

Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Escuela de Ingeniería en Electrónica
Escuela de Química**

Informe Final del Proyecto

DIP-727-07

Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de campo para variables ambientales y de un sensor de viento, ambos de bajo costo y de arquitectura abierta.

**Dr. Jaime Quesada Kimsey
Ing. Nestor Hernández Hostaller
Ing. Adolfo Chaves Jiménez**

Cartago, 18 de mayo del 2009

HOJA DE INFORMACIÓN GENERAL

1. Datos generales del proyecto

1.1 Número del proyecto. DIP 727-07

1.2 Nombre del proyecto. Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de campo para variables ambientales y de un sensor de viento, ambos de bajo costo y de arquitectura abierta.

1.3 Unidad responsable. Escuela de Ingeniería Electrónica y CIPA.

1.4 Otras Escuelas, Centros de Investigación o Universidades participantes.
E. de Química, CIPA.

1.5 Investigador principal. Adolfo Chaves

2. Fecha en que el investigador presentó el informe al Comité Técnico.

2 de junio 2009.

3. # del acta en el que se aprueba el informe _____(adjuntar copia del Acuerdo o del Acta).

Tabla de contenidos

Resumen	5
1. Introducción.....	6
1.1 Antecedentes	6
1.1 Definición del problema	6
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo General	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
2. Revisión de literatura.....	8
2.1 Sistemas de adquisición de datos.....	8
2.2 Anemómetros y sensores piezoeléctricos	8
3. Materiales y métodos	14
4. Resultados y discusión	15
4.1 Dispositivo de adquisición de datos	15
4.1.1 Descripción del hardware	15
4.1.2. Descripción del software	17
4.2 Diseño del anemómetro piezoeléctrico.....	22
5. Conclusiones y recomendaciones.....	27
Conclusiones.....	27
Recomendaciones	27
6. Aportes y alcances.....	28
7. Bibliografía.....	29
8. Apéndices	31
8.1 Manual del usuario de la estación de adquisición de datos	31

Índice de figuras

Figura 1. Anemómetro de cazoletas o de molinete.	9
Figura 2. Sensor basado en el efecto piezoeléctrico.....	10
Figura 3. Funcionamiento de un sensor piezoeléctrico.	10
Figura 4. Efecto transversal.....	10
Figura 5. Efecto longitudinal.....	11
Figura 6. Efecto cizalla.....	11
Figura 7. Modelado de carga de un sensor piezoeléctrico.....	11
Figura 8. Modelado de voltaje de un sensor piezoeléctrico.....	11
Figura 9. Símbolo de un sensor piezoeléctrico.....	12
Figura 10. Circuito de un amplificador de voltaje.....	12
Figura 11. Circuito de un amplificador de carga.....	13
Figura 12: Diagrama de primer nivel.....	15
Figura 13: Diagrama de segundo nivel.....	15
Figura 14: Diagrama funcional.....	15
Figura 15: Diagrama de tercer nivel: Componentes.....	16
Figura 16: Diagrama general de software.....	18
Figura 17: Estructura de datos para la FIFO y la disposición de punteros.....	19
Figura 18. Convertidor de fuerza a voltaje.....	23
Figura 19. Voltaje de salida para diversos valores de resistencia.....	23
Figura 20. Amplificador de instrumentación utilizado como acondicionador de señal.....	24
Figura 21. Gráfico de masa VS voltaje con 1, 2 y 3 abanicos.....	24
Figura 22. Gráfico de masa VS voltaje de la superficie cóncava.....	25
Figura 23. Sistema mecánico final.....	26
Figura 24. Relación del voltaje del sistema mecánico y la velocidad del viento del anemómetro.....	26

Resumen

Este proyecto es la primera etapa del desarrollo de un sistema de arquitectura abierta para la adquisición de datos para aplicaciones de medición ambiental en general, y es la base de un sistema para probar que sensores piezoeléctricos pueden ser utilizados para medir la velocidad del viento en al menos una dirección.

En general, esta investigación se dividió en dos bloques fundamentales, en los cuales la mayor relación entre los mismos fue la compatibilidad. Se demostró que el sistema completo puede ser realizado a un precio relativamente bajo comparado con los sistemas estándares de adquisición de datos para la medición de velocidad de viento (menos de 200 dólares comparado con sistemas que están más allá de los 1000 dólares), y además abre una nueva gama de opciones de investigación para probar los beneficios de la utilización de sensores piezoeléctricos en sensores ambientales, ya estando probado el hecho de que se puede medir la velocidad del viento utilizando este tipo de sensor.

Además, el diseño del sistema de adquisición de datos generó una primera propuesta (alfa) de un sistema de bajo costo, pero sin embargo, alta capacidad de memoria, ya que aprovecha los desarrollos del tipo de memorias con conexión USB.

Abstract

This project is the first phase of the development of an open-architecture system for data acquisition in environmental applications, and simultaneously is a basis for demonstrating that piezoelectronic sensors can be successfully used for wind speed measurements in at least one direction.

In general, this work consisted of two fundamental blocks, striving for compatibility among their expected products. It was shown that the complete system can be implemented at a relatively low cost in comparison to standard data acquisition systems coupled to wind sensors (less than \$200- as compared to over \$1000-). It additionally opens up a variety of research options for the use of piezoelectronic sensors in environmental applications, given that their potentiality in wind measurements has been proven.

The design of the data acquisition system generated a functional low cost first (alpha) version with a large memory capacity, as it employs late developments in USB connected memory units.

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La ciencia en la que históricamente más se ha requerido un medio para grabar datos de campo en forma continua es la meteorología. Más tarde han sido las ciencias ambientales y geofísicas las que han participado de esa necesidad en mayor medida. La generación de una amplia gama de sensores electrónicos para medir las diversas variables ambientales y geofísicas exige la existencia de sistemas electrónicos de adquisición de datos, los cuales deben operar con autonomía en el campo. A este tipo de sistema se le ha llamado “data logger”, alojador de datos, y su mercado mundial ha estado en pocas manos por muchos años. Compañías como Campbell Scientific y Vaisala han ofrecido data-loggers y sensores ambientales de altísima confiabilidad por muchos años a la comunidad científica, pero lamentablemente a precios excluyentes para investigadores que no disponían de recursos considerables. Hoy, gracias al avance en la electrónica y a la globalización de su dominio, esto está cambiando.

Actualmente existen muy variadas compañías, muchas pequeñas, que ofrecen sistemas excelentes de adquisición de datos, algunos pocos para el campo o para ambientes extremos (el tracto gastrointestinal, líneas de producción, sondas aéreas, sondas marinas, estaciones remotas, automóviles de prueba...). Aún así, sigue excluida una parte importante de la comunidad científica. El mercado meta de los fabricantes de estos equipos (Ecotech, National Instruments, Campbell Scientific, Vaisala...) son los centros de investigación de primer mundo, por lo que la optimización de costo no ha sido una variable importante en su diseño.

Tampoco la optimización del consumo de potencia y el tamaño han sido objeto de mucha atención, con excepciones de las cuales la más notoria y actual es el Mica Mote, desarrollado por la Universidad de Berkeley. El Mica Mote es una estación de bajo consumo de potencia con 8 canales de conversión de análogo a digital de 10 bits, 48 canales digitales y capacidad de telemetría; para su tamaño y precio, un gigante (por ejemplo, <http://www.cc.gatech.edu/~keith/classes/ubicomplexity/pdfs/infra/hsw-motes.pdf>, mayo 2009).

Este sistema incluso reduce notoriamente el costo. Así, de un precio mínimo cercano a los \$2000- para un logger modesto de Campbell, el Mica Mote desciende a menos de \$500- (vg. <http://www.microdaq.com/data-logger>; <http://www.campbellsci.co.uk/index.cfm>, mayo 2009). Aún así, por una estación, que se puede ubicar en un solo sitio por vez, un investigador costarricense tendría que invertir el costo de la estación, el de su importación y transporte, y lo correspondiente para cada uno de los sensores que vaya a conectarle. Sumando, es fácil darse cuenta de que el costo por estación con sensores puede fácilmente hallarse en los miles de dólares. Si en realidad se requieren varias de estas estaciones simultáneamente, la investigación ya se torna imposible por los costos.

Sin embargo, sin sensores confiables y el sistema que grabe los datos que generan, hoy

día no es mucha la investigación ambiental o geofísica que se pueda hacer. Es una de las razones por las que no se hace más investigación en nuestros países, y hay que esperar a que vengan investigadores de otras partes a hacerla. Y es también la razón principal por la que a nuestro grupo le interesa desarrollar sensores y estaciones que sean realmente accesibles a quien las necesita.

1.1 Definición del problema

Actualmente no existen sistemas de adquisición de datos de campo, que sean de bajo costo, y mucho menos de tecnología abierta, que a la vez optimicen precisión, costo y consumo de potencia. Lo mismo es válido para sensores ambientales, de una forma general. Los altos precios y poca asequibilidad de los sistemas comerciales, para investigadores del tercer mundo, establecen un límite real para la investigación que ellos puedan realizar, dejando muchos temas sin investigar o, en el mejor de los casos, dejándoles temas propios del país sólo a investigadores de países desarrollados. Se quiere con este proyecto generar tecnologías abiertas y de bajo costo, de adquisición de datos y de sensores ambientales, que los interesados puedan hacer por sí mismos, para dar posibilidades reales a la investigación con recursos monetarios limitados.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollo de un anemómetro piezoeléctrico y un sistema de adquisición de datos para sensores ambientales, que sean de bajo costo, de código y arquitectura abiertos, con autonomía de varias semanas, útiles para la adquisición de datos a usarse para vigilancia y para las investigaciones ambientales.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Clasificación de la información, el equipo y partes de base disponibles y tramitar la adquisición del equipo y partes que se tengan que comprar.
2. Diseño de un anemómetro piezoeléctrico y la primera versión de la estación de adquisición de datos ambientales, con base en el sistema de adquisición de datos de referencia (mica-mote), en las informaciones recabadas, y en las partes óptimas por su costo y disponibilidad.
3. Construcción un anemómetro piezoeléctrico funcional y capaz de desempeñarse en el campo con una autonomía de 3 meses sin mantenimiento.

