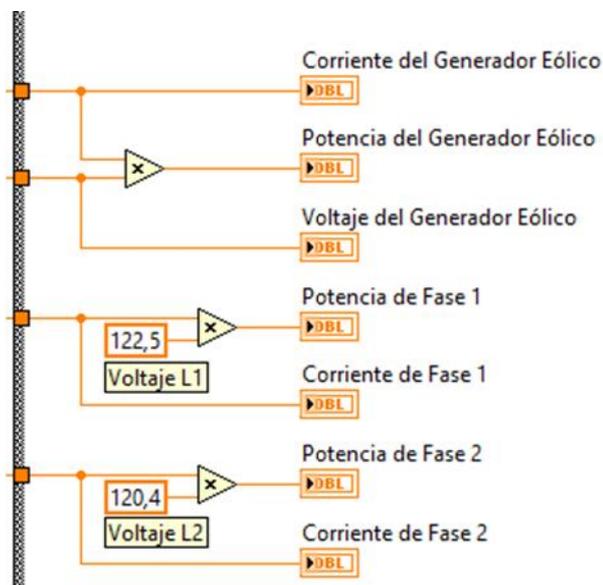


Fig. 2.32 Modo Manual, pulsado Inicio.

Explicación:

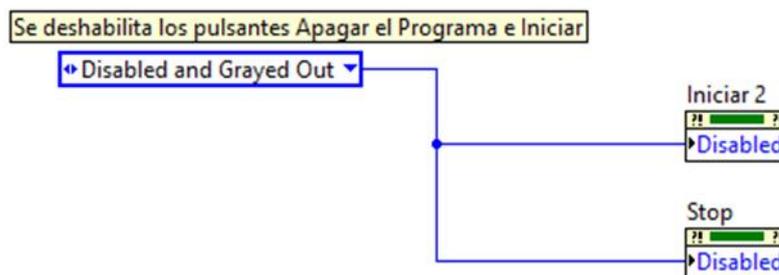
Como se observa en la figura a continuación, se muestran los datos ya procesados después de las ecuaciones, hay que destacar que para los voltajes de las fases, tanto L1

como L2, se ha tomado una media dependiendo de medidas tomadas previamente con el multímetro.

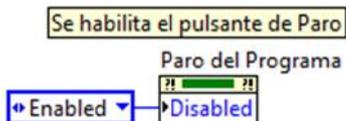


Como seguridad de que no se pueda presionar nuevamente el pulsante “Iniciar” se lo deshabilita.

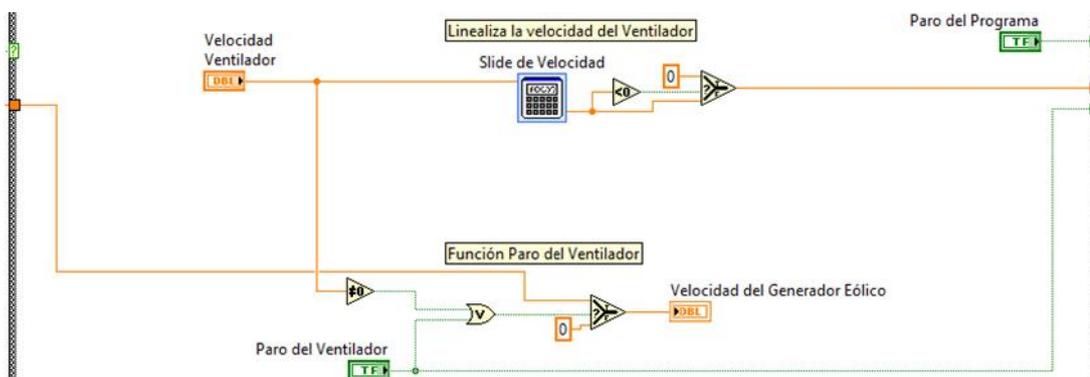
Se hace lo mismo con el botón “Apagar el programa”, el motivo es: cuando está en funcionamiento y éste es presionado, el ventilador no vuelve a los parámetros iniciales, sino se queda con los últimos parámetros cargados (en funcionamiento).



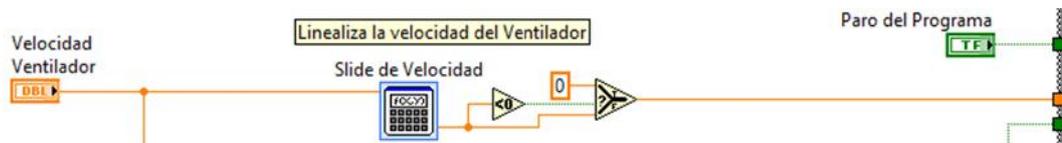
Se habilita el pulsante “Paro” de esta manera se puede detener el equipo si ocurriera algún problema con el mismo; este pulsante también servirá para que vuelva a ser habilitado el pulsante de “Apagar el Programa”.



En la siguiente parte del programa se muestra la función que hace que se muestre “0” en el Indicador grafico de la velocidad del anemómetro cuando el ventilador no este encendido, de igual manera se conecta con el interruptor “Paro de Ventilador”, el cual hará que se apague el mismo.



Se linealiza la velocidad del ventilador, para esto se hicieron varias pruebas para determinar la ecuación de la velocidad de viento interna generada por el ventilador, esto referido a la velocidad del anemómetro con respecto a la velocidad de viento del motor.



A continuación se muestra la ecuación que sirve para linealizar la velocidad de viento del motor.

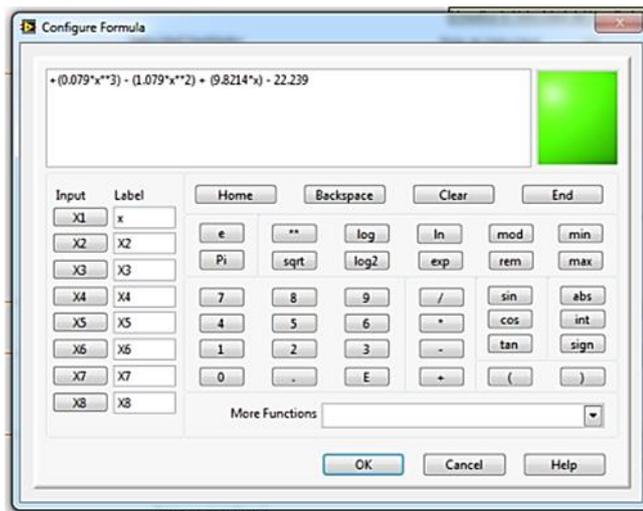


Fig. 2.33 Ecuación de Velocidad de Viento.

Modo Automático.- Es la forma más adecuada para realizar prácticas en el proyecto, debido a la automatización.

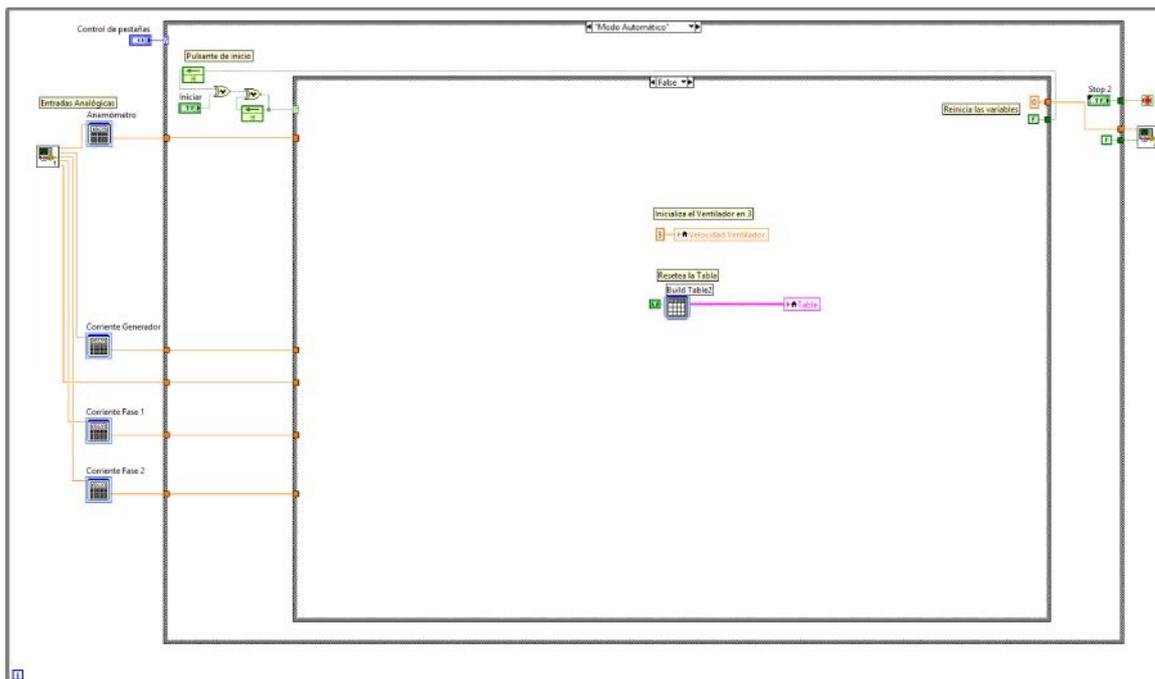
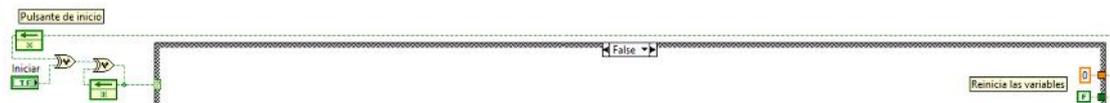


Fig. 2.34 Modo Automático

Explicación:

El pulsante de “Inicio”, su función es mantener activado el programa en Modo Automático hasta que se cumplan todos los intervalos que se han colocado previamente, éstos se explican a continuación.



En esta primera parte del Modo Automático se explica el caso “FALSE”, o sea cuando aún no se ha pulsado “Iniciar”.

