

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMILIANO ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS

DIVISIÓN ACADÉMICA DE MECÁNICA INDUSTRIAL

**“CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE VIENTO WIND SENSOR
REV. P.”**

REPORTE DE ESTADÍA

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
TÉCNICO SUPERIOR UNIVERSITARIO EN MECATRÓNICA
ÁREA AUTOMATIZACIÓN**

**PRESENTA:
MIGUEL ANGEL HUERTERO DIEGO**

**ASESOR INSTITUCIONAL
DR. GUILLERMO BARRIOS DEL
VALLE**

**ASESOR ACADÉMICO
M.C. JONATHAN VILLANUEVA
TAVIRA**

**SEGUNDO ASESOR
DR. JORGE SALVADOR VALDEZ MARTÍNEZ**

CONTENIDO

Índice de figuras

Índice de tablas

Agradecimientos

Resumen

Summary

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....10

1.1	Planteamiento del Problema	10
1.2	Planteamiento de la Hipótesis.....	10
1.3	Objetivos	11
1.3.1	General	11
1.3.2	Específicos.....	11
1.4	Justificación.....	11
1.5	Alcances y Limitaciones	11
1.5.1	Alcances	12
1.5.2	Limitaciones	12
1.6	Datos generales de la Empresa	12
1.6.1	Nombre	12
1.6.2	Logotipo	12
1.6.3	Dirección	13
1.6.4	Giro	13
1.6.5	Tamaño.....	13
1.6.6	Asesor Industrial	13

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO14

2.1	Revisión Bibliográfica	14
2.1.1	Metrología	14
2.1.1.1	Calibración.....	14
2.1.1.2	Error.....	14

2.1.1.3 Incertidumbre.....	14
2.1.1.4 Exactitud.....	15
2.1.1.5 Precisión.....	15
2.1.1.6 Repetibilidad.....	16
2.1.2 Sensores.....	16
2.1.2.1 Tipos de Sensores.....	16
2.1.2.2 Tipos de Transducción	17
2.1.3 Wind Master Gill Instruments	18
2.1.3.1 Teoría del Funcionamiento	19
2.1.3.2 Fundamentación Matemática	21
2.1.4 Wind Sensor Rev. P.....	22
2.1.4.1 Principio del Funcionamiento.....	23
2.1.4.2 Anemómetro con Termistores	24
2.1.5 Acondicionamiento de Señal.....	25
2.1.5.1 Dominio de Datos	26
2.1.6 Sistemas de Adquisición de Datos.....	26
2.1.7 Arduino YUN.....	27
2.2 Perspectiva Teórica.....	28

CAPÍTULO 3. DESARROLLO.....29

3.1 Procesos de Administración.....	29
3.1.1 Inicio.....	29
3.1.2 Planeación	30
3.1.3 Ejecución del Proyecto.....	31
3.1.3.1 Sistema de Adquisición de Datos.	31
3.1.3.2 Caracterización del Wind Sensor Rev. P.....	34
3.1.3.2.1 Montaje para el Experimento.....	35
3.1.3.2.2 Diseño e Impresión de Base 3D.....	36
3.1.3.2.3 Caracterización del Viento.....	39
3.1.3.2.4 Análisis de Sensibilidad.....	42
3.1.3.2.5 Caracterización de Temperatura.	43
3.1.3.3 Calibración del Wind Sensor Rev. P.....	48
3.1.3.3.1 Temperatura.....	48
3.1.3.3.2 Viento.	54

3.1.4	Control	63
3.1.5	Cierre	64

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....65

4.1	Comprobación de Hipótesis	65
4.2	Cumplimiento de Objetivos	65
4.3	Resultados	66
4.4	Contribuciones	66

REFERENCIAS

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Logotipo de la empresa.....	12
Figura 1.2 Croquis de ubicación de la empresa	13
Figura 2.1 Exactitud.	15
Figura 2.2 Precisión.	15
Figura 2.3 Anemómetro 3D.	18
Figura 2.4 Especificaciones Estructurales.....	18
Figura 2.5 Señal cuadrada.	19
Figura 2.6 Dirección del viento.	19
Figura 2.7 Onda Ultrasónica.....	20
Figura 2.8 Reflexión, absorción y transmisión de una onda.	20
Figura 2.9 Efecto Doppler.	21
Figura 2.10 Medición de viento mediante Ultrasonido.....	22
Figura 2.11 Wind Sensor Rev. P.	22
Figura 2.12 Curva característica NTC.	23
Figura 2.13 Relación Voltaje-Amperaje.....	24
Figura 2.14 Tipos de dominios.	26
Figura 2.15 Sistemas de adquisición de datos.	27
Figura 2.16 Puente entre los Microcontroladores.....	28
Figura 3.1 Sistema de adquisición de datos dentro de la carcasa.	32
Figura 3.2 Transformador utilizado en la fuente de alimentación.	32
Figura 3.3 Placa de alimentación.	33
Figura 3.4 Fuente conmutada 12V 2A.....	33
Figura 3.5 CNC para Construcción del PCB.	34
Figura 3.6 Nueva placa terminada.	34
Figura 3.7 Esquema del Sensor.....	34
Figura 3.8 Ventilador.	35
Figura 3.9 Ventilador y WindMaster alineados.	36

Figura 3.10 WindMaster sobre tripié.	36
Figura 3.11 Plantilla para obtener ángulos.	37
Figura 3.12 Diseño del Wind Master en Blender.	37
Figura 3.13 Vista ortogonal.	37
Figura 3.14 Vista inferior.	38
Figura 3.15 Impresora Prusa i3.	38
Figura 3.16 Proceso de impresión.	38
Figura 3.17 Conexión del sensor.	39
Figura 3.18 Diagrama a bloques de conexión.	40
Figura 3.19 Rotación del Wind Sensor.	42
Figura 3.20 Termómetro.	44
Figura 3.21 Calentador.	44
Figura 3.22 LM35, Sensor de temperatura.	45
Figura 3.23 Esquemático del termistor.	49
Figura 3.24 Sensores dentro de la caja.	52
Figura 3.25 Montaje del experimento.	52
Figura 3.26 Sitio para llevar acabo las campañas experimentales.	55
Figura 3.27 Marcas en el piso de los 5 puntos.	56
Figura 3.28 Ventilador.	56
Figura 3.29 Ventilador industrial.	59
Figura 3.30 Ventilador industrial.	59
Figura 3.31 Graduación de posiciones.	60
Figura 3.32 Marcas para cada posición.	61
Figura 3.33 WindSensor detrás del WindMaster.	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Sensores y métodos de detección ordinarios.	17
Tabla 3.1 Diagrama de Gantt	30
Tabla 3.2 Lista de materiales.	30
Tabla 3.3 Primer análisis de altura.	41
Tabla 3.4 Segundo análisis de altura.	41
Tabla 3.5 Alturas con tres velocidades.....	42
Tabla 3.6 Análisis de sensibilidad.	43
Tabla 3.7 Caracterización de temperatura.	45
Tabla 3.8 Segunda campaña de caracterización de la temperatura.	48
Tabla 3.9 Independencia de datos en promedios.....	51
Tabla 3.10 Diferencia entre ambas ecuaciones.	54
Tabla 3.11 Segunda caracterización del viento.....	57
Tabla 3.12 Segunda y tercer caracterización del viento.	58
Tabla 3.13 Caracterización ventilador industrial.....	59
Tabla 3.14 Interferencia de sensor.....	62

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a: mis padres que son pieza fundamental en mi desarrollo académico y personal, por todo su apoyo y comprensión, por ser ejemplos de triunfo y superación personal, alentando así mi motivación por estudiar, a ellos, toda mi admiración y respeto.

Mi pequeño hermano, que es el motor de todo esto, gracias por ayudarme a no estresarme tanto, y hacerme recordar que cosas pequeñas, pueden hacer que un día malo se convierta en algo bueno.

Mis abuelos, por apoyarme en momentos difíciles, ser guías y darme un poco de su tan vasto y valioso conocimiento.

Mis tíos, por esas grandes muestras de afecto y apoyo, por sus consejos y esas pláticas que nutren mi conocimiento.

Mis amigos, por el apoyo brindado en momentos difíciles, por esas palabras de aliento y por esos buenos momentos que hemos podido compartir.

Mis profesores, que en mis 14 años de estudio he tenido la dicha de conocer a maestros que se merecen de manera honorífica ser llamados así, gracias por ser guías, por su esfuerzo y dedicación, de igual forma a mi asesor académico, quien fue de gran ayuda en la realización de este proyecto.

Finalmente, al Dr. Guillermo Barrios del Valle, por darme la oportunidad de colaborar en este proyecto y así poder demostrar mis habilidades, así como a la Dra. Guadalupe Huelsz, al Ing. Héctor Daniel Cortés González y al Ing. Guillermo Hernández Cruz, por el apoyo brindado.

RESUMEN

El departamento de termociencias del Instituto de Energías Renovables (IER), perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), tiene como objetivo realizar investigación en el área de transferencia de calor en edificaciones entre otros temas afines, para realizar el trabajo experimental es muy importante la utilización de un sistema de adquisición de datos fiable. El objetivo de este proyecto es lograr la calibración del sensor de viento y temperatura WindSensor Rev. P., realizando una serie de campañas experimentales para poder identificar el comportamiento del sensor. Inicialmente se realizaron pruebas para identificar si el sensor realmente necesitaba ser calibrado, al ser comprobado que en efecto era necesaria la calibración, se procedió a realizar las campañas experimentales pertinentes. Se realizaron dos calibraciones, una para el termistor con el que funciona el WindSensor para medir la temperatura y una segunda calibración para las mediciones del viento. La metodología experimental utilizada fue distinta para ambos parámetros y como patrones de medida se utilizaron un termómetro y un anemómetro ultrasónico (WindMaster), para la temperatura y el viento respectivamente.

Finalmente, a los datos obtenidos de las campañas experimentales, se les ajustó una curva, con la cual se pudo obtener sus respectivas ecuaciones de calibración, además se realizó la comprobación del funcionamiento de las ecuaciones, las cuales arrojaron resultados satisfactorios, concluyendo con que la calibración del sensor fue un éxito. Cabe resaltar que, para el trabajo experimental, es necesario tener controlados todos los parámetros y objetos que intervengan en dicho trabajo, es decir realizar un montaje que permita tener repetibilidad al realizar una serie de pruebas, en el desarrollo del proyecto se especifica de manera detallada como se realizó el montaje para los experimentos y la metodología utilizada, la cual es importante seguir, si es que se quiere replicar el trabajo de calibración.

SUMMARY

The department of thermosciences of the Instituto de Energías Renovables (IER) of Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), makes investigation work about heat transfer in builds among other related topics, to make the experimental work is very important the use of a system of data acquisition trustworthy, usually the systems of data acquisition are expensive, so that was development a system of data acquisition of free software and hardware, using a Arduino and sensors of temperature, humidity, sun radiation and wind. the objective of this project is gets the calibration of sensor of wind and temperature WindSensor Rev. P., doing a series of experimental campaign to identify the comporting of sensor. Initially, performed tests to identify if the sensor needed calibration, once verified that the calibration is needed, the campaigns experimental was made. two calibrations were made, one to the thermistor used to measurement of temperature and a second calibration to measurement wind. the methodology experimental used was different for the two parameters, the patron of measurement was a thermometer and anemometer (WindMaster), to temperature and wind respectively.

Finally, to all data get of the experimental campaigns, were fitted to a curve, with which they were obtained their respective calibration equations, was make the testing of equations of calibration, the data were satisfactory, in conclusion the calibration was success. for make an experimental work, is very important and necessary have control of the parameters and objects what intervene in the experimental work, make a setup, which let have repeatability when necessary make other tests, in the develop of this project, is specified, how was made the setup to experiments and the methodology to follow, if you want replicate the calibration work.

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 Planteamiento del Problema

El Instituto de Energías Renovables (IER), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), es un centro de investigaciones, que tiene como fin generar conocimiento de frontera en el tema de energía, está constituido por un conjunto de departamentos. El departamento de termociencias, realiza trabajos de investigación sobre el comportamiento de distintas magnitudes físicas en edificaciones, tales como temperatura, velocidad del viento, dirección del viento, radiación etc.

Por esta razón se diseñó un sistema de adquisición de datos utilizando software libre, mediante el uso de un Arduino Yún y distintos sensores que deberán realizar mediciones de dichas magnitudes físicas, las medidas adquiridas son almacenadas en una Base de datos. Dentro de los sensores, el que destaca es un sensor de viento y temperatura de alta sensibilidad, sin embargo, es necesario verificar la fidelidad y precisión de dicho sensor, para esto se deberán realizar una serie de campañas experimentales, para comprobar su funcionamiento.

Además, se deberá realizar una crítica constructiva respecto al sistema de adquisición de datos vigente, para de esta manera partir hacia su mejora.

1.2 Planteamiento de la Hipótesis

Es posible realizar la calibración del Wind Sensor Rev. P, para lograrlo, es necesaria la realización de una serie de campañas experimentales, para obtener una curva de calibración que se encuentre dentro de los lineamientos del El Instituto de Energías

Renovables, dicho lineamiento es que las mediciones del sensor se encuentran dentro de $\pm 5\%$ de error.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Realizar la calibración del Wind Sensor Rev. P. y mejorar el sistema de adquisición de datos de software libre actual.

1.3.2 Específicos

- Desarrollar una campaña experimental sobre el Wind Sensor Rev. P.
- Verificar que su funcionamiento sea óptimo, de lo contrario se deberá calibrar.
- Se diseñará una nueva Placa de Circuito Impreso (PCB) del sistema de Adquisición de datos, para lograr mayor eficiencia en el sistema de alimentación del mismo.

1.4 Justificación

Es de gran importancia comprobar que las lecturas tomadas por el Wind Sensor Rev. P. son verídicas, dado que la información obtenida por el sistema de adquisición de datos, será utilizada por el departamento de termociencias, para determinar el comportamiento de distintas magnitudes físicas en edificaciones. Por tanto, es necesario tener lecturas reales para su trabajo experimental.

1.5 Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

Al finalizar las estadías, se logrará desarrollar el sistema de adquisición de datos de software libre versión 2.0, el cual permitirá realiza mediciones con un grado más alto de exactitud y precisión.

1.5.2 Limitaciones

Los resultados de la calibración se verán afectado por la falta de equipo necesario, para alcanzar una calibración de alta confiabilidad.

1.6 Datos generales de la Empresa

1.6.1 Nombre

Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México.

1.6.2 Logotipo



Figura 1.1 Logotipo de la empresa

1.6.3 Dirección

Priv. Xochicalco S/N Temixco, Morelos 62588 México. Se puede observar el croquis en la Figura 1.2.

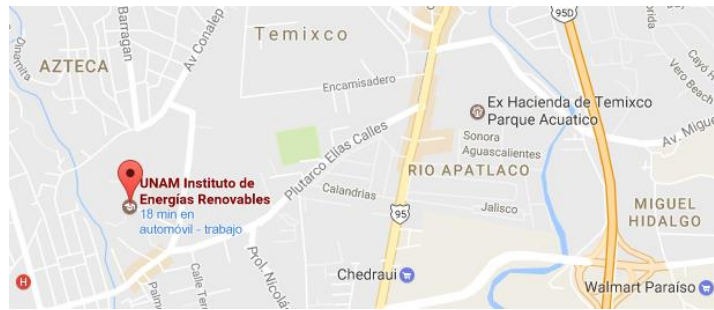


Figura 1.2 Croquis de ubicación de la empresa

1.6.4 Giro

Investigación y Desarrollo Tecnológico.

1.6.5 Tamaño

Grande.

