

# **SISTEMA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UN ALTERNADOR DE AUTOMÓVIL EN GENERACIÓN EÓLICA**

**PRESENTADO POR:  
Laura Burgos Graterón  
Diego Emilio Sierra Galindo**



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
Y DE TELECOMUNICACIONES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014**

# **SISTEMA PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE UN ALTERNADOR DE AUTOMÓVIL EN GENERACIÓN EÓLICA**

**PRESENTADO POR:  
Laura Burgos Graterón  
Diego Emilio Sierra Galindo**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Electricista e  
Ingeniero Electrónico**

**Director  
Dr. Hermann Raúl Vargas Torres**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA  
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014**

# AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Hermann Raúl Vargas Torres director de este proyecto, por permitirme participar en el, por la orientación y supervisión del mismo. A mi compañero Diego Emilio Sierra Galindo, con quien quedo profundamente agradecida por la confianza depositada en mí, al permitirme trabajar junto a él este proyecto. En general a todas las personas que con su ayuda colaboraron en la realización del mismo.

Laura Burgos Graterón

A Dios.

Diego Emilio Sierra Galindo

# Lista de Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>1. Pruebas de Campo para el Alternador</b>	<b>15</b>
1.1. Prueba de Campo No.1 para el Alternador . . . . .	15
1.2. Prueba de Campo No.2 para el Alternador . . . . .	18
<b>2. Pruebas de Laboratorio para el Alternador</b>	<b>23</b>
2.1. Pruebas de Circuito Abierto y Cortocircuito . . . . .	23
2.2. Modelo 1. Frecuencia Variable . . . . .	24
2.3. Modelo 2. Frecuencia Constante . . . . .	26
<b>3. Desarrollo en LabView</b>	<b>28</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>37</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>38</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>39</b>
<b>Apéndice</b>	<b>40</b>
<b>A. DATOS PRUEBAS DE CAMPO</b>	<b>40</b>
A.1. Pruebas Guadalupe . . . . .	40
A.2. Pruebas Ruitoque . . . . .	43
<b>B. PRUEBAS DE LABORATORIO</b>	<b>44</b>
B.1. Datos de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto . . . . .	44
B.2. Datos de las pruebas a frecuencia variable . . . . .	46
B.3. Datos de las pruebas a frecuencia constante . . . . .	46
<b>C. MAPAS DE VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN SUPERFICIE</b>	<b>48</b>
<b>D. IMÁGENES DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA</b>	<b>51</b>

# Lista de Tablas

1.1. Valor promedio del viento en superficie. . . . .	18
1.2. Valor promedio del viento en superficie. . . . .	22
2.1. Prueba sin Carga. . . . .	25
2.2. Prueba con Carga, 1 Bombillo de 200 W . . . . .	25
2.3. Prueba con Carga, 2 Bombillos de 200 W . . . . .	25
2.4. Prueba sin Carga. . . . .	26
2.5. Prueba sin Carga. . . . .	26
2.6. Prueba sin Carga. . . . .	27

# Lista de Gráficos

1.1. Toma de datos 10 de Mayo - Jornada de la mañana. . . . .	16
1.2. Toma de datos 10 de Mayo - Jornada de la tarde. . . . .	16
1.3. Prueba Arduino. Toma de datos 22 de Julio. . . . .	19
1.4. Prueba Foto Tacómetro. Toma de datos 22 de Julio. . . . .	19
1.5. Prueba Anemómetro. Toma de datos 22 de Julio. . . . .	20
2.1. Prueba de Cortocircuito del Alternador . . . . .	24
2.2. Prueba de Vacío del Alternador . . . . .	24
3.1. Estructura principal del proyecto . . . . .	28
3.2. Panel frontal del sistema creado en LabView . . . . .	29
3.3. Diagrama de bloques de análisis y manipulación de datos . . . . .	30
3.4. Conexión de la DAQ para adquirir datos acondicionados del generador. . . . .	31
3.5. Adquisición de las señales provenientes del generador, tensión y corriente. . . . .	31
3.6. Bloque que divide las señales y donde se efectúan cálculos. . . . .	32
3.7. Bloque que compara y corrige la potencia requerida. . . . .	33
3.8. Interfaz entre la DAQ y el variador de velocidad . . . . .	34
3.9. Capacidad de generación . . . . .	37
A.1. Datos día 1 - Mañana . . . . .	40
A.2. Datos día 1 - Tarde . . . . .	40
A.3. Datos día 2 - Mañana . . . . .	41
A.4. Datos día 2 - Tarde . . . . .	41
A.5. Datos día 3 - Mañana . . . . .	41
A.6. Datos día 3 - Tarde . . . . .	42
A.7. Diagramas de bigotes - Día 1 . . . . .	42
A.8. Diagramas de bigotes - Día 3 . . . . .	43
A.9. Datos prueba de campo Ruitoque . . . . .	43
B.1. Datos prueba de cortocircuito . . . . .	44
B.2. Datos prueba de circuito abierto . . . . .	45
B.3. Prueba a frecuencia variable y tensión de excitación fija . . . . .	46
B.4. Prueba frecuencia constante, 25 Hz . . . . .	46

## LISTA DE GRÁFICOS

11

B.5. Prueba frecuencia constante, 25 Hz . . . . .	46
B.6. Prueba a frecuencia constante, 30 Hz . . . . .	47
C.1. Mapa tomado del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, mes de Mayo[3] . . . . .	49
C.2. Mapa tomado del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, mes de Julio[3] . . . . .	50
D.1. Estructura para montaje del alternador, Prueba Guadalupe . . . . .	51
D.2. Ubicación del relé para uso con arduino, Prueba Guadalupe . . . . .	52
D.3. Conexión tarjeta arduino, Prueba Guadalupe . . . . .	52
D.4. Montaje final, Prueba Guadalupe . . . . .	53
D.5. Elementos de medida, Prueba Ruitoque . . . . .	53
D.6. Elementos de medida, Prueba Ruitoque . . . . .	54
D.7. Estructura, Prueba Ruitoque . . . . .	54
D.8. Proceso de medida, Prueba Ruitoque . . . . .	55
D.9. Alternador . . . . .	55

# RESUMEN

**AUTORES<sup>1</sup>:** LAURA BURGOS GRATERÓN, DIEGO EMILIO SIERRA GALINDO

**PALABRAS CLAVE:** Energías alternativas, generación eólica, alternador.

**CONTENIDO:** El proyecto es un estudio práctico del alternador o generador de un automóvil con datos obtenidos en un ambiente controlado de laboratorio para la transformación de la energía eólica en eléctrica a bajas potencias.

El proyecto consta de una estructura de madera que a su vez soporta una estructura metálica, en la cual se pueden intercambiar 3 tipos de alternadores para sus correspondientes caracterizaciones, un motor que emula el viento a través de una correa hacia el generador, un variador de velocidad que entre comillas manipula la cantidad de viento o la velocidad del mismo sobre un posible generador con aspas para intercambio de energías, una tarjeta de adquisición de datos o DAQ por sus siglas en inglés, que funciona como interfaz entre los datos obtenidos a partir de una corriente de excitación y la corrección en velocidad en la que se deba incurrir para obtener la potencia deseada en laboratorio, y un comando visual en el cual se puede observar, y a través del pc, las variables obtenidas o a manipular; para este proyecto se usa el software de la National Instrument, conocido como Labview, licenciado a la Universidad Industrial de Santander.

En correspondencia con la estructura física, primero se obtienen datos tabulados de velocidad del viento medidos de tres maneras diferentes, en dos lugares, una de ellas es objetivamente la finca que es primordialmente mencionada, y segundo, datos tabulados de corriente de excitación máxima y mínima, datos de la energía generada dentro del laboratorio con cargas distintas, datos de la prueba de vacío y de corto circuito, y el aporte que se obtuvo con el analizador de redes para una frecuencia de 60 Hz. Los datos tabulados de velocidad del viento que se tomaron en campo se comparan con los datos presentados en el 2006 por parte del IDEAM. Finalmente, el estudio concluye con un análisis de las capacidades y posibilidades que se obtienen con el uso de un alternador como generador de electricidad.

---

<sup>1</sup>Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

# SUMMARY

**AUTHORS<sup>2</sup>:** LAURA BURGOS GRATERÓN, DIEGO EMILIO SIERRA GALINDO

**KEYWORDS:** Alternative energies, eolic generation, alternator.

**CONTENT:** This project has a support by a practical study of the contributions that car's alternator or generator can grant to the transformation of the wind power in electricity of low power, with information manipulated and obtained in laboratory in a controlled environment.

The project's frame has a wood table that supports a metallic structure, in which 3 different alternators can be exchanged for his corresponding characterizations, a motor that tries to emulate the wind across a strap towards the generator, a speed variator that in quotation marks manipulates the quantity of wind or the speed of the same one on a generator with a wind turbine for exchange of energies, a card of data acquisition or DAQ for his initials in English, that works as interface between the data obtained from a current of excitation and the correction in speed which it should incur to obtain the power wished in laboratory, and a visual command in which is possible to watch it, and across the PC, the obtained or manipulated data, for this project uses the software of the National Instrument, known as Labview, licensed to the Universidad Industrial de Santander.

As for the physical structure, first the wind speed data are collected and tabulated in three different ways, in two places, one of them is the farm that is mentioned in the project, next, tabulated data of maximum and minimal current of excitation, the data of energy generated inside the laboratory with different loads, the data of emptiness' and short circuit's test , and the contribution that the analyzer of networks made it for a frequency of 60 Hz. The wind's speed data that took in field are compared with the information presented in 2007 by the IDEAM.

Finally, the study concludes with an analysis of the capacities and possibilities that will be obtained by the use of an alternator as a generator of electricity.

---

<sup>2</sup>Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

# INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica, a partir de energías renovables, ha generado un interés en el ámbito nacional y a nivel universitario tanto de pregrado como de posgrado, debido a la creciente necesidad de reducir el impacto ambiental por las emisiones de los combustibles convencionales y la creciente demanda energética. El territorio de Santander cuenta con un potencial eólico por aprovechar, lo cual se puede evidenciar en los resultados plasmados en el atlas de viento y energía eólica de Colombia. Se puede decir que el territorio santandereano se encuentra en una buena etapa para iniciar el aprovechamiento de la energía que el viento ofrece.

El objetivo de este proyecto es contribuir al desarrollo de un sistema de energía alternativa, energía eólica, a través de la caracterización de un alternador de automóvil como elemento útil para este fin, ya que es de fácil manipulación y adquisición para las personas en general. La caracterización del alternador se realiza mediante pruebas y datos controlados en un banco de laboratorio, en el cual se puede emular el viento con un motor adaptado mediante una correa al alternador y un variador de frecuencias con el que se puede alterar la velocidad del motor emulando diferentes velocidades del viento sobre la hélice. Los datos de la velocidad del viento recopilados en dos salidas de campo se comparan con los datos presentados por el IDEAM, para analizar la potencia eléctrica que el alternador puede generar a determinadas velocidades del viento.