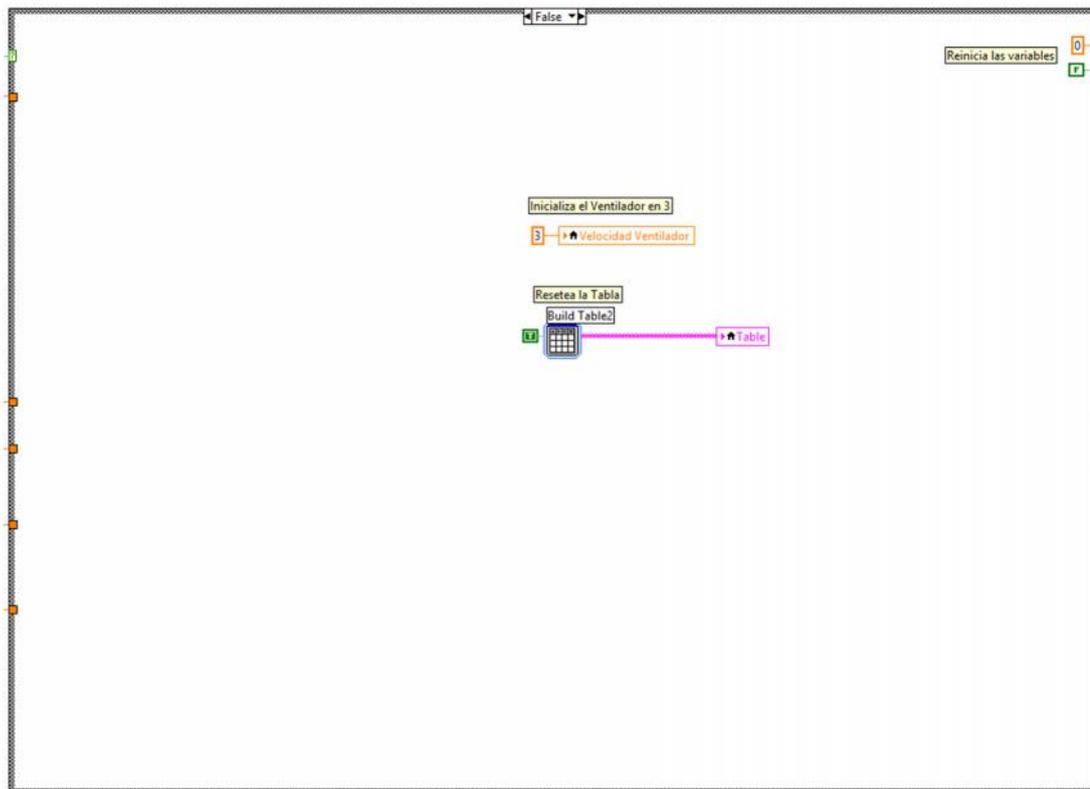


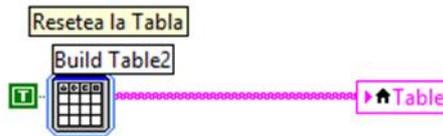
Fig. 2.35 Modo automático, sin pulsar Inicio.

Explicación:

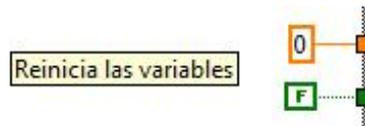
Antes de iniciar el funcionamiento del programa se tiene que establecer el valor mínimo, el cual comenzara a aumentar la velocidad del ventilador, para esto se inicia la variable ventilador en 3, esto está dado en m/s, debido a que con valores menores a 3 no habrá ningún movimiento en el generador eólico y por ende no habrá datos para analizar.



Se tiene que reiniciar la tabla en el caso de que haya tenido recolección de datos previamente.



Una parte fundamental es el establecimiento de las variables “Control de Velocidad de Ventilador y Apagar el Ventilador” en cero o False.



A continuación se explica el caso “TRUE”, esto es cuando se ha pulsado “Iniciar”.

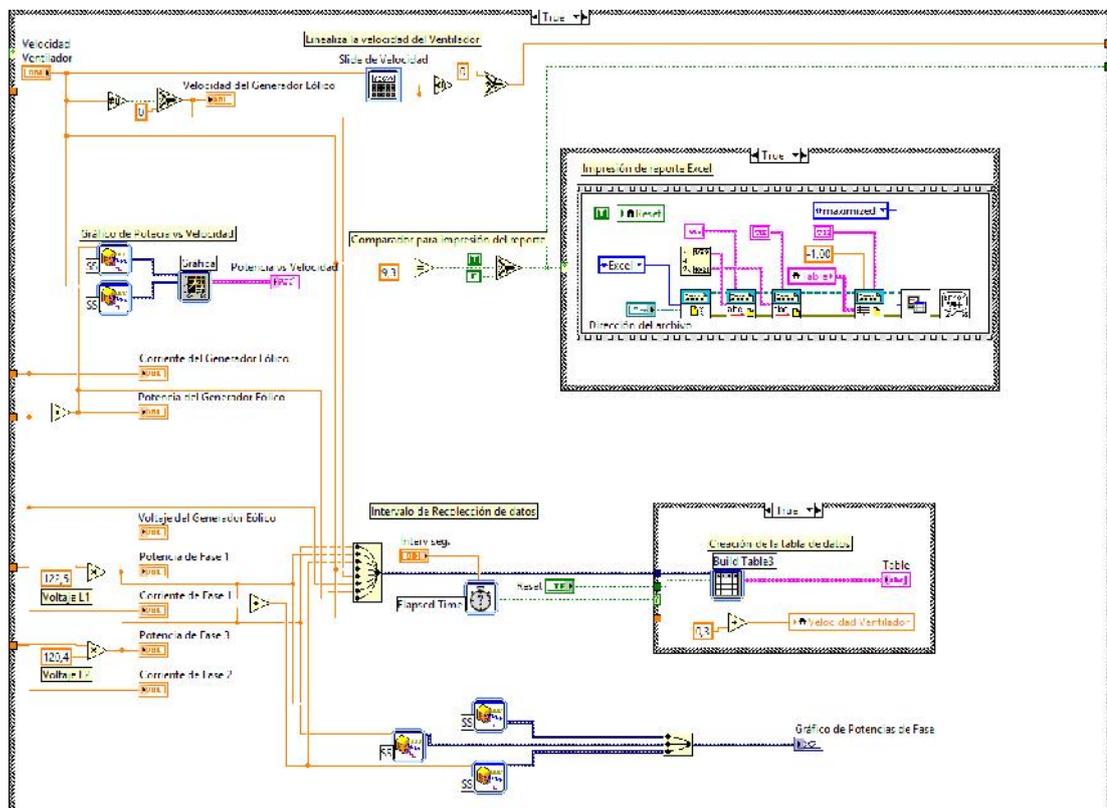
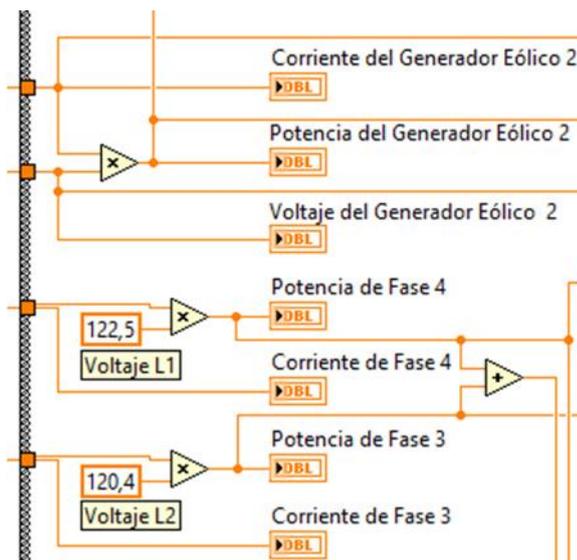


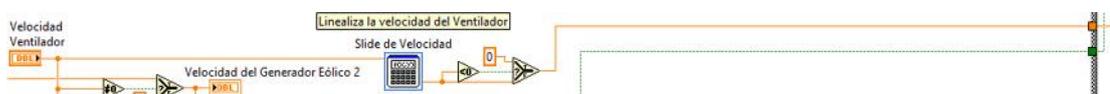
Fig. 2.36 Modo automático, pulsado Inicio.

Explicación:

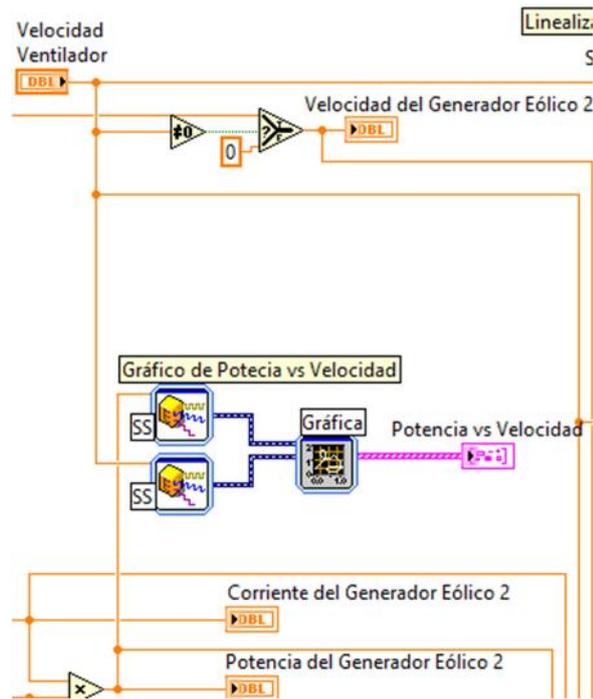
Como se observa en la figura a continuación, se muestran los datos ya procesados después de las ecuaciones, hay que destacar que para los voltajes de las fases, tanto L1 como L2, se ha tomado una media dependiendo de medidas tomadas previamente con el multímetro.



