

Diseño y construcción de un globo meteorológico cautivo instrumentado

Design and construction of an instrumented meteorological tethersonde

Wilfrido Gutiérrez L.¹, Manuel García E.²,
Victor O. Magaña R.³ y Jorge A. Escalante G.⁴

Recepción: 23-ene-2006 / Modificación: 06-mar-2007 / Aceptación: 10-mar-2007
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Las observaciones de capa límite planetaria son clave para la realización del pronóstico numérico del tiempo. Los sistemas para perfilar la atmósfera tienen en general un alto precio, lo que los hace con frecuencia inaccesibles. Por ello, la necesidad de contar con instrumentos de medición a bajo costo que permitan obtener datos confiables ha llevado al diseño y construcción de un globo meteorológico cautivo instrumentado, comparable a los diversos sistemas existentes en el mercado internacional tales como radiosondeo, perfiladores de viento, SODARS y globos cautivos, entre otros. Al abatir el costo, se abre la posibilidad de realizar un mayor número de mediciones de calidad, útiles

¹ Ingeniería en Mecánica-Eléctrica-Electrónica, wili@atmosfera.unam.mx, ingeniero de diseño área de Instrumentación Meteorológica, Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México D.F.-México.

² Ingeniería en Mecánica-Eléctrica-Electrónica, mgare@atmosfera.unam.mx, jefe del área de Instrumentación Meteorológica, Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México D.F.-México.

³ Doctor en Ciencias Atmosféricas, victormr@servidor.unam.mx, jefe del departamento de Meteorología Tropical, Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México D.F.-México.

⁴ Ingeniería en Mecánica-Eléctrica-Electrónica, jorescal@atmosfera.unam.mx, ingeniero de diseño área de Instrumentación Meteorológica, Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México D.F.-México.

en estudios de procesos atmosféricos que determinan el tiempo meteorológico, pero sobre todo para mejorar la condición inicial de los modelos de pronóstico del tiempo.

En este artículo se describe el diseño de un globo meteorológico cautivo de bajo costo con el cual se pueden mantener mediciones de capa límite de manera continua, útiles en estudios de procesos atmosféricos y en el pronóstico numérico del tiempo. La viabilidad del instrumento quedó demostrada en campañas de medición realizadas a bordo de un buque oceanográfico.

Palabras claves: globo cautivo, capa límite.

Abstract

Observations of the planetary boundary layer are essential for in numerical weather prediction. However, such observations are usually expensive, which makes them inaccessible for a majority of projects. Therefore, the need of less expensive instruments for boundary layer measurements has led to the design and construction of an instrumented meteorological captive balloon comparable with various existing systems such as radiosondes, wind profilers, SODARS, or commercial tethered sondes, among others. Lower cost instruments open the possibility of obtaining more quality data, useful for atmospheric processes studies and in numerical weather prediction activities.

This paper describes the design of a low cost tethered sonde useful in maintaining the continuous monitoring of boundary layer for processes studies and weather prediction. The viability of the instrument has been shown in meteorological field campaigns on board of an oceanographic vessel.

Key words: tethered sonde, boundary layer.

1 Introducción

En Meteorología es de fundamental importancia conocer la estructura de la capa límite planetaria. Es en esta zona donde los flujos de calor y humedad determinan el tiempo meteorológico dominante, por lo que una descripción adecuada de ésta es clave para el pronóstico numérico del tiempo. Las mediciones de capa límite se pueden realizar por diversos métodos como son: radiosondeos, perfiladores de viento, SODARS y globos cautivos. Sin embargo, los costos de la mayoría de los instrumentos anteriores son elevados y en algunos casos la disponibilidad del equipo y/o su manejo resulta difícil. En la

Universidad Nacional Autónoma de México, el uso del globo cautivo del tipo ADAS (*Acquisition Data Atmospheric System*) resultó adecuado para conocer la estructura de la capa límite sobre el océano cuando los vientos son menores de 10 m/s [1]. Sin embargo, el sistema original ADAS ha desaparecido del mercado por lo que sólo se tienen modelos como el de la compañía Vaisala [2] de costo elevado.

