

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL, VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO EN BASE A SENSORES ULTRASÓNICOS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ALEXANDRA JOSEFINA FLORES PAREDES

alexas00@hotmail.com

DIEGO FERNANDO MENESES COSTALES

menescos1@hotmail.com

DIRECTOR: NELSON SOTOMAYOR, MSc.

nelsons@mailfie.epn.edu.ec

Quito, Julio 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Alexandra Josefina Flores Paredes y Diego Fernando Meneses Costales, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diego F. Meneses C.

Alexandra J. Flores P.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alexandra Josefina Flores Paredes y Diego Fernando Meneses Costales, bajo mi supervisión.

Nelson Sotomayor, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A Dios por sembrar en mí las semillas de la curiosidad, la perseverancia, de la tenacidad y de la humildad.

Por ser luz en tiempos de oscuridad, y oscuridad en épocas de estancamiento.

A mi familia por su apoyo incondicional, por su diario sacrificio, por su comprensión y bondad.

A la Escuela Politécnica Nacional y en especial a MSc. Nelson Sotomayor, por todos los conocimientos que se me han compartido, y sobre todo por formar mi carácter.

Al INAMHI en nombre de los ingenieros Ramón Chango, Marcelo Ayabaca y Edison Cruz. Gracias por permitirme y permitirse demostrar que aquí en el Ecuador existe capacidad humana.

Diego Meneses

AGRADECIMIENTO

A Dios por mantener viva en mí la llama de la esperanza, y ayudarme a nunca perderme en el camino que lleva al cumplimiento de mis sueños.

A mi madre por ser el pilar de mi vida, por su apoyo, confianza y sacrificio en cada momento.

Al INAMHI por los recursos y apoyo brindados a lo largo de todo el proyecto, y en especial al Ing. Ramón Chango, Ing. Marcelo Ayabaca y al Ing. Edison Cruz por su guía y ayuda.

Al MSc. Nelson Sotomayor por su valiosa dirección en este proyecto y a la Escuela Politécnica Nacional por sus apreciables enseñanzas.

A mi familia y amigos que de una u otra forma han colaborado en la realización de los objetivos que en estos cinco años me he propuesto.

Alexandra Flores

DEDICATORIA

A la luz que vive en mis células, transita por mis venas, camina junto a mi por los senderos de mis sueños, escucha conmigo los sonidos de los lirios, las rocas y las almas; y enciende en mi tormentas de ideas, ilusiones y deseos.

Diego Meneses

DEDICATORIA

A mi amiga incondicional, quien me ha brindado su hombro y me ha dado su mano en los momentos de angustia, ha sido paz después de tiempos de inquietud y ha sabido imprimir en mi ser los valores que rigen mi caminar.

Para ti madre.

Alexandra Flores

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS BÁSICOS

1.1 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA TEMPERATURA EN LA TRANSMISION DE ONDAS ULTRASÓNICAS.....	1
1.1.1 ONDAS ACÚSTICAS.....	1
1.1.2 ULTRASONIDOS.....	3
1.1.2.1 Generación de ultrasonidos.....	3
1.1.2.2 Propagación de los ultrasonidos.....	4
1.1.2.3 Ventajas del ultrasonido.....	4
1.1.3 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ACÚSTICAS EN EL AIRE.....	4
1.1.4 VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE.....	5
1.1.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA VELOCIDAD DEL ULTRASONIDO.....	10
1.1.6 INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA VELOCIDAD DEL ULTRASONIDO.....	11
1.2 ANEMÓMETRO ULTRASÓNICO.....	12
1.2.1 FUNDAMENTOS ANEMOMETRÍA.....	12
1.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	15
1.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANEMÓMETROS ULTRASÓNICOS COMERCIALES.....	20
1.3 TERMÓMETROS ULTRASÓNICOS.....	25
1.3.1 INTRODUCCIÓN.....	25
1.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	27
1.3.3 UTILIZACIÓN.....	30
1.3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMÓMETROS ULTRASÓNICOS COMERCIALES.....	31

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL PROTOTIPO

2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA.....	34
2.2 DISEÑO MECÁNICO.....	35
2.2.1 CONSTRUCCIÓN.....	36
2.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN	37
2.4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES.....	39
2.4.1 TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS.....	39
2.4.2 SEÑAL ULTRASÓNICA.....	40
2.4.3 GENERADOR DE SEÑAL.....	41
2.4.4 CONMUTACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES.....	42
2.4.5 SEÑAL DEL RECEPTOR.....	44
2.4.5.1 Amplificación.....	44
2.4.5.2 Filtro.....	47
2.4.5.3 Conversión análoga digital.....	49
2.4.5.4 Detector de cruces por la referencia.....	52
2.5 MICROCONTROLADOR.....	54
2.6 CONVERSORES DIGITAL ANÁLOGO.....	56
2.7 ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	59
2.7.1 MEMORIAS.....	60
2.7.2 RELOJ.....	61
2.7.3 CONFIGURACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	63
2.8 TRANSMISIÓN DE DATOS.....	64

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

3.1 PROGRAMA DE CONTROL.....	68
3.1.1 SECUENCIA DE CONFIGURACIÓN.....	69

3.1.1.1 Configuración de Puertos.....	69
3.1.1.2 Configuración Conversor A/D.....	70
3.1.1.3 Configuración UART.....	70
3.1.1.4 Configuración I2C.....	71
3.1.1.5 Configuración del módulo comparador de salida.....	71
3.1.1.6 Configuración de Interrupciones.....	71
3.1.1.7 Inicialización de Variables.....	71
3.1.2 SECUENCIA DE MEDICIÓN.....	75
3.1.2.1 Selección del emisor y receptor.....	77
3.1.2.2 Generación de la señal de 40 KHz.....	77
3.1.2.3 Conversión A/D y detección de interrupción externa.....	78
3.1.2.4 Retardo y re-inicialización de variables.....	80
3.1.3 SECUENCIA DE CÁLCULO.....	80
3.1.3.1 Filtrado de datos.....	81
3.1.3.2 Validación de datos.....	84
3.1.3.3 Cálculo de promedios.....	84
3.1.3.3 Cálculo de la velocidad.....	85
3.1.3.4 Cálculo de la dirección.....	88
3.1.3.5 Cálculo de la temperatura.....	89
3.1.4 PRESENTACIÓN DE DATOS.....	90
3.1.4.1 Conversión Digital Análoga.....	91
3.1.4.2 UART.....	95
3.1.4.3 Almacenamiento de datos.....	97
3.1.5 SUBROUTINAS AUXILIARES.....	105
3.1.5.1 Comunicación con la interfaz HMI.....	105
<i>3.1.5.1.1 Habilidadación y deshabilitación de monitoreo.....</i>	<i>107</i>
<i>3.1.5.1.2 Configurar periodo de almacenamiento.....</i>	<i>107</i>
<i>3.1.5.1.3 Consultar periodo de almacenamiento.....</i>	<i>108</i>
<i>3.1.5.1.4 Configurar periodo de muestreo.....</i>	<i>109</i>
<i>3.1.5.1.5 Consultar periodo de muestro.....</i>	<i>109</i>
<i>3.1.5.1.6 Configuración de fecha y hora.....</i>	<i>111</i>
<i>3.1.5.1.7 Consultar hora y fecha.....</i>	<i>112</i>

3.1.5.1.8 Descarga de datos.....	114
3.1.5.2 Cambio decimal BCD.....	116
3.1.5.2 Subrutinas I2C.....	117
3.1.5.2 Interrupción TMR2.....	118
3.2 INTERFAZ HMI.....	118
3.2.1 CONFIGURACIONES.....	119
3.2.1.1 Configuración de la comunicación serial.....	120
3.2.1.2 Configuración de la hora y fecha.....	121
3.2.1.3 Configuración del periodo de almacenamiento.....	122
3.2.1.4 Configuración del tiempo de muestreo.....	123
3.2.2 MONITOREO.....	124
3.2.3 DESCARGA DE DATOS.....	126

CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE VELOCIDAD DEL VIENTO.....	129
4.1.1 ESTABILIDAD Y ERROR DE OFFSET.....	129
4.1.2 CURVAS DE RESPUESTA.....	132
4.2 PRUEBAS DE DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	143
4.3 PRUEBA TEMPERATURA AMBIENTAL.....	146
4.4 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CONTÍNUO.....	152
4.5 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.....	156
4.6 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS.....	157

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	162
5.2 RECOMENDACIONES.....	164
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
ANEXOS	

RESUMEN

Todas las actividades del hombre están vinculadas con la meteorología: transporte aéreo y terrestre, planificación urbana, medicina, energías alternativas, agricultura, turismo, pronóstico de alertas, glaciología, etc. Sin embargo de ella sólo se conocen los aspectos concernientes a la climatología y la previsión del tiempo. La meteorología incluye la medición de algunos parámetros básicos como: la presión atmosférica, la temperatura, la humedad, la dirección y velocidad del viento, la cantidad y altura de las nubes, la visibilidad y las precipitaciones.

La temperatura ambiental, la velocidad y la dirección del viento son dos de los parámetros más importantes. Los dos últimos son actualmente medidos con sensores generalmente mecánicos, que necesitan mantenimiento continuo y son muy susceptibles a daños. El objetivo del proyecto es demostrar la influencia del viento y la temperatura en la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas y aprovechar este efecto para desarrollar un anemómetro y termómetro que supere estas desventajas.

Los parámetros medidos son presentados en forma análoga y digital, a través de conversores D/A y de una interfaz serial. Además el sistema permite el almacenamiento periódico de datos.

La configuración, monitoreo y descarga de datos es realizada a través de una interfaz de computadora, mediante comunicación RS-232.

El sistema es controlado por el procesador de señales dsPIC30f3011, el cual genera la señal de 40KHz para la transmisión ultrasónica y mediante el conversor A/D integrado y un comparador externo que permite medir el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica.

El sistema cuenta con cuatro transductores orientados en los ejes Norte-Sur y Este-Oeste. El tiempo de vuelo es medido en las cuatro posibles direcciones, con estos datos se calcula la velocidad y la temperatura en cada una de los ejes, a través de los algoritmos de la inversa de los tiempos de vuelo.

Con las velocidades en cada eje se realiza una suma vectorial para determinar la dirección y velocidad total del viento. La temperatura se obtiene del promedio de las dos temperaturas medidas.

PRESENTACIÓN

El presente proyecto está dividido en cinco capítulos: fundamentos básicos, diseño del prototipo, desarrollo del programa de control, pruebas y resultados, conclusiones y recomendaciones.

En el primer capítulo se determinan la influencia que tiene el viento y la temperatura del aire en la transmisión de las ondas ultrasónicas, para ello se establece la forma en la que una onda de sonido es transportada en un medio.

Luego se analiza específicamente al ultrasonido, las formas de generarlo, su propagación y fenómenos físicos que lo afectan; y las ventajas de utilizarlo en ciertas aplicaciones frente a otras longitudes de onda sonoras.

En la parte medular de este capítulo se desarrollan minuciosamente las relaciones entre los tiempos de vuelo de la señal ultrasónica y la velocidad, dirección y temperatura del aire que sirven como base para el desarrollo del proyecto.

El capítulo termina con un estudio sobre los tipos y formas de anemómetros-termómetros ultrasónicos comerciales, que sirven como base para el posterior diseño del prototipo.

En el segundo capítulo se realiza una descripción general del hardware del sistema, para luego ir desarrollando cada uno de sus componentes como: los transductores ultrasónicos utilizados y la forma en que su señal fue acondicionada, el diseño mecánico, el microcontrolador, el banco de memorias, la fuente de alimentación, la conversión digital-análoga y la transmisión de datos.

En el tercer capítulo se detalla el programa de control para el microcontrolador y la interfaz para el computador.

Para el microcontrolador el programa fue desarrollado en el lenguaje C30 bajo la plataforma de MPLAB 8.20 de Microchip y se lo puede dividir en cuatro acciones principales: configuración de periféricos y variables, secuencia de medición, secuencia de cálculo y presentación de datos; cada uno detallado en este capítulo.

Para la interfaz el programa se desarrolló en LABView 6.1 y desde él es posible configurar y monitorear el sensor, además de permitir al usuario extraer los datos

almacenados en el banco de memorias. Se detalla su funcionamiento y la utilización de dicho software.

En el cuarto capítulo se pueden encontrar las pruebas realizadas al sensor para poder determinar su correcto funcionamiento y el margen de error cometido en las mediciones al comparar el prototipo con otros sensores considerados como patrón.

En el quinto capítulo se concluye y se recomienda, para ello se toma en cuenta las dificultades y problemas encontrados en el desarrollo del proyecto, así como los resultados de las pruebas realizadas.

Además se añade un manual de usuario para el sensor, el diseño electrónico, el diseño de la placa, los planos de la estructura y los manuales junto con las especificaciones de los elementos electrónicos utilizados.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS BÁSICOS

1.1 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA TEMPERATURA EN LA TRANSMISIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS

Dado que el funcionamiento del sistema de medición de temperatura, velocidad y dirección del viento con transductores ultrasónicos se basa en la medición de la influencia que ejerce la velocidad y la temperatura de un fluido en la transmisión de señales ultrasónicas, se exponen a continuación algunos conceptos físicos sobre la transmisión de ondas acústicas, y en base a estos conceptos se especifican los algoritmos usados en el sistema.

1.1.1 ONDAS ACÚSTICAS

Una onda acústica es una variación local de la densidad o presión de un medio continuo, que se transmite de una parte a otra del medio en forma de onda longitudinal periódica o cuasi periódica. Cuando la onda resulta audible, se llama onda sonora [1].

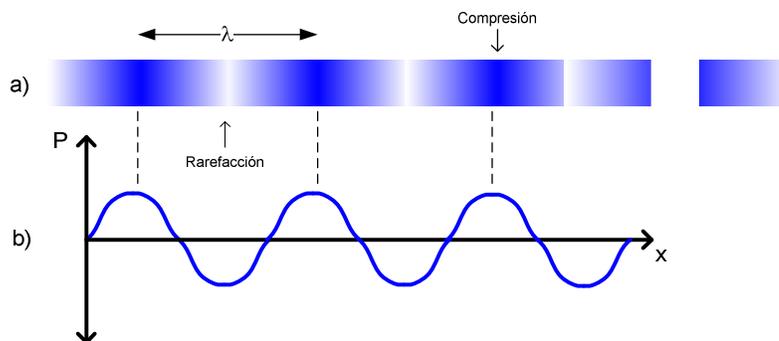


Figura 1.1 (a) Compresiones y rarefacciones de una onda sonora en el aire en un instante determinado, (b) Variación sinusoidal de la presión como función del desplazamiento, tomado de [2].

Las variaciones de presión, humedad o temperatura del medio, producen el desplazamiento de las moléculas que lo forman. Cada molécula transmite la vibración a la vecina, provocando un movimiento en cadena. Esos movimientos

coordinados de millones de moléculas producen las denominadas ondas sonoras, que originan en el oído humano una sensación descrita como sonido.

La acústica es la ciencia interdisciplinaria que estudia el sonido, infrasonido y ultrasonido, es decir ondas mecánicas que se propagan a través de la materia (tanto sólida como líquida o gaseosa). A efectos prácticos, la acústica estudia la producción, transmisión, almacenamiento, percepción o reproducción del sonido [3].

El sonido es la sensación producida en el oído por la vibración de las partículas que se desplazan (en forma de onda sonora) a través de un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) que las propaga [4].

Las ondas acústicas tienen las siguientes características:

- El sonido es una onda mecánica.
- Es una onda longitudinal.
- Es una onda esférica.

La mayoría de las ondas son el resultado de muchas perturbaciones sucesivas del medio. Cuando dichas perturbaciones se producen a intervalos regulares y son todas de la misma forma, se tiene una onda periódica. En el caso de las ondas sonoras la frecuencia está entre 20 Hz y 20 kHz. Las ondas acústicas de menos de 20 Hz se denominan infrasonidos, y las de más de 20 kHz se llaman ultrasonidos [5].

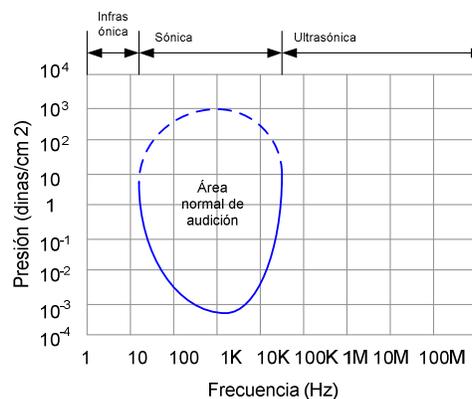


Figura 1.2 Espectro de frecuencias de ondas acústicas, tomado de [6]

1.1.2 ULTRASONIDOS

El ultrasonido es una onda acústica cuya frecuencia está por encima del límite perceptible por el oído humano, aproximadamente 20.000 Hz.

1.1.2.1 Generación de ultrasonidos

Para fines prácticos existe un gran número de métodos para generar ultrasonido, entre ellos se tiene:

- Procedimientos mecánicos.- En principio sirven los mismos procedimientos que se emplean para generar sonidos audibles, si los dispositivos capaces de oscilar se construyen con una frecuencia propia correspondientemente alta.
- Efecto magnetoestrictivo.- Los materiales ferro magnéticos muy especialmente el níquel y el acero tienen la propiedad de contraerse o expandirse por efecto de un campo magnético. Inversamente en una barra de acero ferro magnético se produce un campo magnético si es expuesto a un esfuerzo de tracción y compresión.
- Efecto piezoeléctrico.- Ciertos cristales naturales o sintéticos tienen la propiedad de que en presencia de un esfuerzo de tracción o compresión se originan cargas eléctricas en su superficie, las cuales cambian de signo si se invierte la dirección del esfuerzo. Así, en la superficie de un cristal expuesto a un esfuerzo de tracción y compresión existe una diferencia de potencial alternativamente positivo y negativo. Este efecto es reversible, es decir cuando se aplica una carga eléctrica a la superficie del cristal, esta se contrae o se expande según la polaridad de la carga eléctrica. Esto es utilizado para generar y recibir ondas en base al mismo principio, utilizando el mismo cristal como emisor y receptor. El cristal más usado es el cuarzo laminado.
- Efecto ferroeléctrico.- Tiene su base en la propiedad de algunos materiales cerámicos (titanato de bario, sulfato de litio), previamente polarizados capaces de comportarse como cristales piezoeléctricos. [7]

1.1.2.2 Propagación de los ultrasonidos

La propagación de los ultrasonidos y en general de cualquier onda acústica depende en gran medida, del medio. Cada medio tiene una impedancia distinta, la cual hace variar la velocidad de propagación entre otras variables.

Fenómenos ondulatorios típicos, tales como la reflexión, refracción y difracción tienen lugar, en ondas ultrasónicas, de manera análoga a otros tipos de ondas. Hay que tener en cuenta que la longitud de onda del ultrasonido es muy pequeña, lo cual tiene efectos apreciables en fenómenos como la difracción. En general, este tipo de ondas pueden considerarse como planas, con propagación rectilínea debida al pequeño valor de su longitud de onda; la energía, por tanto, no puede desplazarse a través de discontinuidades [8].

1.1.2.3 Ventajas del ultrasonido

El ultrasonido para uso en diferentes tipos de aplicaciones presenta ciertas ventajas:

- Las ondas de frecuencias más altas tienen longitudes de onda más cortas, lo cual significa que la difracción o reflexión en torno a un obstáculo de dimensiones determinadas se reduce en forma correspondiente. Por lo tanto es más fácil dirigir y enfocar un haz de ultrasonido.
- Las ondas ultrasónicas pueden atravesar sin dificultad las paredes metálicas de tubos y recipientes. Lo cual es aprovechado para que en aplicaciones el sistema de medición pueda montarse externamente al fluido. Esto es muy importante con fluidos hostiles, o sea, aquellos con propiedades corrosivas, radioactivas, explosivas o flamables [8].
- El ultrasonido puede emitirse y propagarse a través del tejido biológico, lo que lo hace idóneo para aplicaciones médicas [8].

1.1.3 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ACÚSTICAS EN EL AIRE

No es lo mismo propagar sonido por el aire, donde las partículas están más sueltas y es más difícil de transmitirse, que propagar sonido por el hierro, que al

ser un sólido están las partículas muy unidas y se puede transmitir rápidamente el sonido. Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

La velocidad de propagación de la onda sonora (velocidad del sonido) depende de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera. Por lo que tanto el sonido como el ultrasonido y el infrasonido se comportan de manera similar en los diferentes medios, y se propaga con la misma velocidad [9].

Tabla 1.1 Velocidad del sonido en distintos medios, tomado de [10]

Velocidad del sonido en distintos medios (a 20° C)		
Sustancia	Densidad (kg /m3)	Velocidad (m/s)
Aire	1,20	344
Etanol	790	1.200
Benceno	870	1.300
Agua	1.000	1.498
Aluminio	2.700	5.000
Cobre	8.910	3.750
Vidrio	2.300	5.170
Hierro	7.900	5.120

1.1.4 VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

Como se mencionó, en el aire el sonido se propaga esféricamente, es decir en todas direcciones. Por razones de comodidad, para estudiar el sonido es posible hacerlo desde dos puntos de vista, a veces como una esfera creciendo, o como un radio (eventualmente todos los radios) [11].

Considerando al sonido como una deformación de un elemento de volumen que estaba inicialmente en la posición x , y su desplazamiento Ψ .

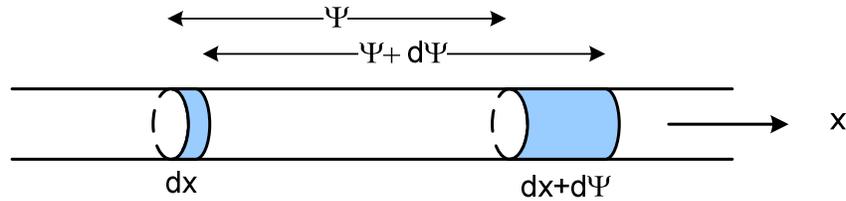


Figura 1.3 Desplazamiento de un volumen de aire, tomado de [12]

La masa de gas contenida en el elemento de volumen, es la misma antes y después de la deformación:

$$M = M_0$$

$$\rho V = \rho_0 V_0$$

$$\rho S(dx + d\Psi) = \rho_0 S dx \quad (1.1)$$

Donde:

S Superficie del frente de onda.

ρ Densidad después de una perturbación de origen acústico.

ρ_0 Densidad en el equilibrio.

M Masa en el volumen después de la perturbación.

M_0 Masa en el volumen en equilibrio.

V Volumen después de la perturbación.

V_0 Volumen en equilibrio.

De (1.1) se obtiene ρ :

$$\rho = \frac{\rho_0 dx}{(dx + d\Psi)} = \frac{\rho_0 \frac{dx}{dx}}{\left(1 + \frac{d\Psi}{dx}\right)} = \frac{\rho_0}{\left(1 + \frac{d\Psi}{dx}\right)} \quad (1.2)$$

Se debe tener en cuenta a efectos de notación (derivada parcial) que Ψ es una función de dos variables x (posición) y t (tiempo), y que el término que se suma a la unidad en el denominador es muy pequeño por lo que es posible aproximarlo usando el desarrollo del binomio de Newton $(1+x)^{-1} \approx 1-x$ cuando $x \ll 1$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{d\Psi}{dx} \right) \quad (1.3)$$

En el sonido las variaciones de presión son extremadamente pequeñas respecto a la presión de equilibrio o media P_0 . Correspondientemente las variaciones de densidad son extremadamente pequeñas [11]. Por lo que se puede escribir:

$$P = P_0 + P_e \quad \rho = \rho_0 + \rho_e \quad (1.4)$$

Donde:

P Presión después de la perturbación.

P_0 Presión de equilibrio antes de la perturbación.

P_e Variación de presión.

ρ_e Variación de densidad.

Como la presión es una función de la densidad:

$$P = P_0 + P_e = f(\rho_0 + \rho_e) = f(\rho) \quad (1.5)$$

Desarrollando por serie de Taylor $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x)|_a}{n!} (x-a)^n$ en el punto $\rho = \rho_0$,

se tiene:

$$P = f(\rho)|_{\rho=\rho_0} + (\rho - \rho_0) f'(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \frac{(\rho - \rho_0)^2}{2} f''(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \frac{(\rho - \rho_0)^3}{6} f'''(\rho)|_{\rho=\rho_0} + \dots$$

$$P = P_0 + (\rho - \rho_0) \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=\rho_0} + \frac{(\rho - \rho_0)^2}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial^2 \rho} \right) \Big|_{\rho=\rho_0} + \frac{(\rho - \rho_0)^3}{6} \left(\frac{\partial^3 P}{\partial^3 \rho} \right) \Big|_{\rho=\rho_0} + \dots \quad (1.6)$$

Dado que las variaciones de densidad son sumamente pequeñas se puede despreciar los términos de orden superior.

$$P = P_0 + (\rho - \rho_0) \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=\rho_0} \quad (1.7)$$

Esta expresión muestra que efectivamente la presión es una función de la densidad.

Se emplea una transformación adiabática debido a que no hay tiempo suficiente para que el calor fluya desde las regiones comprimidas (temperatura más alta) a las expandidas (temperatura más baja). Antes de que esto suceda, medio periodo después, la región que estaba comprimida pasa a estar expandida, y así sucesivamente [12]. La relación entre la presión y el volumen en una transformación adiabática es:

$$P_0 V_0^\gamma = P V^\gamma \quad (1.8)$$

Donde:

γ es el índice adiabático del gas.

Entonces:

$$P_0 \frac{m^\gamma}{\rho_0^\gamma} = P \frac{m^\gamma}{\rho^\gamma} \quad (1.9)$$

$$\frac{P_0}{\rho_0^\gamma} = \frac{P}{\rho^\gamma} \quad P = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} \rho^\gamma \quad (1.10)$$

Derivando (1.10) y evaluando en el punto $\rho = \rho_0$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} = \left. \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} \gamma \rho^{\gamma-1} \right|_{\rho=\rho_0} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} \gamma \frac{\rho_0^\gamma}{\rho_0} = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} \quad (1.11)$$

Se necesita ahora la ecuación del movimiento del volumen elemental que contiene una masa ($m_0 = \rho_0 S dx$)

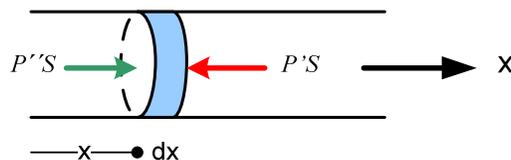


Figura 1.4 Sumatoria de fuerzas, tomado de [12]

El gas a la izquierda del elemento de volumen lo empuja hacia la derecha con una fuerza $F'' = P''S$ y el gas que está a la derecha lo empuja hacia la izquierda con una fuerza $F' = P'S$. Por tanto, la fuerza resultante en la dirección +X es:

$$F = F'' - F' = (P'' - P')S$$

En el límite:

$$dF = -S \cdot dP \quad (1.12)$$

Reemplazando (1.11) y (1.3) en (1.7):

$$P = P_0 + (\rho - \rho_0) \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right) \Big|_{\rho=\rho_0} = P_0 + \left(-\rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \left(\gamma \frac{P_0}{\rho_0} \right) = P_0 - P_0 \gamma \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (1.13)$$

Derivando (1.13):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -P_0 \gamma \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \quad dP = -P_0 \gamma \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} dx \quad (1.14)$$

Reemplazando (1.14) en (1.12):

$$dF = -SP_0 \gamma \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} dx \quad (1.15)$$

Aplicando la segunda ley de Newton, fuerza igual a masa contenida en el elemento por aceleración (derivada segunda del desplazamiento).

$$dF = dm \cdot a = (\rho_0 S dx) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (1.16)$$

Igualando las expresiones (1.15) y (1.16) de la fuerza se tiene la ecuación diferencial del movimiento ondulatorio:

$$dF = -SP_0 \gamma \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} dx = (\rho_0 S dx) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (1.17)$$

Relacionando (1.17) con la fórmula general del movimiento ondulatorio $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$. La fórmula de la velocidad de propagación es:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}} \quad (1.18)$$

Para condiciones normales del aire: γ es el índice adiabático (1.4), ρ_0 es la densidad (1.293 kg/m³), y P_0 la presión normal (1 atm=1.013·10⁵ Pa y a 0°C)

Con estos datos, la velocidad de propagación del sonido en el aire es $c=331$ m/s.

1.1.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA VELOCIDAD DEL ULTRASONIDO

De la ecuación de un gas ideal $PV = nRT$ o bien,

$$PV = \frac{m}{M} RT \quad m = \rho \cdot V \quad (1.19)$$

Donde:

- R Constante universal de los gases.
- T Temperatura absoluta del gas.
- M Masa molar.
- V Volumen de gas.
- n Número de moles.
- m Masa.

$$P = \frac{\rho RT}{M} \quad (1.20)$$

Remplazando (1.20) en (1.18):

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \rho_0 RT}{M \rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1.21)$$

Reemplazando las constantes en (1.21):

$$c = \sqrt{\frac{(1.4) (8.314) T [^\circ K]}{23 \times 10^{-3} [kg / mol]}} = 20.055 \sqrt{T}$$

Donde:

$\gamma = 1.4$ para O_2 y N_2 que representa el 98% de la atmósfera y es el valor correspondiente también para el aire.

$R = 8.314 [J / (mol \cdot Kg)]$ que es la constante universal de los gases.

$M = 29 \times 10^{-3} [Kg / mol]$ que es la masa molar del aire.

1.1.6 INFLUENCIA DEL VIENTO EN LA VELOCIDAD DEL ULTRASONIDO

En una onda acústica de frecuencia constante, se denomina frente de onda a la superficie imaginaria formada por la unión de todos los puntos del espacio donde las variables presión P o densidad ρ tienen la misma fase.

Si una onda acústica de frecuencia constante se propaga de forma que su amplitud y dirección de propagación varían muy poco a lo largo de distancias del orden de la longitud de onda, es posible ignorar la naturaleza ondulatoria del sonido y considerar que su transmisión es a lo largo de líneas, llamados rayos, cuyas tangentes en cada punto tienen la misma dirección que la propagación del frente de onda. Esto es equivalente a analizar el sonido en el límite cuando la longitud de onda tiende a cero $\lambda \rightarrow 0$ [13].

Si la onda se propaga en un medio que se mueve con una velocidad v_w , la velocidad de propagación de la onda v_p puede ser expresada:

$$\vec{v}_p = \vec{v}_w + c\vec{n} \quad (1.22)$$

Donde:

\vec{n} Vector unitario normal al frente de onda que coincide con la dirección de propagación de la onda.

c Velocidad del sonido.

Entonces la velocidad de propagación de la onda puede ser expresada como un concepto de velocidad relativa.

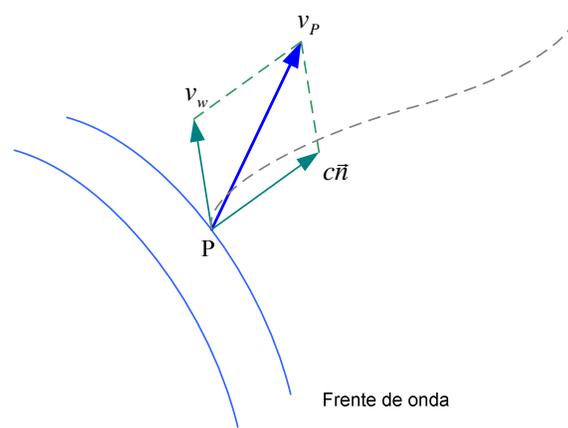


Figura 1.5 Propagación de un frente de onda en un medio que se mueve, tomado de [13]

1.2 ANEMÓMETRO ULTRASÓNICO

1.2.1 FUNDAMENTOS ANEMOMETRÍA

El viento es el desplazamiento de las masas de aire, causado por las diferencias de presión atmosférica, atribuidas a la variación de temperatura sobre las diversas partes de la superficie terrestre. Es decir, las distintas temperaturas existentes en la tierra y en la atmósfera, por la desigual distribución del calentamiento solar y las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas, producen corrientes de aire. Las masas de aire más caliente tienden a subir y en su lugar se ubican masas de aire más denso y frío [14].

La intensidad del viento está sujeta a variaciones tanto en periodo como en amplitud. Esto se debe a que el flujo del aire conocido como viento no es laminar. El viento sobre la superficie es un flujo turbulento, que comprende remolinos de tamaños diversos y parámetros físicos que se desplazan con el flujo. La orografía de la Tierra es el principal factor que determina la estructura turbulenta del viento, la misma que se manifiesta a través de la llamada rafagocidad del viento, o sea fluctuaciones de los parámetros del viento de superficie [15].

La intensidad del viento es una cantidad vectorial que tiene dirección y magnitud, esta es considerada en términos de tres componentes, ubicándose dos de ellas en un plano paralelo a la superficie de la Tierra y la tercera perpendicular a ese plano. Con fines meteorológicos la componente vertical es despreciada,

considerándose por lo tanto el viento en superficie como una cantidad vectorial en dos dimensiones [15].

La medición de la velocidad y dirección del viento son requeridas para monitoreo y predicción meteorológica, estudios climatológicos, estimaciones de la energía eólica, probabilidades de daños, como parte de las estimaciones de los flujos de superficie (evaporación, dispersión del aire contaminado, etc.), y para diversas aplicaciones en agricultura y aeronáutica [16].

En Meteorología generalmente se usan diferentes escalas para definir la intensidad de los vientos. La más usada es la Escala de Beaufort. Su nombre completo es Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos y relaciona los fenómenos naturales familiares conectados con diferentes velocidades del viento.

La velocidad del viento en la Escala de Beaufort puede expresarse por la fórmula:

$$v = 0.837 \cdot B^{3/2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1.23)$$

Donde:

v es velocidad del viento.

B es el número en la escala de Beaufort [17].

Tabla 1.2 Escala de Beaufort, tomado de [17]

Escala Beaufort	Km. hora	Mp. Hora	m/s	Nudos	Observaciones	Denominación
0	0 - 0,5	0 - 0.5	0 - 0.5	0 - 0.5	El humo se eleva en vertical.	Calma.
1	1 - 5	1 - 3	1 - 2	1 - 3	El humo se inclina y hace curvas.	Brisa muy ligera.
2	6 - 11	4 - 7	2 - 3	4 - 6	Se siente la brisa.	Brisa ligera.
3	12 - 19	8 - 12	4 - 5	7 - 10	Las hojas se mueven.	Pequeña brisa.

4	20 - 28	13 - 18	6 - 7	11 - 16	Las ramas se mueven.	Brisa moderada.
5	29 - 38	19 - 24	8 - 10	17 - 21	Los pequeños árboles se inclinan.	Buena brisa.
6	39 - 49	25 - 31	11 - 13	22 - 27	Las grandes ramas se inclinan.	Fresco.
7	50 - 61	32 - 38	14 - 16	28 - 33	Los árboles se mueven.	Frescachón.
8	62 - 74	39 - 46	17 - 20	34 - 40	Se rompen las ramas.	Duro.
9	75 - 88	47 - 55	21 - 24	41 - 47	El viento arranca elementos de edificios.	Muy duro
10	89 - 102	56 - 64	25 - 28	48 - 55	Grandes estragos.	Temporal ó tempestad.
11	103 - 117	65 - 73	29 - 32	56 - 63	Devastaciones.	Tempestad violenta.
12	> 118	> 74	> 33	> 64	Huracán.	Huracán.

En el intercambio internacional de datos, la dirección del viento se informa en grados, aproximándoles a los 10° más cercanos. Otra escala de dirección del viento está basada en puntos de brújula (8, 16 o 32 puntos de acuerdo a la exactitud requerida). Para indicar los puntos de la brújula se usan las siguientes abreviaturas:

Tabla 1.3 Escalas de dirección del viento, tomado de [15]

Dirección de brújula	Equivalencia en grados	Sector en grados
N	360	355-5
N'E	11.25	6-16
NNE	22.5	17-28
NE'N	33.75	29-39
NE	45	40-50
NE'E	56.25	51-61
ENE	67.5	62-73
E'N	78.75	74-84
E	90	85-95
E'S	101.25	96-106
ESE	112.5	107-118
SE'E	123.75	119-129
SE	135	130-140
SE'S	146.25	141-151
SSE	157.5	152-163
S'E	168.75	164-174
S	180	175-185
S'W	191.25	186-196
SSW	202.5	197-208
SW'S	213.75	209-219
SW	225	220-230

SW'W	236.25	231-241
WS'W	247.5	242-253
W'S	258.75	254-264
W	270	265-275
W'N	281.25	276-286
WNW	292.5	287-298
NW'W	303.75	299-309
NW	315	310-320
NW'N	326.25	321-331
NNW	337.5	332-343
N'W	348.75	344-354

Para propósitos meteorológicos la velocidad debe ser reportada con una resolución de 0.5 m/s o en nudos (0.515 m/s) a la unidad más cercana, mientras que la dirección debe ser reportada en grados con sentido horario tomando como punto de partida el norte magnético (indicado por la brújula). Ambas magnitudes deben ser representadas en reportes de sinóptica, como promedios en un intervalo de diez minutos [16].

Para aplicaciones aeronáuticas la dirección y la velocidad del viento deben ser indicadas en un intervalo de dos minutos.

1.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La medición de la velocidad de un fluido utilizando señales de ultrasonido se basa en la influencia del campo de las velocidades del fluido sobre una señal generada desde un transmisor hacia un receptor.

Básicamente el sistema consiste en un transmisor de ondas ultrasónicas que emite una señal continua o una serie de pulsos que viajan por el fluido (líquido o gas) del cual se requiere conocer la velocidad, hasta llegar a un receptor que capta esta señal perturbada.

Para poder conocer el sentido de la velocidad se utiliza es un arreglo transmisor-receptor en cada uno de los extremos de un eje, de esta manera es posible diferenciar si el flujo se aleja o acerca de un determinado extremo del eje. Si la

señal ultrasónica viaja a mayor velocidad, se puede concluir que la dirección del fluido concuerda con la de transmisión del ultrasonido y viceversa.

Siendo de interés medir solamente el tiempo que tarda la señal en viajar del transmisor al receptor, la distancia entre transmisor y receptor se mantiene fija.

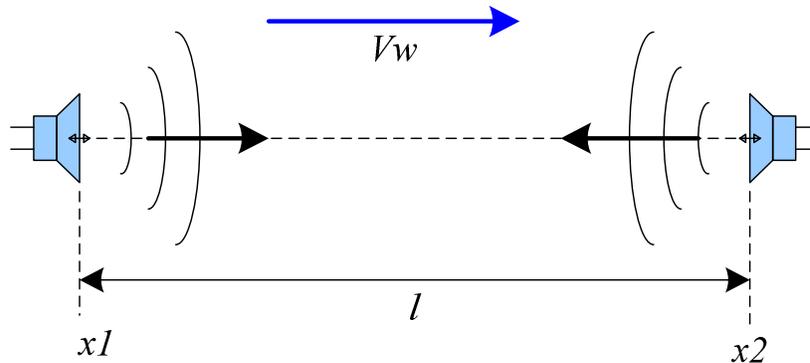


Figura 1.6 Configuración básica de un eje de medida para velocidad de un fluido.

Existen diversos métodos para la determinación de los tiempos de vuelo de las señales ultrasónicas en ambas direcciones y según el que se aplique existen algoritmos diferentes para calcular la velocidad. A continuación se menciona los algoritmos y los tipos de señales que se usan en cada uno:

- Diferencia de tiempos de viaje.- Considerando las velocidades relativas se puede obtener las siguientes expresiones y los tiempos de viaje de la señal:

$$v_1 = c + v_w = \frac{l}{t_1} \quad v_2 = c - v_w = \frac{l}{t_2} \quad (1.24, 1.25)$$

$$t_1 = \frac{l}{c + v_w} \quad t_2 = \frac{l}{c - v_w} \quad (1.26, 1.27)$$

Donde:

c es la velocidad del sonido en [m/s]

v_1 es la velocidad de la onda ultrasónica en una dirección en [m/s]

v_2 es la velocidad de la onda ultrasónica en la dirección contraria en [m/s]

l es la distancia en el eje entre los sensores en [m]
 v_w es la velocidad del viento paralelo al eje en [m/s]
 t_1 es el tiempo que tarda la señal en viajar de x_1 a x_2 en [s]
 t_2 es el tiempo que tarda la señal en viajar de x_2 a x_1 en [s]

Obteniendo la diferencia de tiempos:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c - v_w} - \frac{l}{c + v_w} = \frac{l(c + v_w - c + v_w)}{c^2 - (v_w)^2} \quad (1.28)$$

$$\Delta t = \frac{2lv_w}{c^2 - (v_w)^2} \quad (1.29)$$

Considerando la relación $\frac{v_w}{c} \ll 1$ es decir que la velocidad del viento que se va a medir es mucho menor a la del sonido, se tiene:

$$v_w = \frac{\Delta t \cdot (c^2 - v_w^2)}{2l} = \frac{\Delta t c^2}{2l} \left(1 - \frac{v_w^2}{c^2} \right) \cong \frac{\Delta t c^2}{2l} = \frac{(t_2 - t_1)c^2}{2l} \quad (1.30)$$

La relación (1.30) muestra que la velocidad del viento v_w depende directamente de la velocidad del sonido c , lo cuál implica una dependencia de ciertos parámetros termodinámicos (temperatura, coeficiente adiabático) [13].

Además la consideración de que $\frac{v_w}{c} \ll 1$ hace a este método difícilmente aplicable para velocidades altas de un fluido.

Este algoritmo puede obtenerse tanto con la utilización de señales continuas como de pulsos [13].

- Angulo de fase.- Si se transmiten señales sinusoidales continuas y de frecuencia f (Hz) constante es posible detectar la variación de fases $\Delta\phi$ (rad) de la señal utilizando un detector de fases. La equivalencia entre la diferencia de fases y la diferencia de tiempos Δt (s) es [10]:

$$\Delta\phi = 2\pi f \Delta t \quad (1.31)$$

Reemplazando esta expresión en (1.30) se obtiene:

$$v_w = \frac{\Delta\phi \cdot (c^2 - v_w^2)}{2l \cdot 2\pi f} = \frac{\Delta\phi \cdot c^2}{4\pi f} \left(1 - \frac{v_w^2}{c^2}\right) \cong \frac{\Delta\phi c^2}{4\pi f} \quad (1.32)$$

La ecuación muestra que la variación de fases $\Delta\phi$ se puede hacer tan grande como se desee aumentando la frecuencia, lo que puede considerarse como una ventaja. Sin embargo la medición de fase a altas frecuencia resulta difícil de implementar [13].

- Diferencia inversa de los tiempos.- Al considerar las velocidades en cada dirección a partir de los tiempos medidos y utilizando las ecuaciones (1.24, 1.25), se tiene:

$$v_1 = c + v_w = \frac{l}{t_1} \quad v_2 = c - v_w = \frac{l}{t_2}$$

Restando las ecuaciones:

$$2v_w = \left(\frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2}\right) \quad (1.33)$$

$$v_w = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right) \quad (1.34)$$

Este algoritmo aunque es complejo de implementar debido a la relación inversa de los tiempos medidos, presenta la ventaja de que no depende de la velocidad del sonido. Es actualmente el más usado en los anemómetros comerciales [13].

Todos los algoritmos explicados obtienen el valor de la velocidad del viento en una sola medición, sin embargo la mayoría de los anemómetros comerciales presenta el valor obtenido como un promedio de varias mediciones en un tiempo generalmente configurable por el usuario.

Todos estos algoritmos permiten calcular la velocidad del viento a lo largo del eje de medida, pero con un arreglo de dos o más ejes es posible calcular la dirección del viento a partir de las diferentes componentes.

Para la determinación del ángulo en el eje horizontal se necesitan al menos dos arreglos de transductores con los cuales se puede conocer la dirección al realizar las respectivas operaciones matemáticas.

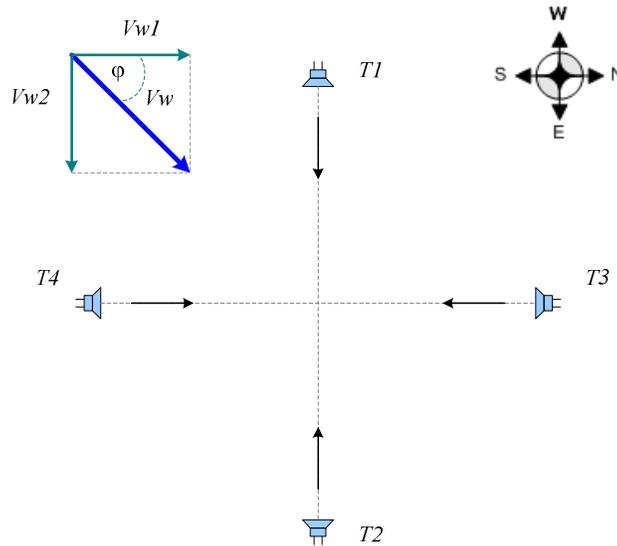


Figura 1.7 Arreglo de 2 ejes para la medida de la velocidad en el plano horizontal

Cuando se tiene las dos componentes ortogonales de la velocidad del viento, la dirección se puede calcular con la expresión:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_{w2}}{v_{w1}}\right) \quad (1.35)$$

La magnitud del vector velocidad se obtiene a partir de:

$$\vec{v}_w = \vec{v}_{w1} + \vec{v}_{w2}$$

$$v_w = \sqrt{(v_{w1})^2 + (v_{w2})^2} \quad (1.36)$$

Se suelen usar un arreglo de tres ejes de medida, que forma un triángulo equilátero para el cálculo de la velocidad y de la dirección en el plano horizontal. Este tipo de arreglo tiene la ventaja de disminuir las interferencias de las señales. Aunque se requiere mayor capacidad de procesamiento para la determinación de la velocidad y la dirección. A continuación se muestran las relaciones usadas para el cálculo de la velocidad y la dirección en esta configuración:

Velocidad:

$$\vec{v}_w = \vec{v}_A + \vec{v}_B + \vec{v}_C$$

$$v_w = \sqrt{(v_A)^2 + (v_B)^2 + (v_C)^2 - v_A v_B - v_A v_C - v_C v_B} \quad (1.37)$$

Dirección:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}v_A - \sqrt{3}v_C}{2v_B - v_C - v_A}\right) \quad (1.38)$$

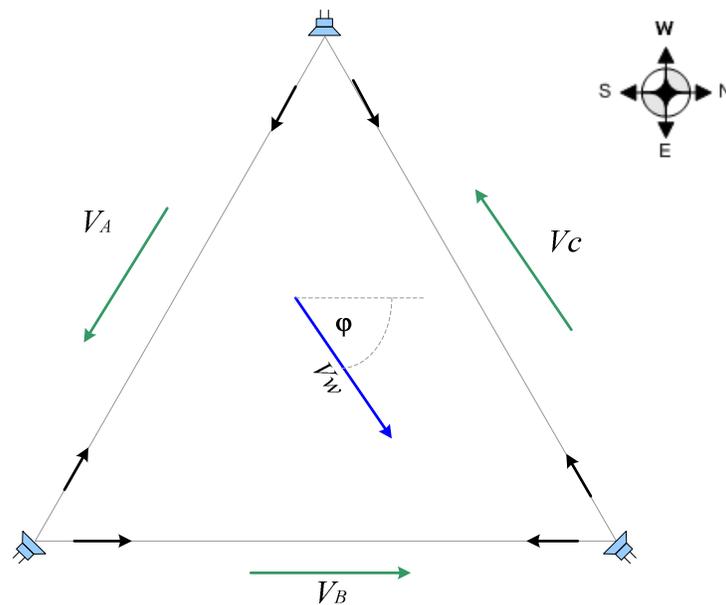


Figura 1.8 Arreglo de 3 ejes para la medida de la velocidad en el plano horizontal

Los sensores que miden las componentes en el espacio, utilizan algoritmos similares para determinar el ángulo de orientación en el plano horizontal y el ángulo de elevación del viento.