Al igual que en el modo manual, hay que linealizar los valores del ventilador con respecto al anemómetro para esto se utiliza la misma fórmula obtenida en el modo manual.



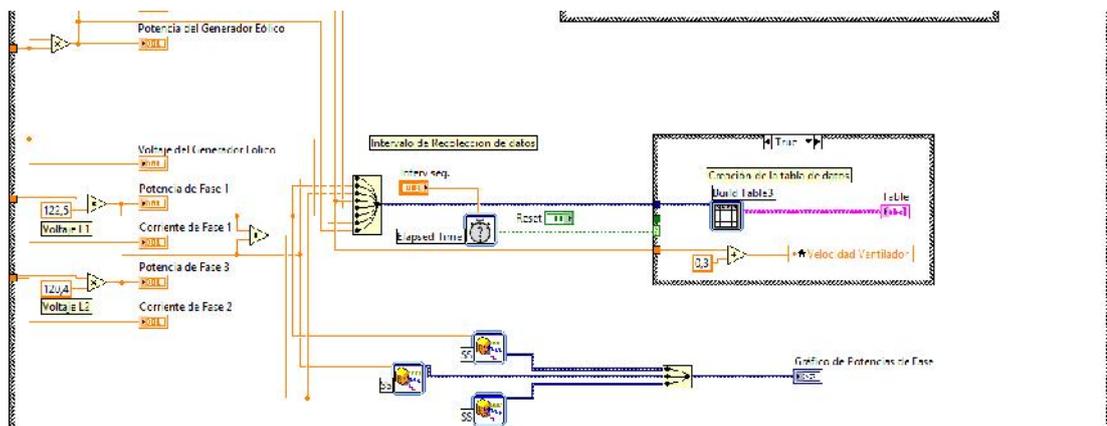
Se crea una gráfica en la cual se muestra la potencia del Generador Eólico vs Velocidad de viento en el interior, hay que tener en cuenta que el tipo en el que están los valores no es adecuado para gráficas, por tal motivo se crea una señal simulada continua con valor preestablecido 0, de esta manera los valores que se van a dibujar pasan por el offset del generador de señales, y varían en amplitud como se muestra a continuación:



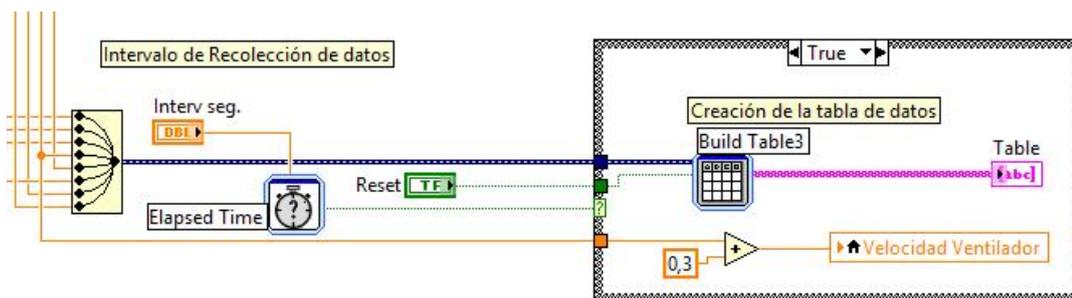
En el modo Manual se crea un comparador para de esta manera enviar el valor 0 a velocidad del anemómetro si la velocidad del ventilador es 0.



De igual manera se grafica las potencias de las fases y la potencia total utilizada en el ventilador.

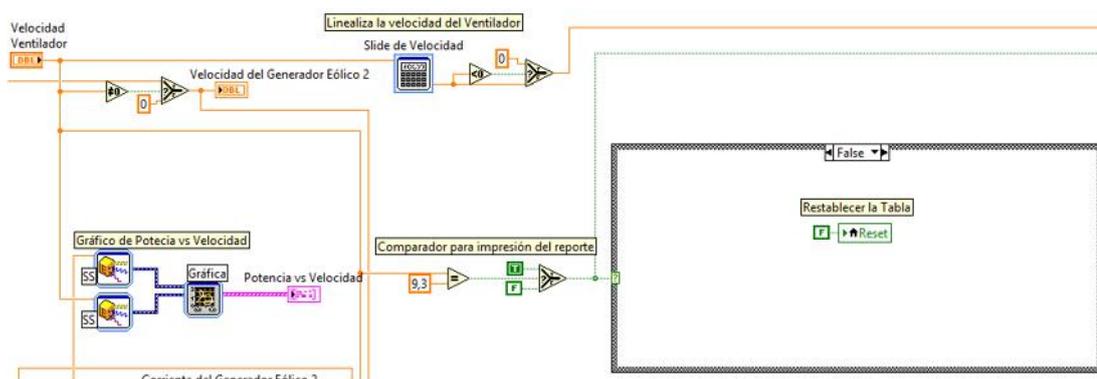


En la figura a continuación se muestra la toma de datos, esto depende del tiempo “Interv Seg.” que es el lapsus de tiempo entre cada dato, para esto el “Elapsed time” enviar un TRUE cada vez que se cumpla el intervalo antes señalado, en esta figura también se muestra un incremento de 0.3 al ventilador, esto va hacer que el ventilador una vez que tome cada dato, aumente su velocidad en 0.3m/s.

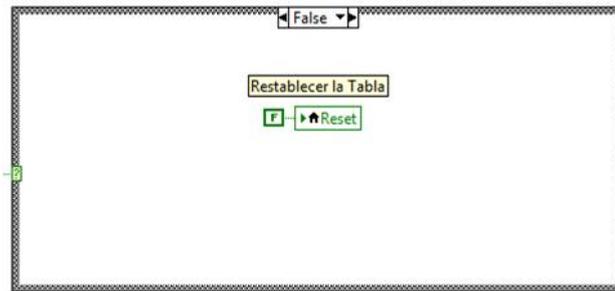


El interruptor “reset” es un elemento no visible que tiene variables locales ubicadas en el reporte de la tabla que se mostrará a continuación y tiene como fin el resetear la tabla cuando ya se haya generado el reporte en Excel.

Como el control Ventilador va a estar variando continuamente, se tiene que dar un límite para que genere el reporte, este límite está determinado por la velocidad máxima de viento que puede generar el ventilador, en este caso 9.3m/s, este comparador va a dar valores TRUE o FALSE según su condición.



Cuando su valor es FALSE simplemente se restablece la tabla creada anteriormente, como se muestra en la figura siguiente:



Si su valor es TRUE se crea un reporte en Excel donde se muestra la fecha, la hora y los datos junto a un formato preestablecido en donde se encuentra el nombre de la Universidad.

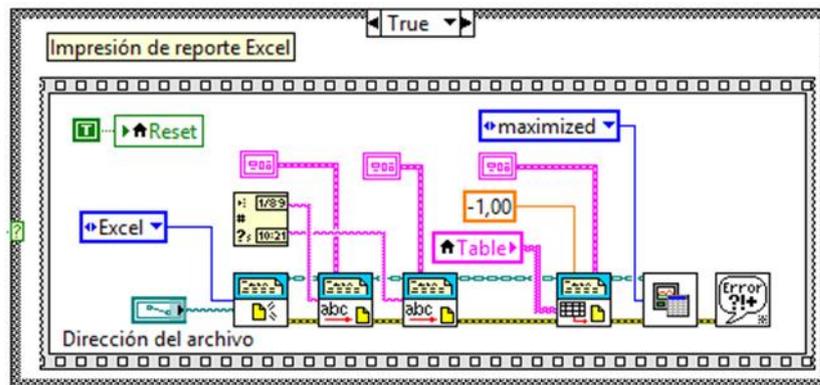


Fig. 2.37 Impresión de reporte en Excel.

2.5. Generador Eólico

La conexión del generador eólico se la realiza dependiendo del voltaje que se va a utilizar, existen 3 tipos de conexiones para los voltajes, 12V, 24V y 48V, como se muestran en la Fig.64.

| WHISPER 100/200 MULTI-VOLTAGE WIRING | | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------|------------|------------|---|---------|---|---------|
| 12V | RED WIRE NUTS | | | INSTRUCTIONS: SEE OWNERS MANUAL FOR COMPLETE REWIRING INSTRUCTIONS. USE THE WIRE NUT COLOR SPECIFIED AND INCLUDE A BRUSH WIRE IN THE CONNECTION WHERE INDICATED. BRUSH WIRES ARE NON-SPECIFIC. ANY AVAILABLE BRUSH WIRE MAY BE USED FOR ANY CONNECTION. | | | |
| | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | | | | |
| | WHITE 1 | WHITE - | RED 1 | | | | |
| | WHITE 3 | WHITE 2 | RED 3 | | | | |
| | BLACK 2 | RED 2 | BLACK 1 | | | | |
| | BLACK - | RED - | BLACK 3 | | | | |
| 24V | RED WIRE NUTS | | | YELLOW WIRE NUTS | |  | |
| | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | WHITE - | WHITE 2 | | |
| | WHITE 1 | RED 2 | BLACK 1 | RED 3 | RED 1 | | |
| | WHITE 3 | RED - | BLACK 3 | BLACK - | BLACK 2 | | |
| 48V | RED WIRE NUTS | | | YELLOW WIRE NUTS | | | |
| | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | BRUSH WIRE | WHITE - | WHITE 2 | RED 2 | BLACK 2 |
| | WHITE 1 | RED - | BLACK 1 | RED 1 | WHITE 3 | RED 3 | BLACK 3 |
| | | | | BLACK - | | | |

Fig. 2.38 Tabla de conexiones de Generador eólico.

La conexión que se va a utilizar para este proyecto es la de 12V y su configuración es:



Fig. 2.39 Conexión para 12V del generador Eólico.

F1, F2, F3 son las fases que da el generador eólico en corriente alterna.

Como el generador envía la señal en alterna, se diseña un pequeño circuito rectificador para las mediciones de voltaje.