# Capítulo 1

## Pruebas de Campo para el Alternador

El objetivo de la prueba era usar cualquier método con el cual se pudiera adquirir datos de velocidad producida por el viento y que se reflejará sobre el alternador. La primera experiencia sobre una posibilidad de usar un generador se debe a la vivida por el estudiante Diego Sierra al ser foráneo y vivir cerca de la zona donde se instalaría el sistema. Una segunda experiencia se desarrolló de manera física, esta prueba contó con la estructura y materiales para soportar un primer prototipo, del cual se extraen las primeras y veraces posibilidades de avanzar en el proyecto, de manera concreta se observó la gran velocidad que alcanzaba el alternador durante largos periodos de tiempo en las tardes, ya que la finca se encuentra frente a la hoya del río Suárez.

Se compró el alternador, se construyó el primer prototipo de aspas, se montó una estructura de 8m de altura en cemento, ángulo y varilla que soportó el alternador.

### 1.1. Prueba de Campo No.1 para el Alternador

Usando arduino y basados en su open source, se tomó un ejemplo ya desarrollado que usa un relé reed como transductor, un imán que hace que el relé opere cuando gira la hélice y usando el puerto análogo del arduino [4]; el sketch transforma datos de velocidad del viento a revoluciones por minuto medidos a una distancia de 19 cm desde el eje del alternador, ver gráfico D.2 .

Una prueba de campo se realizó desde el 7 al 11 de Mayo de 2014, en la finca el Pórtico de la vereda San José, en el municipio de Guadalupe, Santander. La toma de datos se llevo a cabo durante tres días consecutivos, contando con dos jornadas por día, una en la mañana de 7:30 a 9:30 am y la segunda en horas de la tarde de 4:00 a 6:00 pm; durante las dos horas de cada prueba se almacenaron 180 datos resultado de las mediciones realizadas mediante arduino con un retardo entre cada muestra de minuto y medio. Se obtuvieron datos para los siguientes gráficos:

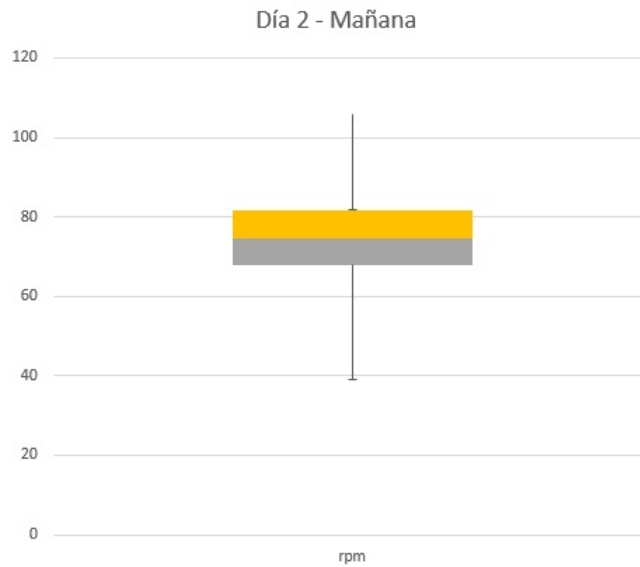


Gráfico 1.1: Toma de datos 10 de Mayo - Jornada de la mañana.

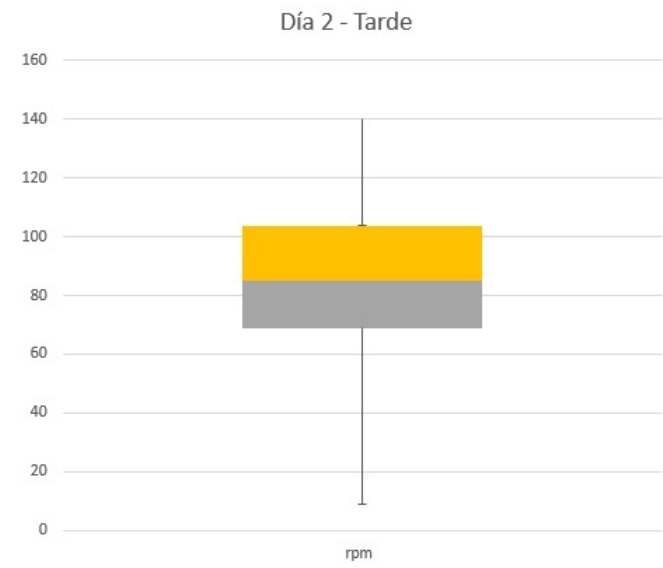


Gráfico 1.2: Toma de datos 10 de Mayo - Jornada de la tarde.

Los gráficos 1.1 y 1.2 para las revoluciones por minuto de la hélice en la toma de datos del día 2 son notables para analizar el comportamiento del viento en la zona, puesto que es el día en el que se presenta mayor velocidad de viento durante las pruebas. La simetría en la muestra refleja que aproximadamente el 50 % del conjunto de datos se encuentra entre 68 y 82 revoluciones por minuto para las velocidades de la mañana, y con valores entre 69 y 104 revoluciones por minuto para la tarde,

además no existen puntos atípicos en los gráficos, lo cual simplemente garantiza que es poco probable que se presente una variación abrupta en la velocidad del viento que genere un pico en la velocidad de la hélice.

De las muestras adquiridas durante los tres días de pruebas, se realiza un cálculo para obtener el valor promedio de valores que alcanza la velocidad de la hélice, dejando una media de 65 y de 72 revoluciones por minuto en la mañana y la tarde respectivamente, mostrando solo algunos valores atípicos para las mediciones realizadas. Los gráficos que enseñan el comportamiento de las mediciones de los días 1 y 3 de prueba se encuentran en el anexo A del documento.

A continuación se especifican las condiciones bajo las cuales se desarrolló la prueba en Guadalupe:

**Coordenadas geográficas:**

LATITUD: 6° 14' 56,59"Norte

LONGITUD: 73° 25' 40,88.°este

Elevación 1420 m.s.n.m

**Horario(durante los 4 días):**

Inicio de la prueba de la mañana: 7:30 a.m.

Fin de la prueba: 9:30 a.m.

Inicio de la prueba de la tarde: 4:00 p.m.

Fin de la prueba: 6:00 p.m.

**Condición climática**

Nublado, poco viento

20 °C

**Materiales e insumos de la prueba:**

Alternador, aspas, cableado, relé, imán, cinta de aislar, estructura soporte del alternador, estructura en cemento, computador, arduino, resistencias. Las imágenes del montaje de las pruebas se encuentran al final del documento, en el anexo D.

Para evaluar el potencial eólico en la zona con los datos adquiridos durante las pruebas, se realiza una comparación con la velocidad promedio del viento en superficie del mes de Mayo que se encuentra en el atlas de viento y energía eólica de Colombia publicado por el IDEAM[3] (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). "La velocidad del viento en superficie se refiere a la velocidad que alcanza esta variable meteorológica a 10 metros de altura, que es la norma internacional establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como estándar para la medición y seguimiento del viento"<sup>1</sup>.

Para realizar esta comparación se requiere llevar los valores medidos por el arduino en rpm a m/s, este cambio de unidades se realiza usando la siguiente ecuación:

<sup>1</sup>Atlas de viento y energía eólica de Colombia. IDEAM. 2006

$$velocidad[m/s] = \frac{2\pi * d * rpm}{60} \quad (1.1)$$

Donde  $d$  es la distancia comprendida entre el eje de la hélice y la guía que se ubicó sobre una de las aspas para realizar las mediciones, con un valor de 0,19 m. Al aplicarle el valor de la siguiente relación al conjunto de datos de los tres días de prueba, se obtienen los valores de la velocidad promedio del viento en cada jornada; dicha relación se obtiene de la prueba de campo No.2 para el alternador realizada en Ruitoque, Santander; las especificaciones de la prueba se encuentran en la sección 1.2 de este documento. El valor de la relación entre el anemómetro y el arduino se halla con la ecuación (1.2).

$$\frac{ValorPromedioAnemómetro}{ValorPromedioArduino} = \frac{3,2494[m/s]}{2,4142[m/s]} = 1,3459 \quad (1.2)$$

El valor de la relación anterior indica que los valores en m/s del anemómetro es 1,3459 veces el valor en m/s de los datos medidos con el arduino.

	Día 1				Día 2				Día 3			
	Mañana		Tarde		Mañana		Tarde		Mañana		Tarde	
	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s	rpm	m/s
Valor promedio anemómetro	53,17	1,06	71,99	1,43	73,95	1,47	84,97	1,69	67,54	1,34	73,17	1,46
Velocidad del viento [m/s]	1,4238		1,93		1,98		2,28		1,81		1,96	

Tabla 1.1: Valor promedio del viento en superficie.

La velocidad del viento que se muestra en la tabla anterior, corresponde a los valores diarios obtenidos luego de aplicar la relación de 1,3459 a la velocidad del arduino en m/s. Tomando como guía el rango de velocidad promedio del viento en la zona mostrado por el IDEAM, (La imagen del mes de Mayo, se encuentra en los anexos del documento), que oscila entre 2 - 2,5 m/s, y los valores mostrados en la tabla anterior, se clarifica que la zona cuenta con un potencial de viento útil para generación de energía eólica.

## 1.2. Prueba de Campo No.2 para el Alternador

Esta prueba se hace para llevar a cabo una comparación tácita, entre los datos obtenidos usando el arduino de la prueba de campo No.1, y usando otro instrumento de medida facilitado por la Universidad, que fuera de fácil manipulación. Este instrumento fue el foto tacómetro que entrega datos de revoluciones por minuto.

El montaje de la prueba se realizó en Ruitoque, Santander, en el sitio conocido como Vuelo Libre, emulando las condiciones físicas de la primera prueba llevada

en Guadalupe. Esta prueba se hizo el día 22 de Julio de 2014. De la prueba se obtuvieron los siguientes gráficos:

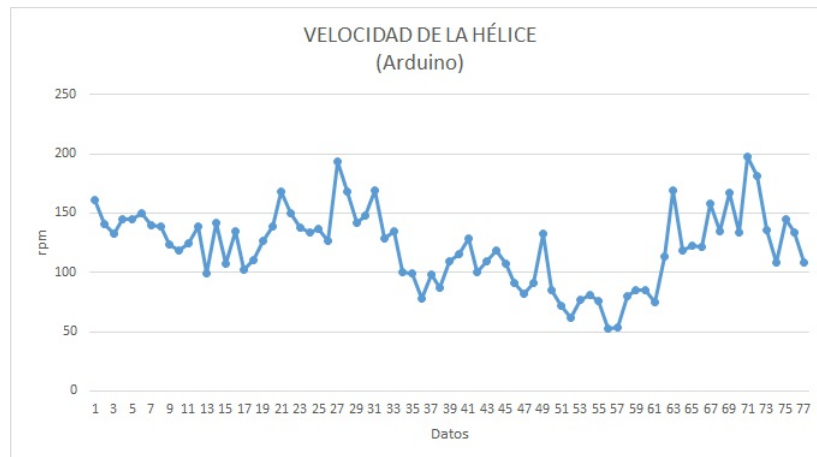


Gráfico 1.3: Prueba Arduino. Toma de datos 22 de Julio.

