 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ANEMÓMETRO BASADO EN SENSORES ULTRASÓNICOS

Fabian Blanco García

Tecnología en Electrónica

Bonie Johana Restrepo Cuestas

Álvaro Jaramillo Duque

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Mayo 15 de 2015

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

En este proyecto se implementó un anemómetro basado en sensores ultrasónicos, para la medición de temperatura, velocidad y dirección del viento. Se desarrolló un prototipo de hardware, que consta de: el sistema de monitoreo (basado en ultrasonido), el sistema de acondicionamiento de señales, el diseño mecánico, la fuente de alimentación y el dispositivo programable. Luego, se desarrolló el software del prototipo, en el lenguaje processing/Wiring bajo la plataforma Arduino. Este sistema está encargado de la secuencia de medición, secuencia de cálculo y presentación de datos. Se desarrollaron pruebas por etapa y una vez superadas se implementaron sus circuitos impresos.

Palabras clave: anemómetro, sensores ultrasónicos, implementación, Arduino.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Ante todo, quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional, por creer en mí y en mis sueños. Ellos son el origen de la persona que soy. Con su dedicación y sus enseñanzas he crecido como una persona muy dichosa, dentro de un ambiente acogedor y comprensivo.

Durante el periodo que he estado en el ITM, he conocido personas muy admirables que sembraron en mí un amor infinito por esta profesión, a los cuales también quiero agradecer a los profesores de gran calidad que me dieron una excelente formación académica y los compañeros que ahora son grandes amigos.

Por último y muy especialmente a mis asesores de grado Álvaro Jaramillo y Bonie Restrepo, les agradezco infinitamente por su paciencia, por su dedicación, por brindarme sus conocimientos y sobre todo por formar mi carácter.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

AO Amplificador operacional.

BJT Transistores de Unión Bipolar (del inglés “Bipolar Junction Transistor”).

PVC Policloruro de vinilo.

PCB Placa de circuitos impresos (del inglés “Printed Circuit Board”).

ZCD Detector de cruce por cero (del inglés “Zero Crossing Detector”).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	8
3. METODOLOGÍA.....	12
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	35
REFERENCIAS	37

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.

1.1.1. Justificación

Los anemómetros son dispositivos meteorológicos utilizados para medir la velocidad y dirección del viento. Dichas mediciones son importantes ya que permiten realizar la predicción del clima. Los anemómetros mecánicos han sido por tradición los que se han utilizado para las mediciones meteorológicas debido a su bajo costo, pero al utilizar sensores mecánicos las piezas se desgastan por factores ambientales tales como: el aire, el polvo, la sal entre otros. Para una medición correcta estos instrumentos necesitan de un mantenimiento continuo.

En este proyecto se propone como una factible solución, utilizar un sistema de medición basado en sensores ultrasónicos, que no cuente con partes móviles y que sea una opción económica comparada con los ofrecidos en el mercado.

1.1.2. Planteamiento del problema

Se busca desarrollar un sistema capaz de medir temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento, similar a la función que realizan los anemómetros mecánicos; evitando utilizar sensores móviles que son afectados por la inercia del movimiento. Básicamente, lo que se busca es implementar otra forma de medir temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento, basado en sensores ultrasónicos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2. Objetivos.

Objetivo general.

Implementar un prototipo de un anemómetro basado en sensores ultrasónicos sin partes mecánicas para la medición de temperatura, velocidad y dirección del viento.

Objetivos específicos.

- Investigar los métodos para medir temperatura, velocidad y dirección del viento con sensores ultrasónicos.
- Desarrollar un prototipo de hardware para el anemómetro ultrasónico.
- Desarrollar un prototipo de software para el control del anemómetro ultrasónico a través de *Arduino*.
- Calibrar el prototipo con un anemómetro comercial.

1.3. Organización del trabajo.

En la primera parte se mostrará un breve marco teórico, que incluye algunos conceptos asociados al uso de sensores ultrasónicos en la implementación de anemómetros. En la segunda parte se presentará la metodología utilizada para desarrollar el proyecto. Posteriormente se mostrarán los resultados de las pruebas. Para finalizar se presentan las conclusiones y recomendaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

En el proceso de diseño de aplicaciones de energía renovable, es necesario conocer el potencial eólico y solar del área de interés. Para esto es necesario medir el recurso en el tiempo, en este caso la velocidad del viento y la dirección.

Desde el punto de vista físico, el viento es la velocidad de las partículas de aire, en consecuencia, es un vector que se define por su dirección e intensidad. La dirección se expresa en grados sexagesimales; es decir, según un círculo graduado en 360°, significando "de donde viene el viento". La intensidad se expresa en nudos, en m/s o en Km/h (Organización Meteorológica Mundial, 1996).

Para obtener estos datos, se utilizan estaciones meteorológicas que miden un conjunto de variables ambientales o dispositivos especializados como los anemómetros.

2.2.1 Anemómetro

“Un anemómetro es un dispositivo meteorológico que mide la velocidad relativa del viento que incide sobre él. Si el anemómetro está fijo colocado en tierra entonces medirá la velocidad del viento en esa zona pero si está colocado en un objeto en movimiento puede utilizarse para medir la velocidad de movimiento relativo del objeto con respecto al viento en calma. Para medir la velocidad relativa del viento es necesario utilizar algún proceso físico cuya magnitud varíe con respecto a la velocidad del viento.

Los anemómetros se pueden clasificar de acuerdo a su modo de funcionamiento, así:

Velocidad de giro de un rotor sometido al viento.

La fuerza obtenida al enfrentar una superficie al viento.

La diferencia de temperatura entre dos filamentos calientes, uno sometido al viento y el otro al aire en calma.

La presión dinámica producida en una superficie enfrentada al viento.

El efecto Doppler, el cual consiste en la variación de frecuencia de una fuente para un observador en movimiento” (Villegas Jiménez, 2008).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para evitar problemas en la medición, debido a elementos mecánicos, contaminación, entre otros, se busca un anemómetro con un principio de funcionamiento más robusto y que evite los problemas antes mencionados. Entre estos se encuentran los anemómetros basados en ultrasonidos.

2.2.2 Ultrasonidos

El ultrasonido es una onda acústica cuya frecuencia está por encima del umbral de audición del oído humano, aproximadamente 20.000 Hz.

2.2.2.1 Generación de ultrasonido

Existe un gran número de métodos para la generación de ultrasonido para fines prácticos los más utilizados son:

Efectos piezoeléctricos

Propiedades de algunos materiales cristalinos, los cuales generan cargas eléctricas en determinadas superficies producidas por tracción o compresiones mecánicas ejercidas, perpendicularmente, sobre su eje principal de simetría. Fenómeno que ocurre en los dieléctricos cristalinos, en los cuales, la presión ejercida en determinadas condiciones, provoca una polarización de las cargas eléctricas, al concentrar las positivas en una cara del cristal y las negativas en la otra cara. Al unirlo con un conductor, circula por este una corriente generada por la presión (Capote Cabrera, Pérez López, & Acosta Bravo, 2009).

Efectos piezoeléctricos invertidos

Se aplica corriente eléctrica alterna a ciertos materiales policristalinos y experimentan cambios en su forma.

Materiales: cuarzo, titanato de bario, titanato de bario circonio entre otros (Capote Cabrera et al., 2009).

Procedimiento mecánico

En principio se aplican los mismos procedimientos que emplean para generar sonidos audibles, si los dispositivos capaces de oscilar se fabrican con una frecuencia propia correspondiente alta (Vega Fidalgo & Zorita Téllez, 2004).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.2.2 Propiedades de las ondas ultrasónicas:

Reflexión: la onda regresa a partir de la superficie del nuevo medio (y será más intensa cuanto más difiere la resistencia sónica), el ángulo de incidencia es igual al de reflexión. Para evitar que la energía sónica se refleje por completo, si se interpone una capa de aire entre el cabezal y la piel, se debe aplicar un líquido de acople (gel de acople) que posea la misma resistencia sónica que el tejido.