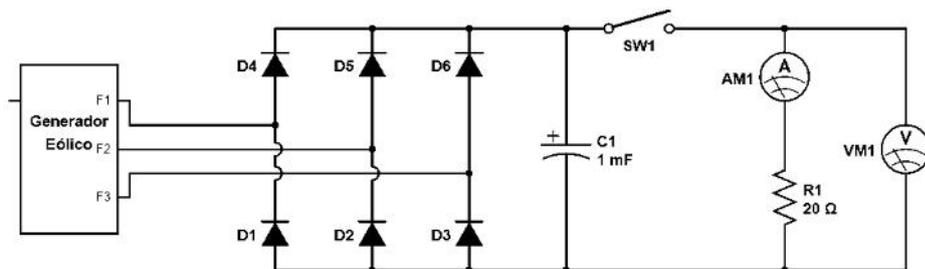


Fig. 2.40 Circuito rectificador de Voltaje para el generador Eólico.

2.6. Configuración del Motor

Esquema de conexión del Motor-. Indica que tipo de conexión se va a utilizar en el equipo, esto puede ser estrella o doble estrella, dependiendo del voltaje al cual se va a trabajar.

Tomando en cuenta que se tiene un voltaje de 220V, se utiliza la conexión doble estrella, la conexión para el proyecto se la realiza mediante la siguiente forma.

-) “L1” del motor va a ir conectado a “U” del variador de frecuencia.
-) “L2” del motor va a ir conectado a “V” del variador de frecuencia.
-) “L3” del motor va a ir conectado a “W” del variador de frecuencia.

Para la conexión del variador de frecuencia, se explica en el siguiente apartado.

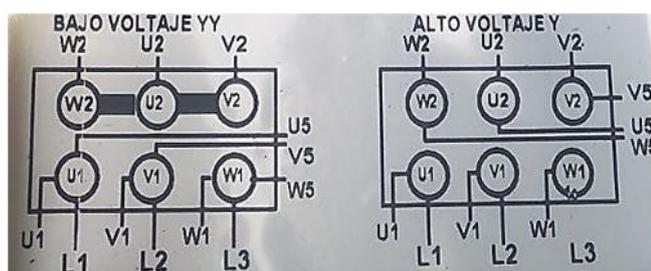


Fig. 2.41 Conexiones Estrella y Doble Estrella.



Fig. 2.42 Conexión Doble Estrella.

Datos de Motor para la Parametrización-. A continuación, se muestran los datos correspondientes en la placa característica del motor.

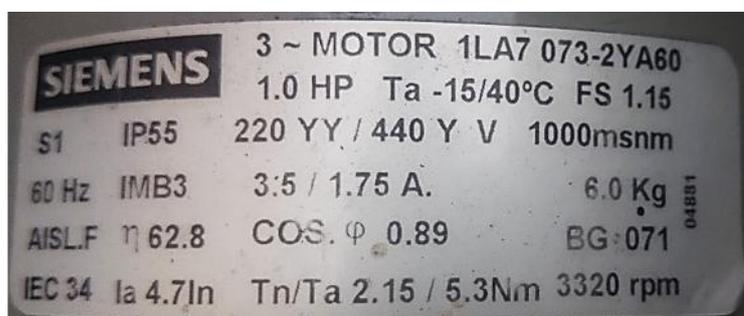


Fig. 2.43 Datos del Motor.

Las especificaciones técnicas se las puede encontrar en el Anexo 1.

2.7. Configuración del Variador de Frecuencia

Para la configuración del variador de frecuencia se utiliza los comandos de configuración establecidos en fábrica, los cuales se detallan en el Anexo 2, los parámetros de configuración se encuentran establecidos con el prefijo Pxxxx, y van desde 0003 a 3900, por ejemplo: P0100 (frecuencia a la que va a trabajar el motor).

Para la configuración del mismo se puede escoger entre dos modos de configuración, Puesta en Servicio Estándar, y Puesta en Servicio Avanzada.

Variantes. - Existen 2 variantes a utilizar en el equipo: Variante analógica (se utiliza para aplicaciones de un solo convertidor, las ordenes se las hace a través de un

interruptor y un potenciómetro externos) y Variante USS (se utiliza en aplicaciones de varios convertidores, las ordenes se realizan a través de la interface RS485).

En el proyecto se utiliza la variante Analógica, ya que nos permite enviarle rangos de voltaje (0-10V) a través del circuito digital-analógico mencionado en el apartado 2.3.

Variante analógica:

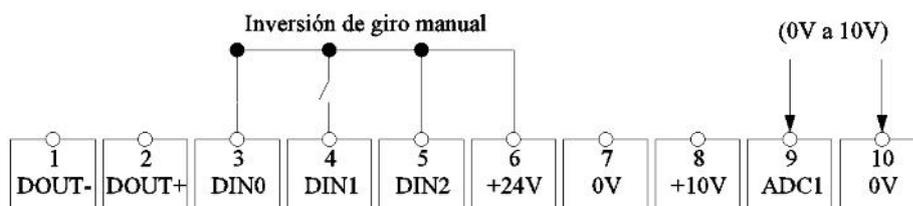


Fig. 2.44 Variante Analógica.

Conexión.- Las conexiones están dadas de la siguiente forma:

-) L1 y L2 son las fases de nuestra acometida a 220V de la Empresa Eléctrica.
-) U, V, W son las líneas que van a alimentar el motor, según las especificaciones mencionadas en el apartado 2.5.
-) PE es la Puesta a tierra, recomendable en las instalaciones eléctricas para protección de sobrecargas.

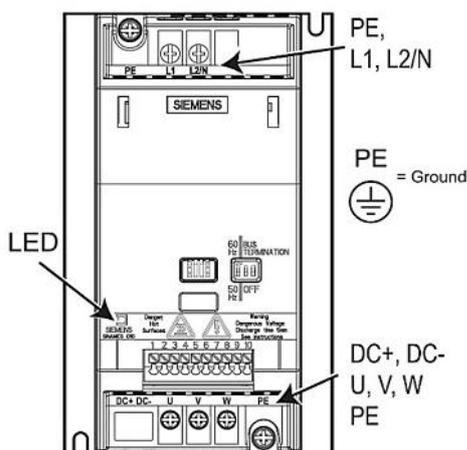


Fig. 2.45 Conexiones del Variador de Frecuencia.

Fuente: Hoja técnica G110, ver Anexo 2.

Configuración del variador de frecuencia para el Proyecto.

La configuración que se utiliza en el proyecto es la Puesta en Servicio Avanzada, la cual permite establecer de mejor forma los parámetros del motor (1 HP trifásico de 2 Polos), a su vez permite manejar la variante analógica utilizada en el proyecto.

Para la primera modificación del equipo se colocará el variador en la frecuencia a la que el motor trabaja, en este caso a 60Hz, utilizando el interruptor “DIP 1” que se muestra en la Fig.72.



Fig. 2.46 Terminales de Frecuencia.

Fuente: Hoja técnica G110, ver Anexo 2.

Panel BOP y Funciones avanzadas:



Fig. 2.47 Panel BOP.

Fuente: Hoja técnica G110, ver Anexo 2.

El BOP es un panel de control opcional en el que se pueden modificar de forma más fácil los parámetros de configuración, en la Fig. 74 se muestra un ejemplo de la modificación de los parámetros.

| Modificar P0003 – nivel de acceso | |
|---|-----------------------|
| Pasos | Resultado en pantalla |
| 1 Pulsar P para acceder a parámetros. | r 0000 |
| 2 Pulsar ▲ hasta que se visualice P0003 | P0003 |
| 3 Pulsar P hasta acceder al valor de parámetro. | 1 |
| 4 Pulsar ▲ o ▼ hasta obtener el valor requerido. (Poner el valor 3) | 3 |
| 5 Pulsar P para confirmar y almacenar el valor. | P0003 |
| 6 Con el nivel de acceso 3 se pueden seleccionar todos los parámetros de los niveles 1 a 3. | |

Fig. 2.48 Ejemplo de cambio de parámetros.

Fuente: Hoja técnica G110, ver Anexo 2.

Diagrama de flujo para puesta en marcha Rápida.