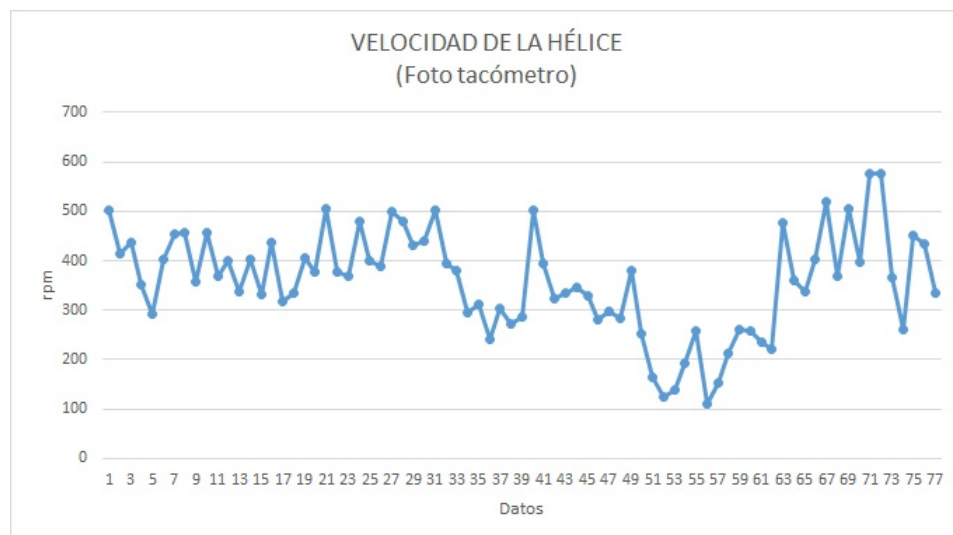


Gráfico 1.4: Prueba Foto Tacómetro. Toma de datos 22 de Julio.

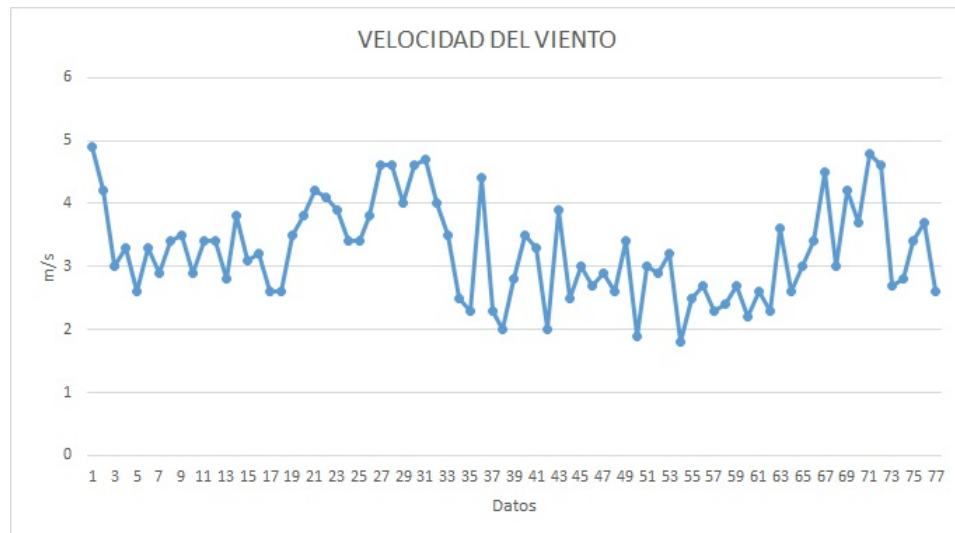


Gráfico 1.5: Prueba Anemómetro. Toma de datos 22 de Julio.

En los gráficos 1.3, 1.4 y 1.5 se encuentran los resultados de tres equipos de medición, los datos se obtienen de realizar las mediciones de manera simultánea con el anemómetro, el foto tacómetro y el relé del arduino; permitiendo encontrar con facilidad las relaciones entre las velocidades de la hélice y el viento; dichas relaciones resultan útiles para encontrar la velocidad que puede alcanzar el alternador cuando el viento genera movimiento a la hélice. Se puede apreciar la similitud que existe en el comportamiento de las gráficas en cuanto al incremento o disminución de la velocidad en cada medida, se presentan algunas variaciones, las cuales se deben a los diversos tipos de errores que se pueden tener en un proceso de medición, como el que se genera por la sensibilidad de los equipos, y el error que puede agregarle la persona encargada de realizar la medida y el manejo de cada equipo, entre otros.

A continuación se especifican las condiciones bajo las cuales se desarrolló la prueba en Ruitoque:

**Coordenadas geográficas:**

LATITUD: 7° 1' 47,13"Norte

LONGITUD: 73° 5' 57,56.ºeste

Elevación 1270 m.s.n.m

**Horario:**

Inicio de la prueba: 4: 15 p.m.

Fin de la prueba: 5:45 p.m.

**Condición climática:**

Soleado, seminublado, viento

20 °C

**Materiales e insumos de la prueba:**

Alternador, aspas, cableado, relé, imán, foto tacómetro, tubo de aluminio de una

pulgada de diámetro y de 2 metros de altura para soporte del alternador, platina para empotrar el alternador al tubo, computador, arduino, resistencias, escalera, anemómetro, martillo, navaja, cinta de aislar. Las imágenes del montaje de la prueba se encuentran al final del documento, en el anexo D .

En la segunda prueba de campo realizada al alternador, se recopilaron 231 datos mediante tres elementos de medida, con cada elemento se registro la misma cantidad de datos puesto que la medición se realizo simultáneamente y se obtuvieron datos instantáneos durante el proceso; para obtener los datos en el mismo instante de tiempo se uso como referencia los datos adquiridos mediante el arduino, puesto que este era el de mas difícil visualización en el medidor. El anemómetro registro la velocidad del viento presente en la zona durante la prueba, el foto tacómetro y el arduino midieron la velocidad de la hélice, el foto tacómetro cuenta con un láser que al reflejarse en una marca colocada sobre el aspa a 19 cm del eje indica la velocidad que alcanza la hélice, para realizar las mediciones con el arduino se uso un relé que censaba el paso de un imán ubicado también a 19 cm del eje en el aspa. Para definir las relaciones entre la velocidad del viento y la hélice, se necesitan todos los datos censados en una unidad en particular, en este caso m/s, para realizar el cambio de unidades de los resultados del arduino y el foto tacómetro, las dos medidas en rpm, se utilizo la siguiente ecuación:

$$velocidad[m/s] = \frac{2\pi * d * rpm}{60} \quad (1.3)$$

Donde  $d$  es la distancia comprendida entre el eje de la hélice y la guía que se ubicó sobre una de las aspas para realizar las mediciones.

Con todos los datos en una misma unidad de medida, se quiere calcular la relación que existe entre cada dos elementos de medida, que no es mas que una fracción del valor promedio de todas las medidas, así:

$$\frac{ValorPromedioAnemómetro}{ValorPromedioArduino} = \frac{3,2494[m/s]}{2,4142[m/s]} = 1,3459 \quad (1.4)$$

$$\frac{ValorPromedioAnemómetro}{ValorPromedioFotoTacómetro} = \frac{3,2494[m/s]}{7,1357[m/s]} = 0,4554 \quad (1.5)$$

$$\frac{ValorPromedioFotoTacómetro}{ValorPromedioArduino} = \frac{7,1357[m/s]}{2,4142[m/s]} = 2,9557 \quad (1.6)$$

En esta prueba también se toma como referente la velocidad promedio del viento en superficie mostrada por el IDEAM, (La imagen del mes de Julio se encuentra en los anexos), pero esta vez con el fin de comparar las medidas entregadas por el anemómetro, valores que al promediar resulta muy superior al rango estipulado en el atlas, tal como se muestra en la tabla.

	IDEAM	Anemómetro
Velocidad promedio [m/s]	1 - 1,5	3,25

Tabla 1.2: Valor promedio del viento en superficie.

## Capítulo 2

# Pruebas de Laboratorio para el Alternador

Un sistema eléctrico de potencia se basa en la conversión de energía primaria, en este caso energía eólica, en energía y potencia eléctrica; para este fin las máquinas síncronas son las más utilizadas.

Mediante pruebas controladas en el laboratorio, se logra censar variables como la intensidad de corriente, la tensión y la potencia producida en los bornes del generador; mediante el variador de frecuencia se emulan diversas velocidades de viento; alimentando la corriente de excitación del campo del generador a través de las escobillas y los anillos colectores.

### 2.1. Pruebas de Circuito Abierto y Cortocircuito

Para conocer la tensión interna del alternador generada por una corriente de campo dada se realizan las pruebas de circuito abierto y cortocircuito al generador; la prueba de cortocircuito se lleva a cabo con los terminales del alternador en cortocircuito y consiste en iniciar con la corriente de campo en cero y aumentarla durante el ensayo hasta alcanzar su valor nominal, si se desea; la prueba de circuito abierto o vacío, se realiza sin carga en los bornes del alternador e igualmente la corriente de excitación se inicia en cero y se aumenta durante el ensayo; las dos pruebas se realizan a una misma velocidad, 715 rpm, que se alcanza cuando el variador de frecuencia indica 24,2 Hz.

Las pruebas de cortocircuito y vacío desarrolladas en el laboratorio mostraron las siguientes curvas características del alternador:



Gráfico 2.1: Prueba de Cortocircuito del Alternador

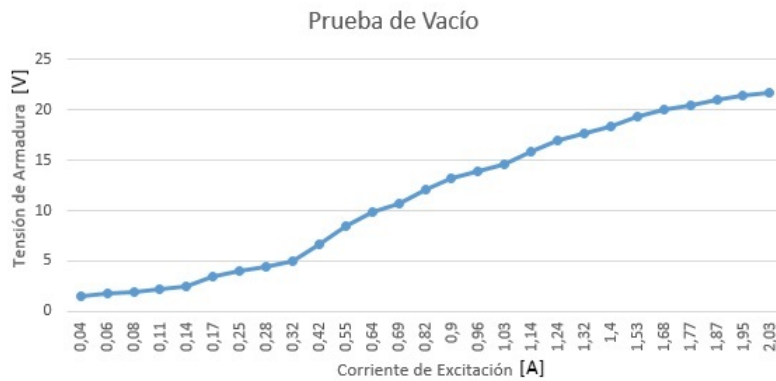


Gráfico 2.2: Prueba de Vacío del Alternador

Las tablas de datos recopilados, que generan los anteriores gráficos se encuentran en el apéndice B del documento.

## 2.2. Modelo 1. Frecuencia Variable

En las pruebas realizadas a frecuencia variable y tensión constante, se evidencia tanto el incremento de la tensión en los bornes del alternador, como el de la intensidad de corriente, los resultados se mantienen en los parámetros esperados de la curva de velocidad contra potencia generada por un alternador, que se puede hallar en el libro Motores de arranque y alternadores [2].

Se efectúan tres pruebas, la primera sin carga y dos mas variando la carga conectada al sistema; para colocar carga al sistema se utilizan bombillos de 200 W. A continuación se muestran los resultados de las pruebas:

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión de la Carga [V]	Tensión de Salida [V]	Corriente de Salida[A]
20	3	0,83	11,25	11,98	2,42
25		0,88	16	15,58	2,74
28		0,89	18,18	17,66	2,95
30,5		0,88	20,3	19,6	3,09
33,5		0,88	21,5	20,3	3,11
36		0,86	22,3	22,4	3,33
39		0,85	24,3	23,3	3,41
42		0,85	25,9	25,8	3,58

Tabla 2.1: Prueba sin Carga.