Transmisión: la onda se desplaza en el nuevo medio y se refracta si no incide con un ángulo de 90°.

Absorción: cuando las ondas atraviesan un medio, algunas se observan y en este fenómeno chocan con partículas produciendo un calentamiento considerable, lo que implica una disminución de su intensidad (Capote Cabrera et al., 2009; Vega Fidalgo & Zorita Téllez, 2004).

2.2.3 Anemómetro ultrasónico

La medición de un fluido utilizando señales ultrasónicas se basa en la influencia del campo de las velocidades del fluido por una señal producida desde un transmisor hacia un receptor.

Para determinar la velocidad y dirección del viento, el sensor ultrasónico emite pulsos ultrasónicos de un transductor al opuesto y luego se mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de los impulsos. Para evitar errores causados por condiciones ambientales ya sea temperatura, humedad y presión barométrica las mediciones se realizan a lo largo de 2 ejes ortogonales (Darrera S.A., 2012).

Los tiempos transcurridos se obtienen utilizando las siguientes formulas:

$$t_1 = \frac{l}{c+v_w} \quad t_2 = \frac{l}{c-v_w}$$

Usando las formulas anteriores se obtiene la velocidad del viento:

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

Dónde:

c = velocidad del sonido [m/s]

l = distancia en el eje entre los sensores [m]

v_w = velocidad del viento paralelo al eje [m/s]

t_1 = tiempo que tarda la señal en viajar x_1 a x_2 [s]

t_2 = tiempo que tarda la señal en viajar x_2 a x_1 [s]

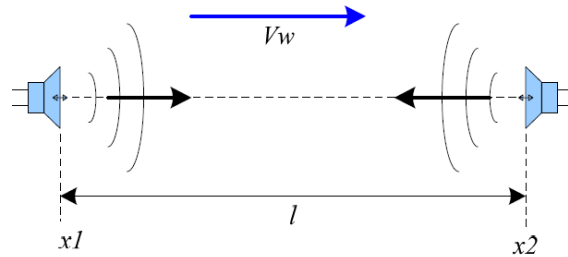


Figura 1. Configuración básica de un eje de medida para velocidad del viento

Este método para medir la velocidad del viento, es complejo de implementar; pero su ventaja radica en que no depende de la velocidad del sonido. Y es actualmente el que se utiliza en los anemómetros ultrasónicos comerciales (Darrera S.A., 2012).

Para determinar la dirección del viento es necesario un arreglo de dos ejes o más con los cuales se logra conocer el ángulo en los ejes horizontales como se observa en la Figura 2, se puede calcular con la siguiente fórmula $\theta = \arctan\left(\frac{v_{w1}}{v_{w2}}\right)$.

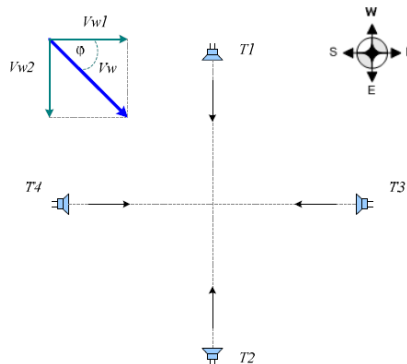


Figura 2. Arreglo de 2 ejes horizontales para la medición de velocidad y dirección del viento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló en 4 etapas. En la primera etapa, se realizó una búsqueda de proyectos semejantes para hacer el estado del arte. Se identificaron varios proyectos que implementaban prototipos de anemómetros ultrasónicos. La información encontrada fue de gran ayuda ya que utilizaban los mismos principios de funcionamiento. Los proyectos más relevantes son (Becker, 2003; Villegas Jiménez, 2008).

En la segunda etapa se desarrolló un prototipo de hardware para el anemómetro ultrasónico, que incluyó: el sensado, el acondicionamiento de señales y el sistema de control.

Las actividades desarrolladas en la segunda etapa fueron:

Investigación de los sensores ultrasónicos disponibles en el mercado, y sus respectivos fabricantes.

- Estudio y pruebas de los sensores ultrasónicos 400PT160 de Pro-Wave.
- Investigación sobre el acondicionamiento de los sensores ultrasónicos.
- Pruebas del circuito de acondicionamiento mediante simulación y montaje en protoboard.
- Prueba del circuito completo montado en protoboard para verificar su funcionamiento.
- Diseño del circuito impreso (EAGLE).
- Fabricación del circuito impreso.
- Montaje y verificación del funcionamiento de la PCB con los sensores ultrasónicos.
- Diseño y fabricación de la estructura mecánica.

En la tercera etapa, se desarrolló el programa de control bajo la plataforma *Arduino*. Este sistema es el encargado de controlar la transmisión y recepción de las señales ultrasónicas, también es el que se encarga de realizar todos los cálculos necesarios para obtener los valores de temperatura, velocidad y dirección del viento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este proyecto está compuesto por tres sistemas (ver Figura 3, cada uno será descrito a continuación).



Figura 3. Diagrama del sistema

4.1 Sensado

En esta etapa se realizó la adquisición de las señales, mediante sensores ultrasónicos. El tiempo de vuelo de la señal ultrasónica es medido en las diferentes direcciones. La temperatura es obtenida mediante un sensor de temperatura LM35.

Transductores ultrasónicos

Los transductores ultrasónicos seleccionados son los 400PT160 de Pro-Wave que tienen las siguientes características:

Como Transmisor	
Frecuencia central	40.0±1.0Khz
Nivel de presión sonora	117dB min
Capacitancia	2400 pF
Como Receptor	
Frecuencia central	40.0±1.0Khz
Sensibilidad mínima	-65dB min
Capacitancia	2400 pF

Tabla 1. Características sensores 400PT160 (Pro-Wave Electronics Corporation, 2015).

Para evitar interferencia electromagnética en la señal, se utilizó cable coaxial blindado para su integración al sistema.

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura que se eligió es el LM35 de la National Semiconductor que tiene las siguientes características (National Semiconductor Corporation, 2000):

- Este sensor de alta precisión presenta como ventaja una salida de voltaje lineal, regida por la relación (10mV/°C).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Rango de trabajo: -55º a 150º Celsius.
- Voltaje de alimentación: 4~30VDC.
- Consumo de corriente: 60 µA.

4.2 Acondicionamiento

Utilizando los valores obtenidos en la etapa de sensado se implementó un acondicionamiento de la señal, que permitiera generar un rango de voltaje que fuera fácil de manipular.

El acondicionamiento de los sensores ultrasónicos se probó con varias herramientas de simulación. Dado que los elementos fueron tomados desde librerías y en algunos casos no fue posible modificar sus parámetros, se optó por realizar las simulaciones en Proteus. Adicionalmente, porque permitía incluir la placa *Arduino*.

4.2.1 Acondicionamiento del generador de señal

La señal de referencia que se envía al transmisor es generada por un microcontrolador en la etapa de control. Dicha señal es una onda cuadrada periódica, con amplitud entre 0 y 5V, con frecuencia de 40Khz, que es la frecuencia central de los sensores.

Tal como se indicó en el marco teórico (ver Figura 1) y como se observa en la Figura 4, la señal se envía a cada transmisor por turnos, para completar un ciclo de medida en las dos direcciones por ejes.