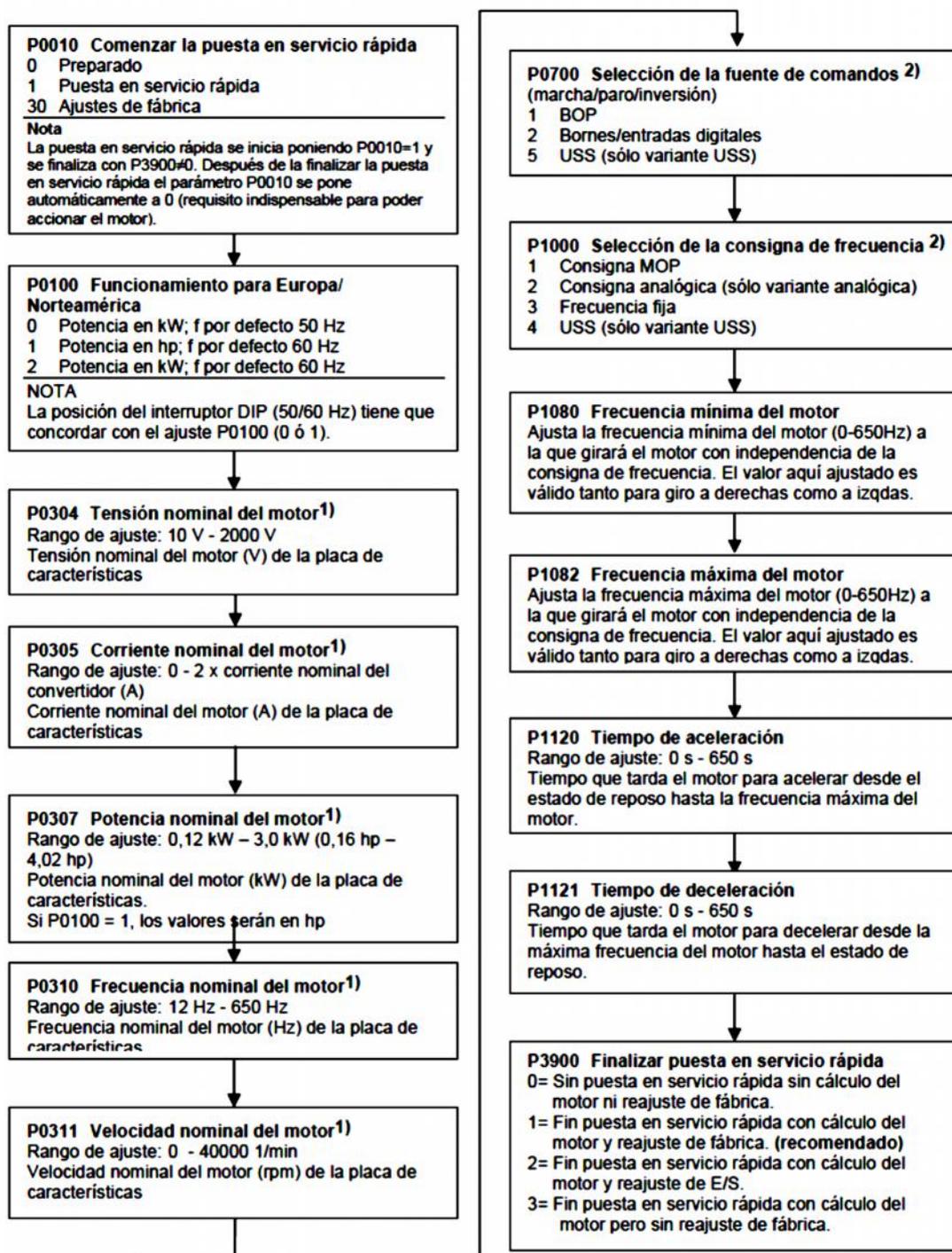


Fig. 2.49 Puesta en marcha rápida.

Fuente: Hoja técnica G110, ver Anexo 2.

A continuación se detallan los valores establecidos para la configuración del variador dentro del proyecto:

Tabla 2.2 Configuración del Variador.

| Código | Parámetro | Valor |
|--------|-------------------------------------|-------|
| P0100 | Funcionamiento (Europa/USA) | 1 |
| P0304 | Tensión nominal del motor | 220 |
| P0305 | Corriente nominal del motor | 3.5 |
| P0307 | Potencia nominal del motor | 1 |
| P0308 | cosPhi nominal del motor | 0.89 |
| P0310 | Frecuencia nominal del motor | 60 |
| P0311 | Velocidad nominal del motor | 3320 |
| P0700 | Selección de la fuente de comandos | 2 |
| P1000 | Selección de consigna de frecuencia | 1 |
| P1080 | Frecuencia mínima del motor | 6 |
| P1082 | Frecuencia máxima del motor | 60 |
| P1120 | Tiempo de aceleración | 10 |
| P1121 | Tiempo de desaceleración | 10 |
| P3900 | Finalizar puesta en servicio rápida | 1 |

2.8. Integración

Esquema de configuración

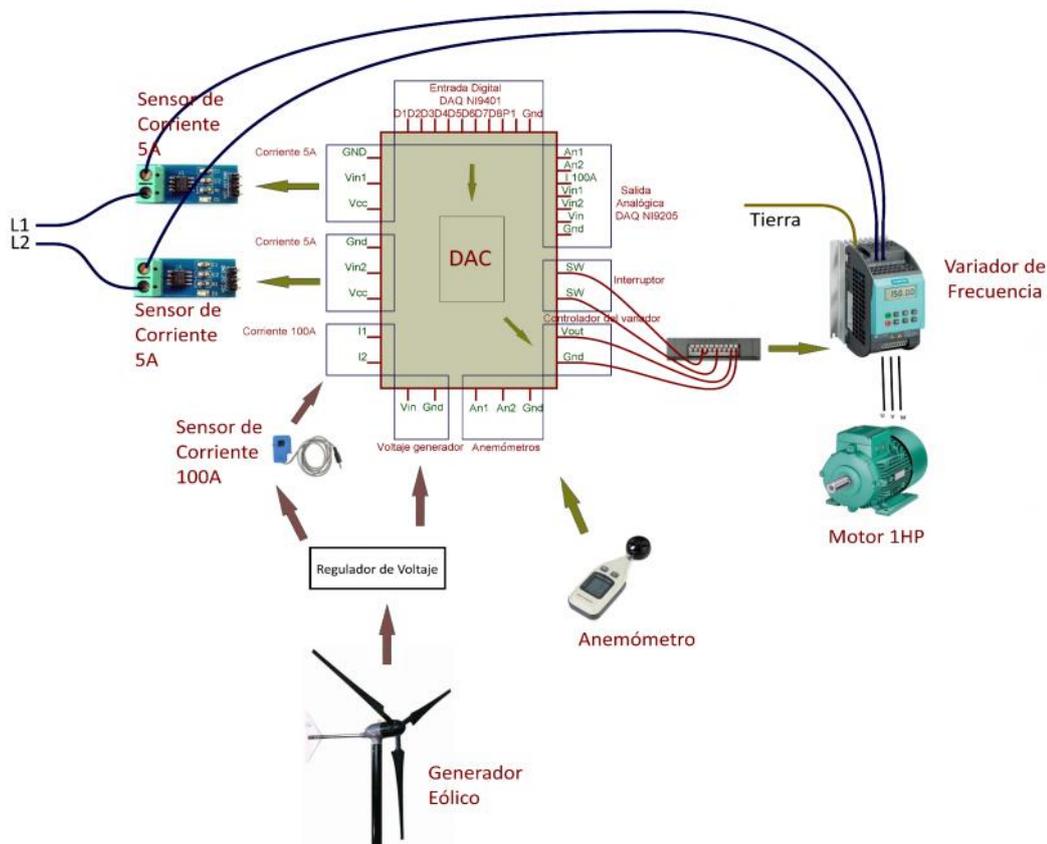


Fig. 2.50 Esquema de Configuración.

En este apartado se va hacer referencia a la conexión éntrelos circuitos-DAQ-LabVIEW junto a los sensores.



Fig. 2.51 Proyecto unificado.

El anemómetro como hemos explicado en puntos anteriores, sirvió de 2 formas, tanto en sentido de calibración, como en medición de viento para entregarle los datos directamente a la DAQ, en la figura a continuación se muestra el lugar donde es colocado para la medición de viento, tras el generador eólico.



Fig. 2.52 Pruebas.

El variador de frecuencia, se va a encargar de controlar la velocidad del ventilador, en la foto a continuación se muestra ya con las conexiones pertinentes, para la configuración, revisar el Anexo 2.



Fig. 2.53 Variador de Frecuencia.

A continuación, se muestra las conexiones entre la placa de circuito y DAQ.

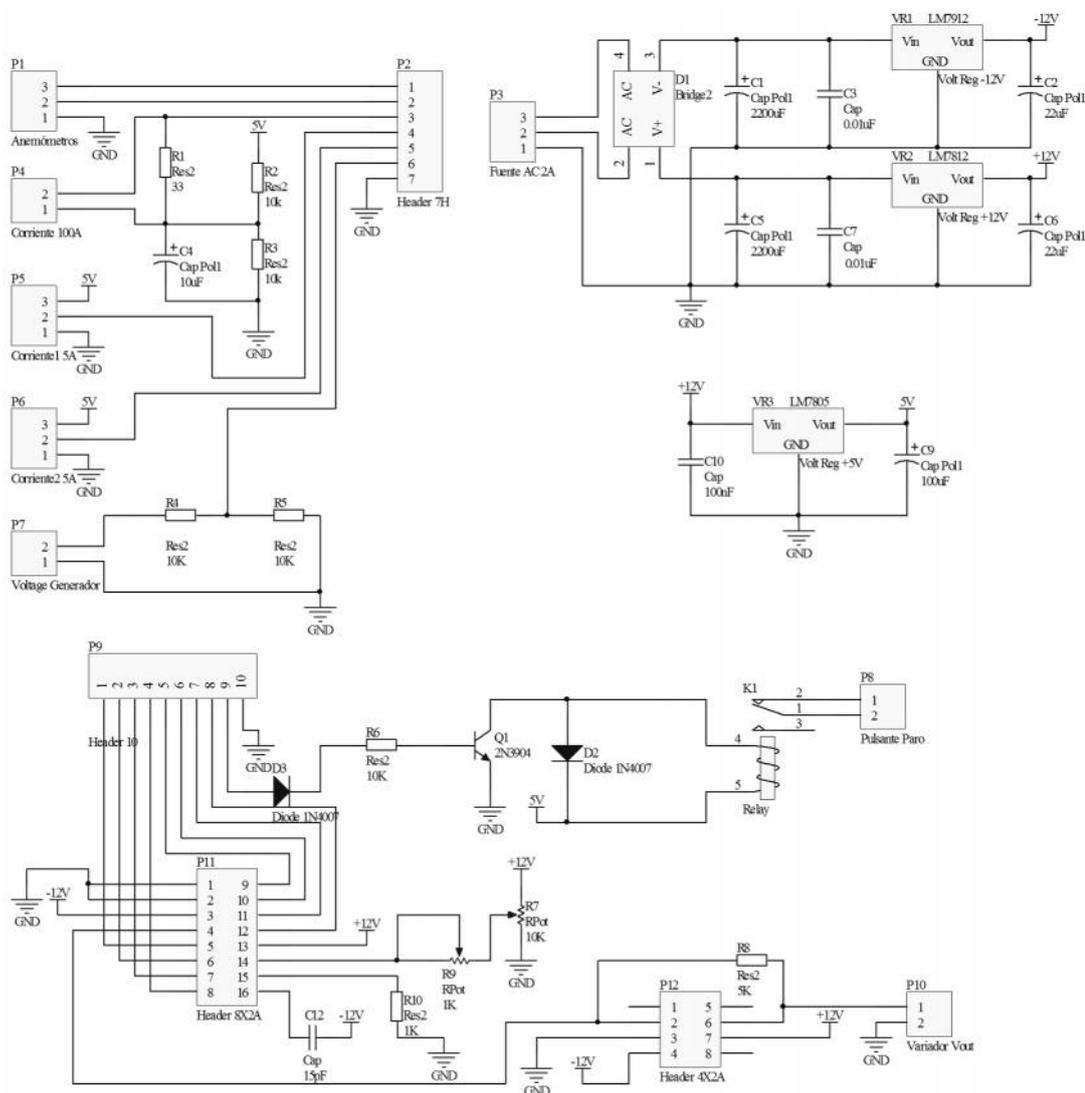


Fig. 2.54 Circuitos.