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión de la Carga [V]	Tensión de Salida [V]	Corriente de Salida[A]
20	3,2	0,98	15,3	15	
25,2			19,5	19,5	0,28
28,5			22,2	22,2	0,29
31,5			25,5	25,5	0,29
34,5			27,1	26,3	0,3
37,5			29,2	29,3	0,3

Tabla 2.2: Prueba con Carga, 1 Bombillo de 200 W

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión de la Carga [V]	Tensión de Salida [V]	Corriente de Salida[A]
20	3,6	1,04	16,6	16,3	0,23
25		1,04	21,2	21,3	0,25
28		1,06	25,2	24,3	0,23
31,1		1,06	27,3	27,3	0,23
34,5		1,06	30,3	30	0,23
37,5		1,07	34,7	34,3	0,23
41		1,14	38,6	38,6	0,23
44		1,12	41,5	39,4	0,23
46,5		1,12	45,2	40,1	0,24

Tabla 2.3: Prueba con Carga, 2 Bombillos de 200 W

### 2.3. Modelo 2. Frecuencia Constante

Estas pruebas se realizaron con valores de frecuencia constantes, cada prueba se realizó para un valor diferente, por el contrario a las anteriores pruebas, la tensión de excitación se aumentaba de manera gradual en la fuente, para registrar los valores de tensión de continua y alterna en los bornes del alternador.

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]	Velocidad del Motor [rpm]
20	0	0	0,9	0,3	
	0,3	0,01	0,9	0,02	612,6
	0,6	0,03	0,08	0	612,9
	0,9	0,1	1	1	616,9
	1,2	0,16	1,4	2,8	614,1
	1,5	0,25	2,8	6,8	612,6

Tabla 2.4: Prueba sin Carga.

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]	Velocidad del Motor [rpm]
25	0	0	0,7	2	728
	0,8	0,11	1,8	4,5	728,7
	1,3	0,21	2,8	7,5	729,17
	1,6	0,27	3,7	9,8	728,73
	1,9	0,3	4,5	12	728,3
	2,5	0,45	6,6	17,5	726,43
	2,8	0,53	7,8	20,2	727,22
	2,9	0,58	8,5	22,1	726,37
	3	0,61	9,1	23,5	725,8

Tabla 2.5: Prueba sin Carga.

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]	Velocidad del Motor [rpm]
30	0	0	0,8	2,4	876,13
	0,4	0,02	1	4,8	878,8
	0,7	0,09	1,8	4,8	879,27
	1,1	0,19	3,3	8,9	878,63
	1,4	0,26	4,5	12	877,03
	1,6	0,29	4,9	13,2	878,13
	2	0,43	7	18,2	877,43
	2,3	0,48	8,4	23,8	

Tabla 2.6: Prueba sin Carga.

# Capítulo 3

## Desarrollo en LabView

A continuación en el gráfico 3.1 se presenta el esquema estructural del montaje para laboratorio, sobre el cual se realizaron las pruebas en el generador y las respectivas aclaraciones de su funcionamiento y fin.

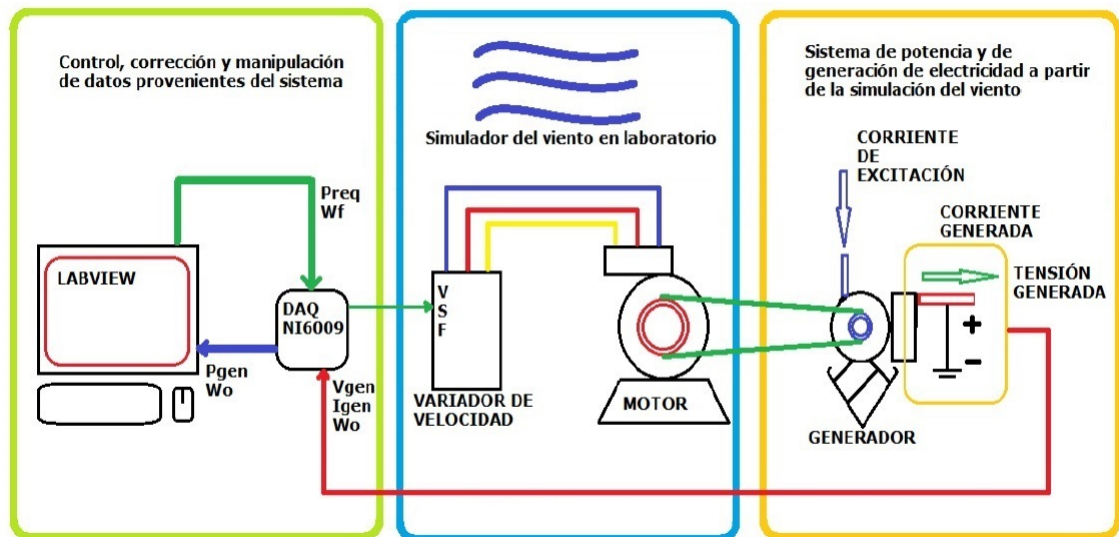


Gráfico 3.1: Estructura principal del proyecto

$w_o$  es la frecuencia inicial que es igual a 20 Hz.

$w_n$  es la frecuencia a la que debe ir el variador para satisfacer la potencia requerida, bajo una corriente de excitación constante.

$P_o$  potencia generada con  $w_o$  y un valor contante de corriente de excitación.

$P_f$ , potencia requerida, que puede ser mayor, igual o menor que  $P_o$ , y dependiendo de esto y por medio de software de LabView, se aumenta, no cambia o se disminuye

wn, respectivamente.

El proyecto consta de un sistema físico para emular y controlar el viento, se dice que se está emulando el viento cuando se intercambia energía mecánica proveniente del motor, evitando la ausencia total del viento en un laboratorio y se controla cuando la velocidad de este se manipula con el variador de velocidad.

La generación depende de dos variables directamente, la magnitud de la corriente de excitación en el rotor del generador y de la velocidad con la cual se produce el flujo de corriente en el devanado del estator.

El proceso es el siguiente, se excita el campo con un valor de corriente mayor a 100 mA, a una velocidad constante inicial de 20 Hz, medido en el variador de velocidad, se introduce un offset de potencia en el panel frontal de LabView, y dependiendo del valor de este offset o de potencia requerida, la velocidad cambiará, aumentando o disminuyendo, dependiendo de la potencia solicitada, el proceso requiere que se esté comparando la potencia inicial con respecto a la potencia requerida en todo momento, además para el control de la generación se puede optar por que el control se realice de manera manual o automática, como se puede seleccionar con un Push Button del panel frontal del instrumento virtual o VI por sus siglas en inglés *Virtual Instrument* (VI, será la forma de referirse a este desde ahora) del gráfico 3.2

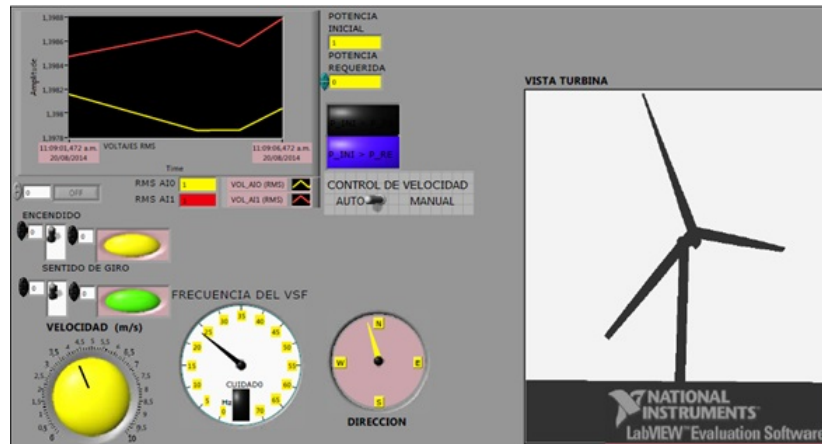


Gráfico 3.2: Panel frontal del sistema creado en LabView

De la figura anterior se pueden describir las variables de entrada y salida que posee el panel frontal del VI; se puede dar encendido al sistema; se puede seleccionar el sentido de giro para el motor; hay una perilla para el control manual de la velocidad del motor con su respectivo indicador de la frecuencia que está en ese mismo instante sobre el variador de frecuencia; una perilla interactiva con los pun-

tos cardinales que está conectada a la vista de la turbina, que describe virtualmente una posible dirección de donde proviene el viento; un control numérico para la introducción de la potencia que se quiere obtener; un indicador numérico de la potencia inicial; un indicador rms (raíz cuadrada media) de la variable de entrada que es la tensión a la salida del generador; un indicador gráfico del valor rms de la variable de entrada y dos leds indicadores sobre el estado de comparación de las dos potencias, tanto de la requerida como de la inicial.

De ahí que se haya querido tener la mayor cantidad de información útil y de la manipulación del sistema sin tener que moverse de un panel frontal a otro, de tal forma que se crea un laboratorio interactivo y práctico, ya que en un periodo del proyecto se contaba con tres VI, que durante el proceso se redujo a uno, un extracto de las mejores cualidades de cada VI.

A continuación se presenta la esencia de todo el sistema del VI, es una descripción del comportamiento del diagrama de bloques, que es quien sustenta las pruebas; es un paso a paso de lo previsto y desarrollado con LabView.

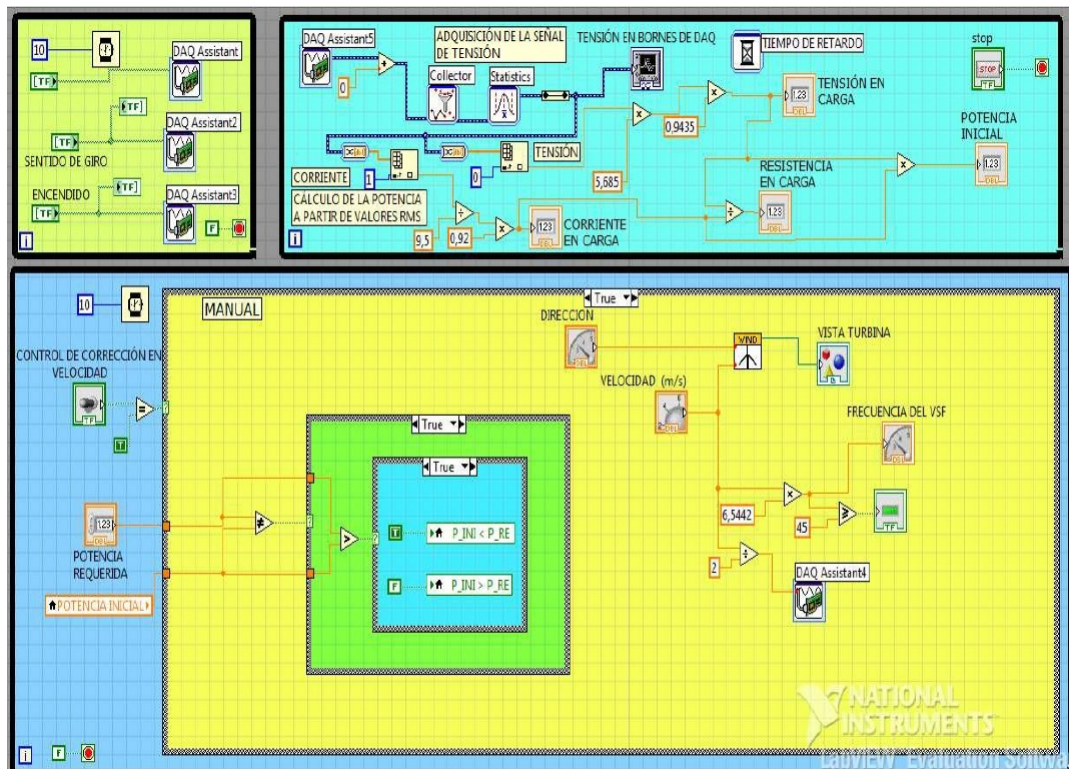


Gráfico 3.3: Diagrama de bloques de análisis y manipulación de datos

El gráfico 3.3, necesita la aclaración de que las señales o variables se toman directamente de la salida del generador, y que la señal de tensión se obtiene de una