4. Diseño de una estación de adquisición de datos ambientales funcional capaz de desempeñarse en el campo, con al menos 10 MB de memoria para datos.

A raíz de que se concedió finalmente un año en lugar de dos para la ejecución de este proyecto, y de que se le redujo el presupuesto, los objetivos tuvieron que reducirse. Así, el último objetivo relativo a difusión se eliminó. El objetivo 3 relativo a la construcción de un anemómetro se redujo eliminando pruebas de campo y se reformuló así:

3. Construir un prototipo de anemómetro piezoeléctrico capaz de medir viento en una dirección.

2. Revisión de literatura

2.1 Sistemas de adquisición de datos

Siguiendo la tendencia de desarrollo de sistemas de sensórica remota, hoy en día son muchos los grupos en los principales centros de investigación a nivel mundial que han desarrollado sistemas de este tipo. Uno de los sistemas más representativos, debido a su uso extendido en múltiples aplicaciones, son los desarrollos de diferentes tipos de de “Motes” de la Universidad de California en Berkeley (UC Berkeley), actualmente comercializados por Crossbow [7]. Estos sistemas han sido desarrollados con base en procesadores de 8 bits (por ejemplo el Mica 2 con el ATMega128), o el Telos, desarrollado a partir del procesador TI MSP430, un procesador de bajo consumo de energía de arquitectura de 16 bits [13].

Dichos “motes” han sido diseñados para trabajar con un sistema operativo orientado a eventos llamado TinyOS [19]. Este tipo de sistemas tienen la característica de tener un bajo consumo de energía y de poseer una fuente de energía independiente (utilizan baterías). Otro ejemplo similar de dicho desarrollo, en que se puede ver las similitudes entre sistemas, es el BTnode de la ETH Zurich [8]. Este nodo fue diseñado incluso para trabajar también con el sistema operativo TinyOS. En este tipo de desarrollos, es interesante observar que a pesar de que el sistema operativo ha sido liberado como código libre, tal y como se puede ver en la página web del TinyOS [19], ninguno de estos desarrollos implica la utilización del mismo concepto a nivel de hardware.

Esta tendencia puede observarse en muchos otros desarrollos, tales como el CSIRO Fleck, Eyes, UCLA E-Badge y muchos otros [16]. El sector corporativo no es ajeno a dicha tendencia. Desde hace varios años, las compañías han financiado investigaciones en los institutos universitarios, o han hecho el desarrollo por su cuenta. Por ejemplo, Intel financió el desarrollo hecho en UC Berkeley de los “motes“, pero además, con la experiencia desarrollada, creó su propio “Intel Mote” [10]. Este último sistema tiene la característica, no observada en sus desarrollos conjuntos anteriores con la UC Berkeley, de utilizar un procesador de 32 bits, un ARMv7. Otro ejemplo de desarrollo de este tipo, pero completamente independiente, es el Sun Spot, de Sun Microsystems, en el cual, se programa por medio de Java [15].

2.2 Anemómetros y sensores piezoeléctricos

Anemómetro: Un anemómetro (de la palabra griega anemos que significa viento) es un aparato meteorológico utilizado para medir la velocidad del viento. Básicamente existen dos clases de anemómetros: los que tienen partes móviles que son movidas por el viento, y los que utilizan algún otro principio que no requiere partes móviles. Los anemómetros que se usan para la medición de partes móviles son los de cazoletas o molinete, y los de

propela (ver figura abajo). En este caso, la dirección se determina con las llamadas veletas, que son móviles.

El anemómetro más utilizado es el anemómetro de cazoletas y es el estándar más común en mediciones meteorológicas. Se compone de copas hemisféricas montadas en los extremos de los brazos distanciados en ángulos iguales y asimétricamente. El flujo de aire pasa por las copas y las hace girar de forma horizontal con velocidad angular proporcional a la velocidad del viento. Otro anemómetro estándar común es el de propela, que sin embargo suele ser más costoso. En la figura abajo se muestran ejemplos.



Figura 1. Anemómetros de cazoletas y de propela.

Entre los anemómetros que no requieren partes móviles se hallan el de láser Doppler, el de filamento caliente, los de tubo de Pitot y los ultrasónicos [18]. El único sensor alternativo que se considera actualmente suficiente para mediciones de campo permanentes es el anemómetro ultrasónico [18, 19]. La calidad de los datos de un ultrasónico supera con mucho la de los demás anemómetros, en todos los sentidos (fiabilidad, resolución, frecuencia, sensibilidad), y además son sensores mucho más robustos, entre otras razones, por no tener partes móviles [18, 19]. Este sin embargo tiene un consumo de energía considerable y es mucho más costoso, usualmente más de \$1500- (vg <http://www.biral.com/met/wind/find.htm>, abril 2009).

Piezolectricidad o efecto piezoeléctrico: La piezolectricidad (del griego *piezein* que significa “estrujar” o “apretar”) es un fenómeno que se presenta en ciertos cristales o materiales cerámicos, los cuales al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica; a esto también se le llama efecto piezoeléctrico. Dicho fenómeno también se presenta a la inversa, o sea, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible, ya que al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico recuperan su forma. Los materiales piezoeléctricos más utilizados en electrónica son: cuarzo, rubidio, sal de *Seignette* y algunas cerámicas.

Una de las aplicaciones más extendidas de este tipo de cristales son los encendedores electrónicos, los cuales en su interior llevan un cristal piezoeléctrico que es golpeado de forma brusca por el mecanismo de encendido. Este golpe en seco genera una elevada corriente eléctrica capaz de crear un arco voltaico o chispa que puede encender el mechero. Otra aplicación muy importante es el sensor de vibración, en el cual cada una de las variaciones de presión producidas por vibraciones provocan un pulso de corriente que es proporcional a la fuerza ejercida, así es posible convertir una vibración mecánica

en una señal eléctrica lista para amplificar, por ejemplo: pastillas piezoeléctricas de guitarras. Otras aplicaciones de estos sensores son: actuadores, reloj de cuarzo, filtros SAW, líneas de retardo, cápsula de tocadiscos, transductores ultrasónicos, altavoces de agudos (“tweeters”) y reguladores de presión proporcional neumáticos.

Sensores piezoeléctricos: Un sensor es un dispositivo que convierte un parámetro físico en una salida eléctrica. Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración y fuerza, las cuales convierte en una señal eléctrica y por lo tanto son herramientas versátiles para realizar mediciones de varios procesos. Desde el descubrimiento inicial en 1880 por los hermanos Curie no fue sino hasta 1950 que el efecto piezoeléctrico fue utilizado para aplicaciones industriales de sensado pero ha experimentado un gran crecimiento en tecnología y rentabilidad y se ha probado satisfactoriamente en instrumentación medida, aeronáutica y nuclear. El surgimiento de la tecnología piezoeléctrica esta directamente relacionada con sus ventajas, tales como la elasticidad de los materiales piezoeléctricos la cual puede compararse con muchos metales y llega hasta los 105 N/m^2 . En la Figura 2 se muestra un diagrama sobre un sensor basado en el efecto piezoeléctrico y en la Figura 3 se muestra como es el funcionamiento de un sensor piezoeléctrico.

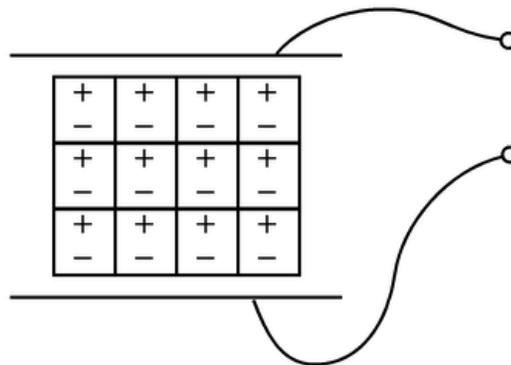


Figura 2. Sensor basado en el efecto piezoeléctrico.

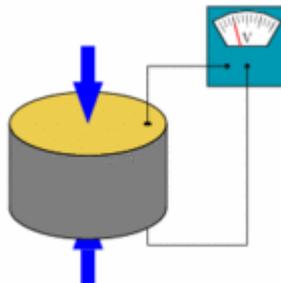


Figura 3. Funcionamiento de un sensor piezoeléctrico.

Aunque los sensores piezoeléctricos son sistemas electromecánicos que reaccionan a la compresión los elementos de sensado, presentan cero deflexiones y por eso los sensores piezoeléctricos son tan robustos, además tienen una frecuencia natural alta y una excelente linealidad. Adicionalmente la tecnología piezoeléctrica no es sensible

a los campos electromagnéticos y a la radiación lo cual permite realizar mediciones en condiciones extremas.

La desventaja de los sensores piezoeléctricos es que no pueden utilizarse para mediciones estáticas o aplicaciones DC, ya que la carga eléctrica producida decae con el tiempo debido a la impedancia interna del sensor y a la impedancia de entrada de los circuitos acondicionadores de señal, sin embargo los sensores piezoeléctricos son muy buenos para aplicaciones dinámicas o de AC.

Dependiendo del material piezoeléctrico existen tres modos de operación:

- **Efecto Transversal:** la fuerza es aplicada en el eje y y las cargas son generadas en la dirección del eje x, perpendicular a la línea de la fuerza. La cantidad de carga depende de las dimensiones geométricas del material piezoeléctrico (ver Figura 4).

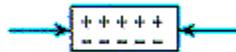


Figura 4. Efecto transversal.

- **Efecto Longitudinal:** la cantidad de carga producida es proporcional a la fuerza aplicada y es independiente del tamaño y forma del elemento piezoeléctrico. La única forma de aumentar la carga de salida es usando varios elementos que están mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo (ver Figura 5).

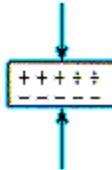


Figura 5. Efecto longitudinal.