1.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANEMÓMETROS ULTRASÓNICOS COMERCIALES.

Existen gran cantidad de modelos comerciales. La mayoría de estos instrumentos tiene un amplio rango de operación, tamaño compacto, son de fácil instalación y de bajo consumo de corriente. Los resultados de las medidas son mostrados

como salidas de voltaje (0-5V) o corriente (4-20mA), y usando protocolos seriales con conexiones RS-232, RS-485 o SDI-12 para hacerlos compatibles con la mayoría de registradores (dataloggers), pueden presentar los datos en forma continua o cuando estos son solicitados. Generalmente son configurables con algún software terminal con diversos tipos de protocolos de comunicación.

Los instrumentos comerciales de un solo eje (1D) son menos comunes, aunque son usados en túneles de viento.

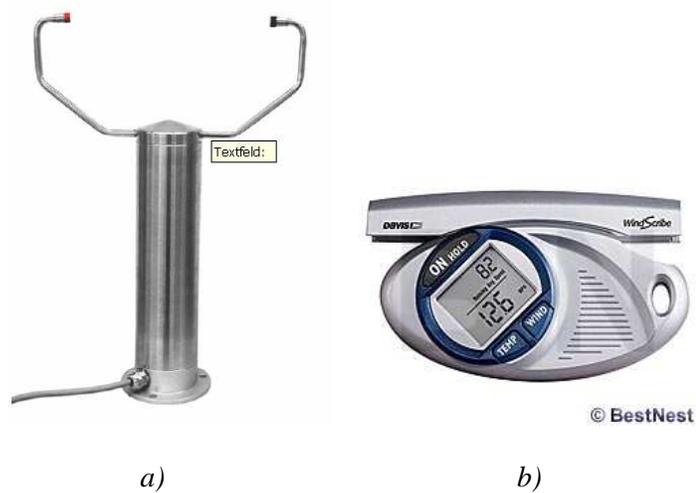


Figura 1.9 Anemómetros 1D a) THIES 1-D (Fabricante: THIES CLIMA)
b) Anemómetro digital 1-D (Fabricante DAVIS)

Los sensores comerciales de 3 ejes (3D) son especialmente usados para aplicaciones aeronáuticas y aeroportuarias.

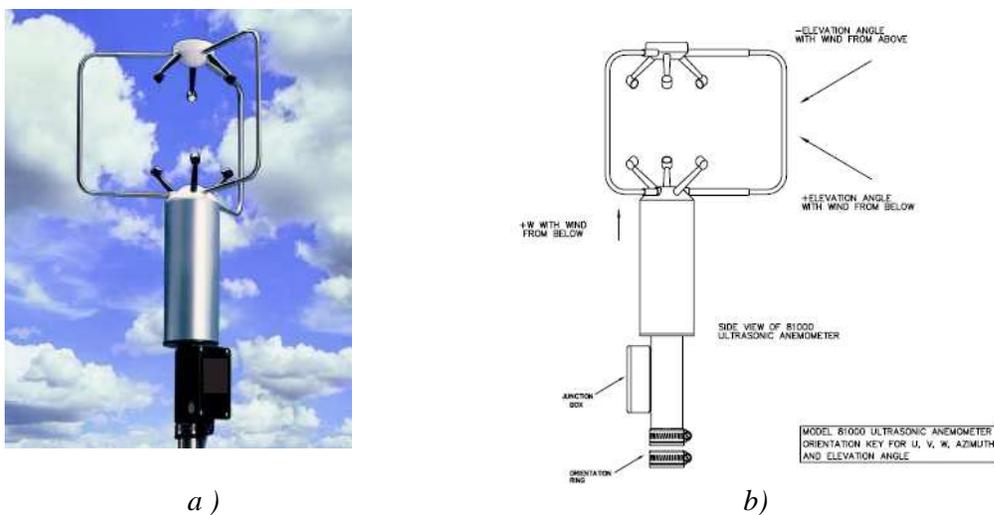


Figura 1.10 CSAT3-3D (fabricante RM YOUNG.) a) Vista general b) Detalle, tomado de [18]

Los anemómetros ultrasónicos más usados en aplicaciones meteorológicas son aquellos que tienen la capacidad de medir las dos componentes horizontales del viento.

A continuación se presenta una tabla con algunos de los sensores 2-D más usados y sus características principales:

Tabla 1.4 Anemómetros ultrasónicos comerciales

Figura	Fabricante	Modelo		Rango	Resolución	Precisión	Voltaje de alimentación	Potencia	Salidas
	VAISALA	WS425 F/G [19]	Velocidad	0 a 85 m/s	0.05 m/s	0.014 m/s	115 VAC/60 Hz or 240 VAC/50 Hz	30 mA	Optical cable RS-232
			Dirección	0° a 360°	1°	±1°			
	VAISALA	WMT52 [20]	Velocidad	0 a 60 m/s	0.1 m/s	0.3 m/s	5 a 32 Vdc	3mA a 12 Vdc	SD-12, RS232, RS485, RS422, USB adapter
			Dirección	0 a 360°	1°	±3°			
	RM YOUNG	200-85000 [21]	Velocidad	0 a 70 m/s	0.1 m/s	±0.1 m/s	9 to 16 VDC,	30 mA	RS-232 RS-485 0 a 5Vdc 4 a 20 mA
			Dirección	0° a 360°	1°	±2°			

	<p>RM YOUNG</p>	<p>200-7000 [22]</p>	<p>Velocidad</p>	<p>0 a 60 m/s</p>	<p>0.01 m/s</p>	<p>±4%</p>	<p>9 a 30 Vdc</p>	<p>40 mA</p>	<p>RS232 RS422 RS485 0-5V 4-20 mA</p>
<p>Dirección</p>	<p>0 a 360°</p>	<p>1°</p>	<p>±3°</p>						
	<p>THIES Clima</p>	<p>WindSensor 2D [23]</p>	<p>Velocidad</p>	<p>0 a 65 m/s</p>	<p>0.1 m/s</p>	<p>±2%</p>	<p>12 a 24 V</p>	<p>3 VA</p>	<p>4 a 20 mA 0a 10 V RS 485/422</p>
<p>Dirección</p>	<p>0 a 360 °</p>	<p>1°</p>	<p>±1°</p>						
	<p>GILL Instruments</p>	<p>WIND Observer II [24]</p>	<p>Velocidad</p>	<p>0 65 m/s</p>	<p>0.1 m/s</p>	<p>±2%</p>	<p>9 a 30V</p>	<p>40 mA</p>	<p>RS422 0 a 5 V 4 a 20 mA</p>
<p>Dirección</p>	<p>0 a 360°</p>	<p>1°</p>	<p>±2°</p>						

1.3 TERMÓMETROS ULTRASÓNICOS

1.3.1 INTRODUCCIÓN

Físicamente la temperatura es una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "energía sensible", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que es mayor la energía sensible de un sistema se observa que está más "caliente", es decir, que su temperatura es mayor [13].

Para propósitos meteorológicos la temperatura es medida en numerosos medios. Los más comunes:

- Temperatura del aire cerca de la superficie terrestre.
- Temperatura del aire superior.
- Temperatura en la superficie del terreno.
- Temperatura del suelo a varias profundidades.
- Temperatura del agua en lagos y mares a varias profundidades.

Estas medidas son requeridas como datos para los modelos numéricos de predicción, para propósitos de hidrología y agricultura, y como indicadores de la variación climática. Además la temperatura local tiene un significado fisiológico importante en las actividades de la población.

La temperatura del aire es la temperatura libre medida de 1.2m a 2m por encima del suelo, las medidas de temperatura deben tomarse a horas fijas, de igual forma deben medirse los extremos de temperatura mínima y máxima tomados durante el día [14].

El rango operacional de un termómetro puede ser escogido considerando el rango del clima local. Como un ejemplo se muestra en la Tabla 1.5 los rangos

aceptables de calibración y errores para termómetros en aplicaciones meteorológicas comunes.

Tabla 1.5 Rango y precisión de termómetros meteorológicos, tomado de [16]

Tipo de termómetro	Ordinario	Máxima	Mínima
Amplitud de escala (°C)	-30 a 45	-30 a 50	-40 a 40
Rango calibración (°C)	-30 a 40	-25 a 40	-30 a 30
Error máximo (°C)	< 0.2	0.2	0.2

Existen dos escalas básicas para la medición de temperatura de las cuales la escala Celsius o centígrada es la más utilizada en Meteorología.

La escala Celsius está determinada por dos temperaturas básicas de referencia que son: el punto de fusión del hielo como 0 °C y el punto de ebullición del agua como 100 °C en condiciones normales (P = 1013.25 H pa; g = 980.625 cm / s; H = 0 m, sobre el nivel del mar).

La unidad termodinámica de la temperatura en el Sistema Internacional SI está determinada por la escala Kelvin y como punto de referencia tiene la temperatura del punto triple del agua pura, es decir la temperatura a la cual el agua esta en equilibrio simultáneo en sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso y es igual a 273.16 °K, es decir 0,01 °C [25].

$$K = T[°C] + 273.16 \quad (1.49)$$

Además de estas escalas existen otras como la FARENHEIT

$$F = \frac{9}{5}T [°C] + 32 \quad (1.40)$$

y la REAMUR

$$R = \frac{4}{9}(T [°F] - 32) \quad (1.41)$$

que son poco usadas en la actualidad.

1.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La medición de la temperatura en un medio gaseoso utilizando señales de ultrasonido se basa en la influencia de la temperatura sobre una señal generada desde un transmisor hacia un receptor.

La velocidad isoentrópica del sonido en un gas (aire) depende de la temperatura, humedad, presión y densidad del mismo. Sin embargo se pueden despreciar ciertos parámetros que no la afectan considerablemente. Por ejemplo se estima que para el caso de la humedad resulta sólo un 0,15% de influencia para una variación de 10 % a 90% de humedad relativa en la velocidad del ultrasonido, lo cual para efectos prácticos es despreciable [26].

La relación fundamental entre la velocidad de transmisión del ultrasonido y la temperatura del aire está dada por la relación:

$$c = 20.055\sqrt{T} \quad (1.42)$$

Donde:

T es la temperatura del gas (aire) en [°K]

Básicamente el sistema consiste en un transmisor de ondas ultrasónicas que emite una señal continua o una serie de pulsos que viajan por el fluido (líquido o gas) del cual se requiere conocer la temperatura, hasta llegar a un receptor que capta esta señal perturbada.

Existen diferentes algoritmos que permiten obtener la temperatura a partir de la medición del tiempo que tarda en recorrer una señal ultrasónica una distancia determinada, los más utilizados son:

- Despreciando el efecto de la humedad relativa y realizando mediciones con el viento en calma.- Este algoritmo considera un emisor y un receptor ultrasónicos separados una distancia l conocida, al medir el tiempo de vuelo de la señal entre el emisor y el receptor en condiciones en que la

velocidad del medio es nula (viento en calma) se puede calcular la velocidad de transmisión de la onda y a partir de esta obtener la temperatura considerando la relación (1.42).

Despreciando la naturaleza ondulatoria del sonido y tomando en cuenta que en el intervalo de tiempo en que la señal viaja (en el orden de los microsegundos) la temperatura permanece constante, la velocidad de la onda ultrasónica se puede expresar como:

$$c = \frac{l}{t_v} \quad (1.43)$$

Donde:

l es la distancia entre transmisor y receptor.

t_v es el tiempo de vuelo de la señal.

c es la velocidad del ultrasonido.

Reemplazando la ecuación (1.43) en (1.42), se obtiene:

$$T = \left(\frac{l}{20.055 * t_v} \right)^2 \quad (1.44)$$

Esta expresión permite calcular la temperatura del aire, a partir del tiempo de vuelo. La relación obtenida es simple y fácil de implementar. Sin embargo no considera los efectos de otros parámetros termodinámicos sobre la velocidad de transmisión. Además para este método es importante realizar la medición siempre y cuando el viento se mantenga en calma. Esta es la principal limitación, ya que solo se puede obtener el valor de la temperatura cuando las condiciones ambientales sean las adecuadas.

Este método puede llegar a medir la temperatura del aire con una indeterminación de $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

- Considerando la velocidad de la onda con influencia del viento.- Con la evolución de la anemometría sónica y dado que ésta también se basa en la medición del tiempo de transmisión de un punto a otro de una senda ultrasónica, se llegó a unir en un solo equipo las dos funcionalidades: la medición de la velocidad del fluido y la medición de la temperatura de éste.

Para el efecto se desarrolló un algoritmo que permite calcular la temperatura del aire a partir de los tiempos de vuelo de dos señales simultáneas de dirección opuesta, valores igualmente obtenidos en la medición de la velocidad del viento por el método de la diferencia inversa de los tiempos.

La velocidad del ultrasonido puede ser encontrada con la suma de los inversos de los tiempos de vuelo. Sumando las ecuaciones (1.24) y (1.25) se puede obtener:

$$2c = \frac{l}{t_1} + \frac{l}{t_2} \quad (1.45)$$

$$c = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (1.46)$$

Obtenido c puedo encontrar finalmente la temperatura con la ecuación (1.42).

$$20.055\sqrt{T} = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (1.47)$$

$$T = \frac{l^2}{1608} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 \quad (1.48)$$

Con esta ecuación es posible determinar la temperatura del aire T inclusive cuando exista viento, ya que la influencia del mismo se resta al utilizar dos señales ultrasónicas viajando simultáneamente y opuestas como en el caso del anemómetro ultrasónico.

Esta es la principal ventaja del método, al eliminar la influencia que tiene el viento en la velocidad de la onda se pueden realizar medidas de la temperatura en cualquier instante, característica importante para las mediciones meteorológicas.

Una desventaja es que se necesitan dos transmisores y dos receptores en lugar de uno. Sin embargo como ya se mencionó si se maneja este sensor junto con el anemómetro ultrasónico, el resultado es que se puede aprovechar los mismos transductores para la medición de la temperatura sin necesidad de incorporar nuevos elementos al sensor.

1.3.3 UTILIZACIÓN

La termometría sónica trae consigo algunas ventajas: no se ven afectados por el envejecimiento o contaminación atmosférica, y para aplicaciones marinas la deposición de sal en el alambre de platino y similares problemas de inmersión de otros sensores no afecta a los ultrasónicos.

Los termómetros ultrasónicos son especialmente usados en aplicaciones industriales, cuando se trata de medir la temperatura de gases por encima de los 1200°C llegando a medir rangos de temperatura entre 10000°C y 20000°C en estudios de propiedades del transporte de gases.

El sistema de medición acústica de la temperatura en un gas puede ser instalado en grandes calderas, plantas de energía de desecho, plantas de desechos peligrosos con hornos giratorios, hornos de cemento y acero. Un Pirómetro Acústico se usa para ayudar a mantener identificados y corregir problemas de quemadores, problemas de escoria (picaduras), sobrecalentamiento del horno y mejorar la disponibilidad y eficiencia [27].

En meteorología su uso es escaso, debido a las limitaciones de precisión, sin embargo se está buscando superar las dificultades debido a las ventajas que poseen en cuanto a robustez, tiempo de respuesta y mantenimiento. Además de

la ventaja de poder medir las magnitudes de velocidad, dirección del viento y temperatura en un mismo equipo.

1.3.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMÓMETROS ULTRASÓNICOS COMERCIALES.

Termómetros sónicos comerciales para aplicaciones industriales son desarrollados independientemente según la aplicación. Difícilmente se encuentran estándares comerciales.

En meteorología la mayoría de anemómetros ultrasónicos viene acompañados de un termómetro ultrasónico, en el mismo equipo. Aunque estos no son muy usados debido a sus limitaciones de precisión por lo que se les emplea en conjunto con termocuplas y RTD's. A continuación se presentan algunos anemómetros/termómetros ultrasónicos con sus características principales:

Tabla 1.6 Termómetros-Anemómetros ultrasónicos

Figura	Fabricante	Modelo	Rango	Resolución	Precisión	Voltaje de alimentación	Potencia	Salidas
	GILL INSTRUMENTS	MASTERWIND [28]	-40°C TO +70 °C	0.01°C	0.5 °C	9 - 30 Vdc,	55 mA a 12V	RS232, 422, 485 0-20mA, 4-20mA, 0-5V, ±2.5V, ±5V
	THIES Klima	WindSensor 2D [23]	-40 a 70 °C	0.1 °C	± 1 °C (-30...+50 °C ±0.5 K)	12 a 24 V	3 VA	4 a 20 mA 0a 10 V RS 485/422
	GILL Instruments	WIND Observer II [24]	-40 a 70 °C	0.1 °C	± 1 °C (-30...+50 °C ±0.5 K)	9 a 30V	40 mA	RS422 0 a 5 V 4 a 20 mA

Se ha realizado un estudio de la influencia que ejerce la velocidad y temperatura del aire en las ondas de ultrasonido y a partir de estos principios se han expuesto las formas prácticas de cálculo de dichos parámetros que se utilizan en la construcción de anemómetros y termómetros comerciales. También se han analizado las características de dichos equipos y algunos conceptos que se deben tomar en cuenta en aplicaciones meteorológicas.

En el siguiente capítulo se realiza el diseño del sistema a implementar, se detalla en principio las partes y componentes que en conjunto forman el anemómetro y termómetro ultrasónico, para luego detallar su función y utilización.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DEL PROTOTIPO

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

El prototipo está compuesto por siete sistemas que se encargan de realizar tareas específicas, además interactúan entre ellos para la obtención de los resultados:

- La fuente de alimentación tiene como suministro de energía una batería de 12V estándar utilizada en las estaciones automáticas, la cual es regulada a 3,3V, 5V y 6V para alimentar a las diferentes partes del equipo.
- La respuesta de los transductores es acondicionada por un circuito electrónico que permite enviar y recibir una señal que tanto los sensores como el sistema central puedan manejar.
- El sistema central está basado en un microcontrolador que maneja a los cuatro transductores ultrasónicos, mide el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica, realiza los cálculos correspondientes, guarda y transmite los resultados. Además es el encargado de controlar al resto de componentes de cada sistema.
- Los datos de velocidad, dirección y temperatura son almacenados cada cierto intervalo de tiempo en memorias EEPROM para posteriormente ser descargados en el computador.
- Los datos de velocidad, dirección y temperatura pueden además ser obtenidos como señales análogas normalizadas para poder acoplar el sistema a registradores comerciales, esto se lo hace a través de conversores digital-análogo incluidos en el sistema microprocesado.
- Los datos almacenados y los datos instantáneos pueden ser visualizados en un computador con comunicación RS-232 gracias a un HMI.
- Todo el sistema es montado en una estructura metálica diseñada para una adecuada disposición y colocación de los transductores y circuito

impreso. Además permite la correcta colocación del prototipo en una estación meteorológica.

A continuación se muestra un diagrama del sistema integral:

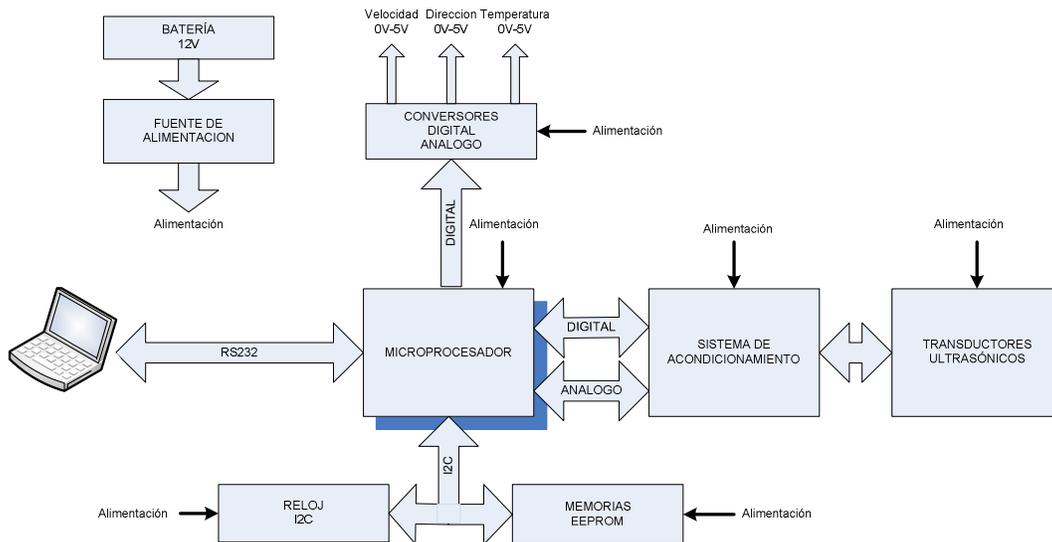


Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema.

2.2 DISEÑO MECÁNICO

Todas las partes electrónicas están montadas sobre una estructura metálica. En ella se colocan los sensores para que puedan obtener una correcta medida de la velocidad del viento y temperatura. En su interior se encuentra el sistema electrónico para protegerlo y además permite que el anemómetro sea colocado a la intemperie en una estación meteorológica automática.

Los requerimientos y características más importantes de dicha estructura son:

- Debe soportar condiciones climáticas adversas como: lluvia, granizo, viento, radiación solar, humedad, etc.
- Debe ser robusta, para que no pueda ser dañada por animales como aves, insectos o roedores; o por vegetación, piedras, partículas en el aire, etc.

- Debe presentar una baja resistencia al aire para impedir que la estructura cause turbulencias y así evitar pérdidas en la energía del viento y que la estructura altere la medición.
- En su interior aloja al circuito electrónico, protegiéndolo y manteniéndolo fijo.
- Los soportes de los sensores deben presentar una mínima deformación ante el aire o la temperatura. La distancia entre transmisor y receptor debe ser fija y presentar mínimos cambios de longitud, además los soportes deben estar nivelados. Todo ello para evitar que el anemómetro se descalibre.

2.2.1 CONSTRUCCIÓN

La estructura está construida en su totalidad en acero inoxidable y está diseñada de tal forma que asegura una disposición uniforme de los sensores, manteniendo una distancia constante entre los transductores. Se escoge este material por su baja capacidad de oxidación y tener bajo coeficiente de deformación. Además es el más utilizado en la fabricación de este tipo de equipos.

La distancia que se mantiene entre los transductores es de 20 cm para obtener un tiempo de vuelo de $582\mu s$ cuando la velocidad del viento es 0 m/s a 20°C.

Cada soporte está colocado a 15cm del nivel más alto de la estructura para asegurar que la misma no interfiera en el haz de ultrasonido entre los sensores. Los soportes se colocaron a 90 grados entre ellos con la finalidad de formar un plano cartesiano que facilite el cálculo del módulo de la velocidad y su dirección.

El soporte-base está construido en un tubo de 3 pulg. A él llegan los cables de los transductores y en él se encuentra el circuito impreso. Además permite la instalación del sensor sobre un mástil.

A continuación se encuentra el diagrama de la estructura, en el ANEXO B se encuentran los planos detallados:



Figura 2.2 Estructura metálica.

2.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación está compuesta por una batería de 12V que se usa regularmente como fuente de energía principal en las estaciones automáticas meteorológicas, dos reguladores de voltaje de 6V, 5V @1A, uno de 3,3V @ 1,5A y un regulador de 5V @ 100mA.

A continuación se presenta el esquema:

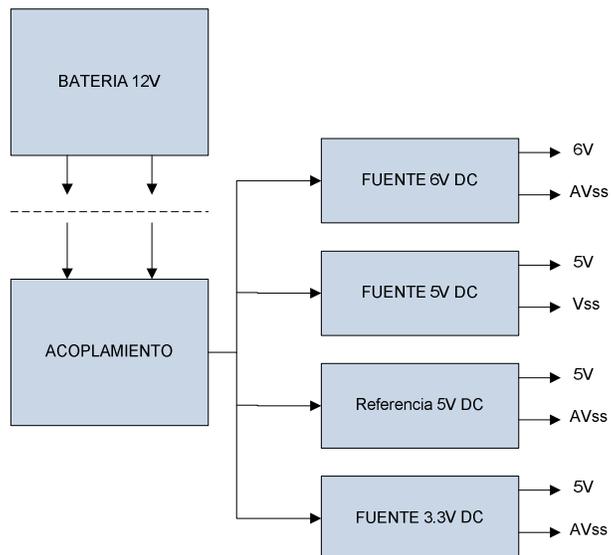


Figura 2.3 Esquema fuente de alimentación.

La batería alimenta a todos los reguladores, pudiendo funcionar el sistema con voltajes de entrada de 8.5 a 30V DC.

El regulador de 6V es el circuito integrado LM7806 que tiene una regulación de línea de 150mV max y una regulación de carga de 150mV max, protección térmica interna y limitador de corriente interno. Se lo utiliza para la alimentación del circuito de acondicionamiento de los sensores.

El regulador de 3.3V es el integrado LT1086 que tiene una regulación de línea del 0.015% y una regulación de carga de 0.1%. Sirve como referencia del circuito de acondicionamiento de los sensores.

El regulador de 5V @1A es el LM7805 que tiene similares características que el LM7806. Se encarga de alimentar al microcontrolador, la transmisión de datos seriales y a los conversores digital-análogos.

El regulador de 5V @100mA es el LM78L05 que tiene una regulación de línea de 200mV máx. y una regulación de carga de 60mV máx. Se utiliza exclusivamente como referencia para el conversor A/D del microcontrolador, con el fin de asegurar una correcta conversión según especifica el catálogo del microcontrolador.

Adicionalmente se utiliza un circuito de acoplamiento en la entrada de la fuente compuesto por dos toroides y dos capacitores. Además se utiliza un fusible para proteger al sistema de sobrecorrientes o corto circuitos.

Se desacopla la tierra de los componentes análogos con la de los componentes digitales utilizando una inductancia para evitar que sean afectados por ruido e interferencia que provocan los elementos digitales.

También se utilizan dos capacitores a la salida de los reguladores como recomienda el fabricante para garantizar voltajes constantes y un buen acoplamiento.

A continuación se presenta el circuito:

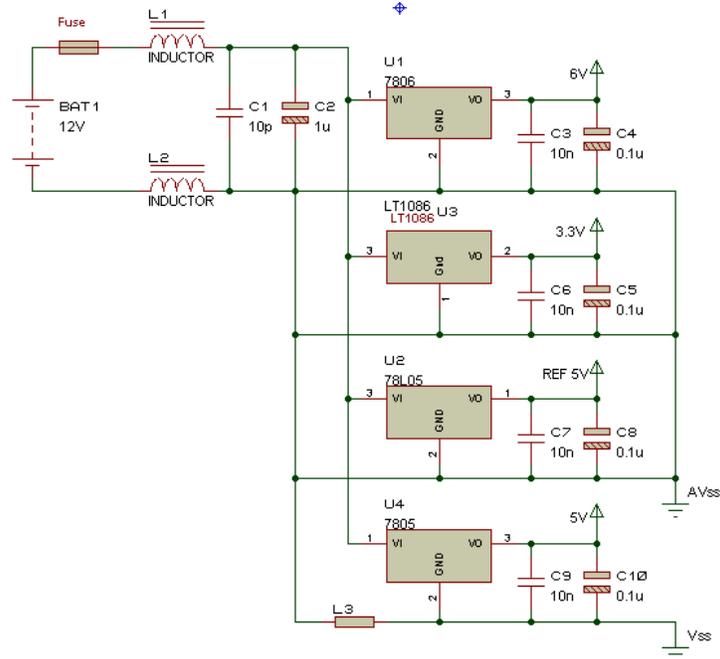


Figura 2.4 Fuentes de alimentación.

2.4 ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES

2.4.1 TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Los transductores ultrasónicos que se utilizaron son los 40TR16F que tienen las siguientes características:

Tabla 2.1 Características Transductores, tomado de [29]

Como Transmisor	
Frecuencia Central	40±1,0 kHz
Nivel de presión sonora	119dB/±1,1KH
Ancho de banda	Min: 4KHz/112dB
Capacitancia	2000pF±30%

Como Receptor	
Frecuencia Central	40±1,0 kHz
Sensibilidad mínima	67dB/40±1kHz
Ancho de banda	Min: 5kHz/a 75dB
Capacitancia	2000pF±20%

Para la conexión de los transductores al circuito impreso se utilizó cables tipo 24AWG de 3 líneas, con apantallamiento metálico.

Es importante el uso de este tipo de cable para evitar que otro tipo de señales en forma de ruido distorsionen la señal que entrega el receptor ultrasónico.

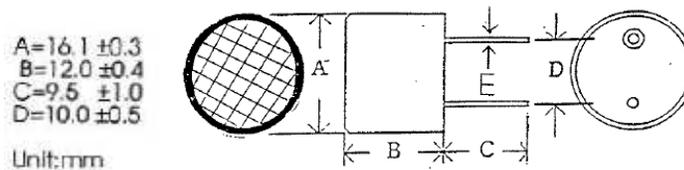


Figura 2.5 Dimensiones transductores ultrasónicos, tomado de [29]

2.4.2 SEÑAL ULTRASÓNICA

La señal obtenida en el receptor ultrasónico es una senoide de 40kHz y amplitud creciente cuando el transmisor empieza a detectar la onda, luego la señal se estabiliza y el receptor entrega una onda de amplitud casi constante para finalmente disminuir su amplitud progresivamente.

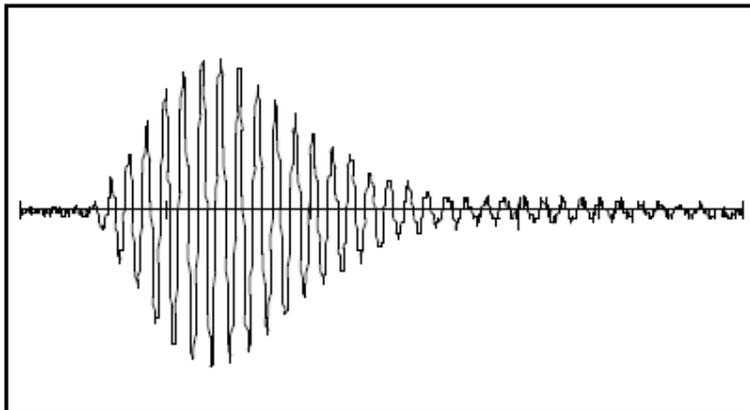


Figura 2.6 Señal ultrasónica del receptor, tomado de [30]

Es de interés determinar el inicio de la onda (el primer ciclo) para fijar el tiempo de vuelo, por lo que se trabaja con la parte de amplitud variable de la señal. Sin embargo este hecho representa ciertas desventajas, ya que la forma de la onda varía mucho en su amplitud dependiendo de ciertos parámetros que la afectan de forma directa y además inciden en la calidad de señal que entrega el receptor.

Entre los factores más importantes se tiene:

- La forma de la señal enviada al transmisor: si es una senoide, cuadrada o triangular.
- La amplitud en la señal de emisión: si se envía una señal de mayor voltaje en el transmisor, el receptor captará una señal de mayor amplitud.
- El número de ciclos de la onda que se envía al transmisor: la amplitud de la señal que entrega el receptor es proporcional a la cantidad de ciclos que se envíen al transmisor [30].
- La frecuencia de la onda influye en la amplitud debido a que el receptor tiene mayor sensibilidad a ondas de frecuencia igual a su frecuencia de resonancia [30].
- La disposición de los sensores: se va perdiendo ganancia en la señal conforme incrementa el ángulo del eje entre transmisor y el receptor, obteniendo máxima ganancia si los transductores están dispuestos en forma opuesta uno del otro.
- La distancia entre transductores: a mayor distancia, menor es la amplitud de la señal que entrega el receptor.
- La energía que de la onda disipa el viento depende en gran medida de su velocidad y afecta la amplitud.
- El ruido presente en el ambiente afecta la amplitud de la onda y la distorsiona.

En lo concerniente a la frecuencia, se obtiene en el receptor una señal de 40KHz que se puede considerar constante ya que no presenta cambios significativos entre ciclos.

2.4.3 GENERADOR DE SEÑAL

A continuación se presenta el esquema del acondicionamiento de la señal del transmisor:

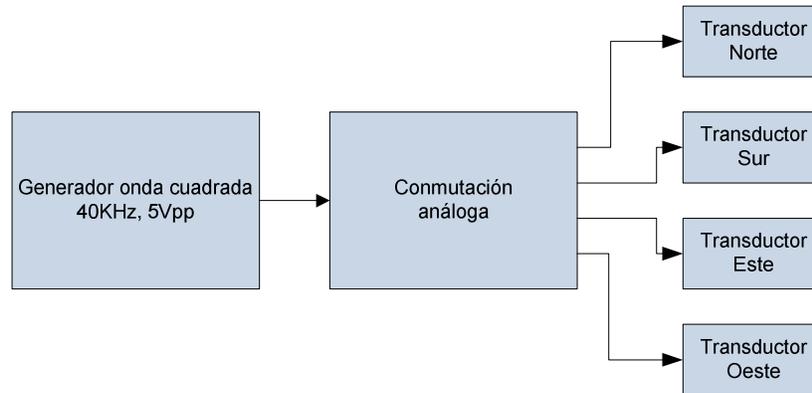


Figura 2.7 Esquema del acondicionamiento del transmisor.

Para generar la señal de frecuencia constante que se envía al transmisor se utiliza el módulo comparador de salida del microcontrolador. Esta señal tiene una frecuencia de 40KHz, una amplitud de 0 a 5Vpp, una relación de trabajo de 0.5 y se la obtiene en el pin 19. Es una onda cuadrada periódica de cuatro ciclos que se envía a cada transmisor por turnos para completar un ciclo de medida en los dos ejes y en las dos direcciones por eje.

El transmisor se conecta directamente a este pin para evitar retardos en el envío de la señal y distorsiones de la misma.

2.4.4 CONMUTACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES

Como los transductores pueden funcionar tanto como transmisor o receptor, se utiliza el multiplexor/demultiplexor análogo CD4052BP para poder conmutar a los transductores y hacerlos funcionar como transmisores enviándoles una onda cuadrada, o utilizándolos como receptores enviando su señal a la entrada del amplificador.

El conmutador posee dos canales independientes de entrada/salida (a,b) que se pueden multiplexar o demultiplexar a cuatro canales (Y0a/b, Y1a/b, Y2a/b, Y3a/b) seleccionables gracias a dos entradas digitales que en este caso son controladas por el microcontrolador.

Cuando un canal es seleccionado entra a un estado de baja impedancia que típicamente es de 80Ω , lo que permite que señales análogas de hasta 15Vpp puedan ser manejadas del canal de entrada al de salida. Los otros canales al contrario se encuentran en estado de alta impedancia.

A continuación se presenta la tabla de control:

Tabla 2.2 Control CD4052

Estado de las entradas			Estado de los canales			
Inhibido	A1	A0	Y0 a/b	Y1 a/b	Y2 a/b	Y3 a/b
0	0	0	ON	OFF	OFF	OFF
0	0	1	OFF	ON	OFF	OFF
0	1	0	OFF	OFF	ON	OFF
0	1	1	OFF	OFF	OFF	ON
1	X	X	OFF	OFF	OFF	OFF

El canal “a” se utiliza para recibir la señal de los transductores ultrasónicos y conectarlos al circuito de amplificación, mientras que el canal “b” se utiliza para el envío de la señal cuadrada desde el microcontrolador hacia los transductores que son utilizados para generar la señal ultrasónica.

A continuación se describe la secuencia de selección para cumplir un ciclo de medición:

- Al seleccionar el canal Y0a y Y0b se coloca 0L en A1 y A2, el sensor NORTE recibe la onda cuadrada del microcontrolador y genera una onda ultrasónica. Seguidamente el sensor SUR recibe la onda ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal al amplificador.
- Al seleccionar el canal Y1a y Y1b colocando 0L en A1 y 1L en A2, el sensor SUR recibe la onda cuadrada del microcontrolador y genera una onda ultrasónica. Seguidamente el sensor NORTE recibe la onda ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal al amplificador.
- Al seleccionar el canal Y2a y Y2b colocando 1L en A1 y 0L en A2, el sensor ESTE recibe la onda cuadrada del microcontrolador y genera una onda ultrasónica. Seguidamente el sensor OESTE recibe la onda ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal al amplificador.
- Al seleccionar el canal Y3a y Y3b colocando 1L en A1 y A2, el sensor OESTE recibe la onda cuadrada del microcontrolador y genera una onda ultrasónica. Seguidamente el sensor ESTE recibe la onda ultrasónica generada y envía una onda sinusoidal al amplificador.

A continuación se presenta el circuito:

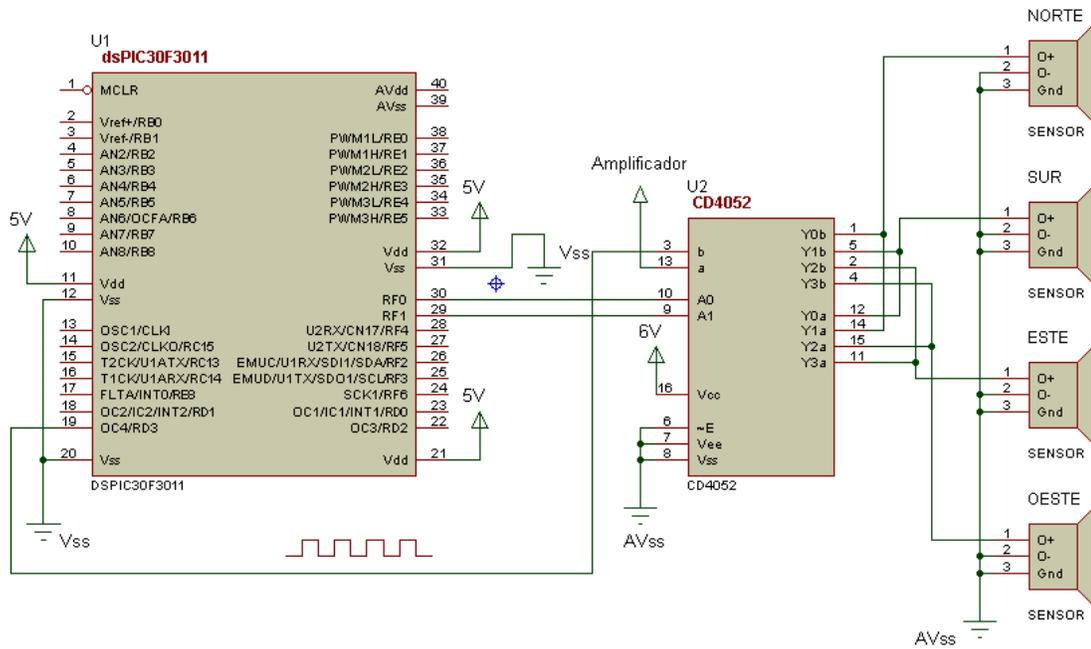


Figura 2.8 Circuito de conmutación de transductores.

2.4.5 SEÑAL DEL RECEPTOR

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

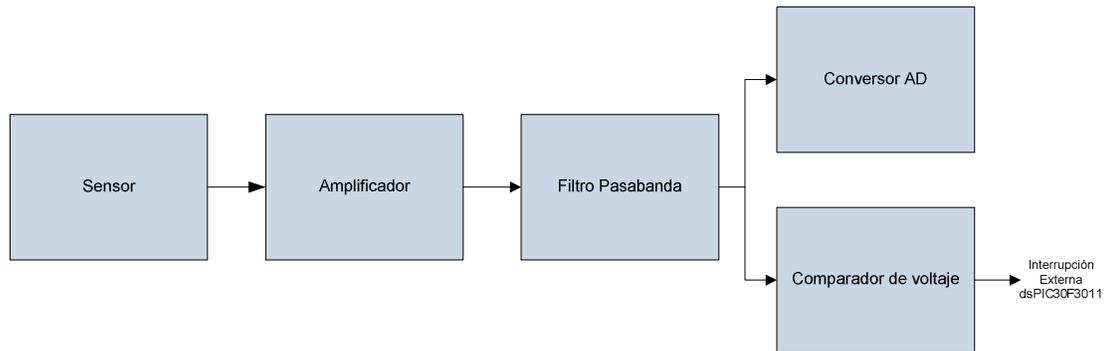


Figura 2.9 Acondicionamiento del receptor.

2.4.5.1 Amplificación

Se utiliza un amplificador inversor de dos etapas para acondicionar la señal sinusoidal que entrega el receptor ultrasónico, ya que tiene una amplitud de aproximadamente 60 a 70mVp en la parte estable pero 6 a 10mVp al inicio de la onda.

El circuito está compuesto por el amplificador operacional UPC4570, de ultra bajo ruido y posee compensador interno de frecuencia.

Como interesa identificar el inicio de la onda se escogen ganancias que permitan amplificar adecuadamente los primeros ciclos de la onda, saturando al operacional para el resto de la señal. La primera etapa tiene una ganancia de 10, inferior a la segunda que es de 20, ya que la primera etapa es más afectada por el ruido. Para el ajuste de las ganancias se utilizan resistencias de precisión para procurar mayor estabilidad en la amplificación.

Se muestra a continuación la señal entregada por el receptor ultrasónico. Se utilizó la computadora dedicada PX-1020 con la tarjeta de osciloscopio PXI-5102 de National Instruments propiedad del INAMHI para obtener esta señal:

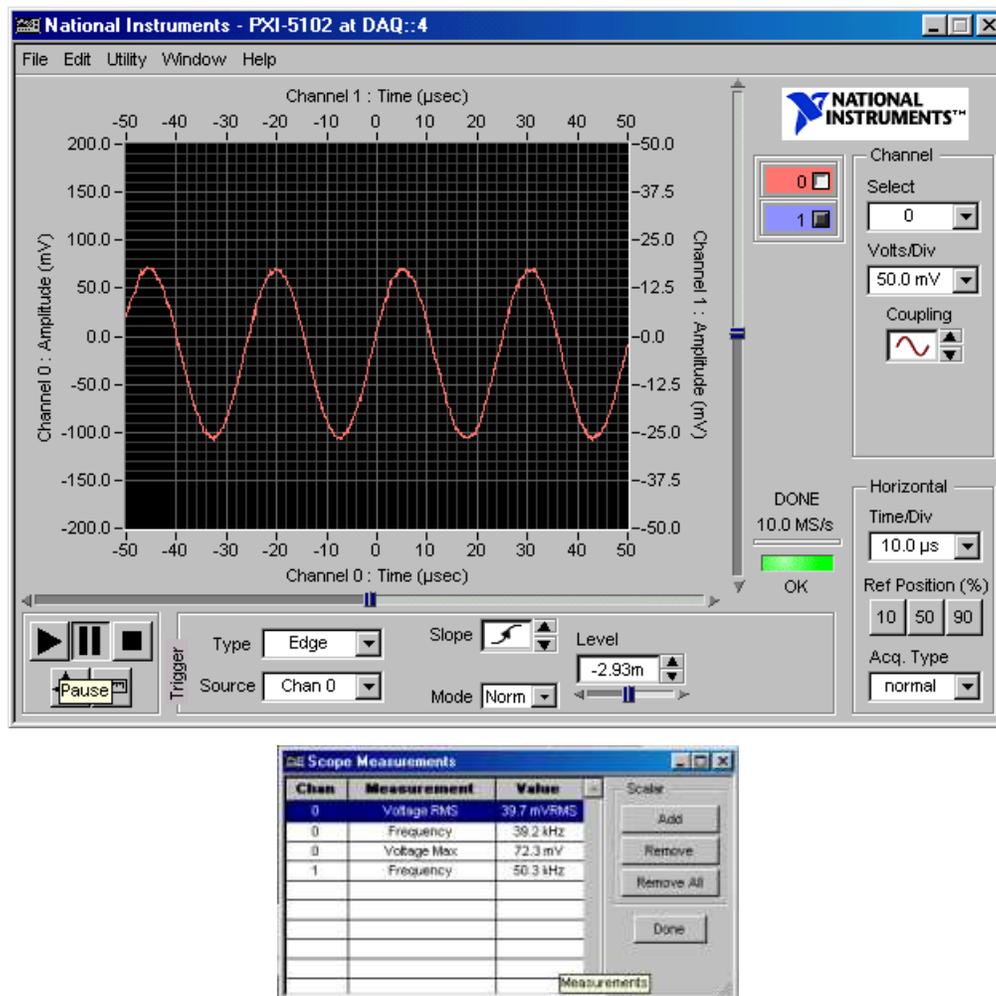


Figura 2.10 Señal entregada por el receptor ultrasónico.

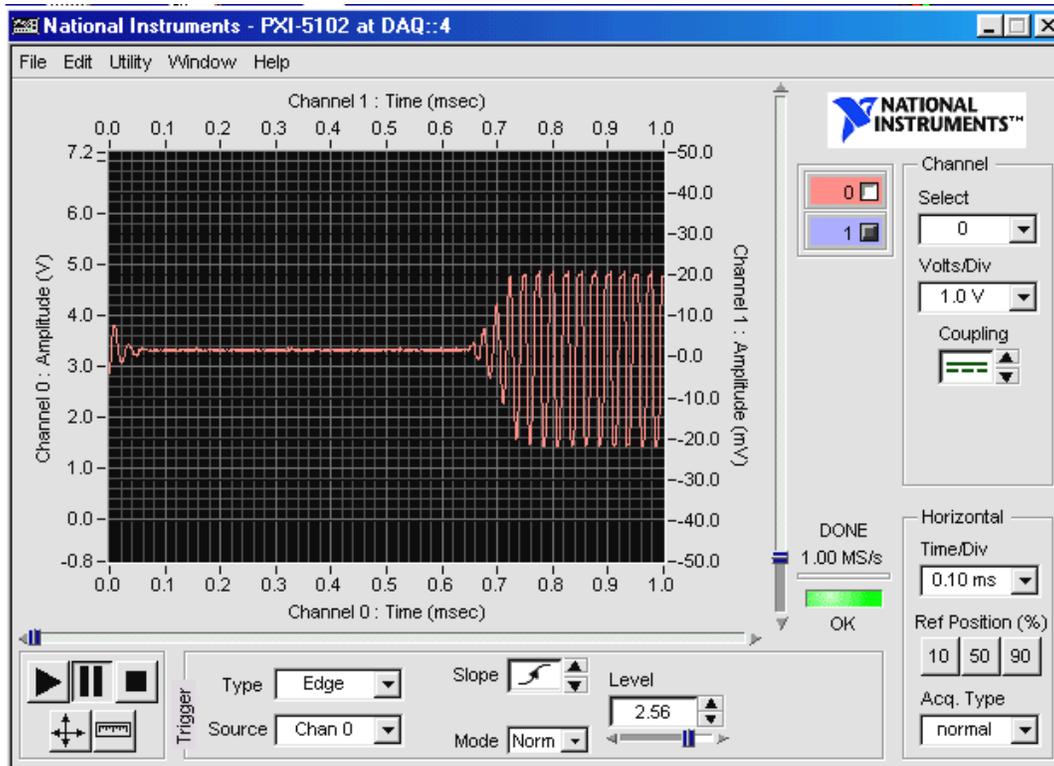


Figura 2.11 Señal amplificada.