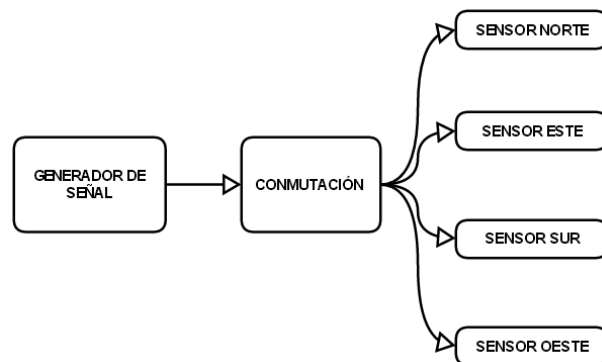


Figura 4. Acondicionamiento transmisor

4.2.2 Conmutación de los transductores

Para completar un ciclo de medida, es necesario utilizar un multiplexor/demultiplexor análogo que realiza la conmutación de los transductores por parejas (emisor-receptor). En el caso del transmisor, se le enviará una señal cuadrada; y en el caso del receptor, se enviará

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

su señal a la etapa de amplificación. En el mercado fue posible obtener el MUX CD4052 (NXP Semiconductors, 2012), que cuenta con dos canales (A,B) de entrada/salida. Este circuito integrado, puede ser utilizado para multiplexar o demultiplexar a cuatro canales (Y0, Y1, Y2, Y3) seleccionables a dos entradas digitales que en este caso serán enviadas desde la etapa de control.

A continuación se presenta la tabla de control del MUX CD4052:

Estado de las entradas			Estado de los canales			
INH	A	B	Y0	Y1	Y2	Y3
0	0	0	H	L	L	L
0	0	1	L	H	L	L
0	1	0	L	L	H	L
0	1	1	L	L	L	H
1	X	X	L	L	L	L

Tabla. 2 Control CD4052

Dónde:

H= nivel alto de voltaje (uno lógico).

L= nivel bajo de voltaje (cero lógico).

X= no importa.

El canal “Y” se utiliza para recibir la señal de los sensores ultrasónicos y acoplarlos al circuito de amplificación, mientras que el canal “X” se utiliza para el envío de la señal cuadrada desde el *Arduino* hacia los transductores para generar la señal ultrasónica.

A continuación se detalla la secuencia de selección del CD4052 para realizar un ciclo de medición.

- Al seleccionar el canal Y0 se coloca L (0 lógico) en A y B, el transductor Norte recibe la onda cuadrada de la etapa de control y genera una señal ultrasónica, seguidamente el transductor Sur recibe la señal ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal a la etapa de amplificación.
- Al seleccionar el canal Y1 se coloca L (0 lógico) en A y H (1 lógico) en B, el transductor Oeste recibe la onda cuadrada de la etapa de control y genera una señal ultrasónica, luego el transductor Este recibe la señal ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal a la etapa de amplificación.
- Al seleccionar el canal Y2 se coloca H (1 lógico) en A y L (0 lógico) en B, el transductor Sur recibe la onda cuadrada de la etapa de control y genera una señal ultrasónica, seguidamente el transductor Norte recibe la señal ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal a la etapa de amplificación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Al seleccionar el canal Y3 se coloca H (1 lógico) en A y H (1 lógico) en B, el transductor Este recibe la onda cuadrada de la etapa de control y genera una señal ultrasónica, luego el transductor Oeste recibe la señal ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal a la etapa de amplificación.

La señal recibida por el receptor ultrasónico es una senoide de 40kHz y amplitud ascendente. Luego la señal se estabiliza con una amplitud casi constante para finalmente disminuir su amplitud gradualmente, tal como se aprecia en la Figura 5:

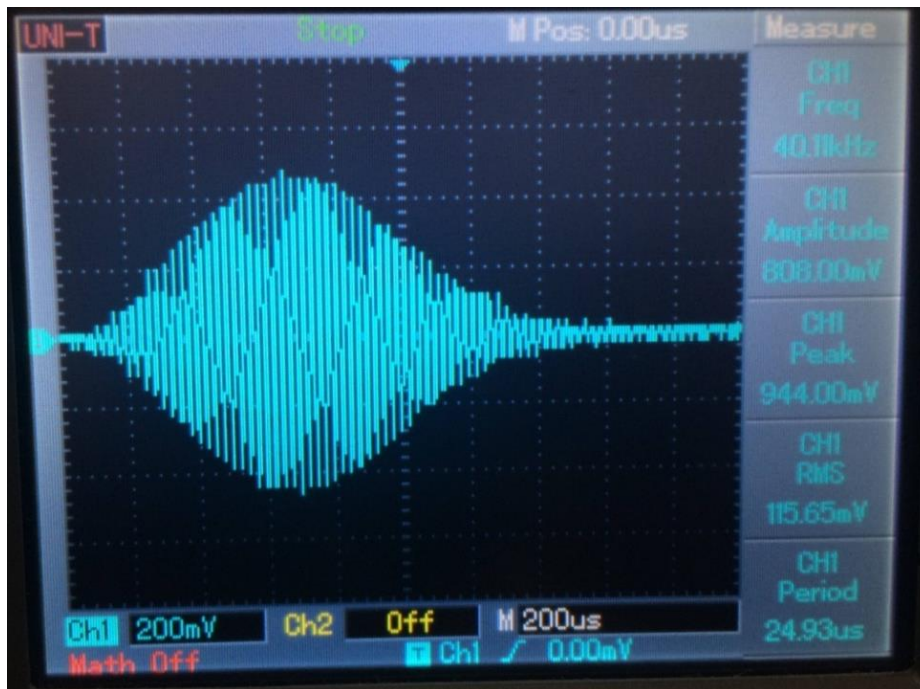


Figura 5. Señal salida receptor ultrasónico

4.2.3 Acondicionamiento señal del receptor

El esquema de la etapa de acondicionamiento de la señal del receptor se presenta a continuación:

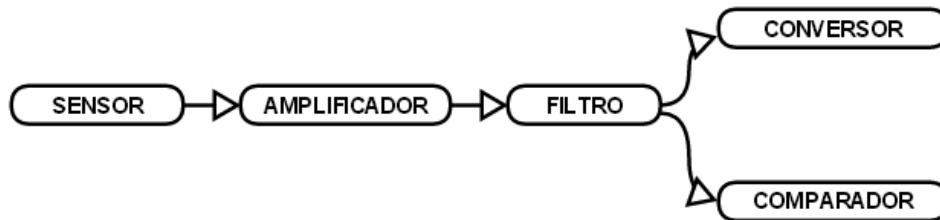


Figura 6. Acondicionamiento receptor

Amplificador

En las primeras pruebas realizadas, se usaron transistores BJT y componentes pasivos para la construcción de la etapa del amplificador. Los resultados no fueron los esperados ya que la salida presentaba alta distorsión y era muy sensible al ruido externo.

Debido a este problema se optó por revisar alternativas a este circuito de amplificación que fueran más robustas y confiables. De las alternativas encontradas, se seleccionó un amplificador operacional.

El proceso de amplificación se realizó en dos etapas (ver Figura 7), dado que las señales provenientes de los receptores ultrasónicos tienen una amplitud al inicio de la onda de aproximadamente de 7 a 10mV y una máxima de 60 a 75mV en su parte estable. En ambas etapas se utiliza un amplificador operacional configurado como inversor.

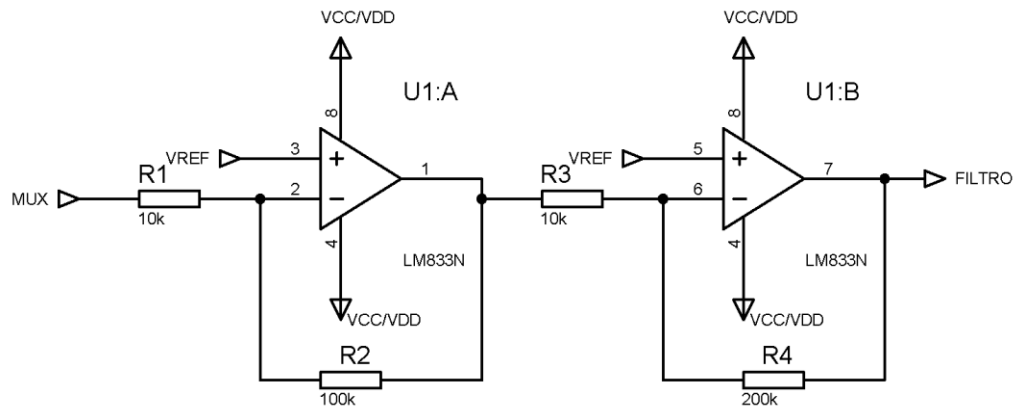


Figura 7 Circuito amplificador

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El circuito está constituido por el amplificador operacional LM833 que tiene bajo nivel de ruido, baja distorsión, alta velocidad e internamente compensado para ganancias de lazo cerrado (SGS-Thomson Microelectronics, 1997).