- **Efecto Cizalla:** Las cargas producidas son estrictamente proporcionales a las fuerzas aplicadas y son independientes del tamaño y forma del elemento (ver Figura 6).

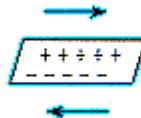


Figura 6. Efecto cizalla.

Modelado: Un sensor piezoeléctrico es modelado como una fuente de carga con un capacitor y una resistencia en paralelo (ver Figura 7) o como una fuente de voltaje en serie con un capacitor y una resistencia (ver Figura 8). La carga producida depende de la constante piezoeléctrica del dispositivo y la capacitancia se determina por medio del área,

el ancho y la constante dieléctrica del material. La resistencia representa la disipación de carga estática. El símbolo esquemático de un sensor piezoeléctrico es el que se muestra en la Figura 9.

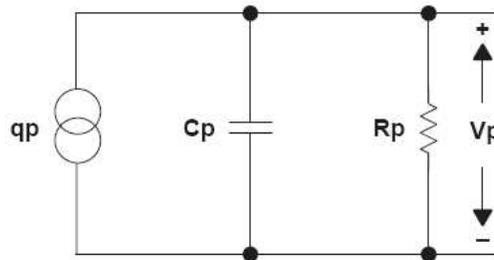


Figura 7. Modelado de carga de un sensor piezoeléctrico.

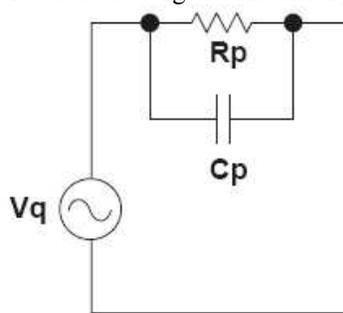


Figura 8. Modelado de voltaje de un sensor piezoeléctrico.



Figura 9. Símbolo de un sensor piezoeléctrico.

Acondicionamiento de señal: La salida de los sensores piezoeléctricos puede variar desde algunos microvoltios hasta cientos de voltios por lo que los requisitos del acondicionamiento de la señal pueden variar drásticamente. Típicamente la alta impedancia de un sensor requiere un amplificador con una entrada de alta impedancia, por lo que los amplificadores operacionales con entradas CMOS o JFET son los más empleados. Para realizar el acondicionamiento se utilizan dos circuitos:

- **Amplificador de voltaje:** se emplea cuando el amplificador está muy cerca del sensor. En la siguiente figura se aprecia un diagrama del circuito:

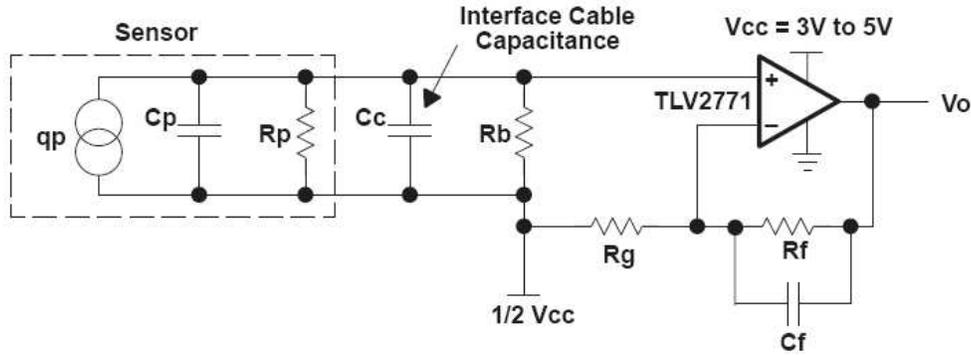


Figura 10. Circuito de un amplificador de voltaje.

En este tipo de amplificador la salida depende de la cantidad de capacitancia vista por el sensor, por lo que la capacitancia asociada con la interferencia del cable afectará la salida de voltaje y si el cable es remplazado o movido entonces las variaciones en C_c . Los valores de R_f y C_f determinan la frecuencia de corte superior y la resistencia R_b se recomienda que sea lo más alta posible y que la interfaz de cableado sea reducida al mínimo.

- **Amplificador de carga:** se emplea cuando el amplificador está lejos del sensor. En la Figura 11 se muestra el circuito de este tipo de amplificador.

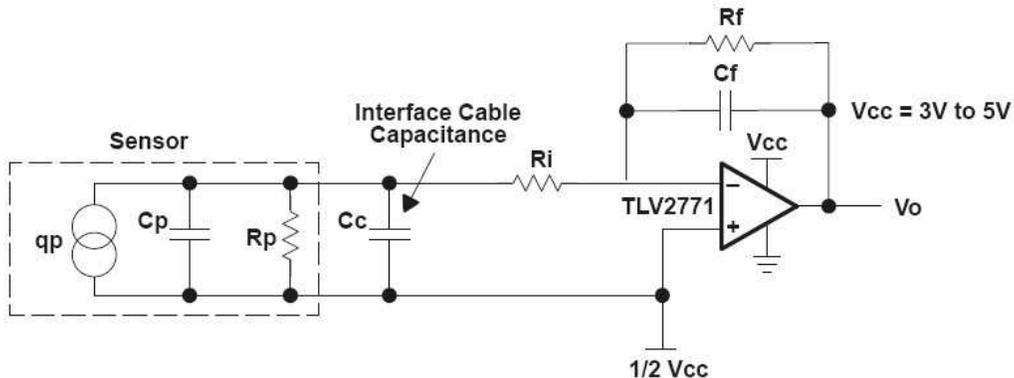


Figura 11. Circuito de un amplificador de carga.

El amplificador de carga hará un balanceo de la carga inyectada en la entrada inversora por medio de la carga del capacitor de realimentación C_f . La resistencia R_f descarga el capacitor C_f a una baja tasa para evitar que el amplificador quede saturado. También los valores de R_f y C_f sirven para definir la frecuencia de corte inferior. La acción del amplificador mantiene 0V entre sus terminales de entrada así que la capacitancia asociada con la interfase del cableado no representa ningún problema. En resumen el propósito de un amplificador de carga es convertir la carga de entrada de alta impedancia en un voltaje de salida manejable.

3. Materiales y métodos

Inicialmente, se encontraron diseños de referencia para el anemómetro piezoelectrónico y para la estación que se utilizarán como base para el diseño desarrollado. La adquisición de equipos se retrasó más del semestre previsto, sin embargo, ya estaba previsto que la adquisición de los equipos puede convertirse en un cuello de botella. De esta manera, el diseño de la primera propuesta de estación se realizó en forma paralela, y con esto se evitaron problemas de calendarización. De esta manera, la estación básica fue diseñada y finalizada en setiembre, momento en el cual se pudo disponer de los componentes básicos.

En el diseño y construcción del sensor se contó con la colaboración de un graduando de la Escuela de Ingeniería de Electrónica, que realizó como su proyecto de graduación bajo la supervisión de los coordinadores del proyecto, y con la estrecha colaboración del Dr. Jaime Quesada, el diseño de el sensor. Este sensor se basa en la presión que ejerce un flujo de aire sobre una superficie ortogonal a él, la cual se traduce en un vector de fuerza medible con una pesa y, por supuesto, con un sistema desarrollado con base en un efecto piezoeléctrico. Se previó asegurar el funcionamiento para fuerzas perpendiculares a la gravedad, antes de intentarlo en fuerzas paralelas a la gravedad. Se tomó como base complementaria la tecnología asociada a las pesas electrónicas, que hoy día es una tecnología madura y de dominio generalizado. En la propuesta original (no reducida), una vez probado en el laboratorio, el sensor se probaría en el campo por varias semanas, junto con uno de uso estándar en meteorología. En la versión reducida del proyecto, se midió paralelamente en el laboratorio con el anemómetro desarrollado y uno de referencia.

Para el diseño y desarrollo la estación de adquisición de datos, se definieron los componentes a utilizar basados en criterios de consumo de potencia, escalabilidad de la tecnología, diseño para adaptación a ambientes naturales y costo. Estaba prevista, sin embargo, la utilización de la tecnología conocida, el “Mica-Mote” desarrollada por la Universidad de Berkeley para propósitos de comparación, sin embargo, problemas con la adquisición de estos sistemas que fueron informados cuando el proyecto se encontraba en la última etapa impidieron el cumplir con dicho objetivo.

De esta manera, se construyó una primera versión de la estación del ITCR, el “Crtec-logger”. Esta primera versión es una estación con capacidad de almacenamiento de datos, adaptable a una alta variedad de sensores de variables ambientales; con una memoria basada en la tecnología de almacenamiento de datos con conexión USB. La optimización del CRtec-logger es parte de los objetivos de los proyectos que se encuentran aprobados y en desarrollo en el año 2009, aprovechando estos primeros trabajos, y la diversificación de los proyectos desarrollados en el ITCR donde se requiere la utilización de una estación de sensórica remota.

4. Resultados y discusión

4.1 Dispositivo de adquisición de datos

Nota: La información aquí presente está basada en el trabajo desarrollado por los estudiantes Frayzer Bonilla y Erick Salas, de la Escuela de Ingeniería Electrónica, bajo la supervisión del Ing. Adolfo Chaves Jiménez, para el Desarrollo del sistema de adquisición.

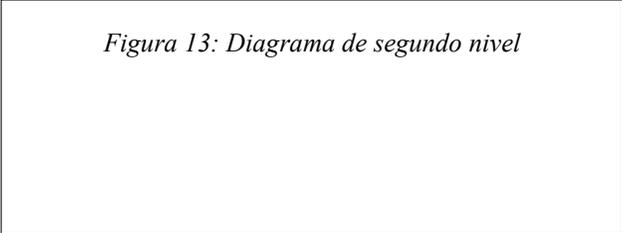
4.1.1 Descripción del hardware

Un sistema de adquisición de datos es un sistema donde se ingresa una o varias señales con algún contenido semántico y se obtiene como resultado, un archivo donde se almacena la información contenida en la señal, en un formato interpretable por un usuario.