Para obtener una señal a la salida que varíe de 3.3V a +5V y +1.6V se realizan los siguientes cálculos:

Datos:

$$V_{in} = 8mV$$

$$V_o = 1.7V$$

$$G1 = 10$$

$$V_{ref}(+) = 3.3V$$

Primera etapa:

$$G1 = -\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R2}{R1} = 10$$

Sea $R1 = 10k\Omega$

$$R2 = 10R1 = 100k\Omega$$

Segunda etapa:

Sea $R3 = 10k$

$$G2 = -\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R4}{R3} = \frac{1.7V}{8mV * 10} = 21.25$$

$$R4 = 21.25 * R3 = 210k\Omega, \text{ Resistencia estándar } R4 = 200k\Omega [2]$$

Además se suma a la señal amplificada del sensor un voltaje DC de 3.3V que es entregado por el regulador LT1086, para permitir que el conversor A/D del microcontrolador convierta tanto los semiciclos positivos como negativos de la onda.

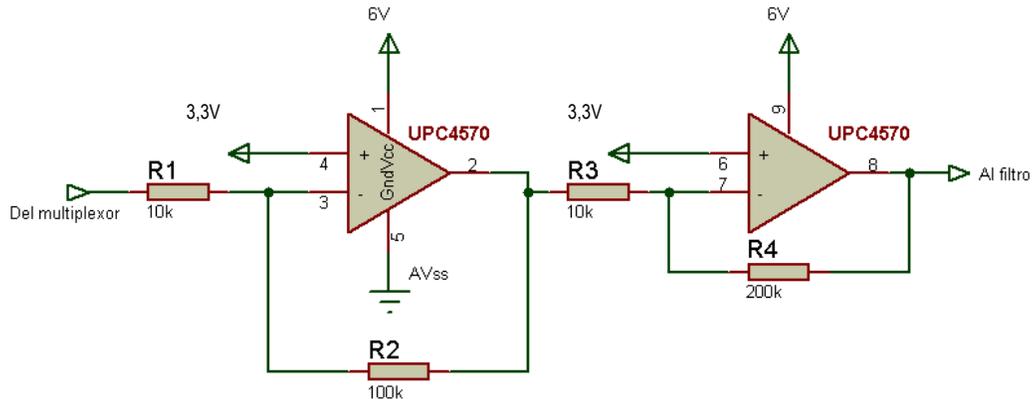


Figura 2.12 Amplificación, circuito.

2.4.5.2 Filtro

La señal amplificada tiene una amplitud aproximada de 3.4Vp-p, pero presenta ciertas distorsiones producidas principalmente por señales de frecuencias múltiplos de la frecuencia de resonancia de los transductores, o por señales de 60Hz producidas por cables de energía eléctrica.

Para obtener una señal que evite la pérdida de precisión en la medición del tiempo de vuelo se construyó un filtro activo pasa banda de frecuencia central 40KHz, factor de calidad de 10 y se utilizó el amplificador operacional UPC4570.

La resistencia R5 es la que define la resistencia de entrada del filtro, si R6 tiene un valor de $2 \cdot R5$ la ganancia máxima será de 1 (0dB) cuando la frecuencia sea la resonante. Ajustando R7 se modifica la frecuencia resonante sin cambiar el ancho de banda ni la ganancia [31].

Para ello se calcula:

Datos

$$f_r = 40\text{kHz}$$

$$Q = 10$$

Calculando el ancho de banda

$$B = \frac{fr}{Q} = \frac{40000}{10} = 4000Hz$$

Sea $C1 = 4.7nF$

$$C1 = C2 = 4.7nF$$

$$R5 = \frac{0.1591}{B * C1} = \frac{0.1591}{4000 * 4.7E^{-9}} = 8463\Omega \approx 8.2k\Omega$$

$$R6 = 2 * R5 = 2 * 8200 = 16400\Omega \approx 16k\Omega$$

$$R7 = \frac{R5}{2Q^2 - 1} = \frac{8200}{2 * 100 - 1} = 41\Omega \approx 43\Omega$$

A continuación se presenta el circuito:

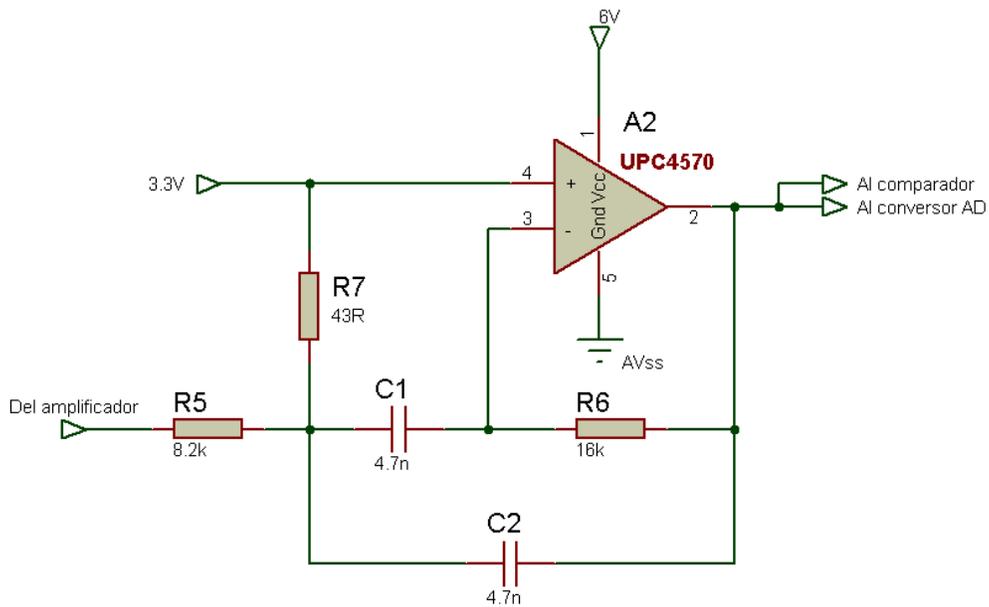


Figura 2.13 Filtro pasa banda.

Se muestra en la siguiente Figura 2.14 la señal antes (en azul) y después (en rojo) del filtro:

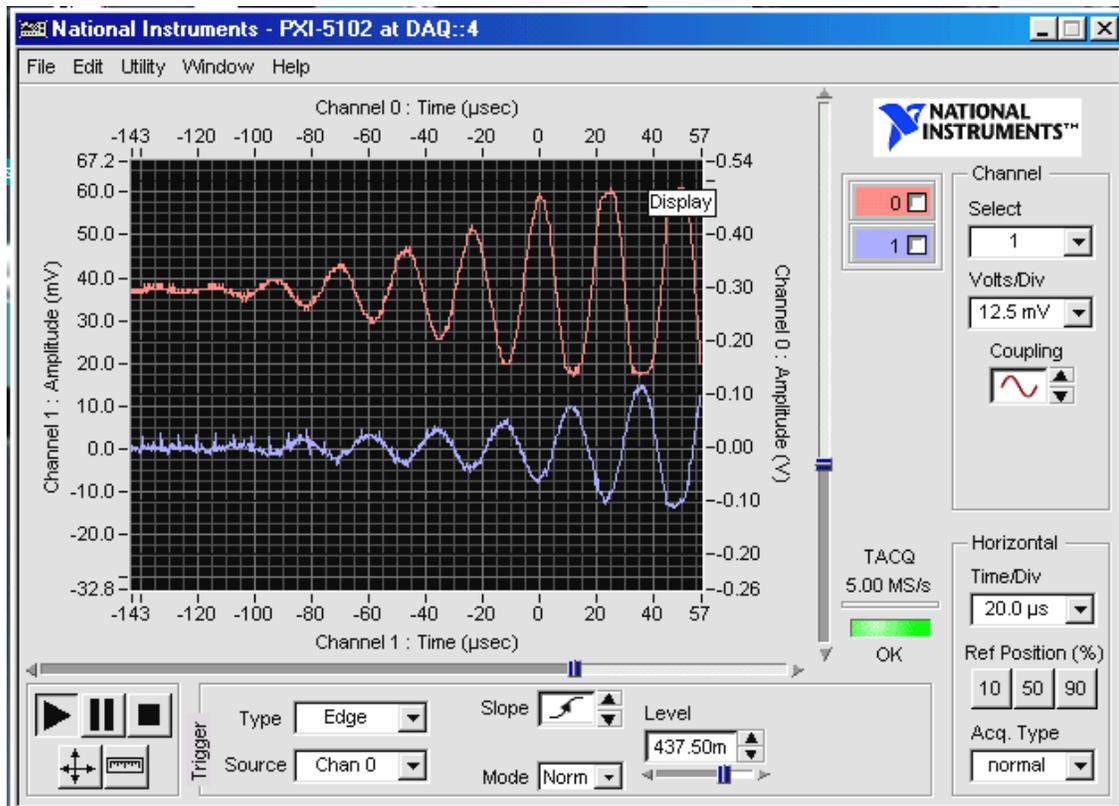


Figura 2.14 Resultados del filtro.

2.4.5.3 Conversión analógica digital

La señal filtrada se envía al conversor A/D del microcontrolador que es de 10bits y tiene una velocidad de muestreo de hasta 1Msps. Con ello se puede discretizar a la onda en pasos de 4.9mV y tomar aproximadamente 24 muestras por ciclo.

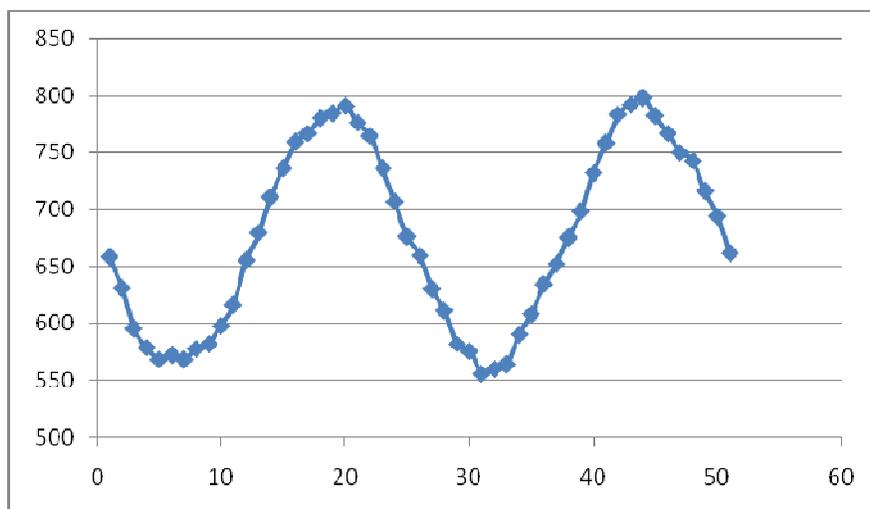
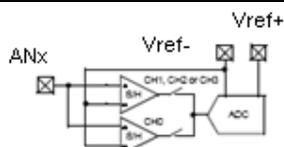
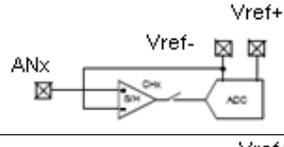
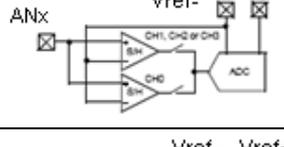
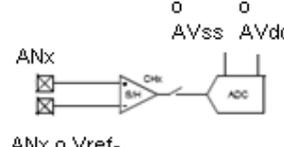
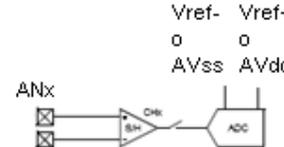


Figura 2.15 Conversión de los dos primeros ciclos de la onda ultrasónica.

El conversor A/D esta basado en la arquitectura de aproximaciones sucesivas con 16 entradas análogas que son multiplexadas por cuatro módulos Sample and Hold (SH), cuyas salidas ingresan al conversor que genera los resultados. El voltaje de referencia del conversor es configurable por software, se puede realizar la conversión con el voltaje de los pines AVdd/AVss o con los de +Vref/-Vref.

Como se trabaja a la máxima velocidad de muestreo, se implementa el circuito que recomienda el fabricante:

Tabla 2.3 Parámetros de conexión según el rango de muestreo, tomado de [35].

Velocidad de muestreo	Tad mínimo (ns)	Tiempo de muestreo mínimo	RS máximo (Ω)	VDD (V)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Configuración de canales A/D
Hasta 1MSPS (1)	83.33	12 Tad	500	4.5 a 5.5	-40 a +85	
Hasta 750 kSPS (1)	95.24	2 Tad	500	4.5 a 5.5	-40 a +85	
Hasta 600 kSPS (1)	138.89	12 Tad	500	3.0 a 5.5	-40 a +125	
Hasta 500 kSPS	153.85	1 Tad	5000	4.5 a 5.5	-40 a +125	
Hasta 300 kSPS	256.41	1 Tad	5000	3.0 a 5.5	-40 a +128	

(1) Los pines externos Vref- y Vref+ deben ser usados para la correcta operación.

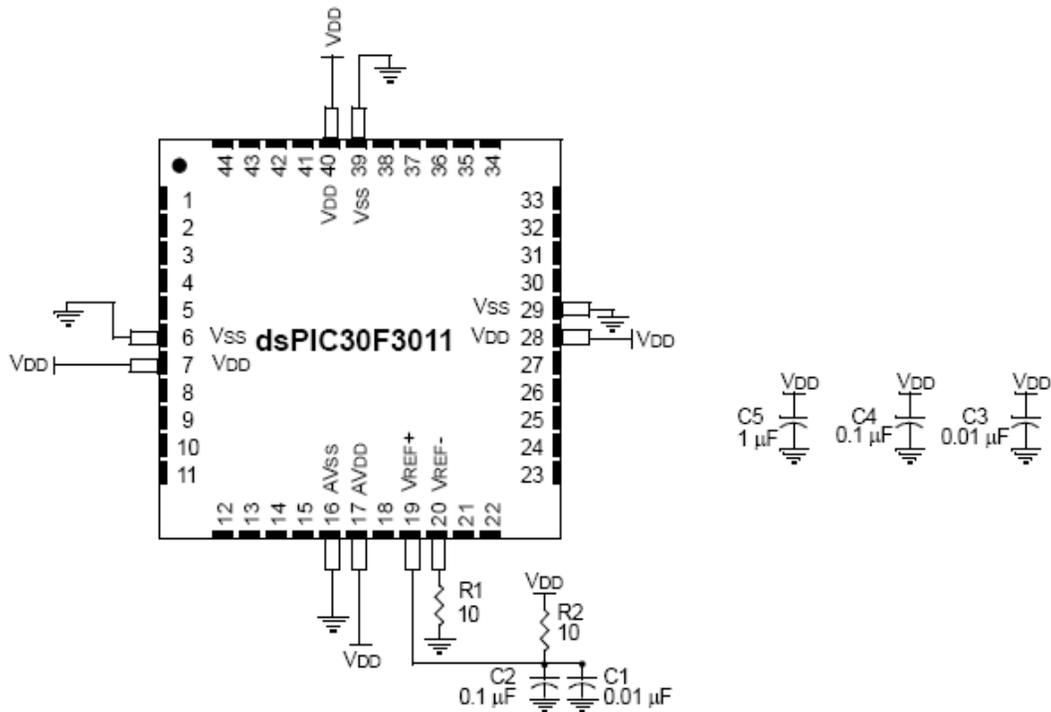


Figura 2.16 Conexiones convertor A/D, tomado de [35]

Con los valores obtenidos en la conversión se puede determinar el inicio de la onda y el número de ciclo en el que se encuentra la conversión de la señal ultrasónica. Para ello se compara el valor obtenido de la conversión con un valor mínimo referencial. Si el valor de la conversión es menor a la referencia, el programa en el microcontrolador reconoce que se encuentra en el tercer ciclo y así define el retardo desde el inicio de la onda restando el número de ciclos por el periodo de cada uno (tiempo de compensación: t_c).

A continuación se presenta la forma de detección de los ciclos:

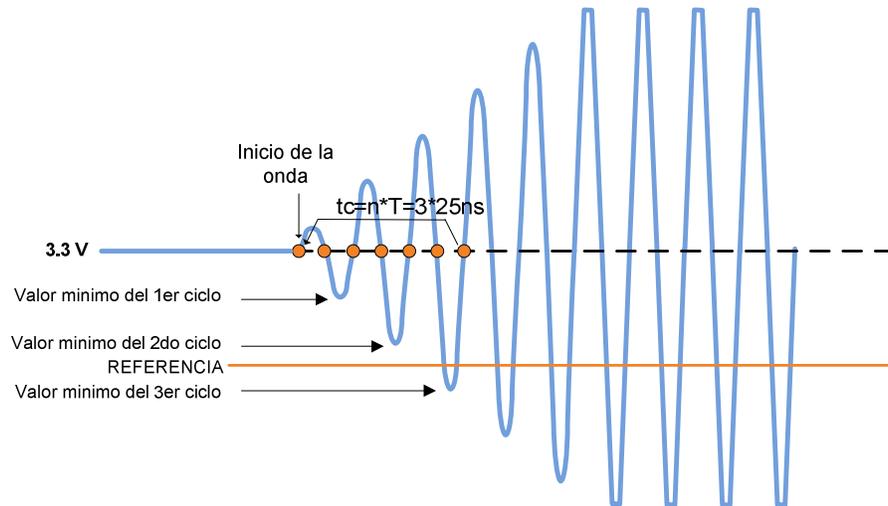


Figura 2.17 Detección de ciclos.

El circuito implementado se muestra a continuación:

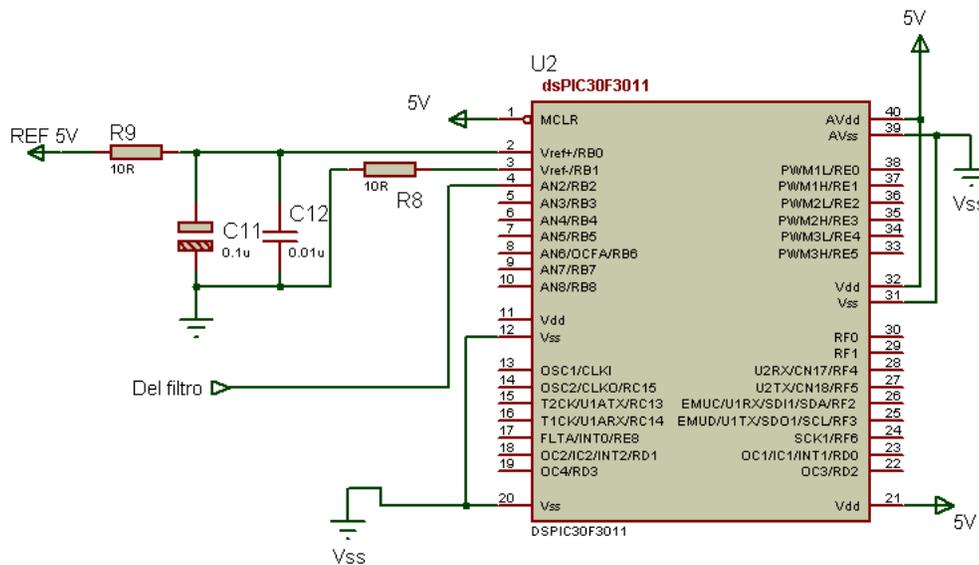


Figura 2.18 Circuito convertor A/D

2.4.5.4 Detector de cruces por la referencia

La señal filtrada ingresa a un comparador de voltaje junto con la referencia de 3.3V. Se utiliza el amplificador operacional LF353P que es de alta inmunidad al ruido y alta impedancia de entrada.

Cuando la señal es mayor a 3.3V el operacional entrega a su salida un voltaje de 5V (1 lógico), caso contrario se obtiene 0V (0 lógico). Este comparador

permite determinar por lo tanto el inicio de cada ciclo de la onda, ya que cambia de estado de 0V a 5V.

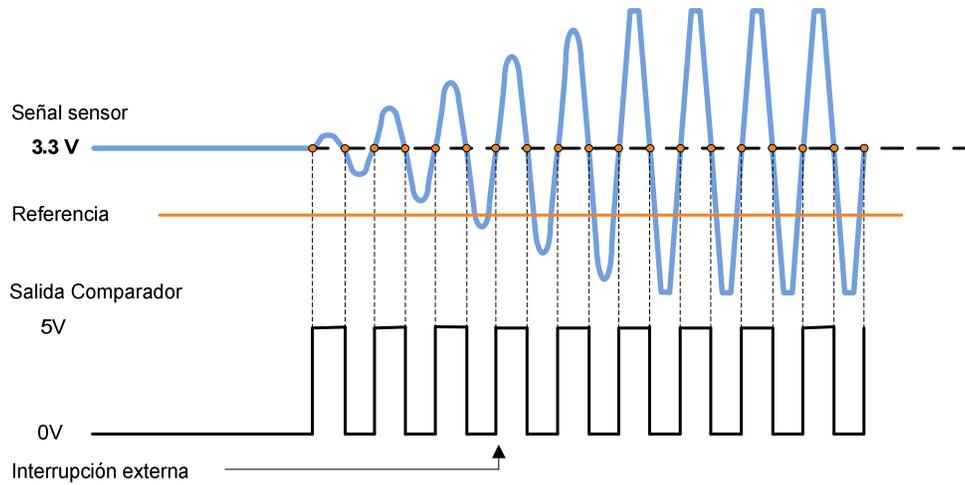


Figura 2.19 Señal de salida del comparador.

La salida del operacional ingresa a un puerto del microcontrolador configurado como interrupción externa. Cuando se detecta un cambio de estado bajo a alto, el microcontrolador entra a una subrutina de interrupción.

A continuación se presenta el circuito implementado:

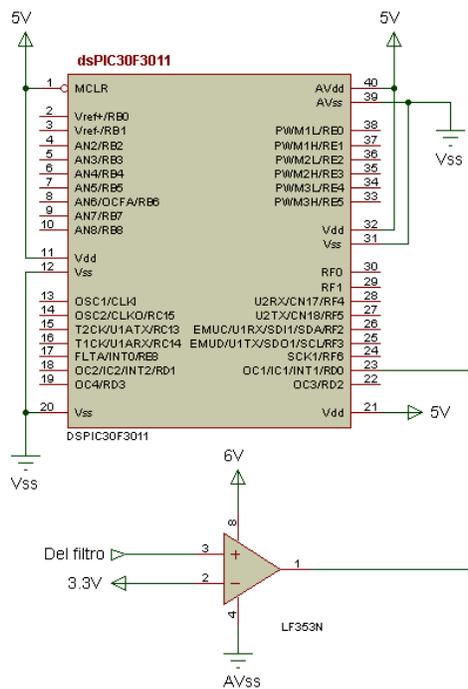


Figura 2.20 Circuito de detección de cruces

2.5 MICROCONTROLADOR

El microcontrolador es el encargado de controlar la transmisión y recepción de señales ultrasónicas, medir el tiempo de vuelo y calcular los valores de velocidad, dirección y temperatura; se encarga de manejar el banco de memorias, el reloj de tiempo real, los conversores digital-análogos y la comunicación con el HMI.

Se usa el microcontrolador dsPIC30F3011 que posee una memoria de programa FLASH de 24Kbytes, 10000 ciclos lectura/escritura y registros de 24 bits para 83 instrucciones base, programación serial en circuito (ICSP), bajo consumo de potencia por ser tecnología CMOS, rango de funcionamiento de 2.5V a 5.5V de alimentación y -40°C a 125°C de temperatura de trabajo.

Los dsPICs manejan una arquitectura de 16 bits y el 30F3011 tiene una memoria RAM de 1Kbyte.

Puede operar a una velocidad de hasta 30MIPS, es configurable el uso de un oscilador externo de 40MHz máximo o el uso de cualquiera de los dos osciladores internos RC o FRC. Además posee un pre-escalador interno que puede multiplicar la frecuencia tanto de los osciladores internos con el externo por 4, 8 y 16 para obtener frecuencias en el oscilador de hasta 120MHz.

Tiene además periféricos de control como Power on Reset(POR), Power-up timer (PWRT), Oscillator Start-up Timer (OST), Watchdog Timer (WDT), etc.

Maneja un módulo DSP que permite por hardware realizar operaciones de multiplicación y división de 16 bits.

Entre los periféricos que posee están: cinco Timers programables de 16 bits, cuatro módulos de captura, cuatro módulos de comparador de salida de 16 bits, un módulo para control de motores y un conversor análogo digital de 10 bits.

Posee además un módulo SPI, un I2C que soporta configuraciones multi-maestro o esclavo con direcciones de 7 y 10 bits, y dos módulos UART con buffers FIFO como medios de comunicación.

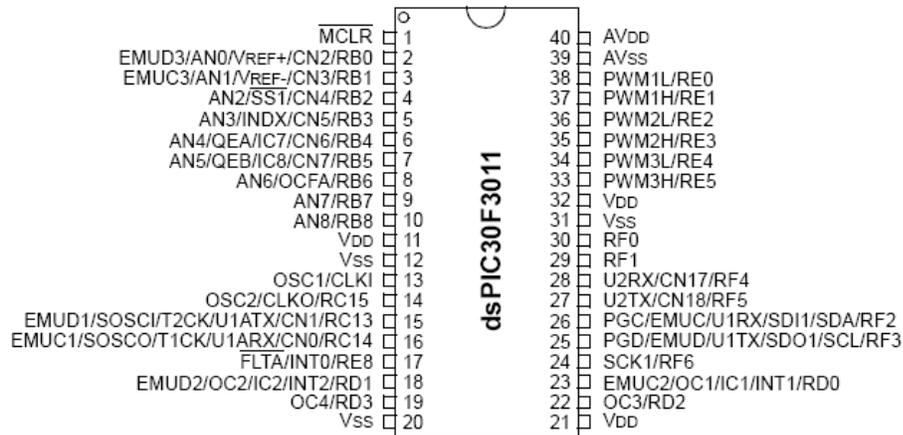


Figura 2.21 Microcontrolador dsPIC30F301

A continuación se presentan los recursos del microcontrolador utilizados en el proyecto:

Tabla 2.4 Designación de pines para el acondicionamiento de los transductores

NOMBRE	PIN	DESIGNACIÓN	FUNCIÓN
RF0	30	Salida	Control del bit LSB del multiplexor/demultiplexor CD4052
RF1	29	Salida	Control del bit MSB del multiplexor/demultiplexor CD4052
AN2	4	Entrada análoga	Entrada de la señal ultrasónica al convertor A/D
VREF+	2	Entrada análoga	Referencia positiva convertor A/D
VREF-	3	Entrada análoga	Referencia negativa convertor A/D
OC4	19	Salida	Generación de la onda cuadrada
INT1	23	Entrada	Interrupción externa

Tabla 2.5 Designación de pines para los convertores Digital/Análogos

NOMBRE	PIN	DESIGNACIÓN	FUNCIÓN
RB3	5	Salida	Habilitación del DAC para datos de velocidad del viento
BR4	6	Salida	Habilitación del DAC para datos de dirección del viento
RB5	7	Salida	Habilitación del DAC para datos de temperatura ambiente
RB6	8	Salida	Habilitación de la conversión digital análoga en los convertores
RB7	9	Salida	Señal de reloj para la comunicación SPI
RB8	10	Salida	Transmisión de datos Para la comunicación SPI

Tabla 2.6 Designación de pines para comunicación I2C con el reloj en tiempo real y el banco de memorias.

NOMBRE	PIN	DESIGNACION	FUNCIÓN
SCL	25	Salida	Señal de reloj para la comunicación I2C
SDA	26	Entrada/Salida	Transmisión y recepción de datos para la comunicación I2C

Tabla 2.7 Designación de pines para la comunicación Serial Asincrónica.

NOMBRE	PIN	DESIGNACIÓN	FUNCIÓN
U2TX	27	Salida	Transmisión de datos UART
U2RX	28	Entrada	Recepción de datos UART

2.6 CONVERTORES DIGITAL ANÁLOGO

Se utilizan los conversores digital análogo para permitir que el anemómetro ultrasónico envíe la información de velocidad, dirección y temperatura instantánea al registrador de una estación automática. Se utilizan tres conversores A/D, una para cada parámetro de medición.

A continuación se presenta el diagrama de bloques:

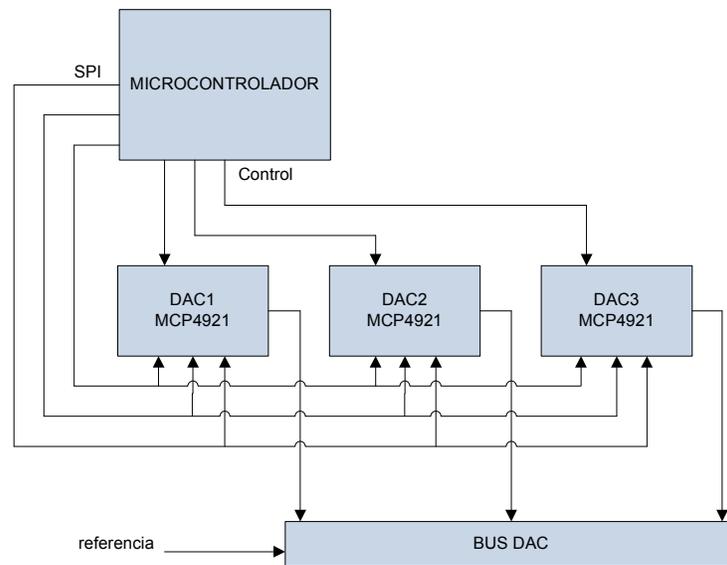


Figura 2.22 Conversión digital análogo.

Los datos calculados por el microcontrolador son enviados a las DAC que entregan a su salida un valor de voltaje proporcional al de la variable que representan.

Se utiliza el convertor digital análogo MCP4921 de Microchip, por su fácil implementación con sistemas microprocesados ya que no se necesitan más que dos líneas para la transmisión del dato digital, una para la selección de la

DAC y una para autorizar la conversión gracias a que manejan comunicación SPI (Interfaz serial de periféricos).

A pesar de que el microcontrolador posee un módulo para este tipo de comunicación no se lo utilizó debido a que los pines utilizados coinciden con los que se necesitan para la comunicación I2C, por ello se implementó este protocolo de comunicación por software realizando el control de la trama de datos y reloj mediante una rutina de programa.

Las DAC MCP4921 tienen una resolución de 12bits y una precisión típica de $\pm 0.2\%$ con respecto al bit menos significativo, poseen comunicación SPI con un reloj de hasta 20MHz y un pin para la habilitación de la conversión que demora típicamente $4.5\mu s$. Poseen un voltaje de referencia externo que en este caso es de 5V que puede ser configurado para duplicar su valor, puede trabajar con alimentación de 2.7 a 5.5V y a una temperatura de -40°C a 120°C .

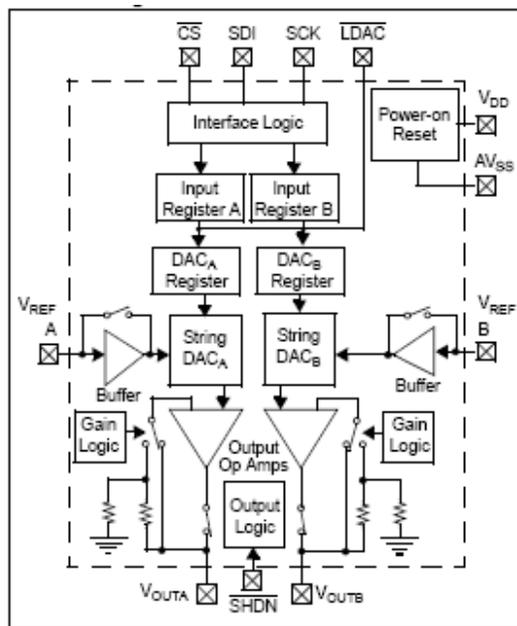


Figura 2.23 Diagrama de bloque MCP4922, tomado de [36]

Para una correcta obtención de los resultados se debe configurar en el registrador la curva característica del anemómetro para cada dato, por ello es pertinente realizar el cálculo de la recta que define la variación del voltaje versus la velocidad, dirección del viento y temperatura ambiental.

Datos:

$$V_{out_{min}} = 0V$$

Como se selecciona el pre-escalador de voltaje a 1 $V_{out_{max}} = 5V$

$$v_{min} = 0m/s$$

$$v_{max} = 25m/s$$

$$dir_{min} = 0^\circ$$

$$dir_{max} = 359^\circ$$

$$T_{min} = -10^\circ C$$

$$T_{max} = 50^\circ C$$

Ecuación de la recta:

$$(y - y_2) = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x - x_2)$$

Para la velocidad: P1(0;0), P2(5;25)

$$(y - 25) = \frac{(25 - 0)}{(5 - 0)}(x - 5)$$

$$y[m/s] = 5 * x[V]$$

Para la dirección: P1(0;0), P2(5;359)

$$(y - 359) = \frac{(359 - 0)}{(5 - 0)}(x - 5)$$

$$y[^\circ] = 71.8 * x[V]$$

Para la temperatura: P1(0;-10), P2(5;50)

$$(y - 50) = \frac{(50 + 10)}{(5 - 0)}(x - 5)$$

$$y[^\circ C] = 12 * x[V] - 10$$

Tabla 2.8 Curvas de calibración

Parámetro	Curva de calibración registrador
Velocidad [m/s]	5*X
Dirección [grados]	71,8*X
Temperatura [°C]	12*X-5

Se puede configurar en el HMI el periodo de muestreo. Este tiempo indica al microcontrolador cada cuantos segundos se realiza un ciclo de medición, lo que a su vez configura el periodo en el que se obtiene una medida diferente en las DAC. Para ello se selecciona uno de los tres valores preestablecidos de 1,2 o 4 segundos.

Los datos obtenidos de las DAC son enviados a un conector externo en el anemómetro para que pueda ser conectado a las terminales análogas del registrador. Este será el encargado de almacenar los valores y darles el tratamiento que se requiera como cálculo promedio del módulo y vector velocidad, análisis de rachas, tendencias de comportamientos según la hora, fecha o época del año, etc. Además podrá enviar las mediciones a la base de datos del INAMHI mediante comunicación satelital, SMS, GPRS u otro medio.

El circuito implementado se muestra a continuación:

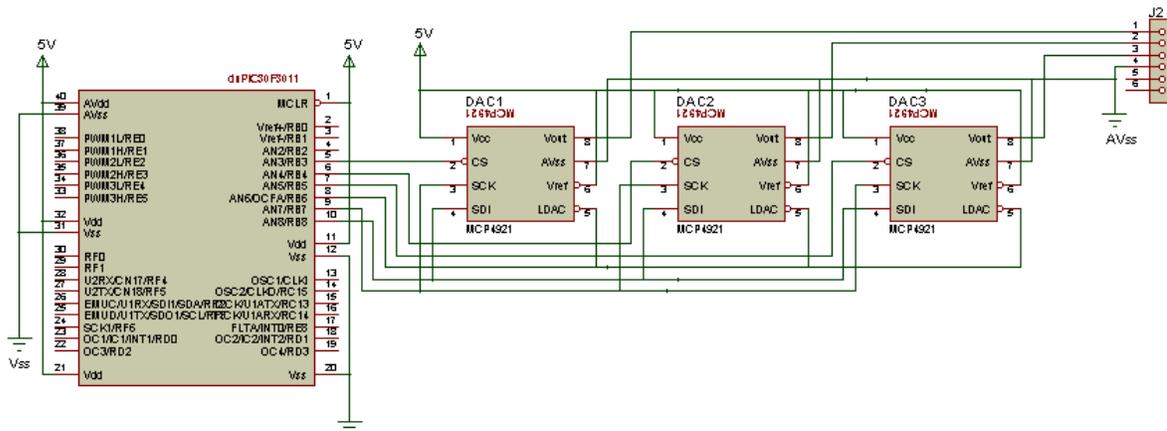


Figura 2.24 Circuito DACs

2.7 ALMACENAMIENTO DE DATOS

El anemómetro ultrasónico puede funcionar de dos maneras básicas:

- Conectado a una estación meteorológica, de la cual obtiene la alimentación necesaria. En este caso el anemómetro envía al registrador periódicamente los datos mediante sus canales análogos. Los datos son almacenados tanto en memoria del anemómetro (como respaldo) como del registrador (para el tratamiento de los datos).
- Conectado a una batería, e instalado independientemente del registrador de la estación. En este caso los datos solo se almacenan en el anemómetro y pueden ser descargados posteriormente a la PC.

A continuación se muestra el esquema de las memorias y el reloj:

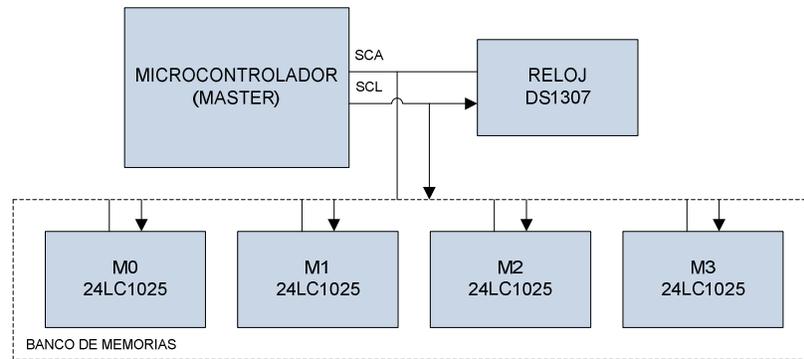


Figura 2.25 Diagrama de bloques, comunicación I2C

El circuito implementado se muestra en la figura siguiente:

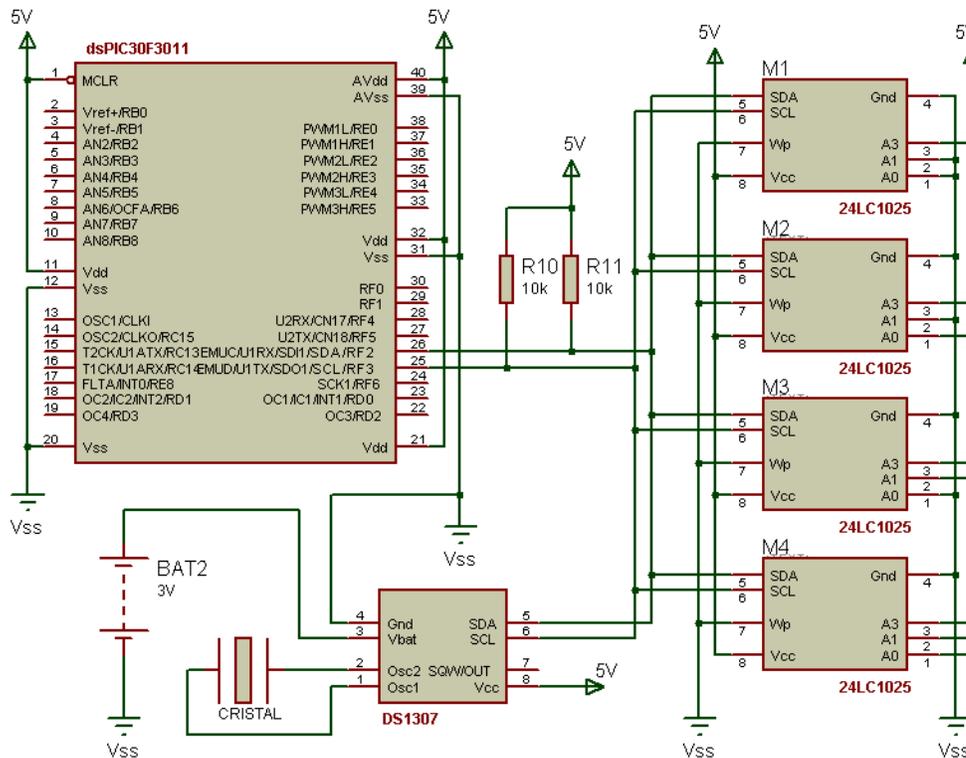


Figura 2.26 Circuito Banco de memorias y reloj I2C

2.7.1 MEMORIAS

El anemómetro cuenta en su interior con un banco de memorias no volátiles de tipo EEPROM, en las cuales se almacenan los datos periódicamente. Se utilizan cuatro memorias 24LC1025 que como principal característica poseen comunicación I2C de modo esclavo para la lectura y/o escritura de sus registros. Tienen capacidad de almacenar 128Kb x 8 (1024Kbits) con una

fuentes de 1.7 a 5.5V, son tecnología CMOS que soporta más de un millón de ciclos lectura/escritura y una retención de datos mayor a 200 años; además se puede escribir o leer sus registros de forma secuencial de la dirección 0000h a FFFFh (primer bloque) y de 10000h a 1FFFFh (segundo bloque). Su fabricante es Microchip, lo que asegura la compatibilidad con dsPICs.

Posee dos pines para la alimentación y un pin WR (write protection) que habilita o inhibe la escritura en la memoria.

La selección de la dirección de cada memoria para el protocolo I2C se la realiza por hardware, para ello se conectan los pines A0, A1 a 0V(0L) o 5V(1L). Esto determinará el valor del registro de dirección de las memorias.

La comunicación I2C utiliza dos pines: SDA(para datos) y SCL (para el reloj generado por el maestro). Se pueden colocar en el bus hasta cuatro memorias para obtener un máximo de 4Mbits en el sistema completo.

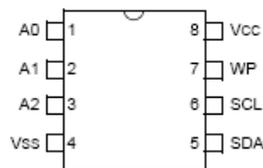


Figura 2.27 Memorias EEPROM, tomado de [37]

En las memorias se guarda la información concerniente a las medidas realizadas como velocidad y dirección, temperatura, además de la hora y fecha de la misma.

Es posible configurar mediante el HMI el periodo de almacenamiento de los datos, que indica al microcontrolador cada qué tiempo un dato será guardado en el banco de memorias.

2.7.2 RELOJ

Los valores de la fecha provienen del reloj de tiempo real DS1307. Funciona con la alimentación principal pero adicionalmente se le conecta a una batería de 3V para asegurar que no se pierda la cuenta del tiempo en caso de que la alimentación principal falle. Además requiere de un oscilador externo de

32.768kHz para mediante un divisor de frecuencia obtener una cuenta en segundos. El reloj está conectado mediante comunicación I2C de modo esclavo al microcontrolador, para ello se utilizan los pines SDA y SCL conectados al bus de comunicación junto con las memorias EEPROM.

Los valores de fecha y hora pueden ser programados mediante la comunicación I2C, para ello se escriben dichos valores en código BCD en los registros correspondientes; los mismo que pueden también ser leídos.

Puede detectar automáticamente un valor de voltaje bajo en la alimentación (menor al 1.25 del voltaje de la batería secundaria) y conmutar su fuente para utilizar la batería secundaria de 48mAh que en condiciones de trabajo normal puede durar hasta 10 años.

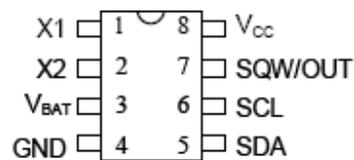


Figura 2.28 Reloj de tiempo real, tomado de [38]

Este reloj cuenta segundos, minutos, horas, días del mes, meses, días de la semana, años calendarios incluyendo los bisiestos hasta el 2100. Puede configurarse la forma de envío de las horas en formato de 24 horas o AM/PM.

Todos los datos son almacenados y enviados al microcontrolador en dígitos BCD, por ello se necesitan dos grupos de cuatro bits para los segundos, dos para los minutos, dos para las horas, uno para los días de la semana, dos para la fecha, dos para los meses y dos para los años que vienen numerados del 0 al 99.

El último registro (07H) de la memoria de configuración es usado para el control de operación del pin SQW/OUT que en este proyecto no se utiliza.

A continuación se presentan los registros de memoria del reloj:

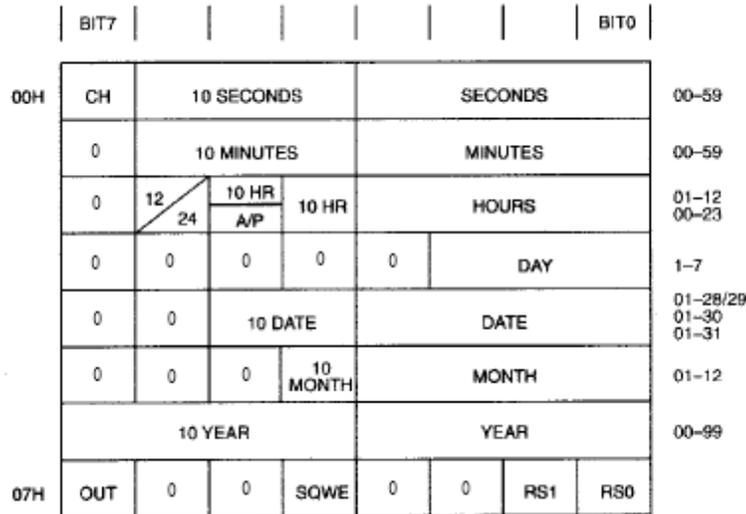


Figura 2.29 Mapa de Memoria del reloj DS1307, tomado de [38]

El anemómetro guarda junto con sus mediciones minutos, hora, fecha, mes y año.

2.7.3 CONFIGURACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE DATOS

Se puede elegir el intervalo en que se almacena la información configurando el anemómetro mediante la interfaz HMI, están disponibles opciones para periodos de 1, 2, 5 y 10 minutos.

Esta opción es necesaria ya que a pesar de que la OMM (Organización Mundial de Meteorología) manifiesta que se deben receptor datos de la velocidad y dirección del viento cada diez minutos, dependiendo de la utilidad que se va a dar a los datos a veces es necesario recolectar las medidas en intervalos más cortos de tiempo.

Para guardar una medición se necesitan un total de 8bytes. A continuación se presenta el cálculo de capacidad del banco de memorias.

Datos:

Capacidad de cada memoria – 128Kbytes

Número de memorias = 4

Espacio de memoria por dato = 8bytes

$$\text{Número de datos} = 128\text{Kbytes} * \frac{4}{8\text{bytes}} = 64000$$

$$\text{T tiempo de llenado del banco} = \frac{\text{Número de datos}}{\text{Datos guardados por hora}}$$

Para un periodo de almacenamiento de 1 minuto:

$$\text{T tiempo de llenado del banco} = \frac{64000 \text{ datos}}{\frac{1 \text{ dato}}{1 \text{ min}} * \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}}} = 44.44 \text{ días}$$

$$\text{T tiempo de llenado del banco} = 44 \text{ días, 10 horas, 40 minutos}$$

Tabla 2. 9 Duración de las memorias EEPROM

Periodo de almacenamiento	Tiempo de llenado del banco
1 min	44 días, 10 horas, 40 minutos
2 min	88 días, 21 horas, 20 minutos
5 min	222 días, 5 horas, 20 minutos
10 min	444 días, 10 horas, 40 minutos

2.8 TRANSMISIÓN DE DATOS

El anemómetro recibe principalmente datos de control y configuración, envía datos de confirmación y valores de las memorias a la interfaz HMI.