Como se debe establecer el comienzo de la onda, se eligen ganancias que permitan acondicionar los primeros ciclos de la señal, y así lograr saturar el AO para el resto de la señal. La primera etapa se eligió con una ganancia de 10, debido a que esta etapa es más susceptible al ruido. La ganancia de la segunda etapa para este caso es de 20. Se seleccionaron valores de resistencias comerciales, para el diseño del circuito. A continuación se presentan los cálculos de las ganancias para cada etapa.

$$G_1 = \frac{R_2}{R_1} \quad G_2 = \frac{R_4}{R_3}$$

Dónde G = ganancia del amplificador y R = valor de la resistencia

Con: $G_1 = 10$; $G_2 = 20$; $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$. $R_2 = 10R_1 \therefore R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 10R_3 \therefore R_4 = 200 \text{ k}\Omega$

En la Figura 8 se puede observar que los nuevos niveles de voltaje de la señal del receptor una vez amplificada es de aproximadamente 5V pico.



Figura 8. Salida etapa de amplificación

En la siguiente Figura 9 se puede apreciar con más detalle que se ha obtenido una señal amplificada constante.

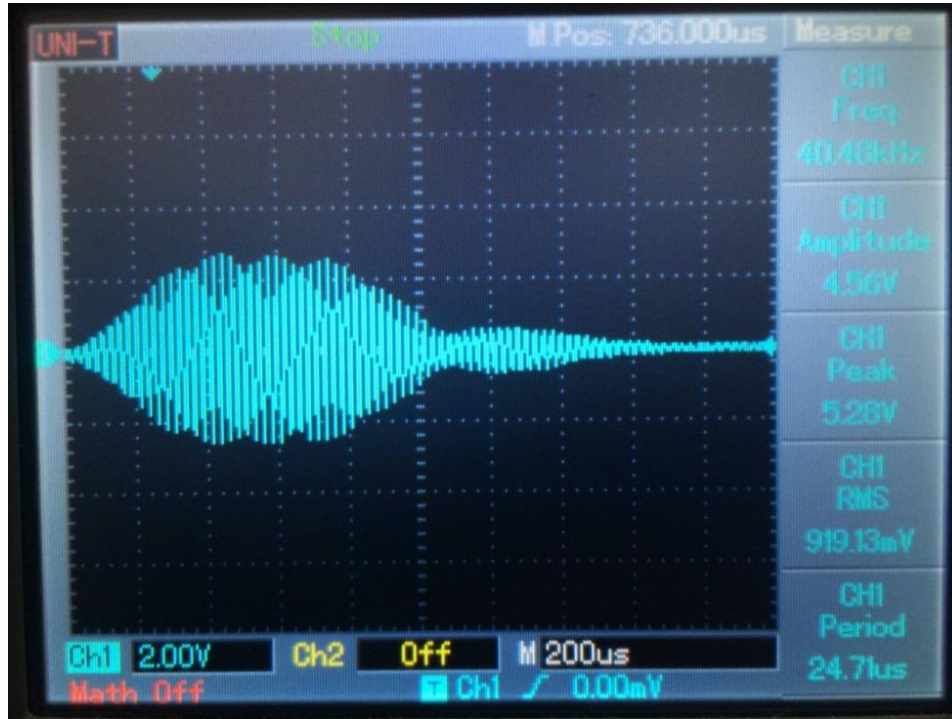


Figura 9. Primer plano de la señal amplificada

Filtrado

La señal amplificada presenta distorsiones ocasionadas por señales de resonancia de los sensores ultrasónicos o frecuencias parásitas de 60Hz producidas por los cables de energía.

Para evitar la pérdida de exactitud de la medición se optó por implementar un pasa banda filtro (ver Figura 10), con un amplificador operacional LM833 de una frecuencia central de 40kHz con factor de calidad de 10. A continuación se presentan el procedimiento del cálculo de los parámetros del filtro. Dados los parámetros:

$$Q = 10; C = 4.7 \text{ nF}; f_0 = 40\text{kHz}; A = 1$$

Dónde:

Q = factor de calidad

C = valor del condensador

f_0 = frecuencia central

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A = ganancia del circuito

BW = ancho de banda

ω_0 = frecuencia angular

R = valor del condensador

$$BW = \frac{f_0}{Q} \therefore BW = 4000 \text{ Hz}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \therefore \omega_0 = 251.32 \text{ krad/s}$$

$$R_1 = \frac{Q}{\omega_0 AC} \therefore R_1 = 8.46 \text{ K}\Omega$$

$$R_2 = \frac{Q}{\omega_0 C(2Q^2 - A)} \therefore R_2 = 42.54 \Omega$$

$$R_3 = \frac{2Q}{\omega_0 C} \therefore R_3 = 16.93 \text{ K}\Omega$$

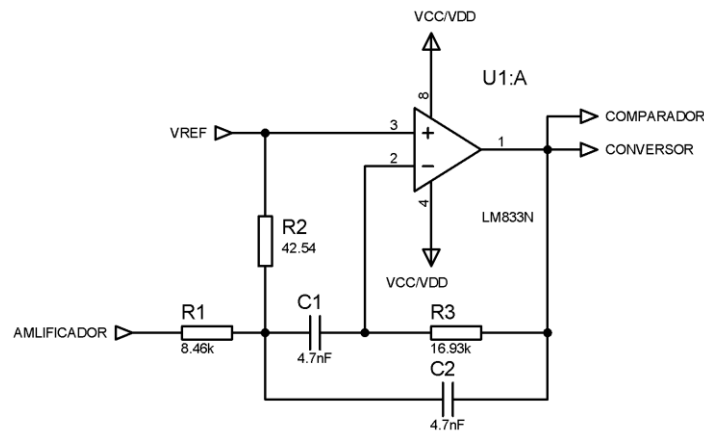


Figura 10. Etapa de filtrado

En la Figura 11 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia la salida del detector de envolvente la cual se conecta al Arduino Uno, donde se activará una interrupción y servirá como una medición del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica.

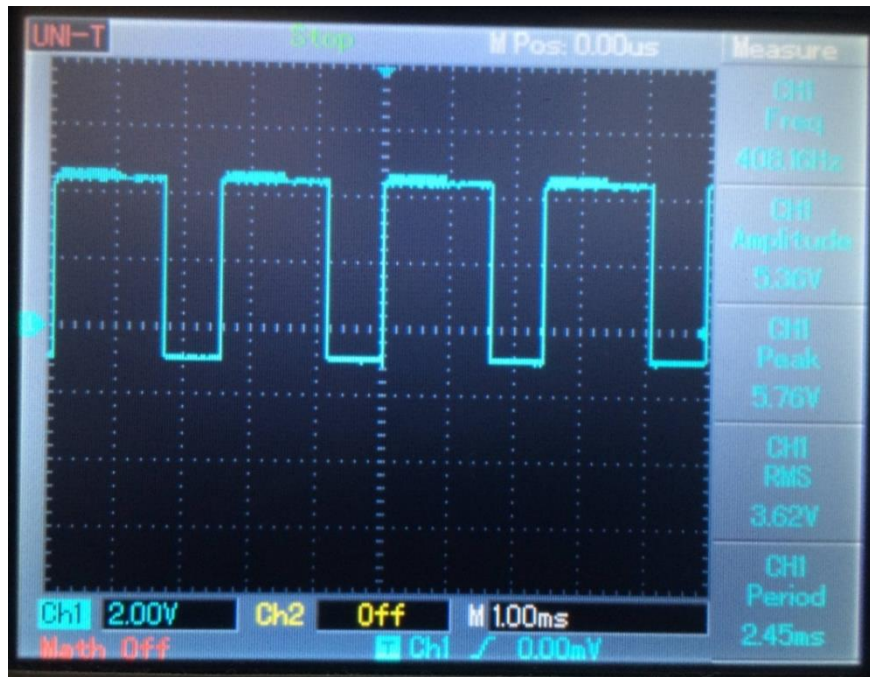


Figura 11. Salida detector de envolvente

Comparador

La señal filtrada, ingresa al comparador de voltaje junto con la referencia (2.5 V para permitir que en la etapa de control convierta tanto los semiciclos positivos como los negativos de la señal). Se utilizó el amplificador operacional LF353 (Fairchild Semiconductor Corporation, 2001b), que es de alta impedancia de entrada y alta inmunidad al ruido (ver Figura 12).