Un globo cautivo o sonda anclada (tethersonda tomado del nombre *tether-sonde*) consiste esencialmente en uno o varios sensores meteorológicos colocados a diferentes alturas de su hilo de sujeción. Conforme se eleva el globo se obtiene el comportamiento de algún parámetro meteorológico en altura con una frecuencia dada. Aunque un globo cautivo tiene la ventaja de que se pueden obtener varios perfiles sin perder la sonda como en el caso del radiosondeo, el alcance vertical se limita por lo general a sólo un kilómetro de altura. El sistema se puede también utilizar como torre, para medir condiciones atmosféricas en un cierto plazo en los niveles múltiples. En general, la capa límite atmosférica se encuentra en este rango.

El reto y objetivo es entonces diseñar un sistema de globo cautivo a un costo menor que los comerciales y que entregue información del mismo tipo, esto es: viento, temperatura, humedad y presión barométrica. Adicionalmente, el sistema de globo cautivo debe entregar información continua por periodos de tiempo superiores a una hora.

2 Solución planteada

Para lograr el objetivo anterior, se colocaron los sensores a diferentes alturas en el hilo que sujeta el globo cautivo tipo dirigible (*blimp*), dependiendo de la resolución vertical de medición deseada (figura 1). La altura del globo cautivo es controlada mediante un malacate con sistema de re-embobinado eléctrico. Los sensores se distribuyeron de acuerdo a la tabla 1.

Normalmente, los sistemas comerciales tienen comunicación vía radiofrecuencia (RF) de los sensores a una estación receptora de datos. Este tipo de sistema es sumamente caro, principalmente por la complejidad del sistema de comunicación. La solución propuesta por el Grupo de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (CCA-UNAM) consiste en aprovechar sistemas portáti-

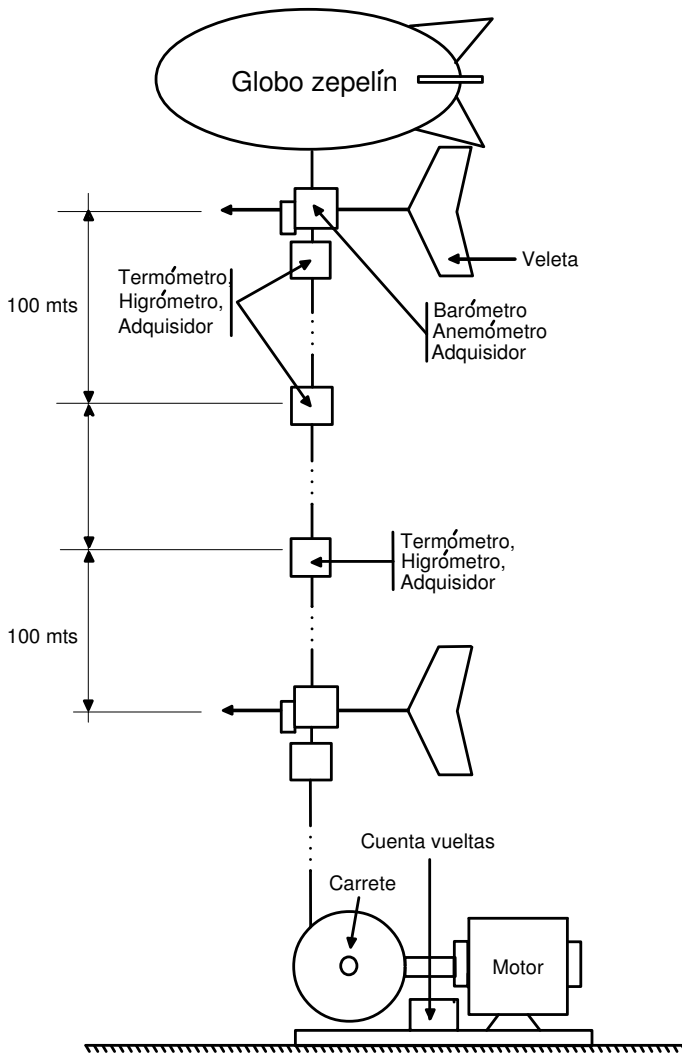


Figura 1: Esquema general del globo cautivo instrumentado

les de adquisición de datos auto-soportados y memoria propia, los cuales son ligeros (menos de 40gr), característica vital para un sistema que es elevado por medio de gas helio a través de un globo cautivo de 6 a 8m³, capaz de levantar eficientemente hasta 1,5 kg.