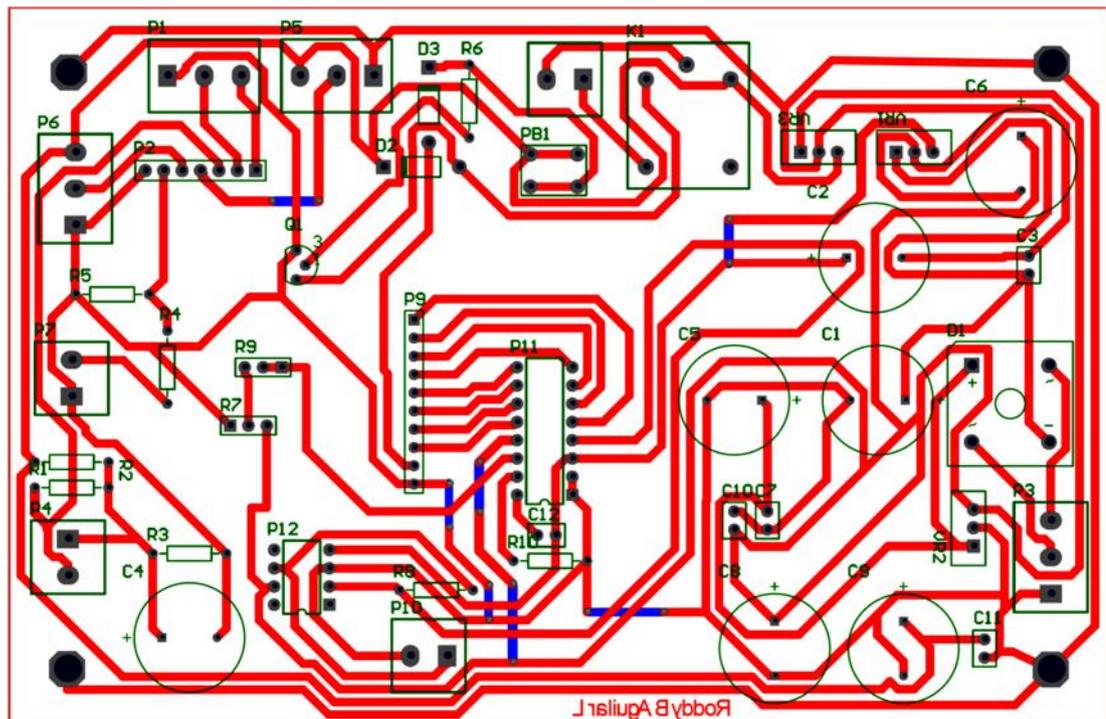


Fig. 2.55 PCB.

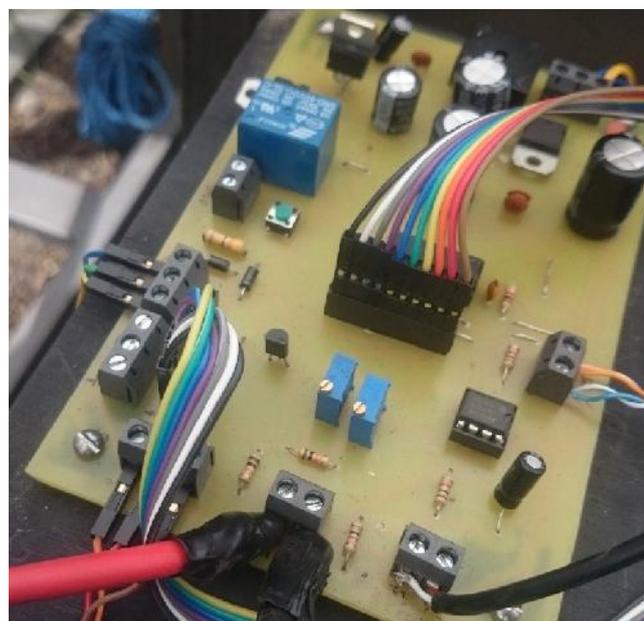


Fig. 2.56 Conexiones.

Para la comunicación al PC se hace a través de la interfaz USB del DAQ que viene con el equipo, cabe aclarar que esta conexión se la realiza una sola vez al inicio del programa.

CAPÍTULO 3

PRUEBAS

3.1. Pruebas de eficiencia

En este capítulo se comparan diferentes sistemas de palas para obtener un mejor rendimiento del generador eólico. Existen varios sistemas de palas, entre ellos monopala, bipala y tripala, los cuales serán empleados en este proyecto.

3.1.1. Tripala



Fig. 3.1 Pruebas Tripala.

El diseño de este sistema consiste en ubicar tres palas del mismo tamaño y peso, separadas por ángulos iguales logrando un sistema equilibrado. Estas palas permiten una mejor recolección de viento a su vez que evitan el ruido provocado por fricción, a continuación se muestran los datos obtenidos de las pruebas a varias velocidades:

Tabla 3.1 Datos de prueba Tripala.

| UNIVERSIDAD DEL AZUAY | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------|----------------------|--|----------------------------|-------------------------|---|-------------------------------|
| Tema: BANCO DE PRUEBAS DIDACTICO PARA SISTEMA DE ENERGIA EOLICA Por: Bismarck Aguilar Loayza Fecha: 03/03/2016 Hora: 18:25 | | | | | | | | | | Viscosidad: 0,0000146 Area: 0,2826 Diámetro: 0,6 Densidad: 1,2147 | | | | |
| Potencia L1 | Potencia L2 | Potencia de Fases Total | Velocidad de Viento Interior (v) | Velocidad de Viento Exterior (v2) | Voltage de Generador Eólico | Corriente de Generador Eólico | Potencia de Generador Eólico | Caudal | Número Reynolds (Re) | Velocidad a la altura del rotor (v) | Factor de ralenización (a) | Potencia de Viento (Po) | Potencia de Viento cedida al rotor (Pw) | Coefficiente de Potencia (Cp) |
| W | W | W | m/s | m/s | V | I | W | m3/s | | m/s | | W | W | |
| 1,23 | 4,26 | 5,49 | 3,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,85 | 123287,67 | 3,00 | 1,00 | 4,63 | 0,00 | 0,00 |
| 79,42 | 56,22 | 135,65 | 3,30 | 3,23 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 135616,44 | 3,27 | 0,99 | 6,17 | 0,26 | 0,04 |
| 83,20 | 59,75 | 142,95 | 3,60 | 3,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,02 | 147945,21 | 3,35 | 0,93 | 8,01 | 1,90 | 0,24 |
| 84,94 | 61,06 | 146,01 | 3,90 | 3,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 160273,97 | 3,58 | 0,92 | 10,18 | 2,83 | 0,28 |
| 95,19 | 68,57 | 163,76 | 4,20 | 3,62 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,19 | 172602,74 | 3,91 | 0,93 | 12,72 | 3,05 | 0,24 |
| 99,50 | 71,74 | 171,24 | 4,50 | 3,55 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 1,27 | 184931,51 | 4,03 | 0,89 | 15,64 | 5,27 | 0,34 |
| 116,65 | 83,31 | 199,96 | 4,80 | 3,42 | 0,64 | 0,01 | 0,00 | 1,36 | 197260,27 | 4,11 | 0,86 | 18,98 | 7,99 | 0,42 |
| 124,99 | 89,16 | 214,15 | 5,10 | 3,57 | 1,17 | 0,03 | 0,04 | 1,44 | 209589,04 | 4,34 | 0,85 | 22,77 | 9,86 | 0,43 |
| 143,72 | 101,73 | 245,45 | 5,40 | 3,53 | 1,56 | 0,06 | 0,09 | 1,53 | 221917,81 | 4,47 | 0,83 | 27,03 | 12,79 | 0,47 |
| 155,84 | 111,65 | 267,49 | 5,70 | 3,97 | 2,09 | 0,08 | 0,16 | 1,61 | 234246,58 | 4,83 | 0,85 | 31,79 | 13,90 | 0,44 |
| 172,77 | 123,18 | 295,96 | 6,00 | 4,29 | 2,32 | 0,10 | 0,22 | 1,70 | 246575,34 | 5,14 | 0,86 | 37,07 | 15,56 | 0,42 |
| 215,01 | 153,44 | 368,45 | 6,30 | 4,36 | 2,81 | 0,13 | 0,35 | 1,78 | 258904,11 | 5,33 | 0,85 | 42,92 | 18,92 | 0,44 |
| 223,12 | 158,42 | 381,54 | 6,60 | 4,67 | 3,32 | 0,14 | 0,48 | 1,87 | 271232,88 | 5,63 | 0,85 | 49,34 | 21,06 | 0,43 |
| 255,28 | 184,91 | 440,19 | 6,90 | 4,44 | 3,85 | 0,17 | 0,64 | 1,95 | 283561,64 | 5,67 | 0,82 | 56,38 | 27,13 | 0,48 |
| 273,98 | 204,71 | 478,69 | 7,20 | 4,94 | 4,18 | 0,19 | 0,81 | 2,03 | 295890,41 | 6,07 | 0,84 | 64,06 | 28,56 | 0,45 |
| 294,87 | 236,99 | 531,86 | 7,50 | 5,64 | 4,83 | 0,22 | 1,06 | 2,12 | 308219,18 | 6,57 | 0,88 | 72,41 | 27,56 | 0,38 |
| 306,77 | 259,41 | 566,18 | 7,80 | 5,51 | 5,63 | 0,24 | 1,36 | 2,20 | 320547,95 | 6,66 | 0,85 | 81,45 | 34,79 | 0,43 |
| 325,25 | 293,40 | 618,65 | 8,10 | 5,47 | 5,94 | 0,26 | 1,57 | 2,29 | 332876,71 | 6,78 | 0,84 | 91,21 | 41,57 | 0,46 |
| 330,97 | 303,99 | 634,97 | 8,40 | 5,64 | 6,36 | 0,28 | 1,80 | 2,37 | 345205,48 | 7,02 | 0,84 | 101,73 | 46,71 | 0,46 |
| 349,92 | 339,99 | 689,91 | 8,70 | 6,03 | 6,63 | 0,30 | 1,97 | 2,46 | 357534,25 | 7,37 | 0,85 | 113,02 | 49,68 | 0,44 |
| 360,26 | 358,12 | 718,38 | 9,00 | 6,46 | 7,16 | 0,32 | 2,32 | 2,54 | 369863,01 | 7,73 | 0,86 | 125,12 | 52,12 | 0,42 |