carga, estas variables al exceder los límites de entrada de la tarjeta DAQ6009 de la NI (National Instrument), hubo que limitarlas a valores entre 0 como mínimo y 10 Volts para los valores máximos, y para poder verlos de forma real simplemente se usa un multiplicador en el diagrama de bloques para escalar a los valores reales en la salida del generador. Para la adquisición de los datos se usan los puertos análogos de entrada en modo RSE (un puerto análogo y la tierra), que permite la entrada acondicionada de los valores anteriormente mencionados; para la tensión se usa el puerto AI-0 y para la corriente el puerto AI-1 (puertos análogos), que se conectan y con ayuda de la LabView de la forma mostrada en el gráfico 3.4.

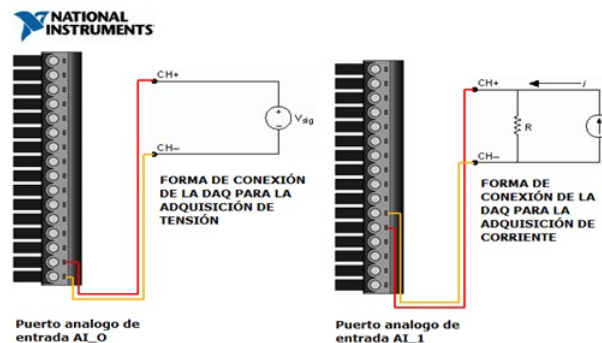


Gráfico 3.4: Conexión de la DAQ para adquirir datos acondicionados del generador.

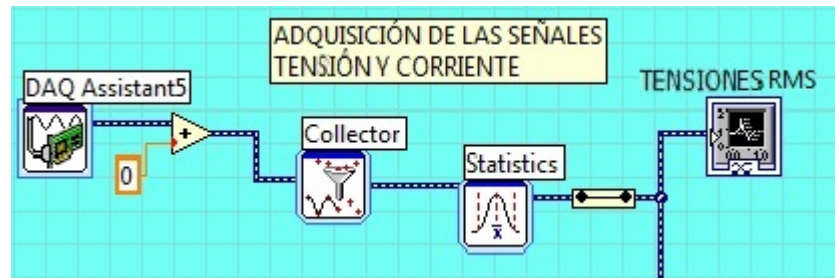


Gráfico 3.5: Adquisición de las señales provenientes del generador, tensión y corriente.

Después de aclarar la forma en que se adquirieron las señales, se procede a la explicación de la primera sección del diagrama de bloques, se toman los datos por medio del DAQ Assistant5 a un rango de muestreo de 1000 muestras por segundo, el sumador se usa por si hubiese la necesidad de un offset en la entrada, después se tiene el bloque Collector, que efectúa una retención de los datos para que se puedan manipular evitando la pérdida de información por sobre o sub-muestreo, en el bloque de Statistics se pueden efectuar diferentes tipos de operaciones estadísticas, para este primer paso fue de hallar el valor rms de las señales de entrada, se usa

un bloque Merge Signal, para poder converger al indicador gráfico las dos señales y poderlas visualizar al mismo tiempo.

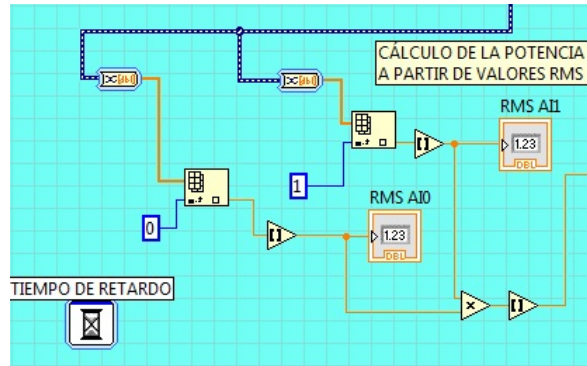


Gráfico 3.6: Bloque que divide las señales y donde se efectúan cálculos.

Luego de dividir las señales por medio de los bloques de Index Array, se efectúa un redondeo de los valores provenientes del bloque anterior, ya que saltaban entre intervalos pequeños de valores y se mostraban cambios en valores finitos y la comparación entraba en un ciclo sin fin, luego del redondeo y con los valores rms se calcula la potencia inicial, que se origina por la multiplicación de la señal de tensión con la señal intensidad de corriente, resultado que también es redondeado; para la obtención de la potencia se hace uso de la ecuación siguiente:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

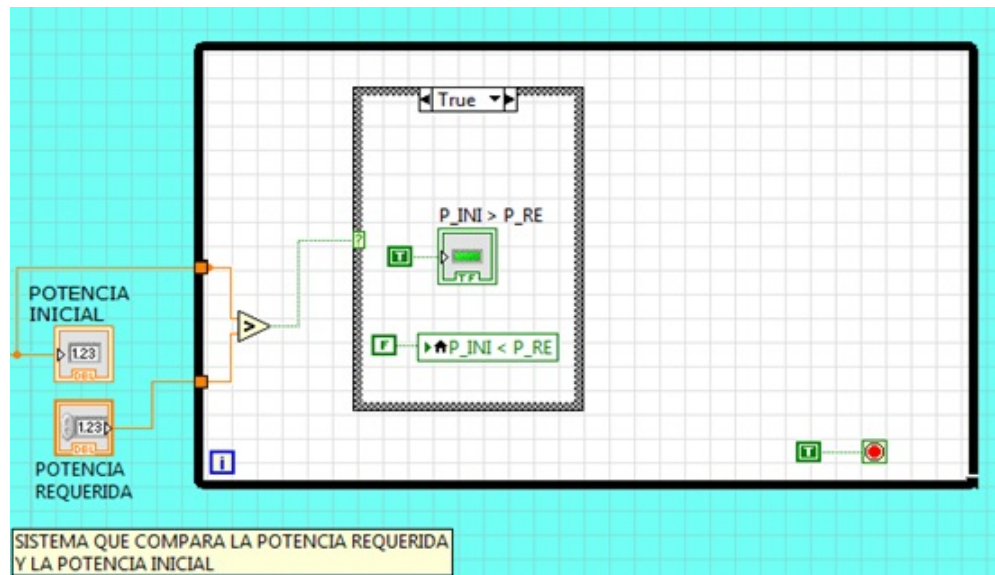


Gráfico 3.7: Bloque que compara y corrige la potencia requerida.

Este bloque realiza el procesamiento lógico, entre la potencia requerida con respecto a la potencia inicial, hace uso de un ciclo While para comparar las señales hasta que la condición en que las dos potencias son iguales se cumpla, por ejemplo, si la potencia requerida es mayor que la potencia inicial, el bloque del Case, primero pregunta si son iguales, de no ser así, pasa a la siguiente comparación del bloque Case y pregunta si la potencia requerida es mayor que la potencia inicial, como el ejemplo lo estipula, la potencia requerida es mayor, entonces como el bloque While realiza una iteración de una condición hasta que se cumpla, el bloque del While y con ayuda de la variable local de la velocidad en la perilla, se aumenta iterativamente la velocidad hasta que las dos potencias sean iguales, es de aclarar que la corrección de la potencia por medio de la velocidad en el motor y a través del variador de velocidad y comandado por la DAQ, tiene dos modos de acción como ya se había estipulado, el primero de forma manual y el segundo de forma automática, cuando las dos potencias se han igualado la velocidad debe quedar en un valor constante, y que no supere los 57 Hz en el variador por seguridad para el motor, que en placa estipula las 1700 rpm.

A continuación se presenta el bloque que hace interfaz entre la tarjeta DAQ y el variador de velocidad o frecuencia.



# CONCLUSIONES

Se construyó una estructura metálica para el proyecto que posee las ventajas básicas para el proceso de caracterización de tres tipos de alternadores, las pruebas se pueden desarrollar con cada alternador haciendo intercambios mecánicos usando llaves de dos dimensiones para aferrar o instalar cada uno de estos; el laboratorio solo requiere una carga y de los instrumentos de medición de intensidad de corriente, tensión y velocidad, elementos comunes de un laboratorio; las dimensiones de la mesa se asemejan a las encontradas dentro de los demás laboratorios, sin embargo, la vibración fue una debilidad, se presentó a altas velocidades e interfirió con algunos de los instrumentos, a pesar de esto se solventa la ventaja de lo construido, que posee versatilidad y ergonomía, la distribución de la estructura metálica, de los instrumentos de medida, el computador y la DAQ, de la fuente de excitación, el variador de frecuencia y las cargas.

Los datos en simulación se obtuvieron fácilmente, el desarrollo de esta actividad se hizo desde un puesto de comando; entonces el uso de LabView combinado con la DAQ y la versatilidad del montaje físico, predispone de un punto de apoyo para el procedimiento de la caracterización de alternadores.

Se establecieron las relaciones entre instrumentos (anemómetro, foto tacómetro y relé) de medida para el viento en campo, y debido a que el foto tacómetro se siguió usando en el proceso de manipulación del viento dentro del laboratorio, por medio del variador de frecuencia y posteriormente en el motor que se conectó al generador, se tuvo la posibilidad de conectar lo que se hizo dentro del laboratorio con el proceso inicialmente mencionado en campo, lo fiable de los datos tomados en laboratorio se contrastaron con los datos que se pueden hallar en el mapa eólico del IDEAM, que también fueron contrastados en dos meses (Mayo y Julio) y durante dos días, se pueden crear procesos de simulación de vientos de cualquier parte del país y crear las condiciones para un posible sistema de generación con unos rangos mínimos de viento que pueden oscilar entre 1.5 m/s, y de corriente de excitación con las cuales se deberá trabajar. El proceso para la evaluación de los datos, inició con los valores disponibles en el mapa de vientos del IDEAM, se capturaron datos con los instrumentos mencionados y disponibles, se contrastaron los datos obtenidos con los tomados del IDEAM, después de promediados se usaron como el rango en

el cual dentro de una locación geográfica se presentaron, finalmente se procedió a simular en el banco de pruebas, para hallar la corriente de excitación mínima para la locación.