Logra comunicarse con la PC mediante comunicación serial asincrónica RS-232 de 2400 baudios, 8 bits, sin paridad y un bit de parada (8N1); se escoge este tipo de comunicación y de configuración por ser la más utilizada en los equipos meteorológicos para configuraciones y monitoreo de los equipos.

La comunicación serial es un protocolo muy común para transmisión de datos, es también un protocolo común utilizado por varios aparatos para instrumentación y puede ser utilizada para adquisición de datos si se usa en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo [32].

Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) Tierra (o referencia), (2) Transmitir, (3) Recibir. Se utiliza una conexión de MODEM nulo para la comunicación entre el anemómetro y la computadora, por ello se usa un cable serial (cruzadas la línea de transmisión y recepción) con conectores DB9. El largo del cable puede llegar hasta los 15 metros. [32]

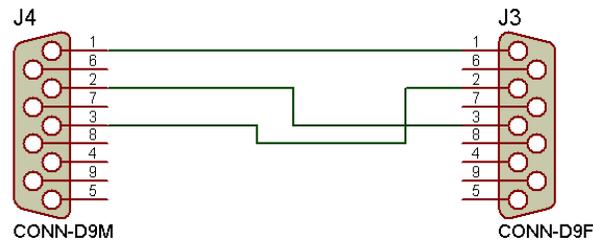


Figura 2.30 Conexión cable serial.

Las características más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales. [3]

El microcontrolador utiliza el módulo UART para la comunicación serial, al cual se le configura con las especificaciones mencionadas.

Los datos que manejan tanto la computadora como el microcontrolador están en formato ASCII. Cuando el usuario del HMI transmite un comando de control o configuración, el microcontrolador lo procesa y cambia los parámetros correspondientes para posteriormente enviar un mensaje de confirmación a la PC. Si lo que desea es descargar los datos guardados en el banco de memorias la computadora envía un comando indicándole al microcontrolador que lea el banco de memorias y envíe su información. Pero si el usuario desea realizar el monitoreo del anemómetro la computadora le indica al microcontrolador que envíe los datos instantáneos que son los mismos que se obtienen en los conversores digital análogos.

Es posible realizar solo una acción a la vez y el microcontrolador deshabilita la comunicación al cerrar la interfaz con el usuario.

Para la conversión de voltajes TTL del microcontrolador a los requeridos por el estándar RS-232 se utiliza una interfaz. A continuación se presenta el diagrama de bloques:

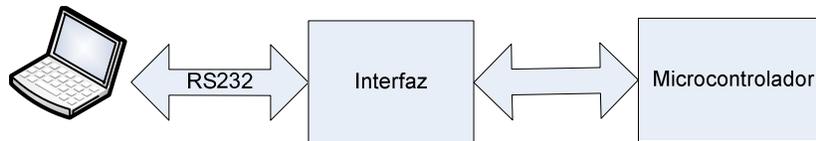


Figura 2.31 Diagrama de bloques comunicación serial.

La interfaz está compuesta principalmente por el circuito integrado MAX-232, que permite cambiar los voltajes de 0 a 5V que maneja el microcontrolador a $\pm 12V$ que maneja el puerto de comunicación serial del computador. Para ello se requiere también el uso de elementos adicionales que requiere el circuito integrado, los mismos que recomienda el fabricante:

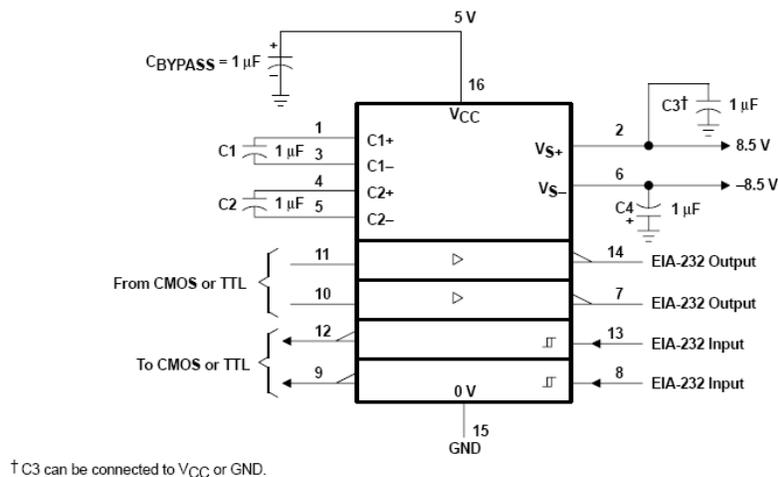


Figura 2.32 Diagrama de conexión del MAX-232, tomado de [39].

A continuación se presenta el circuito implementado:

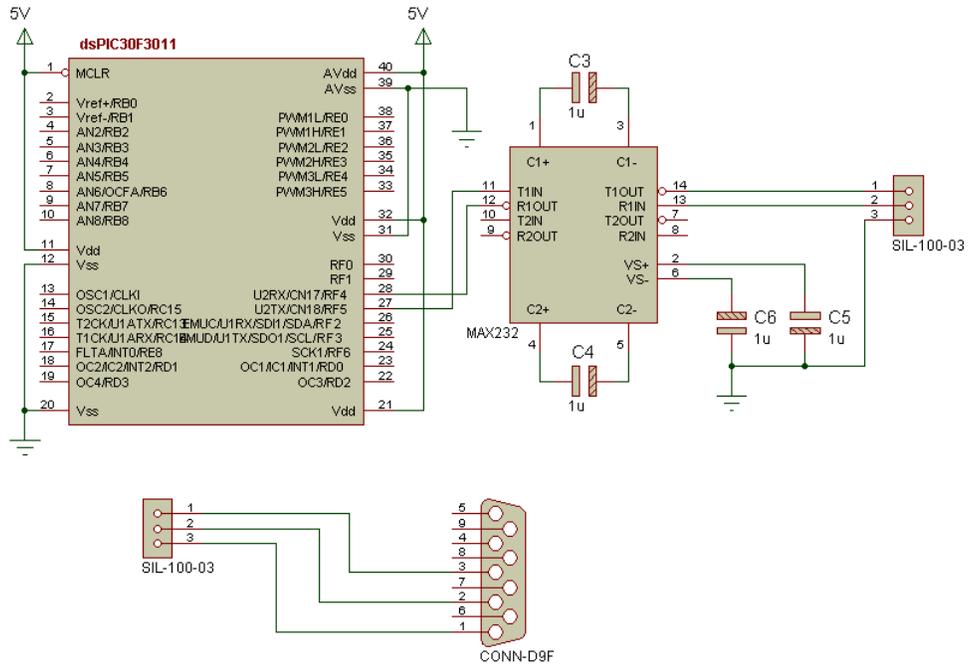


Figura 2.33 Circuito interfaz serial RS-232.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

El microcontrolador dsPIC30F3011 constituye el eje central del sistema, como se muestra en la arquitectura general de la Figura 2.1, en el presente capítulo se muestra el programa de control implementado tanto en el microcontrolador como en la interfaz HMI. El programa de control se desarrolló en el entorno de programación MPLAB C30, mientras que la interfaz HMI que permite la configuración, monitoreo de la medición y descarga de datos se la realizó en LABVIEW 6.1.

3.1 PROGRAMA DE CONTROL

El papel del microcontrolador es interconectar los diferentes sistemas. Su función principal es generar la secuencia de medición, realizar los respectivos cálculos para obtener los valores de velocidad, dirección y temperatura y presentarlos tanto en forma análoga como digital. Además de ejecutar el almacenamiento de datos y permitir la interconexión con la interfaz HMI.

Para ello se ejecutan 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.

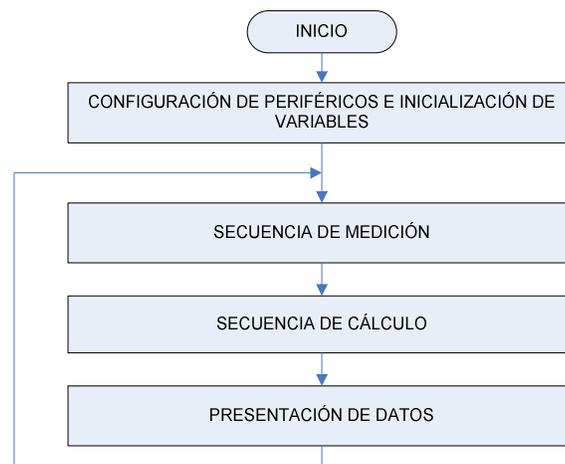


Figura 3.1 Estructura general de programa de control

3.1.1 SECUENCIA DE CONFIGURACIÓN

La rutina inicial del programa es la correspondiente a la configuración de todos los periféricos utilizados, además de la inicialización de variables de configuración. A continuación se muestra el diagrama de flujo de esta secuencia y se detalla cada una de las subrutinas:

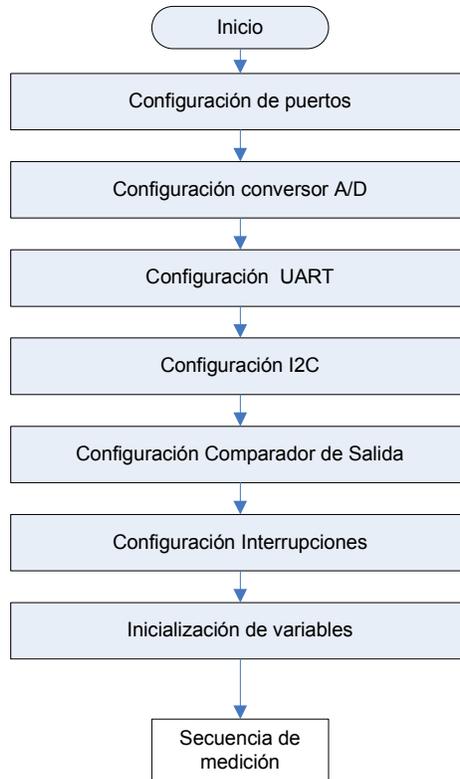


Figura 3.2 Estructura de la secuencia de configuración e inicialización de variables

3.1.1.1 Configuración de Puertos

Los diferentes pines del microcontrolador son configurados como entradas o salidas, análogas o digitales según su función. Para el efecto se utilizan los registros de configuración TRISx donde x corresponde al nombre del puerto. En el microcontrolador dsPIC30f3011 los pines correspondientes al pórtico B pueden ser configurados como análogos o digitales a través del registro ADCPFG.

Los pines correspondientes a Vref+, Vref- y RB2 son configurados como entradas análogas para el conversor A/D. El pin correspondiente a la interrupción externa es configurado como entrada digital, los demás pines usados son configurados como salidas digitales para la comunicación SPI, control de multiplexor/demultiplexor análogo y comprador de salida. Para los módulos UART e I2C no es necesario configurar los pines de salida.

3.1.1.2 Configuración Conversor A/D

Para su configuración se utilizan los registros: ADCHS, ADCON1, ADCON2, ADCON3 y ADSSL. La configuración elegida permite alcanzar 1Msps, a través del canal 0 conectado al pin RB2. Se seleccionó la opción de Autoconvert con un tiempo de adquisición $T_{ad}=83.33ns$ y un tiempo de muestreo de $2T_{ad}$. La opción autoconvert implica que el conversor una vez transcurrido el tiempo de muestreo automáticamente empieza el ciclo de conversión, mientras que el de muestreo se inicia manualmente al setear el bit Automatic Sampling. Para esta operación se seleccionó además como voltajes de referencia a los pines Vref+ y Vref- equivalentes a RB0 y RB1.

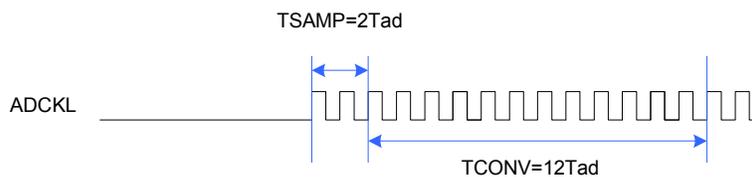


Figura 3.3 Diagrama de tiempos Conversor A/D

3.1.1.3 Configuración UART

El transmisor y receptor universal asincrónico permite la comunicación del sistema con el puerto RS-232. Para su configuración se utilizaron los registros U2BRG, U2TXREG, U2STA y U2MODE. El puerto se configuró para una velocidad de 2400 baudios, y se utilizó su interrupción para la recepción.

3.1.1.4 Configuración I2C

El periférico de comunicación I2C permite enviar y recibir datos hacia el reloj de tiempo real y las memorias EEPROM. Para la configuración se usaron los registros I2CBRG e I2CCON. Debido a que tanto las memorias como el reloj de tiempo real pueden soportar una frecuencia de reloj máxima de 100KHz, el periférico se configuró para esta velocidad de transmisión.

3.1.1.5 Configuración del módulo comparador de salida

Este módulo permite generar una señal cuadrada para transmitir a los transductores y producir la señal ultrasónica. La señal generada tiene una frecuencia de 40 KHz y un ancho de pulso de 0.5. Se eligió el módulo OC4 asociado con el Timer TMR3 para la operación. Además se configuró el pin RD3 como salida digital. Los registros usados son: PR3, OC4R, OC4RS y OC4CON.

3.1.1.6 Configuración de Interrupciones

Se configuró la interrupción correspondiente al TMR1 con una prioridad seis de siete, esta permite establecer el periodo en el cual un nuevo dato será almacenado en las memorias EEPROM. La subrutina correspondiente será explicada más adelante.

Además se configuraron las interrupciones de recepción del módulo UART con prioridad cinco.

En el desarrollo del programa se configuran, activan y desactivan otras interrupciones como la del Timer2, Timer3, Timer5 e Interrupciones externas.

3.1.1.7 Inicialización de Variables

El proceso de inicialización de variables, incluye asignar los valores iniciales a las distintas variables ocupadas en el proceso como son: contadores, variables auxiliares y datos finales.

Además existen algunas variables de configuración que son almacenadas en los primeros bytes de las memorias EEPROM, estos valores corresponden al periodo de almacenamiento, al siguiente espacio de memoria disponible para el almacenamiento de datos y al periodo de muestreo.

El mapa de memoria en la que son almacenados estos valores se muestra en la Figura 3.4:

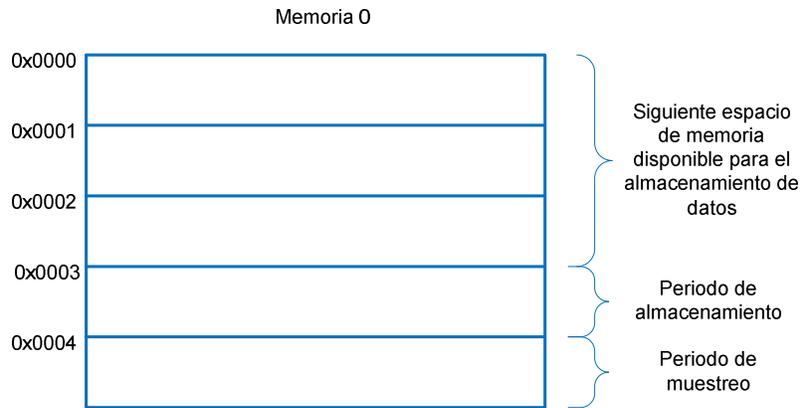


Figura 3.4 Mapa de memoria EEPROM para el almacenamiento de variables de configuración

Los elementos almacenados son:

- Espacio de memoria disponible.- El espacio total para el almacenamiento de datos es de 256kB x4, por lo que para el manejo de direcciones se utiliza una variable de 19 bits. Los primeros 16 bits corresponden a la dirección en cada bloque de la memoria, el bit 17 indica en que bloque de la memoria será almacenado el dato, mientras que los dos últimos bits indican el número de la memoria.

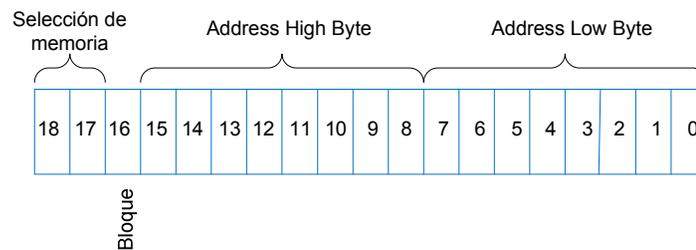


Figura 3.5 Variable para el direccionamiento de datos en memoria

Esta variable de 19 bits es almacenada en los primeros 3 bytes de la memoria 0 (con dirección 0xA0) cada hora y en el momento de la descarga de datos. Al reiniciar el programa se leen estos espacios de

memoria y se carga el dato correspondiente a esta variable en RAM para las posteriores secuencias de almacenamiento.

- Periodo de almacenamiento.- La interfaz HMI permite configurar el periodo en el que un nuevo dato será almacenado, este puede corresponder a 1, 2, 5 o 10 minutos. El valor de este dato es almacenado en la dirección 0x03 de la memoria 0xA0. Al reiniciarse el programa el dato es cargado en una variable de RAM con el fin de que de que la última configuración aplicada sea la usada en la siguiente ejecución.
- Periodo de muestro.- Este valor corresponde al periodo en que una nueva secuencia de medición será realizada y que un dato será enviado a las conversores análogos y a la interfaz HMI. De igual forma que el anterior este valor es configurado en la interfaz.

Las memorias EEPROM se manejan con el protocolo de comunicación I2C. La trama para la lectura se muestra en la figura:

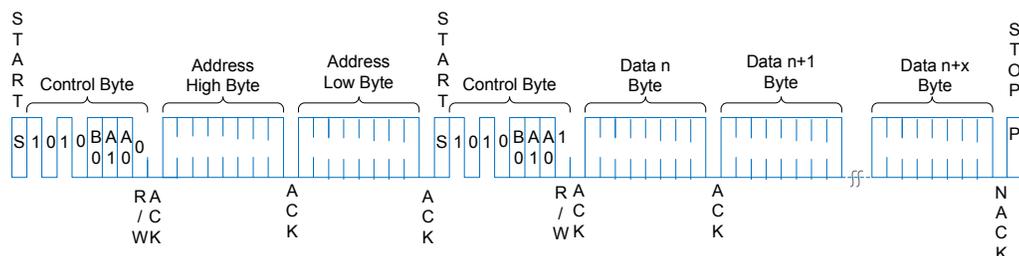


Figura 3.6 Trama para la lectura secuencial de una memoria EEPROM MCP4921

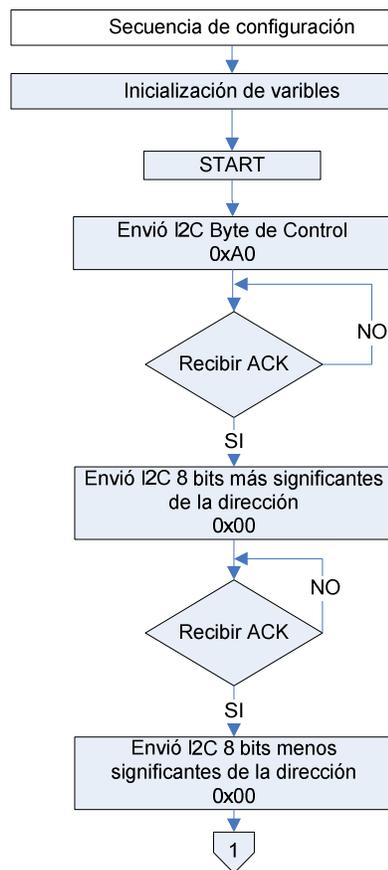
Las condiciones de START, STOP, ACK, NACK, RESTART, lectura y escritura fueron configuradas como subrutinas y serán expuestas posteriormente.

Para la rutina de inicialización de variables se procede en primer lugar a ubicar el puntero en la dirección en la cual se encuentra el dato que se quiere leer, en este caso 0x00. Para ello se inicia una secuencia de escritura. Se genera una condición de START en el bus I2C, se envía inmediatamente el byte de control (0xA0) que en este caso indica que se requiere escribir en el bloque 0 de la memoria 0xA0, se envía a continuación la dirección que se quiere leer en dos

bytes. Cada una de las tramas deberá estar seguida de la recepción de un acuse de recibo (ACK).

Una vez inicializado el puntero de la memoria se genera una condición de RESTART seguida del byte de control (0xA1) indicando que se realizará una lectura. La memoria genera un acuse de recibo (ACK) y posteriormente empezará a enviar los datos, por cada dato enviado el microcontrolador responde con un acknowledge. Al recibir el séptimo dato el microcontrolador generará un no-acknowledge (NACK) seguido de una condición de parada STOP que finaliza la comunicación.

Los datos leídos se almacenarán en la memoria RAM para luego iniciar la secuencia de medición.



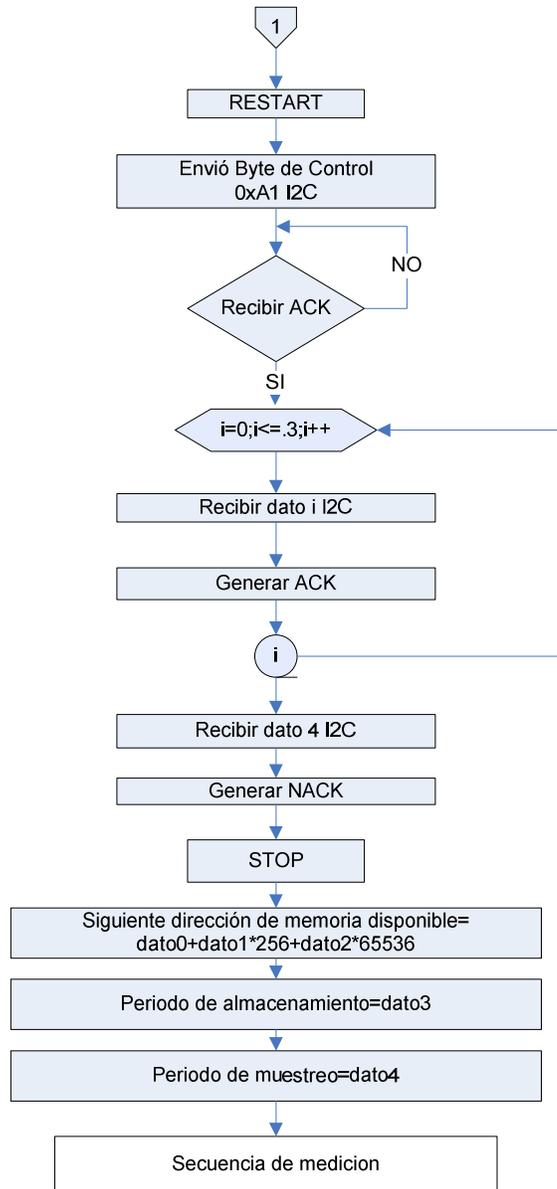


Figura 3.7 Diagrama de bloques secuencia de inicialización de variables

3.1.2 SECUENCIA DE MEDICIÓN

La estructura general de la secuencia de medición se muestra en la Figura 3.8. Cada una de sus etapas se explicará en detalle a continuación:

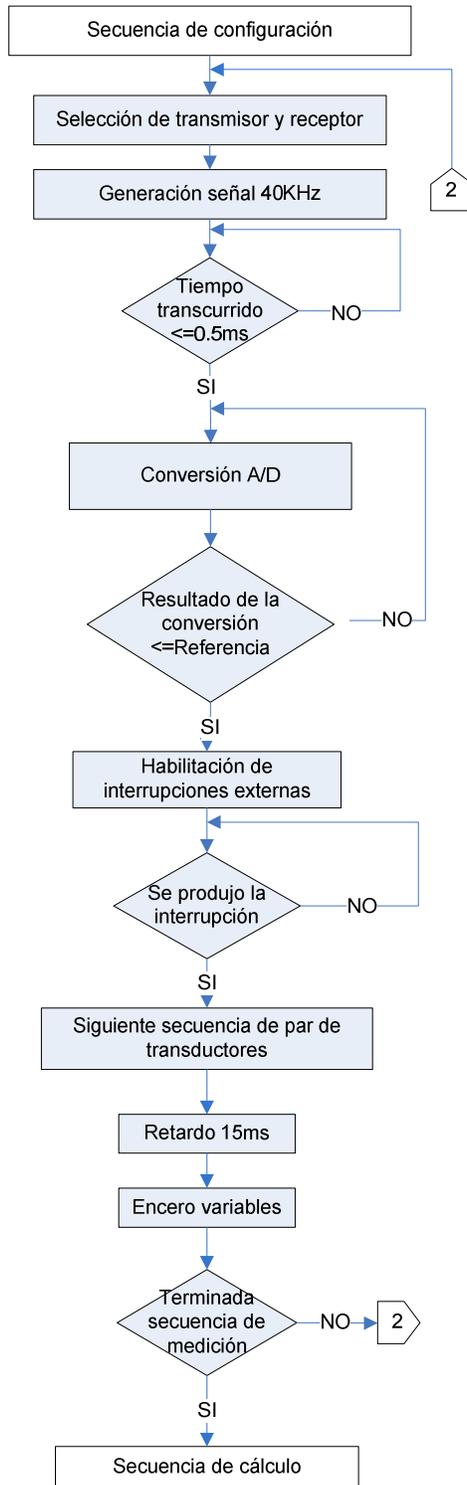


Figura 3.8 Diagrama de flujo general de la Secuencia de medición

3.1.2.1 Selección del emisor y receptor

La selección del emisor y receptor se realiza a través de RF0, y RF1 que se conectan a los pines de control del multiplexor/demultiplexor análogo. Se cuenta con una variable que puede tomar valores del 0 al 3, la cual es escrita en el pín F; de esta forma al incrementar dicha variable es posible seleccionar los diferentes transductores. Esta variable es incrementada después de medir el tiempo de vuelo de la señal. Cuando la variable es igual a cuatro se encera nuevamente, permitiendo realizar las mediciones con la secuencia mostrada en la tabla siguiente.

Tabla. 3.1 Secuencia de transductores

VARIABLE	RF1	RF0	TRANSMISOR	RECEPTOR
0	0	0	Transductor Norte	Transductor Sur
1	0	1	Transductor Sur	Transductor Norte
2	1	0	Transductor Este	Transductor Oeste
3	1	1	Transductor Oeste	Transductor Este

3.1.2.2 Generación de la señal de 40 KHz

Para la generación de la señal de 40 KHz se utiliza el módulo comparador de salida que permite generar señales cuadradas de ancho de pulso variable. Debido a que únicamente se deben generar cuatro pulsos para la medición, se habilita la interrupción del TMR3 que está asociado al módulo de comparación. Se genera una interrupción cada vez que el Timer3 se desborda, es decir cada vez que se cumple un ciclo de la señal, por lo que en la rutina de interrupción se cuenta el número de ciclos. Al cumplirse el cuarto ciclo se apaga el timer y se deshabilita la interrupción.

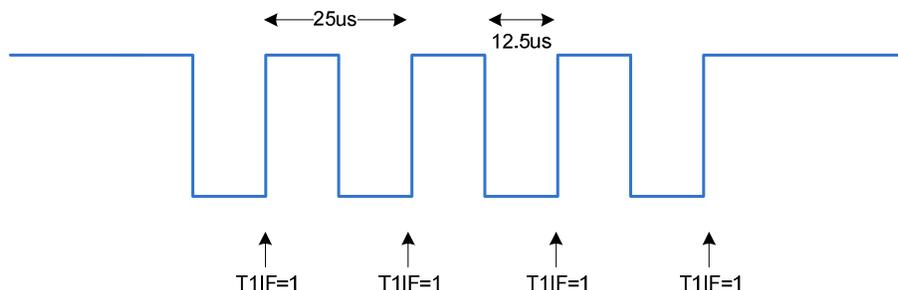


Figura 3.9 Forma de onda generada

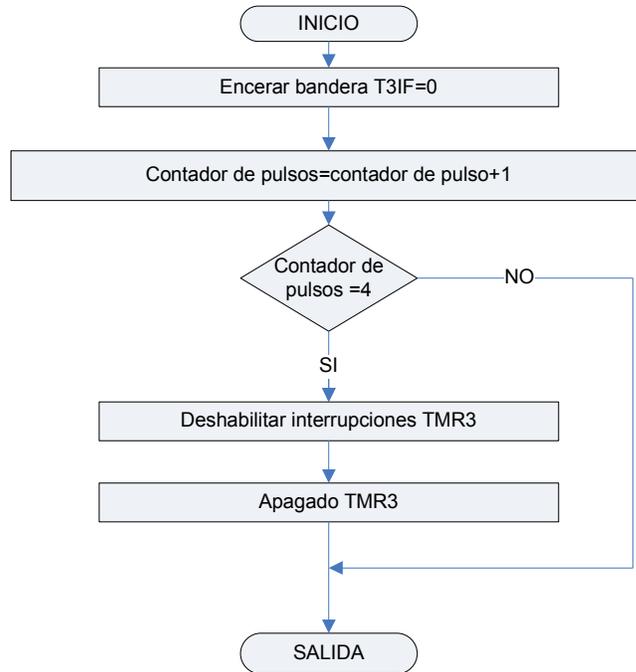


Figura 3.10 Diagrama de flujo interrupción TMR3

3.1.2.3 Conversión A/D y detección de interrupción externa

Cuando se genera la señal ultrasónica se habilita el Timer2 para contar el número de ciclos de máquina que transcurren hasta que se produzca una interrupción externa. El Timer2 sirve además para generar un retardo de 15000 ciclos de máquina (0.51ms) antes de empezar a realizar conversiones sucesivas. Cada valor de la conversión es comparado con una referencia, si este es menor a dicha referencia se deshabilitan las conversiones y se habilita y configura la interrupción externa INT1. El programa mediante un lazo while espera a que se produzca la interrupción tomando como referencia una bandera que es escrita en la rutina de interrupciones.

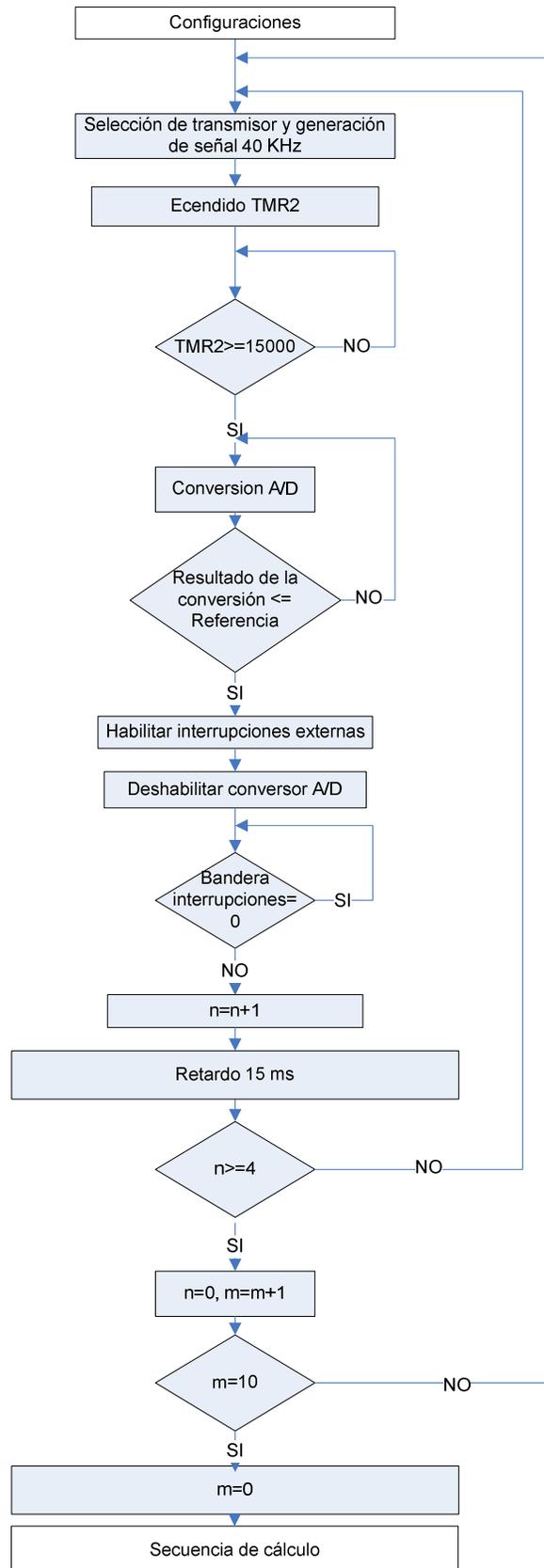


Figura 3.11 Diagrama de flujo secuencia de medición

En la rutina de interrupciones el valor correspondiente al TMR2 es almacenado en un elemento (n,m) de una matriz de 4x10, donde las filas n corresponden al número del sensor que genera la señal y las columnas m al número de medición realizada.

Posteriormente se deshabilita la interrupción externa, se escribe 1L en la bandera que indica al programa principal que se recibió la interrupción, y se encera la bandera de la interrupción INT1IF.

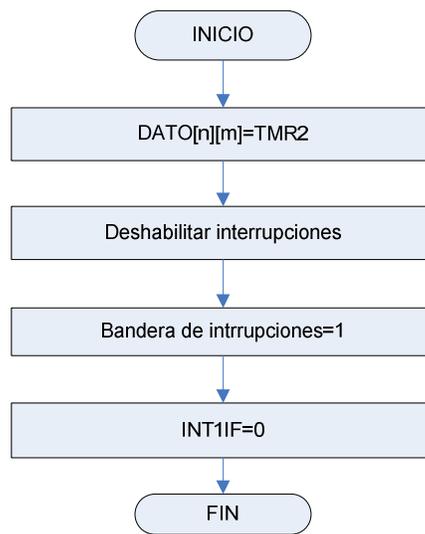


Figura 3.12 Diagrama de flujo interrupción INT1

3.1.2.4 Retardo y re-inicialización de variables

Al terminar la recepción de una onda ultrasónica se genera un retardo de 15ms para evitar la detección de ondas de rebote en la siguiente medición, además se enceran todas las variables entre las que están por ejemplo: la bandera que indica al programa principal que se detectó en la conversión un valor menor a la referencia, la variable que indica que se produjo una interrupción externa y el registro TMR2.

3.1.3 SECUENCIA DE CÁLCULO

De la secuencia anterior se obtuvo una matriz, cada uno de los valores representa el tiempo que se demora la señal en ser detectada. Estos son los datos que permitirán obtener los valores de velocidad, dirección y

temperatura. Debido a que suelen presentarse errores en la medición por diversos factores, se realiza en primer lugar un filtrado de datos. Si los datos son válidos se calcula un promedio de los datos obtenidos y con esos promedios se aplican los algoritmos de cálculo para obtener el valor de velocidad, dirección y temperatura.

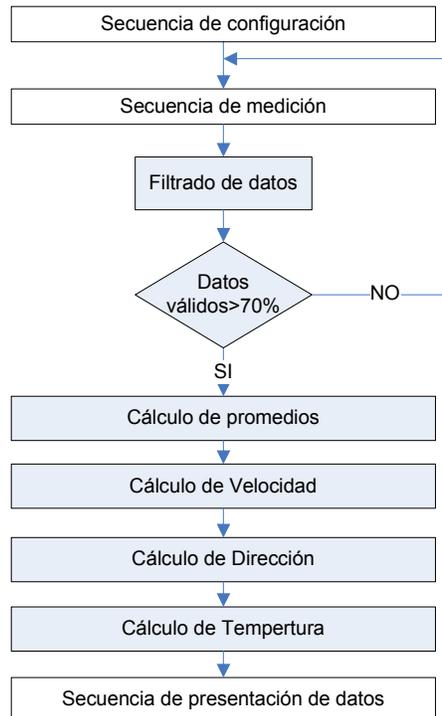


Figura 3.13 Diagrama de flujo general Secuencia de cálculo

3.1.3.1 Filtrado de datos

La variación de la amplitud característica de la señal que se explicó en el capítulo anterior puede causar que el ciclo detectado no sea el correcto. Si la amplitud decrece, se detectará el cuarto ciclo, si se produce el efecto contrario se detectará el ciclo anterior, produciendo una diferencia de 0.025 ms en las mediciones.

Este tipo de eventos pueden afectar gravemente el cálculo si se incluyen estos datos para el cómputo del promedio.

Para discriminar si el dato corresponde a un dato válido o no, se calcula el promedio entre los datos tomados por cada receptor, se compara cada uno de

los datos con dicho promedio y si este posee una diferencia superior a 235 del promedio, el dato se considera como no válido.

Si todos los datos son correctos el promedio corresponde a la suma de los valores dividido para diez.

En el caso extremo si existen tres datos erróneos el promedio sufre una desviación que se puede calcular como:

Datos:

Sea x el valor medido en el tercer ciclo de la onda

y el valor medido en un ciclo posterior

P el promedio calculado

T el periodo de la onda ultrasónica

CM el tiempo de un ciclo de máquina del microcontrolador

El periodo en ciclos de máquina será:

$$T' = \frac{T}{1CM} = \frac{0.025ms}{33.92 \times 10^{-9}} = 737CM \quad (3.1)$$

El promedio con ningún dato erróneo es:

$$P = \frac{10x}{10} = x \quad (3.2)$$

El promedio con tres datos erróneos es:

$$P' = \frac{7x + 3y}{10} \quad (3.3)$$

Dado que $y = x + 737$

$$P' = \frac{7x + 3(x + 737)}{10} = \frac{10x + 2111}{10} = x + 221 \quad (3.4)$$

La diferencia entre los promedios es:

$$P - P' = 221 \quad (3.5)$$

El valor de 221 corresponde a la desviación máxima del promedio en el caso de tener 3 datos adelantados o atrasados un ciclo, por lo que es el valor referencial para discriminar si un dato es considerado en el cálculo del promedio.

Todos los cálculos y verificación de errores se realizan con lazos "for". Los diagramas de flujo se muestran a continuación:

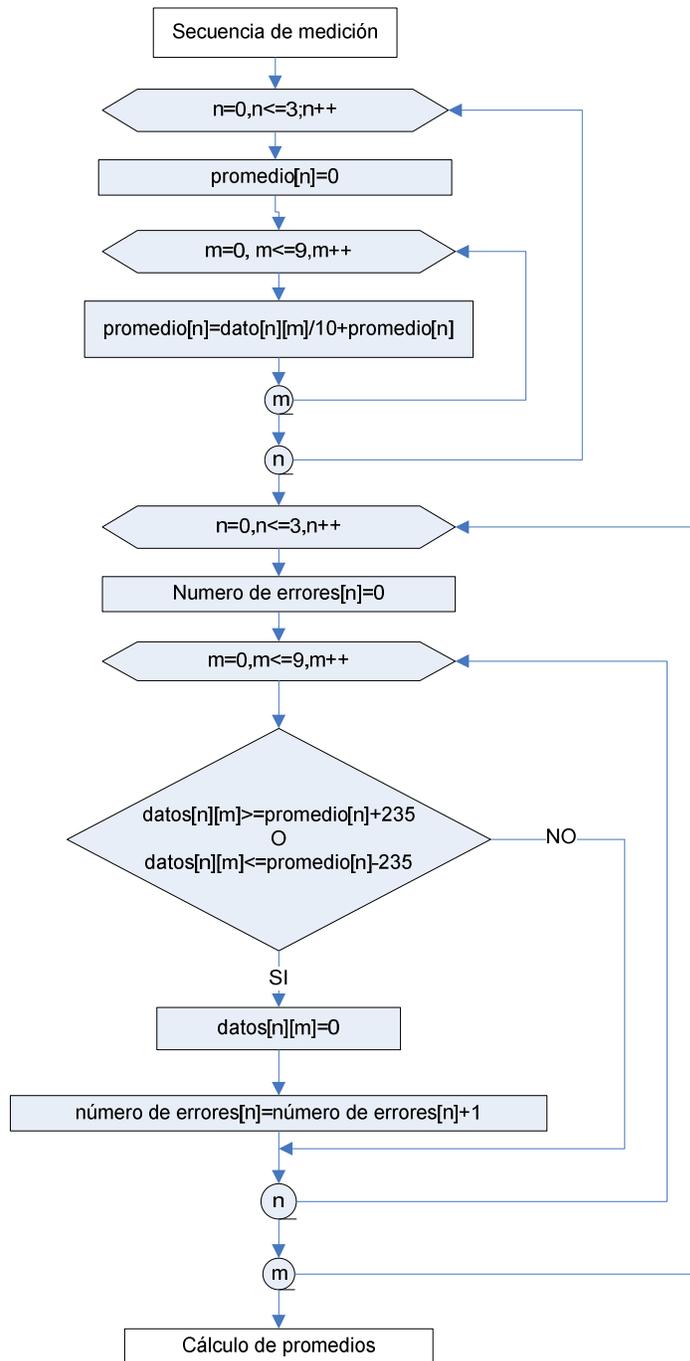


Figura 3.14 Diagrama de flujo filtrado de datos

3.1.3.2 Validación de datos

Si los datos no válidos superan el 30% de los datos medidos, se eliminan todos los datos y esa secuencia de medición se considera como no válida. La variable número de errores permite discriminar si la secuencia de medición es válida o no. Si cualquiera de los datos obtenidos de los sensores posee un número de errores superior a tres se considera que la secuencia de medición es errónea y en lugar de realizar los cálculos se repite la secuencia de medición.

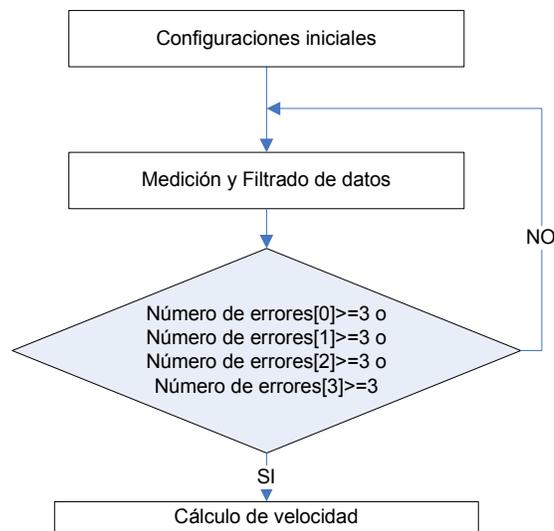


Figura 3.15 Diagrama de flujo validación de datos

3.1.3.3 Cálculo de promedios

Considerando los datos válidos resultantes del filtrado se realiza el cálculo del nuevo promedio que será posteriormente usado para los cálculos de velocidad, dirección y temperatura. El cálculo de promedios se efectúa a través de dos lazos for anidados, el diagrama de flujo se muestra a continuación:

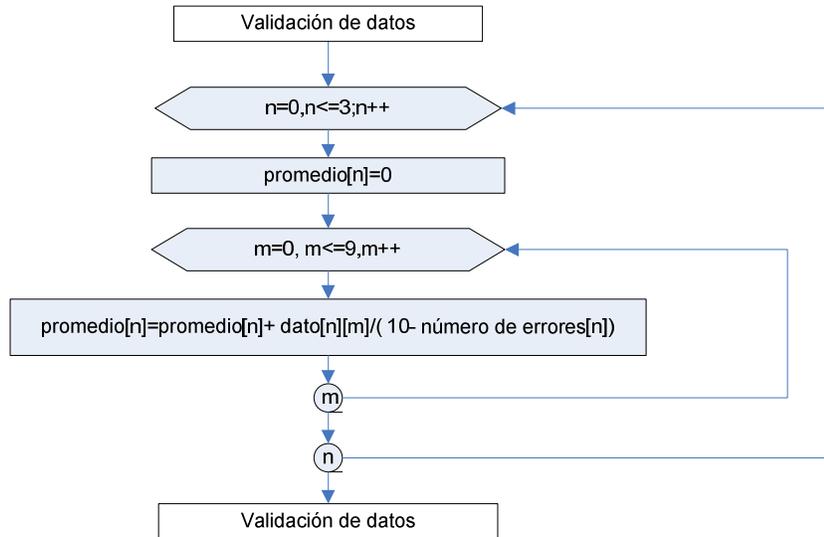


Figura 3.16 Diagrama de flujo cálculo de promedios

3.1.3.4 Cálculo de la velocidad

Como se muestra en la Figura 3.17 el tiempo medido corresponde al inicio del cuarto ciclo de la onda, por lo que para realizar los cálculos de la velocidad del viento y temperatura, se necesita restar a los promedios calculados un tiempo de compensación igual a 0.075 ms, es decir 2211 ciclos de máquina.

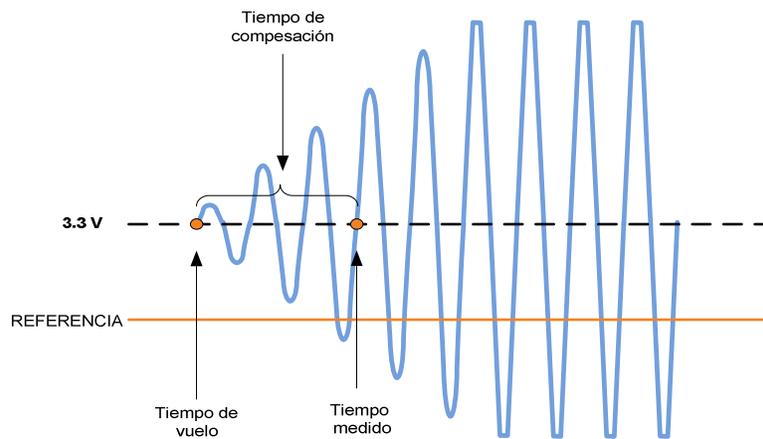


Figura 3.17 Tiempo de compensación

Para el cálculo de la velocidad se escogió el algoritmo de la inversa de los tiempos de vuelo, este algoritmo se explicó en detalle en el Capítulo 1. La fórmula utilizada es:

$$v_w = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t1} - \frac{1}{t2} \right) \quad (3.5)$$

En primer lugar para el cálculo de la velocidad se resta a cada uno de los promedios el tiempo de compensación. Luego tomando los valores resultantes correspondientes al primero y segundo promedio se aplica la expresión (3.5) considerando que el valor medido representa los ciclos de máquina y que cada ciclo de máquina es igual a 33.92×10^{-3} segundos; los valores usados corresponden a los medidos por los transductores norte y sur, obteniendo la velocidad en dicho eje. Se toma el valor absoluto de la velocidad y el dato del signo es almacenado en una variable "signo_velocidad[n]" donde n=0 para el eje Norte-Sur y n=2 para el eje Este-Oeste.

El mismo procedimiento es realizado con los promedios correspondiente a los traductores Este y Oeste. Una vez obtenidos los valores absolutos de las velocidades en el eje Norte-Sur y Este-Oeste, es posible calcular el módulo de la velocidad con la expresión:

$$v_w = \sqrt{(v_{w1})^2 + (v_{w2})^2} \quad (3.6)$$

Debido a que se requiere en la velocidad una resolución de 0.1m/s y que las operaciones se realizan en punto flotante, es necesario realizar un redondeo de las cifras decimales. Para este propósito el valor obtenido del módulo de la velocidad se multiplica por 100, se manejarán entonces valores entre 0 y 2500 que representarán un rango de velocidades de 0.0m/s a 25.0 m/s. Se realiza posteriormente un cambio a dígitos BCD con el llamado a una función que se detalla más adelante, si el valor de las unidades resultante es superior a cinco se suma diez al módulo de la velocidad, se restan las unidades y posteriormente se divide para diez; caso contrario solamente se divide el valor de la velocidad para diez. Así, se obtiene finalmente un valor de 0 a 250 ya redondeado que representa el rango de velocidad antes indicado.