Figura 12: Diagrama de primer nivel

El sistema de adquisición de datos principalmente consiste de tres módulos de hardware. El convertidor analógico digital y el microcontrolador, la interfaz y control de *USB*, y finalmente a la memoria *flash* tipo *USB*.

Figura 13: Diagrama de segundo nivel

The diagram area is currently blank, enclosed in a rectangular border.

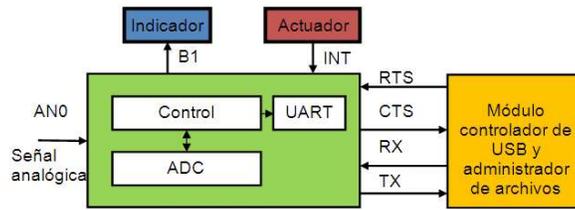


Figura 14: Diagrama funcional

El principal módulo de hardware está compuesto del microcontrolador PIC 16F877A, que tiene relevantes características, como lo son 8 canales de adquisición de datos analógicos, una resolución de 10 bits de conversión analógico digital, sistema de comunicación *UART*, modo de operación de bajo consumo tipo *sleep*. Este microcontrolador es de bajo costo y de fácil adquisición, además de sobresaliente uso en muchas aplicaciones *embedded* debido a su versatilidad.

El Convertidor analógico digital (ADC) captura una muestra de la señal analógica, el núcleo del microcontrolador procesa los datos convertidos, configura el puerto *UART*, tanto con la velocidad de transmisión y la trama de los datos. La comunicación entre el módulo *VDRIVE2* y el microcontrolador es completamente serial. Enviando primero el comando de ejecución o control para finalmente los parámetros correspondientes, como el nombre de archivo, el tamaño y el contenido del mismo. Soportala apertura y el cierre de archivos.

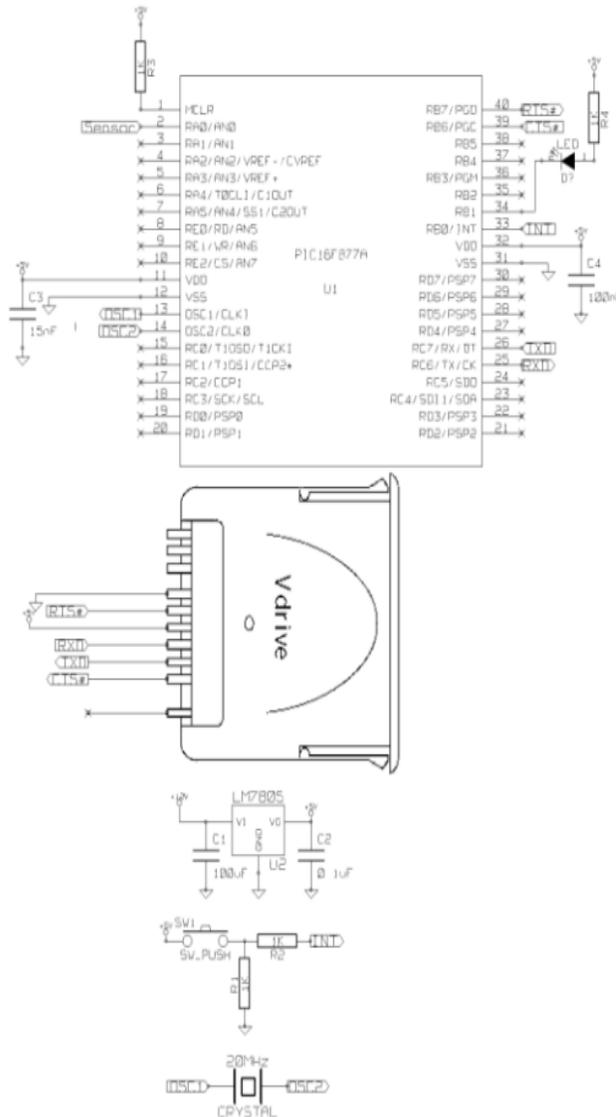


Figura 15: Diagrama de tercer nivel: Componentes

Regulación de la alimentación

Se usó un LM7805 para mantener constante la tensión de alimentación de todo el sistema en 5V.

Conexiones del Microcontrolador

El microcontrolador utilizado (PIC16F877A) posee 40 pines de los cuales se utilizaron 10 pines sin tomar en cuenta los pines de alimentación y de referencia, de la siguiente manera: el pin 1 es el *Master clear (MCLR#)* del microcontrolador, utilizado para el reinicio (*reset*) general, es activa en bajo, por lo tanto para el funcionamiento normal debe estar a 5V.

La señal proveniente del sensor entra al microcontrolador por el pin 2, que es una entrada para la captura analógica (AN0), que corresponde al canal 0. Para el oscilador se utilizó el cristal de 20MHz, la señal que transmite los datos en serie (*UART*) del microcontrolador al VDRIVE sale por el pin 25 (TX), y en el pin 26 (RX) se reciben los datos provenientes del VDRIVE.

La interrupción externa (INT) del microcontrolador es utilizada para implementar el actuador (botón), que permite el inicio del almacenaje de datos, está conectada en el pin correspondiente (33), en el pin 34 se conectó un LED en *pull up*, para indicar el estado de operación del sistema, los cuales son: modo de adquisición de datos y almacenamiento en la memoria *FLASH USB* y el modo de espera por conexión del dispositivo *FLASH USB* al módulo controlador *VDRIVE2*, finalmente las señales de sincronización entre el microcontrolador y el *VDRIVE2* se emitían por el pin 39 (CTS) y se recibían por el pin 40 (RTS).

Conexiones del VDRIVE2

El VDRIVE2 es el módulo que controla el *FLASH USB* y administra el sistema de archivos, este componente posee 7 pines, el pin 2 o RTS# envía una señal de control para tener sincronía con el microcontrolador, el pin 4 o RXD recibe los datos transmitidos por el microprocesador, el pin 5 o TXD transmite datos al microprocesador, el pin 6 o CTS# recibe una señal de control para sincronía, y el pin 7 o RI# no se utilizó para nuestra implementación.

4.1.2. Descripción del software

El microcontrolador interactúa con el controlador de *USB* de manera maestro esclavo. Este mismo responde a las órdenes solicitadas. El software está principalmente implementado en el microcontrolador y el sistema es independiente de otro sistema.

El software debe tener la máxima portabilidad, extensa escalabilidad y de código

abierto, que permita controlar los parámetros como frecuencia de muestreo, cantidad de datos por archivo y tabulación de los datos obtenidos.

Entre las rutinas de software más importantes, se puede considerar mostrar en la figura 11, en esta define el diagrama de flujo de los procesos más destacados, como su control de flujo relativo a las condiciones de operación hacia los procesos indicados:

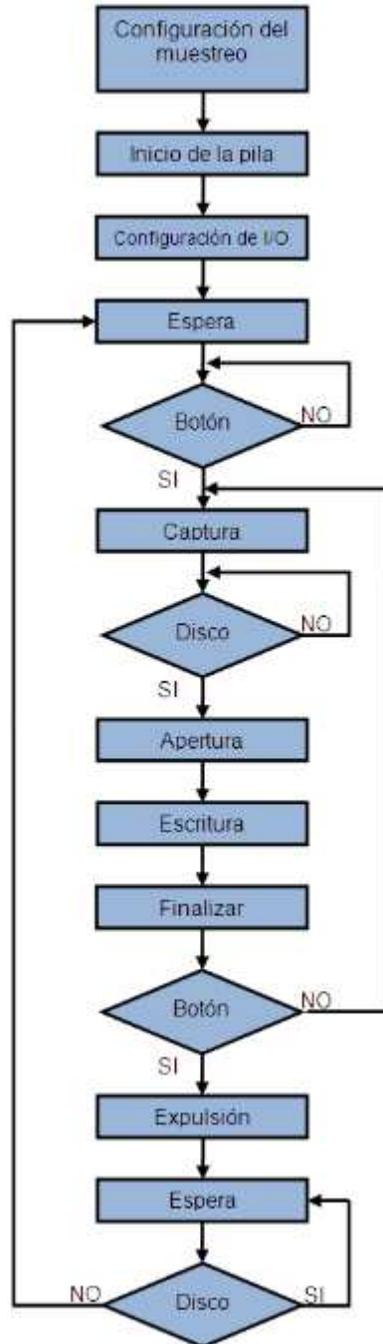


Figura 16: Diagrama general de software

El módulo VDRIVE2 es controlado por medio de unos comandos simples que son transferidos mediante *UART*. En este caso se utilizó el set de comandos del tipo extendido¹ junto con el debido proceso de disposición de negociación (*handshaking*) para un funcionamiento adecuado [3]. El código de operación del sistema, específicamente en las rutinas de sincronización son basadas en el ejemplo de aplicación dado por el fabricante.[4]

Dentro de las rutinas más importantes se encuentran las siguientes:

Configuración de la *FIFO* para la administración de la recepción

Reinicia el estado de la fila (*FIFO*) y establece el puntero de inicio (*RX_FIFO_START*) y el puntero final (*RX_FIFO_END*) que indican las direcciones de memoria que delimitan el tamaño de la fila, para organización de los datos obtenidos vía serie (*UART*) desde el módulo. En la figura 13 se muestra la disposición de la *FIFO* en la memoria del microcontrolador.

Disposición para agregar elementos a la *FILA*

El siguiente listado de código, muestra la manera que el puntero *RX_FIFO_HEAD_PTR*, que contiene la dirección que apunta el siguiente dato por guardar en la *FILA*, almacena el contenido del registro *RCREG* (contiene el dato recibido por *UART*) e incrementa el contador de cantidad de datos obtenidos (*RX_FIFO_COUNT*). La dirección en *RX_FIFO_HEAD_PTR* se postincrementa para el siguiente espacio en memoria.

```
*RX_FIFO_HEAD_PTR++ = rcreg;  
RX_FIFO_COUNT++;
```

Disposición para leer y despachar elementos de la *FILA*

En el código siguiente, el puntero *RX_FIFO_TAIL_PTR*, que contiene la dirección que apunta el siguiente dato por leer desde la *FILA* se copia hacia otro puntero para el procesamiento posterior en el sistema y se decrementa el contador de cantidad de datos obtenidos (*RX_FIFO_COUNT*). La dirección en *RX_FIFO_TAIL_PTR* se postincrementa para el siguiente espacio en memoria.