Tabla 1: Distribución de los sensores a diferentes alturas en el globo

Altura de los sensores (metros)	VARIABLES A MEDIR
800	Temperatura, humedad, presión, velocidad del viento
700	Temperatura, humedad
600	Temperatura, humedad
500	Temperatura, humedad, presión, velocidad del viento
400	Temperatura, humedad
300	Temperatura, humedad
200	Temperatura, humedad
100	Temperatura, humedad

En el mercado existen los sistemas *HoBo Stoway*, modelos U12-011, que miden directamente temperatura (T) y humedad relativa (RH), a doce bits, con exactitudes de $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2,5\%$ respectivamente. Estos sistemas tienen capacidad para 43.000 registros en total, esto es, 21.500 lecturas de temperatura y 21.500 de humedad relativa. Los *HoBo* tienen la ventaja de contar con una interfaz directa a puerto USB para recuperar los datos obtenidos en una computadora y continuar midiendo.

Las especificaciones técnicas son:

- **Temperatura.** Rango: -20 a 70°C . Precisión: $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ de 0 a 50°C .
- **Humedad Relativa.** Rango: 5 a 95% . Precisión: $\pm 2,5\%$ de 10 a 90% .

Para la presión y velocidad del viento se propuso que la captura de datos se haga a través de un adquisidor analógico de cuatro canales, como el modelo U12-006, con la misma resolución digital de 12 bits, entradas de 0 a $2,5$ voltios de C. D., resolución de $0,6$ mV y precisión de ± 2 mV. Para los adquisidores mencionados, la información queda disponible en forma analógica. Su conversión a magnitud física real requiere de analizar cada sensor por separado, y hacer el tratamiento de señal adecuado a través de un proceso de calibración.

Para medir el viento se decidió seguir con la misma idea del diseño del sistema de viento modelo 05103 marca RM Young [3], el cual consiste en una propela helicoidal orientada mediante una veleta. Ésta obedece a las variaciones en la dirección horizontal del viento acoplada al cuerpo de un

anemómetro de hélice pequeño. El diseño mecánico de la veleta toma en cuenta el problema de fricción, así como su velocidad de respuesta. El sistema incluye un pequeño gabinete en el cual se alojan los circuitos necesarios, en cuyo centroide se inserta un vástago en forma vertical, que permite el giro libre con eje de rotación y el hilo del globo. El mecanismo se sostiene mediante unos tapones de caucho y un tope mantiene al mecanismo en la misma posición relativa respecto al globo. Una fotografía del sistema de viento completo se muestra en la figura 2.



Figura 2: Veleta, anemómetro y adquisidor de datos analógicos con sistema mecánico de alineación

Ahora bien, dada la restricción del peso, se buscaron anemómetros ligeros ó de tamaño pequeño. Los anemómetros marca *Skywatch* modelo Fun de 28 gramos de peso [4], son capaces de medir vientos de hasta 60 m/s (200 km/h aproximadamente), con una resolución de 0,1 m/s y exactitud de $\pm 3\%$. Estos instrumentos son totalmente independientes, con lectura en pantalla de cuarzo, aunque desafortunadamente no cuentan con memoria propia para almacenar la información. El problema se resuelve obteniendo la señal directamente del circuito impreso del instrumento. Esta señal es un tren de

pulsos cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del viento. Con la señal obtenida, se desarrolló un circuito electrónico que convierte la frecuencia en voltaje con un filtro activo paso bajas de segundo orden para eliminar el “rizo” de la señal del convertidor. El arreglo electrónico de este sistema de viento puede verse en la figura 3.