Cuando la señal es mayor que el voltaje de referencia, entrega a la salida 5V. Cuando la señal es menor que el voltaje de referencia, la salida del comparador es 0V. De esta manera el comparador nos indica el inicio de la onda, ya que su estado cambia de 0V a 5V.

La salida del comparador está conectada a un pin de la etapa de control. Así, cuando se detecta un cambio de estado (bajo a alto), la etapa de control realiza una subrutina que se explicará más adelante.

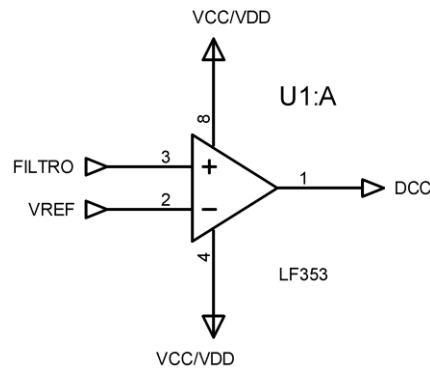


Figura 12. Circuito Comparador

En la Figura 13 se puede observar la salida del detector de cruce por cero, se desencadena un pulso cada vez que la señal amplificada cruza por cero.

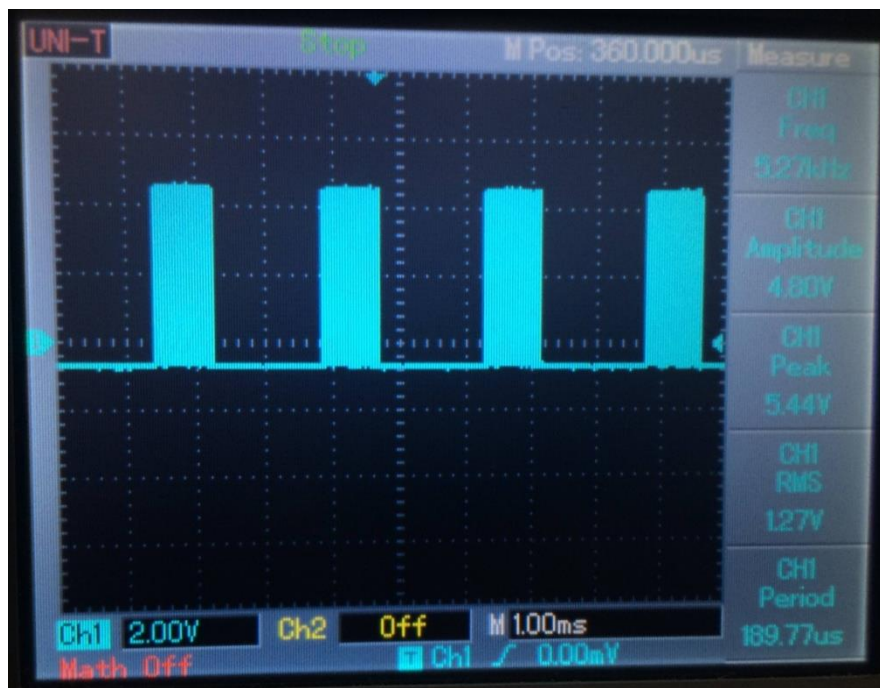


Figura 13. Detector de cruce por cero

En la Figura 14 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se aprecia el detector de cruce por cero más cerca, Como era de esperarse el detector también produce señales muy pequeñas que se pueden considerar como ruido en la entrada del sistema.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 14. Primer plano detector de cruce por cero

4.2.4 Diseño mecánico

Todo el sistema está montado sobre una estructura de PVC, la cual facilita la colocación de los sensores para obtener una correcta medición. Su construcción en su totalidad es de PVC y su diseño asegura una distribución uniforme de los sensores, manteniendo una distancia constante entre ellos de 20cm.

Se opta este material ya que resiste la oxidación, su grado de deformación ante el aire es mínimo soporta condiciones climáticas desfavorables como son la lluvia, humedad y la radiación solar.

A continuación se presenta la estructura con los cuatro sensores montados:



Figura 15. Estructura de PCV

4.3 Programa de control

Esta etapa es la encargada de controlar la transmisión y recepción de las señales ultrasónicas, medir el tiempo de vuelo y secuencia de medición, realizar los cálculos para obtener los valores de velocidad, dirección, temperatura del viento y presentarlos de forma digital, además de interconectar los diferentes sistemas. Para ello se utilizan una serie de rutinas y subrutinas que se detallan más adelante. A continuación se presenta un diagrama general de la estructura del programa de control.

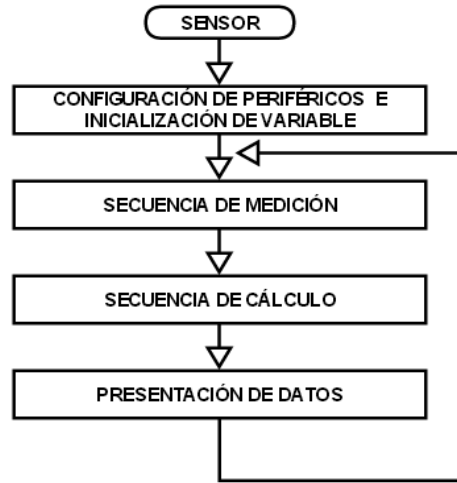


Figura 16. Estructura general programa de control

El programa de control se desarrolló con en el lenguaje Processing/Wiring (Arduino, 2015) bajo la plataforma *Arduino*. El control se implementó con la placa *Arduino Uno*, que tiene las siguientes características:

Microcontrolador	ATmega328
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines digitales I / O	14 (de las cuales 6 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC por Pin I / O	40 mA
Corriente DC de 3.3V Pin	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328)
Velocidad del reloj	16 MHz

Tabla 3. Configuración *Arduino Uno* (Atmel, 2013).

4.3.1 Secuencia de configuración

La rutina inicial del programa es la correspondiente a la configuración de los periféricos empleados, además de la inicialización de variables de configuración ver Figura 17. Los diferentes pines del *Arduino* son configurados como entradas o salidas, ya sean análogos o digitales, según su función. Los pines correspondientes a las interrupciones externas son configurados como salidas digitales, los demás pines utilizados se configuran como

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

salidas digitales para el control multiplexor/demultiplexor análogo y comparador de salida.

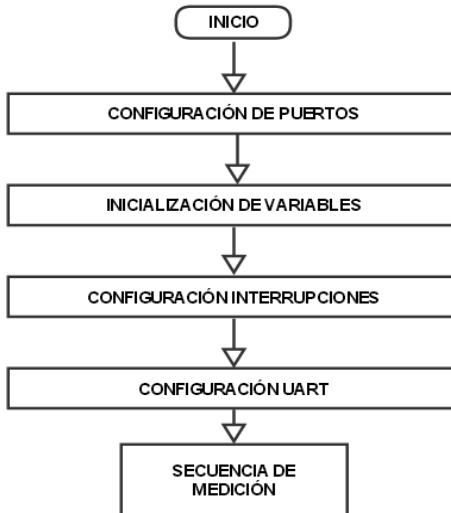


Figura 17. Secuencia de configuración

Configuración de puertos

En el *Arduino Uno* los pines correspondientes a los puertos B y D son configurados como digitales y el puerto C es configurado como entrada analógica.