1.6.6 Asesor Industrial

Dr. Guillermo Barrios Del Valle

Puesto en Investigador asociado C de tiempo completo.

Doctor en Ingeniería, área Mecánica.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Revisión Bibliográfica

2.1.1 Metrología.

La metrología es la ciencia que trata de las mediciones, de los sistemas de unidades y de los instrumentos de medición. La metrología es una ciencia muy importante que nos permite la normalización y calibración de instrumentos (Rodríguez, 2012).

2.1.1.1 Calibración.

Cuando se selecciona un dispositivo con propósito de patrón de referencia para realizar una calibración de otro instrumento, una de las más importantes determinaciones es cuán exacto debe ser éste y saber a ciencia cierta si se puede servir para calibrar otros instrumentos apropiadamente (Díaz, 2011).

2.1.1.2 Error.

El error de medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las imperfecciones de los aparatos (Solé, 2011).

2.1.1.3 Incertidumbre.

Es la dispersión de los valores que se pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos, etc. (Solé, 2011).

2.1.1.4 Exactitud.

Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiene de dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud de medida. Es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, tal como se muestra en la Figura 2.1, la exactitud se da en términos de inexactitud (Solé, 2011).



Figura 2.1 Exactitud.

2.1.1.5 Precisión.

Es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas, tal como se muestra en la Figura 2.2. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión (Solé, 2011).



Figura 2.2 Precisión.

2.1.1.6 Repetibilidad.

Es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice de la señal de salida del instrumento, al medir repartidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones del servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo, la repetibilidad es sinónimo de precisión (Solé, 2011).

2.1.2 Sensores

Un sensor es un dispositivo detector especializado. Está diseñado para reconocer la presencia y la intensidad de determinados fenómenos, y para convertir estos conocimientos en “información”. Posteriormente, la información resultante permite tomar decisiones, ya que nos permite evaluar el comportamiento en tiempo real (Juran, 1992).

El transductor es un dispositivo que convierte a una variable física en otra, pero con un dominio distinto, y un sensor como ya se había descrito proporciona una salida útil para ser utilizada como variable de entrada en un sistema de procesamiento de información (Lonel, 2014).

2.1.2.1 Tipos de Sensores

Una de las formas de clasificar los sensores, es en digitales, son aquellos que presentan sólo dos estados, normalmente denominados alto y bajo, principalmente son sensores de presencia y los analógicos son aquellos que representan muchos valores, por ejemplo, un sensor de temperatura.

Otra forma de clasificarlos es en: moduladores o generadores, es decir si necesitan o no aporte de energía para efectuar la traducción, si necesita energía se denominan moduladores y si no la necesitan son generadores, ya que con capaces de generar su propia energía para funcionar (Pallás, Adquisición y distribución de señales, 1993).

2.1.2.2 Tipos de Transducción

Para llevarse a cabo el proceso de transducción existen varios principios físicos en los cuales se basa el cambio de dominio de la señal (Ver Anexo A).

A continuación, se muestra en la Tabla 2.1, la relación entre los principios de funcionamiento y algunas magnitudes, a fin de conocer, las formas que utilizan algunos sensores para poder realizar mediciones.

Sensor	Magnitud		
	Velocidad	Temperatura	Caudal / flujo
Resistivos	n/a	RTD termistores	Termistores, Anemómetro de hilo caliente.
Capacitivos	n/a	n/a	n/a
Inductivos	Ley de Faraday, LVT, Efecto hall.	n/a	rotámetro ley de Faraday, LVDT
Digitales	Codificadores	Osciladores de cuarzo	n/a
Ultrasónicos	Efecto Doppler	n/a	Efecto Doppler

Tabla 2.1 Sensores y métodos de detección ordinarios.

Como se puede observar, en la magnitud de flujo, tenemos dos métodos de detección que son de interés, dado que son lo que utilizan los sensores con los que se trabajará, tanto el principio de funcionamiento y la teoría, serán descritos en el siguiente apartado.

2.1.3 Wind Master Gill Instruments

Es un anemómetro ultrasónico tridimensional, esto significa que utiliza las componentes x, y, z para medir las componentes del viento y poder obtener su magnitud, sus especificaciones técnicas son la siguientes:

- Precisión de tres ejes (x, y, z).
- Rango de viento 0-50m/s
- Rango de dirección 0-369°
- Vectores x, y, z a la salida (software de adquisición)

Este instrumento es capaz de medir de 0 hasta 50 m/s, y tiene una salida de tres ejes, está construido de aluminio como se puede ver en la Figura 2.3, además de su gran tamaño como se muestra en la Figura 2.4, el sensor puede ser probado en un túnel de viento para verificar su óptimo funcionamiento (Road, 2015).



Figura 2.3 Anemómetro 3D.

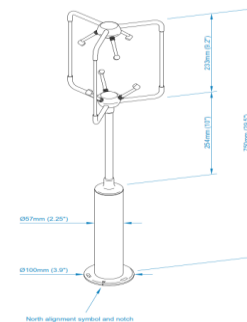


Figura 2.4 Especificaciones Estructurales.

Como se puede ver en las imágenes el sensor dispone de seis sensores ultrasónicos, tres emisores y tres receptores, los emisores envían una señal cuadrada periódica (Figura 2.5), con un n número de ciclos hacia los receptores, los cuales detectan el vector del fluido.

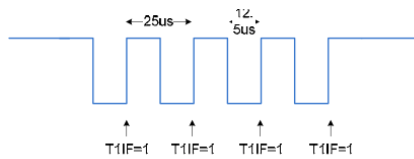


Figura 2.5 Señal cuadrada.

Después la información de los receptores es enviada mediante puerto serial hacia la computadora, utiliza su propio software llamado WindView v1.01.01, dicho software es configurable para dos o tres componentes y también para que muestre los datos de forma polar, en adición también cuenta con una opción que muestra de manera gráfica la dirección del viento (Figura 2.6), para facilitar la edición.

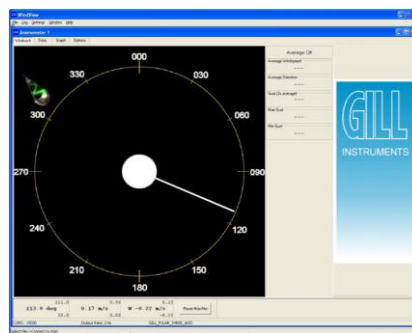


Figura 2.6 Dirección del viento.

2.1.3.1 Teoría del Funcionamiento

Las ondas ultrasónicas (Figura 2.7), son útiles para detectar y evaluar objetos en medio gaseosos, líquidos e incluso en medios sólidos. Una de sus principales ventajas sobre las electromagnéticas, es que las ultrasónicas no se atenúan con rapidez en objetos metálicos o en el cuerpo humano (Nakamura, 2012).



Figura 2.7 Onda Ultrasónica.

El principio de transducción ultrasónica se basa en la conversión de energía mecánica que posee la onda en otro tipo de energía útil para ser procesada; si la onda mecánica se induce sobre un objeto, una parte de esta onda será absorbida, otra parte será reflejada y otra transmitida (Figura 2.8), debido a esto, los transductores ultrasónicos pueden medir la velocidad con la que la onda regresa, el tiempo de su propagación, su atenuación o si la onda reflejada es o no interrumpida por un objeto.

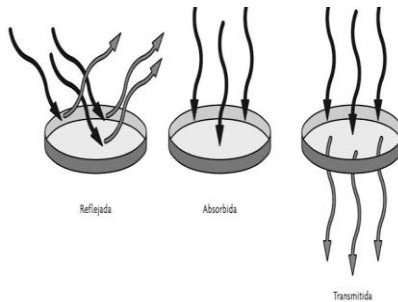


Figura 2.8 Reflexión, absorción y transmisión de una onda.

El principio físico que rige el funcionamiento de un sensor ultrasónico, se conoce como efecto Doppler, dicho efecto se presenta cuando en un medio ultrasónico se presenta un cambio de la frecuencia de la onda, debido a un movimiento o interrupción entre la fuente emisora y el receptor (Figura 2.9), de esta manera cuando la distancia de propagación de la onda disminuye, la frecuencia de la onda

aumenta, y cuando la distancia de propagación aumenta la frecuencia disminuye. (Lonel, 2014)

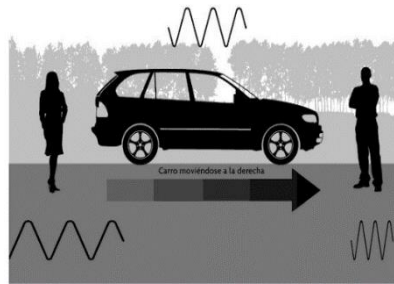


Figura 2.9 Efecto Doppler.

2.1.3.2 Fundamentación Matemática

Flores y Meneses (2010) Fundamentaron matemáticamente:

El viento en la atmósfera es una magnitud vectorial, como todo vector, tiene sus respectivas tres componentes, ahora bien, la medición de viento mediante ultrasonido, se basa en la influencia del campo de las velocidades de un fluido sobre una señal generada desde un transmisor hacia un receptor (Figura 2.10), se considera que la onda se transmite de manera que su amplitud y dirección de propagación varían muy poco a lo largo de distancia del orden de la longitud de onda, hasta cierto punto es posible ignorar la naturaleza ondulatoria del sonido, así se puede considerar que su transmisión es a lo largo de líneas, por tanto es posible aplicar el concepto de velocidades relativas para la velocidad de transmisión del sonido y la velocidad del viento:

$$V_1 = c + v_w = \frac{l}{t_1} \quad (2.1)$$

$$V_2 = c - v_w = \frac{l}{t_2} \quad (2.2)$$

Despejando:

$$v_w = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

C = la velocidad del sonido m/s

V_1 =la velocidad de la onda ultrasónica en una dirección m/s

V_2 = la velocidad de la onda ultrasónica en dirección contraria m/s

L = la distancia entre sensores m

V_w =Velocidad del viento m/s

T_1 =el tiempo que tarda en llegar la señal del transmisor x_1 al receptor x_2 s

T_2 = el tiempo que tarda en llegar la señal del receptor x_2 al transmisor x_1 s

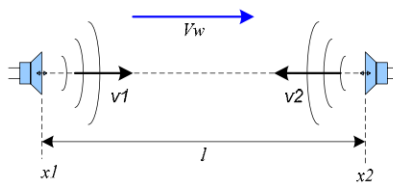


Figura 2.10 Medición de viento mediante Ultrasonido.

2.1.4 Wind Sensor Rev. P.

Sensor de viento de bajo costo (Figura 2.11), que utiliza termistores Negative Temperature Coefficient (NTC) para lograr medir el viento, en adición, puede medir la temperatura, el sensor trabaja de 8V-12V. a una corriente de 40mA, su rango de medición es de 0-150 MPH, puede utilizarse cualquier tarjeta de prototipos o microcontrolador, el sensor tiene dos salidas analógicas, una para la temperatura y otra para la velocidad del viento (Device, 2015).



Figura 2.11 Wind Sensor Rev. P.

2.1.4.1 Principio del Funcionamiento.

Un termistor es un sensor resistivo de temperatura, su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un conductor a una temperatura, existen dos tipos de termistores el Positive Temperature Coefficient (PTC) y el Negative Temperature Coefficient (NTC), este último es el de nuestro interés, dado que es el tipo de termistor que utiliza nuestro sensor a calibrar. En los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumenta la concentración de portadores, por lo que la resistencia disminuye, de ahí que se le considere de coeficiente negativo (Castañeda, 2012).

La característica resistencia-temperatura para el termistor NTC se muestra en la Figura 2.12, las grandes variaciones de resistencia con relación a la temperatura hacen que el termistor sea un dispositivo de estado sólido versátil. La gráfica para la resistencia contra la temperatura en un termistor NTC es no lineal (Harper, 2012).

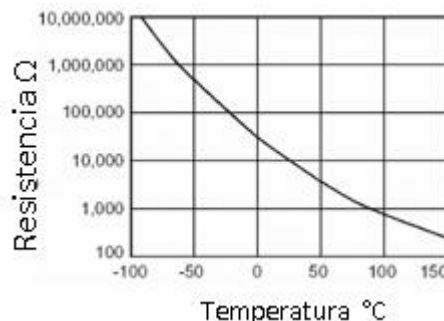


Figura 2.12 Curva característica NTC.

Para los termistores tipo NTC, en un margen de temperatura reducido (50°C), la dependencia entre R_T y T se puede considerar de tipo exponencial de la forma:

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (2.4)$$

donde R_0 es la resistencia a una temperatura de referencia (generalmente 25°C), y T_0 es dicha temperatura expresada en Kelvin. El parámetro B es la denominada

temperatura característica del material, y tiene valores de 2000 K a 5000 K, pero varía con la temperatura, aumentando al aumentar esta. El valor de B se puede encontrar midiendo la resistencia del termistor a dos temperaturas conocidas T_1 y T_2 (Castañeda, 2012).

Para algunas aplicaciones interesa la relación entre la tensión de los terminales del termistor y la corriente que circula a través del mismo. Para corrientes bajas, la tensión en los terminales del termistor es prácticamente proporcional a la corriente porque el auto calentamiento del termistor es muy pequeño. Cuando aumenta la corriente, el termistor sufre un auto calentamiento apreciable y alcanza una temperatura por encima de la del ambiente, reduciéndose su resistencia y, por lo tanto, la caída de tensión a través de él (Figura 2.13). En la zona de auto calentamiento el termistor es sensible a cualquier efecto que altere el ritmo de disipación de calor. Esto permite aplicarlo a las medidas de caudal, nivel, conductividad calorífica, entre otros (Castañeda, 2012).

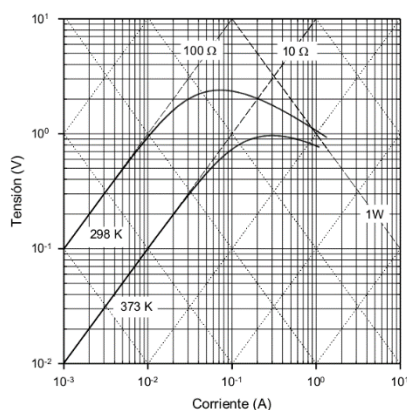


Figura 2.13 Relación Voltaje-Amperaje.

2.1.4.2 Anemómetro con Termistores

El termistor posibilita la confección de un anemómetro sin partes móviles ni ruido mediante un circuito bastante sencillo (Para ver diagrama, ver Anexo B). Se trata de

un puente de cuatro ramas (R1, R2, R3, R4) en el que dos de ellas (R1 y R4) son termistores adaptados. Una rama del puente (R5) es un reóstato para equilibrar a cero el puente (ajustando previamente a cero el miliamperímetro M1). El reóstato R3 es el control de calibración. En el exterior, expuesto al viento se monta rígidamente un termistor (R1) mientras que el otro termistor trabaja situado en una zona de aire en reposo y a la misma temperatura que el aire donde está el primer termistor. El primer paso es equilibrar el puente, ajustando el reóstato R5. Cuando el termistor R1 es expuesto al viento, su temperatura, y por consiguiente su resistencia varía. Esta variación desajusta el puente causando una desviación en el miliamperímetro M1). Como que esta variación depende de la resistencia, y a su vez de la velocidad del viento, la escala del medidor puede graduarse, con la ayuda de un reóstato de calibración R3, en unidades de velocidad (m/s, Km/h, ...). Inversamente, si el puente es equilibrado de nuevo a cada nueva velocidad, el dial del reóstato R5 puede ser calibrado directamente en unidades de velocidad. Este instrumento, presenta una ventaja importante respecto a anemómetros mecánicos y es su resistencia a fuertes vientos (Turner, 1982).