Medidas las variables de velocidad, tensión y corriente con instrumentos manuales, se introdujeron errores en el proceso mismo del laboratorio, aunque se encuentren bien distribuidos sobre el banco, siempre debe vincularse una traslación para la captación de los datos y es ahí donde la DAQ cimienta el proyecto. La inclusión del instrumento virtual o VI de LabView, presupuesta que las acciones del proceso contengan la calidad y confiabilidad necesarias, lo que la hace ser parte del soporte principal de la adquisición y manipulación de los datos, y permite que exista una conexión palpable y visual para comparar con instrumentos manuales de medición; con las ventajas de la DAQ y de LabView el proceso de medición se fundamenta en observar los datos dentro del VI, señales de entrada, señales de salida y la corrección de velocidad, y luego simplemente rotando la vista, contrastar con los obtenidos con los instrumentos manuales.

Todos los generadores presentan características individuales, y éstas usadas en generación de electricidad, se resumen en la densidad de potencia o en su capacidad de generación, que es medida en Watt.hora; de forma gráfica el sistema diseñado de aspas y alternador presentó la siguiente capacidad[1].

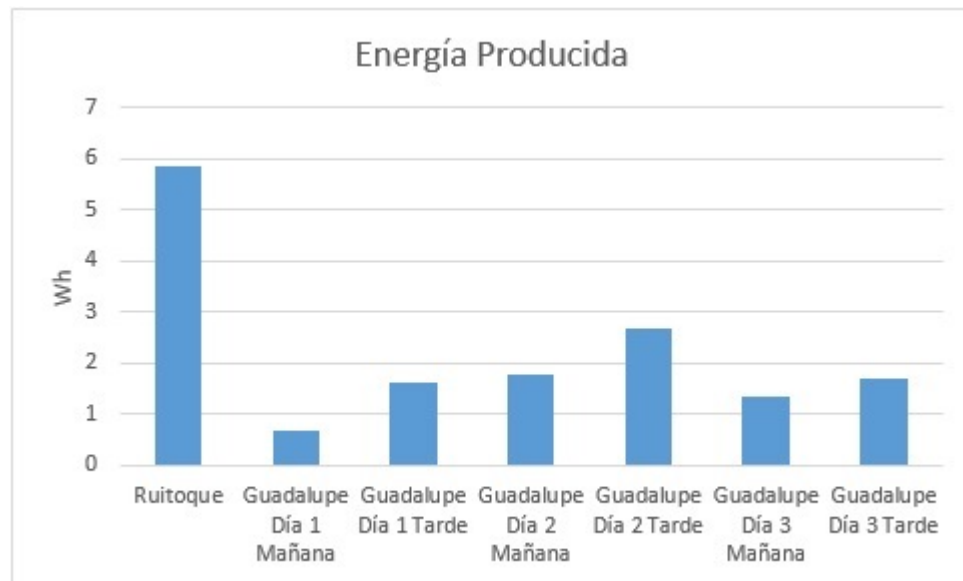


Gráfico 3.9: Capacidad de generación

# RECOMENDACIONES

El banco de pruebas se encuentra restringido a un valor máximo de revoluciones, debido a que el motor sólo puede llegar a 1700 rpm por datos de placa, entonces el alternador nunca fue llevado por precaución a su velocidad máxima, debido a esto, se debe incorporar un motor con al menos 2000 rpm.

Se debe adquirir y acondicionar un elemento que disminuya la vibración sobre los instrumentos manuales de medida, que se utilizan sobre el banco y que sirven como punto de referencia con respecto a lo medido con la DAQ.

El número de cables que provienen de la alimentación de electricidad para el variador y para la fuente de excitación, son incómodos para la movilización, entonces se deben crear punto de conexión sobre el banco mismo, para disimular parcialmente su presencia y reducir la incomodidad que generan.

En el VI de LabView, se debe incluir un panel gráfico y un colector de datos para que retenga los puntos de la caracterización, y al final de la prueba lo entregue como una función y su respectiva representación con un gráfico.

# Bibliografía

- [1] FRANQUESA VONESCHEN, Manuel. Nociones de energía eólica para alumnos y profesores novatos en la materia. *Cataluña*, 2012. 14 pág.
- [2] GUALTIERI, Pablo Jorge. Motores de arranque y alternadores. *Buenos Aires : HASA*, 2008. 192 pág.
- [3] INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME). Atlas de viento y energía eólica de Colombia. *Bogotá : Ministerio de Minas y Energía : Upme : Ideam*, 2006. 169 pág.
- [4] PÉREZ PASTOR, Cristóbal. Tacómetro para proyecto de aerogenerador (Arduino y Tecnologías para educación secundaria). [Blog en línea] *España: Albacete* , mayo 2012. Disponible en internet: URL:<http://jorgeroden.blogspot.com>

# Apéndice A

## DATOS PRUEBAS DE CAMPO

### A.1. Pruebas Guadalupe

Datos día 1. Jornada de la mañana																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm
1	116	21	60	41	19	61	31	81	49	101	32	121	103	141	55	161	59
2	78	22	57	42	16	62	35	82	48	102	45	122	101	142	58	162	64
3	79	23	53	43	3	63	36	83	47	103	50	123	99	143	60	163	67
4	78	24	49	44	29	64	32	84	46	104	54	124	95	144	55	164	72
5	76	25	42	45	33	65	31	85	44	105	54	125	91	145	48	165	73
6	76	26	36	46	36	66	36	86	44	106	53	126	89	146	41	166	71
7	73	27	29	47	39	67	40	87	45	107	49	127	85	147	35	167	73
8	67	28	24	48	33	68	45	88	41	108	46	128	82	148	30	168	74
9	63	29	23	49	30	69	50	89	35	109	43	129	77	149	30	169	73
10	61	30	28	50	31	70	52	90	32	110	40	130	74	150	38	170	73
11	62	31	32	51	32	71	51	91	32	111	45	131	72	151	47	171	72
12	69	32	46	52	30	72	48	92	31	112	53	132	72	152	50	172	66
13	77	33	56	53	27	73	45	93	29	113	64	133	69	153	47	173	64
14	84	34	58	54	29	74	49	94	27	114	71	134	66	154	46	174	68
15	87	35	52	55	32	75	53	95	26	115	78	135	66	155	46	175	68
16	87	36	46	56	30	76	54	96	24	116	84	136	64	156	46	176	66
17	85	37	43	57	32	77	51	97	20	117	89	137	61	157	47	177	65
18	77	38	37	58	28	78	50	98	19	118	92	138	61	158	45	178	64
19	69	39	30	59	26	79	51	99	19	119	97	139	60	159	49	179	68
20	64	40	23	60	28	80	53	100	18	120	101	140	57	160	54	180	75

Gráfico A.1: Datos día 1 - Mañana

Datos día 1. Jornada de la tarde																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm
1	84	21	82	41	55	61	53	81	83	101	115	121	87	141	63	161	67
2	89	22	80	42	57	62	67	82	82	102	110	122	93	142	57	162	68
3	96	23	74	43	61	63	67	83	81	103	105	123	97	143	54	163	68
4	102	24	68	44	63	64	67	84	82	104	98	124	97	144	55	164	65
5	106	25	62	45	62	65	69	85	82	105	94	125	93	145	53	165	63
6	104	26	59	46	59	66	77	86	80	106	91	126	89	146	52	166	64
7	103	27	58	47	60	67	84	87	75	107	89	127	85	147	50	167	67
8	101	28	56	48	58	68	87	88	71	108	91	128	84	148	46	168	78
9	94	29	52	49	54	69	86	89	76	109	96	129	84	149	42	169	84
10	87	30	53	50	50	70	82	90	81	110	97	130	83	150	37	170	84
11	81	31	53	51	45	71	77	91	85	111	95	131	80	151	30	171	82
12	78	32	56	52	42	72	74	92	90	112	93	132	77	152	25	172	79
13	80	33	56	53	40	73	79	93	93	113	91	133	75	153	26	173	71
14	79	34	56	54	39	74	80	94	94	114	91	134	75	154	29	174	59
15	78	35	56	55	35	75	82	95	96	115	90	135	76	155	39	175	49
16	74	36	55	56	38	76	77	96	100	116	88	136	77	156	44	176	44
17	75	37	55	57	37	77	75	97	105	117	86	137	78	157	46	177	47
18	76	38	53	58	32	78	78	98	111	118	82	138	78	158	52	178	52
19	75	39	50	59	37	79	81	99	118	119	82	139	72	159	63	179	53
20	79	40	49	60	41	80	82	100	117	120	85	140	66	160	68	180	54

Gráfico A.2: Datos día 1 - Tarde

Datos día 2 Jornada de la mañana																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm
1	58	21	71	41	80	61	80	81	58	101	106	121	67	141	80	161	81
2	63	22	74	42	76	62	69	82	65	102	106	122	65	142	81	162	80
3	68	23	72	43	70	63	59	83	66	103	100	123	67	143	81	163	80
4	73	24	71	44	64	64	50	84	65	104	90	124	68	144	80	164	76
5	73	25	69	45	59	65	44	85	66	105	86	125	67	145	79	165	74
6	73	26	73	46	58	66	42	86	73	106	84	126	70	146	78	166	72
7	74	27	79	47	62	67	40	87	76	107	82	127	69	147	76	167	67
8	77	28	83	48	67	68	39	88	77	108	80	128	69	148	74	168	66
9	77	29	86	49	73	69	42	89	80	109	80	129	67	149	74	169	65
10	79	30	88	50	86	70	47	90	77	110	79	130	70	150	80	170	62
11	79	31	86	51	94	71	53	91	74	111	79	131	73	151	87	171	61
12	81	32	86	52	96	72	60	92	72	112	77	132	74	152	92	172	59
13	82	33	85	53	92	73	56	93	71	113	71	133	73	153	92	173	62
14	82	34	82	54	89	74	49	94	69	114	69	134	75	154	86	174	65
15	82	35	84	55	85	75	44	95	69	115	74	135	79	155	80	175	69
16	80	36	85	56	84	76	44	96	69	116	70	136	81	156	80	176	74
17	79	37	84	57	87	77	45	97	72	117	68	137	84	157	80	177	74
18	78	38	86	58	91	78	49	98	83	118	68	138	87	158	84	178	73
19	75	39	81	59	89	79	51	99	98	119	69	139	85	159	84	179	76
20	70	40	78	60	84	80	55	100	103	120	68	140	80	160	83	180	75

Gráfico A.3: Datos día 2 - Mañana

Datos día 2 Jornada de la tarde																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm
1	9	21	123	41	97	61	85	81	98	100	100	121	73	141	80	161	47
2	27	22	129	42	90	62	82	82	89	102	100	122	76	142	78	162	43
3	21	23	134	43	81	63	83	83	83	103	101	123	98	143	77	163	99
4	18	24	138	44	71	64	84	84	76	104	103	124	114	144	77	164	50
5	14	25	140	45	85	65	82	85	81	105	105	125	117	145	79	165	52
6	11	26	139	46	97	66	85	86	95	106	110	126	121	146	83	166	46
7	15	27	139	47	98	67	86	87	86	107	112	127	115	147	87	167	104
8	30	28	139	48	68	68	83	88	99	108	115	128	121	148	89	168	38
9	40	29	137	49	78	69	80	89	102	109	118	129	126	149	89	169	43
10	102	30	133	50	70	70	79	90	105	110	118	130	51	150	86	170	101
11	57	31	133	51	60	71	80	91	113	111	119	131	59	151	79	171	40
12	69	32	134	52	74	72	82	92	115	112	115	132	69	152	72	172	44
13	79	33	135	53	111	73	82	93	121	113	109	133	75	153	63	173	52
14	87	34	135	54	99	74	86	94	119	114	104	134	73	154	54	174	58
15	93	35	133	55	68	75	84	95	92	115	99	135	76	155	43	175	56
16	96	36	127	56	77	76	78	96	88	116	91	136	82	156	35	176	55
17	97	37	121	57	84	77	69	97	95	117	84	137	87	157	33	177	54
18	102	38	115	58	88	78	60	98	98	118	75	138	88	158	33	178	55
19	111	39	108	59	89	79	52	99	99	119	66	139	85	159	35	179	50
20	118	40	103	60	87	80	128	100	100	120	69	140	82	160	42	180	45