- B (pines digitales del 8 al 13).
- D (pines digitales del 0 al 7).
- C (entradas analógicas).

Cada uno de los puertos está gobernado por tres registros (DDR, PORT, PIN) los cuales están incluidos en el lenguaje de *Arduino* como variables.

- El registro **DDR**, define si el pin es una entrada o una salida.
- El registro **PORT** controla si el pin está en nivel alto o en bajo.
- El registro **PIN** permite leer el estado de un pin que se ha configurado con entrada usando la función *pinMode ()*.

Inicialización de variables

La fase de inicialización de variables incorpora los valores iniciales a las distintas variables utilizadas en el programa por ejemplo contadores, auxiliares, datos entre

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

otros. Para la declaración de variables se inicia por definir su tipo como int, float, long, char, volatile, etc, asignándoles un nombre descriptivo para hacer el código más fácil de entender y un valor inicial.

Configuración de interrupciones

Se configuraron las interrupciones INT0 e INT1, que son asignadas en los pines 2 y 3 del *Arduino Uno* como flancos de bajada, de igual manera se configura el *Timer1* como contador de alta velocidad 16 Bit, el *Timer0* es utilizado como generador de pulsos de 40KHz y el *Timer2* es el temporizador del sistema.

Configuración UART

El transmisor y receptor universal asincrono (UART) es el protocolo que controla los puertos seriales de los diferentes dispositivos. Permite la comunicación para la placa *Arduino* y otros dispositivos que sean compatibles con el protocolo UART, el puerto se configuró para una velocidad de 9600 baudios ya que es un valor estandar y tipico para comunicarse con el computador, tambien es el que tiene por defecto *Arduino* al inicial. Para su configuración se utiliza la sentencia `Serial.begin(9600)`; el hardware es implementado a través de los pines TX (pin 1) y RX (pin 0) en la placa *Arduino Uno*.

4.3.2 Secuencia de medición

La secuencia de medición es encargada de la selección de los transductores y la de generar la señal de 40 kHz. La estructura general se muestra en la Figura 18. Cada una de sus etapas se explicará en detalle a continuación.

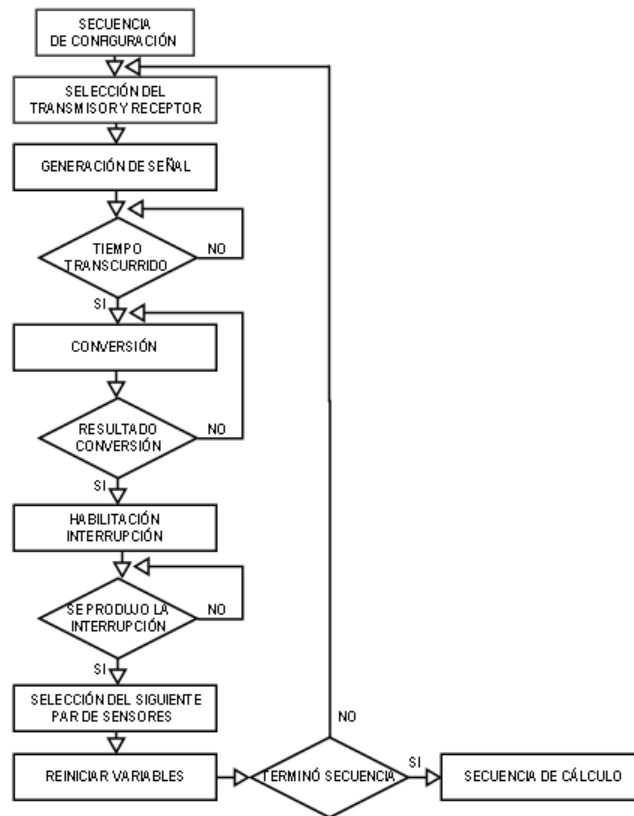


Figura 18 Secuencia de medición

Selección del transmisor y receptor

En la estructura general de medición se realiza la selección del emisor y receptor a través de PD4 (Digital 4) y PB0 (digital 8) que se conectan a los pines de control del multiplexor/demultiplexor (ver Tabla. 2).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

PD4	PB0	Transmisor	Receptor
0	0	Transductor NORTE	Transductor SUR
0	1	Transductor SUR	Transductor NORTE
1	0	Transductor OESTE	Transductor ESTE
1	1	Transductor ESTE	Transductor OESTE

Tabla 4. Secuencia de transductores

Generador de señal

Para la generación de la señal de 40kHz, se utiliza el módulo comparador del Arduino, que permite generar señales cuadradas. Se genera una interrupción cada vez que el Timer2 se desborda, es decir, cada vez que cumple un ciclo de la señal. Por lo que en la rutina de interrupción se cuenta el número de ciclos, que para este caso, son cuatro pulsos para la medición. Al cumplirse el cuarto ciclo se apaga el Timer2 y se deshabilita la interrupción.

Contador y detección de interrupción

Cuando se genera la señal de ultrasonido, se habilita el Timer2 para iniciar el conteo del número de ciclos de máquina que dura hasta que se origine una interrupción. Asimismo el Timer2 genera un retardo de 0.48 ms después de haber enviado la señal ultrasónica para volver a iniciar el contador y limpiar las banderas de INTO e INT1 para así habilitar las interrupciones.

Re-inicialización de variables

Se realiza una comparación para determinar si los datos de medición son válidos esto con el fin de que no se afecten los datos de los cálculos, al finalizar la recepción de la onda ultrasónica de los cuatro sensores se reinician las variables, ya que termina el ciclo de medición para así realizar los cálculos necesarios.

4.3.3 Secuencia de cálculo

De la secuencia de medición se adquieren los valores del tiempo de emisión-recepción en cada par de transductores. De 300 muestras que se toman, se calcula el promedio, y con estos promedios se calculan las variables como se explicó en el numeral 2.2.3. En la Figura 19 se muestra la secuencia de cálculo.

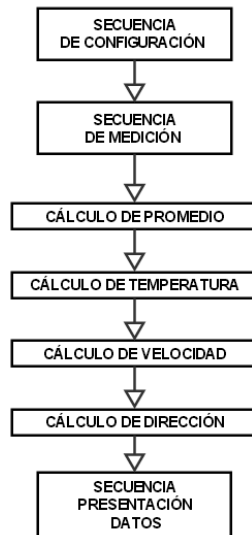


Figura 19. Secuencia de cálculo

Cálculo de promedio

Dado que los datos son válidos en la etapa de medición, tal como se dijo en el numeral 4.3.2, se realiza el cálculo del nuevo promedio que será usado para el cálculo velocidad y dirección. El cálculo del promedio se realiza tomando 300 muestras (Arduino, 2011).

Cálculo de temperatura

Para el cálculo de la temperatura se utilizó el sensor de temperatura LM35, el cual tiene una salida análoga proporcional a la temperatura que registra, es decir, por cada grado Celsius aumenta 10 mV. El pin de salida del sensor va conectado al pin 5 análogo del *Arduino Uno*. Se calcula una conversión de voltaje a temperatura por software, este dato es guardado en una variable.

Cálculo de velocidad

Para el cálculo de la velocidad se escogió el algoritmo de la inversa de los tiempos de vuelo descrito anteriormente (ver numeral 2.2.3). Inicialmente, se toman los valores correspondientes a las medidas asociadas a los sensores Norte-Sur, obteniendo la velocidad en dicho eje. De la misma manera, se obtiene la velocidad correspondiente a los sensores Este-Oeste. Partiendo de ambos resultados, y considerándolos como vectores en los ejes Norte-Sur y Este-Oeste, se obtiene la magnitud de la velocidad.