2.1.5 Acondicionamiento de Señal.

Los acondicionadores de señal son circuitos que convierten los parámetros eléctricos de salida de los transductores en una señal eléctrica (generalmente corriente, voltaje o frecuencia) que se pueda medir fácilmente, el conjunto transductor-acondicionador es la interface entre la variable física y la entrada del circuito electrónico. Que vaya a procesar la información (por ejemplo, el convertidor A/D de un microprocesador) (Mercedes, 2015).

Existen varias razones por las que las señales necesitan el proceso de acondicionamiento, por ejemplo, cuando la señal eléctrica que es función de la magnitud que se mide no es una tensión o una intensidad, suele ser conveniente utilizar un circuito que realice la conversión a este tipo de señal, así en transductores

resistivos, donde la variable de interés es el voltaje y no la resistencia de salida, es necesario utilizar un acondicionador de señal (Mercedes, 2015).

2.1.5.1 Dominio de Datos

Se denomina dominio de datos a el nombre de una magnitud mediante la que se representa o transmite información. El concepto de dominio de datos y el de conversiones de dominio, es de gran interés para entender los transductores y los circuitos electrónicos asociados (Figura 2.14). En el dominio analógico, la información está en la amplitud de la señal. Bien se trate de carga, corriente, tensión o potencia, en el dominio temporal, la información no está en la amplitud de la señal, sino en las relaciones temporales, tales como periodo, frecuencia, ancho de pulso, fase y en el dominio digital las señales tienen sólo dos niveles, por tanto, la información puede estar en el número de pulsos (Pallás, Sensores y acondicionadores de señal, 2005).

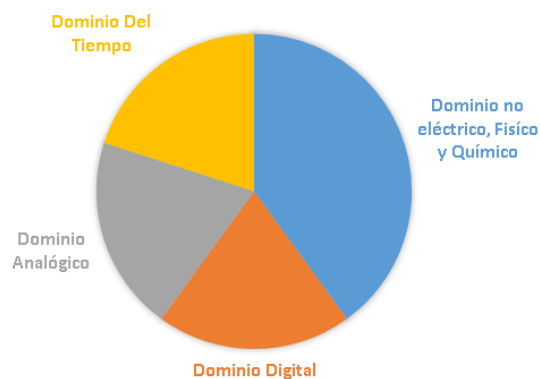


Figura 2.14 Tipos de dominios.

2.1.6 Sistemas de Adquisición de Datos.

Son sistemas electrónicos de medidas que se utilizan para obtener automáticamente información de un determinado proceso o del estado de una planta, trabajan en

varias etapas, como se ilustra en la Figura 2.15. Los sistemas de adquisición de datos basados en una computadora, ha ganado gran popularidad, dado que representan una mayor flexibilidad de usos e implementación, ya que explotan al máximo las funciones que tiene la computadora. Los sistemas de adquisición de datos son de dos tipos principales, los basados en una computadora, o en tarjetas de adquisición de datos, tal es el caso de la placa Arduino, la cual se ha popularizado con rapidez (Mercedes, 2015).

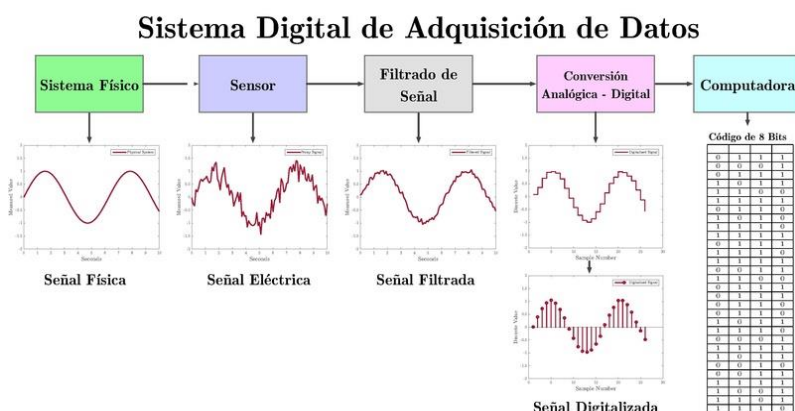


Figura 2.15 Sistemas de adquisición de datos.

2.1.7 Arduino YUN.

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source). Arduino puede sentir o detectar el entorno mediante la recepción de entradas (sensores) y puede afectar a su alrededor mediante el uso de salidas. El microcontrolador de la placa se programa usando el Arduino Development Environment. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo con Flash, Processing, MaxMSP, etc.) (Ojeda, 2014).

Sin embargo, cuando se requiere realizar proceso de envío de información mediante internet, Arduino nos ofrece varias opciones para poder hacer esto, el Arduino YUN

que utiliza un microcontrolador ATmega32u4 como se observa en la Figura 2.16. Dispone de entradas y salidas analógicas. Arduino cuenta con un host USB, con un procesador Atheros AR9331, lo que le permite utilizar Linux, una versión especial para Arduino llamada Linino. El USB host puede ser utilizado para conectar memorias flash, cámaras y otros dispositivos (Khunel, 2015). (Ver Anexo C para ver esquema a bloque de Arduino Yún).

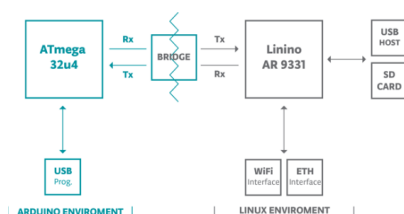


Figura 2.16 Puente entre los Microcontroladores.

2.2 Perspectiva Teórica

El punto de partida de este proyecto es un sistema de adquisición de datos de software y hardware libre el cual cuenta con una serie de sensores, los cuales son de humedad, temperatura, viento y radiación solar, estos están conectados a un Arduino Yún y esta información es enviada a una MicroSD en un formato de base de datos.

El principal objetivo del proyecto es lograr la caracterización del sensor de viento y temperatura WindSensor Rev. P. mediante varias campañas experimentales, con el fin de recabar la información necesaria la cual permitirá identificar si es necesaria la calibración o sólo se requiere de un ajuste. Gracias a la información del marco teórico, se logró entender el principio de funcionamiento de dicho sensor, un termistor, con el cual logra medir un flujo que pasa por sus bornes, haciendo una comparación de voltaje-Amperaje. De igual forma gracias a la investigación realizada en el marco teórico, se logró obtener los conocimientos básicos sobre la calibración, abordando los temas de metrología, cuyos conceptos son la base del análisis de datos para realizar la caracterización del sensor.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO

3.1 Procesos de Administración

La administración de este proyecto fue realizada en su mayoría por el Dr. Guillermo Barrios del Valle, también se contó con el apoyo del al Dra. Guadalupe Huelsz quien fue de gran apoyo en el diseño de las campañas experimentales. Así como el apoyo del Ing. Guillermo Hernández Cruz, quien asesoro en el diseño de los montajes realizados para poder hacer el trabajo experimental y auxilio con los materiales utilizados.

3.1.1 Inicio

El departamento de termociencias del Instituto de Energías Renovables (IER), de la Universidad Nacional Autónoma de México contaba con un sistema de adquisición de datos, de software y hardware libre, el cual fue creado con la finalidad de recabar información en edificaciones para su posterior análisis de datos y así desarrollar su trabajo experimental.

La problemática residía en el funcionamiento de uno de los sensores más importantes el WindSensor Rev. P., a pesar de que el fabricante en su página oficial presentaba una ecuación de calibración, era necesaria la caracterización y comprobación del funcionamiento del mismo, dado que las mediciones serán utilizadas para realizar trabajo experimental por el departamento de termociencias, razón por la cual era imprescindible que el sensor trabajara de manera adecuada.

3.1.2 Planeación

El grafico de Gantt (Tabla 3.1) muestra de manera sintetizada la lista de actividades en general realizadas, separadas en caracterización, que es la recaudación de los datos para conocer cómo se comporta el dispositivo, y la calibración es el análisis de mismos para obtener la curva de calibración correspondiente.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMILIANO ZAPATA															
PLAN DE TRABAJO															
CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR DE VIENTO WIND SENSOR REV. P.															
Semana	Mes														
	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	
Análisis y crítica constructiva sobre el sistema actual de adquisición de datos.															
Caracterización del viento.															
Caracterización de la temperatura.															
Calibración del Wind Sensor Rev. P.															

Tabla 3.1 Diagrama de Gantt

Lista de materiales utilizado en el desarrollo del proyecto Tabla 3.2.

Material	Precio	Descripción
Eliminador de 12v.	\$100	Fuente de alimentación para el Wind Sensor.
Arduino Yún.	\$1,500	Tarjeta de adquisición de datos.
Jumper.	\$80	Cables de conexión.
Adaptador Serial.	\$100	Interfaz de comunicación del Sensor WindMaster a la computadora.
WindSensor Rev. P.	\$500	Sensor de viento y temperatura.
WindView.	N/A	Software de adquisición de datos para el WindMaster.
Protoboard.	\$100	Tarjeta para conexiones en prototipos.
Calentador.	\$500	Calentador para lograr temperaturas altas.
Termómetro	\$250	Patrón de medida.

Tabla 3.2 Lista de materiales.

3.1.3 Ejecución del Proyecto

3.1.3.1 Sistema de Adquisición de Datos.

De primera instancia se estudió el funcionamiento del sistema de adquisición de datos (Figura 3.1) esto con el fin de realizar una crítica constructiva, para mejorar su funcionamiento. Como ya se explicó en el marco teórico, un sistema de adquisición de datos es un conjunto de sensores conectados a una placa controladora, la cual nos permite ver y manipular la información.

Gracias a la documentación sobre el sistema, se logró entender el funcionamiento: un conjunto de sensores analógicos de variables presentes en edificaciones, se conectan a un Arduino Yún, el cual es alimentado por un banco de pilas de 12V. a 2A, dicho banco de pilas también alimentaba a los sensores, además tenía la posibilidad de poderlo alimentar mediante la línea eléctrica doméstica (112V.), presentaba una buena característica, la posibilidad de cambiar entre las pilas y la alimentación doméstica, por tanto cuando se conectaba a la línea doméstica además de hacer funcionar el sistema, cargaba las pilas. Finalmente, presentaba una placa con transistores (Figura 3.3) de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) para hacer el cambio de alimentación de pilas o línea doméstica, dicha placa también contaba con los cargadores de pilas y los reguladores correspondientes para poder alimentar al Arduino y a los sensores. Con las pilas el sistema tenía una autonomía de 7,200 s (2 horas) y toda la información que recababa el Arduino Yún era enviada a una MicroSD, en bases de datos MySQL, todo el sistema estaba contenido en una caja con las siguientes dimensiones 15 cm de altura, 10 cm de anchura y 10 cm de profundidad.



Figura 3.1 Sistema de adquisición de datos dentro de la carcasa.

Después de haber estudiado el sistema de adquisición de datos, se puso a trabajar al sistema para corroborar lo que la documentación decía, sin embargo, encontramos un par de problemas, uno de ellos era que los MOSFET, no realizaban la tarea de cambiar de alimentación cuando se conectaba a la línea doméstica, se realizaron varias pruebas y finalmente se encontró que uno de los transistores estaba en corto y a otro de ellos no tenía la pista correspondiente en la placa de circuito impreso (PCB). Como parte de la crítica constructiva se presentó una propuesta, cambiar el sistema de alimentación doméstica, ya que utilizaba una fuente con transformador (Figura 3.2), haciendo que ocupara mucho espacio de manera innecesaria y así incrementando el tamaño de la carcasa para el sistema de adquisición de datos.

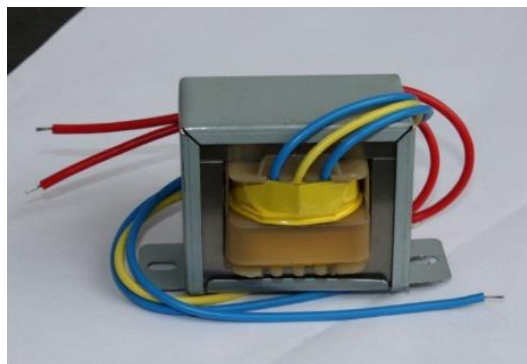


Figura 3.2 Transformador utilizado en la fuente de alimentación.



Figura 3.3 Placa de alimentación.

Las soluciones que se plantearon fueron realizar un nuevo rediseño de la placa de alimentación del sistema de adquisición de datos, ya que aunado a que faltaba una pista era innecesario ciertos componentes como el puente de diodos y los capacitores de filtrado para fuente de transformador, dado que sería remplazada; la segunda propuesta fue utilizar una fuente conmutada (Figura 3.4), que generaría menos espacio en la carcasa y reduciría el costo del proyecto en al menos \$100 MNX.



Figura 3.4 Fuente conmutada 12V 2A.

El diseño de la placa de circuito impreso, fue hecho el en software Fritzing, el cual es de software libre y para la impresión se utilizó una CNC (Figura 3.5), la cual mejora la calidad de la placa de circuito impreso (Figura 3.6) y reduce los errores de construcción. De esta manera se logró aportar mejoras al sistema de adquisición de datos, tanto en su construcción como en su funcionamiento.

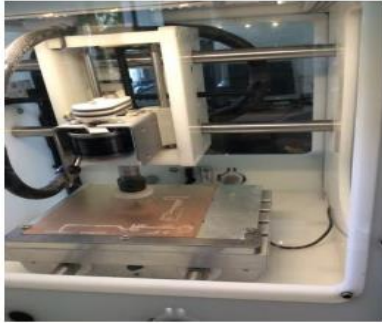


Figura 3.5 CNC para Construcción del PCB.

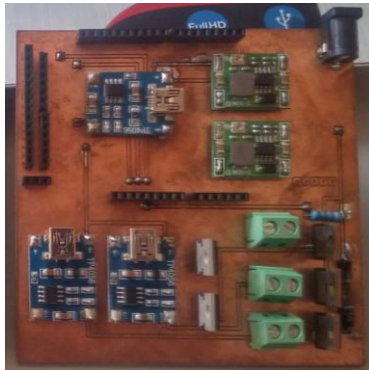


Figura 3.6 Nueva placa terminada.

3.1.3.2 Caracterización del Wind Sensor Rev. P.

El WindSensor Rev. P. utiliza un termistor (Figura 3.7) el cual logra medir la temperatura, y gracias a la sensibilidad que presenta en sus bornes del termistor, detecta la cantidad de flujo que está circulando, comprendido el principio físico de su funcionamiento se dispuso a conocer al sensor de manera estructural.

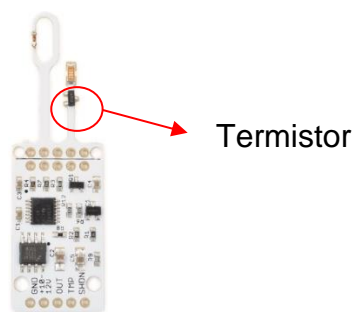


Figura 3.7 Esquema del Sensor.

Como se puede observar en el esquema, el termistor se encuentra de forma vertical en la parte superior del sensor, dado que el sensor es plano se planteó la idea de que podría tener solo una posición en la que el sensor trabajará de mejor manera, así que una de las campañas experimentales a desarrollar tendrá como fin identificar cual es la posición de mayor y menor detección del flujo, sin embargo, en ese momento no se contaba con el material necesario para poder construir una metodología experimental adecuada, es decir no, había un montaje que permitiese mantener un ambiente controlado, así que se dispuso a planifica el set up o montaje.