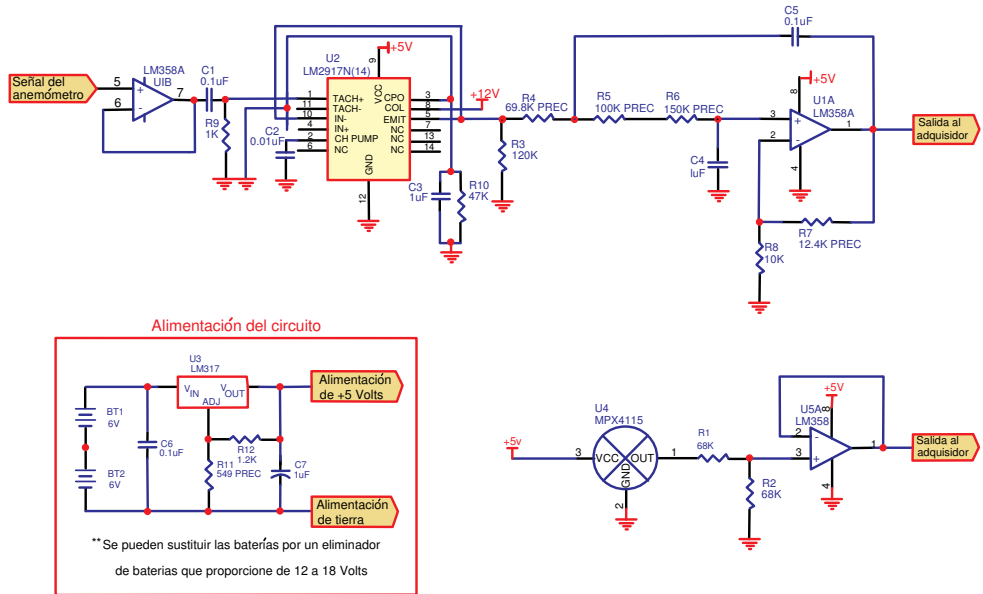


Figura 3: Diagrama general del anemómetro y barómetro

3 Presión barométrica

Existen en el mercado una serie de transductores electrónicos de presión de la serie MPX4115A [5], cuya salida es un voltaje directamente proporcional a la presión. Estos sensores requieren una alimentación de +5 voltios, están compensados para variaciones debidas a la temperatura y entregan una salida lineal para el rango comprendido entre 15 y 115 kPa (150 a 1150 mBares), con una exactitud de $\pm 1,5\%$ para temperaturas comprendidas entre 0 y 85°C a escala completa.

Solamente es necesaria una adecuación de escala, mediante un divisor de voltaje y acoplamiento de impedancia con un seguidor de voltaje. En la figura 4 puede verse un arreglo terminado del barómetro junto con el sistema de viento. Asimismo, la figura 3 muestra el arreglo electrónico del transductor.

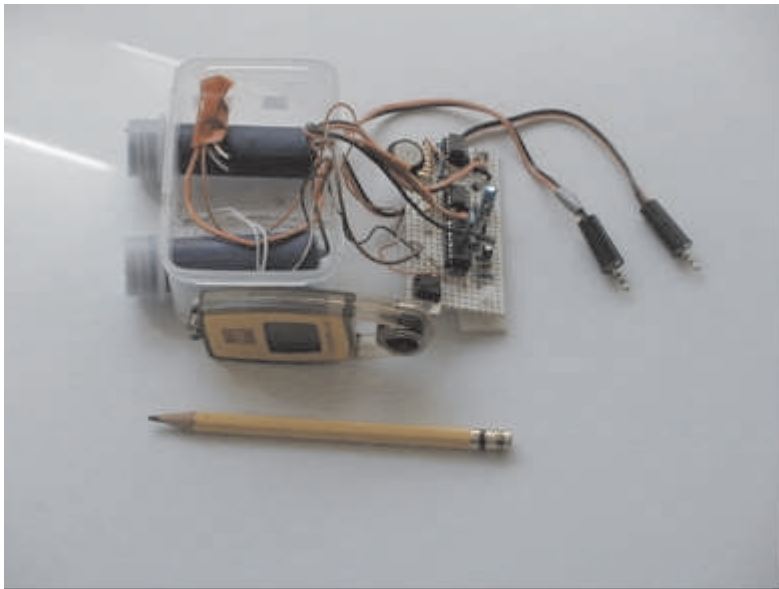


Figura 4: Anemómetro y circuito acondicionador de señal, junto con el barómetro analógico y salidas respectivas para el adquirente de datos