Cálculo de dirección

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para el cálculo de la dirección se aplica la fórmula que se explicó en detalle en 2.2.3. Los datos usados son los valores de velocidad de los dos ejes obtenidos del proceso anterior, aplicando la expresión se consigue el resultado del ángulo, siendo 0° el transductor Norte y 270° el transductor Oeste.

4.3.4 Presentación de datos

La presentación de datos se realiza por medio del módulo UART del ATmega328 (microcontrolador del *Arduino Uno*) y el pc. Se adquirió un conversor de UART a USB con el fin de facilitar la visualización de los datos en cualquier pc, ya que de no hacerlo se debía implementar un acoplamiento entre ATmega328 y el computador por medio del protocolo RS232, el cual crea un inconveniente, ya que en la actualidad, no todos los computadores traen el puerto serial.

4.4 Implementación de circuitos

Luego de realizar las simulaciones, se implementaron los circuitos PCB con el software EAGLE de la fuente de alimentación, la etapa de acondicionamiento y la etapa de amplificación.

Para el diseño de las PCB se utilizaron tutoriales para la creación de circuitos impresos en EAGLE (CadSoft Computer, 2011).

Fuente de alimentación

El circuito impreso de la fuente de alimentación se realizó con el método de la plancha. La fuente está compuesta por un transformador de 9-0-9V a 1A, un regulador de voltaje de 5V a 1A LM7805 (Fairchild Semiconductor Corporation, 2001a) y un regulador de -5V a 1A LM7905 (Fairchild Semiconductor Corporation, 2001c).

A continuación se presenta el circuito PCB en la Figura 20:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

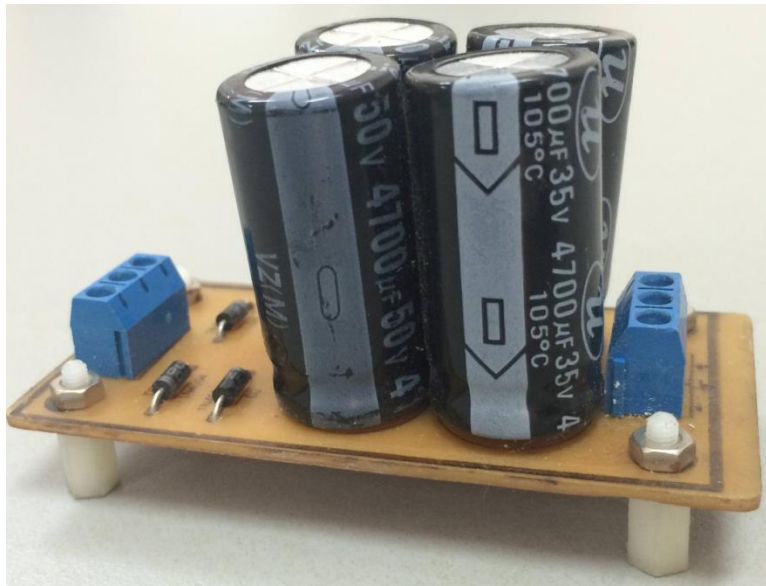


Figura 20. Fuente de alimentación

Los reguladores de voltaje se encargan de alimentar los circuitos de acondicionamiento y control de los sensores ultrasónicos, además se utiliza un banco de condensadores en la entrada y salida de los reguladores para filtrar el voltaje y de este modo garantizar un voltaje constante a la salida.

Circuito de acondicionamiento de los sensores

El acondicionamiento de la etapa de transmisión se realizó por medio de la maquina CNC protoMat s100 de LPKF ubicada en el laboratorio de electrónica del Parque i, en la Figura 21 se aprecia toda la etapa de acondicionamiento y control de los sensores ultrasónicos.

La etapa de acondicionamiento está conformada por un ATmega328, tres multiplexor/demultiplexor CD4052, 8 conectores ZIP dobles, resistencia y condensadores dos buffer 74HC368 esté integrado es el encargado de manejar los transductores ya que si no se utiliza los transductores no serán capaz de funcionar como receptor.

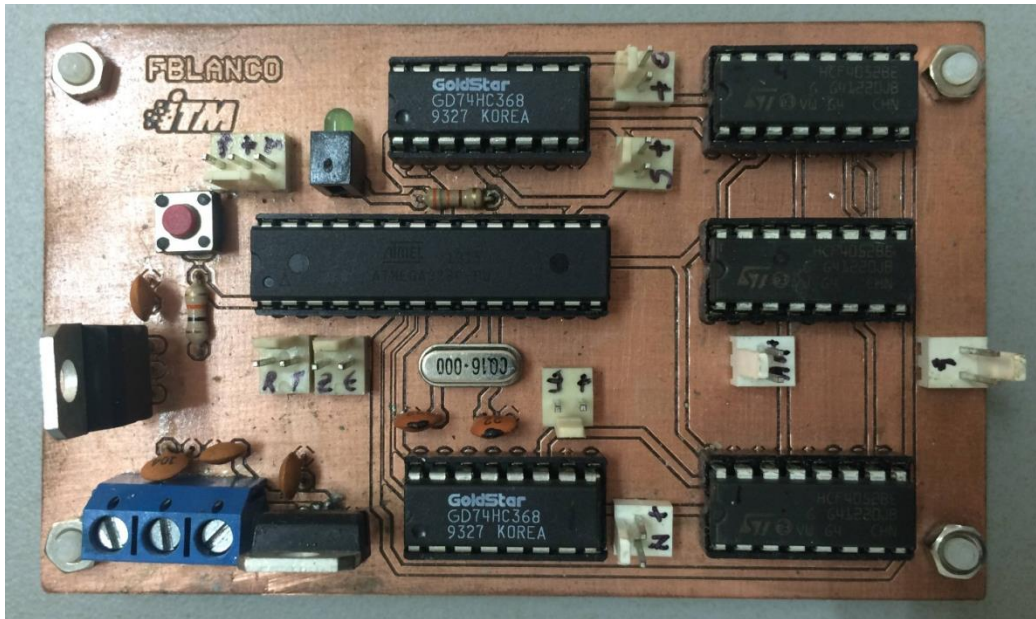


Figura 21. Circuito de acondicionamiento

Circuito de amplificación de los sensores

Esta etapa puede ser considerada el corazón del sistema ya que aquí es donde se amplifica y se procesa la señal obtenida de los sensores el circuito se puede apreciar en la Figura 22.

Las tareas de esta etapa son:

- Amplificar la señal recibida.
- Detector de envolvente.
- Detector de cruce por cero.

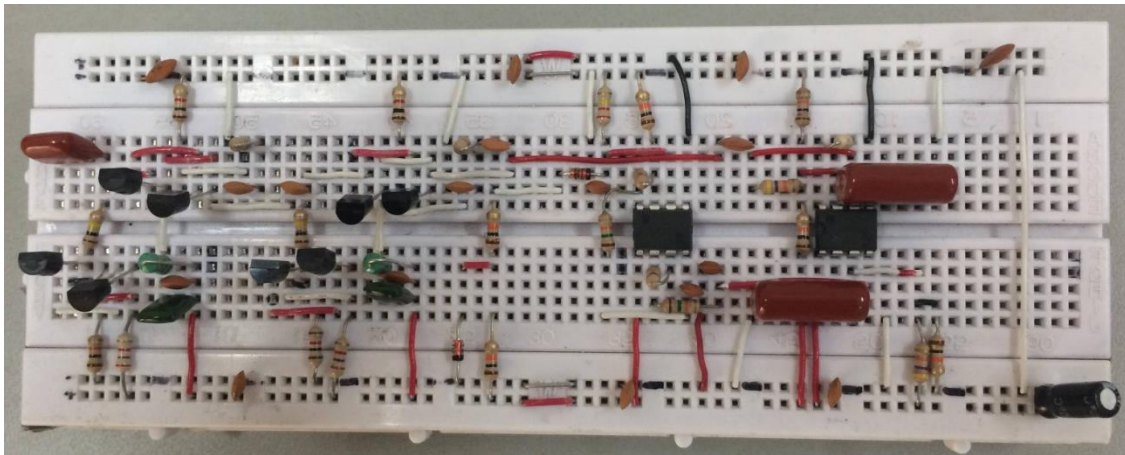


Figura 22. Circuito de amplificación

4.5 Listado de elementos y costos

A continuación se presenta un listado de los elementos utilizados y su costo en el desarrollo del presente proyecto.