3.1.3.2.1 Montaje para el Experimento.

Para poder llevar a cabo las campañas experimentales, fue necesario controlar la variable física de interés en medida de lo posible, además de la posición de cada objeto. El suministro del flujo fue dado por un ventilador convencional doméstico (Figura 3.8), el cual fue colocado sobre una mesa, para que tuviera mayor altitud, frente al ventilador se colocó el sensor ultrasónico 3D WindMaster (como se observa en la Figura 3.9), a una distancia de 50 cm, este sensor se colocó sobre un tripié para darle mayor estabilidad y alineación (figura 3.10).



Figura 3.8 Ventilador.



Figura 3.9 Ventilador y WindMaster alineados.



Figura 3.10 WindMaster sobre tripié.

Tanto para el tripié como para el ventilador fueron colocadas marcas sobre la superficie donde se encontraban, esto para tener controlada la posición de cada objeto y no afectara al realizar las campañas experimentales.

El ventilador y el WindMaster ya estaban establecidos y montados de manera controlada, por último, falta el Wind Sensor Rev. P., que al ser muy pequeño y delgado no fue posible fijarlo utilizando métodos comunes, así que se decidió realizar el diseño de una base 3D para el sensor, de esta forma se podría colocar sobre el WindMaster y tener controlada la posición e inclinación del Wind Sensor Rev. P.

3.1.3.2.2 Diseño e Impresión de Base 3D

El diseño de la base 3D fue realizado en el software Blender que muy potente y es libre, esto significa que no es necesario pagar una licencia para poder utilizarlo.

Lo primero fue obtener todas las medidas y ángulos del sensor, dado que la base diseñada tendría que acoplarse a la perfección, las medidas fueron obtenidas con vernier y los ángulos con una plantilla (Figura 3.11).

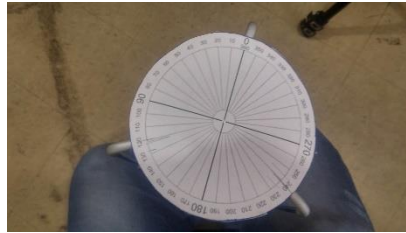


Figura 3.11 Plantilla para obtener ángulos.

En Blender se utilizó la técnica de resta de superficies, es decir, primero se construyó la estructura del WindMaster (Figura 3.12), después se colocó la base, y se le restó la figura del WindMaster, de esta manera, se aseguró que las medidas y los ángulos fuesen los correctos.

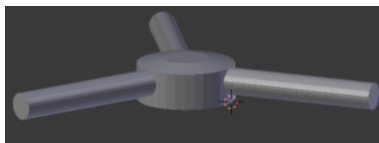


Figura 3.12 Diseño del Wind Master en Blender.

El diseño final de la base 3D quedó de la siguiente manera, la vista ortogonal se muestra en la Figura 3.13 y la vista inferior en la Figura 3.14.

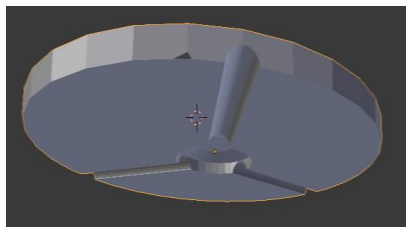


Figura 3.13 Vista ortogonal.

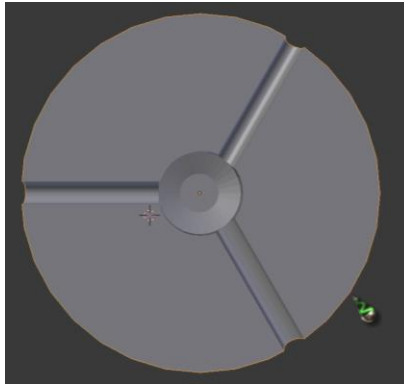


Figura 3.14 Vista inferior.

Para realizar la impresión del diseño, se utilizó una impresora 3D Prusa i3 (Figura 3.15) del departamento de termociencias, el proceso de impresión (Figura 3.16) duró aproximadamente cuatro horas y se utilizó Ácido Poli Láctico (PLA), es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico.



Figura 3.15 Impresora Prusa i3.

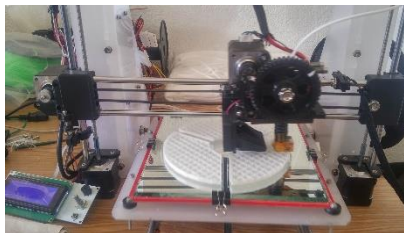


Figura 3.16 Proceso de impresión.

Terminada la base del sensor, todo el montaje del experimento se da por concluido, habiendo cumplido este aspecto se dispuso a iniciar con las campañas experimentales.

3.1.3.2.3 Caracterización del Viento.

Dado que el WindSensor se colocó sobre el Wind Master, se debía hacer un análisis de fluido en la altura, eso significa, que en la posición de Y, tomando la analogía de un plano cartesiano en los sensores, existiera la misma cantidad de fluido en el lugar donde se encuentra midiendo el Wind Master y el WindSensor. Para corroborar esto se utilizó el WindMaster desplazándolo en el eje Y a ciertas alturas, aprovechando que se encontraba sobre el tripié y facilitaba su manipulación.

Para utilizar el Wind Master, es necesarios descargar su software (WindView), de la página del proveedor, además de un adaptador USB-Serial, dado que a la salida del sensor se encuentra un Jack hembra de serial, este sensor se alimenta a 12V y necesita 1A, para realizar el muestreo de datos se debe conectar el sensor al USB de la computadora y estar alimentado, en WindView lo primero es ir a File>connect>se selecciona 'auto find'>connect, como se muestra en la Figura 3.17.

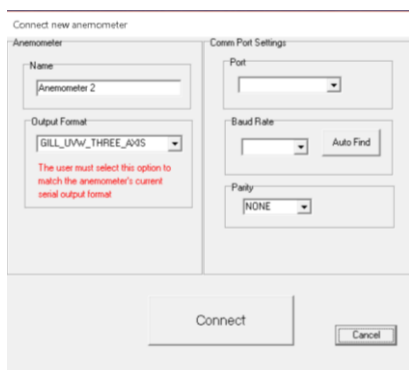


Figura 3.17 Conexión del sensor.

El Apartado de OutFormat, se debe elegir dependiendo de la necesidad:

Two_axis_uv trabajará solo con dos componentes e imprimirá el valor en x,y.

Two_axis_polar trabajará solo con dos componentes e imprimirá el valor en polar.

Three_axis_polar/uvw trabajará con tres componentes e imprimirá el valor en polar/x,y,z.

Al seleccionar connect, iniciará con la adquisición de datos, según el formato elegido será la manera en la que se presentará dichos datos, la opción de Windsock permite ver el ángulo de dirección del fluido, en el apartado 'data' muestra toda la información enviada por el sensor, en Graph grafica la dirección y magnitud del fluido y finalmente en options, se puede cambiar el formato de salida de datos. Otra opción importante es la de log, que nos permite almacenar la información en un archivo de texto, para esto, se le especifica la ruta de almacenamiento y para iniciarlo solo se da clic en log>start / log>stop, según el caso.

Con el WindSensor se utilizó el Arduino Yún para obtener los datos enviados por él, dicha información era enviada por el puerto serial, para después proceder con el análisis de la información. El WindSensor se conecta a 12V, y tiene 2 salidas analógicas, el pin OUT y TEMP_OUT, los cuales se conectaron a las entradas analógicas del Arduino Yún, el diagrama a bloques de la conexión se muestra en la Figura 3.18.

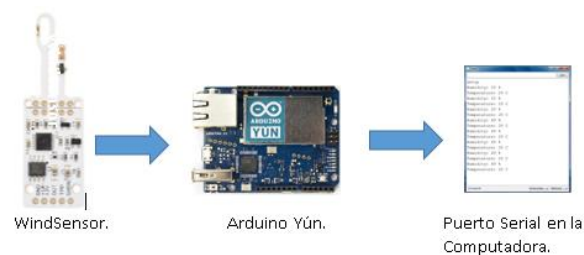


Figura 3.18 Diagrama a bloques de conexión.

Para el análisis de altura se utilizó un ventilador con tres velocidades, la primera prueba fue con la velocidad máxima del ventilador y el WindMaster se colocó a 0, 6 y

10 cm en Y, el tiempo de muestreo fue de 200 ms y se tomaron solo 240 datos en cada prueba, con una duración de un minuto y cinco pruebas en cada altura.

Medición a 10 cm		Medición a 6 cm		Medición a 0 cm	
Promedio	Desviación	Promedio	desviación	Promedio	desviación
2.82	0.23	2.78	0.22	2.82	0.24
2.71	0.24	2.78	0.23	2.80	0.24
2.71	0.24	2.76	0.21	2.80	0.23
2.78	0.24	2.78	0.23	2.84	0.22
2.81	0.24	2.76	0.23	2.81	0.23
Promedio final: 2.77		Promedio final: 2.77		Promedio final: 2.81	

Tabla 3.3 Primer análisis de altura.

Como podemos observar en la Tabla 3.3, los promedios finales son muy parecidos, por excepción de la medición a 0 cm, donde el flujo fue mayor, sin embargo, al final estas mediciones no fueron de gran utilidad, dado que a la altura máxima en la que se midió no es la posición donde estaría el WindSensor Rev. P., por tanto, se repitieron las mediciones (Tabla 3.4), bajo las mismas condiciones, solo que ahora la altura máxima fue a 17.8.

Alturas	M1 m/s	M2 m/s	M3 m/s	M4 m/s	M5 m/s	Promedio Final
0 cm	2.77	2.85	2.81	2.81	2.80	2.80
17.8 cm	2.95	2.99	2.97	2.90	2.91	2.94

Tabla 3.4 Segundo análisis de altura.

Los resultados obtenidos no fueron muy satisfactorios, dado que hay una diferencia de 0.14 m/s. Como el ventilador tiene tres posibles velocidades, ahora se realizaron las mismas pruebas bajo las mismas condiciones y parámetros (Tabla 3.5), solo que ahora con tres velocidades distintas.

	Alturas		
Velocidad Ventilador	0 cm en m/s	17.8 cm en m/s	Error %
1	2.35	2.55	8.5
2	2.79	2.79	0.0
3	2.71	2.87	5.7

Tabla 3.5 Alturas con tres velocidades.

Como podemos observar se logró obtener datos satisfactorios en la velocidad dos, de esta manera se puede saber que en esas condiciones existe el mismo flujo y se puede continuar con el trabajo experimental.

3.1.3.2.4 Análisis de Sensibilidad.

Dado el tamaño del sensor, y su composición estructural, de manera intuitiva, no fue posible definir cuál de las cuatro posibles posiciones del sensor era la que presentaba mejor desempeño, el sensor al ser plano y muy delgado, presentaba la posibilidad de ser girado cada 90° , así que, como parte de la caracterización del viento fue necesario hacer las pruebas pertinentes para poder identificar dicha posición. Se utilizó la base previamente diseñada, la cual, tiene integrado unas muescas las cuales permiten el libre giro del sensor cada 90° (Figura 3.19).

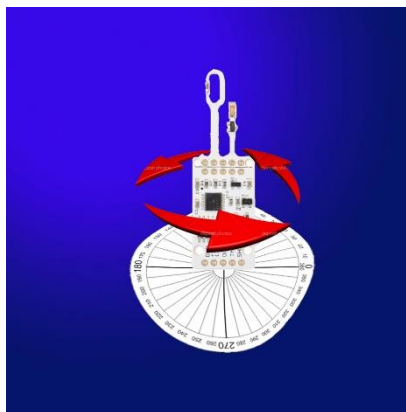


Figura 3.19 Rotación del Wind Sensor.

Es de decir 0°,90°, 180° y 270°, en sentido horario. Aunado a esto, también con esta prueba se pudo comprar los resultados de ambos sensores, dado que los dos estaban trabajando al mismo tiempo, al igual que las pruebas anteriores el muestreo de datos es de 200 ms durante un minuto, se trabajó con 240 datos y cada prueba se repitió cinco veces. Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.6, así como su respectiva grafica (Ver Anexo D).

Grados	Wind Sensor Rev. P. m/s	WindMaster 3d anemometer m/s	Error %
0°	3.98	2.57	54.86
90°	3.68	2.54	44.88
180°	4.43	2.57	72.37
270°	4.29	2.55	68.24

Tabla 3.6 Análisis de sensibilidad.

Como se puede observar, la mayor sensibilidad se encuentra en los 180°, sin embargo, también en estos grados se encuentra el mayor porcentaje de error 72.37%, si observamos la tabla, veremos que en todos los ángulos hay un porcentaje de error muy grande, por lo tanto, esto significa que el Wind Sensor Rev. P. no está funcionando adecuadamente, en base a estos datos se concluye que es necesaria la realización de la calibración del sensor.

3.1.3.2.5 Caracterización de Temperatura.

Como ya se había mencionado en anteriores capítulos, el Wind Sensor Rev. P. logra medir la cantidad de flujo que circula por sus bornes, mediante un termistor, por tanto, también se debe caracterizar dicho termistor, dado que, si la temperatura no es medida de manera indicada, las mediciones de viento tampoco serán correctas.

Para realizar esta campaña experimental se utilizó un termómetro de relleno orgánico, pero igual de eficiente y preciso que un termómetro de mercurio(Hg), dicho relleno orgánico es para evitar accidentes, el mercurio es un metal pesado, el único

metal líquido a temperatura ambiente, El mercurio y la mayoría de sus compuestos son extremadamente tóxicos y deben ser manejados con cuidado. Como se puede ver en la Figura 3.20, el líquido indicador es de color azul, este termómetro, logra medir de -20° hasta 110° C, y cuenta con su certificado de calibración, así que las lecturas tomadas, son confiables.



Figura 3.20 Termómetro.

También se utilizó un calentador por radiación (Figura 3.21), dicho calentador presenta una resistencia, a la cual se le induce una corriente, citando a la primera ley de la termodinámica, la cual dice que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, la energía suministrada a las resistencias, es disipada o convertida en calor.



Figura 3.21 Calentador.

La primera campaña experimental se realizó durante una hora, aproximadamente, tomando las lecturas del termómetro y también del Wind sensor Rev. P., cada cinco minutos, también se utilizó un sensor de temperatura llamado lm35 (Figura 3.22), esto con el fin de tener más puntos de referencia al tomar lecturas de la temperatura.

De igual forma que con el viento, el proveedor del WindSensor, en su página oficial, presenta una ecuación con su respectiva curva de calibración, dicha ecuación será utilizada para tomar las siguientes medidas mostradas en la Tabla 3.7, sin embargo, también se realizó una búsqueda en internet, sobre la ecuación de calibración y se encontró una distinta a la que ya se tenía, de tal forma que al medir con el Wind sensor se utilizaron las dos ecuaciones y también dos sensores para identificar si trabajaban de igual forma.



Figura 3.22 LM35 Sensor de temperatura.

Termómetro		WindSensor	WindSensor	Im35ah	WindSensor 1	WindSensor 2
°C		1 °C	2 °C	°C	m2 °C	m2 °C
27		25.81	33.07	25.88	25.5	33
27		25.06	33.07	25.88	25.5	33
27		25.56	33.07	25.88	26.5	32.75
Termómetro		WindSensor	WindSensor	Im35ah	WindSensor 1	WindSensor 2
°C		1 °C	2 °C	°C	m2 °C	m2 °C
27		26.56	33.07	24.9	25.5	33
27		26.06	32.57	25.39	25	33.5
27		26.56	32.32	25.88	26.25	32.75
27		26.06	34.58	25.88	26.75	33
27		26.31	33.32	25.88	27.5	32.75
promedio	27.0	26.0	33.1	25.7	26.1	33.0
desv.		0.5	0.7	0.4	0.8	0.2
%error		3.7	-22.8	4.8	3.4	-22.2
Diferencia		1.0	6.1	1.3	0.9	6.0

Tabla 3.7 Caracterización de temperatura.