3.1.2. Bipala

Este sistema cuenta con dos palas ubicadas una en contra de la otra, esto permite el equilibrio del sistema; este diseño, aunque es estable requiere una velocidad de viento mayor para su funcionamiento, los datos obtenidos de las pruebas se detallan a continuación:

Tabla 3.2 Datos de prueba Bipala.

| UNIVERSIDAD DEL AZUAY | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------|---------------------|--|-----------------------------|-------------------------|---|-------------------------------|
| Tema: BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA Por: Bismarck Aguilar Loayza Fecha: 03/03/2016 Hora: 18:10 | | | | | | | | | | Viscosidad: 0,0000146 Área: 0,2826 Diámetro: 0,6 Densidad: 1,2147 | | | | |
| Potencia L1 | Potencia L2 | Potencia de Fases Total | Velocidad de Viento Interior (v) | Velocidad de Viento Exterior (v2) | Voltage de Generador Eólico | Corriente de Generador Eólico | Potencia de Generador Eólico | Caudal | Número Reynols (Re) | Velocidad a la altura del rotor (v') | Factor de ralentización (a) | Potencia de Viento (Po) | Potencia de Viento cedida al rotor (Pw) | Coefficiente de Potencia (Cp) |
| W | W | W | m/s | m/s | V | I | W | m3/s | | m/s | | W | W | |
| 1,373 | 3,71 | 5,09 | 3,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,85 | 123287,67 | 3,00 | 1,00 | 4,63 | 0,00 | 0,00 |
| 79,812 | 56,45 | 136,26 | 3,30 | 3,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 135616,44 | 3,22 | 0,98 | 6,17 | 0,55 | 0,09 |
| 85,835 | 61,26 | 147,09 | 3,60 | 3,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,02 | 147945,21 | 3,41 | 0,95 | 8,01 | 1,48 | 0,19 |
| 82,901 | 58,82 | 141,72 | 3,90 | 3,51 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 160273,97 | 3,70 | 0,95 | 10,18 | 1,85 | 0,18 |
| 91,148 | 65,61 | 156,76 | 4,20 | 3,40 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,19 | 172602,74 | 3,80 | 0,90 | 12,72 | 3,96 | 0,31 |
| 96,919 | 68,91 | 165,83 | 4,50 | 3,52 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,27 | 184931,51 | 4,01 | 0,89 | 15,64 | 5,42 | 0,35 |
| 113,837 | 81,17 | 195,01 | 4,80 | 3,37 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,36 | 197260,27 | 4,08 | 0,85 | 18,98 | 8,19 | 0,43 |
| 120,254 | 86,09 | 206,34 | 5,10 | 3,41 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 1,44 | 209589,04 | 4,25 | 0,83 | 22,77 | 10,52 | 0,46 |
| 138,273 | 98,21 | 236,49 | 5,40 | 3,49 | 0,35 | 0,00 | 0,00 | 1,53 | 221917,81 | 4,45 | 0,82 | 27,03 | 12,94 | 0,48 |
| 149,603 | 106,47 | 256,07 | 5,70 | 3,73 | 0,59 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 234246,58 | 4,72 | 0,83 | 31,79 | 15,01 | 0,47 |
| 167,513 | 119,01 | 286,53 | 6,00 | 3,60 | 0,70 | 0,01 | 0,01 | 1,70 | 246575,34 | 4,80 | 0,80 | 37,07 | 18,98 | 0,51 |
| 206,967 | 145,90 | 352,87 | 6,30 | 3,97 | 0,94 | 0,02 | 0,02 | 1,78 | 258904,11 | 5,13 | 0,81 | 42,92 | 21,10 | 0,49 |
| 224,020 | 158,90 | 382,92 | 6,60 | 4,31 | 1,29 | 0,04 | 0,05 | 1,87 | 271232,88 | 5,45 | 0,83 | 49,34 | 23,40 | 0,47 |
| 249,836 | 177,14 | 426,98 | 6,90 | 3,93 | 1,55 | 0,06 | 0,09 | 1,95 | 283561,64 | 5,41 | 0,78 | 56,38 | 29,90 | 0,53 |
| 276,825 | 207,35 | 484,17 | 7,20 | 4,05 | 1,76 | 0,07 | 0,12 | 2,03 | 295890,41 | 5,63 | 0,78 | 64,06 | 34,21 | 0,53 |
| 292,922 | 231,17 | 524,09 | 7,50 | 4,14 | 1,87 | 0,08 | 0,14 | 2,12 | 308219,18 | 5,82 | 0,78 | 72,41 | 39,05 | 0,54 |
| 304,494 | 250,51 | 555,01 | 7,80 | 4,58 | 2,27 | 0,10 | 0,22 | 2,20 | 320547,95 | 6,19 | 0,79 | 81,45 | 42,33 | 0,52 |
| 328,586 | 299,45 | 628,04 | 8,10 | 4,71 | 2,85 | 0,12 | 0,34 | 2,29 | 332876,71 | 6,41 | 0,79 | 91,21 | 47,72 | 0,52 |
| 332,881 | 309,64 | 642,52 | 8,40 | 4,30 | 2,94 | 0,13 | 0,37 | 2,37 | 345205,48 | 6,35 | 0,76 | 101,73 | 56,73 | 0,56 |
| 351,743 | 346,30 | 698,05 | 8,70 | 4,61 | 3,14 | 0,14 | 0,43 | 2,46 | 357534,25 | 6,66 | 0,77 | 113,02 | 62,16 | 0,55 |
| 360,850 | 363,41 | 724,26 | 9,00 | 5,64 | 3,56 | 0,16 | 0,55 | 2,54 | 369863,01 | 7,32 | 0,81 | 125,12 | 61,76 | 0,49 |

3.1.3. Monopala



Fig. 3.2 Pruebas Monopala.

El diseño de este sistema es muy similar al bipala, con la diferencia que solo se utiliza un aspa y en el lado contrario de esta se coloca un contrapeso para que el sistema este equilibrado, este sistema es muy poco utilizado ya que requiere una velocidad de viento mayor para su funcionamiento, los datos obtenidos de las pruebas se detallan a continuación:

Tabla 3.3 Datos de prueba Monopala.

| UNIVERSIDAD DEL AZUAY | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------|----------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|--|--|
| Tema: BANCO DE PRUEBAS DIDÁCTICO PARA SISTEMA DE ENERGÍA EÓLICA Por: Bismarck Aguilar Loayza Fecha: 03/03/2016 Hora: 18:14 | | | | | | | | | | Viscosidad: 0,0000146 Área: 0,2826 Diámetro: 0,6 Densidad: 1,2147 | | | | |
| Potencia L1 | Potencia L2 | Potencia de Fases Total | Velocidad de Viento Interior (v) | Velocidad de Viento Exterior (v2) | Voltage de Generador Eólico | Corriente de Generador Eólico | Potencia de Generador Eólico | Caudal | Número Reynolds (Re) | Velocidad a la altura del rotor (v') | Factor de ralentización (a) | Potencia de Viento (P _o) | Potencia de Viento cedida al rotor (P _w) | Coefficiente de Potencia (C _p) |
| W | W | W | m/s | m/s | V | I | W | m3/s | | m/s | | W | W | |
| 1,72 | 4,05 | 5,77 | 3,00 | 3,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,85 | 123287,67 | 3,00 | 1,00 | 4,63 | 0,00 | 0,00 |
| 79,99 | 57,38 | 137,37 | 3,30 | 3,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 135616,44 | 3,20 | 0,97 | 6,17 | 0,70 | 0,11 |
| 82,68 | 58,72 | 141,40 | 3,60 | 3,13 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,02 | 147945,21 | 3,37 | 0,93 | 8,01 | 1,82 | 0,23 |
| 85,54 | 61,34 | 146,87 | 3,90 | 3,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 160273,97 | 3,52 | 0,90 | 10,18 | 3,25 | 0,32 |
| 95,14 | 67,85 | 162,98 | 4,20 | 3,17 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,19 | 172602,74 | 3,69 | 0,88 | 12,72 | 4,79 | 0,38 |
| 97,02 | 69,82 | 166,84 | 4,50 | 3,23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,27 | 184931,51 | 3,87 | 0,86 | 15,64 | 6,50 | 0,42 |
| 112,16 | 80,27 | 192,42 | 4,80 | 3,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,36 | 197260,27 | 3,96 | 0,83 | 18,98 | 9,03 | 0,48 |
| 119,40 | 86,24 | 205,64 | 5,10 | 3,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,44 | 209589,04 | 4,07 | 0,80 | 22,77 | 11,70 | 0,51 |
| 142,96 | 102,14 | 245,10 | 5,40 | 3,21 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,53 | 221917,81 | 4,30 | 0,80 | 27,03 | 13,94 | 0,52 |
| 153,58 | 109,24 | 262,83 | 5,70 | 3,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 234246,58 | 4,42 | 0,78 | 31,79 | 17,18 | 0,54 |
| 176,46 | 125,63 | 302,09 | 6,00 | 3,36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,70 | 246575,34 | 4,68 | 0,78 | 37,07 | 19,84 | 0,54 |
| 205,45 | 145,81 | 351,25 | 6,30 | 3,46 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,78 | 258904,11 | 4,88 | 0,77 | 42,92 | 23,21 | 0,54 |
| 220,06 | 156,26 | 376,32 | 6,60 | 3,54 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,87 | 271232,88 | 5,07 | 0,77 | 49,34 | 27,00 | 0,55 |
| 249,47 | 178,16 | 427,62 | 6,90 | 3,60 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 1,95 | 283561,64 | 5,25 | 0,76 | 56,38 | 31,21 | 0,55 |
| 276,49 | 203,44 | 479,92 | 7,20 | 4,25 | 0,36 | 0,00 | 0,00 | 2,03 | 295890,41 | 5,72 | 0,80 | 64,06 | 33,19 | 0,52 |
| 295,42 | 231,05 | 526,47 | 7,50 | 4,89 | 0,51 | 0,00 | 0,00 | 2,12 | 308219,18 | 6,19 | 0,83 | 72,41 | 34,40 | 0,48 |
| 302,51 | 243,15 | 545,67 | 7,80 | 4,35 | 0,53 | 0,00 | 0,00 | 2,20 | 320547,95 | 6,08 | 0,78 | 81,45 | 43,69 | 0,54 |
| 319,40 | 277,58 | 596,98 | 8,10 | 3,84 | 0,76 | 0,00 | 0,00 | 2,29 | 332876,71 | 5,97 | 0,74 | 91,21 | 52,13 | 0,57 |
| 326,24 | 291,45 | 617,69 | 8,40 | 4,09 | 0,82 | 0,01 | 0,01 | 2,37 | 345205,48 | 6,24 | 0,74 | 101,73 | 57,72 | 0,57 |
| 349,18 | 340,89 | 690,06 | 8,70 | 4,09 | 1,00 | 0,02 | 0,02 | 2,46 | 357534,25 | 6,39 | 0,73 | 113,02 | 64,73 | 0,57 |
| 356,48 | 355,65 | 712,13 | 9,00 | 5,27 | 1,22 | 0,03 | 0,04 | 2,54 | 369863,01 | 7,14 | 0,79 | 125,12 | 65,15 | 0,52 |