A continuación se muestra el diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad:

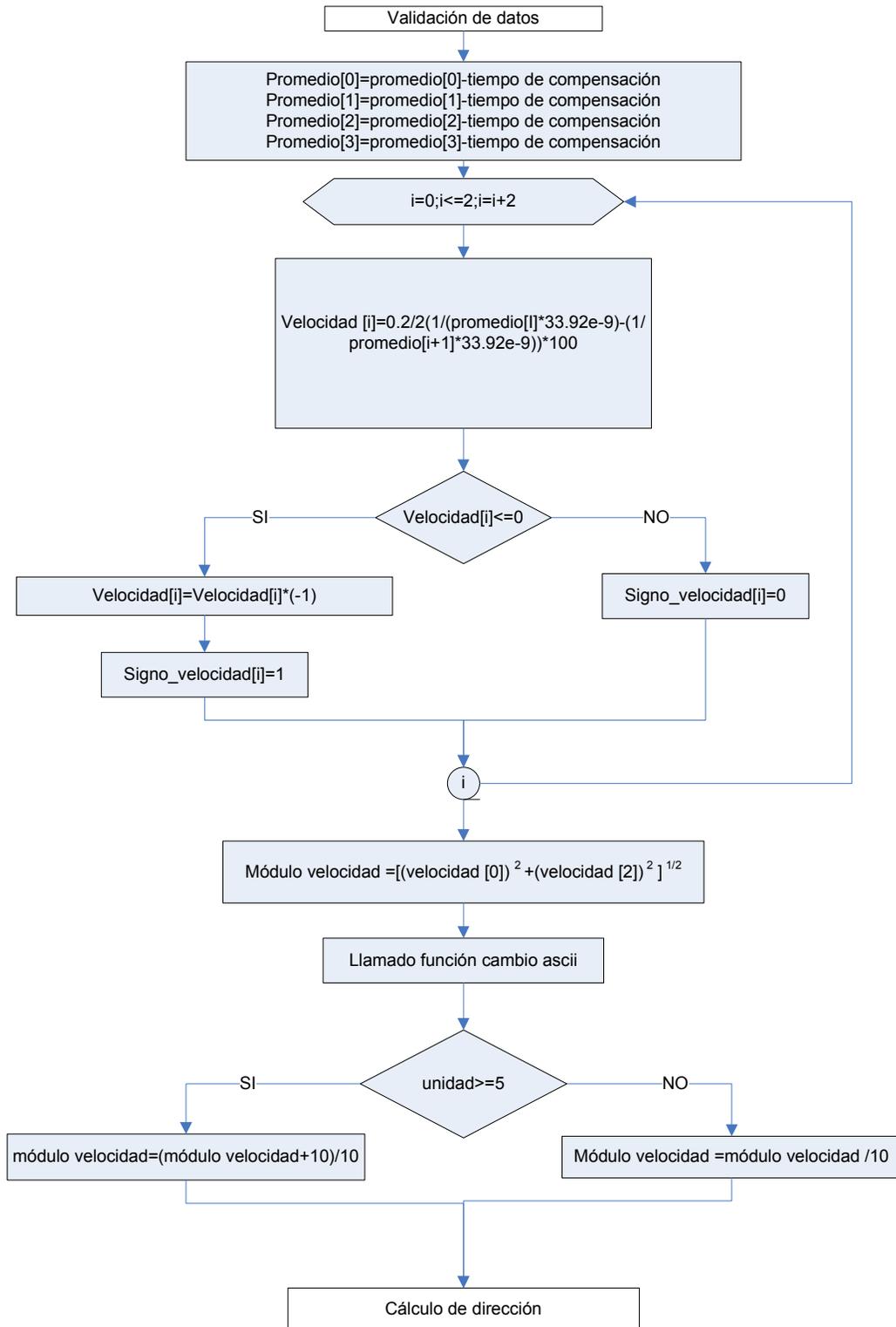


Figura 3.18 Diagrama de flujo cálculo de la velocidad

3.1.3.5 Cálculo de la dirección

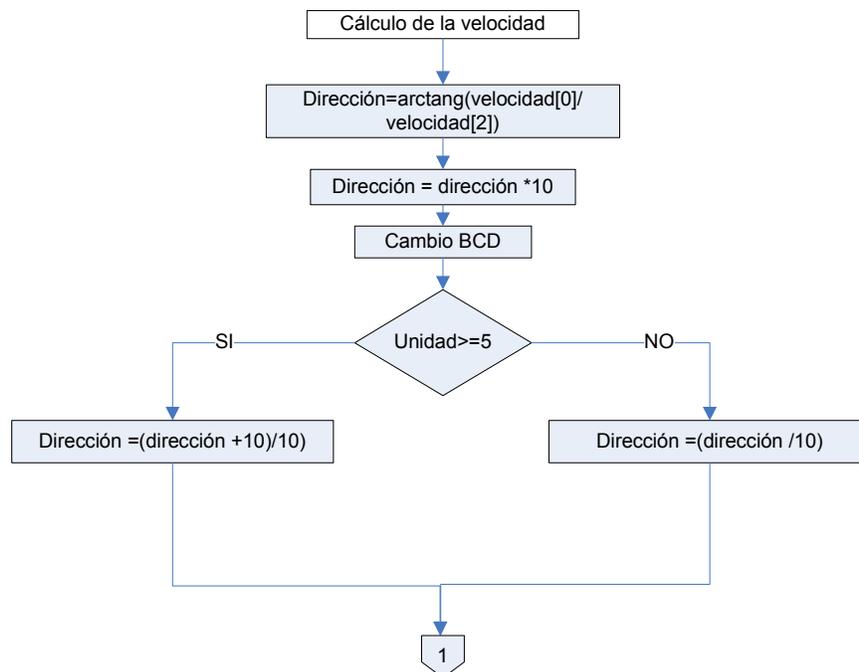
Para el cálculo de la dirección se aplica la expresión:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{v_{w2}}{v_{w1}}\right) \quad (3.7)$$

Los datos usados corresponden a los valores absolutos de la velocidad obtenidos del proceso anterior, aplicando la expresión (3.7) se consigue como resultado un ángulo que varía entre 0° y 90°. Como la resolución que se requiere es de 1° se realiza un ajuste decimal con un similar procedimiento que el ajuste de la velocidad.

El cuadrante se determina por los signos de los valores de la velocidad obtenidos anteriormente. Si ambos signos son positivos no se necesita realizar ninguna corrección. Si ambos signos son negativos se suma 180° al valor obtenido. Para el primer signo positivo y el segundo negativo el valor será igual a 360° menos el ángulo obtenido, la última posibilidad es cuando el primer signo es negativo y el segundo es positivo y se obtiene el ángulo restando 180 grados menos el valor obtenido.

Si el valor es igual a 360° en la corrección, este se sustituye por cero.



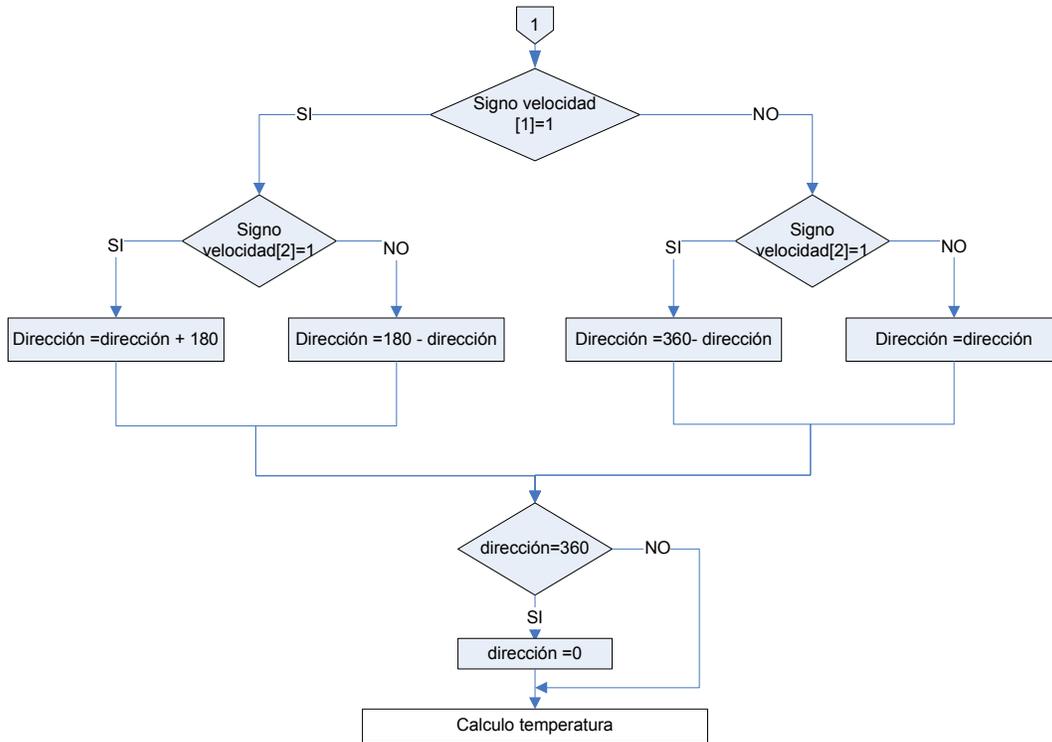


Figura 3.19 Diagrama de flujo del cálculo de la dirección

3.1.3.6 Cálculo de la temperatura

Para el cálculo de la temperatura se utiliza la ecuación que se muestra a continuación y que fue estudiada en detalle en el Capítulo 1.

$$T = \frac{l^2}{1608} \left(\frac{1}{t1} + \frac{1}{t2} \right)^2 - 273.15 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.8)$$

Se calcula la temperatura en ambas sendas de medida Norte-Sur y Este-Oeste con los promedios de las diez mediciones. Posteriormente se obtiene un promedio de las dos temperaturas obtenidas, se toma el valor absoluto y el dato del signo es guardado en una variable.

Se necesita una resolución de 0.1 °C, por lo que se realiza un similar proceso de ajuste decimal que el descrito anteriormente. Así se obtiene finalmente un valor de -100 a 500 ya redondeado que representa el rango de -10°C a 50°C.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de la operación:

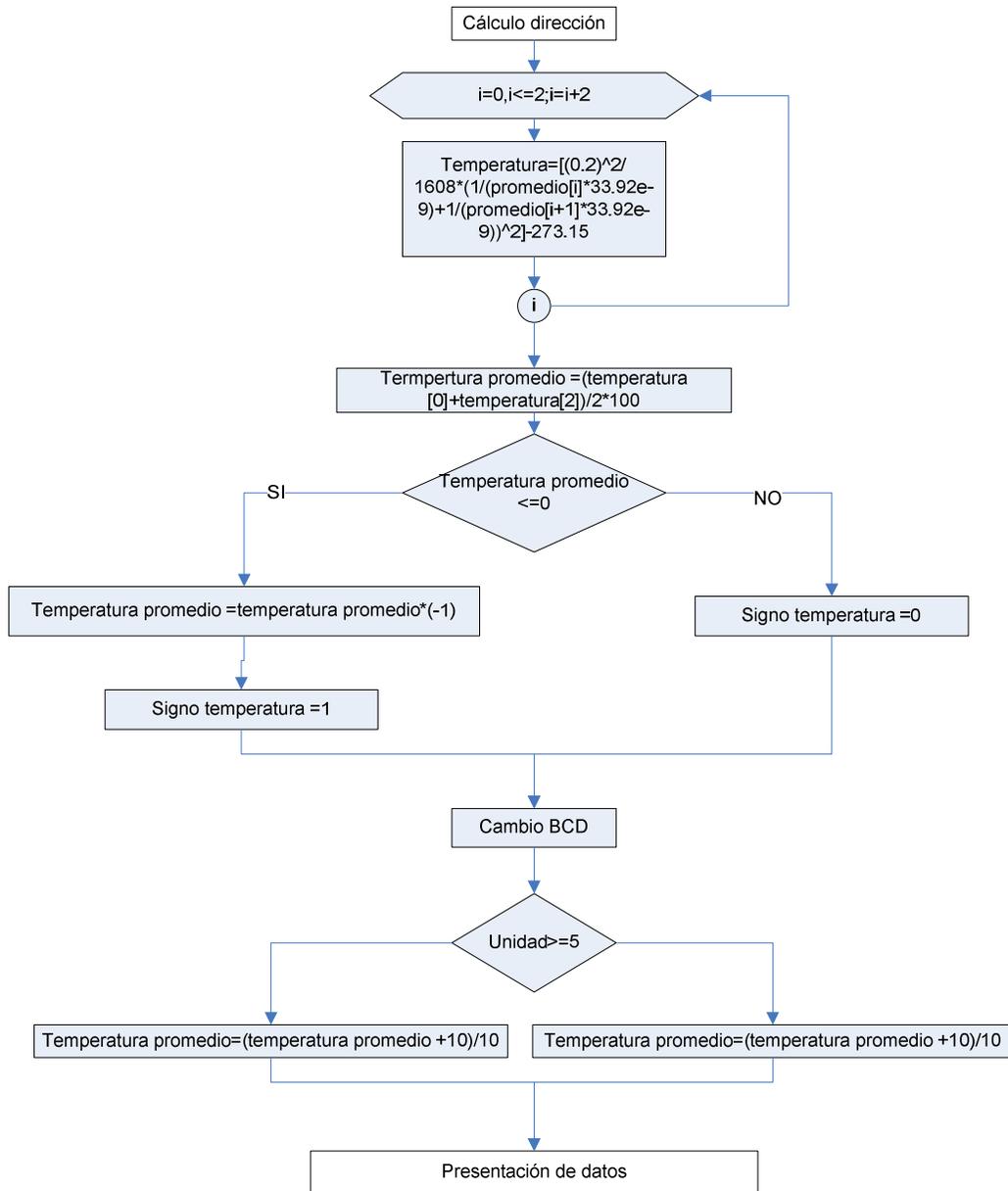


Figura 3.20 Diagrama de flujo del cálculo de la temperatura

3.1.4 PRESENTACION DE DATOS

Se realiza la presentación de datos de dos formas: a través de los conversores D/A y a través del módulo UART. Además se almacena en el banco de memorias EEPROM el último dato obtenido si ha transcurrido el periodo de almacenamiento.

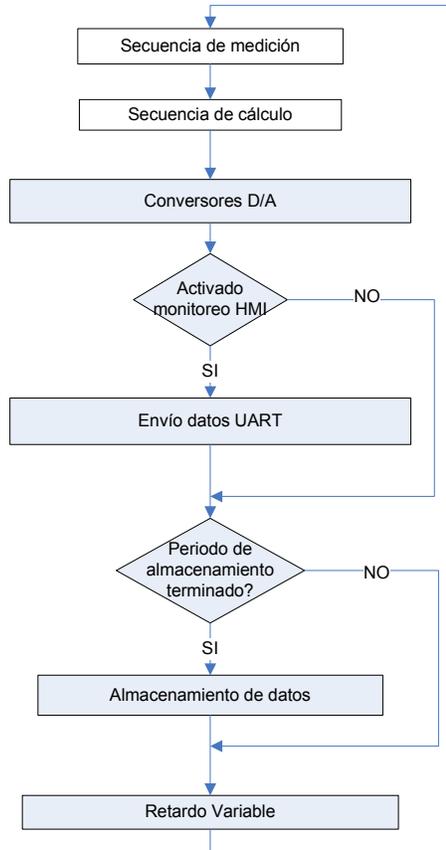


Figura 3.21 Diagrama de flujo presentación de datos

3.1.4.1 Conversión Digital Análoga

Se usan 3 conversores digital/análogos que se comunican por protocolo SPI. Se implementó dicho protocolo por software utilizando los pines correspondientes al pòrtico B. La trama para la escritura de los conversor A/D se muestra a continuación:

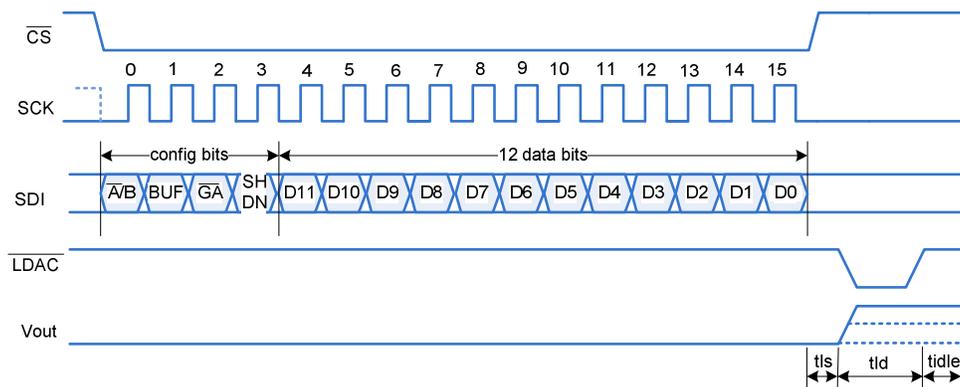


Figura 3.22 Tramas de escritura MCP4921

La señal de reloj se genera en el pin RB7 con ayuda del Timer5 que se configura para que se desborde cada $5\mu\text{s}$, que corresponde a medio periodo de la frecuencia de reloj.

Cuando éste se desborda se produce una interrupción en la que se cambia de estado al pin correspondiente al reloj. Cuando se cumple un periodo se escribe una variable que indica la terminación de un ciclo de reloj.

Finalmente se encera la bandera correspondiente a la interrupción.

El diagrama de flujo de la interrupción del Timer 5 se muestra a continuación:

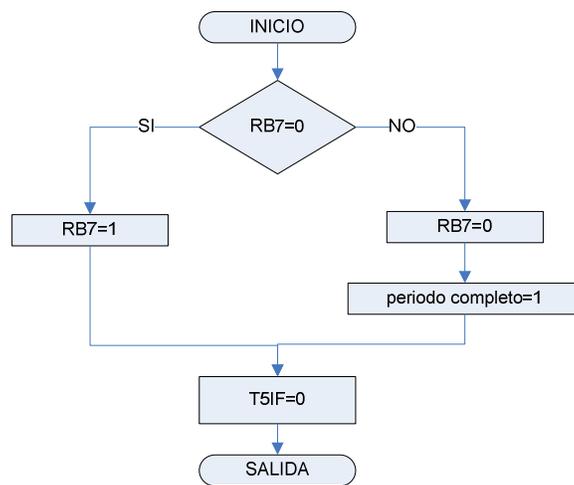


Figura 3.23 Diagrama de flujo interrupción Timer5

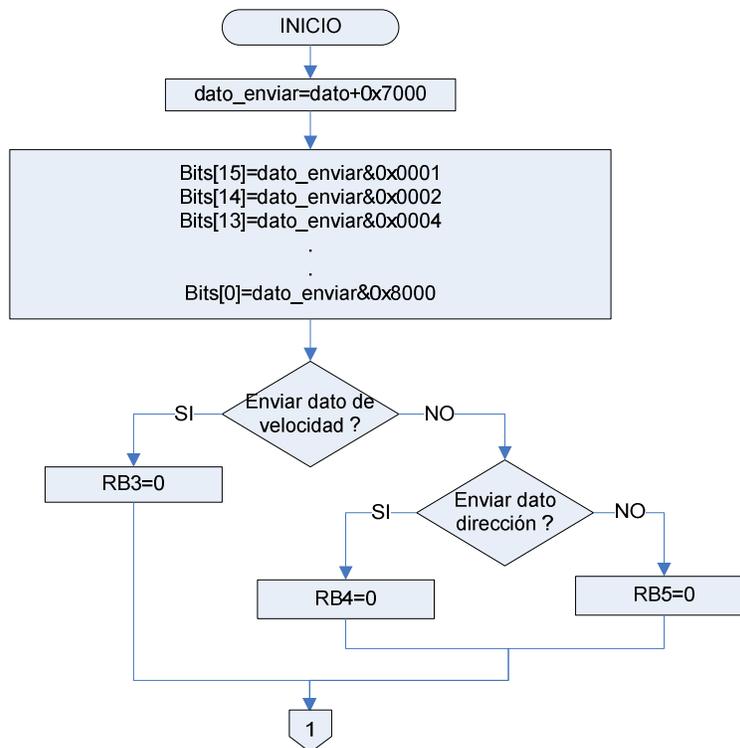
Todos los pines usados en la transmisión SPI son configurados en la rutina de configuraciones como salidas digitales y se les da sus valores iniciales, para CS (RB3,RB4,RB5) y LDAC(RB6) se escribe 1L, mientras que SCK(RB7) Y SDI(RB8) se los inicializa en 0L.

La rutina que maneja la generación de la trama SPI, en primer lugar forma una variable de 16 bits: los 4 primeros bits corresponden a la configuración que en este caso es 0x700, indicando al convertor una ganancia de uno, usando el convertor "A" y habilitando el buffer de salida; los 12 últimos bits corresponderán al dato que deber ser enviado. Posteriormente cada uno de los 16 bits es almacenado en una variable tipo vector. Se habilita el convertor A/D a ser escrito colocando en cero el pin correspondiente: RB3 para velocidad, RB4 para dirección y RB5 para temperatura. En este instante se enciende el TMR5 y se habilitan sus interrupciones. Se escribe 1L o 0L en el pin

correspondiente a SDI verificando si el primer bit es 0L o 1L del vector formado, luego se espera a que la bandera que indica que se terminó un ciclo de reloj sea escrita en las interrupciones para repetir el mismo procedimiento con los 15 bits restantes.

Al terminar de transmitir la trama se detiene el Timer5 y se deshabilitan las interrupciones. Posteriormente se deshabilita nuevamente el CS seleccionando escribiéndole 1L. Es necesario generar un retardo t_{LCS} (LDAC setup time) de 20 ns como se indica en el manual del fabricante, transcurrido este tiempo se escribe 0L en el pin LDAC y se genera un nuevo retardo de 200ns correspondientes a t_{LCS} (LDAC pulse width). Finalmente se escribe nuevamente LDAC en 1L y se genera un nuevo retardo de 40ns que corresponde al t_{LCS} (SCK Idle Time before CS Fall)

El diagrama de flujo se muestra a continuación:



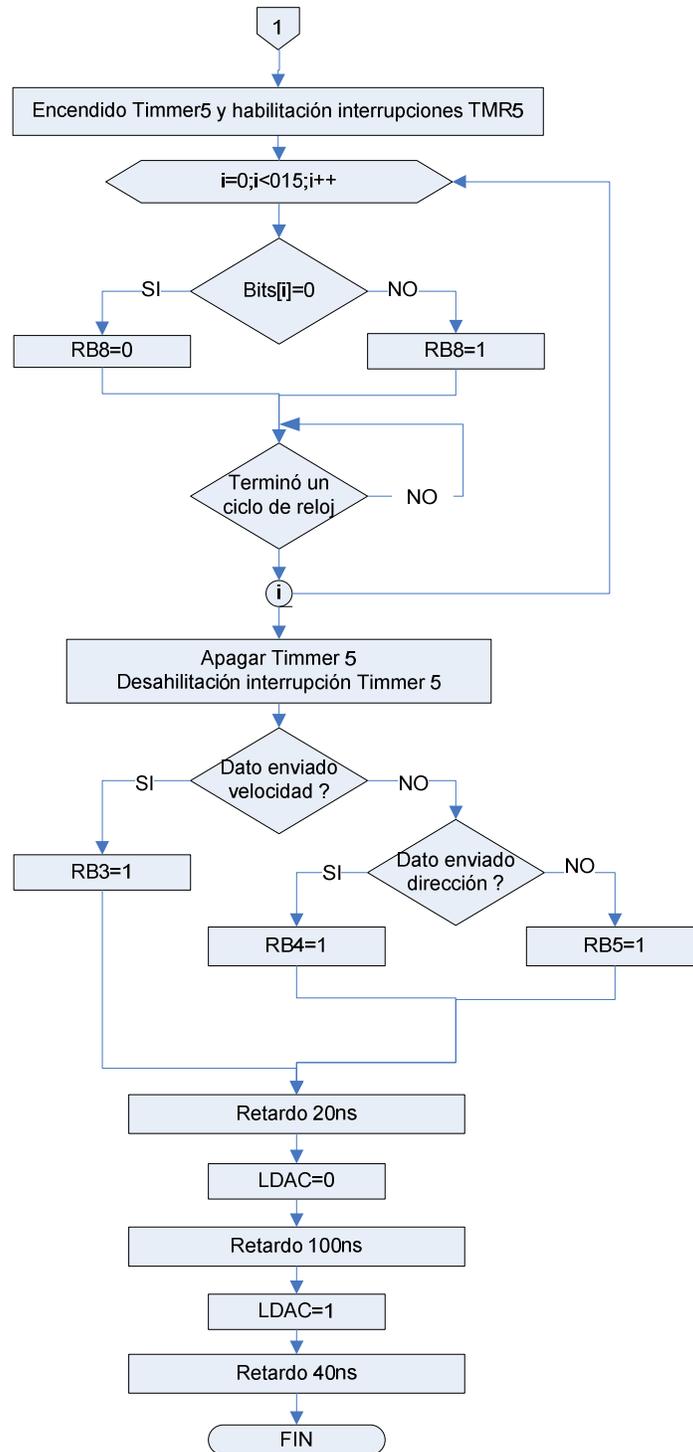


Figura 3.24 Diagrama de flujo secuencia SPI

En el programa principal para realizar la conversión, en primer lugar se indica que el valor a enviar es la velocidad a través de una variable. Dado que el valor

esta comprendido entre 0 y 250, se multiplica este valor por 16.38 que permite obtener un rango de 0 a 4096. Se realiza un llamado a la subrutina explicada anteriormente y se ejecuta el mismo procedimiento para la dirección esta vez multiplicando por un factor de 11.37. Para la temperatura en primer lugar se toma en cuenta su signo almacenado en una variable independiente, si es positivo se suma cien, caso contrario se resta cien menos la temperatura, y el resultado se multiplica por un factor de 6.83.

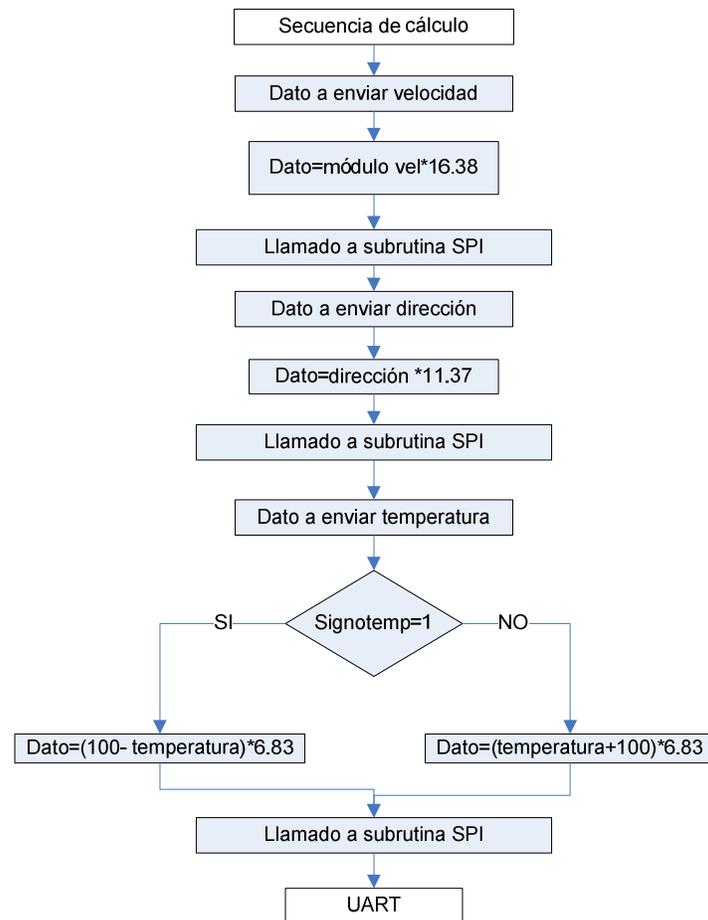


Figura 3.25 Diagrama de flujo envío de dato DAC

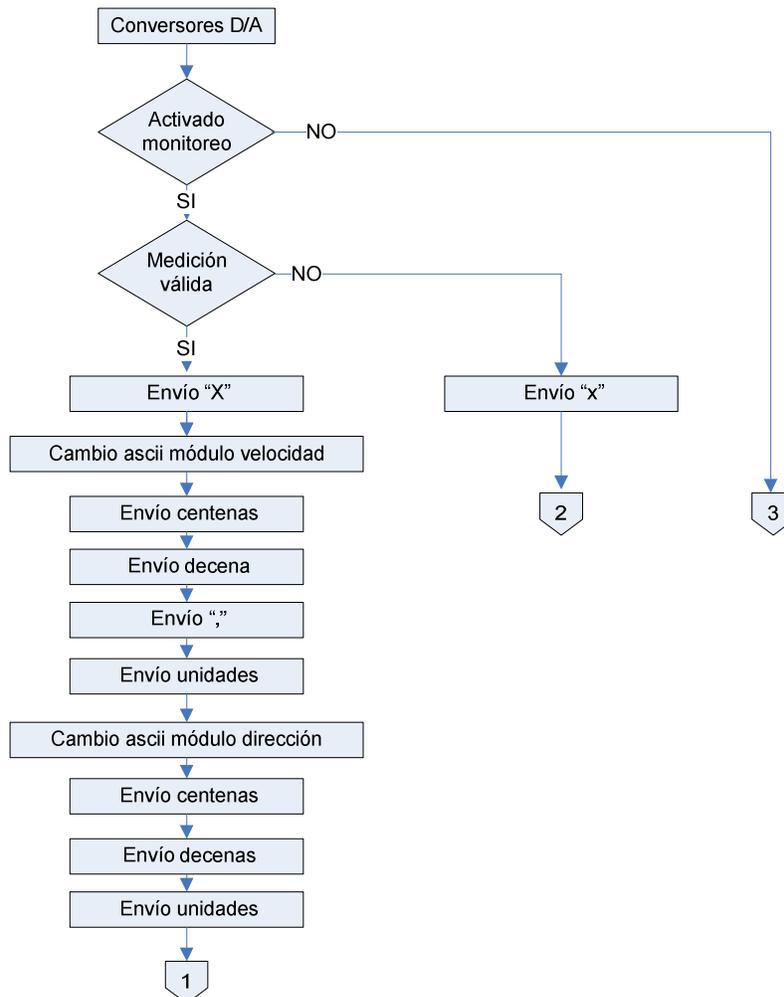
3.1.4.2 UART

La interfaz HMI en la pestaña monitoreo recibe los datos instantáneos que son enviados a través del módulo UART del microcontrolador. En primer lugar se verifica si la medición fue válida, si no es así se envía una "x" y se repite la medición. Si la medición es válida se envía una "X", y seguidamente el dato de

la velocidad, dirección y temperatura. La variable módulo velocidad que se encuentra entre 0 y 250 es transformada en dígitos ASCII con una función que se especifica más adelante. Se envían los dígitos de centenas y decenas seguidos de una coma y finalmente las unidades producto de la transformación a ASCII.

De igual forma la dirección se transforma en dígitos ASCII y se envían los dígitos correspondientes a centenas, decenas y unidades.

Para la temperatura se verifica el signo, si es positivo se envía el signo “+” y si es negativo “-”. Luego se realiza el mismo procedimiento del módulo de la velocidad para la variable temperatura. Se debe tener en cuenta antes de enviar un dato que el buffer de transmisión del módulo UART este vacío, esto se lo realiza a través del bit TMRT de registro U2STA.



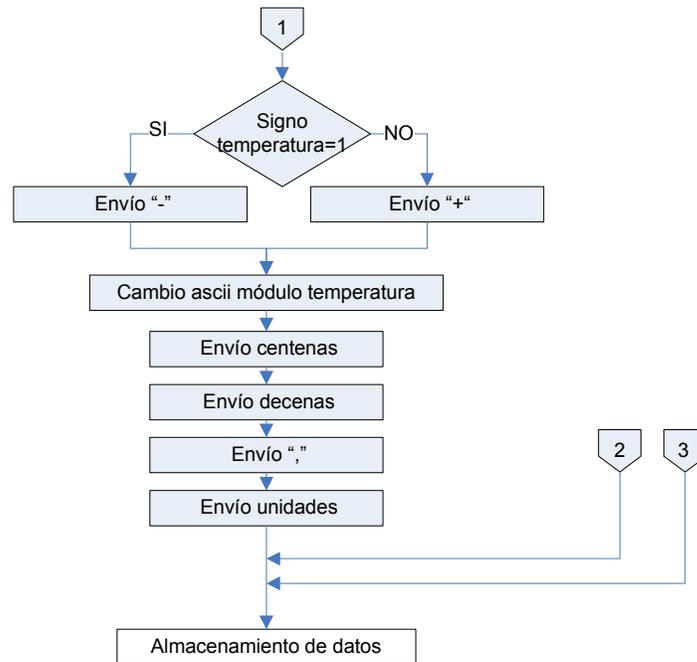


Figura 3.26 Diagrama de flujo envío datos por UART

3.1.4.3 Almacenamiento de datos

Para el almacenamiento de datos se utiliza el Timer1 y un contador que permiten generar un periodo de almacenamiento variable. Este periodo como ya se mencionó es configurable en la interfaz HMI.

Las interrupciones del Timer 1 están habilitadas y cada vez que se genera una interrupción, el contador se incrementa en una unidad, este valor es comparado con una referencia que dependerá del periodo configurado. Cuando ambos valores sean iguales se escribirá 1L en una bandera, que indicará que el periodo de almacenamiento ha transcurrido y en el programa principal los últimos datos de velocidad, temperatura y dirección serán almacenados en el banco de memorias.

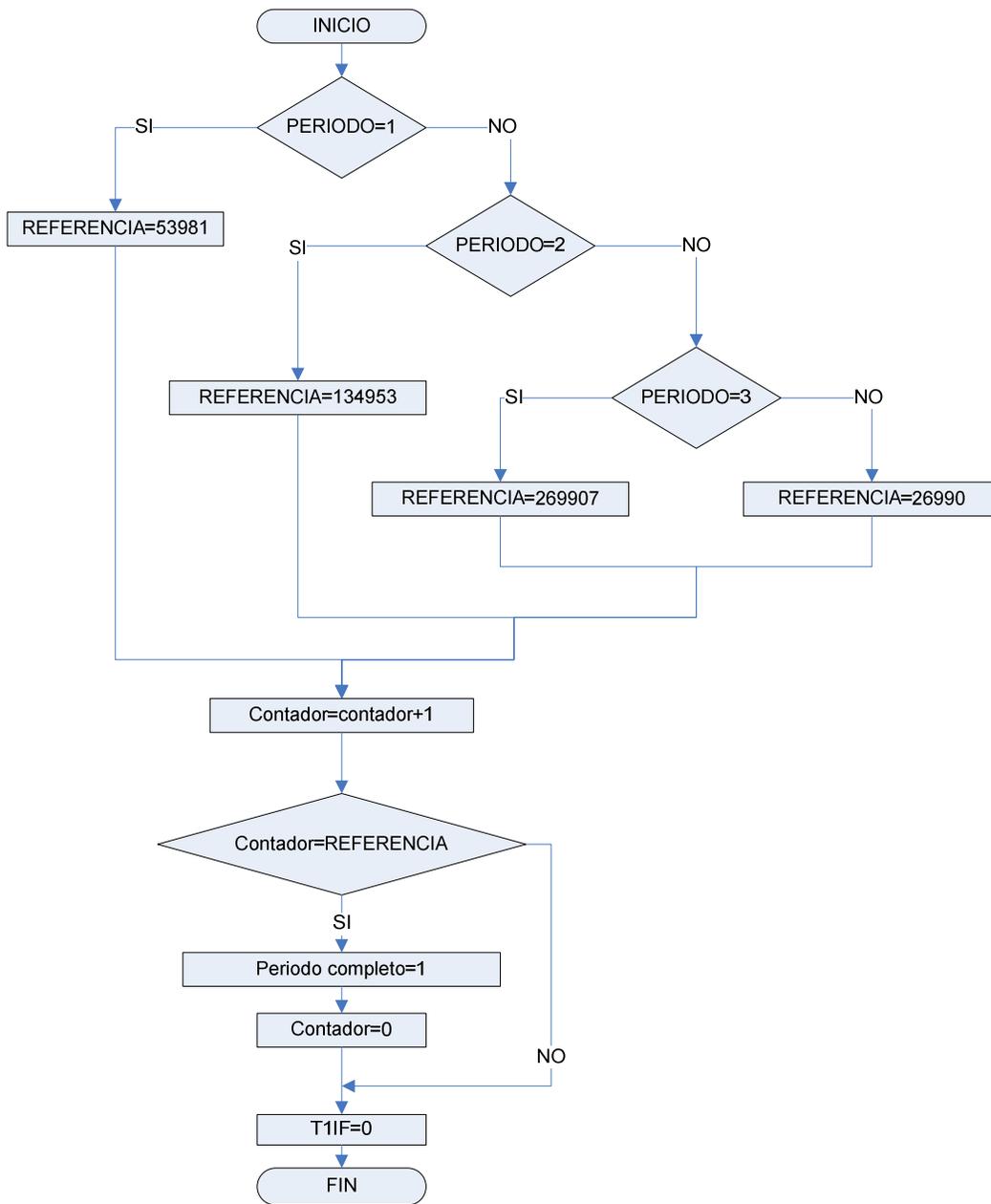


Figura 3.27 Diagrama de INTERRUPCION TMR1

En el programa principal se verifica si ha transcurrido un tiempo igual al periodo de almacenamiento, si es así se almacena en memoria el último dato obtenido siempre que este sea válido.

Considerando un dato válido, se inicia el ciclo de lectura de reloj, inicializando el puntero, para ello se genera una condición de inicio START y se envía el

byte de control 0xD0, después de recibir un acknowledge se envía la dirección 0x00, y finalmente un RESTART.

Se envía el byte de control 0xD1 esta vez indicando que se requiere realizar una lectura, el reloj genera un ACK y posteriormente envía datos consecutivamente desde la dirección 0x00. Después de recibir cada dato el microcontrolador genera un acknowledge. Al recibir el sexto dato se genera un noacknowledge seguido de una condición de parada, para indicar al reloj que se requiere terminar la comunicación.

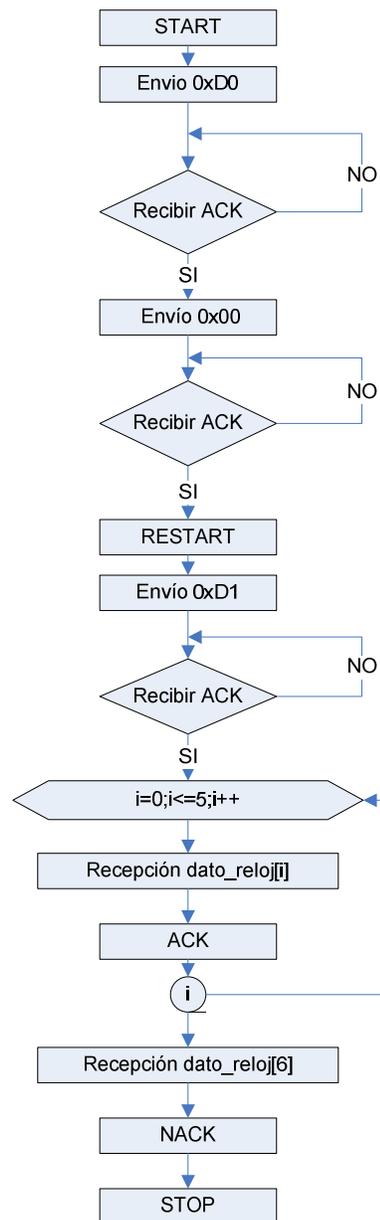


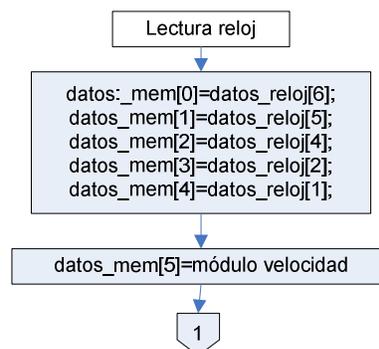
Figura 3.28 Diagrama de flujo lectura reloj

El siguiente paso es preparar la trama para almacenar los datos en el banco de memorias. Las variables temperatura, velocidad y dirección se encuentran en rangos de 0 a 250, de 0 a 360 y de 0 a 500 respectivamente. Por lo que para almacenarlos es necesario 9 bits. Con el fin de ahorrar espacio en memoria se almacenan los datos en el siguiente formato:

Tabla 3.2 Formato de almacenamiento de datos.

Registro	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	dec_año	dec_año	dec_año	dec_año	año	año	año	año
1	Velocidad.8	Dirección.8		dec_mes	mes	mes	mes	mes
2	Signo_temperatura		dec_día	dec_día	día	día	día	día
3	Temperatura.8		dec_hora	dec_hora	hora	hora	hora	hora
4		dec_min	dec_min	dec_min	min	min	min	min
5	Velocidad.7	Velocidad.6	Velocidad.5	Velocidad.4	Velocidad.3	Velocidad.2	Velocidad.1	Velocidad.0
6	Dirección.7	Dirección.6	Dirección.5	Dirección.4	Dirección.3	Dirección.2	Dirección.1	Dirección.0
7	Temperatura.7	Temperatura.6	Temperatura.5	Temperatura.4	Temperatura.3	Temperatura.2	Temperatura.1	Temperatura.0

Los datos recibidos del reloj de año, mes, fecha y hora son colocados en los primeros registros de una variable tipo vector; se verifica si la velocidad tiene un valor mayor a 256, si es así se escribe 1L en el bit 7 del registro 1, y los primeros 7 bits se los coloca en el byte 5. Se realiza lo mismo con la variable de dirección colocando en los registros y bits que se indica en la Tabla 3.2, para la temperatura además del valor de su módulo se verifica su signo. Este procedimiento da como resultado un vector de 8 bytes que será almacenado en las memorias.



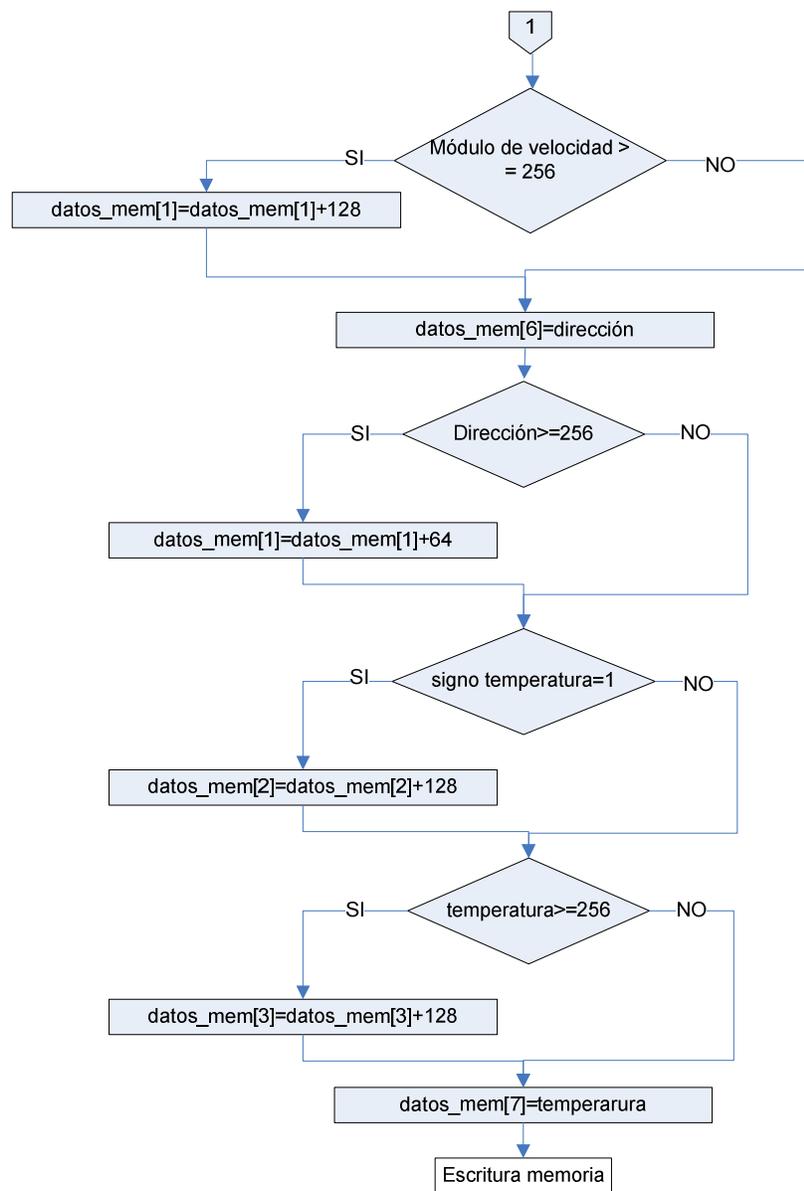
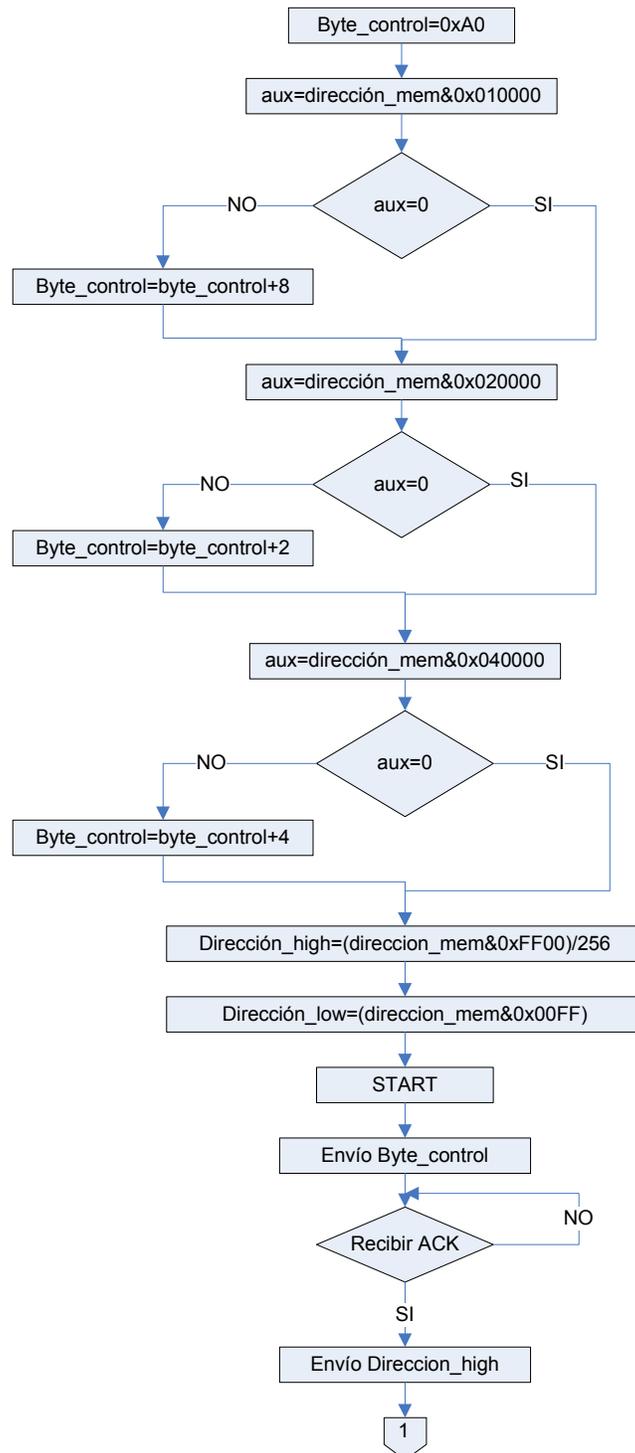


Figura 3.29 Diagrama de flujo de la preparación de la trama I2C para almacenamiento de datos

Como se explicó anteriormente se utiliza una variable de 19 bits para indicar el siguiente espacio de memoria en la que puede ser guardado un dato. De esta variable se obtiene la memoria, bloque y dirección en la que se almacenará el dato a partir de una serie de enmascaramientos. Posteriormente se inicia la secuencia de escritura I2C. Después de generar una condición de inicio, se envía el byte de control que incluye la dirección de la memoria, el número de bloque y la instrucción de escritura. Al recibir un acknowledge, se envían los 8

bits más significantes de la dirección de memoria y al recibir un segundo acknowledge se envían los 8 bit menos significantes. Posteriormente con un lazo “for” se envía el vector de 8 bytes que contiene la información de fecha, hora, velocidad, dirección y temperatura.