En los títulos de las columnas, tenemos descritos a que corresponde los datos, la etiqueta m2, se refiere al método dos, es decir la segunda ecuación de calibración encontrada en internet.

Las mejores lecturas fueron tomadas con el primer WindSensor, ya que presenta un error del 3.7 – 3.4 % es decir $\pm 1^{\circ}\text{C}$, el lm35, con su propia ecuación de calibración también funcionó de manera adecuada, presentó un 5% de error aproximadamente, $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$, pero el WindSensor 2, fue el menos favorable, dado que presentó un error del 22% aproximadamente, es decir $\pm 6^{\circ}\text{C}$. El termistor que utiliza el Wind Sensor Rev. P. es un MCP9701, producido por Micro Chip, en el datasheet, se especifican los siguientes parámetros:

- Pendiente de la temperatura 19.53mV/ $^{\circ}\text{C}$.
- Precisión de $\pm 4^{\circ}\text{C}$ entre 0°C y 70°C .
- Precisión de $\pm 4^{\circ}\text{C}/6^{\circ}\text{C}$ entre -10°C y 125°C .
- Bajo consumo de amperaje, 12 μA (máx.).
- Funciona desde 3.1V a 5.5V
- Rango de trabajo de -40°C a 125°C

Tomando en cuenta la información presenta por el proveedor, se podría establecer que el termistor no está trabajando de manera adecuada, las mediciones no son fieles a las obtenidas por el termómetro, el WindSensor 1 presenta $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dicho error entra en la descripción del datasheet, sin embargo, el WindSensor 2 presenta $\pm 6^{\circ}\text{C}$, así que ese valor sale del rango especificado, dado que las temperaturas se encuentran entre 0°C y 70°C así que el error máximo debería de ser $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

A pesar de los datos obtenidos, no se pudo concluir en algo de forma definitiva, dado que son muy pocos datos, para las campañas experimentales, es necesario tener más datos, además de mayor rango en función de la variable de interés, es decir, en la anterior campaña, todas las mediciones fueron realizadas a 27°C , para poder

hacer un análisis de datos con mayor carácter experimental es necesario contar con mayor rango de temperaturas. La siguiente campaña experimental, se realizó durante la mañana y tarde, de 8:00 AM a 4:30 PM, aproximadamente, de esta forma se obtuvo mayor rango de temperaturas dando pauta para poder realizar un análisis de datos más congruente, las mediciones se tomaron cada hora y a las tres de la tarde, hora promedio en la que se obtiene la máxima temperatura del día, se calentó el cuarto utilizando alcohol para obtener temperaturas más altas, dichos datos se muestran en la Tabla 3.8, así como su grafica (Ver Anexo E).

En el grafico se puede observar la dispersión de las temperaturas, los puntos azules son del WindSensor que debería formar una línea aproximadamente a 45°, como la línea color negro trazada de forma imaginaria, para ejemplificar la posición que debería tener los datos, sin embargo, como se puede ver, los datos están muy alejados de dicha línea, algunos hacia arriba y otros más bajos.

Como se puede observar en la Tabla 3.8, se logró obtener un rango de 7°C de 23°C a 30°C, el principal propósito de esta campaña experimental fue lograr encontrar un offset, es decir un rango de dispersión de temperatura constante respecto a las mediciones del termómetro, dicho de otra forma, encontrar un patrón de error, en las mediciones del Wind Sensor que se corrigiera incrementando o disminuyendo x cantidad de grados centígrados.

Hora	Termómetro [°C]	WS1 [°C]	Diferencia [°C]	WS2 [°C]	Diferencia [°C]	LM35 [°C]	Diferencia [°C]
07:55	23.0	24.2	-1.2	N/A	N/A	19.1	3.9
08:55	23.5	27.4	-3.9	27.4	-3.9	21.2	2.3
09:55	24.0	26.7	-2.6	25.9	-1.9	22.1	1.9
10:55	25.0	29.6	-4.6	28.5	-3.5	23.1	1.9
11:55	25.9	30.1	-4.2	29.2	-3.3	23.9	2.0
12:55	26.8	30.0	-3.2	29.0	-2.2	24.6	2.2
13:55	27.0	28.8	-1.8	28.4	-1.4	24.7	2.3
14:55	29.0	34.1	-5.1	34.3	-5.3	26.8	2.2

Hora	Termómetro [°C]	WS1 [°C]	Diferencia [°C]	WS2 [°C]	Diferencia [°C]	LM35 [°C]	Diferencia [°C]
15:13	31.0	32.7	-1.7	31.6	-0.6	28.3	2.7
16:04	32.0	37.1	-5.1	37.4	-5.4	29.8	2.2
16:14	30.0	33.6	-3.6	34.9	-4.9	28.1	1.9
Diferencia promedio			-3.4		-3.2		2.3

Tabla 3.8 Segunda campaña de caracterización de la temperatura.

En la tabla se especifica la diferencia de cada sensor respecto a la medición del sensor, a pesar de que la diferencia promedio entre el Wind Sensor 1 (WS1) y el Wind Sensor 2 (WS2), son muy cercanos 3.4°C/3.2°C, sin embargo, la diferencia individual no fue favorable, usualmente el offset es constante, pero en las pruebas realizadas la diferencia hablando individualmente oscila entre 1.2 y 5.1 °C, así que dicho offset no se pudo obtener, por lo que también se procede a la calibración del termistor.

3.1.3.3 Calibración del Wind Sensor Rev. P.

3.1.3.3.1 Temperatura.

Para poder realizar la calibración fue necesario diseñar una metodología, es decir, lograr relacionar las magnitudes físicas presentes, para poder obtener una ecuación que nos dé como resultado la temperatura, que es la magnitud de interés en este caso. Para esto se omitió por completo la ecuación dada por el proveedor, y solo se dispuso a medir el valor analógico entregado por el sensor, antecediendo a esto, se analizó el diagrama esquemático del WindSensor Rev. P. específicamente la sección donde se encuentra el termistor para identificar si contaba con algún tipo de acondicionamiento de señal que pudiese afectar o interferir con el valor analógico entregado. Como se puede observar en la Figura 3.23, el termistor no tiene ningún tipo de acondicionamiento, esa conectado a 3.3v y GND, la salida del termistor está a Temp_out, que es el pin de salida de temperatura del sensor.

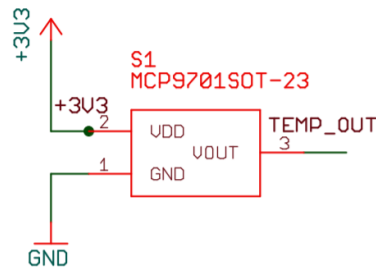


Figura 3.23 Esquemático del termistor.

Al medir el valor analógico de la temperatura se utilizó un tiempo de muestreo de un segundo, promediando cinco segundos y tomando ese valor obtenido, dicho valor analógico se relacionó con la lectura del termómetro, de esta forma a determinada temperatura obtenida con el termómetro correspondía con el valor analógico que entregaba el sensor en ese momento, los datos obtenidos se muestran en el grafico (Ver Anexo F). Los puntos azules representan el valor analógico correspondiente a una temperatura, para poder obtener la ecuación de calibración fue necesario realizar un ajuste de curva, es decir, ajustar los datos a un tipo de ecuación que corresponda al comportamiento de los datos.

En el grafico se muestran dos posibles ajustes, uno lineal (línea roja) y otro cuadrático (línea verde), sin embargo, el ajuste de interés es el lineal, dado que la respuesta esperada es una línea a 45° entre la temperatura y el valor analógico del sensor, la ecuación queda de la siguiente forma.

$$temp = p1 * x + p2 \quad (3.1)$$

Donde:

$p1=0.2202$

$p2=-20.137$

x =valor analógico del sensor

Sustituyendo:

$$Temp = 0.2202(x) - 20.137 \quad (3.2)$$

Cabe resaltar que la variable temp está dada en °C. Ya obtenida la ecuación de calibración, se modificó el código de programación del Arduino Yún, para poder comprobar que la nueva ecuación funcionara de manera adecuada, los resultados obtenidos se muestran en el gráfico (Ver Anexo G).

Como se puede observar en el gráfico del Anexo G, los puntos azules indican las lecturas que se obtuvieron por el WindSensor, y la línea color negro representa la línea esperada de las temperaturas, es decir a pesar de ser aplicada la curva de calibración los datos aún presentan dispersión, por ejemplo el primer dato dónde el termómetro marco 14°C, el WindSensor tomó una lectura de 11°C, las mejores temperaturas obtenidas son 20 °C y 30°C, en el grafico se puede observar que dichos puntos están sobre la línea negra, sin embargo el resto de lecturas presentan un cierto porcentaje de error. En esta primera curva de calibración obtenida, los datos no fueron muy satisfactorios, si bien los datos mejoraron considerablemente aún hay un porcentaje de error en las mediciones, por tanto, se planifico una segunda campaña experimental, para poder determinar si las lecturas pudiesen mejorar.

Antes de iniciar con la segunda campaña experimental de calibración para la temperatura, se analizaron a detalle los datos, para tratar de identificar algún error metodológico. Se identificó que un problema pudo haber sido el tiempo de muestreo, en la anterior campaña experimental se tomaron datos cada cinco segundos, promediando dichos resultados y tomando como válida dicha lectura, sin embargo, no se tomó en cuenta que, al realizar esta operación, también era necesario identificar cuando el promedio dejaba de depender del tiempo, es decir, en cinco datos, si uno o más llegaba a oscilar, provocaba que el promedio se modificara de forma considerable, así que fue necesario determinar el tiempo en el que el promedio de una lectura lograba estabilizarse.

Para lograr esto, se realizaron una serie de pruebas (Tabla 3.9), tomado promedios de un minuto, cada 250 ms, es decir un total de 240 datos en cada prueba, después a cada conjunto de datos se sacaron promedios individuales cada segundo y aumentado progresivamente un segundo más, es decir, promedio de 1 s, 2 s, 3 s, etc. El mayor tiempo para que una serie de datos estabilizara su promedio fue de 20 s, por tanto, a este tiempo el promedio puede ser confiable.

Tiempo ms	Promedio	datos	Promedio	Datos	promedio	datos
250	206.295833	204.6	209.083333	212.3	207.1625	206.9
500		205.8		211.8		202.8
750		206.2		210.9		203.7
1000		205.5		211.6		205.2
1250		206.0		210.9		205.4
1500		205.9		210.1		205.1
1750		206.1		210.3		205.2
2000		205.4		209.9		205.2
2250		205.3		209.7		205.6
2500		205.8		209.6		205.7
2750		206.4		209.6		206.1
3000		206.1		209.5		206.3
3250		206.3		209.5		206.4
3500		206.6		209.7		206.6
3750		205.6		209.5		206.9
4000		205.7		209.8		206.8
4250		205.9		209.8		206.6
4500		205.8		209.7		206.8
4750		205.8		209.6		206.9
5000		206.0		209.6		207.1
5250		206.3		209.6		207.2

Tabla 3.9 Independencia de datos en promedios.

Como se puede observar en la tabla, la columna datos representa los promedios individuales antes descritos, estos varían mucho al principio, respecto a la columna promedio, que contiene el dato del promedio de un minuto.

Otro problema que se logró identificar fue que, el calentador utilizado es por radiación, dicha radiación pudo haber afectado las lecturas tomadas a altas temperaturas, así que, para la segunda campaña de calibración, al utilizar el calentador, tanto el WindSensor, como el termómetro se colocaron dentro de una caja (Figura 3.24 y 3.25), para que la radiación de calentado chocara con una de las paredes de la caja, y esta a su vez transmitiera la temperatura por conducción, para que de esta forma el calor se transmitiera de forma uniforme dentro de la caja.



Figura 3.24 Sensores dentro de la caja.



Figura 3.25 Montaje del experimento.

Para esta campaña se utilizó el mismo procedimiento de la primera campaña experimental, a excepción del tiempo de muestreo el cual fue mencionado anteriormente, los datos obtenidos se muestran en el gráfico (Ver Anexo H).

La ecuación de calibración obtenida fue la siguiente:

$$temp = p1 * Vout + p2 \quad (3.3)$$

Donde:

Temp=temperatura en °C

P1=0.29516

P2=-35.603

Vout=voltaje de salida del WindSensor.

Sustituyendo:

$$temp = 0.29516 * Vout - 35.603 \quad (3.4)$$

Ya obtenida la nueva ecuación de calibración se dispuso a comprobar su funcionamiento, así que a los datos obtenidos se les aplicó dicha ecuación, los datos se muestran en el gráfico (Ver Anexo I).

Como se puede observar en el gráfico. En esta segunda calibración se tuvo menor rango de temperaturas, sólo de 22°C a 30°C, ahora, gráficamente los datos presentan una gran dispersión y se encuentran por debajo de la línea donde deberán estar, por tanto, se decidió comparar ambas ecuaciones de calibración para identificar cuál es la que presenta un mayor desempeño (Tabla 3.10).

Termómetro[°C]	Ecuación 2[°C]	diferencia	Error %	Ecuación 1[°C]	diferencia	Error %
14	-	-	-	11.0	3.0	21.4
15	-	-	-	13.9	1.1	7.2
16	-	-	-	15.4	0.6	4.1
17	-	-	-	17.9	0.9	5.2
18	-	-	-	19.2	1.2	6.7
19	-	-	-	19.7	0.7	3.9
20	-	-	-	20.6	0.6	2.8
21	-	-	-	22.2	1.2	5.7
22	21.1	0.9	4.0	22.9	0.9	4.2
23	22.8	0.2	1.0	22.6	0.4	1.9

Termómetro[°C]	Ecuación 2[°C]	diferencia	Error %	Ecuación 1[°C]	diferencia	Error %
24	22.9	1.1	4.7	23.8	0.2	0.9
25	23.4	1.6	6.3	26.1	1.1	4.3
26	27.4	1.4	5.2	26.5	0.5	2.1
27	28.8	1.8	6.6	27.1	0.1	0.2
28	30.8	2.8	10.0	28.6	0.6	2.3
29	29.2	0.2	0.8	29.8	0.8	2.7
30	32.1	2.1	7.1	30.1	0.1	0.4
31	32.1	1.1	3.5	32.3	1.3	4.2
32	33.8	1.8	5.7	33.5	1.5	4.7
33	34.0	1.0	2.9	33.0	0.0	0.1
34	32.4	1.6	4.7	34.7	0.7	2.1
35	35.0	0.0	0.1	33.4	1.6	4.7
36	-	-	-	35.2	0.8	2.1
37	35.0	2.0	5.4	36.2	0.8	2.2
38	37.1	0.9	2.3	36.6	1.4	3.7

Tabla 3.10 Diferencia entre ambas ecuaciones.

Se optó por utilizar la segunda ecuación, apesar de haber presentado mayor diferencia promedio, su desviación es de 5, 2.8 menos que la Ecuación 3.1, al presentar menos desviación los datos serán menos dispersos a comparación de la Ecuación 3.2, así se concluye la calibración del viento utilizando la Ecuación 3.4.

3.1.3.3.2 Viento.

Para lograr la caracterización de viento se utilizó una metodología experimental distinta a la empleada en la temperatura, la razón es que porque la calibración de la medición del viento, es un tanto más compleja, ya que la ecuación de calibración debe presentar una corrección de viento por temperatura, es decir intervienen las dos variables en la ecuación, el viento y la temperatura, por esta razón se calibro primero la temperatura.