1

Set de comandos tomados desde la hoja de especificaciones
http://www.vinculum.com/documents/fwspecs/UM_VinculumFirmware_V205.pdf

f

```
*RX_FIFO_BYTE = *RX_FIFO_TAIL_PTR++;  
RX_FIFO_COUNT--;
```

La función del puntero `RX_FIFO_HEAD_PTR` es apuntar hacia la FILA por el próximo dato por almacenar, y el puntero `RX_FIFO_TAIL_PTR` por el próximo dato por leer. En esta disposición, cuando la FILA contiene algún dato, el puntero `RX_FIFO_HEAD_PTR` apunta hacia una dirección superior en comparación a la dirección dada por `RX_FIFO_TAIL_PTR`. Posibles excepciones a lo anterior se dan en el momento de reinicio de la FILA, cuando esta vacía o en la circunstancia de redireccionamiento por sobrepasar los límites propios de la FILA.

En el caso de sobrepasar los límites de la fila, la misma es implementada de manera circular, por lo tanto, la referencia de los punteros son cambiados para apuntar de nuevo el inicio de la fila (`RX_FIFO_START`) en circunstancias que los punteros (`RX_FIFO_TAIL_PTR`) y (`RX_FIFO_HEAD_PTR`) apunten a la misma dirección que (`RX_FIFO_END`). Como se muestra en la figura 12, las referencias son circulares, para evitar acceder y sobrescribir secciones de la memoria *RAM* destinada a otros usos y así le permite hacer un uso más eficiente del espacio disponible en memoria de trabajo.

Configuración operativa del periférico *UART*

Configura el puerto asignado para el *UART*, la velocidad de transmisión y recepción que soporta el módulo *VDRIVE2* por defecto es de 9600 bps y requiere de la utilización de la negociación (*handshaking*) para el adecuado control de las tramas de comunicación.

Rutina de captura de datos

En esta rutina, se procede a adquirir por medio de un canal apropiadamente configurado, las señales analógicas provenientes de un sensor debidamente conectado. En este caso, se utilizaron 2 variables importantes para la sección de captura de datos: `total_muestras` y `periodo`. `Total_muestras` determina el número de datos que le permite almacenar en la memoria *RAM* del microcontrolador antes de ser procesados y transferidos hacia el *VDRIVE2* y luego al medio de almacenamiento masivo. La variable `periodo` establece el intervalo de tiempo que debe tomarse entre cada una de las muestras.

Además, esta rutina tiene la importancia que permite elegir el canal analógico de la cual se desea capturar la señal, lo anterior daría la posibilidad en próximas implementaciones de dar la libertad de escoger el canal en un instante dado, en el efecto de un sistema de adquisiciones múltiples.

Rutina de sincronía del microcontrolador con el módulo *VDRIVE2*

Para efectos de establecer el estado real de conexión con el módulo *VDRIVE2*, existe una secuencia definida en la figura 13, que permite verificar los procesos de consulta y

respuesta en la comunicación entre ambos sistemas, en la figura 13 se muestran los detalles propios del proceso.

Esta basado en el intercambio de “ecos” entre las partes, inicialmente se envía por el microcontrolador un comando llamado ‘E’ y el VDRIVE2 le responde ‘E’ 0x0D, mediante el debido proceso de esperas por la respuesta, se procede a tramitar la recepción y clasificar los resultados, en caso de ser la respuesta esperada (‘E’ 0x0D) se tramita ‘e’ y se recibe ‘e’ 0x0D. Es claro que la recepción es meramente serial, por lo tanto se procesan las respuestas como bytes por separado.

Si se tiene éxito en ambos procesos, se declara el módulo como debidamente conectado y en sincronía con el sistema. El algoritmo contempla el debido tratamiento de las esperas por la respuesta y la forma de tratar de los reintentos, ambos se evalúan continuamente, para fines de determinar la operación como no satisfactoria. Cada byte recibido por el UART es transferido hacia la FILA de recepción para el debido proceso de validación de los resultados.

Rutina de procesamiento de los datos obtenidos

Cada dato capturado por los procesos que involucra el ADC como medio para adquirir los datos del medio físico y en general, no tienen una codificación determinada que especifique el modo que deben ser tratados. Se implementó una rutina de conversión de datos binarios a su correspondiente conjunto de caracteres ASCII que refleje el significado real, cuyo objetivo es garantizar la legibilidad del archivo por almacenar. Para este caso, el dato adquirido es de 8 bits, por lo tanto se requieren 3 dígitos codificados ASCII. Por motivo de espacio reducido de memoria *RAM* en el microcontrolador y una adecuada y eficiente manejo del procesamiento, se estableció que la conversión a cadena ASCII ocurriera en el momento del almacenamiento a una tasa de dato a la vez. En otro caso, la cantidad de espacio en memoria podría triplicarse.

Rutina de envío de datos

Debido a la necesidad del *handshaking*, para el envío de datos hacia el VDRIVE2, se espera por el *RTS* esté en la condición activa (bajo) para preparar el *UART* y proceder a la transmisión en serie. Se estableció que el envío debía ser ejecutado sólo si el transmisor esté listo para funcionar y finalizar el proceso sólo si el *buffer* de transmisión esté de nuevo disponible.

Rutina de recepción de datos

El microcontrolador debe disponer del mecanismo para atender la petición de recepción de datos provenientes del *UART*. La forma adecuada es la interrupción referente al puerto serie. Debido que el módulo es asincrónico respecto al microcontrolador, las respuestas pueden presentar desfases respecto a los tiempos esperados de respuesta, en conjunto con los mecanismos de procesamiento y administración propios del control del núcleo mismo y el *FLASH USB*. Por lo tanto, cada

repuesta del VDRIVE2 debe ser trata mediante la correspondiente interrupción. La atención propia permite establecer el procedimiento para agregar el dato recibido hacia la FILA de recepción.

Rutina de búsqueda del dispositivo de almacenamiento

El módulo controlador *USB* responde con información relativa al estado de la memoria a controlar, por medio de un comando específico. Esta rutina debe comparar la información suministrada con parámetros conocidos, para establecer el estado de no operación de administración de memoria. El microcontrolador envía el comando en modo extendido 0x0D, el módulo le responde con 'D:>' 0x0D, el programa debe verificar la respuesta, para declarar que la memoria *FLASH USB* está presente.

Rutina para la apertura del archivo

Esta rutina determina el nombre del archivo que se necesite abrir, el envío del nombre debe enviarse carácter por carácter, por último se envía el comando de apertura de archivo, el módulo responde con información acerca del éxito de la operación. En el modo extendido de envía inicialmente 'OPW' luego de un carácter de espacio y el nombre del archivo por abrir para escritura.

Rutina para la escritura en el archivo

Esta rutina es la más importante, por medio de esta determina los datos que van ser escritos en el archivo recientemente abierto. Adicionalmente se debe enviar el tamaño del dato conjunto de los datos enviados. Se debe conocer la respuesta dado por el controlador *USB* que establece el estado de la escritura. En el modo extendido de envía inicialmente 'WRF' luego de un carácter de espacio y la cantidad de bytes por escribir en el archivo. En esta rutina se ejecuta la conversión hacia ASCII del dato por almacenar.

En este listado se muestra la secuencia de envío para la escritura de datos en el archivo.

```
serial_sendbyte('W'); // Envía 'W'
serial_sendbyte('R'); // Envía 'R'
serial_sendbyte('F'); // Envía 'F'
serial_sendbyte(' '); // Envía ' '
serial_sendbyte(0x00); // Envía 0x00-bytes a escribir MSB
serial_sendbyte(0x00); // Envía 0x00
serial_sendbyte(0x00); // Envía 0x00
serial_sendbyte(0x05); // Envía 0x0E-bytes a escribir LSB
serial_sendbyte(0x0D); // Envía el retorno de línea
```

Rutina para cerrar el archivo

Esta rutina determina el nombre del archivo que se necesite cerrar, el envío del nombre debe enviarse carácter por carácter, por último se envía el comando que cierra el archivo,

el módulo responde con información acerca del éxito de la operación. En el modo extendido se envía inicialmente 'CLF' luego de un carácter de espacio y el nombre del archivo por cerrar.

Rutina para la interacción del actuador en el sistema

Una característica de manejo del sistema por el usuario radica en la posibilidad de interactuar en la manera de adquirir los datos y tener cierto grado de decisión en el ciclo de almacenamiento. Este mecanismo de *DATALOGGER* permite romper el ciclo de adquisición y acumulación de información hacia la memoria masiva.

Básicamente mediante la atención de la interrupción externa (*INT*) modifica temporalmente el tamaño del bloque de datos adquiribles. Tal disposición cambia un estado interno que logra la condición para permitir la expulsión o extracción segura del medio. Los datos previamente capturados se transfieren con seguridad y son escritos en el archivo en cuestión. El estado se puede reflejar en un indicador luminoso. Además dicho botón permite definir el momento de inicio del proceso de captura.

4.2 Diseño del anemómetro piezoelectrónico

Nota: Este desarrollo se basa en el trabajo del Dr. Jaime Quesada, de la Escuela de Química del ITCR y el graduando Eduardo Villegas, de la Escuela de Electrónica del ITCR. Eduardo hizo su trabajo de graduación a partir de este desarrollo.