4 Alimentación del circuito

La alimentación del sistema se dividió dependiendo de las necesidades de cada instrumento: los sensores de T y RH vienen incluidos en un sistema de adquisición con batería de litio independiente. Para el circuito acondicionador de velocidad del viento, se requieren +5 voltios. En el mercado, se cuenta con baterías tipo CR-123 A de 3V, 1500mAh y 17gr de peso. Las características

anteriores permiten el uso de esas baterías, conectadas en serie. Para garantizar una alimentación constante y continua se ocupó un circuito regulador de voltaje electrónico LM317 [6]. Dentro del diagrama electrónico mostrado en la figura 3, se puede ver la parte correspondiente a la alimentación eléctrica utilizada en el sistema.

5 Sistema de embobinado de la cuerda para el globo

Siendo un sistema de globo cautivo, se debe desembobinar el hilo que lo sostiene, mantenerlo fijo a la altura especificada y rebobinarlo a voluntad, ya sea para detenerlo a ciertas alturas o para regresarlo a la superficie. Esta tarea la lleva a cabo un motor de corriente directa con el carrete de hilo acoplado a su flecha. Este tipo de motores tiene la ventaja de poseer un gran torque (potencia de tracción), característica fundamental para que el globo quede fijo una vez decidida la altura del muestreo.

La estimación de la altura se lleva a cabo mediante un sistema electrónico de conteo de vueltas. Este consiste en cuatro imanes colocados en la flecha y un *reed switch* (interruptor hecho de dos láminas que al estar en presencia de un campo magnético se unen, cerrando un circuito). De este modo, se obtienen cuatro pulsos por cada vuelta del carrete de hilo.

La cuenta de las vueltas se obtiene mediante un microcontrolador “PIC” [7] que se programa para multiplicar por el diámetro promedio del carrete. Dentro del microcontrolador, también se tiene un programa que permite al usuario reiniciar el conteo desde cualquier punto del embobinado, sumar una cantidad en metros para compensar altura y continuar la cuenta desde ahí, así como realizar cuentas ascendentes o descendentes.

El conteo de vueltas del hilo nos sirve para hacer una estimación aproximada de la altura del globo, la altura real a la cual se llegó y la que va a ser tomada para el análisis de los datos utiliza el barómetro como altímetro sabiendo que la presión tiene cambios más significativos debido a la altura que a las condiciones meteorológicas que imperan en ese instante para intervalos cortos de medición (30 minutos aproximadamente). La figura 5 muestra el arreglo completo del sistema de embobinado.