En el diseño de la metodología se difirieron parámetros los cuales se usarían como base para realizar la calibración:

$$\begin{aligned} [0 - V_{max}] &\rightarrow \Delta V \\ [T_{min} - T_{max}] &\rightarrow \Delta T \end{aligned} \quad (3.5)$$

Es decir, encontrar el voltaje máximo y voltaje mínimo, entregado por la salida analógica (de viento) del WindSensor para poder obtener el valor de delta del voltaje, así como una temperatura mínima y una máxima, para poder definir delta de temperatura y en función de estos datos obtener una ecuación en función del voltaje y la temperatura.

Para poder obtener dichos parámetros fue necesario modificar el montaje del experimento previo para el viento, dado que se debía encontrar el voltaje mínimo fue necesario alejar el ventilador de los sensores, pero el lugar donde se desarrollaron las primeras campañas experimentales no había el suficiente espacio para alejar los sensores del ventilador a una distancia considerable, así que se decidió mover el equipo a un sitio con mayor espacio, para así poder realizar las campañas experimentales de manera adecuada. Como se puede observar en la Figura 3.26, el WindMaster continuó sobre el tripié, de igual forma que en el anterior montaje realizado tanto el WindMaster como el ventilador se colocaron alineados entre sí, para que el viento proporcionado por el ventilador se aprovechara de la mejor forma y no presentara desviaciones. De manera ilustrativa en la imagen aparece una flecha roja, la cual indica que a esa dirección se desplazaba el sensor, ya que para esta nueva campaña experimental el sensor se desplazó en Y, Z.

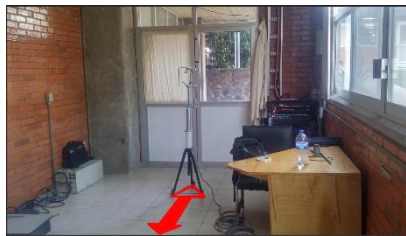


Figura 3.26 Sitio para llevar acabo las campañas experimentales.

Para el eje z se colocaron cinco puntos (Figura 3.27), los cuales fueron marcados para que en posteriores campañas no se modificara dicha posición, al poder desplazar al sensor en el eje z nos permitió poder obtener más información sobre el sensor para hacer una mejor calibración, la distancia de los cinco puntos se definió en función de la distancia del punto más lejano y el ventilador, dicha distancia fue de 4.55 m así que entra cada marca había 90 cm, las marcas trazadas eran completamente simétricas y al colocarlas se tuvo mucho cuidado para que fuesen iguales en proporciones, cabe resaltar que para realizar un montaje para trabajo experimental, todos los objetos deben estar debidamente marcados para que su posición no sea modificada y pueda afectar en las campañas experimentales.



Figura 3.27 Marcas en el piso de los 5 puntos.

El ventilador se colocó sobre una mesa (Figura 3.28), de esta forma el flujo lograba acercarse más a la altura del WindMaster dado que el sensor se encontraba sobre el tripié presentaba una altura considerable, por eso fue necesario elevar también la altura del ventilador.

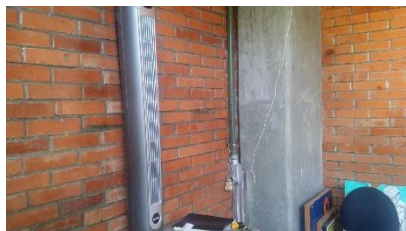


Figura 3.28 Ventilador.

La caracterización del viento en las posiciones 0 cm y 17.8 cm en el eje Y ya se había realizado, pero solo para una posición en el eje Z, así que fue necesario repetir dicha caracterización. Se usó un tiempo de muestreo de 250 ms por 1 minuto, utilizando la velocidad dos del ventilador, realizando cinco mediciones en cada posición del eje Y, Z, siendo un total de 50 mediciones para dicha campaña experimental. Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.11.

Eje Z	Eje Y	Velocidad m/s	Desviación Velocidad.	Dirección del viento (Rad)
Punto 1	0cm	1.142023007	0.270122452	-1.13089391
455cm	17.8cm	0.981650264	0.258285482	-4.853975097
Punto 2	0cm	0.488232379	0.269506205	-0.974850554
364cm	17.8cm	0.397799503	0.214652203	3.735917359
Punto 3	0cm	0.7446204	0.321308114	1.011073632
273cm	17.8cm	0.559382306	0.255679068	10.97840289
Punto 4	0cm	0.782723924	0.340532331	5.259035544
182cm	17.8cm	0.582892212	0.304149877	13.80217783
Punto 5	0cm	1.12977316	0.277947089	3.271410748
91cm	17.8cm	1.031515626	0.304564112	8.283323353

Tabla 3.11 Segunda caracterización del viento.

Como se puede observar valores del viento a 17.8 cm está muy por debajo de los valores presentes a 0 cm, esto se puede apreciar más en el grafico (Ver Anexo J), donde la línea roja representa los datos a 17.8 cm y la línea azul los datos a 0 cm.

El flujo no se está comportando como debería, los picos de mayor viento se encuentran en la distancia más lejana y la más cercana, lo cual no tiene mucho sentido, sin embargo, la posible respuesta es que, en el punto más lejano, se esté generando recirculación del viento, esto significa que el flujo al chocar con las paredes se esté regresando generando que el WindMaster lea que en ese punto existe mayor flujo del que debería. Uno de los principales aspectos que debe cubrir el

trabajo experimenta es la repetibilidad, por tanto, se decidió realizar la campaña dos veces más bajo las mismas condiciones y bajo los mismos parámetros. Los datos se muestran en la Tabla 3.12, así como su grafica (Ver Anexo K).

		Campaña 1	Campaña 2	Campaña 1	Campaña 2
Eje Z	Eje Y	Velocidad m/s		Desviación Velocidad	
Punto 1	0cm	1.31974378	1.52528994	0.28704923	0.29943701
455cm	17.8cm	1.23111088	1.52748116	0.34247521	0.33543115
Punto 2	0cm	1.40797169	1.60073801	0.34817832	0.35796447
364cm	17.8cm	0.97430363	1.19287723	0.37988353	0.41929567
Punto 3	0cm	1.05249038	1.46159658	0.3185853	0.35303208
273cm	17.8cm	0.71320601	0.92833199	0.27297256	0.36055108
Punto 4	0cm	1.42676724	1.47904321	0.26702861	0.29954041
182cm	17.8cm	0.9310911	1.23767259	0.32990015	0.32502848
Punto 5	0cm	0.59529512	1.06569245	0.30029975	0.30536691
91cm	17.8cm	0.64496505	1.02152189	0.27018464	0.27325646

Tabla 3.12 Segunda y tercer caracterización del viento.

Los datos obtenidos de la segunda y tercera campaña experimental no son iguales con los de la primera campaña, sin embargo, entre estos dos últimos sí que existe un parentesco entre los datos, a pesar de ello la constante entre las tres campañas que es la velocidad del viento a 17.8 cm de altura es menor que a 0 cm de altura.

Desde las primeras campañas realizadas se identificó que el viento proporcionado por el ventilador era muy irregular, dado que con el software de adquisición de datos del WindMaster, el flujo siempre se mantenía oscilando aproximadamente ± 0.5 m/s, se creyó que esto podría ser la posible causa de tener diferencias de ciento entre las alturas, por tanto se decidió cambiar de ventilador (Figura 3.29), y realizar nuevamente una campaña experimental para identificar si con ese nuevo ventilador se lograba obtener la misma cantidad del flujo a los 0 cm y 17.8 cm (Figura 3.30).



Figura 3.29 Ventilador industrial.



Figura 3.30 Ventilador industrial.

El segundo ventilador utilizado fue uno industrial, el cual por su forma circular se esperó que su funcionamiento fuera mejor que el ventilador en forma vertical, dado que el flujo se encontraría en solo zona a diferencia del otro ventilador, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.13.

		Velocidad m/s	Desviación.	Dirección (Rad)	Desviación. Dirección.
Punto 1	0cm	1.449905113	0.438869607	1.738015314	11.7060768
455cm	17.8cm	1.881745522	0.377086114	-0.855333226	6.659129358
Punto 2	0cm	1.401496789	0.462145277	-0.417870282	15.28497814
364cm	17.8cm	1.692065368	0.375278265	-2.845379467	9.048945482
Punto 3	0cm	1.355108699	0.39411577	-2.840490061	12.53307013
273cm	17.8cm	1.173123987	0.369609361	-0.22534886	15.45053877
Punto 4	0cm	1.229263281	0.310644631	-2.743570406	11.51789123
182cm	17.8cm	1.061513272	0.367884179	-4.86604484	17.40690571
Punto 5	0cm	0.834080977	0.321008289	1.746181706	20.77302446
91cm	17.8cm	0.765208981	0.285605093	1.989743683	18.99350183

Tabla 3.13 Caracterización ventilador industrial.

Al ser un ventilador industrial los valores de viento fueron mayores, a pesar se utilizar la velocidad más baja de dicho ventilador, sin embargo los datos no fueron los esperados, la velocidad menor se encontró en el punto más cercano al ventilador, lo cual genera una inconsistencia en los datos. Al no poder encontrar la misma velocidad en ambos puntos se decidió modificar la metodología y algunos parámetros para poder realizar dicha calibración, dado que fue imprescindible que la velocidad del flujo fuese la misma en ambos sensores.

Se decidió regresar al primer ventilador, a pesar de que presenta fluctuaciones, si se compara con el ventilador industrial, funciona de mejor manera. Como se explicó, se utilizaron cinco puntos para desplazar los sensores en el eje z, y el ventilador se colocó frente al WindMaster, gracias a la herramienta de dirección de viento presente el software de adquisición de datos de dicho sensor, se identificó que a pesar de que el ventilador estaba alineado, el flujo no siempre chocaba con el sensor justo de frente, así que se colocaron marcas en el ventilador (Figura 3.31), las cuales correspondían a cada punto del eje z, dichas marcas en el ventilador (Figura 3.32), lograron que el flujo chocara de frente con el WindMaster, haciendo que la alineación de ambos fuese más precisa.

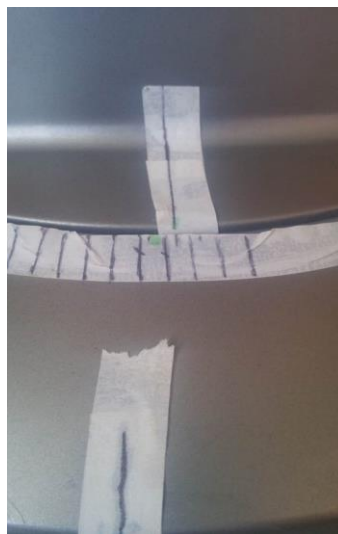


Figura 3.31 Graduación de posiciones.

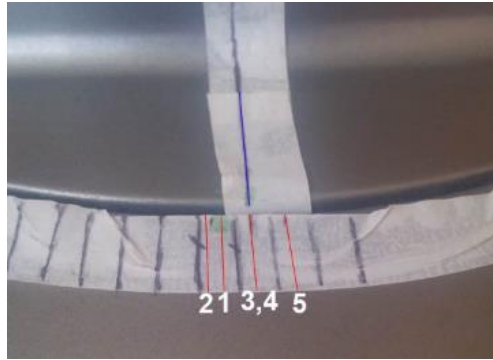


Figura 3.32 Marcas para cada posición.

La última modificación al montaje del experimento, fue al cambio de posición del WindSensor, en un principio se pensó en colocarlo sobre la WindMaster, sin embargo, como en ninguna de las pruebas anteriores se logró obtener la misma cantidad de viento se optó por colocar el WindSensor, justo detrás del WindMaster, (Figura 3.33) así que se realizaron una serie de pruebas para identificar si al colocar el WindSensor, detrás del WindMaster modificaba las mediciones realizadas por dicho sensor.



Figura 3.33 WindSensor detrás del WindMaster.

Como se puede observar en la Tabla 3.14 los valores del viento con y sin sensor son prácticamente iguales, por lo tanto, se concluye que poner el WindSensor no afecta las lecturas tomadas por el WindMaster.

sensores	Velocidad	Diferencia
Con sensor	1.9361877	-0.08733981
Sin sensor	1.95324733	

Tabla 3.14 Interferencia de sensor.

Al igual que para la temperatura se buscó la independencia del promedio respecto al tiempo de captura de datos, es decir, cuanto tiempo tardaba en estabilizarse el promedio de las mediciones del WindSensor. El tiempo encontrado fue de 50 s, sin embargo, se dio 10 s. más de tolerancia es decir minuto.

Una vez realizadas las modificaciones pertinentes se procedió con la campaña experimental para poder realizar la calibración del viento, la metodología experimental fue la siguiente: se conservó el ventilador vertical, y los cinco puntos en el eje z, en cada punto se realizaron pruebas a cada velocidad, es decir tres pruebas en cada punto, las pruebas se realizaron con un tiempo de muestreo de 250 ms durante un minuto, dichas pruebas se realizaron tres veces, a 23°C, 27°C y 31°C, esto para identificar si el valor analógico del WindSensor se modifica al cambiar la temperatura ambiente. Los datos obtenidos se muestran en el gráfico (Ver Anexo L).

Como se puede observar en el gráfico los valores del WindSensor no se ven afectados por el cambio de temperatura, esto significa que la ecuación de temperatura no deberá presentar corrección por temperatura en estos rangos de temperatura y velocidad.

A dichos datos se le ajusto una ecuación polinómica de cuarto grado, la ecuación obtenida fue la siguiente:

$$V = (p1 * x^4) + (p2 * x^3) + (p3 * x^2) + (p4 * x) + (p5) \quad (3.6)$$

Donde:

V = viento en m/s

$p1 = 8.8945e-009$

$p2 = -1.2185e-005$

$p3 = 0.0063302$

$p4 = -1.4628$

$p5 = 126.23$

x = valor analógico del WindSensor

Los datos obtenidos se muestran en el gráfico (Ver Anexo M).

Aplicando la ecuación de calibración a los datos obtenidos, se obtuvo la siguiente gráfica (Ver Anexo N).

Como se puede observar en el gráfico del Anexo N, al igual que con la temperatura el resultado esperado era que al poner los datos de la velocidad el WindMaster contra la velocidad del WindSensor los datos formaran una línea a 45° tal como se obtuvo en la gráfica antes mencionada, por tanto, se concluye que la ecuación obtenida es óptima para la calibración y además que el WindSensor no necesita corrección por temperatura.

En la última grafica (Ver Anexo O), se demuestra la diferencia entre el ajuste de curva realizado por nosotros (línea roja), y la curva ajustada por el proveedor (línea azul), es clara la diferencia entre ambas, sin embargo, se demostró que la ecuación obtenida funciona de manera adecuada.

3.1.4 Control

La administración y control del proyecto se definió en el diagrama de Gantt, en el cual se especificaron los tiempos para llevar a cabo cada actividad, así como el uso de diagramas y esquemas proporcionados por el Dr. Guillermo Barrios del Valle, los cuales fueron muy útiles al momento de realizar las actividades marcadas.

3.1.5 Cierre

El proyecto se entregó demostrando que las ecuaciones de calibración obtenidas funcionaban de manera óptima, como se mostró en el capítulo anterior, se graficaron los datos del sensor para mostrar el comportamiento del sensor con las nuevas ecuaciones de calibración.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

4.1 Comprobación de Hipótesis

La investigación realizada en el capítulo 2, permitió comprender cuál es el principio de funcionamiento del WindSensor Rev. P., así como la identificación de componentes presentes en dicho sensor, esto fue de gran ayuda ya que el momento de ejecutar el proyecto, ya se sabía con qué hardware se trabajaría y en cierta forma ayudó a plantear la metodología experimental. En la ejecución del proyecto como se planteó en la hipótesis, se realizaron una serie de campañas experimentales, con las cuales se logró obtener la curva de calibración con un rango de error del $\pm 5\%$.