Gráfico A.4: Datos día 2 - Tarde

Datos día 3 Jornada de la mañana																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm
1	77	21	76	41	71	61	59	81	80	101	59	121	67	141	35	161	81
2	71	22	76	42	65	62	60	82	71	102	53	122	66	142	41	162	74
3	64	23	77	43	63	63	61	83	67	103	48	123	63	143	47	163	75
4	62	24	78	44	61	64	65	84	67	104	44	124	60	144	57	164	80
5	66	25	76	45	56	65	67	85	70	105	40	125	55	145	62	165	82
6	67	26	76	46	57	66	67	86	77	106	35	126	50	146	72	166	81
7	67	27	74	47	62	67	66	87	78	107	34	127	43	147	80	167	78
8	67	28	75	48	63	68	66	88	82	108	32	128	34	148	78	168	77
9	67	29	78	49	65	69	66	89	87	109	35	129	26	149	78	169	80
10	65	30	77	50	64	70	66	90	92	110	39	130	17	150	75	170	81
11	63	31	78	51	64	71	73	91	93	111	42	131	16	151	76	171	85
12	60	32	80	52	64	72	82	92	91	112	44	132	21	152	78	172	88
13	57	33	80	53	64	73	86	93	92	113	46	133	18	153	82	173	88
14	56	34	80	54	64	74	86	94	92	114	51	134	20	154	85	174	87
15	58	35	78	55	63	75	86	95	87	115	56	135	31	155	86	175	89
16	64	36	76	56	61	76	86	96	81	116	59	136	37	156	89	176	90
17	74	37	75	57	59	77	89	97	79	117	61	137	37	157	89	177	94
18	78	38	77	58	62	78	93	98	74	118	62	138	36	158	89	178	102
19	78	39	78	59	61	79	90	99	67	119	64	139	35	159	86	179	111
20	77	40	75	60	58	80	87	100	63	120	66	140	34	160	86	180	111

Gráfico A.5: Datos día 3 - Mañana

Datos día 3. Jornada de la tarde																	
No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm	No. Muestra	rpm		
1	99	21	85	41	83	61	70	81	57	101	84	121	44	141	87	161	69
2	105	22	86	42	85	62	70	82	52	102	83	122	57	142	89	162	66
3	108	23	86	43	85	63	71	83	49	103	80	123	61	143	90	163	63
4	111	24	87	44	85	64	74	84	47	104	77	124	64	144	89	164	60
5	113	25	87	45	87	65	77	85	42	105	71	125	67	145	86	165	62
6	114	26	87	46	88	66	81	86	39	106	68	126	68	146	82	166	61
7	113	27	86	47	87	67	84	87	38	107	66	127	66	147	75	167	60
8	112	28	84	48	86	68	85	88	45	108	61	128	63	148	66	168	58
9	112	29	85	49	85	69	85	89	48	109	57	129	60	149	57	169	55
10	112	30	87	50	86	70	86	90	49	110	54	130	59	150	53	170	54
11	108	31	88	51	87	71	87	91	51	111	53	131	58	151	48	171	54
12	104	32	92	52	87	72	85	92	50	112	52	132	59	152	50	172	57
13	103	33	95	53	85	73	82	93	50	113	44	133	64	153	55	173	59
14	101	34	99	54	83	74	78	94	53	114	35	134	67	154	60	174	62
15	99	35	99	55	79	75	76	95	58	115	27	135	68	155	65	175	66
16	97	36	97	56	74	76	74	96	64	116	22	136	70	156	68	176	69
17	95	37	96	57	71	77	70	97	70	117	27	137	77	157	67	177	71
18	91	38	95	58	69	78	68	98	77	118	33	138	81	158	68	178	70
19	86	39	92	59	67	79	66	99	81	119	36	139	84	159	70	179	69
20	84	40	86	60	68	80	63	100	84	120	36	140	86	160	72	180	70

Gráfico A.6: Datos día 3 - Tarde

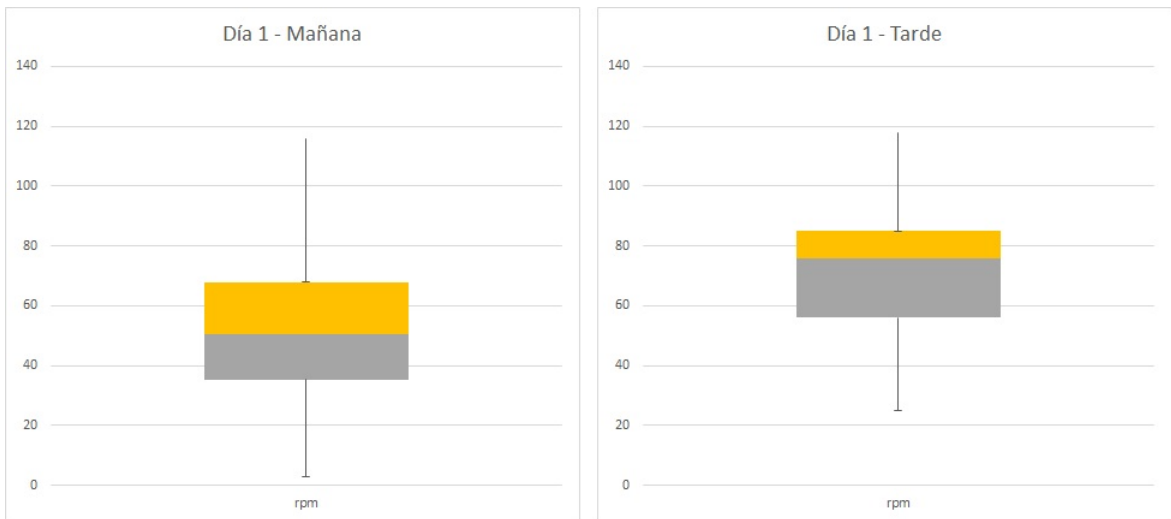


Gráfico A.7: Diagramas de bigotes - Día 1

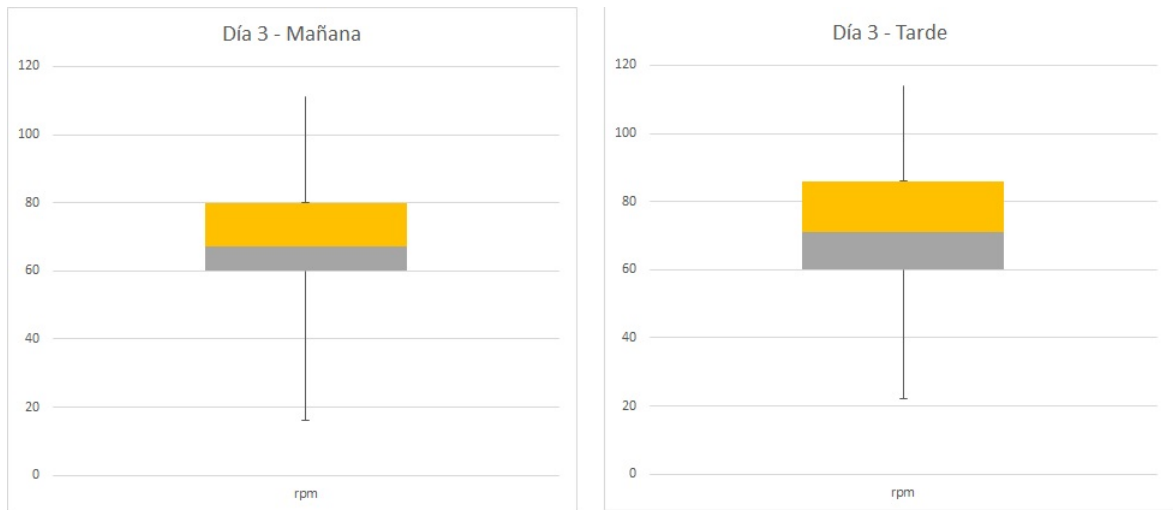


Gráfico A.8: Diagramas de bigotes - Día 3

## A.2. Pruebas Ruitoque

Arduino [rpm]	Foto Tacómetro [rpm]	Anemómetro [m/s]	Arduino [rpm]	Foto Tacómetro [rpm]	Anemómetro [m/s]	Arduino [rpm]	Foto Tacómetro [rpm]	Anemómetro [m/s]
161	502,1	4,9	129	395,3	4	169	475,4	3,6
141	415	4,2	135	380,9	3,5	119	360,9	2,6
133	438	3	100	293,7	2,5	123	338,9	3
145	350,5	3,3	99	312,6	2,3	122	403,1	3,4
145	292	2,6	78	241	4,4	158	520,1	4,5
150	402,2	3,3	98	303,3	2,3	135	369,5	3
140	455	2,9	87	271,9	2	167	505,6	4,2
139	455,9	3,4	109	286,3	2,8	134	396,1	3,7
124	356,7	3,5	115	502,5	3,5	198	576,6	4,8
119	458	2,9	129	393,2	3,3	181	575,2	4,6
125	369,2	3,4	100	324,6	2	136	367,1	2,7
139	400,9	3,4	109	334,1	3,9	108	259,5	2,8
99	337,3	2,8	119	345,5	2,5	145	450,9	3,4
142	403,1	3,8	107	328	3	134	435,4	3,7
107	332,6	3,1	91	280,7	2,7	108	333,4	2,6
135	437	3,2	82	298,4	2,9	85	259,6	2,7
102	318,1	2,6	91	282,6	2,6	85	257,2	2,2
110	335,5	2,6	133	380,5	3,4	75	236	2,6
127	404,6	3,5	85	252,8	1,9	113	221,2	2,3
139	378	3,8	72	163,5	3	168	479,2	4,6
168	506	4,2	62	123,4	2,9	142	430,4	4
150	376	4,1	77	138,2	3,2	148	439,8	4,6
138	369,7	3,9	81	193,3	1,8	169	502	4,7
134	478,3	3,4	76	256,8	2,5	80	213,8	2,4
137	399,7	3,4	53	111,3	2,7	194	498,9	4,6
127	389,4	3,8	54	154	2,3			

Gráfico A.9: Datos prueba de campo Ruitoque

## Apéndice B

### PRUEBAS DE LABORATORIO

#### B.1. Datos de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto

Corriente de Excitación [A]	Corriente de Armadura [A]
0,04	1,78
0,055	1,99
0,07	2,14
0,08	2,33
0,11	2,61
0,19	3,7
0,21	4,077
0,3	5,37
0,64	10,29
0,88	14,19
1,22	19,47
1,53	24,6
1,57	25,55
2,09	32,33