Acondicionamiento: Los sensores piezorresistivos se comportan como resistencias variables (potenciómetros), por lo que hay que tener en cuenta que si disminuye la resistencia aumenta la corriente y si aumenta la resistencia disminuye la corriente. El fabricante especifica que la máxima corriente que puede pasar a través del sensor piezorresistivo es de 1mA, por lo tanto fue necesario poner en serie una resistencia de un valor fijo. Existen varios tipos de circuitos acondicionadores para sensores piezorresistivos y el que se escogió fue el siguiente:

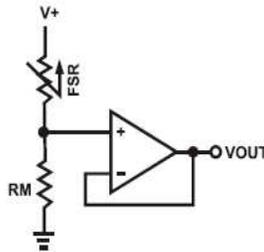


Figura 17. Convertidor de fuerza a voltaje2.

El circuito anterior es un divisor de voltaje que tiene el sensor piezorresistivo *FSR*

conectado en serie con una resistencia RM de un valor fijo, en la cual es donde se mide el voltaje de salida utilizando un amplificador seguidor, esto con el fin de aislar el circuito. Al aplicar una fuerza a la FSR entonces el voltaje de salida aumenta, ya que su resistencia disminuye y el paso de corriente es mayor, por lo que el voltaje en RM es mayor. Cuando no se aplica fuerza a la FSR entonces su valor de resistencia es enorme y se comporta como un circuito abierto por lo que el paso de corriente es prácticamente nulo y por ende no hay caída de voltaje en RM . El valor de V^+ fue de 5V para seguir la recomendación del fabricante y también por comodidad. El valor de RM se escogió utilizando el gráfico de la Figura 18. En dicho gráfico anterior se aprecian diversas curvas del voltaje de salida para diversos valores de resistencias y de fuerzas. Se puede notar que con la resistencia de $100k\Omega$ se obtiene el mayor voltaje de salida, casi 5V (curva de color celeste), y por lo tanto esta fue la que se escogió para el circuito de la Figura 17.

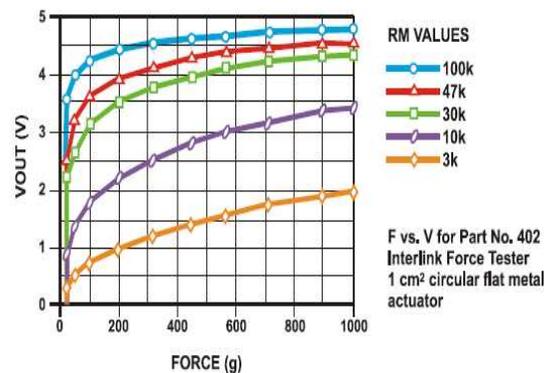


Figura 18. Voltaje de salida para diversos valores de resistencia³.

Voltajes de salida: para linealizar el comportamiento del sensor piezorresistivo se diseñó un amplificador de instrumentación debido a que dicho circuito es muy versátil, puede ser calibrado fácilmente y es muy preciso, lo cual lo convierte en una excelente opción para realizar acondicionamientos de señal.

Dicho circuito se diseñó para que con los voltajes de salida del circuito de la Figura 17 se obtuviera un rango de voltajes de salida de 0V a 10V y se implementó con un $LM324$ por comodidad y disponibilidad.

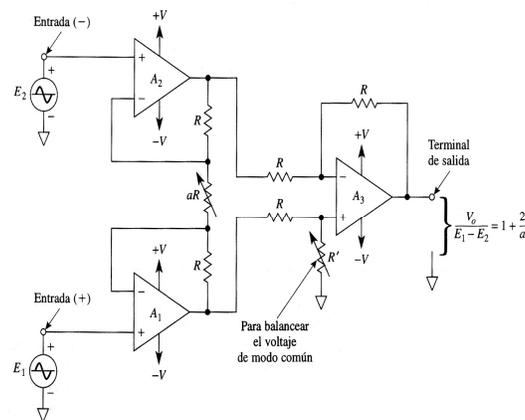


Figura 19. Amplificador de instrumentación utilizado como acondicionador de señal (4).

3 <http://www.interlinkelectronics.com/library/media/papers/pdf/fsrguide.pdf>

En el amplificador de instrumentación recibía como entrada los voltajes de salida del circuito “Convertidor de Fuerza a Voltaje” (conectado a la entrada no inversora del circuito de la Figura 19) y por lo tanto la salida dependía completamente de los valores recibidos en dicha entrada. Como la entrada inversora no fue utilizada entonces se conectó a tierra.

Se hicieron pruebas para verificar que la señal (V) obtenida de este sistema acoplado a un sistema mecánico en que se ubicó el sensor piezorresistivo, tuviese una relación lineal con la fuerza aplicada. Mediante el acople de diferentes números de objetos de igual masa al sistema, se demostró la relación lineal. Esto se hizo como paso de verificación de funcionamiento adecuado, lo cual fue positivo, por lo cual no se dan más detalles.

Fuerza del viento sobre una superficie: Para comprobar cómo se comporta la fuerza del viento sobre una superficie al variar su velocidad, se construyó un “túnel de viento” utilizando un tubo de PVC y 3 abanicos de computadora dentro del tubo y cada uno de los cuales podía ser encendido o apagado individualmente.

Variando el voltaje de alimentación de los abanicos se podía variar la velocidad del mismo y por ende la intensidad del viento. Igualmente, variando el número de abanicos encendidos se podía variar la velocidad del viento generado.

Se utilizó una pesa digital para demostrar la hipótesis básica de que la fuerza de empuje generada por el viento sobre una superficie es una función simple de su velocidad. Se halló una relación lineal entre el voltaje suministrado a los abanicos y la fuerza medida, tal y como se muestra la figura de abajo. Con ello, quedó suficientemente demostrado que la relación entre velocidad y fuerza sobre una superficie transversal es simple, de hecho, esencialmente lineal. Como el objetivo no es el estudio específico de este caso, no se aborda en más detalle.

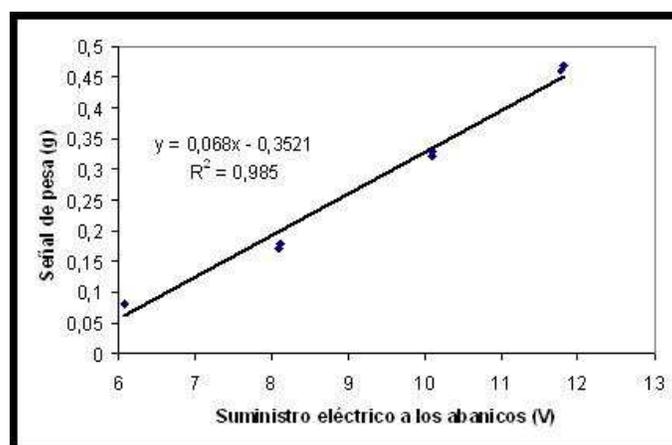


Figura 20. Variación de la fuerza medida en la pesa con el voltaje suministrado a los abanicos; superficie plana circular.

Superficie con mayor fuerza de arrastre: Una vez que se determinó cómo era el comportamiento del viento se procedió a realizar otra serie de experimentos con el fin de determinar cuál superficie era la que generaba la mayor fuerza de arrastre al estar expuesta a un flujo de viento. El arrastre es una fuerza aerodinámica que se opone al movimiento de un objeto a través de un fluido (líquido o gas). Se utilizaron los siguientes tipos de figuras: esfera lisa (bola de ping pong), plano circular transversal, plano cuadrado transversal, superficie convexa, superficie cóncava y un cilindro. Luego de comparar todos los datos obtenidos de las diversas figuras se concluyó que la superficie cóncava es la que posee la mayor fuerza de arrastre; esto coincide con la predicción de la Ley de Poiseuille, según la cual la superficie cóncava es la que posee el mayor coeficiente de arrastre ($CD = 2,30$) de todas. El coeficiente de arrastre es un número adimensional utilizado en aerodinámica para modelar todas las complejas dependencias de forma, inclinación, condiciones de fluido en el arrastre de un objeto y usualmente es determinado de forma experimental.

Sin embargo, la superficie cóncava es útil solo en el caso de querer medir la velocidad del viento en una dirección, no en varias. Para medir en varias con un cuerpo cóncavo, se requeriría una veleta, a fin de orientar el cuerpo en la dirección apropiada. Como el objetivo ulterior de este proyecto es desarrollar un anemómetro que mida en varias direcciones sin emplear una veleta (para evitar partes móviles), es necesario un cuerpo con la mayor simetría en el ámbito de direcciones que se quieren medir. Esto implica utilizar un cilindro (útil para medir velocidades en el plano) o una esfera (para medir hasta en tres dimensiones).

El gráfico de los datos obtenidos con la superficie cóncava es el que se muestra a continuación y el valor de fuerza más alto fue de 0,789 g (el más alto en comparación con las demás formas):

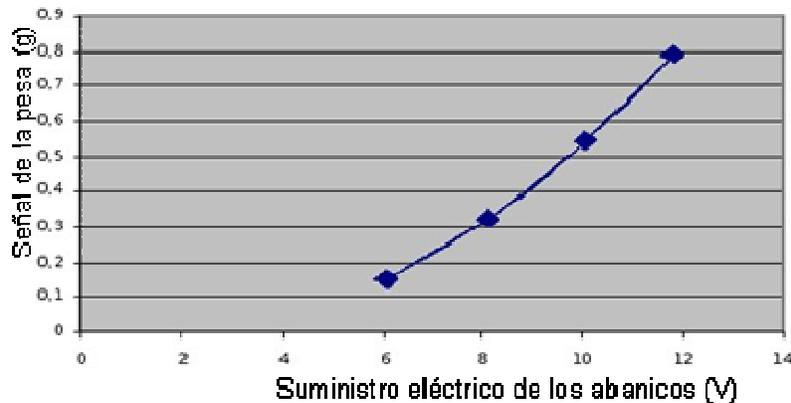


Figura 22. Variación de la fuerza medida en la pesa con el voltaje suministrado a los abanicos; superficie cóncava circular.