Elementos	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Arduino Uno	1	50000	50000
Estructura PCV	1	20000	20000
Circuito impreso	2	4500	9000
Transductores ultrasónicos	4	17500	70000
Amplificador LM833	4	1250	5000
Amplificador LF353	1	900	900
Multiplexor análogo CD4052	2	2350	4700
Regulador de voltaje LM7805	1	700	700
Regulador de voltaje LM7905	1	800	800
Capacitores	14	50	700
Resistencias	20	20	400
Transistor 2N2222	6	300	1800
Conector ZIP	8	350	2800
Bases de integrado	5	200	1000
Cable blindado	4	1200	4800
Total			172600

Tabla 5. Costos totales

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

- Se implementó un anemómetro sin partes móviles, que se basa en la influencia que ejerce la temperatura y el viento en la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas.
- Las características de la señal ultrasónica como amplitud variante y bajo rango de voltaje, hacen que la señal sea susceptible a ruido provocado por factores externos, por tanto fue necesario implementar un sistema para suavizar estos efectos con elementos de bajo ruido y rápida conmutación.
- La distancia entre los transductores debe ser la misma en los dos ejes, de igual manera la estructura debe ser estable para no introducir errores en la medida, debido a que una mínima variación de la distancia cambia notablemente el tiempo de vuelo de la señal.
- El integrado multiplexor/demultiplexor CD4052 hace factible el uso de un solo bloque de acondicionamiento para los cuatro sensores ultrasónicos, ya que permite la conmutación de los cuatro sensores. Adicionalmente permite intercambiar entre las funciones de recepción y transmisión.
- El uso de amplificadores operacionales proporcionan una gran ventaja con respecto a los transistores a la hora de diseñar la etapa de amplificación, ya que permite reducir el número de componentes, tiene una mayor velocidad de operación y es menos susceptible al ruido.
- De acuerdo a la experimentación y a los resultados obtenidos con los diferentes circuitos de la etapa de amplificación, se puede decir que la etapa compuesta con amplificadores operaciones, es la más adecuada para el acondicionamiento de las señales adquiridas ya que entregó los resultados más cercanos a los valores teóricos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Con la primera fase de las pruebas experimentales se comprobó el correcto funcionamiento de la etapa de hardware, primero en la etapa de acondicionamiento y luego en la etapa de amplificación.
- A través del desarrollo del proyecto se observaron varias dificultades, una de ellas fue con el programa de control, donde no mostraba de forma correcta, en el puerto serial del Arduino Uno, los datos de velocidad, temperatura y dirección del viento. Por esta razón no se llegó a la etapa de calibración ni a la comparación con un patrón referencial.
- El costo global del prototipo desarrollado, tiene un valor visiblemente menor que el costo de un anemómetro comercial. Cabe aclarar que el prototipo continúa en etapa de pruebas y mejoramiento.

5.2. Recomendaciones

- La estructura mecánica debe ser realizada en un material más resistente pero liviano para facilitar su transporte. Así mismo se recomienda diseñar de mejor manera los soportes de los sensores para minimizar las turbulencias producidas por el viento.
- Se recomienda la utilización de sensores de mejor calidad para así colocar el sistema al aire libre con mayor seguridad.
- Se recomienda diseñar un sistema de almacenamiento de datos que incluyan memorias extraíbles con la finalidad de que el equipo sea autónomo.
- Sería recomendable la realización de un sistema de transmisión de datos inalámbrico entre ellos están WIFI, XBEE, BLUETHOOTH para facilitar su utilización en áreas remotas.

5.3. Trabajos futuros

- El proyecto se culminará para presentarlo en la muestra tecnológica de ITM. Para esto es necesario realizar pruebas en la etapa de control y acondicionamiento. También es necesario calibrar el prototipo con el fin de verificar su funcionamiento y finalmente comparar sus medidas con una estación meteorológica comercial.
- Se planteará una segunda etapa del proyecto como trabajo de grado en ingeniería. Para esta se utilizarán sensores más precisos y con mejor rendimiento. También se incluirá almacenamiento de datos y comunicación inalámbrica con un computador.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

Arduino. (2011). Forum: Ultrasonic Anemometer. Retrieved from <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=53569.0>

Arduino. (2015). Arduino - Home. Retrieved from <http://www.arduino.cc/>

Atmel. (2013). Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash. Atmel. Retrieved from http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf

Becker, J. (2003). Wind Speed Meter. Becker, John. Retrieved from http://www.ozitronics.com/docs/K168_article.pdf

CadSoft Computer. (2011). Easily Applicable Graphical Layout Editor. Retrieved from http://www.cadsoftusa.com/fileadmin/journalist/Documents/V6_tutorial_en.pdf

Capote Cabrera, A., Pérez López, Y. M., & Acosta Bravo, T. (2009). *Agentes Físicos*. Cuba: Editorial Ciencias Médicas. Retrieved from <http://gsdl.bvs.sld.cu/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0rehabili-00-0---0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-1l-50---20-help---00-0-1-00-0-0-11-1-00-00&a=d&c=rehabili&cl=CL1&d=HASH01423182db49b48c965bf137.10.1.1>

Darrera S.A. (2012). 3R UAV01 Ultrasonic Anemometer for Davis VP2 User Manual. Darrera S.A. Retrieved from <http://www.darrera.com/archivos/productos/adjuntos/3r-uav01-anemometro-ultrasonico-davis-vp2-manual-rev-a.pdf>

Fairchild Semiconductor Corporation. (2001a). 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator. Fairchild Semiconductor Corporation. Retrieved from <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/LM7805.pdf>

Fairchild Semiconductor Corporation. (2001b). Dual Operational Amplifier (JFET) LF353. Fairchild Semiconductor Corporation. Retrieved from <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/LF353.pdf>

Fairchild Semiconductor Corporation. (2001c). Negative Voltage Regulator.

National Semiconductor Corporation. (2000). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors General. Retrieved from <http://www.didacticaselectronicas.com/images/documentos/lm35.pdf>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

NXP Semiconductors. (2012). Dual 4-channel analog multiplexer/demultiplexer 74HC4052; 74HCT4052. NXP Semiconductors. Retrieved from http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/NXP_Semiconductors/74HC_HCT4052.pdf

Organización Meteorológica Mundial. (1996). *Guía de Instrumentos y Métodos*. (Secretaría General, Ed.) (6th ed., Vol. 3). Ginebra.

Pro-Wave Electronics Corporation. (2015). Air Ultrasonic Ceramic Transducers. Pro-Wave Electronics Corporation. Retrieved from <http://www.robot-electronics.co.uk/datasheets/t400pt16.pdf>

SGS-Thomson Microelectronics. (1997). Low Noise Dual Operational Amplifiers LM833. SGS-THOMSON MICROELECTRONICS. Retrieved from <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXuwqrt.pdf>

Vega Fidalgo, L. M., & Zorita Téllez, D. (2004). Infrasonidos y Ultrasonidos. Retrieved from http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/index.htm

Villegas Jiménez, E. J. (2008). *Diseño de un anemómetro basado en el efecto piezoresistivo*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

FIRMA ESTUDIANTES Fabian Blanco Garcia

FIRMA ASESOR BONTE J RESNOSO C

Alvaro Aguilar D.

FECHA ENTREGA: 15 de Mayo de 2015

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____