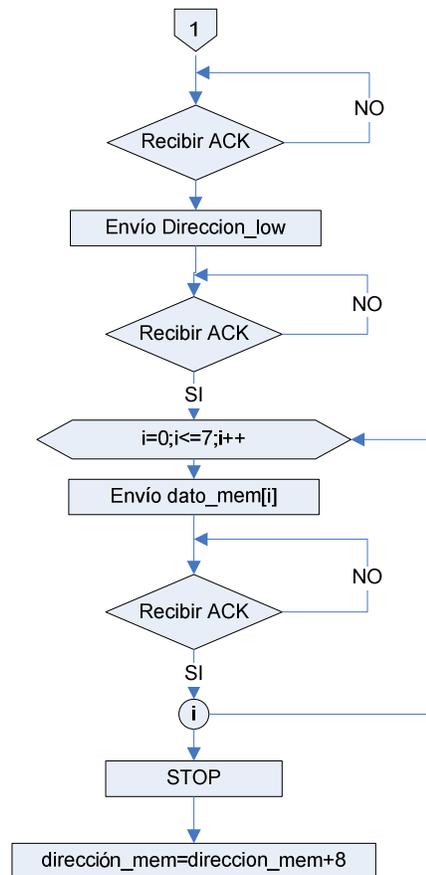


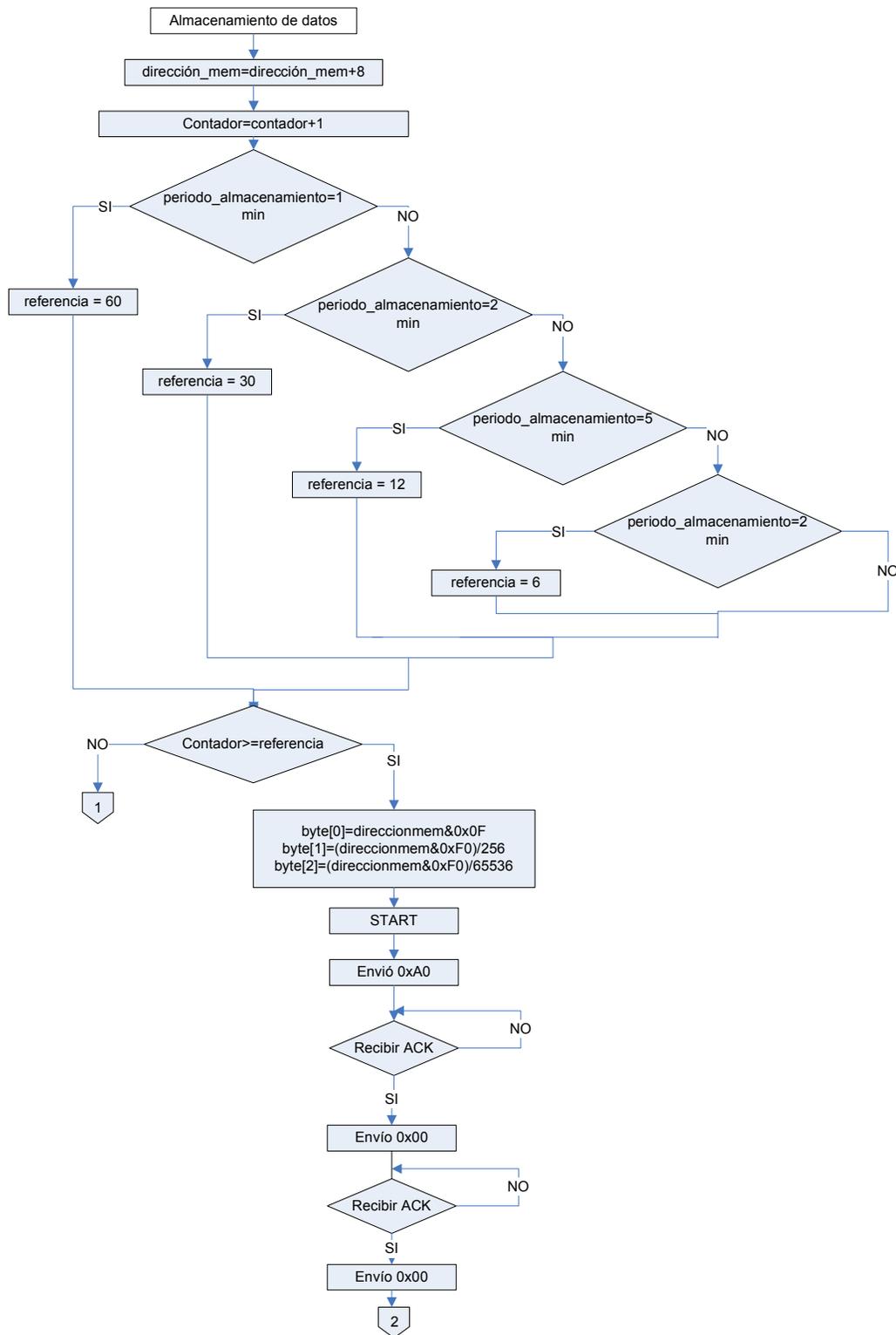
Figura 3.30 Diagrama de flujo Escritura I2C

Cada hora se actualizan los datos de configuración almacenados en la memoria EEPROM correspondientes al siguiente registro de memoria disponible.

Cada vez que se almacena un dato, se incrementa un contador que se compara con una referencia, si el contador es superior a la referencia se realiza el proceso de actualización. Como los posibles periodos de almacenamiento son conocidos y corresponde a 1,2,5 y 10 minutos, para cada uno se fija una referencia que permita actualizar la configuración cada hora.

Cuando se haya cumplido una hora de la última actualización la variable que indica la dirección de la memoria se almacena en un vector de 3 bytes. Se genera una condición de START, seguidamente se envía la dirección 0xA0 que indica que se desea escribir en el bloque 0 de la memoria 0. Se envía a continuación la dirección 0x0000 en dos bytes. Posteriormente se envían los 3

bytes correspondientes al siguiente valor de memoria disponible y se genera finalmente una condición de STOP.



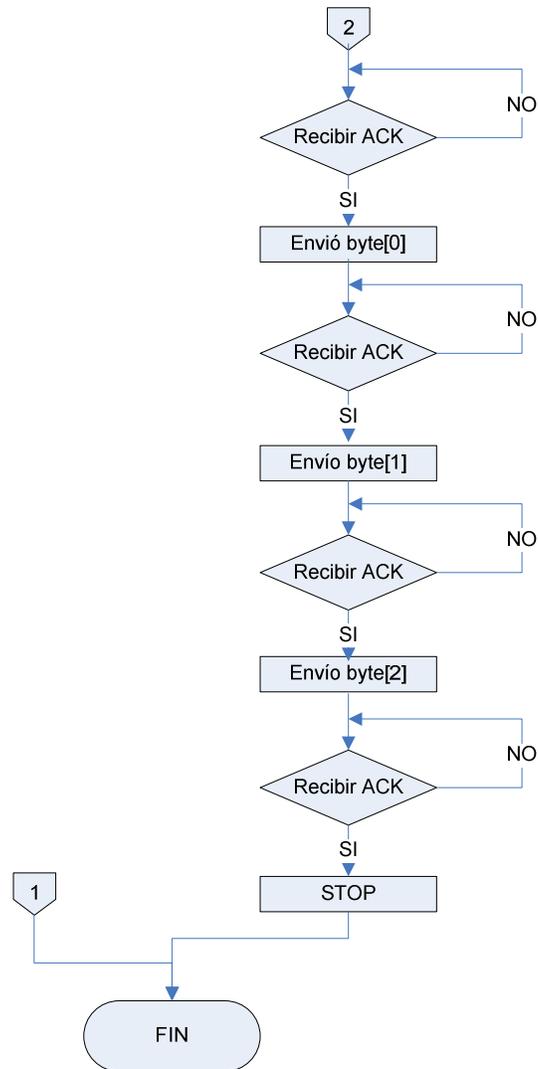


Figura 3.31 Diagrama de Flujo escritura en memoria de la siguiente dirección disponible

3.1.5 SUBRUTINAS AUXILIARES

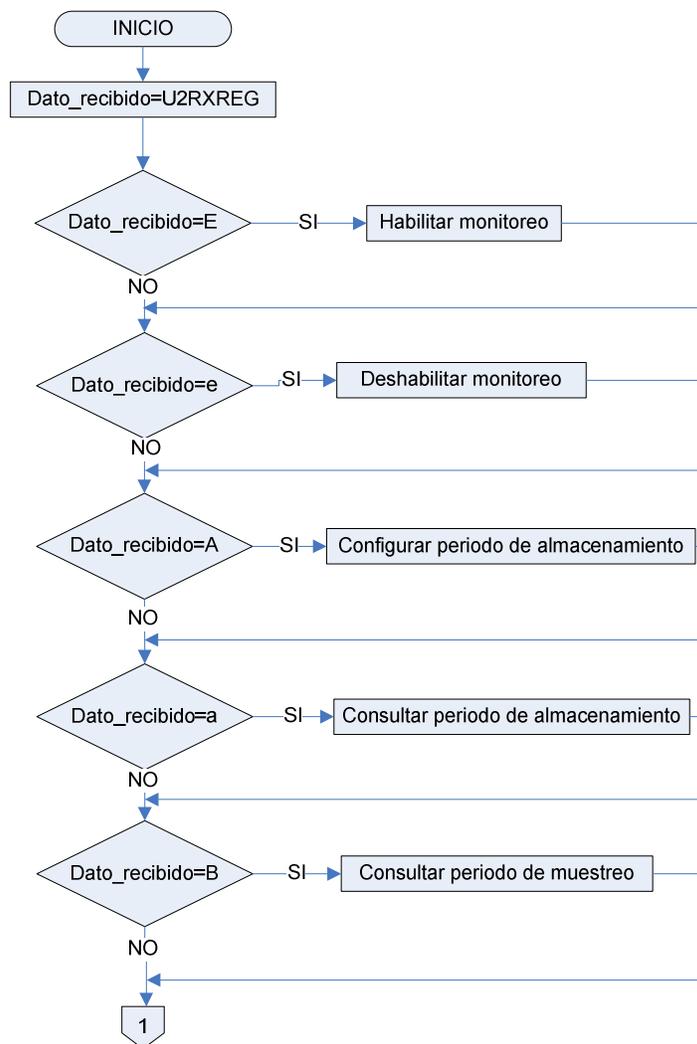
3.1.5.1 Comunicación con la interfaz HMI

La interfaz HMI envía comandos de un byte que indican al microcontrolador la acción a realizarse. Cuando uno de estos comandos es recibido, se produce una interrupción, en la rutina de interrupción se verifica cual es el comando recibido y según eso se ejecutan una serie de instrucciones. Los comandos que pueden ser recibidos son:

Tabla 3.3 Comandos enviados HMI

COMANDO	FUNCION
A	Configura periodo de almacenamiento
A	Consultar el periodo de almacenamiento configurado
B	Consultar el periodo de muestreo configurado
B	Configurar el periodo de muestreo
D	Descargar datos
E	Habilitar monitoreo
E	Deshabilitar monitoreo
R	Configura reloj
R	Leer estado del reloj

La secuencia se muestra a continuación:



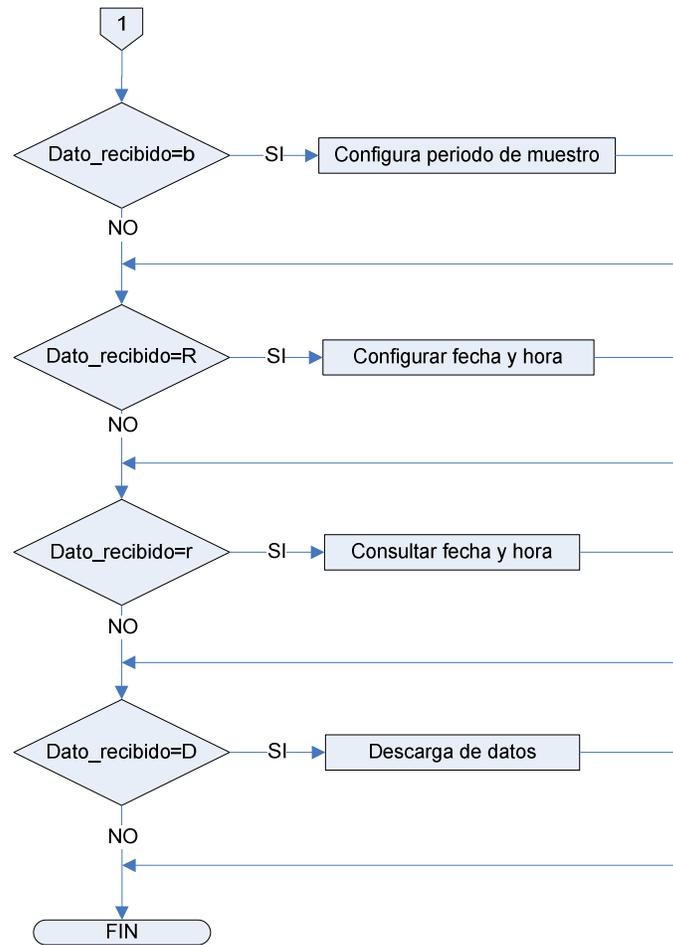


Figura 3.32 Diagrama de flujo interrupción módulo UART

3.1.5.1.1 *Habilitación y deshabilitación de monitoreo*

El programa principal monitorea una variable que permite o no la transmisión de datos. Al recibir el código “E” a través del módulo UART dicha variable es escrita indicando que la interfaz HMI está lista para recibir las mediciones instantáneas. De forma similar cuando la recepción es deshabilitada en el HMI se recibe el código “e” y la misma variable es encerrada.

3.1.5.1.2 *Configurar periodo de almacenamiento*

Al recibir el código “A”, el microcontrolador envía a través del módulo UART el carácter “z”, indicando al HMI que está listo para recibir un nuevo valor del

periodo de almacenamiento. El código recibido puede ser el dígito ASCII 0, 1, 2 o 3 correspondiente a 1, 2, 5 o 10 minutos respectivamente. El valor recibido es colocado en una variable RAM “periodo”, además almacenado en la dirección 0x03 de la memoria 0xA0, con el fin de que en el siguiente reinicio del sistema este sea el valor de periodo de almacenamiento con el que se ejecutará el programa.

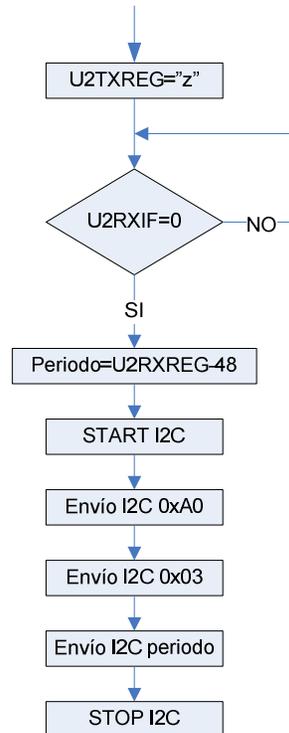


Figura 3.33 Diagrama de flujo configuración periodo de almacenamiento

3.1.5.1.3 Consultar periodo de almacenamiento

Para la consulta del periodo de almacenamiento el HMI envía el código “a”. El microcontrolador al recibir este carácter, envía el periodo de almacenamiento como dos dígitos ASCII, para ello consulta la variable periodo y de acuerdo a esta se enviarán los dígitos “01”, “02”, “05” y “10” según corresponda.

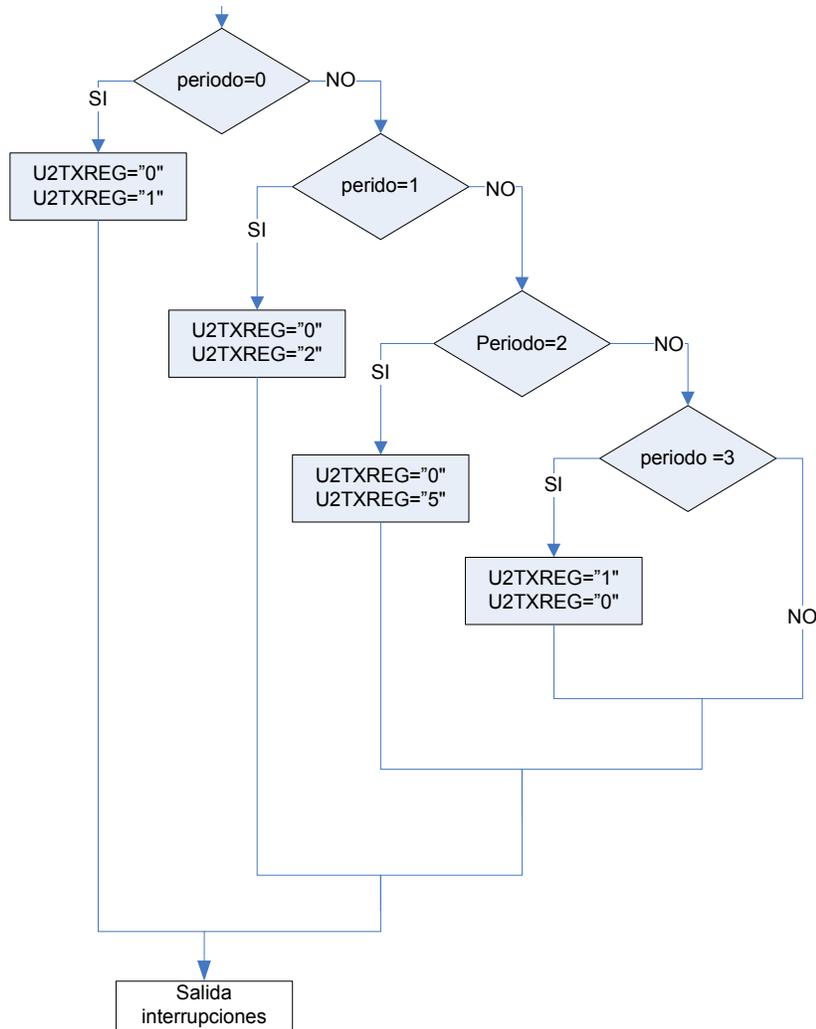


Figura 3.34 Diagrama de flujo Consulta periodo de almacenamiento

3.1.5.1.4 Configurar periodo de muestreo

Cuando se configura el periodo de muestreo, el HMI envía el código “b”, en el microcontrolador al producirse la interrupción y comprobar que el comando enviado corresponde al carácter “b”, se envía por la interfaz UART “z” para indicar al HMI que puede enviar el nuevo periodo de muestreo. Se espera recibir un segundo byte, monitoreando la bandera de las interrupciones correspondientes a la recepción UART. El dato recibido corresponde a la variable “periodo_muestreo”. Esta dato posteriormente es almacenado en el byte 0x04 de la memoria 0xA0.

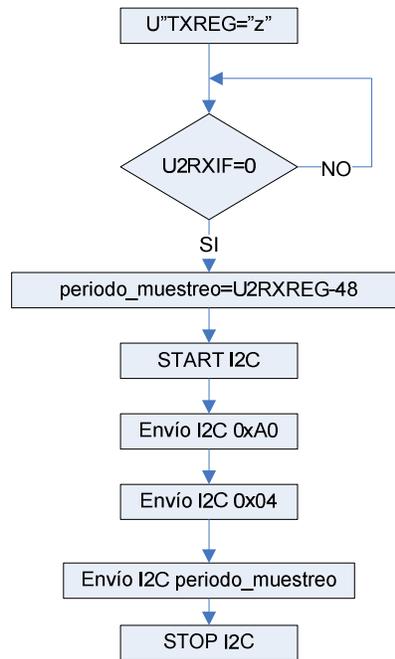


Figura 3.35 Diagrama de flujo Configuración periodo de muestreo

3.1.5.1.5 Consultar periodo de muestro

Para consultar el periodo de muestreo la interfaz HMI envía el código "B", El microcontrolador seguidamente envía un dígito ASCII, que corresponderá al periodo de muestreo en segundos configurado, para ello verificara la variable periodo_muestreo que tendrá valores de entre 0 y 2.

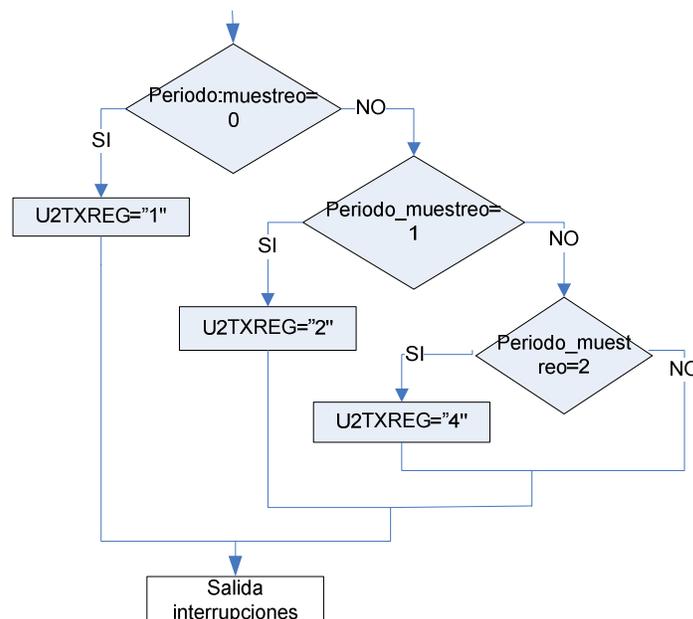
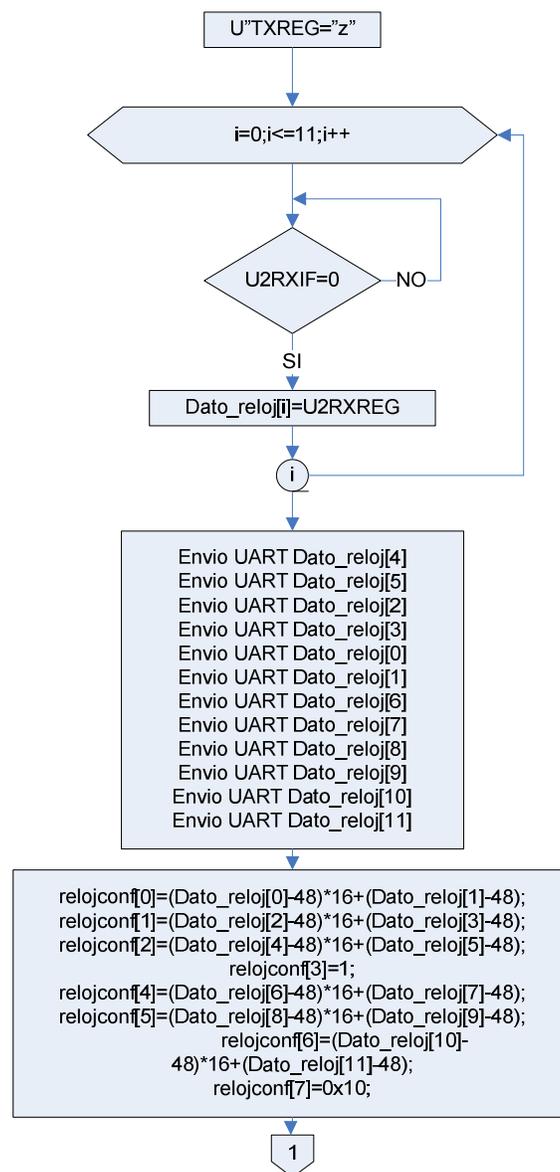


Figura 3.36 Diagrama de flujo Consulta periodo de muestreo.

3.1.5.1.6 Configuración de fecha y hora

Cuando se desea configurar la fecha y hora el microcontrolador recibe el carácter ASCII "R", y seguidamente envía el carácter "z" para iniciar la transmisión de los dígitos correspondientes a hora y fecha. Se reciben en total 11 bytes, los cuales son reenviados por la interfaz UART para confirmar la recepción y posteriormente reordenados de acuerdo al mapa de memoria del reloj DS1307. Estos 7 bytes son escritos en los registros 0x00-0x07 del RTC (0xD0) siguiendo el proceso de escritura I2C.



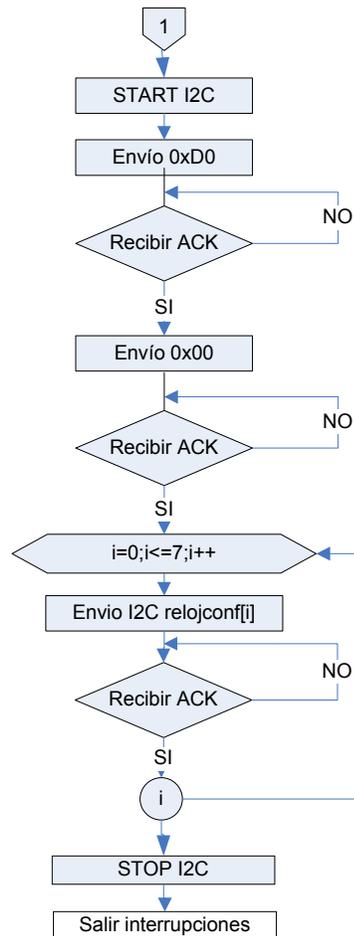
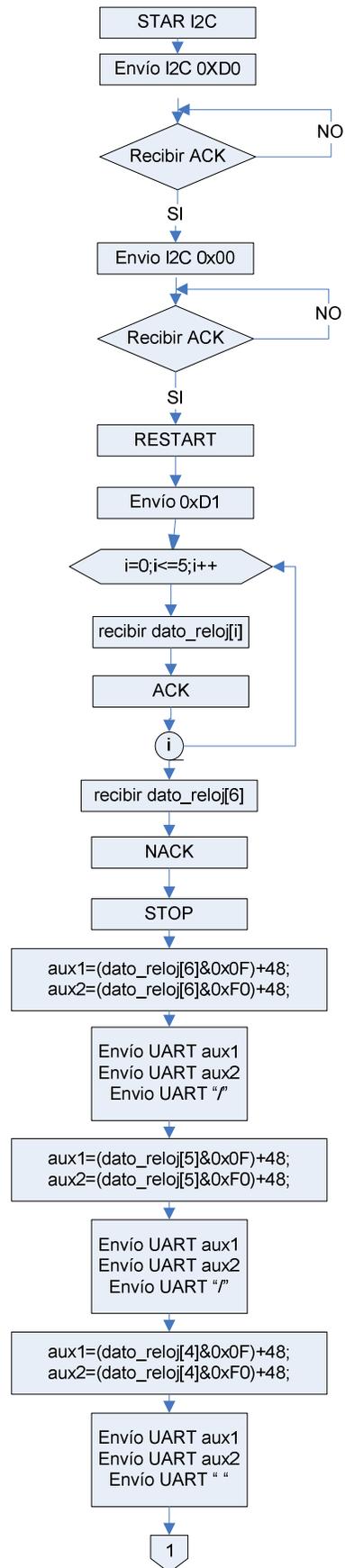


Figura 3.37 Diagrama de flujo Configuración fecha y hora

3.1.5.1.7 Consultar hora y fecha

Al consultar la hora y fecha del reloj la interfaz HMI envía el código ASCII “r”, el microcontrolador al recibir dicho código, lee del reloj RTC la fecha y hora con una rutina similar a la mostrada en la rutina de almacenamiento de datos. A continuación los datos recibidos son reordenados y enviados a través del módulo UART, en el formato “dd/mm/aa hh:mm:ss”.



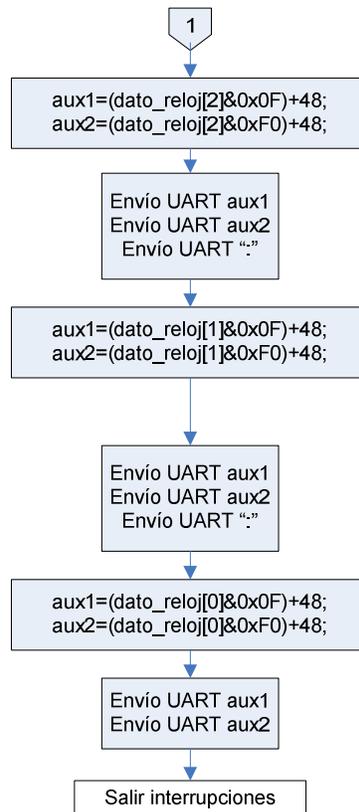


Figura 3.38 Diagrama de flujo Consulta fecha y hora

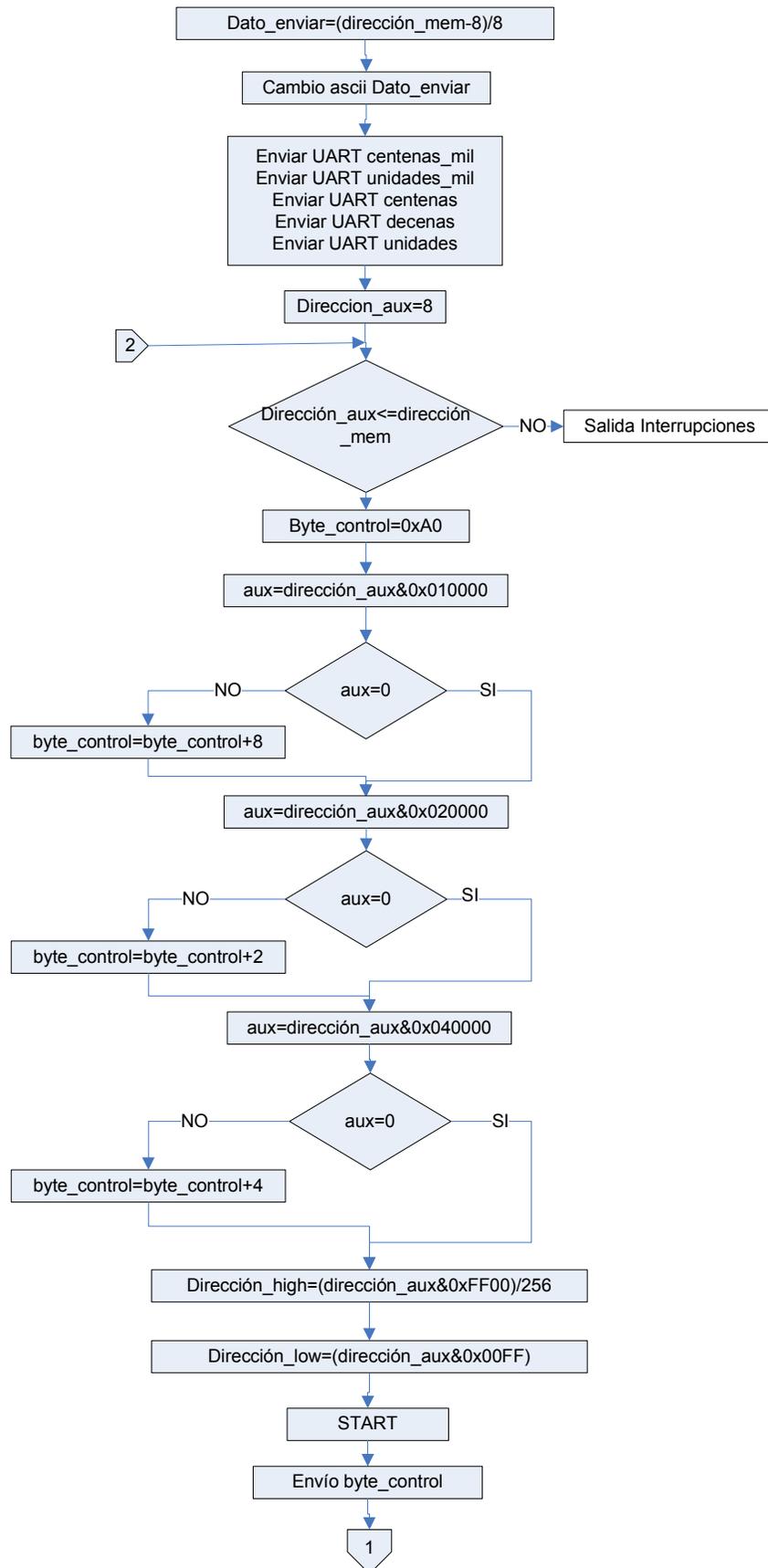
3.1.5.1.8 Descarga de datos

Cuando el microcontrolador recibe el parámetro de descarga de datos, se calcula el número datos almacenados, este valor corresponderá a la dirección del siguiente espacio de memoria disponible menos 8 unidades y dividido para ocho bytes por cada medida. Este dato se envía por el módulo UART en cinco dígitos ASCII.

Los datos son leídos en tramas de 8 bytes iniciando en la dirección 0x08 de la memoria 0xA0, los cuales son reordenados y enviados por la interfaz UART en el formato dd/mm/aa, velocidad(00.0), dirección(000) y temperatura (+00.0).

Una variable auxiliar de 19 bits indica que memoria, que bloque y que dirección se lee, dicha variable es incrementada en 8 cuando finaliza la descarga y envío de 8 bytes.

El proceso se repite hasta que todos los datos almacenados hayan sido descargados.



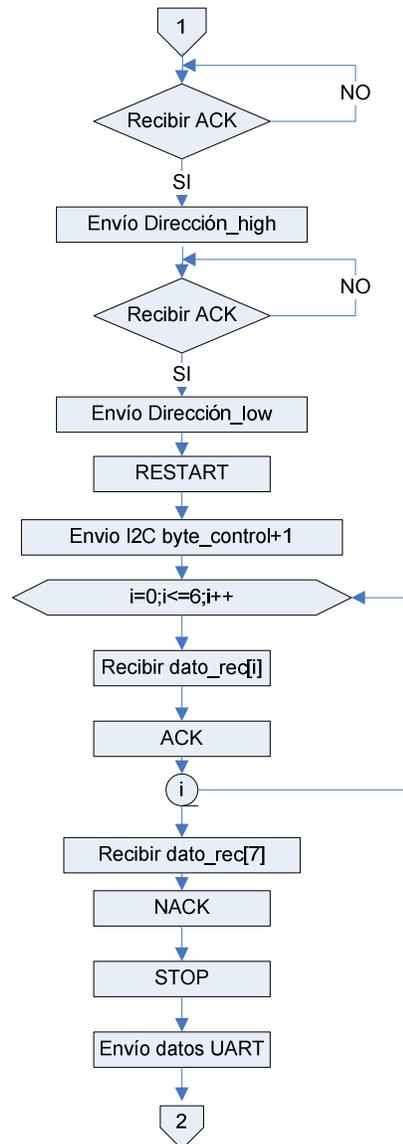


Figura 3.39 Diagrama de flujo Descarga de datos

3.1.5.2 Cambio decimal BCD

Esta rutina permite transformar un número decimal tipo entero a caracteres ASCII representados en cinco variables que corresponden a unidades, decenas, centenas, unidades de mil y decenas de mil. Para ello se realizan divisiones y sucesivas para 10, 100, 1000 y 10000. Las operaciones se muestran en el diagrama siguiente. Esta rutina también es usada para obtener los dígitos BCD, considerando que la diferencia entre dígitos BDC y ASCII es de 48.

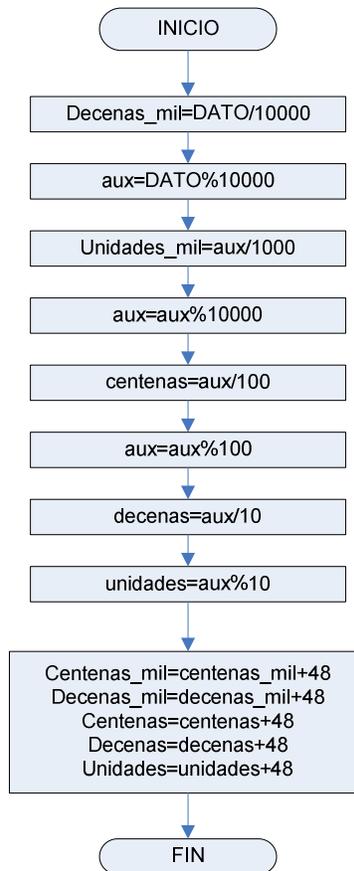


Figura 3.40 Diagrama de flujo Cambio decimal ASCII

3.1.5.3 Subrutinas I2C

Las subrutinas I2C utilizadas corresponden a START, STOP, RESTART, ACK, NACK, Recepción y Envío.

- START.- Escribe 1L en el bit SEN del registro I2CCON, monitorea este bit para confirmar que la secuencia se termine de generar.
- STOP.- Escribe 1L en el bit PEN del registro I2CCON, monitorea este bit para confirmar que la secuencia se termine de generar.
- RESTART.- Escribe 1L en el bit RSEN del registro I2CCON, monitorea este bit para confirmar que la secuencia se termine de generar.
- ACK.- Configura el ACKDT = 0, y escribe 1L en el bit ACKEN del registro I2CCON, para confirmar que la secuencia se termine de generar.

- NACK.- Configura el ACKDT = 1, y escribe 1L en el bit ACKEN del registro I2CCON, para confirmar que la secuencia se termine de generar.
- Recepción.- Escribe 1L en el bit RCEN del registro I2CCON para habilitar la recepción, monitorea el bit RBF para detectar cuando una trama fue recibida.
- Transmisión.- Escribe el dato a transmitirse en el registro I2CTRN, la transmisión comienza inmediatamente. Monitorea el registro TBF y TRSTAT del registro I2CCON para asegurar que la transmisión se finalice.

3.1.5.4 Interrupción TMR2

Esta interrupción es utilizada para evitar que el programa caiga en un lazo infinito en la medición en el caso de que la señal ultrasónica generada no sea receptada por el transmisor debido a obstrucciones entre el emisor y el receptor o fallas en los transductores.

La interrupción es activada en el momento de empezar la medición, si la señal no se recepta después de 2.2 ms (65536 CM) se genera la interrupción y las banderas que indican al programa la recepción de la señal son activadas, evitando de esta manera caer en un lazo infinito y continuar con el siguiente par de transductores. Los valores de tiempo de vuelo de las mediciones fallidas son encerrados.

3.2 INTERFAZ HMI

La interfaz se basa en el uso de un computador que tenga por lo menos un puerto de comunicación serial. Mediante un cable serial cruzado se conecta el conector macho de la PC con el conector hembra que se encuentra en el anemómetro.

Para la computadora se desarrolló una interfaz programada en Labview 6.1 que utiliza lenguaje de alto nivel. En ella se pueden realizar tres acciones principales:

- Configuración del anemómetro.
- Monitoreo en tiempo real de velocidad, dirección y temperatura.
- Descarga de los datos almacenados en la memoria del anemómetro.

Cada acción se encuentra separada en una pestaña diferente para facilitar la interacción del usuario con el anemómetro ultrasónico, además en cada pestaña se encuentran secciones que distribuyen las acciones que el usuario puede comandar.

Cuando el usuario selecciona una de las pestañas se deshabilitan automáticamente las acciones de las otras para evitar problemas en el funcionamiento del anemómetro y de la interfaz. Así para tomar otra acción se debe primero terminar la actual y escoger la pestaña pertinente.

3.2.1 CONFIGURACIONES

En la pestaña "Configuraciones" están todas las acciones que el usuario puede tomar para seleccionar la forma en que se desea el anemómetro funcione.

Además se encuentra una ayuda que describe el funcionamiento básico de cada pestaña y acción que puede el usuario tomar.

Junto al botón que despliega la ayuda se encuentra además el botón que permite cerrar la interfaz.

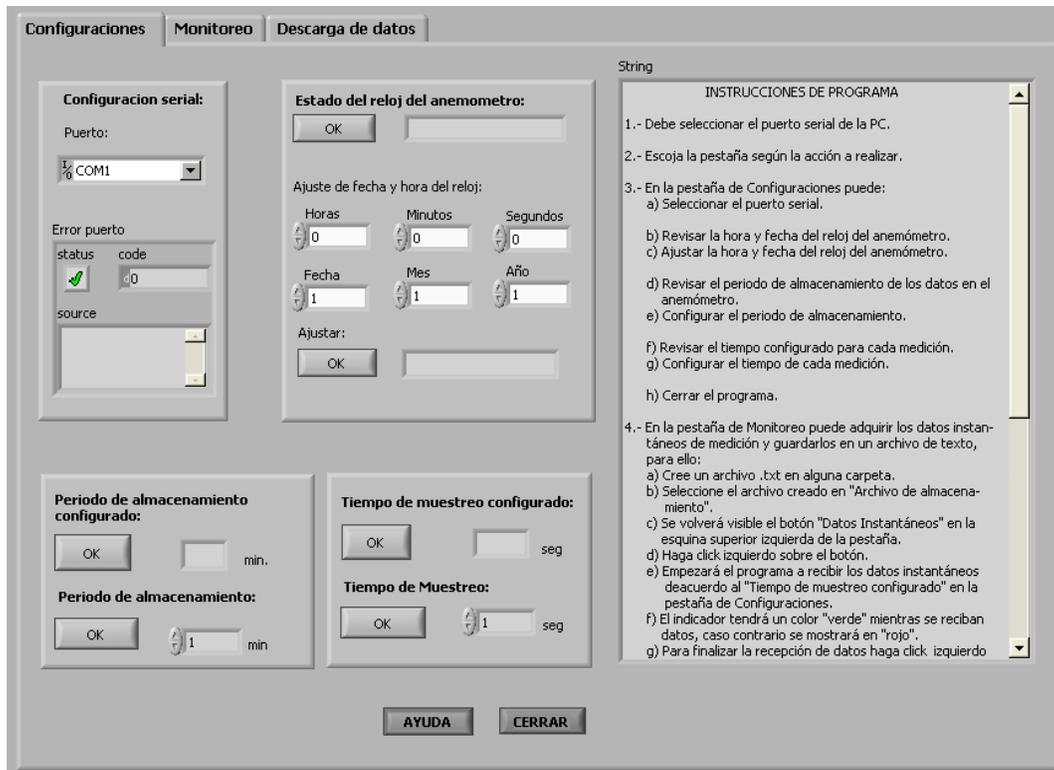


Figura 3.41 Pestaña “Configuraciones”.

3.2.1.1 Configuración de la comunicación serial

En el primer recuadro se puede escoger el puerto serial que utilizará el computador para la comunicación. Aparecen además mensajes de error o éxito en la comunicación serial, indicando al usuario el estado del puerto y si la transmisión fue exitosa.



Figura 3.42 Configuración serial.

3.2.1.2 Configuración de la hora y fecha

En el segundo recuadro es posible configurar el reloj en tiempo real del anemómetro.

Si se da un click en el botón “Estado del reloj del anemómetro” se visualiza la hora y fecha que está configurada. La computadora envía el comando “r” indicando al microcontrolador que debe comunicarse mediante I2C con el reloj para obtener los valores de fecha y hora. Posteriormente el microcontrolador envía 17 bytes con la información requerida que se visualiza con el formato “días/mes/año hora/minuto/segundo”.



Figura 3.43 Fecha y hora configurada.

Para cambiar los valores de fecha y/u hora existen seis selectores, uno para cada parámetro que deben ser los primeros en escogerse: horas (de 0 a 23), minutos (de 0 a 59), segundos (de 0 a 59), fecha (de 0 a 31), mes (de 0 a 12) y año (de 0 a 99).

En cada selección de mes y año, la interfaz asegura que la fecha no exceda el máximo permitido de 30 o 31 días según el mes seleccionado, considerando además años bisiestos y el mes de febrero.

Luego de estar seguro de la configuración el usuario puede dar un click izquierdo en el botón “Ajustar”. El programa al detectar este evento envía el comando “R” para indicar al microcontrolador que se requiere configurar el reloj. Cuando el microcontrolador acaba de realizar las tareas pendientes envía a la interfaz un byte de confirmación para iniciar la transmisión de datos. La interfaz empieza a enviar los datos configurados y al recibir todos el microcontrolador escribe en los registros correspondientes del reloj los valores.

Seguidamente el usuario puede confirmar la correcta escritura de la hora y fecha en el anemómetro, gracias a que el microcontrolador envía los valores escritos nuevamente a la interfaz para que esta los muestre en un indicador.

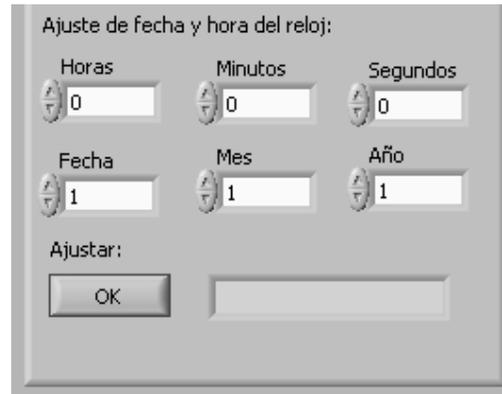


Figura 3.44 Igualación del reloj.

3.2.1.3 Configuración del periodo de almacenamiento

Al dar un click en el botón “Periodo de almacenamiento configurado” del tercer recuadro el usuario obtiene en el indicador el tiempo en minutos que el microcontrolador cuenta para guardar los datos en el banco de memorias.

Para ello la interfaz envía el comando “a”, al recibirlo el microcontrolador procede a leer el espacio de memoria correspondiente donde se guarda esta información. Seguidamente envía 2 bytes que representan dicho valor y que la interfaz muestra en el indicador.

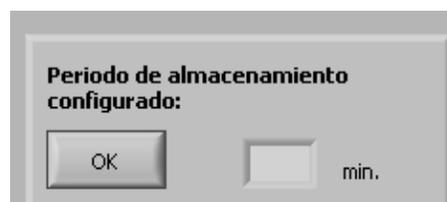


Figura 3.45 Indicador del periodo de almacenamiento.