Sistema mecánico para usar el sensor piezorresistivo en medición de velocidad de viento: Se diseñó un sistema mecánico que convirtiera la fuerza del viento en presión sobre un sensor piezorresistivo. Para crear dicho sistema fue necesario considerar lo siguiente: que estuviese compuesto de materiales de fácil adquisición, que fuera de fácil fabricación, que las partes que conformaban dicho sistema estuvieran muy planas para

evitar mal funcionamiento del sensor y que la pieza que generara la presión sobre el sensor piezorresistivo estuviera guiada para garantizar que siempre actuara sobre el área activa del sensor. El sistema mecánico fue creado en madera por la facilidad de ese material para darle forma y se le colocaron unas piezas de dominó en posición horizontal así como un tornillo para ajustar la presión. Para captar la fuerza del viento se utilizó una esfera de estereofón sobre un mástil, debido a que se pretende que en partes futuras del proyecto el sistema mecánico sea capaz de medir viento en varias direcciones simultáneamente y para eso una esfera es el objeto idóneo. El mástil se puso de una madera rígida, ya que en pruebas realizadas anteriormente se determinó que un mástil flexible generaba oscilación y vibración hasta el punto de imposibilitar la medición de diferentes intensidades de viento. En la siguiente figura se aprecia cómo era el sistema mecánico utilizado en las pruebas finales:



Figura 21. Sistema mecánico final (foto: Eduardo)

Medición de la velocidad del viento con el sistema mecánico: Se generaron diferentes velocidades de viento mediante una secadora de pelo de 2 velocidades colocada a diferentes distancias (50cm, 75cm, 110cm y 150cm) del sensor. Se le inhabilitó el calentamiento a la secadora. Este tipo de abanico da un flujo uniforme transversalmente, cosa que no hacían los abanicos de computadora. Como referencia, se utilizó un anemómetro de cazoletas marca Thies Clima, a fin de tener una medición de la velocidad

del viento con un instrumento convencional y aceptado. Para guardar los datos digitalizados se utilizó el datalogger CEC webDAQ/100. Los datos del anemómetro de cazoletas (pulsos) se procesaron mediante un programa que se diseñó en el lenguaje de programación C#, el cual realizaba la conversión de frecuencia a velocidad en m/s y km/h. A continuación se muestra un gráfico de promedios de 30 segundos medidos con los dos anemómetros:

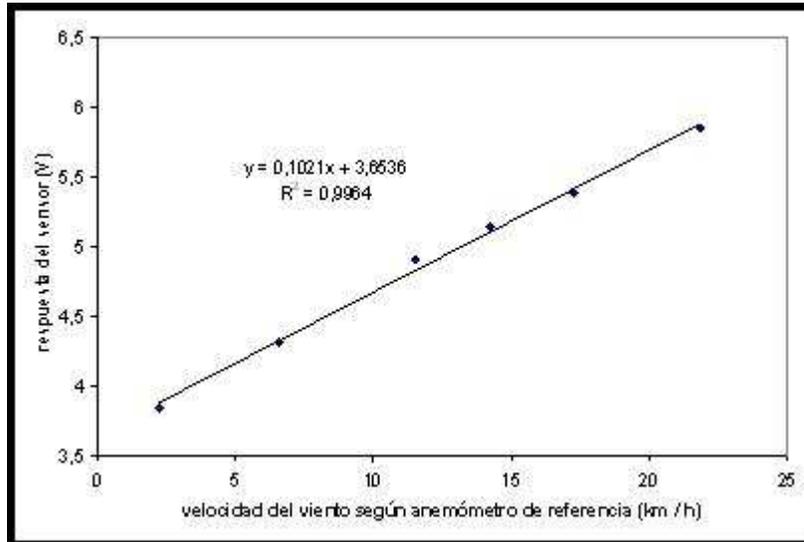


Figura 22. Relación del voltaje del sistema mecánico y la velocidad del viento medida con el anemómetro.

El ámbito de velocidades probado coincide con velocidades comunes cotidianamente en el valle central, a lo largo del año. Se observa que la correlación es excelente. Es probable que las divergencias de la recta se deban más bien a las deficiencias propias del anemómetro de cazoletas, o a la forma de colocar la fuente del viento, y no al sensor desarrollado. Pero para comprobarlo sería necesario medir con un sensor de referencia diferente, en un sitio con viento real, cosa que podrá hacerse en una futura etapa del desarrollo. Detalles adicionales del desempeño del sensor, como su mayor frecuencia de datos, su mejor precisión, y otros, serán publicados y discutidos próximamente en un artículo que está en proceso de elaboración. Por lo pronto ha quedado demostrado que la aplicación de un sensor piezoelectrónico de bajo costo en la medición de viento es factible.

5. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Es posible a partir del diseño básico y la utilización de la tecnología de microcontroladores el diseño de una estación para adquisición de datos con una alta capacidad de almacenamiento (1 GB), utilizando las tecnologías electrónicas actuales (memoria USB)
- Sensores piezoeléctricos pueden ser utilizados para la medición de la velocidad de viento en al menos una dirección.
- Es posible el diseño de estaciones de bajo costo para medir velocidad de viento utilizando los componentes desarrollados.

Recomendaciones

1. El módulo VDRIVE2 tiene un amplio repertorio de comandos que permiten la administración de los archivos y carpetas, lo anterior puede ser útil para disponer de una colección de archivos catalogados en directorios para un mejor manejo neto de los datos recolectados.
2. Según las necesidades de la aplicación es posible que la cantidad de datos por capturar por bloque o ráfaga aumenten razón de la eficiencia del uso de los dispositivos, debido que el modulo VDRIVE2 aumenta el consumo energético, es deseable que el módulo este encendido sólo en caso de almacenamiento.
3. Para un mejor uso del sistema sería recomendable adaptar un sistema de interfase gráfica que permita al usuario interpretar el estado de operación del *datalogger*.
4. Se recomienda continuar el trabajo con los sensores piezoeléctricos a fin de implementar la medición de viento en el plano, y eventualmente en tres dimensiones.
5. Se recomienda fabricar un prototipo del anemómetro piezoeléctrico que pueda ser probado en el campo.

6. Aportes y alcances

Los desarrollos de este proyecto han generado la puesta en funcionamiento de la primera plataforma de arquitectura abierta para sensórica remota creada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. De esta manera, una gran cantidad de proyectos relacionados con la conservación del medio ambiente en desarrollo en varias escuelas del ITCR, entre ellas, la Escuela de Química (anemómetro piezoeléctrico y una serie de proyectos en colaboración con el CEQIATEC), la Escuela de Ciencias y Letras de la Sede San Carlos (en supervisión de la calidad de agua) y la Escuela de Electrónica, cuentan con un instrumento cuya información de diseño está disponible para su uso, y es de bajo costo y alta capacidad de memoria a partir del aprovechamiento de tecnologías como las memorias con tecnología de transmisión USB.

Estos resultados han sido la base de propuestas más ambiciosas, entre las cuales se encuentran el proyecto “Desarrollo tecnológico del datalogger de propósitos de investigación”, actualmente en desarrollo, y que busca a partir de la versión “alfa” desarrollada en este proyecto crear un producto tecnológico con características adecuadas para ser utilizado en las aplicaciones antes mencionadas, y en general, en las aplicaciones de conservación del medio ambiente, incluso desarrollando versiones básicas y avanzadas del dispositivo de adquisición de datos para diferentes necesidades,

Estos resultados se ven reflejados en la publicación “Propuesta para la creación de un nodo de sensórica remota de arquitectura abierta: CRTECMote ”, presentada en la conferencia internacional “Workshop on Sensor Networks and Applications WseNA08” (<http://www.d2ars.org/d2ars/wsena08>) organizada por el consorcio internacional D2ARS en Rio Grande del Sur, Brasil, en la cual, los desarrollos futuros de este dispositivo fueron analizados como una posible base para el desarrollo de hardware de los proyectos internacionales desarrollados por esta organización.

De esta manera, la recomendación de este trabajo es dar continuidad a este proyecto, para utilizar la base actual en la generación de sistemas cada vez más eficientes, y ajustados a las necesidades de las aplicaciones específicas.

7. Bibliografía

- [1] Libelium Comunicaciones Distribuidas y Universidad de Zaragoza. SquidBee [en línea]. 2007 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.libelium.com/squidbee/>.
- [2] I. F. Akyildiz y I. H. Kasimoglu. Wireless sensor and actor networks: research challenges. Ad Hoc Networks,
- [3] Arduino. Arduino open-source electronics prototyping platform [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.arduino.cc>.
- [4] S. Camtepe y B. Yener. Key distribution mechanisms for wireless sensor networks: a survey. www.cs.rpi.edu/research/pdf/05-07.pdf.
- [5] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation of Australia. Fleck Sensor Device [en línea]. 2006 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.sensornets.csiro.au/fleck1.htm>.
- [6] Creative Commons International. Creative Commons [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.
- [7] Crossbow. Crossbow Wireless Sensor Networks [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.xbow.com/Home/wHomePage.aspx>.
- [8] ETH Zurich. BTnote [en línea]. 2007 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.btnode.ethz.ch/Main/Overview>.
- [9] Instituto de Automática e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Valencia. PaRTiKle [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.e-rtl.org/partikle/>.
- [10] Intel Corporation. Intel Mote 2 Overview [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: http://www.intel.com/research/downloads/imote_overview.pdf.
- [11] E.N. Murillo. Diseño e implementación de una red de comunicación inalámbrica para la protección ambiental en el bosque [en línea]. 2005 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/181/1/Informe+Proyecto.pdf>.
- [12] W. S. Pérez. Diseño e implementación de un sensor para la detección de motosierras de la red inalámbrica de telecomunicaciones para la Protección Ambiental en el bosque [en línea]. 2005 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/191/1/Proyecto+final.pdf>.
- [13] J. Polastre, R. Szewczyk, y D. Culler. Telos: Enabling ultra-low power wireless research. Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks, 2005.
- [14] W. S. Pérez. Diseño e implementación de un sensor para la detección de motosierras de la red inalámbrica de telecomunicaciones para la Protección Ambiental en el bosque. [en línea]. 2005 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en:

<http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/2238/191/1/Proyecto+final.pdf>.