Gráfico B.1: Datos prueba de cortocircuito

Corriente de Excitación [A]	Tensión de Armadura [V]
0,04	1,5
0,06	1,75
0,08	1,92
0,11	2,2
0,14	2,48
0,17	3,43
0,25	4,01
0,28	4,46
0,32	5,04
0,42	6,59
0,55	8,5
0,64	9,91
0,69	10,66
0,82	12,15
0,9	13,24
0,96	13,91
1,03	14,64
1,14	15,89
1,24	16,92
1,32	17,64
1,4	18,32
1,53	19,37
1,68	20
1,77	20,5
1,87	21
1,95	21,4
2,03	21,7

Gráfico B.2: Datos prueba de circuito abierto

## B.2. Datos de las pruebas a frecuencia variable

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión de Salida [V]	Corriente de Salida [A]
20	2,2	0,66		
23	2,2	0,61	9,3	2,47
26	2,2	0,62	10,39	2,6
29	2,2	0,64	12,12	2,88
33	2,2	0,64	14,23	3,1
35	2,2	0,6	14,54	3,15
38,1	2,2	0,64	16,68	3,41

Gráfico B.3: Prueba a frecuencia variable y tensión de excitación fija

## B.3. Datos de las pruebas a frecuencia constante

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]	Velocidad del Motor [rpm]
25	0	0	1	1	
	0,3	0,02	1	1,3	764,3
	0,6	0,07	1,3	2,4	762,06
	0,9	0,11	1,6	3,6	765,6
	1,2	0,2	2,5	6,1	761,87
	1,5	0,28	3,5	8,4	759,9

Gráfico B.4: Prueba frecuencia constante, 25 Hz

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]
25	0	0	7,5	2,1
	0,3	0,01	7,3	2,2
	0,6	0,06	7,3	3,3
	1	0,14	8	6,1
	1,2	0,2	8,4	7,7
	1,5	0,32	9,7	12,6

Gráfico B.5: Prueba frecuencia constante, 25 Hz

Frecuencia [Hz]	Tensión de Excitación [V]	Corriente de Excitación [A]	Tensión en Alterna [V]	Tensión en Continua [V]	Velocidad del Motor [rpm]
30	0	0	0,5	1,4	871,47
	0,3	0,01	0,3	1	877,2
	0,6	0,05	0,6	1,6	879,27
	0,9	0,16	1,6	4,5	879,5
	1,2	0,18	2,3	5,9	879,47
	1,5	0,32	5,2	13,4	879

Gráfico B.6: Prueba a frecuencia constante, 30 Hz



## Apéndice C

# MAPAS DE VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN SUPERFICIE

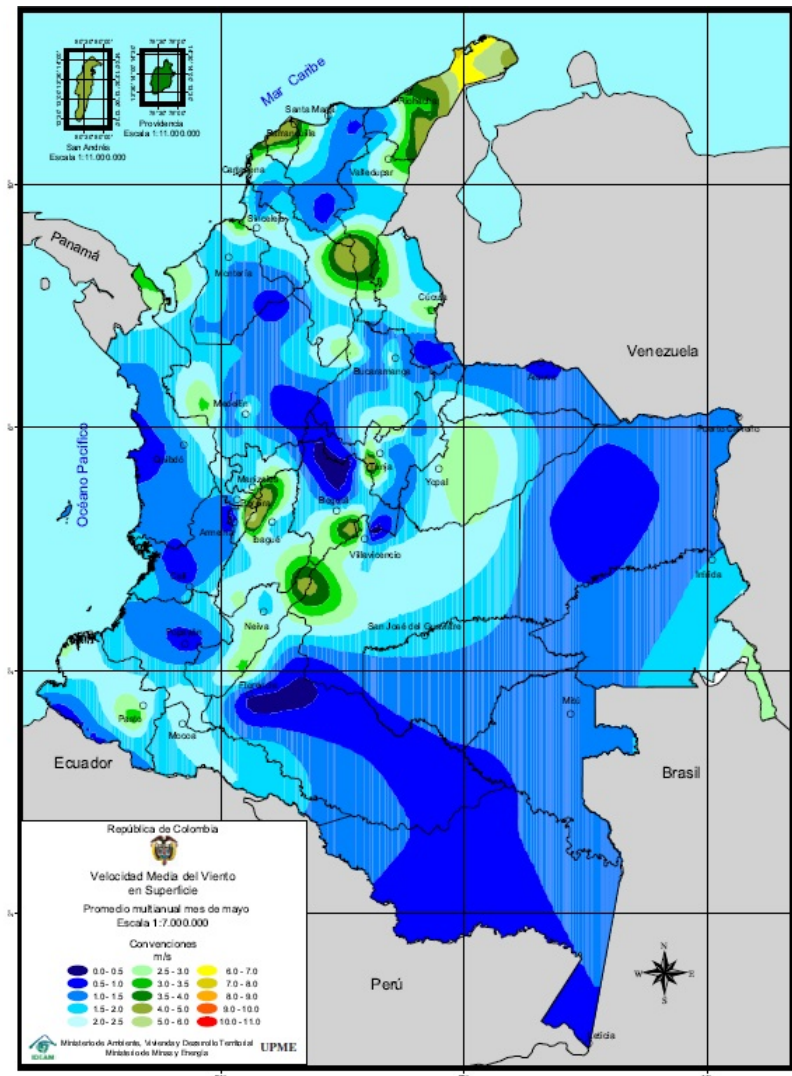


Gráfico C.1: Mapa tomado del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, mes de Mayo[3]

APÉNDICE C. MAPAS DE VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN SUPERFICIE49

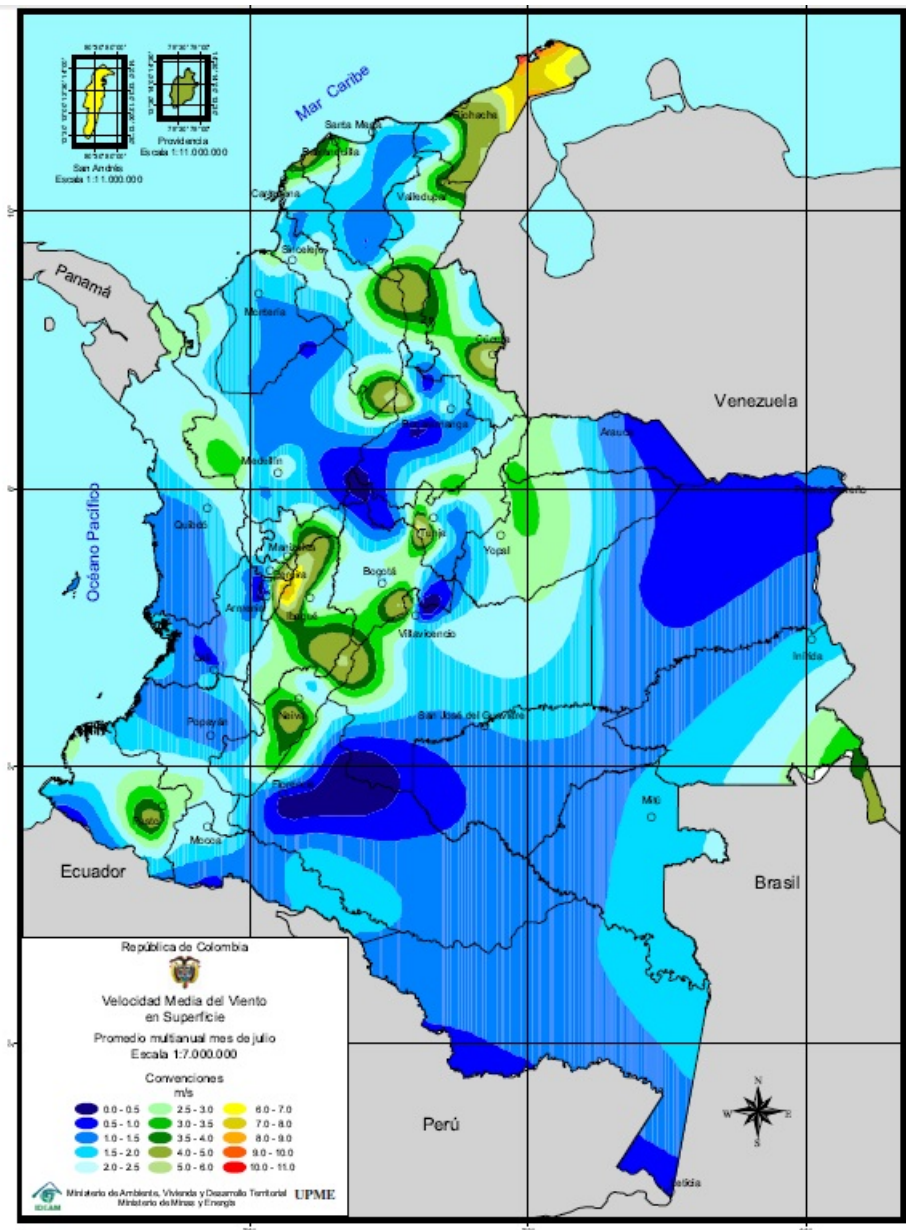


Gráfico C.2: Mapa tomado del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, mes de Julio[3]

## Apéndice D

# IMÁGENES DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA



Gráfico D.1: Estructura para montaje del alternador, Prueba Guadalupe



Gráfico D.2: Ubicación del relé para uso con arduino, Prueba Guadalupe

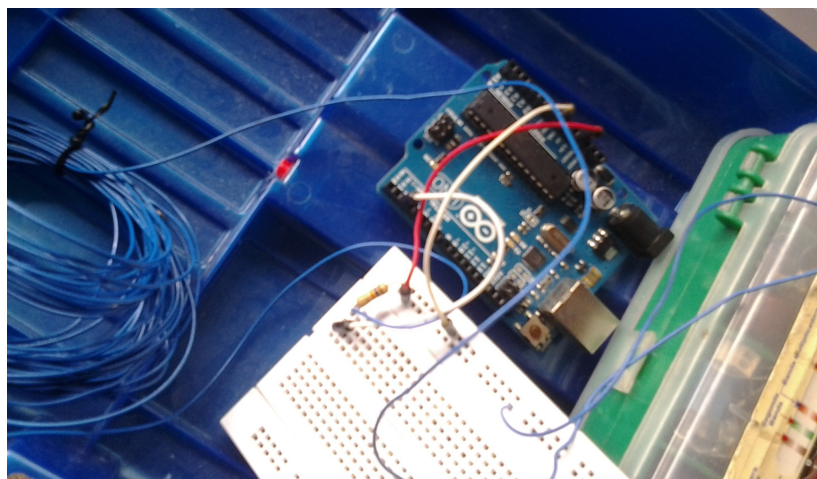


Gráfico D.3: Conexión tarjeta arduino, Prueba Guadalupe



Gráfico D.4: Montaje final, Prueba Guadalupe



Gráfico D.5: Elementos de medida, Prueba Ritoque



Gráfico D.6: Elementos de medida, Prueba Ruitoque



Gráfico D.7: Estructura, Prueba Ruitoque



Gráfico D.8: Proceso de medida, Prueba Ruitoque



Gráfico D.9: Alternador