4.2 Cumplimiento de Objetivos

Para el WindSensor como se mencionó en un inicio, se logró caracterizar, es decir, mediante el uso de la metrología y operaciones estadísticas, se logró definir el comportamiento del sensor a distintas condiciones tanto de viento como de temperatura, así como la obtención de una ecuación de calibración que permite tomar mediciones confiables, con su correspondiente porcentaje de error, dado que el hardware presenta limitaciones, sin embargo, el saber el porcentaje de error permite saber que tanto oscilaran los datos. Para el sistema de adquisición de datos, se logró la mejora en la reducción de espacio utilizado, sustituyendo una fuente con transformador por una conmutada, además de rediseño de la placa de alimentación para el sistema de adquisición de datos.

4.3 Resultados

Los resultados obtenidos más relevantes, son la identificación de la parte de mayor sensibilidad del WindSensor Rev. P., que es a 90° , así como el tiempo mínimo en el que se deben tomar lectura para la temperatura y el viento, también la descripción detallada de su comportamiento y finalmente las ecuaciones correspondientes de calibración.

4.4 Contribuciones

La realización de este proyecto ayudó a adquirir nuevos conocimientos, dado que el proyecto hasta cierto punto está fuera de mi área de trabajo, como Mecatrónico, la mayoría de las veces solo me baso en desarrollo de proyecto de automatización utilizando actuadores y sensores, para reducir tiempo en la realización de ciertos proceso, y a pesar de haber llevado la mataría de metrología, los conceptos de forma teórica muchas de las veces no se pueden cimentar de manera sólida si no se hace una ejecución práctica.

El desarrollar este proyecto logré darme cuenta la importancia de la metrología, y aún más la necesidad de tener dispositivos calibrados que permitan hacer trabajo de investigación o experimental, además de cual útil resultan las matemáticas el momento de realizar un análisis científico a un determinado sistema, además de abrir mi panorama respecto a sensores, dado que comúnmente son utilizados sin antes identificar si trabajan de manera adecuada o no.

El haber participado en un centro de investigaciones, me permitió conocer en parte el trabajo que se lleva a cabo, y motivarme para continuar estudiando un posgrado y algún día poder lograr un aporte significativo a la comunidad científica.

REFERENCIAS

- Castañeda, L. A. (2012). *Medidor de Flujo con Termistores*. Recuperado de <http://documents.mx/documents/trabajo-termistor.html>
- Device, M. (2015). *Wind Sesnor Rev. P*. Recuperado de <https://moderndevice.com:https://moderndevice.com/product/wind-sensor-rev-p/>
- Díaz, J. R. (2011). *Metrología, aseguramiento metrológico industrial*. Medellín, Colombia: Editorial ITM.
- Flores, A., y Meneses, D. (2010). *Diseño y construcción de un sistema de medición de velocidad de viento basado en sensores ultrasónicos*. Quito, Ecuador: Editorial EPN.
- Harper, G. E. (2012). *El ABC de la instrumentación en el control de procesos industriales*. DF, México: Editorial Limusa.
- Juran, J. M. (1992). *Juran on Quality by Design*. USA: Editorial Macmillan.
- Khunel, C. (2015). *Arduino for the cloud*. Florida, USA: Editorial Universal Publishers.
- Lonel, C. R. (2014). *Sensores y Actuadores con aplicacion para arduino*. DF, Mexico: Editorial Grupo Editorial Patria.
- Mercedes, M. G. (2015). *Instrumentación Electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Cantabria, España: Editorial Universidad de cantabria.
- Nakamura, K. (2012). *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications*. Philadelphia, USA: Editorial Woodhead.
- Ojeda, L. T. (2014). *Arduino*. Recuperado de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Pallás, A. R. (1993). *Adquisición y distribución de señales*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.
- Pallás, A. R. (2005). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.
- Road, C. (2015). *Gill Instruments: meteorological technology*. Recuperado de: <http://gillinstruments.com/data/datasheets/windmaster.pdf?iss=3.201603>

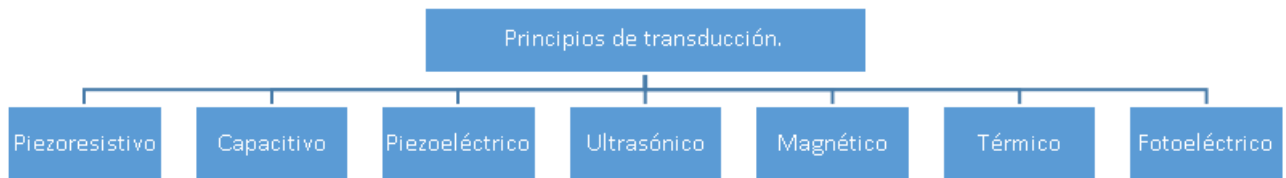
Rodríguez, F. L. (2012). *Técnicas de mecanizado y metrología*. Málaga, España: Editorial IC.

Solé, A. C. (2011). *Instrumentación industrial*. DF, México: Editorial Alfaomega.

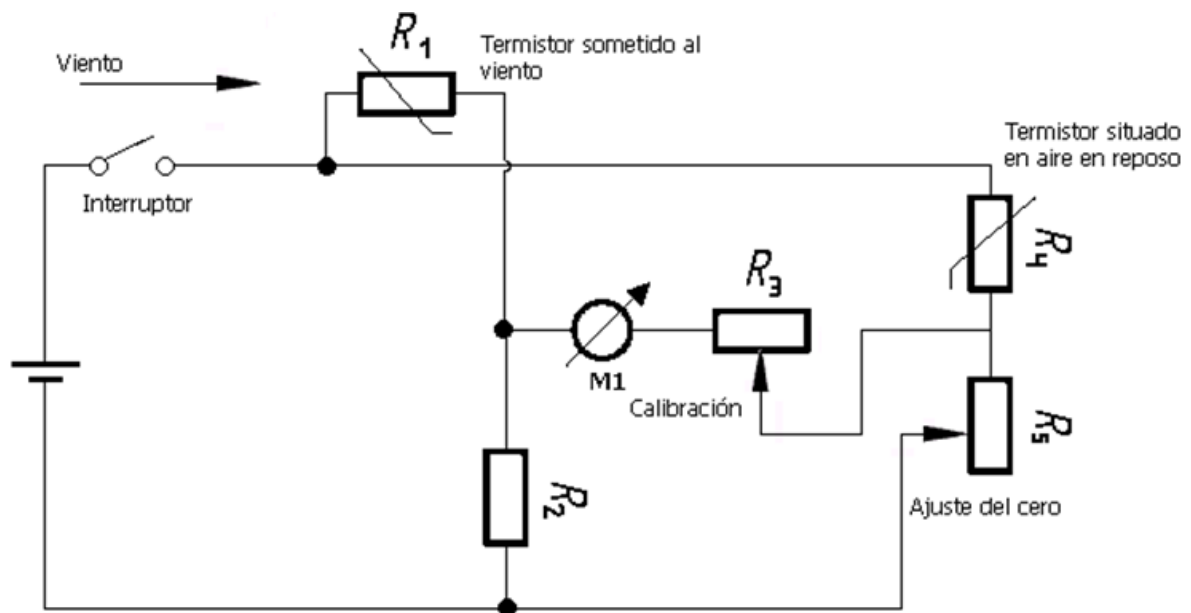
Turner, R. P. (1982). *ABC de los termistores*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.

ANEXOS

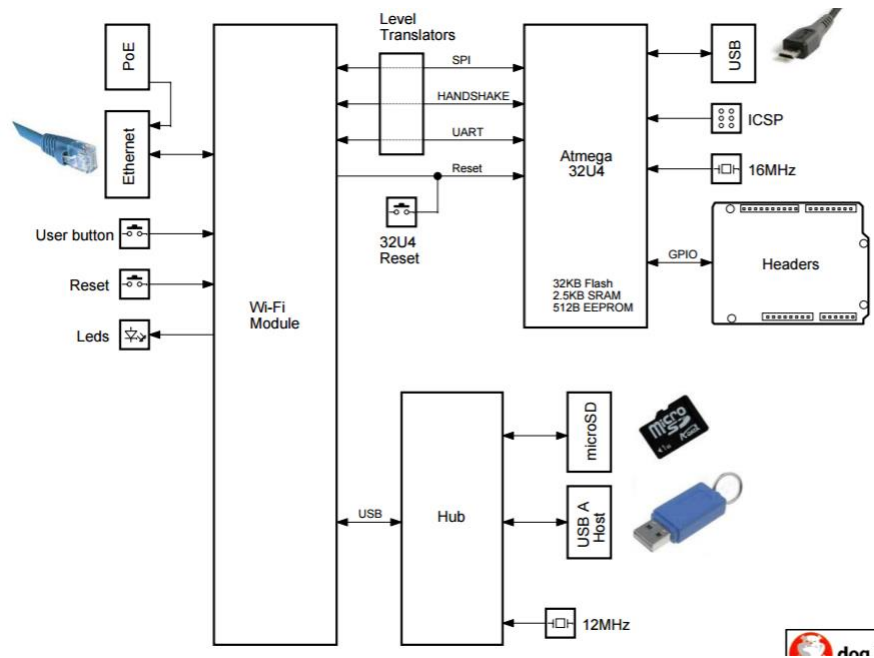
ANEXO A. MÉTODOS DE TRANSDUCCIÓN.



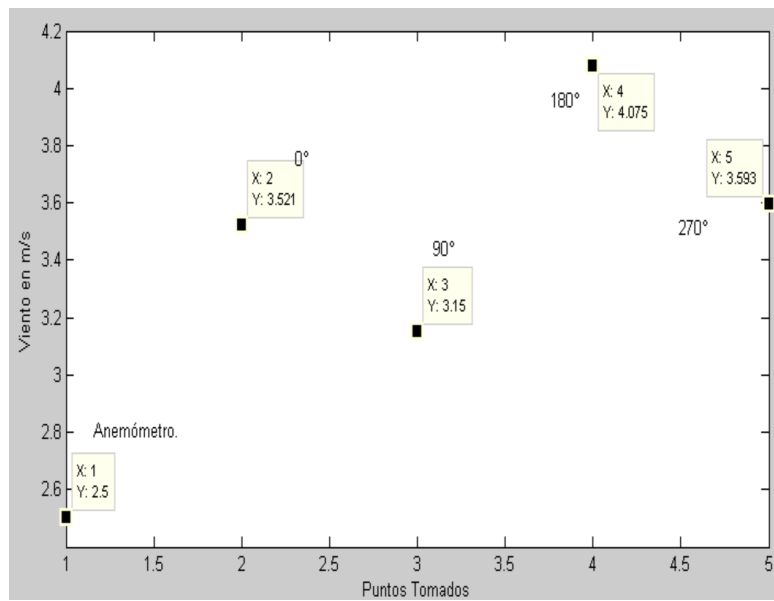
ANEXO B. DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE TERMISTORES COMO ANEMÓMETRO.



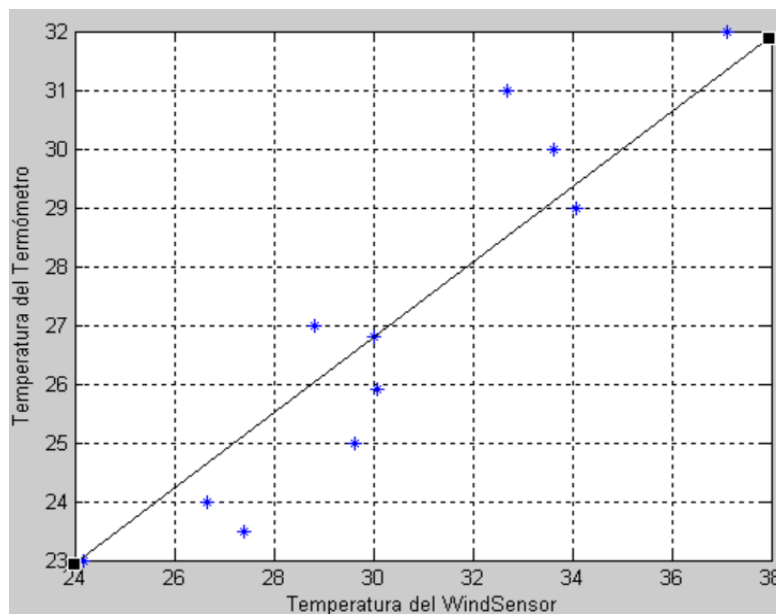
ANEXO C. DIAGRAMA A BLOQUES DEL ARDUINO YÚN.



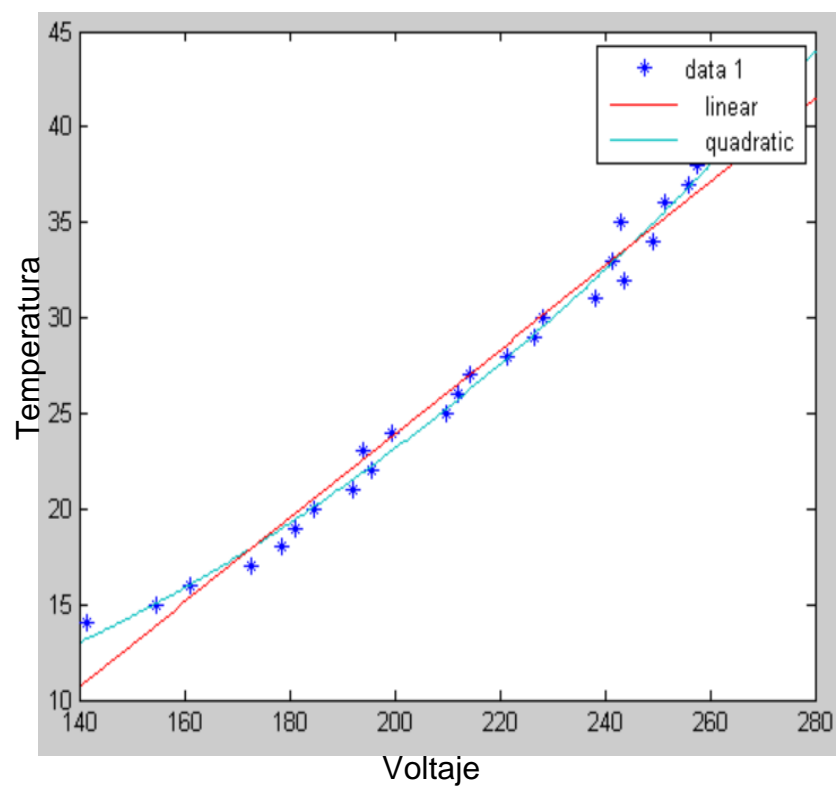
ANEXO D. GRAFICA DE SENSIBILIDAD DEL WIND SENSOR REV. P.



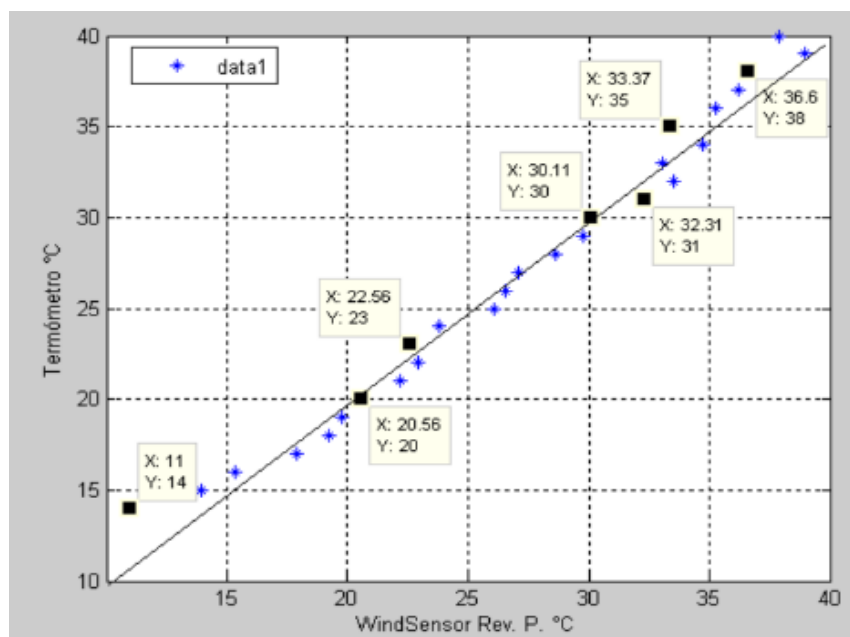
ANEXO E. DISPERSIÓN DE TEMPERATURA.