CAPÍTULO 4

PRÁCTICAS

4.1. Práctica 1

Velocidades de arranque y estabilización de generador eólico.

Objetivos:

- Encontrar el punto de inicio del generador eólico mediante el modo manual, el cual permite variar la velocidad de viento.
- Comparar las velocidades de viento, tanto en el interior como el exterior.
- Realizar las mediciones con carga y sin carga en el generador eólico.
- Realizar pruebas con todas las palas disponibles (monopala, bipala, tripala).

Instrucciones para la práctica:

- a. Insertar las palas disponibles comenzando por la Monopala en el generador eólico, para esto para esto se utiliza una llave número 14.
- b. Desconectar la carga del generador eólico.
- c. Dar clic en INICIAR, para que el programa arranque, luego de esto se procede a variar el flujo de viento desde el ventilador.
- d. Anotar los valores generados de viento, tanto en el interior como en el exterior del túnel, justo cuando el generador eólico comienza con movimiento constante.
- e. Dar clic en PARO, para apagar el programa y que el ventilador vuelva a "0".
- f. Conectar la carga al generador eólico
- g. Realizar los mismos pasos de los literales c, d, e.
- h. Cambiar al siguiente tipo de palas, realizar los mismos pasos de los literales c, d, e, f, g.

Tabla de Mediciones

| | Monopala | | Bipala | | Tripala | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Vel. Interior | Vel. Exterior | Vel. Interior | Vel. Exterior | Vel. Interior | Vel. Exterior |
| Sin Carga | | | | | | |
| Con Carga | | | | | | |

Conclusión de las Mediciones:

¿En qué porcentaje varía la velocidad exterior con respecto a la interior?, ¿a qué se debe esto? _____.

¿Qué conclusión se obtiene al momento de comparar los diferentes tipos de palas?

Según en el análisis de la carga, para cargas mayores es necesario tener una mayor potencia de viento, ¿esto es correcto? _____.

4.2. Práctica 2

Prueba de potencias.

Objetivos:

- Obtener las curvas características generadas por cada configuración de palas.
- Realizar la comparación de las curvas características.

Instrucciones para la práctica:

Para realizar las mediciones de potencia hay que tener en cuenta que, necesariamente se tiene que conectar la carga al generador eólico.

- En el Modo Automático, seleccionar el archivo temporal en donde se van a insertar los datos.
- Dar clic en Inicio, automáticamente comenzará a generar una tabla la cual se mostrará una vez que llegue al límite de velocidad.
- Una vez obtenidos los datos, se deben guardar en el computador con el nombre y ruta deseados.
- Cambiar al siguiente tipo de palas, realizar los mismos pasos de los literales b y c.

Conclusión de las Mediciones:

- Realice una comparación entre las potencias de los diferentes tipos de palas.

.

- Coloque los datos de todos los tipos de pala en una misma gráfica,



¿Explique sus resultados?

- Según los resultados obtenidos, ¿qué pasaría con la potencia del generador eólico si se colocara un ventilador con el doble de potencia?

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

-) El banco de pruebas didáctico combina la parte teórica con la práctica y permite demostrar los principios fundamentales de un generador eólico, siendo un apoyo importante tanto para docentes como para estudiantes.
-) Al analizar los datos obtenidos en cada uno de los sistemas, se puede observar claramente, que para el inicio de funcionamiento del generador eólico se necesita menos velocidad de viento en el sistema tripala que en los demás, a su vez se observa que el viento pierde velocidad conforme se incrementa el número de aspas en el generador eólico.
-) El generador eólico con el diseño tripala puede ser utilizado en lugares con una baja velocidad de viento, aproximadamente entre 8 y 15 m/s.
-) El generador eólico con diseño bipala puede ser utilizado en lugares con un promedio de viento entre 10 y 18 m/s.
-) El generador eólico con diseño monopala es recomendable para utilizarlo en lugares con mayor flujo de aire.
-) Al aumentar ligeramente la longitud de las palas se puede obtener un incremento considerable de potencia, es decir, a mayor diámetro del rotor, en las mismas condiciones de viento, se obtendrá más potencia, esto es imprescindible para la construcción de rotores eólicos.
-) En cuanto al número de palas, se llega a la conclusión de que a mayor distancia entre estas el rotor va a girar más rápido, esto quiere decir que los aerogeneradores con menor cantidad de palas van a girar más rápido que los que tengan un número mayor de palas.

-) En términos de eficiencia para un aerogenerador, lo recomendable es, encontrar el equilibrio entre el número de palas y el diámetro del rotor en función de la velocidad de viento en donde se proyecte el aerogenerador.

-) El túnel de viento permite hacer un análisis adicional del generador eólico mediante la inclinación o ángulo de paso de las palas, el estudio de esta variación es fundamental para un óptimo rendimiento del mismo.

Recomendaciones:

-) Al realizar las pruebas con el túnel de viento hay que tener mucha precaución de no insertar ningún elemento que interfiera dentro del ventilador, esto podría causar un grave accidente.

-) Evitar contacto físico con el generador eólico mientras está en funcionamiento, esto podría causar daños graves debido a la velocidad con la que se mueve éste.

-) Al momento de realizar las mediciones, evitar obstruir el viento absorbido por el ventilador, esto puede provocar que no se llegue a las velocidades adecuadas para su funcionamiento.

-) Evitar obstruir el viento que se extrae del túnel, ya que se puede tener mediciones erróneas en el sistema y los datos no serán coherentes.

-) Para mejorar el sistema de generación de viento, lo primordial es aumentar la capacidad del motor del ventilador, de esta manera se pueden alcanzar velocidades mayores.

BIBLIOGRAFÍA

- J Vilorio, J. C. 2013. Energías Renovables Lo que hay que saber. España: Ediciones Paraninfo S.A..
- J Jarauta Rovira, L. 2014. Las Energías Renovables. España: Editorial UOC.
- J Gonzáles, S., Urcuhuaranga, W., y Chiroque, J. 2011. Diseño, construcción e instalación de un túnel de viento para pruebas de pequeños aerogeneradores. Lima, Perú: Ed. Guzlopster.
- J Pinilla, Á. 2008. El poder del viento. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- J González Velasco, J. 2009. Energías Renovables. España: Editorial Reverté S.A..
- J Villarrubia, M. 2007. Energía Eólica. Barcelona, España: Editorial Ceac.
- J Barbero, A. 2011. Energía Eólica. Curso. Universidad de Castilla-La Mancha. España.
- J López, J. M. Escudero. 2008. Manual de Energía Eólica. Madrid, España.
- J Duran, J. 2008. Diseño de un túnel de viento para estudios aerodinámicos. Tesis. Universidad de los Andes. Venezuela.
- J Díaz, R. 2013. Viabilidad de la Cogeneración Eólica en las Plantas Desaladoras. Universidad Carlos II de Madrid. departamento de Física. Madrid.
- J Franquesa, M. 2009. Introducción a la teoría de las turbinas eólicas. Berlin, Alemania: Ed. La Veritat
- J Talayero, Ana, y Martínez, Enrique. 2011. Energía Eólica. Zaragoza, España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- J Aerogenerador. © 2011. Itccanarias.
http://www.itccanarias.org/web/difusion/como_funciona/aerogenerador
- J Túnel de viento. © 2016. Iter. <http://www.iter.es/portfolio-items/tunel-de-viento/>
- J Anemómetro. 2013, junio 14. Conocimientosweb.
<http://www.conocimientosweb.net/dcmt/ficha11365.html>
- J La ley de Betz. 1997-2003. Motiva.
http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/betz.htm

ANEXOS

Ver en Disco.