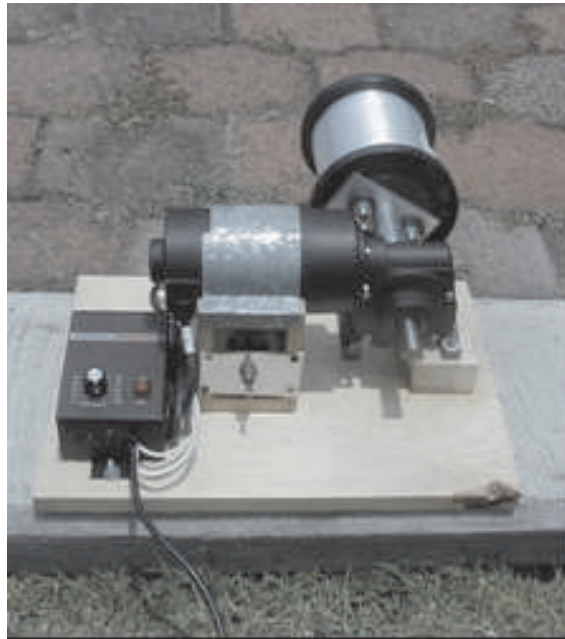


Figura 5: Sistema de embobinado para el hilo del globo instrumentado

6 Pruebas de funcionamiento y calibración

El anemómetro fue calibrado tomando primeramente la respuesta del mismo simulando la señal de su transductor mediante un generador de funciones, para determinar la relación entre velocidad del viento medida en su indicador y frecuencia de entrada. Una vez obtenida esta relación (17 Hertz por m/s) restaría solamente calibrar cada circuito acondicionador construido en el laboratorio, aplicándole como entrada un tren de pulsos de características idénticas al medido en el anemómetro mediante el mismo generador de funciones. Haciendo lo anterior para frecuencias múltiplos de 17, se obtendrían los correspondientes voltajes analógicos de salida. Con el método descrito, se generaron tablas de m/s–frecuencia–voltaje. Aplicando una regresión lineal, se obtuvieron las pendientes y ordenadas al origen para calcular la velocidad del viento a partir del valor medido en el adquisidor después de un lanzamiento de la sonda.

El barómetro se calibró directamente tomando mediciones durante el día comparándolo con un patrón tipo Fortín (columna de mercurio en cisterna, con sistema de medición de altura tipo Vernier y compensación por temperatura). Mediante regresión lineal se obtuvo un factor de multiplicación (pendiente= 0,18580075) y un sumando (ordenada al origen= 501,190274) para calcular la presión a partir de los voltajes capturados en el adquisidor.

Los datos que se obtuvieron en el anemómetro como resultado de la calibración utilizando las regresiones lineales son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2: Datos y resultados de la Regresión Lineal

Velocidad real del viento (m/s)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (mV)	Velocidad calculada del viento (m/s)
1	17	85,5	0,93712
2	34	160	1,91754
3	51	237,5	2,93744
4	68	314,7	3,953392
5	85	393,2	4,986452
6	102	470,5	6,00372
7	119	547,5	7,01704
8	136	624,8	8,034308
9	153	703	9,06342
10	170	779	10,06358
11	187	856	11,0769
12	204	932	12,07706
13	221	1007	13,06406
14	238	1086	14,1037
15	255	1162	15,10386

Resultado de la regresión lineal

Factor de multiplicación	Ordenada al origen
0,013157217	-0,18806814

Velocidad de viento (m/s) = voltaje (milivoltios) × factor de multiplicación + ordenada al origen

Un ejemplo de los resultados obtenidos en una prueba real se muestran en la figura 6, la cual corresponde a un sondeo obtenido el 12 de agosto del 2004 a las 12:00 horas local (HL), en 26°N, 108°W. En el perfil se aprecia claramente la consistencia entre los cambios que experimenta el viento con la altura y los cambios en los perfiles termodinámicos, esto es temperatura, humedad relativa y temperatura potencial. La altura de la capa límite es fácilmente identificable a los 950 mb. Mediciones de este tipo han sido obtenidas en otras regiones. La continuidad de las mediciones permite incluso analizar la evolución diurna de la capa límite planetaria, sobre el océano y algunas regiones continentales.