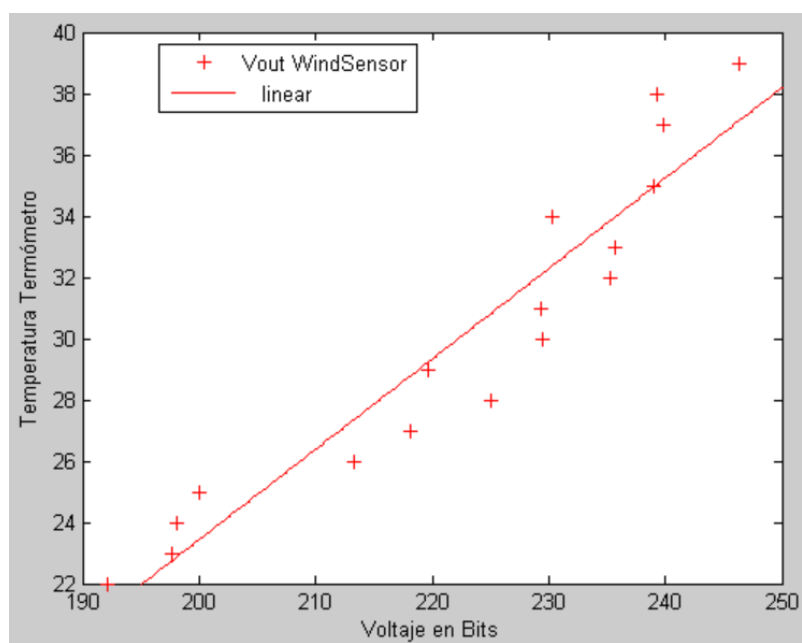
ANEXO F. GRÁFICO DE DISPERSIÓN TEMPERATURA-VOLTAJE.



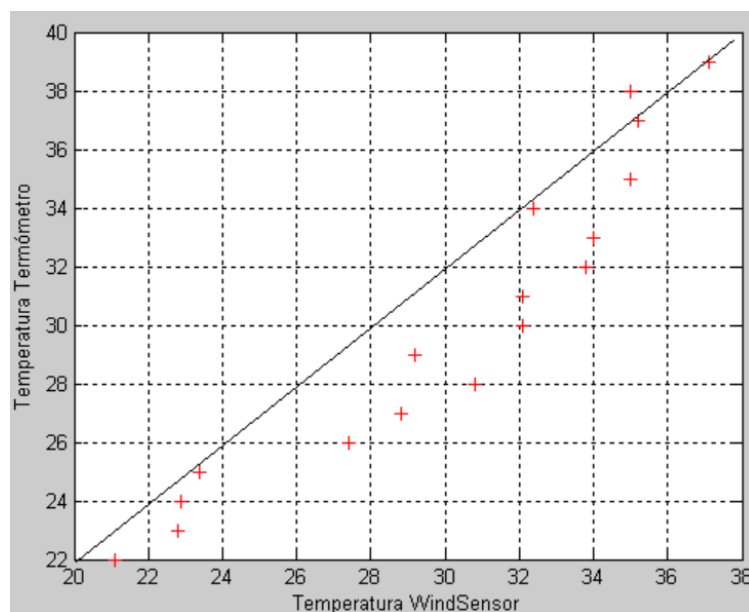
ANEXO G. RESULTADOS DE LA PRIMER ECUACIÓN DE CALIBRACIÓN.



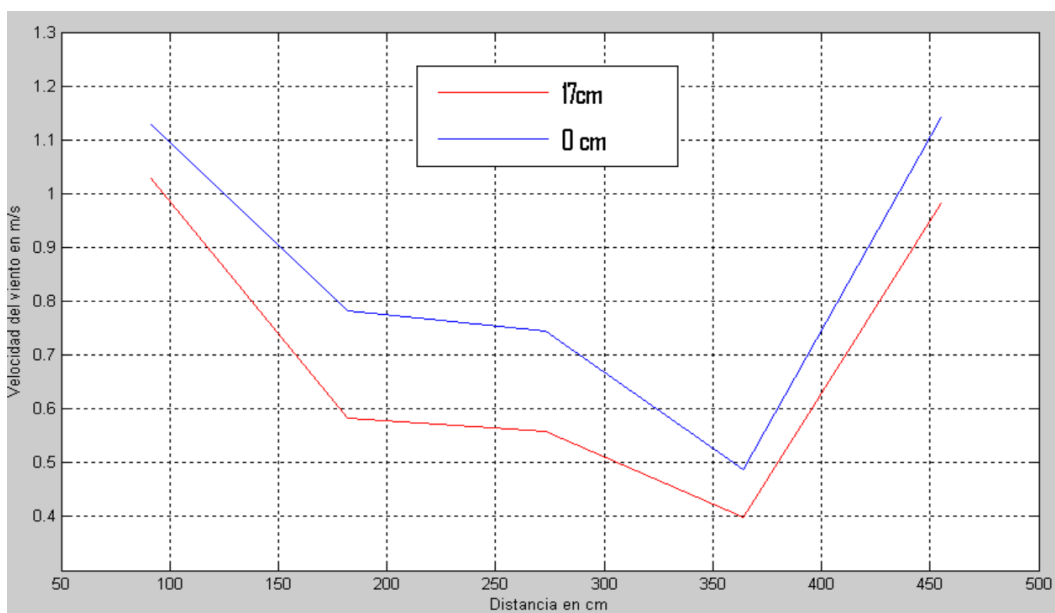
ANEXO H. DATOS DE LA SEGUNDA CAMPAÑA DE CALIBRACIÓN.



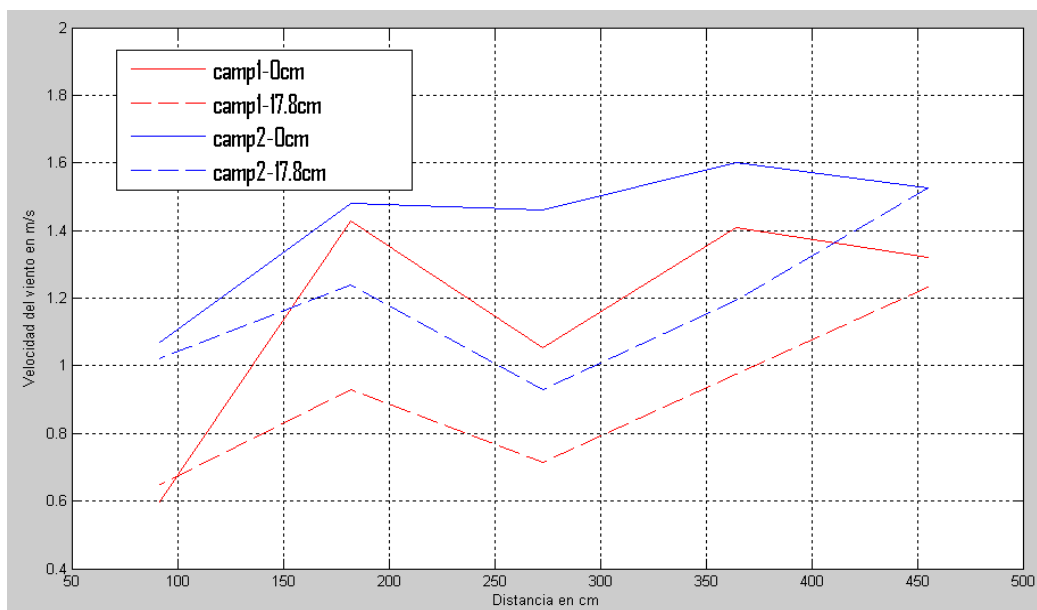
ANEXO I. SEGUNDA CAMPAÑA EXPERIMENTA DE CALIBRACIÓN PARA TEMPERATURA.



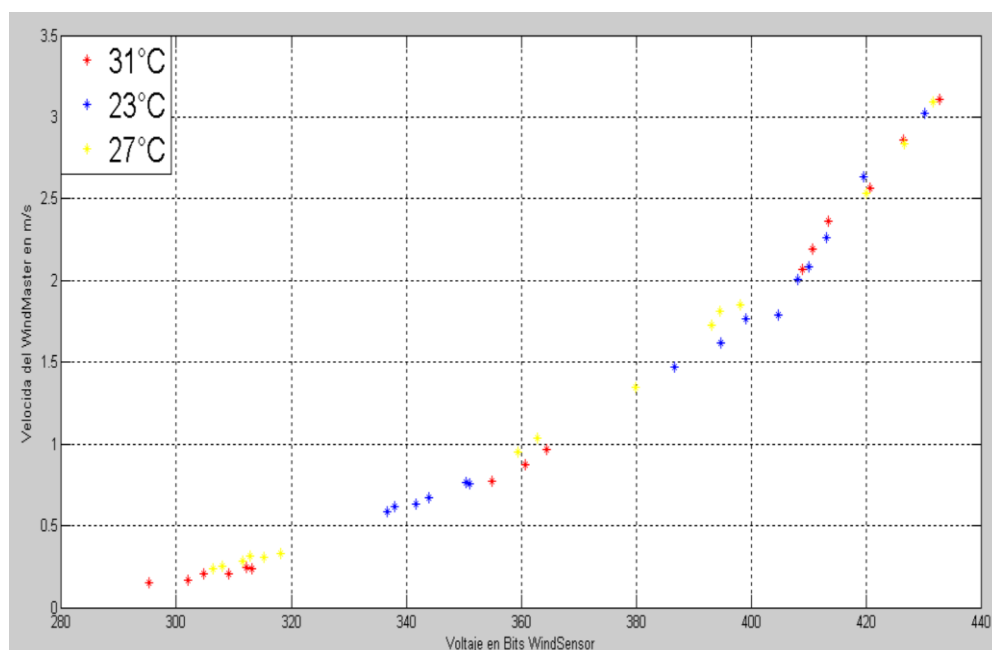
ANEXO J. GRÁFICO DE CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO.



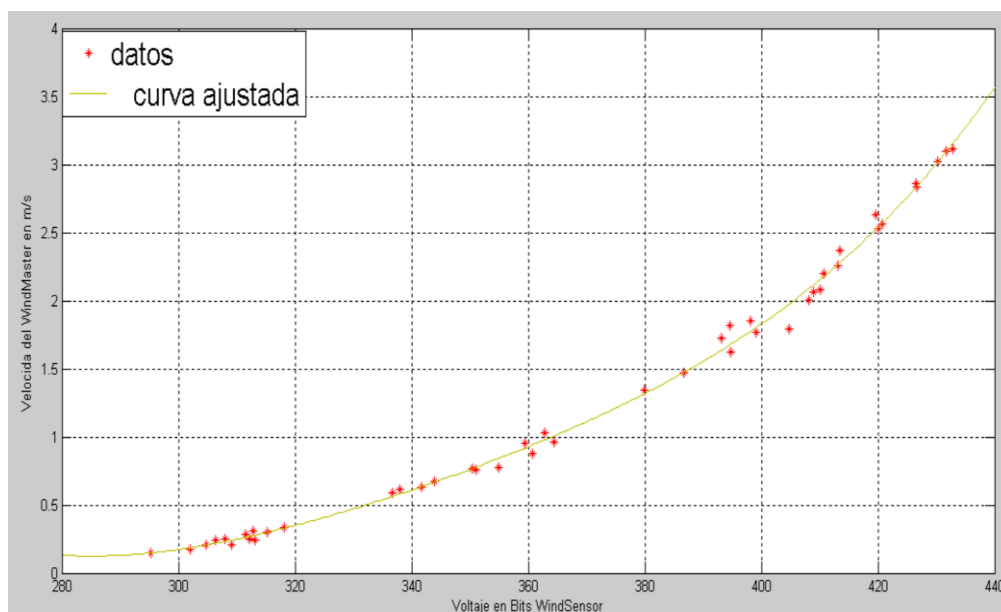
ANEXO K. SEGUNDA Y TERCERA CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO.



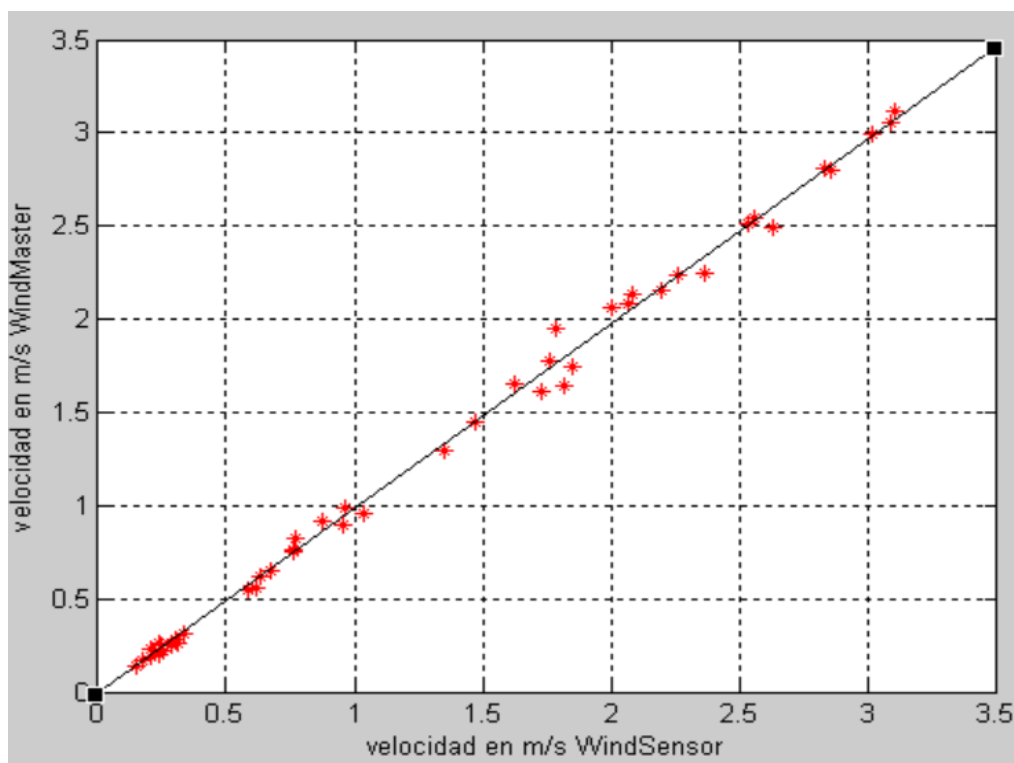
ANEXO L. CAMPAÑA EXPERIMENTAL PARA CALIBRACIÓN DE VIENTO.



ANEXO M. AJUSTE DE CURVA PARA LA CALIBRACIÓN.



ANEXO N. DATOS DE LA CALIBRACIÓN DEL VIENTO.



ANEXO O. COMPARACIÓN DE AJUSTE DE CURVAS.