Si se desea configurar el periodo, primero se debe seleccionar uno de los cuatro tiempos posibles: 1, 2, 5 y 10 minutos. Seguidamente se da un click izquierdo en el botón “Periodo de almacenamiento” y la interfaz envía el

comando “A” indicando al microcontrolador que habilite el banco de memorias para escribir el registro correspondiente. Luego el microcontrolador avisa a la interfaz que puede enviar el periodo de almacenamiento y se transmite un byte con la información correspondiente. El microcontrolador al recibir el valor lo escribe en el banco de memorias y lo toma como referencia para contar el tiempo entre cada periodo de almacenamiento.



Figura 3.46 Configuración del periodo de almacenamiento.

3.2.1.4 Configuración del tiempo de muestreo

El botón “Tiempo de muestreo configurado” permite conocer el tiempo que el anemómetro tardará en realizar cada medición; es decir el tiempo en el que se obtendrá una medida diferente en los conversores digital análogos y en el monitoreo. Para ello la interfaz envía el comando “B” al microcontrolador que al recibirlo envía la información del registro que guarda el valor del tiempo de muestreo para ser visualizada en el indicador correspondiente.



Figura 3.47 Tiempo de muestreo.

Se puede adicionalmente configurar dicho periodo seleccionando uno de los valores posibles (1, 2 o 4 segundos) y luego dando click izquierdo en el botón “Tiempo de muestreo”.



Figura 3.48 Configuración del tiempo de muestreo.

3.2.2 MONITOREO

La pestaña “Monitoreo” sirve principalmente para obtener datos instantáneos de velocidad y dirección del viento junto con la temperatura, es decir para visualizar y guardar las mediciones que en ese momento está realizando el anemómetro.

Para ello la interfaz tiene tres tipos principales de visualizadores: dos numéricos y uno gráfico.

- El primer tipo de visualizador numérico permite ver los datos con la precisión que entrega el anemómetro directamente. Se utiliza para mostrar al usuario de forma clara y precisa el valor de los datos instantáneos. Además el usuario puede obtener directamente las mediciones en diversas unidades.
- El segundo tipo de visualizador numérico muestra los datos de velocidad en metros por segundo, la dirección en grados centesimales y la temperatura en grados centígrados.

Para la velocidad y temperatura este tipo de visualizador le permite al usuario tener idea de la magnitud de la variable, es decir que tan fuerte o débil es el viento y que tan caliente o frío está el ambiente.

Para la dirección permite visualizar desde donde se dirige el viento.

- El tercer tipo permite en cambio ver la variación de los tres datos, ya que presenta la gráfica de los valores medidos en función del tiempo de muestreo.

Este visualizador es de gran ayuda para determinar rachas en el viento, dirección predominante del viento, rangos y promedios de temperatura. Además permite establecer valores máximos y mínimos de las medidas fácilmente.

Se puede emplear además el “Monitoreo” para comprobar el buen funcionamiento del anemómetro comparándolo con otros equipos y estableciendo márgenes de error.

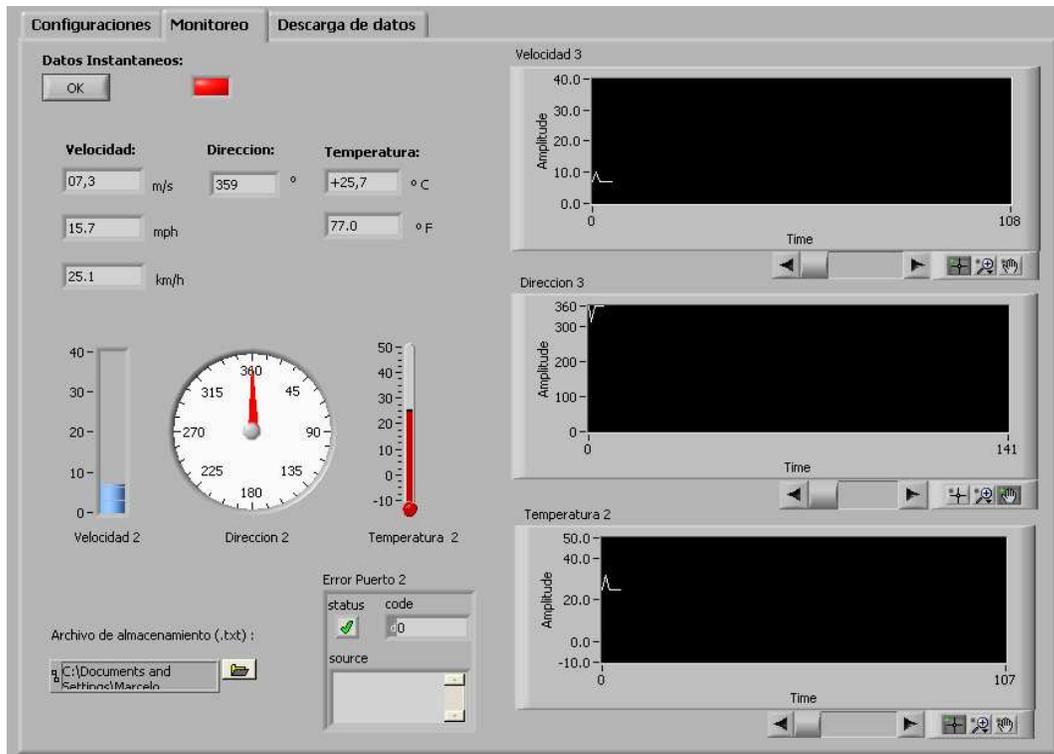


Figura 3.49 Pestaña “Monitoreo”

Para iniciar el monitoreo la primera acción a seguir es la creación de un archivo de texto (con extensión “.txt”) fuera de la interfaz.

Comúnmente se puede aprovechar la aplicación “Bloc de notas” que siempre se encuentra instalada en las computadoras con sistema operativo WINDOWS desde las versiones más antiguas hasta las modernas. Para ello se abre el programa desde Inicio>Todos los programas>Accesorios>Bloc de notas, y sin escribir nada se lo guarda en la ubicación deseada y se cierra la aplicación.

Luego en la pestaña “monitoreo” de la interfaz se escoge el archivo creado y aparecerá el botón que habilita la recepción de los datos instantáneos.

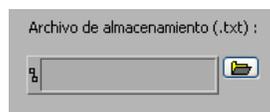


Figura 3.50 Icono para la selección del archivo de texto.

Simplemente al dar un click izquierdo sobre el botón “Datos instantáneos” empezarán a aparecer en los indicadores, los valores correspondientes y el indicador cambiará su color de rojo a verde.



Figura 3.51 Activación de la descarga de los datos instantáneos.

La interfaz envía el comando “E” para indicar al microcontrolador que envíe los datos instantáneos de las variables según el periodo de muestreo.

Luego de que el anemómetro realiza una medición envía a la PC el comando “X” para indicarle que va a empezar a enviar los datos. Envía primero la velocidad, luego la dirección y termina con la temperatura. La interfaz hace el tratamiento adecuado de los datos para mostrarlos en los distintos visualizadores y los guarda en el archivo de texto. Si el dato no es válido el microcontrolador envía el comando “x”.

Si existe cualquier tipo de error en la comunicación serial el recuadro “Error puerto 2” muestra el estado del puerto y si la comunicación es exitosa o no.

3.2.3 DESCARGA DE DATOS

En la tercera pestaña de la interfaz es posible descargar los datos guardados en el banco de memorias y visualizarlos en una tabla de texto (cada tipo de dato en una columna) o en indicadores gráficos (uno para cada parámetro medido). Además permite exportar los datos a Excel para proceder al tratamiento respectivo.

Al completar la descarga la interfaz muestra los resultados y envía los datos a Excel que se abrirá en una ventana diferente.

Se pueden visualizar los datos guardados de velocidad, dirección o temperatura (históricos) escogiendo una de las opciones en el selector que se encuentra en la parte inferior del visualizador gráfico. Además se puede escoger si se desea mantener abierta la ventana de Excel luego de terminar la descarga o si únicamente se desea guardar los datos de extensión “.xls”.

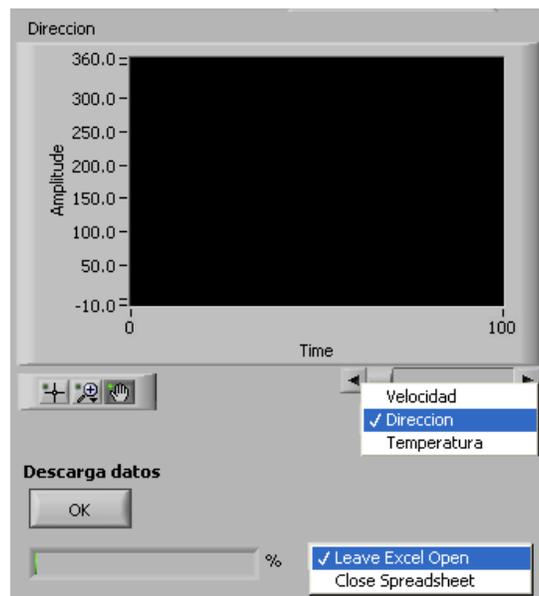


Figura 3.54 Selección de gráfico y de Excel.

En el recuadro “Error puerto 3” se puede ver el estado del puerto serial y si la transmisión y recepción de datos es satisfactoria; mientras que en el recuadro “Error Excel” se puede ver si el envío de datos a la hoja de cálculo Excel es exitosa o no.

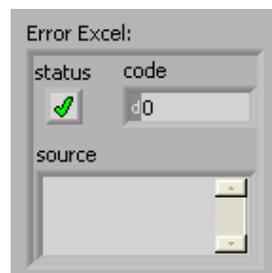


Figura 3.55 Error Excel

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el fin de determinar si se satisfacen los objetivos planteados y delimitar el comportamiento del sistema implementado se realizaron una serie de pruebas que se detallan en el presente capítulo. Estas pruebas permiten determinar las características del equipo tales como estabilidad, precisión, limitaciones, etc.; comparando los resultados con sensores comerciales usados como referenciales. Además demuestran la compatibilidad con registradores comerciales y su funcionamiento general.

4.1 PRUEBAS DE VELOCIDAD DEL VIENTO

Para comprobar la repuesta de la medición de velocidad del viento se realizaron dos pruebas que se detallan a continuación:

4.1.1 ESTABILIDAD Y ERROR DE OFFSET

El objetivo de esta prueba es determinar el comportamiento del sistema en condiciones de calma. Para ello se colocó el sensor en un cuarto cerrado donde se suponen condiciones de calma y se monitoreó la respuesta durante doce horas.



Figura 4.1 Prueba de estabilidad y offset

Las respuestas obtenidas fueron monitoreadas de tres maneras. En primer lugar se muestran los datos obtenidos a través de la interfaz RS232 y monitoreados desde una PC con un periodo de muestreo configurado de 1 segundo.

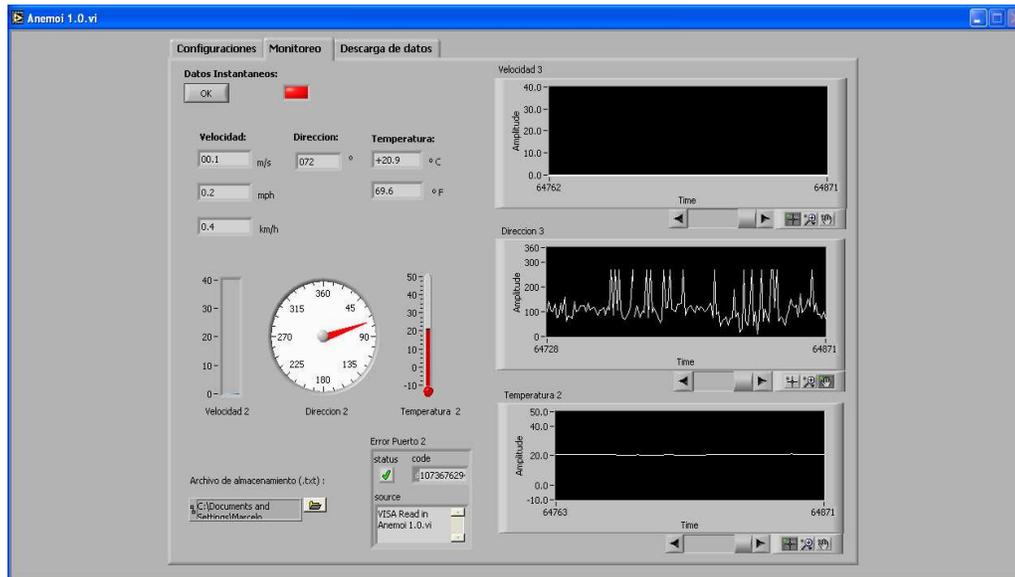


Figura 4.2 Respuesta HMI

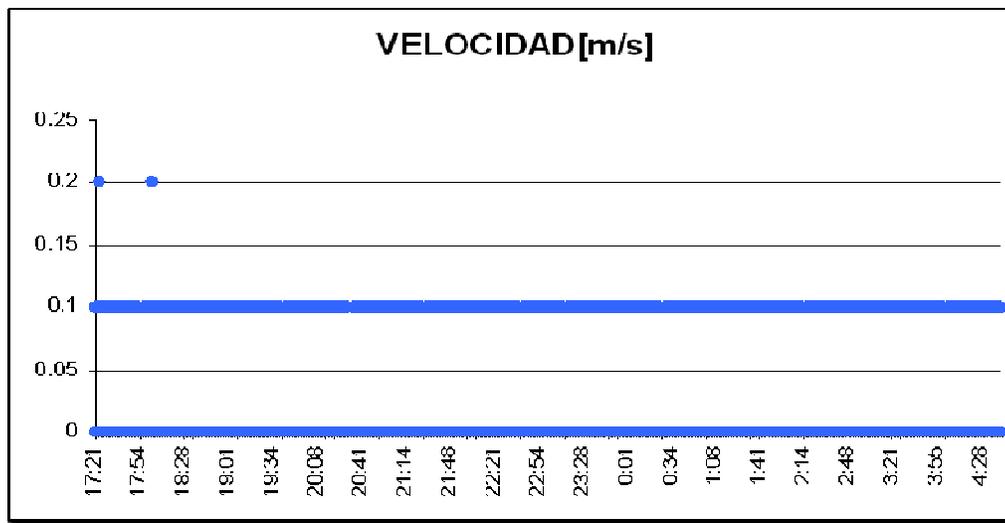


Figura 4.3 Datos obtenidos

(NOTA: Se grafican los 3200 primeros datos, por la capacidad de Excel)

Los datos obtenidos del almacenamiento interno del equipo se muestran a continuación. El periodo de almacenamiento configurado es de 1 minuto.

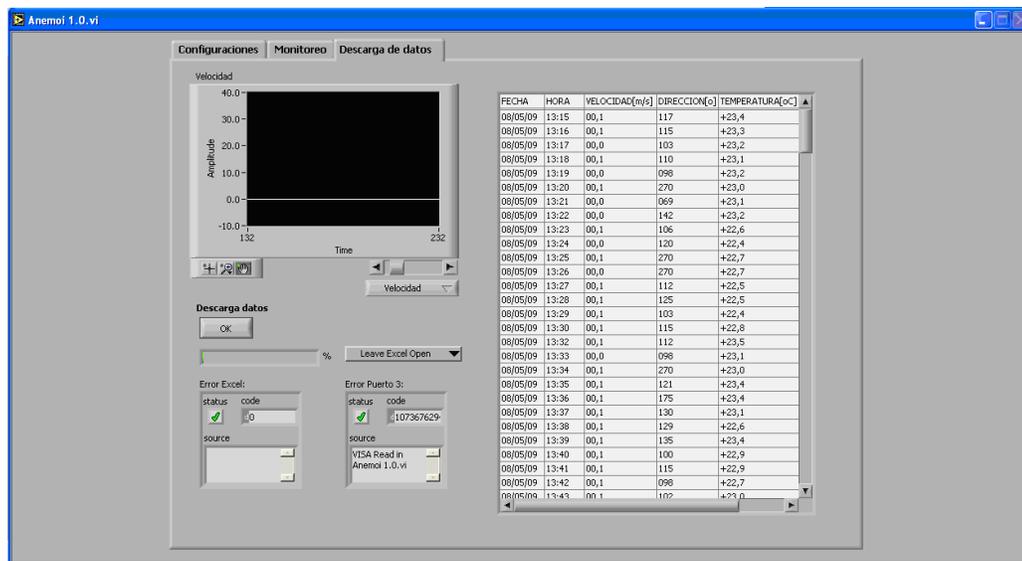


Figura 4.4 Respuesta HMI

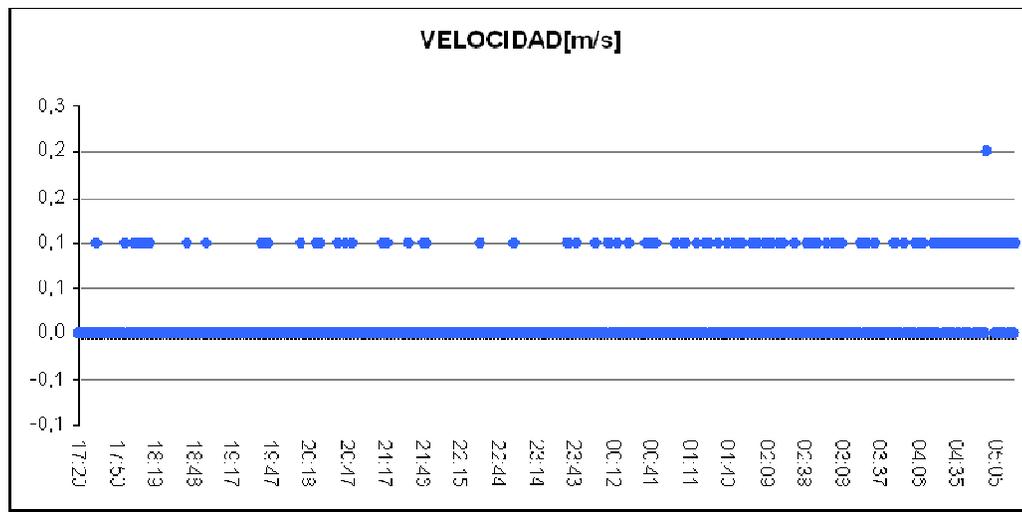


Figura 4.5 Datos obtenidos

Los resultados fueron también obtenidos a través de las salidas análogas y almacenados en el registrador OTT LogoSens, equipo principalmente utilizado en el INAMHI. La descarga de datos se la realizó a través del software Hydras3 de OTT. Los resultados se muestran a continuación:

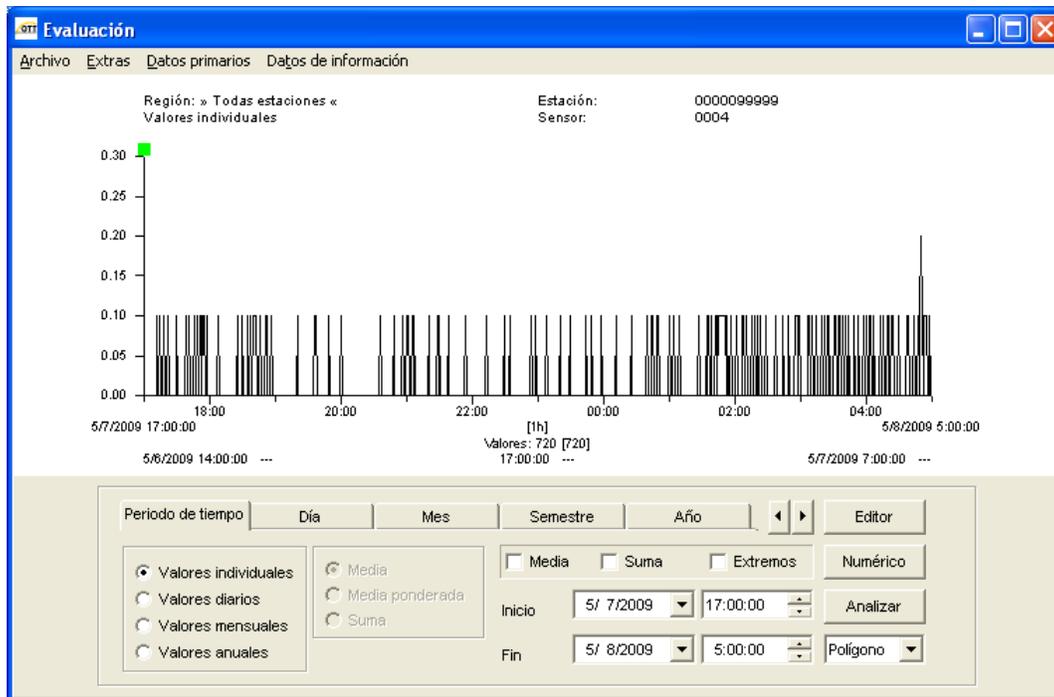


Figura 4.6 Datos obtenidos

De esta prueba se concluye que el sistema presenta una desviación de offset máxima de 0.2 m/s, siendo típica la de 0.1m/s. Es necesario notar que la condición de calma no se puede asegurar, debido a que la habitación no es totalmente hermética e incluso si así lo fuera existen flujos de aire causados por las diferencias de temperatura en las masas de aire.

El sensor en un periodo largo de prueba en calma ha demostrado tener una buena estabilidad en la medición, ya que en todo el intervalo de datos obtenidos, no se presentaron medidas con gran error o valores dudosos.

Igualmente es posible comprobar el buen funcionamiento del almacenamiento de datos en la memoria interna, ya que los datos guardados corresponden a los medidos. Además se demuestra la compatibilidad del equipo con el registrador por medio de las salidas análogas.

4.1.2 CURVAS DE RESPUESTA

El objetivo de la prueba es determinar la curva de respuesta del sistema en un rango amplio de velocidades confrontado datos con un sensor comercial de similares características.

La prueba se realizó en el túnel de viento disponible en el Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El túnel de viento posee un área de trabajo de 30 cmx30cm y una longitud de 1m en donde se colocaron simultáneamente ambos sensores uno a continuación del otro, el flujo de viento es generado por dos ventiladores axiales en serie de 5HP cada uno que pretenden entregar un flujo lo más uniforme posible.

La velocidad en el túnel de viento se controla con la apertura de dos compuertas que regulan el flujo de aire.



Figura 4.7 Prueba para obtener la Curva de respuesta del sistema

Para confrontar los datos se utilizó el sensor Ultrasónico VAISALA WXT510, cuyas características se muestran a continuación:

Tabla 4.1 Características WXT510 [45]

VELOCIDAD	
Rango	0-60 m/s
Precisión de 0-35 m/s	±3 %
Precisión de 36-60 m/s	±5 %
DIRECCION	
Rango	0 a 360°
Precisión	±3°
Tiempo de respuesta	250 ms
TEMPERATURA	
Rango	-52°to +60°C
Precisión	±0.3°C @ +20°C

Para la prueba se abrieron progresivamente las compuertas, 1/30 cada diez mediciones del sistema a ser probado. Se tomaron paralelamente los valores con el sensor WXT510. Luego se procedió a cerrar las compuertas con 1/24 de velocidad. La prueba se realizó a una temperatura ambiente de 20°C.

Los resultados se muestran a continuación:

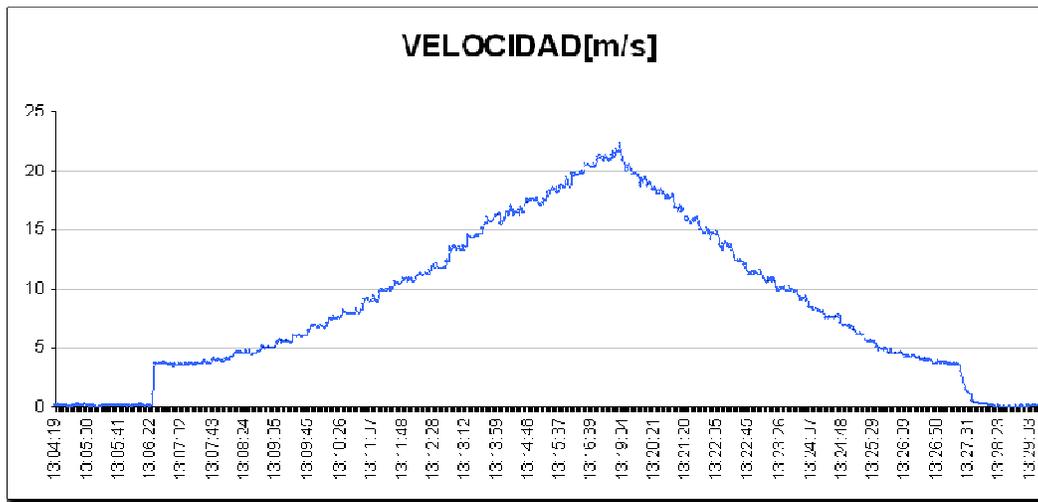


Figura 4.8 Resultados almacenados por el HMI

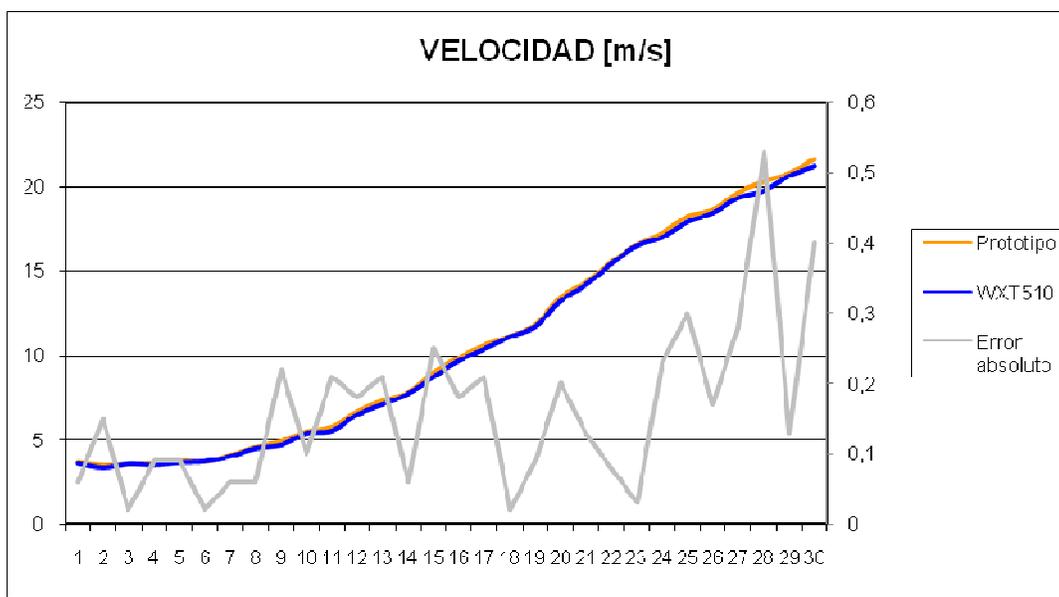


Figura 4.9 Resultados obtenidos WXT510 y el Prototipo (velocidad ascendente)

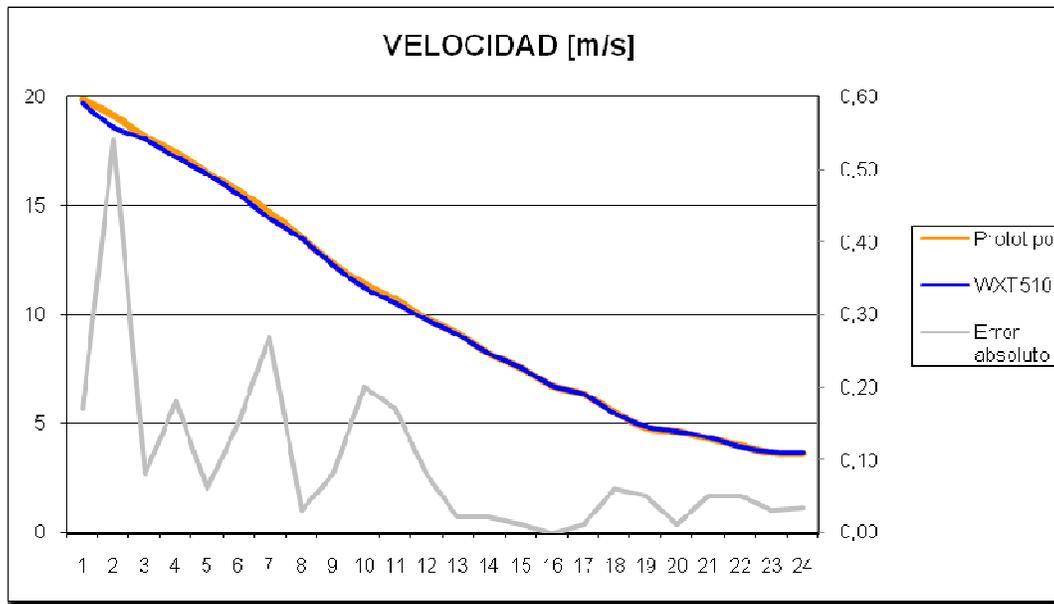


Figura 4.10 Resultados obtenidos WXT510 y el Prototipo (velocidad descendente)

De los resultados obtenidos se presenta a continuación una tabla comparativa entre la respuesta del sistema y el sensor comercial a partir de la cual se realizan cálculos de errores.

La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos del valor promedio y puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas da la precisión de éstas [33].

El error relativo cometido permite obtener una estimación de la exactitud del instrumento.

Tabla 4.2 Tabla comparativa y cálculo de errores (velocidad ascendente)

Número de muestra	Velocidad del Prototipo [m/s]	Velocidad del sensor patrón [m/s]	Promedio de datos del prototipo [m/s]	Promedio de datos del sensor patrón [m/s]	Error relativo [%] (Exactitud)	Desviación estándar [m/s] (Precisión)
0	3,7	3,8	3,68	3,62	1,66	0,08
	3,6	3,7				
	3,8	3,6				
	3,7	3,5				
	3,6	3,5				
	3,6	3,6				
	3,7	3,5				
	3,6	3,6				
	3,8	3,7				
	3,7	3,7				
1	3,5	3,3	3,51	3,36	4,46	0,07
	3,6	3,4				
	3,6	3,3				
	3,6	3,5				
	3,5	3,3				
	3,5	3,4				

	3,4	3,3				
	3,5	3,4				
	3,5	3,4				
	3,4	3,3				
2	3,6	3,7	3,57	3,59	0,56	0,05
	3,6	3,7				
	3,6	3,5				
	3,6	3,5				
	3,5	3,6				
	3,5	3,6				
	3,6	3,6				
	3,5	3,5				
	3,6	3,5				
	3,6	3,7				
3	3,7	3,4	3,62	3,53	2,55	0,08
	3,5	3,5				
	3,6	3,5				
	3,7	3,6				
	3,7	3,6				
	3,6	3,6				
	3,6	3,5				
	3,5	3,5				
	3,6	3,6				
	3,7	3,5				
4	3,9	3,8	3,76	3,67	2,45	0,15
	3,9	3,8				
	3,7	3,7				
	3,8	3,6				
	3,6	3,5				
	3,5	3,6				
	3,6	3,7				
	3,8	3,5				
	3,9	3,8				
	3,9	3,7				
5	3,9	3,9	3,72	3,74	0,53	0,22
	3,9	3,9				
	3,8	3,9				
	3,8	3,9				
	3,4	3,4				
	3,3	3,5				
	3,6	3,7				
	3,7	3,6				
	3,9	3,8				
	3,9	3,8				
6	4,1	4	4,1	4,04	1,49	0,05
	4,1	4,1				
	4,1	4				
	4,1	4				
	4,2	4,1				
	4,1	4				
	4,1	4				
	4	4,1				
	4,1	4,1				
	4,1	4				
7	4,8	4,5	4,57	4,51	1,33	0,17
	4,8	4,5				
	4,6	4,6				
	4,4	4,3				
	4,3	4,5				
	4,5	4,4				
	4,4	4,6				
	4,6	4,5				
	4,7	4,6				
	4,6	4,6				
8	5	4,8	4,93	4,71	4,67	0,08
	4,9	4,7				
	5	4,7				
	5	4,7				
	5	4,6				
	4,9	4,7				
	5	4,7				
	4,9	4,8				
	4,8	4,7				
	4,8	4,7				
9	5,6	5,4	5,49	5,39	1,86	0,07
	5,6	5,3				
	5,5	5,1				

	5,5	5,3				
	5,4	5,4				
	5,5	5,6				
	5,5	5,5				
	5,4	5,4				
	5,4	5,5				
	5,5	5,4				
10	6,1	5,5	5,76	5,55	3,78	0,21
	6,1	5,8				
	5,6	5,6				
	5,9	5,1				
	5,6	5,4				
	5,6	5,8				
	5,7	5,6				
	5,8	5,7				
	5,5	5,4				
	5,7	5,6				
11	6,6	6,1	6,7	6,52	2,76	0,12
	6,9	6,6				
	6,7	6,7				
	6,9	6,3				
	6,6	6,7				
	6,7	6,7				
	6,7	6,4				
	6,6	6,3				
	6,6	6,7				
	6,7	6,7				
12	7,3	7,1	7,34	7,13	2,95	0,05
	7,3	7,1				
	7,4	7,2				
	7,4	7,1				
	7,3	7,1				
	7,3	7,1				
	7,4	7,1				
	7,4	7,2				
	7,3	7,2				
	7,3	7,1				
13	7,9	7,6	7,81	7,75	0,77	0,07
	7,8	7,7				
	7,8	7,8				
	7,8	7,7				
	7,9	7,8				
	7,9	7,8				
	7,8	7,7				
	7,7	7,8				
	7,8	7,8				
	7,7	7,8				
14	9,1	8,8	9	8,75	2,86	0,07
	9,1	8,8				
	9	8,7				
	9	8,7				
	9	8,8				
	9	8,7				
	8,9	8,7				
	8,9	8,7				
	9	8,8				
	9	8,8				
15	9,9	9,7	9,88	9,7	1,86	0,06
	9,9	9,6				
	9,9	9,7				
	9,9	9,6				
	10	9,7				
	9,8	9,6				
	9,8	9,8				
	9,9	9,9				
	9,9	9,7				
	9,8	9,7				
16	10,5	10,2	10,61	10,4	2,02	0,13
	10,4	10,1				
	10,5	10,2				
	10,6	10,4				
	10,7	10,4				
	10,7	10,5				
	10,8	10,5				
	10,7	10,6				
	10,7	10,6				
	10,5	10,5				

17	11,1	11	11,14	11,12	0,18	0,13
	11,1	11				
	11	11,2				
	11,3	11,1				
	11,4	11,1				
	11,1	11,2				
	11,2	11,2				
	11	11,1				
	11	11,2				
18	11,2	11,1	11,81	11,72	0,77	0,09
	11,9	11,8				
	11,8	11,9				
	11,8	11,7				
	11,7	11,6				
	11,7	11,5				
	11,9	11,8				
	11,9	11,8				
	11,8	11,6				
19	11,9	11,9	13,45	13,25	1,51	0,12
	11,7	11,6				
	13,3	13,2				
	13,4	13,2				
	13,5	13,1				
	13,3	13				
	13,6	13,4				
	13,6	13,3				
	13,5	13,4				
20	13,3	13,3	14,34	14,21	0,91	0,08
	13,5	13,2				
	13,5	13,4				
	14,3	14,1				
	14,3	14,2				
	14,3	14,1				
	14,5	14,2				
	14,4	14,3				
	14,4	14,2				
21	14,2	14,2	15,53	15,45	0,52	0,15
	14,3	14,2				
	14,3	14,3				
	14,4	14,3				
	15,2	15,2				
	15,5	15,3				
	15,8	15,6				
	15,5	15,5				
	15,6	15,5				
22	15,6	15,5	16,55	16,52	0,18	0,15
	15,5	15,5				
	15,5	15,5				
	15,5	15,4				
	15,6	15,5				
	15,6	15,5				
	15,5	15,5				
	16,2	16,7				
	16,7	16,3				
23	16,6	16,6	17,25	17,02	1,35	0,14
	16,5	16,4				
	16,6	16,6				
	16,6	16,6				
	16,6	16,4				
	16,6	16,6				
	16,7	16,4				
	16,4	16,5				
	16,6	16,7				
24	17,4	17	18,23	17,93	1,67	0,16
	17,4	17				
	17,4	17				
	17,2	17,1				
	17,1	17				
	17,2	17				
24	17,2	17,1	18,23	17,93	1,67	0,16
	17,2	17,1				
	17,4	17				
	17,1	17				
	17,1	17				
	17,1	17				
24	18	17,7	18,23	17,93	1,67	0,16
	18	17,7				
	18,4	17,8				
	18,3	17,9				
	18,2	18				
	18,2	18				
18,3	18					

	18,1	17,9				
	18,4	18,2				
	18,4	18,1				
25	18,6	18,4	18,64	18,47	0,92	0,10
	18,6	18,5				
	18,6	18,4				
	18,8	18,6				
	18,6	18,5				
	18,5	18,6				
	18,6	18,6				
	18,7	18,4				
	18,6	18,4				
	18,8	18,3				
26	19,8	19,5	19,65	19,37	1,45	0,13
	19,8	19,5				
	19,5	19,3				
	19,6	19,3				
	19,7	19,3				
	19,6	19,4				
	19,7	19,4				
	19,8	19,3				
	19,5	19,3				
	19,5	19,4				
27	20,4	19,7	20,31	19,78	2,68	0,06
	20,3	19,8				
	20,3	19,8				
	20,3	19,9				
	20,3	19,9				
	20,3	19,9				
	20,3	19,7				
	20,4	19,7				
	20,3	19,6				
	20,2	19,8				
28	20,9	20,6	20,79	20,66	0,63	0,22
	21	20,7				
	20,9	20,6				
	20,8	20,7				
	21,1	20,7				
	20,8	20,6				
	20,5	20,6				
	20,6	20,7				
	20,4	20,7				
	20,9	20,7				
29	21,6	21,1	21,63	21,23	1,88	0,25
	21,1	21,2				
	21,6	21,2				
	21,6	21,2				
	21,9	21,2				
	21,6	21,3				
	22	21,3				
	21,5	21,3				
	21,6	21,2				
	21,8	21,3				
			Máximos:	4,67	0,25	
			Mínimos:	0,00	0,05	

Tabla 4.3 Tabla comparativa y cálculo de errores (velocidad descendente)

Número de muestra	Velocidad del Prototipo [m/s]	Velocidad del sensor patrón [m/s]	Promedio de datos del prototipo [m/s]	Promedio de datos del sensor patrón [m/s]	Error relativo [%] (Exactitud)	Desviación estándar [m/s] (Presición)
23	19,9	19,8	19,84	19,67	0,86	0,30
	20,2	20				
	20,4	20				
	19,7	19,2				
	19,7	19,3				
	19,8	19,5				
	19,3	19,7				
	19,9	19,8				
	19,7	19,7				
	19,8	19,7				
22	18,9	18,5	19,11	18,59	2,80	0,23
	19,5	18,7				

	19,1	18,5				
	19,2	18,5				
	18,9	18,7				
	19	18,6				
	18,9	18,5				
	19,1	18,5				
	19,5	18,7				
	19	18,7				
	18,1	18,1				
	18,1	18				
	18,3	18				
21	18,2	18,1	18,13	18,05	0,44	0,11
	18	18				
	18,1	18				
	18	18,2				
	18,1	18				
	18,1	18				
	18,3	18,1				
	17,6	17,4				
	17,9	17,3				
	17,6	17,1				
20	17,3	17,3	17,41	17,23	1,04	0,25
	17,5	17,4				
	17	17,3				
	17,2	17,1				
	17,3	17,1				
	17,3	17,2				
	17,4	17,1				
	16,6	16,4				
	16,6	16,4				
	16,8	16,5				
19	16,7	16,4	16,51	16,45	0,36	0,17
	16,5	16,5				
	16,5	16,5				
	16,3	16,5				
	16,3	16,5				
	16,4	16,4				
	16,4	16,4				
	15,8	15,7				
	15,8	15,5				
	15,7	15,7				
18	15,8	15,5	15,69	15,54	0,97	0,09
	15,6	15,4				
	15,6	15,7				
	15,7	15,4				
	15,6	15,6				
	15,6	15,4				
	15,7	15,5				
	14,7	14,4				
	14,7	14,4				
	14,7	14,4				
17	14,8	14,5	14,71	14,44	1,87	0,06
	14,7	14,4				
	14,6	14,5				
	14,7	14,5				
	14,7	14,4				
	14,8	14,4				
	14,7	14,5				
	13,5	13,6				
	13,5	13,6				
	13,6	13,4				
16	13,7	13,5	13,53	13,5	0,22	0,8
	13,5	13,5				
	13,5	13,4				
	13,5	13,4				
	13,6	13,6				
	13,4	13,6				
	13,5	13,4				
	12,4	12,5				
	12,4	12,3				
	12,3	12,1				
15	12,4	12,1	12,33	12,25	0,65	0,08
	12,2	12,1				
	12,2	12,3				
	12,3	12,3				
	12,4	12,4				
	12,3	12,3				

14	12,4	12,1	11,41	11,21	1,78	0,07
	11,4	11,1				
	11,4	11,1				
	11,5	11,3				
	11,3	11,3				
	11,5	11,2				
	11,5	11,2				
	11,4	11,2				
	11,4	11,3				
	11,3	11,3				
13	11,4	11,1	10,69	10,52	1,62	0,27
	11,4	10,5				
	10,6	10,5				
	10,5	10,5				
	10,7	10,5				
	10,7	10,5				
	10,8	10,6				
	10,6	10,6				
	10,6	10,5				
12	10,5	10,5	9,81	9,73	0,82	0,14
	10	9,8				
	9,8	9,8				
	9,7	9,7				
	9,8	9,8				
	10	9,8				
	9,6	9,6				
	9,7	9,7				
	9,7	9,8				
	9,9	9,6				
11	9,9	9,7	9,12	9,1	0,22	0,08
	9,2	9,2				
	9,2	9,1				
	9,1	8,9				
	9,2	9				
	9,1	9				
	9,1	8,9				
	9,1	9,2				
	9	9,3				
	9,2	9,2				
10	9	9,2	8,23	8,21	0,24	0,14
	8,5	8,5				
	8,4	8				
	8,2	8,2				
	8,3	8,3				
	8,1	8,3				
	8,2	8,1				
	8,3	8,2				
	8,1	8,3				
	8,1	8,2				
9	8,1	8	7,57	7,56	0,13	0,15
	7,6	7,5				
	7,6	7,5				
	7,4	7,6				
	7,6	7,6				
	7,8	7,6				
	7,4	7,6				
	7,5	7,6				
	7,4	7,5				
	7,8	7,5				
8	7,6	7,6	6,73	6,72	0,15	0,12
	6,9	6,8				
	6,7	6,7				
	6,7	6,7				
	6,5	6,5				
	6,9	6,8				
	6,7	6,7				
	6,6	6,8				
	6,8	6,7				
	6,7	6,8				
7	6,8	6,7	6,34	6,33	0,16	0,13
	6,4	6,5				
	6,2	6,2				
	6,1	6,2				
	6,3	6,3				
	6,4	6,2				

	6,4	6,4					
	6,5	6,3					
	6,5	6,5					
	6,4	6,3					
6	5,7	5,7	5,53	5,47	1,10	0,09	
	5,5	5,5					
	5,4	5,4					
	5,6	5,4					
	5,4	5,4					
	5,6	5,5					
	5,5	5,5					
	5,5	5,4					
	5,6	5,4					
	5,5	5,5					
5	4,8	4,8	4,82	4,87	1,03	0,12	
	4,9	4,9					
	4,9	4,9					
	4,8	4,9					
	4,5	4,9					
	4,9	4,8					
	4,9	4,8					
	4,8	4,9					
	4,9	4,9					
	4,8	4,9					
4	4,6	4,7	4,64	4,65	0,22	0,12	
	4,5	4,6					
	4,5	4,5					
	4,5	4,6					
	4,7	4,8					
	4,7	4,5					
	4,7	4,8					
	4,8	4,7					
	4,6	4,7					
	4,8	4,6					
3	4,2	4,3	4,29	4,34	1,15	0,06	
	4,2	4,3					
	4,3	4,3					
	4,3	4,4					
	4,3	4,4					
	4,4	4,3					
	4,3	4,3					
	4,3	4,3					
	4,3	4,4					
	4,3	4,4					
2	4,1	4	3,97	3,92	1,28	0,07	
	4	4					
	3,9	3,8					
	3,9	3,7					
	4	4,1					
	4	4					
	3,9	4,1					
	3,9	3,9					
	4	3,7					
	4	3,9					
1	3,6	3,5	3,66	3,69	0,81	0,11	
	3,8	3,7					
	3,8	3,9					
	3,8	3,9					
	3,6	3,7					
	3,5	3,7					
	3,6	3,5					
	3,6	3,6					
	3,6	3,8					
	3,7	3,6					
0	3,6	3,8	3,63	3,67	0,91	0,11	
	3,5	3,6					
	3,6	3,7					
	3,6	3,8					
	3,5	3,8					
	3,6	3,5					
	3,8	3,6					
	3,8	3,5					
3,7	3,7						
					Máximos:	2,80	0,30
					Mínimos:	0,13	0,06

De la tabla anterior se puede concluir que en la medición del módulo de la velocidad del viento el error máximo cometido es del 4.67% en el rango de velocidades probado para el sistema. Además se puede estimar una precisión de ± 0.3 [m/s].

Es importante notar que las condiciones de prueba no son idóneas: no se puede garantizar un flujo perfectamente homogéneo en el interior de túnel, debido a la disposición de los sensores se producen pérdidas y turbulencias lo que afecta a las mediciones, además hay que considerar la precisión y exactitud del sensor usado como patrón.

Se realizó la prueba de esta forma ya que son los únicos recursos disponibles para poder estimar las características del equipo en un rango amplio de velocidades.

4.2 PRUEBAS DE DIRECCIÓN DEL VIENTO

Para comprobar la repuesta de la medición de dirección del viento se realizó la prueba que se detalla a continuación:

El objetivo de esta prueba es determinar la respuesta del sistema a la medición de la dirección sometiéndolo a un flujo de aire de velocidad constante y determinar el error aproximado.

Esta prueba se realizó en el túnel de viento de la Facultad de Ingeniería Mecánica, se sometió al sistema a una velocidad aproximada de 10m/s y se procedió a girar el sensor en pasos de 30°.