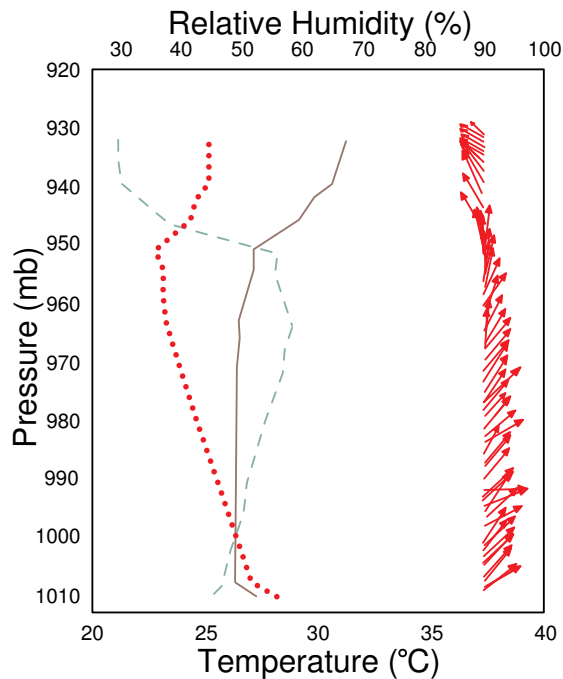


Figura 6: Ejemplo tomado a bordo del Buque Oceanográfico El Puma. Temperatura (línea punteada), humedad relativa (línea a trazos), temperatura potencial (línea continua) y viento (vectores)

Una vez concluidas las pruebas mencionadas anteriormente, se confirmó que los sensores que se usan tienen las características exhibidas en la tabla 3.

Tabla 3: Características de los sensores

Variable	Intervalo	Resolución	Exactitud
Velocidad de viento	0–60 m/s	0,1 m/s	±3 %
Presión barométrica	150 a 1150 mBar	0,1328 mB	±1,5 % F.S.
Temperatura ambiente	–20 a 70°C	12 bits	±0,35°C de 0 a 50°C
Humedad relativa	5 a 95 %	12 bits	±2,5 % de 10 a 90 %

Paralelamente a las pruebas hechas a este prototipo, se efectuó un análisis de costos con respecto a los productos que se encuentran actualmente en el mercado, encontrándose las cifras mostradas en la tabla 4.

Tabla 4: Costos

Sistema	Costo aproximado \$US
SODAR	130.000
Radio sonda	100.000
Thetersonde (globo cautivo comercial)	100.000
Globo cautivo instrumentado	8.000

7 Conclusiones

Se obtuvo un sistema de medición de perfiles verticales atmosféricos muy económico comparado con el que ofrece un fabricante extranjero, autosuficiente y confiable. Esta alternativa es tecnológicamente adecuada a los sistemas comerciales, fácil de instrumentar, reponer y mantener en México. El costo es mucho menor a los sistemas comerciales que podrían emplearse para realizar estudios similares.

Agradecimientos

Se Agradece a la sección de mecánica del área de instrumentación meteorológica por el apoyo en la construcción de las partes del sistema. Al Pas. Ingeniero Josué Vázquez T. por su contribución con el diseño del sistema

electrónico para estimación de la altura de ascenso del globo, Al Pas. Ingeniero Conrado Rivera A. por su participación en la campaña de medición. El apoyo para este trabajo provino del Instituto Inter-Americano (IAI) para el Estudio del Cambio Global y del Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU). Los apoyos provenientes del Proyecto Variabilidad climática regional en México: Diagnóstico y mecanismo de adaptación por sector (CO1-0615/A1) CONACYT-SEMARNAT, Predicibilidad de lluvias en México (IN-119503) PAPIIT y libro de Meteorología para nivel medio superior PAPIME – 2005 (CONO 4001112) PAPIME – los cuales fueron de gran valor.

Referencias

- [1] T. Ambrizzi and V. Magaña. *Dynamics of Subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters*. Revista Atmósfera, ISSN 0187-6236, **18**(4). Referenciado en 31
- [2] Vaisala Group, <http://www.vaisala.com>, febrero de 2004. Referenciado en 31
- [3] R. M. Young. *Compañy Meteorological Instruments*. <http://www.youngusa.com>, febrero de 2004. Referenciado en 33
- [4] JDC Electronic. <http://www.jdcusa.com>, febrero de 2004. Referenciado en 34
- [5] Motorola Semiconductor: *Sensor Device Data*. Tercera edición, 1995. Referenciado en 35
- [6] National Semiconductor: *Linear Databook*, 1998. Referenciado en 37
- [7] José Ma Angulo Usategui. *PIC Diseño práctico de aplicaciones*, ISBN 84-481-2496-0, Mc Graw Hill, 1999. Referenciado en 37