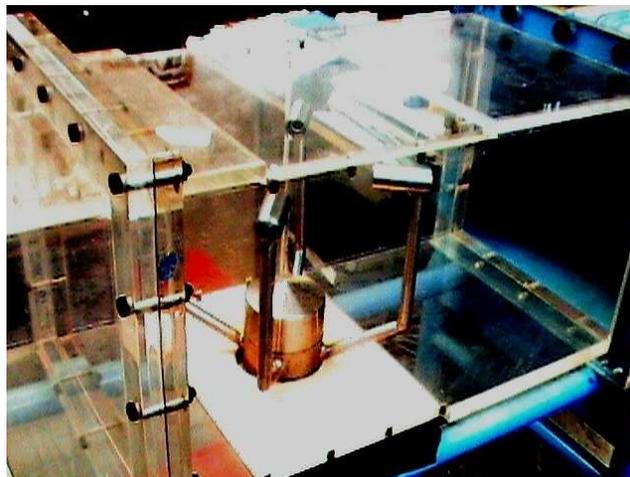


Figura 4.11 Prueba dirección del viento

Para cada ángulo se tomaron 10 medidas y los resultados y cálculos de errores se muestran a continuación:

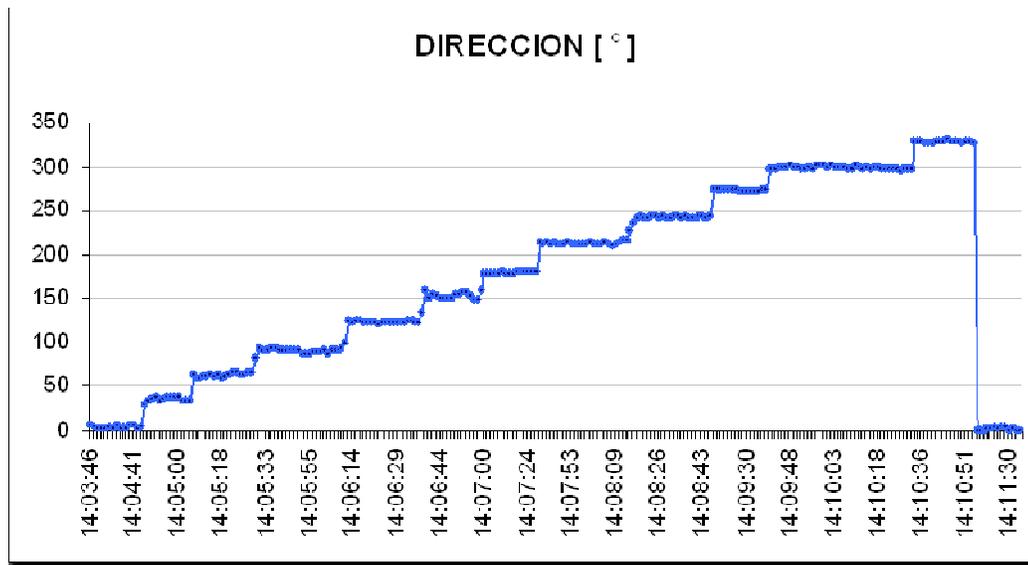


Fig. 4.12 Medición de la dirección del viento

Tabla 4.4 Resultado y cálculo de errores para pruebas de dirección

Angulo real[°]	Angulo medido[°]	Promedio ángulo medido [°]	Error relativo[%] (Exactitud)	Desviación estándar (precisión)[°]
0	2	3.7	-	1.89
	3			
	3			
	5			
	2			
	7			
	2			
	5			
	2			
	6			
30	30	32.1	7.00	1.66
	32			
	33			
	35			
	30			
	31			
	31			
	32			
33				
34				
60	63	61.6	2.67	1.26
	60			
	60			
	61			
	62			
	63			

	62			
	63			
	60			
	62			
90	91	91.8	2.00	1.03
	92			
	92			
	94			
	93			
	92			
	91			
	91			
120	91	123.4	2.83	1.43
	125			
	124			
	125			
	125			
	124			
	123			
	123			
150	122	153	2.00	3.06
	121			
	122			
	155			
	152			
	150			
	150			
	150			
180	154	178.8	0.67	1.03
	154			
	158			
	157			
	179			
	179			
	178			
	178			
210	180	213.3	1.57	0.95
	178			
	178			
	180			
	178			
	178			
	179			
	181			
240	214	242.3	0.96	0.67
	213			
	215			
	213			
	214			
	212			
	213			
	212			
270	214	272.5	0.93	0.71
	213			
	242			
	243			
	243			
	243			
	242			
	243			
300	242	298.8	0.40	1.14
	241			
	273			
	273			
	273			
	273			
	273			
	272			
272				
271				
272				
298				
297				
298				

	299			
	299			
	299			
	301			
	300			
	299			
	298			
330	329	328,3	0,52	1,42
	329			
	329			
	326			
	327			
	326			
	329			
	329			
	329			
	330			
0	329	2.3	-	1.64
	1			
	1			
	0			
	2			
	3			
	4			
	2			
	5			
	4			
1				
	Máximos		7	3.06
	Mínimos		0.40	0.67

De la tabla anterior se puede apreciar que el error máximo cometido es del 7% y que la precisión lograda es de $\pm 3^\circ$. Se debe considerar que el flujo en el interior del túnel no es totalmente laminar, además la estructura de soporte de los transductores genera turbulencias que finalmente afectan las mediciones.

4.3 PRUEBA TEMPERATURA AMBIENTAL

Para comprobar la repuesta de la medición de la temperatura ambiente se realizó la prueba que se detallan a continuación:

El objetivo de esta prueba es determinar la curva de respuesta del sistema y calcular aproximadamente el error comparándolo con un sensor comercial, además servirá para estimar el rango de temperatura de trabajo.

Para esta prueba se utilizó el termómetro digital marca ERTCO, modelo 4400, cuyas características se muestran en la Tabla 4.4; y un refrigerador Marca KELVINATOR.

Tabla 4.5 Características Termómetro digital

Parámetro	Valor
Precisión	$\pm 0.015^{\circ}\text{C}$.
Resolución	$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$
Rango	-20°C to 130°C (-4°F to 266°F).
Nº de Serie	304220
Traceable a N.I.S.T	

Ambos sensores fueron introducidos en el refrigerador con una temperatura inicial igual a la ambiental (con el refrigerador apagado), Luego se procedió a prender a máxima potencia el refrigerador para obtener el mínimo de temperatura, en este lapso de tiempo el refrigerador se apagó automáticamente una vez, detalle que se podrá apreciar en las gráficas. La prueba fue realizada midiendo la temperatura cada 10 minutos desde la temperatura más baja a la ambiental y comparando los resultados entre los sensores.

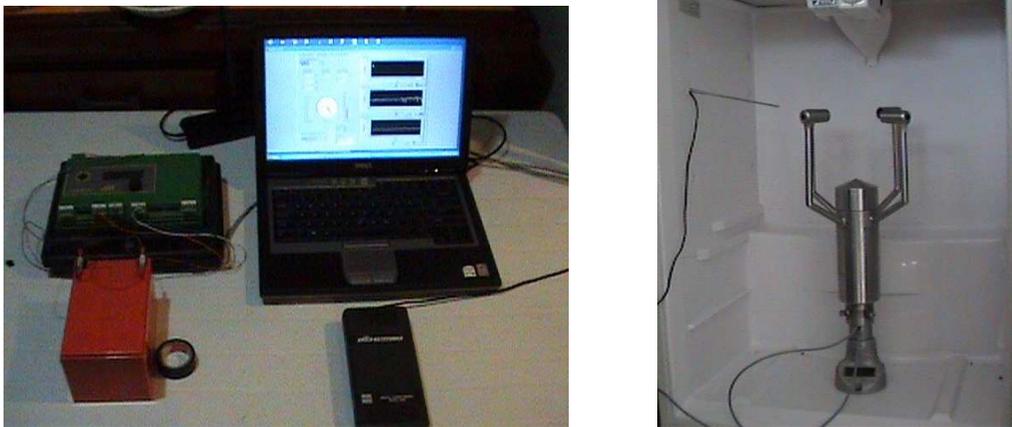


Figura 4.13 Prueba de temperatura para curva de respuesta

Para cada punto de medida se tomaron 10 muestras. Los resultados obtenidos con la interfaz HMI, los almacenados en la memoria interna y los presentados en el registrador OTT LogoSens se muestran a continuación. Además se realiza un cálculo de errores tomando como referencia el valor medido por el termómetro digital:

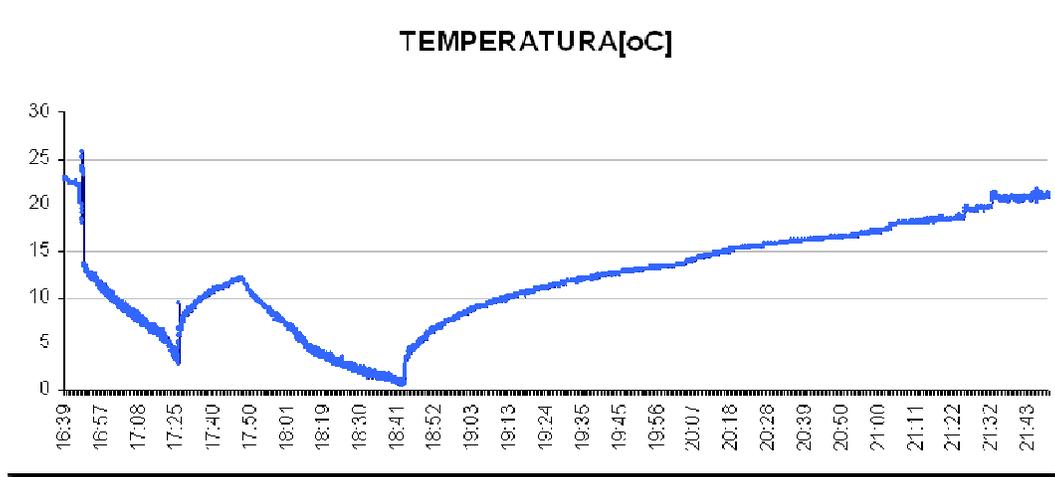


Figura 4.14 Datos obtenidos HMI

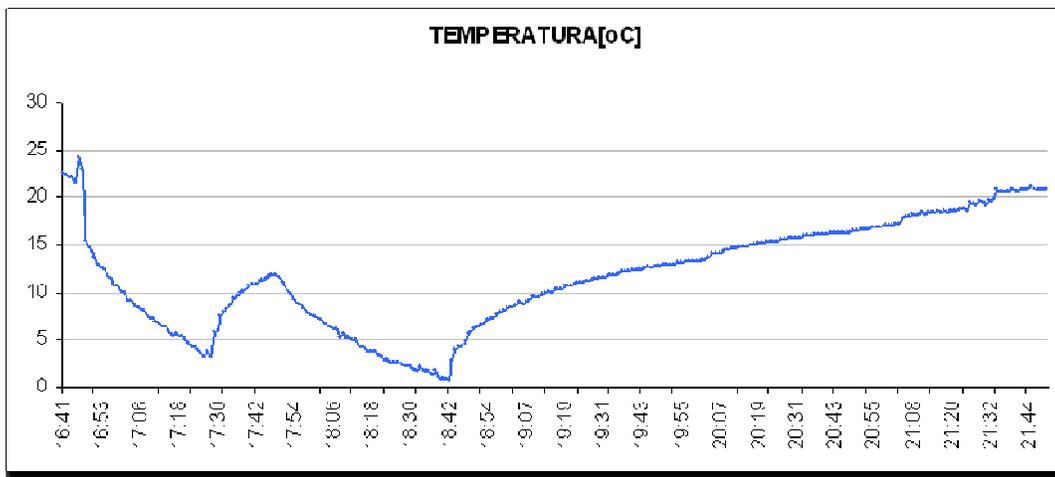


Figura 4.15 Datos obtenidos Almacenamiento Interno.

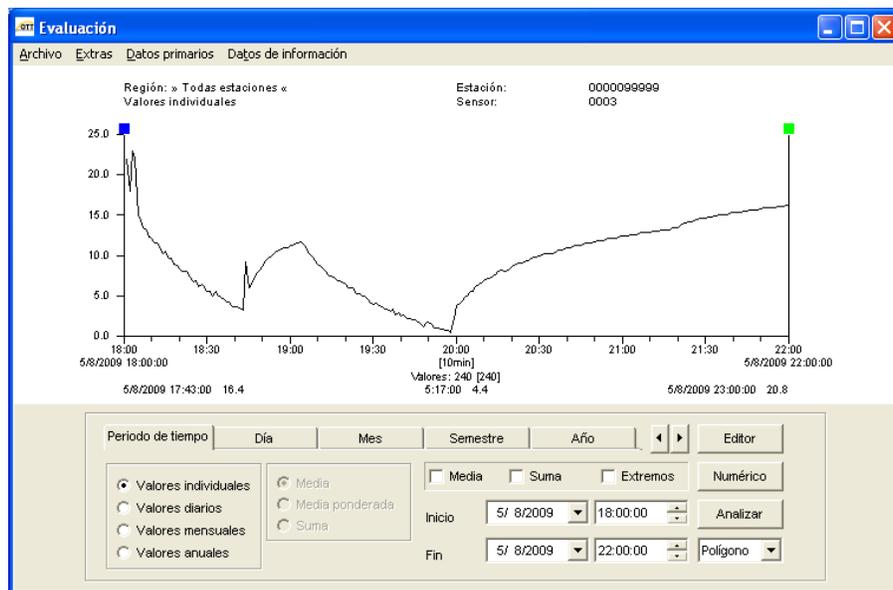


Figura 4.16 Datos almacenados por el Registrador.

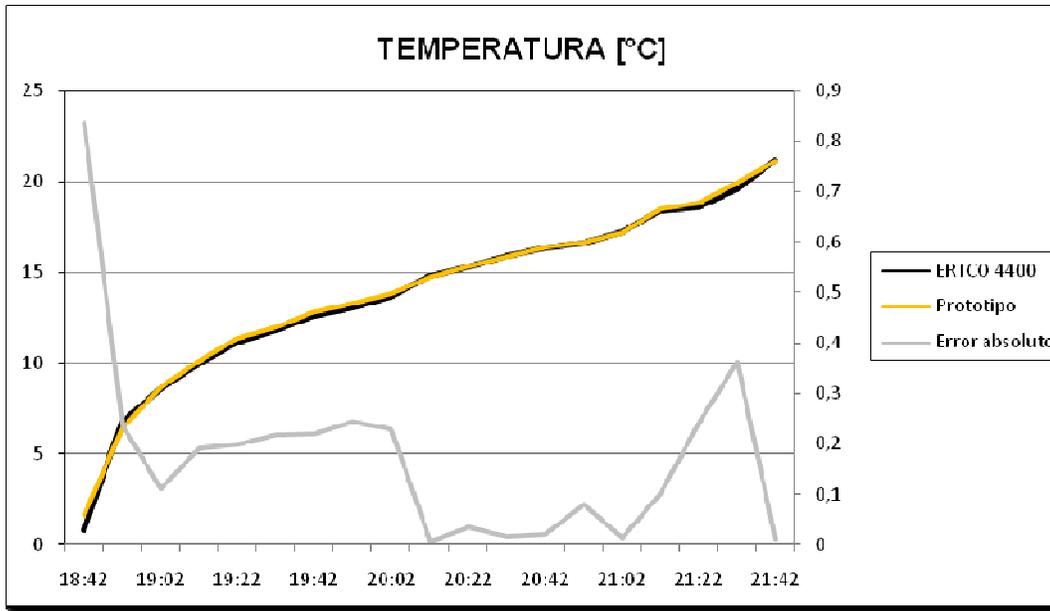


Figura 4.17 Resultado de la prueba (curva de respuesta).

Tabla 4.6 Resultados prueba de temperatura para curva de respuesta

Hora	Temperatura del prototipo [°C]	Temperatura del sensor patrón [°C]	Promedio de datos del prototipo [°C]	Promedio de datos del sensor patrón [°C]	Error relativo [%] (Exactitud)	Desviación estándar [°C] (Precisión)
18:42	0,9	1,69	0,82	1,657	50,51%	0,12
	0,9	1,68				
	0,7	1,67				
	0,9	1,67				
	0,8	1,66				
	0,8	1,65				
	0,7	1,65				
	0,6	1,64				
	0,9	1,63				
18:52	1	1,63	6,71	6,474	3,65%	0,07
	6,7	6,4				
	6,6	6,4				
	6,7	6,42				
	6,7	6,44				
	6,8	6,42				
	6,8	6,49				
	6,6	6,51				
	6,7	6,53				
19:03	6,7	6,55	8,57	8,68	1,27%	0,12
	6,8	6,58				
	8,5	8,62				
	8,3	8,63				
	8,6	8,65				
	8,6	8,65				
	8,5	8,67				
	8,6	8,7				
	8,6	8,7				
8,7	8,71					
8,7	8,73					
8,6	8,74					

19:13	10	10,12	9,96	10,151	1,88%	0,16
	9,8	10,12				
	9,9	10,13				
	10	10,13				
	9,6	10,15				
	10	10,16				
	10	10,16				
	10,1	10,17				
	10,1	10,18				
	10,1	10,19				
19:23	11	11,26	11,16	11,358	1,74%	0,24
	11,1	11,27				
	11	11,28				
	11	11,28				
	11,1	11,28				
	11,1	11,29				
	11,1	11,3				
	11,2	11,31				
	11,2	11,32				
	11,8	11,99				
19:33	11,8	11,99	11,79	12,007	1,81%	0,07
	11,7	11,99				
	11,8	12				
	11,8	12				
	11,9	12,01				
	11,9	12,01				
	11,8	12,02				
	11,7	12,03				
	11,7	12,03				
	12,6	12,81				
19:45	12,6	12,81	12,61	12,829	1,71%	0,12
	12,7	12,82				
	12,7	12,82				
	12,6	12,82				
	12,7	12,83				
	12,6	12,84				
	12,7	12,84				
	12,3	12,84				
	12,6	12,86				
	13,1	13,26				
19:53	13	13,27	13,04	13,283	1,83%	0,05
	13	13,27				
	13	13,28				
	13	13,28				
	13,1	13,29				
	13,1	13,29				
	13,1	13,29				
	13	13,3				
	13	13,3				
	13,6	13,83				
20:02	13,6	13,84	13,62	13,848	1,65%	0,06
	13,6	13,84				
	13,7	13,84				
	13,6	13,85				
	13,5	13,85				
	13,6	13,85				
	13,6	13,86				
	13,7	13,86				
	13,7	13,86				
	14,7	14,72				
20:13	14,8	14,72	14,74	14,734	0,04%	0,05
	14,8	14,72				
	14,8	14,72				
	14,7	14,73				
	14,8	14,74				
	14,7	14,74				
	14,7	14,74				
	14,7	14,75				
	14,7	14,76				
	15,3	15,33				
20:23	15,4	15,33	15,31	15,344	0,22%	0,06
	15,3	15,34				
	15,3	15,34				
	15,4	15,34				
	15,3	15,34				
	15,2	15,35				
	15,3	15,35				

	15,3	15,36				
	15,3	15,36				
20:33	15,8	15,85	15,85	15,865	0,09%	0,05
	15,9	15,85				
	15,8	15,86				
	15,8	15,86				
	15,9	15,86				
	15,8	15,87				
	15,9	15,87				
	15,9	15,87				
	15,9	15,88				
	15,8	15,88				
20:43	16,3	16,36	16,35	16,37	0,12%	0,05
	16,3	16,36				
	16,4	16,36				
	16,3	16,37				
	16,4	16,37				
	16,4	16,37				
	16,3	16,37				
	16,3	16,38				
	16,4	16,38				
20:53	16,6	16,66	16,58	16,659	0,47%	0,06
	16,6	16,67				
	16,7	16,67				
	16,5	16,57				
	16,6	16,67				
	16,5	16,67				
	16,6	16,67				
	16,6	16,67				
	16,5	16,67				
	16,6	16,67				
21:03	17,1	17,13	17,17	17,156	0,08%	0,05
	17,2	17,14				
	17,1	17,15				
	17,2	17,15				
	17,2	17,15				
	17,2	17,16				
	17,2	17,17				
	17,2	17,17				
	17,2	17,17				
	17,1	17,17				
	17,2	17,17				
21:15	18,3	18,4	18,4	18,502	0,55%	0,09
	18,4	18,46				
	18,3	18,46				
	18,3	18,47				
	18,4	18,48				
	18,4	18,48				
	18,4	18,48				
	18,5	18,48				
	18,4	18,49				
21:23	18,6	18,82	18,58	18,82	1,28%	0,06
	18,7	18,82				
	18,6	18,82				
	18,5	18,82				
	18,6	18,82				
	18,6	18,82				
	18,5	18,82				
	18,5	18,82				
	18,6	18,82				
21:33	19,6	19,93	19,58	19,942	1,82%	0,11
	19,4	19,93				
	19,6	19,93				
	19,4	19,93				
	19,5	19,93				
	19,6	19,94				
	19,7	19,95				
	19,7	19,96				
	19,7	19,96				
	19,6	19,96				
21:43	21,1	21,09	21,13	21,12	0,05%	0,07
	21,1	21,09				
	21	21,09				
	21,1	21,1				
	21,2	21,11				

	21,1	21,12				
	21,2	21,14				
	21,2	21,15				
	21,1	21,15				
	21,2	21,16				
				Máximos:	3.65%	0.24
				Mínimos:	0.04%	0.05

De la tabla anterior se puede apreciar que el error máximo cometido es del 3.65% y que la precisión es de ± 0.24 °C. Hay que considerar que las condiciones de prueba no son las ideales para estimar convenientemente la exactitud y precisión del equipo, ya que si bien la refrigeradora ofrece un ambiente aislado, la distribución del aire frío en su interior no se puede considerar homogénea mientras esté prendida; por ello no se consideran en el análisis de la precisión y exactitud la temperatura descendente y el primer dato tomado, este sirve únicamente para determinar el rango de la temperatura de trabajo.

4.4 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO CONTÍNUO

El objetivo de la prueba es verificar el correcto de funcionamiento del sistema en periodos de tiempo prolongado y en condiciones reales de funcionamiento, para lo cual se compara las curvas de tendencia con sensores comerciales.

Para realizar esta prueba se instalaron dos tipos de registradores comerciales. El primero de marca OTT LogoSens registra la respuesta del sistema y otro datalogger de marca VAISALA QMC103 registra los valores generados por el sensor ultrasónico WXT510 junto con un anemómetro de cazoletas cuyas características se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 4.7 Características sensor de cazoletas WMS302 [34]

Viento	
Rango	0,5 a 60m/s
Precisión	$\pm 0,3$ m/s
Dirección	
Rango	0 a 360°
Precisión	$\pm 3^\circ$
Viento mínimo	1 m/s

Los datos fueron registrados en un periodo de 48 horas desde las 0:00h del 23 de mayo del 2009. Los tres sensores fueron montados en una estructura de tal forma que se encuentren lo más cerca posible entre ellos y a la misma altura

del suelo, la estructura se ubicó en el patio de pruebas del INAMHI en la ciudad de Quito. Durante este periodo de pruebas la temperatura varió de 10°C a 21°C, se presentaron además lluvias ocasionales y la humedad relativa estuvo en el rango de 32% a 92% a una presión atmosférica promedio de 731HPa.



Figura 4.18 Prueba de funcionamiento normal

Los resultados obtenidos con el sensor WXT510 corresponden a promedios tomados cada minuto, además sirve como referencia para la temperatura. Los resultados obtenidos con los sensores WMS302 y el prototipo corresponde a los valores instantáneos medidos cada minuto. A continuación se muestran los datos medidos para la velocidad:

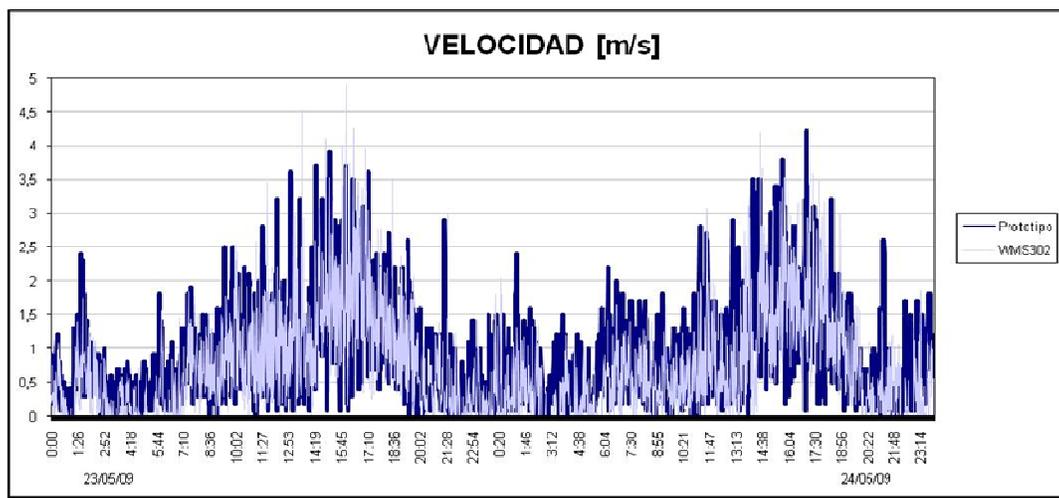


Figura 4.20 Respuesta de velocidad. WMS302 y Prototipo

A continuación se muestran los datos medidos para la dirección, para tener una mejor apreciación se muestra el vector velocidad del viento para cada uno de los sensores:

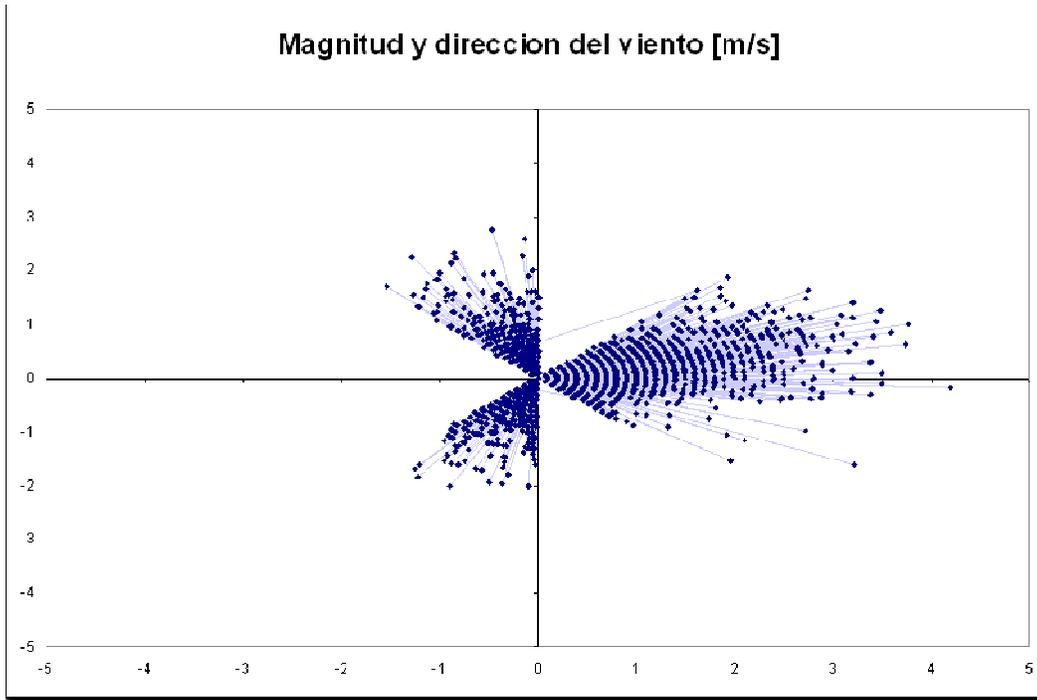


Figura 4.21 Respuesta de la dirección Prototipo

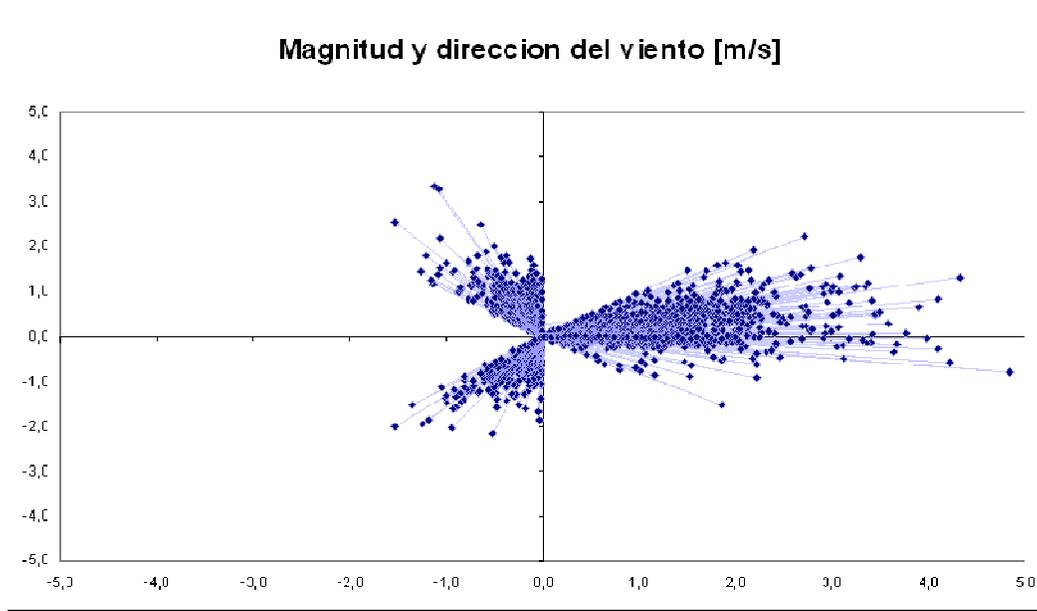


Figura 4.22 Respuesta de la dirección WMS320

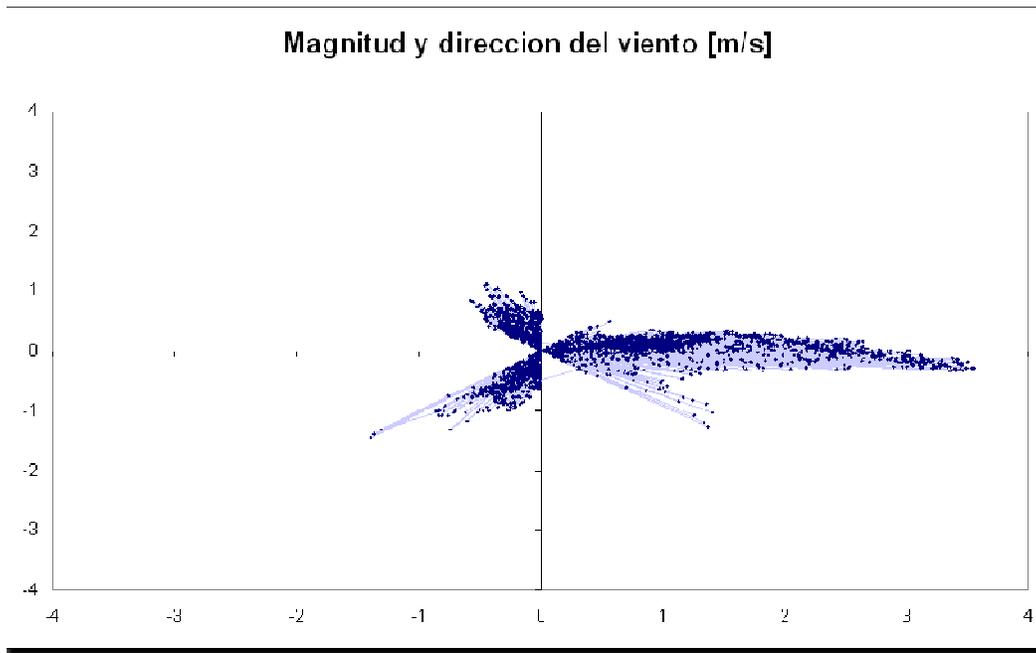


Figura 4.23 Respuesta de la dirección WXT510

A continuación se muestran los datos medidos para temperatura:

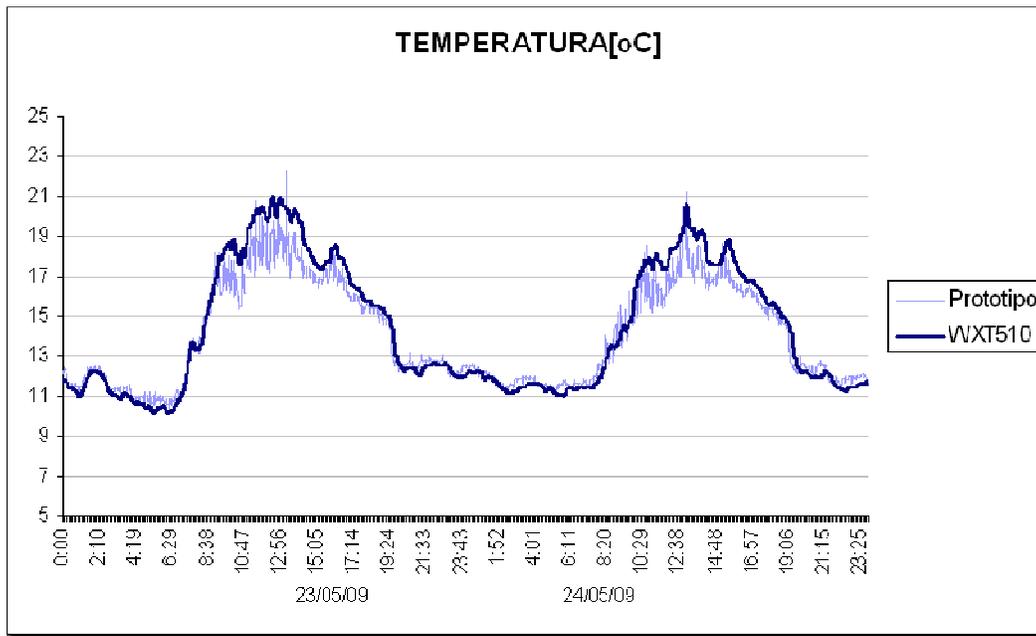


Figura 4.24 Respuesta de la temperatura.

Como se ve en los gráficos precedentes las medidas tomadas por los tres sensores siguen tendencias semejantes. Es importante destacar que el viento es una magnitud bastante cambiante y dado que los sistemas de medición no están colocados exactamente en el mismo sitio no es posible realizar cálculo de errores, pero se pueden verificar las tendencias.

4.5 ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

De acuerdo a las pruebas realizadas y a las características de los elementos utilizados para la construcción del prototipo se pueden estimar las siguientes especificaciones generales del equipo.

Tabla 4.8 Especificaciones técnicas del equipo.

Velocidad del viento	Rango de medida	0 a 25 [m/s]
	Precisión	± 0.3 [m/s] (de 0a 20m/s)
	Resolución	0.1 [m/s]
	Unidades	[m/s]; [km/h]; [mill/h]
Dirección del viento	Rango de medida	0 a 360°
	Precisión	$\pm 3^\circ$
	Resolución	1°
	Unidades	[grados]
Temperatura ambiente	Rango de medida	-10 a 50 [°C] (de 1 a 21°C probado)
	Precisión	± 0.25 [°C] (de 6 a 21°C)
	Resolución	0.1 [°C]
	Unidades	[°C]; [°F]
Salida de datos	Interfaz serial Rs-232	2400 baudios, 8 bits, sin paridad, un bit de parada, (8N1)
	Salidas análogas	Tres salidas de voltaje, de 0 a 5V
Generales	Temperatura de operación	De -10 a 50°C (de 1 a 21° C probado)
	HR% de operación	32 a 92% probado
	Fuente de energía	De 8 a 30V DC
	Consumo de energía	Aprox. 200mA
	Mediciones por segundo	1; 0.5 o 0.25
	Dimensiones	45cm alto, 24cm de ancho y largo

4.6 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS

A continuación se presenta un listado de los elementos utilizados y su costo en el desarrollo del presente proyecto de titulación, se ha incluido además el costo de ingeniería tomando en cuenta el número de horas de dedicación efectiva (800 horas por persona).

Tabla 4.9 Tabla de costos y elementos.

ELEMENTOS	CANTIDAD	COSTO C/U	TOTAL
Estructura Acero Inoxidable	1	180	180
Circuito Impreso	1	30	30
Microcontrolador dsPIC30F3011	1	13,5	13,5
RTC DS1307	1	3,5	3,5
Conversores DAC MCP4921	3	6,6	19,8
Memorias EEPROM 24LC1025	4	6	24
Amplificadores UPC4570	2	1	2
Amplificador LF353N	1	2,5	2,5
Multiplexor Análogo CD4052	1	0,8	0,8
MAX232	1	2	2
Transductores Ultrasónicos	4	5	20
Regulador de voltaje LM7805	1	0,8	0,8
Regulador de voltaje LM7805	1	0,8	0,8
Regulador de voltaje LM78L05	1	0,5	0,5
Regulador de voltaje LT1086	1	3,5	3,5
Batería 3.3 V	1	2,5	2,5
Conectores DIN	2	1,5	3
Zócalos mecanizados	14	0,5	7
Capacitores	16	0,1	1,6
Resistencias	10	0,03	0,3
Conector RS232	1	0,8	0,8
Toroides	2	1	2
Inductancia	1	0,2	0,2
Cable 3x24AWG blindado	2	0,8	1,6
Cable 6x24AWG blindado	10	1	10
TOTAL			\$ 332,70

Tabla 4.4 Tabla de costos totales

DESCRIPCIÓN	COSTO
Elementos	\$ 332,70
Ingeniería	\$ 16000,00
Licencia LABView 6.1 (*)	\$2000,00
TOTAL	\$ 16332,70

*Nota: Este rubro no fue tomado en cuenta porque INAMHI ya adquirió previamente este software

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se determinó la influencia que ejerce el viento y la temperatura en la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas y se utilizó dicho fenómeno para la construcción de un anemómetro y termómetro ultrasónico compatible con registradores OTT, que posee además almacenamiento interno de las mediciones y una interfaz que nos permite realizar configuración, monitoreo y descarga de datos. El instrumento se diseñó con fines meteorológicos.
- Las características de la señal ultrasónica en especial la amplitud dependen de la cantidad de energía que se transfiere al medio, por lo que el número de pulsos y la amplitud de la señal aplicada a los transmisores debe ser idéntica para los cuatro transductores de tal manera de conseguir señales aproximadamente iguales y poder utilizar un solo circuito de acondicionamiento.
- La señal ultrasónica recibida, crece desde cero hasta alcanzar un valor máximo y vuelve a decrecer hasta cero, esto aumenta la dificultad de la determinación de la presencia de la señal y provoca incertidumbre en la determinación del tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción que se traduce en un error en la medida.
- Las características de la señal ultrasónica como amplitud variable, relación de crecimiento y decrecimiento inconstante y bajo rango de voltaje, hacen que la señal sea susceptible a ruido provocado por factores externos. Por lo que es necesario implementar un mecanismo

de validación de los datos obtenidos con el fin de evitar mediciones y cálculos erróneos. Para aplacar estos efectos es de utilidad utilizar elementos de rápida conmutación y bajo ruido.

- La distancia entre dos transductores debe ser exacta e idéntica en los dos ejes de medida para evitar cometer errores en el cálculo. Además la estructura debe asegurar estabilidad, debido que un mínimo cambio en la distancia de los traductores cambia considerablemente el tiempo de vuelo de la señal.
- El multiplexor/demultiplexor análogo hace posible la utilización de un solo bloque de acondicionamiento para los cuatro transductores, además que les permite conmutar entre las funciones de emisor y receptor.
- La utilización de un compilador de alto nivel facilita la implementación de los algoritmos de cálculo en el microcontrolador, además que permite manejar con mayor facilidad los recursos del microcontrolador y programas de gran extensión con el uso de funciones y subfunciones.
- Los registradores utilizados en meteorología disponen de varios canales análogos y digitales. Es importante que el sistema diseñado sea compatible con estos equipos por lo que se usaron convertidores D/A que permiten tener salidas estandarizadas de 0-5V adecuadas para la conexión a cualquier registrador comercial.
- El banco de memorias interno actúa como sistema de respaldo cuando el datalogger no se encuentra en funcionamiento, además permite darle una cierta autonomía al sistema en caso de ser necesario.
- Los procesadores digitales de señal poseen mayores recursos que los microcontroladores comunes. Su ventaja principal se encuentra en la

velocidad de procesamiento, que permite tratar señales de alta frecuencia como el ultrasonido. En el presente proyecto esto es fundamental ya que permite tener una resolución en el tiempo de vuelo de 33.92 ns.

- La variabilidad de la señal ultrasónica hace imposible determinar su recepción desde el primer ciclo. Por lo que para establecer el tiempo de llegada se detecta cuando la señal recibida sobrepasa por primera vez un cierto nivel de amplitud que indica el tercer ciclo de la señal. Para el cálculo de la velocidad y dirección a los tiempos medidos se resta un tiempo de compensación preestablecido.
- Se logró en el prototipo una precisión de ± 0.3 m/s para la velocidad del viento, $\pm 3^\circ$ para la dirección y $\pm 0.25^\circ\text{C}$ para la temperatura.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos se recomienda ampliar el banco de memorias o diseñar otro sistema de almacenamiento que incluya memorias extraíbles o de mayor capacidad con el fin de dar al equipo absoluta independencia y poder almacenar otros datos de procesamiento primario de información como velocidades máximas, temperaturas máximas y mínimas, promedios, etc.
- Se recomienda también usar transductores ultrasónicos de mejor calidad y de menor tamaño para permitir colocar el sistema en la intemperie con mayor seguridad y minimizar la turbulencia producida por las estructuras de soporte.
- La estructura mecánica debe ser realizada con un material de resistencia equivalente al acero pero más liviano para facilitar el transporte. Además se recomienda diseñar de mejor manera el soporte de los transductores para reducir las turbulencias producidas por el viento y sus efectos en la medición.

- Además sería recomendable desarrollar un sistema de transmisión de datos inalámbrico apropiado para permitir su uso independiente en lugares remotos. Además se podría incluir una entrada para una antena GPS que sustituya el reloj de tiempo real y permita además determinar las coordenadas de ubicación del equipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Wikipedia, "Onda", enero 2003,
[http://es.wikipedia.org/wiki/Onda_\(f%C3%ADsica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Onda_(f%C3%ADsica))
- [2] Serway Raymond A., Faughn Jerry S., Moses Clement J., "Física", Editorial Cengage Learning, 2005.
- [3] Wikipedia, "Acústica", marzo 2005,
<http://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%BAstica>
- [4] Wikipedia, "Propagación del sonido", junio 2005,
http://es.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3n_del_sonido.
- [5] Miyara Federico, "La naturaleza del sonido", Comité Científico Interdisciplinario De Ecología Y Ruido, Argentina, diciembre 2000,
<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/comite/sonido.htm>
- [6] "Fisiología del sistema auditivo",
<http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/Sistema%20Auditivo/Sistema%20Auditivo.html>
- [7] Ing. Echeverría Ricardo, "Ultrasonido", Universidad Nacional del Comahue, 2002,
http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/6-Ultrasonido/Apunte_US.pdf
- [8] Vega Fidalgo Luis Miguel , Zorita Téllez David, "Infrasonidos y Ultrasonidos", Universidad de Valladolid, España,
http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/aplicaciones_ultrasonidos.htm
- [9] Wikipedia, "Velocidad del Sonido", octubre 2008,
http://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_del_sonido
- [10] El rincón del vago, "El Sonido",
http://html.rincondelvago.com/el-sonido_1.html
- [11] Feynman Richard, "Física" Volumen 1, Editorial Alhambra Mexicana S.A., Mexico, 1998.
- [12] Franco García Ángel, "Conceptos básicos de termodinámica", Universidad del país Vasco, España, 2006,
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/termo/Termo.html#Adiab%20E1tica%20o%20asilada%20t%20micamente,%20Q=0>

- [13] Franchini Sebastián N., “Fuentes de Incertidumbre en Anemometría Sonica” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2006, http://oa.upm.es/458/01/SEBASTIAN_N_FRANCHINI.pdf
- [14] Educarplus.org, “El Viento”, 2009, http://www.educaplus.org/climatic/04_elem_viento.html
- [15] Organización Mundial de Meteorología, “Compendio de apuntes sobre instrumentos Meteorológicos” N° 622, 2007.
- [16] Organización Mundial de Meteorología, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation” N°8, 2006.
- [17] Wikipedia, “Escala de Beaufort”, octubre 2005, http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort
- [18] R.M. Young Company, “Ultrasonic wind sensors”, USA, 2008, <http://www.youngusa.com/products/6/3.html>
- [19] Vaisala, “Ultrasonic wind sensor WS425”, Finlandia, <http://www.vaisala.com/instruments/products/wind/ws425fg>
- [20] Vaisala, “Ultrasonic wind sensor WMT52”, Finlandia, <http://www.vaisala.com/instruments/products/wind/wmt52>
- [21] FONDRIEST, “Ultrasonic Anemometer”, USA, 2009, http://www.fondriest.com/products/rm_young_85000.htm
- [22] FONDRIEST, “Ultrasonic Anemometer”, USA, 2009, http://www.fondriest.com/products/rm_young_70000.htm
- [23] Thies Clima, “Ultrasonic Anemometer 2D”, Alemania, http://www.thiesclima.com/usanemo_e.htm
- [24] Gill instruments, “Wind Observer”, Inglaterra, 2008, http://www.gill.co.uk/products/anemometer/wind_ob2.htm
- [25] Wikipedia, “Temperatura”, mayo 2009 <http://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura>
- [26] Lupi Daniel O., Brengi Diego J. y Trapanotto Andrés, “Sensor de temperatura ambiental por Ultrasonido”, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, 2007, <http://utic.inti.gov.ar/proyectos/setepus/index.html>
- [27] Bonnenberg + Descher and SEI, “Aplicaciones sistema medición acústica de temperatura en plantas de energía de desecho”, USA, 2000, http://www.sciengr.com/spanish/download_literature/downloads/800910.pdf

- [28] Gill instruments, "Wind Master", Inglaterra, 2008,
<http://www.gill.co.uk/products/anemometer/windmaster.htm>
- [29] Jameco, <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/139492.pdf>
- [30] Gwirc Sergio, Ferdeghini Fernando, Comastri Agata, Lupi Daniel,
"Sensores Ultrasónicos: Respuesta A Distintas Formas De Onda De Emisión",
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Argentina,
<http://www4.inti.gov.ar/GD/2jornadas/ondas.pdf>
- [31] Coughlin Robert F., Driscoll Frederick F., "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales", Editorial Prentice Hall, Mexico, 1999.
- [32] National Instruments, "Comunicación Serial: Conceptos Generales", USA,
junio 2006,
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/039001258CEF8FB686256E0F005888D1>
- [33] Wikipedia, "Desviación Estándar", septiembre 2003,
http://es.wikipedia.org/wiki/Desviaci%C3%B3n_est%C3%A1ndar
- [34] Vaisala, "Wind sensor WMS302", Finlandia,
<http://www.vaisala.com/files/WMS301and302%20Quick%20Reference%20Guide.pdf>
- [35] Microchip, "User Guide dsPIC30F3011", USA, 2008,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70119E.pdf>
- [36] Microchip, "MCP4921", USA, 2008,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21897B.pdf>
- [37] Microchip, "1024K I2C CMOS serial EEPROM", USA, 2008,
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21941F.pdf>
- [38] DALLAS Semiconductor, "DS1307 64x8 Serial-Real Time Clock", USA,
2008, http://www.glacialwanderer.com/_blog/blog2008/04_April/DS1307.pdf
- [39] MAXIM, "Multichannel RS232 Driver/reciver", USA, 2006,
<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX220-MAX249.pdf>