[15] Sun Microsystems. Proyecto Sun Spot [en línea]. 2008 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <https://www.sunspotworld.com/about/>.

[16] Tatiana Bokareva. Mini Hardware Survey [en línea]. 2006 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: http://www.cse.unsw.edu.au/~sensar/hardware/hardware_survey.html.

[17] Technology Review. 10 Emerging Technologies That Will Change the World [en línea]. 2003 [visitado el 15 de julio de 2008]. Disponible en: <http://www.technologyreview.com>

[18] John William Moore, Meteorology Practical And Applied, READ BOOKS, 2007
ISBN 1408627884, 9781408627884; 528 pp.

[19] M. C. Sturgeon, Wind Tunnel Tests of Some Low-Cost Sonic Anemometers.
[http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-ECO_2005/Posters/P3\(36\)_USA_8_Sturgeon.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-82-ECO_2005/Posters/P3(36)_USA_8_Sturgeon.pdf)

8. Apéndices

8.1 Manual del usuario de la estación de adquisición de datos

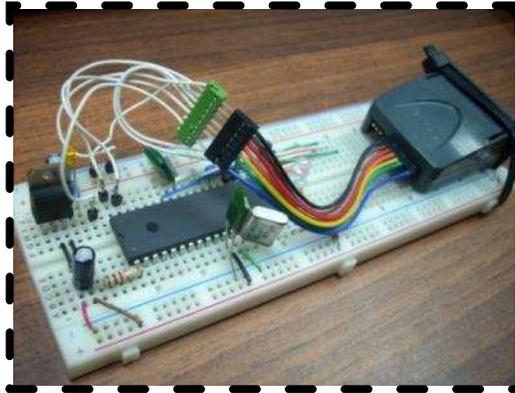
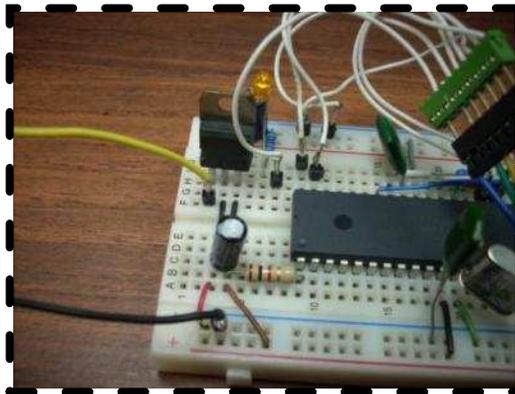


Figura Datalogger

Paso 1

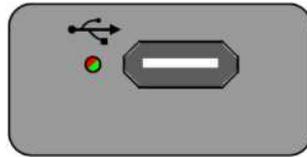
Conectar la alimentación del sistema de 7V-13V a la entrada del regulador (VIN)
LM7805



Conexión de la alimentación

Paso 2

Esperar el tiempo de sincronización entre el microcontrolador y el VDRIVE2 mientras esto ocurre el LED del VDRIVE2 va a cambiar de color verde y rojo



Front



Sincronización del VDRIVE2

Paso 3

Conectar la memoria Flash tipo USB, y esperar que el sistema la reconozca



Front

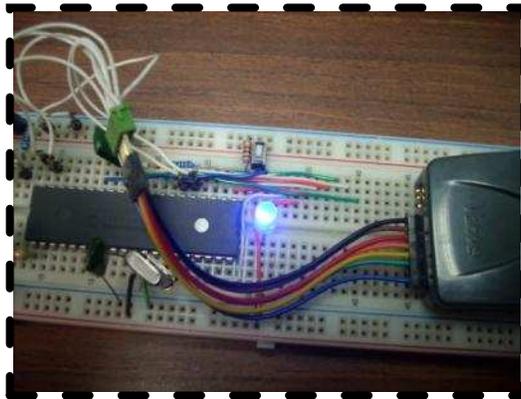
Conexión de la memoria Flash



Conexión de la memoria Flash 2

Paso 4

Pulsar el botón de arranque, en ese momento el LED de estado se va a encender y esperar el tiempo que desee almacenar los datos provenientes del sensor en la memoria Flash.



Adquisición de datos

Paso 5

Pulsar nuevamente el botón para parar la captura de los datos y expulsar la memoria flash, no se debe desconectar la memoria hasta tanto el LED de la memoria se apague

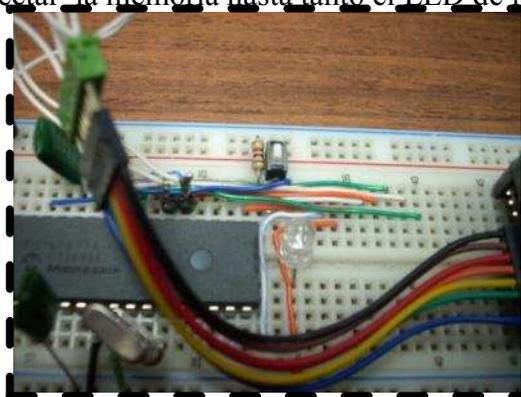


Figura Paro de captura de datos



Desconexión de la memoria Flash

Paso 6

Desconecte la memoria

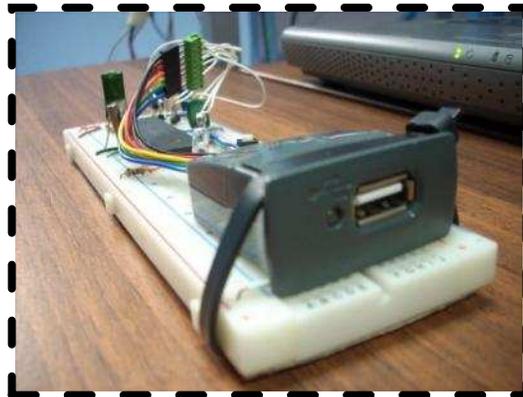


Figura Desconexión de memoria Flash 2

Instituto Tecnológico de Costa Rica

**Escuela de Ingeniería en Electrónica
Escuela de Química**

**Documento complementario al Informe Final
Desarrollo de un sistema de adquisición de datos de campo
para variables ambientales y de un sensor de viento, ambos de
bajo costo y de arquitectura abierta.**

**Dr. Jaime Quesada Kimsey
Ing. Nestor Hernández Hostaller
Ing. Adolfo Chaves Jiménez**

Cartago, 18 de mayo del 2009

1. Cumplimiento de objetivos.

Los objetivos planteados inicialmente en este proyecto son los siguientes:

Objetivo General:

Desarrollar un anemómetro piezoelectrónico y un sistema de adquisición de datos para sensores ambientales, que sean de bajo costo, de código y arquitectura abiertos, con autonomía de varias semanas, útiles para la adquisición de datos a usarse para vigilancia y para las investigaciones ambientales.

Específicos:

5. Reunir la información, el equipo y partes de base disponibles y tramitar la adquisición del equipo y partes que se tengan que comprar.
6. Diseñar el anemómetro piezoelectrónico y la primera versión de la estación de adquisición de datos ambientales, con base en el sistema de adquisición de datos de referencia (mica-mote), en las informaciones recabadas, y en las partes óptimas por su costo y disponibilidad.
7. Construir un anemómetro piezoelectrónico funcional y capaz de desempeñarse en el campo con una autonomía de 3 meses sin mantenimiento.
8. Construir una estación de adquisición de datos ambientales funcional capaz de desempeñarse en el campo, con al menos 10 MB de memoria para datos.
9. Poner a disposición la información necesaria para construir y utilizar estas nuevas tecnologías en un sitio en la red, convirtiéndolas en abiertas.

Para el análisis del cumplimiento de cada uno de los objetivos, se realizará un análisis punto a punto, empezando en los objetivos específicos para un análisis más justificado del cumplimiento del objetivo general.

Reunir la información, el equipo y partes de base disponibles y tramitar la adquisición del equipo y partes que se tengan que comprar.

En este sentido, en el Informe Final, presentado a la Vicerrectoría de Investigación del

ITCR detalla la clase y tipo de componentes que se utilizaron para la creación del sistema de adquisición de datos y el sensor de viento, en conjunto con un análisis de las características de los mismos para su justificación de compra.

Diseñar el anemómetro piezoelectrónico y la primera versión de la estación de adquisición de datos ambientales, con base en el sistema de adquisición de datos de referencia (mica-mote), en las informaciones recabadas, y en las partes óptimas por su costo y disponibilidad.

La primera estación ha sido diseñada, y se puede apreciar incluso un manual de utilización de la misma. Sin embargo, debido a problemas de adquisición en esta primera etapa (problemas con el proveedor que fueron comunicados hasta Octubre del 2008 a los miembros del equipo, no se pudo contar con el dispositivo "Mica-Mote" para realizar la comparación. En general, a pesar de este problema, se considera el avance como satisfactorio, ya que se está desarrollando una segunda etapa en un proyecto aprobado para el año 2009, en el cual se espera mejores resultados en su comparación con las plataformas comerciales.

Construir un anemómetro piezoelectrónico funcional y capaz de desempeñarse en el campo con una autonomía de 3 meses sin mantenimiento.

Este objetivo se reformuló a raíz del recorte de tiempo y presupuesto concedidos para el proyecto, a lo siguiente: "construir un prototipo de anemómetro piezoelectrónico capaz de medir viento en una dirección". El sensor basado en sensores piezoelectrónicos de base fue satisfactoriamente construido, y por lo tanto, fue probado que sensores piezoelectrónicos pueden ser utilizados para la medición de la velocidad del viento. Debido al tamaño de los datos generados, y a las características de la memoria del sistema de adquisición (1 GB o más, dependiendo de la memoria comprada) el sistema únicamente tiene como "cuello de botella" el rendimiento de la batería, que está probado en otros sistemas puede ser de más de tres meses, es decir, el sistema actualmente diseñado puede cumplir con este objetivo satisfactoriamente. Pruebas de campo no fueron posibles este año en un trascurso de tres meses, ya que debido a la naturaleza de la duración del proyecto (1 año, en lugar de los dos solicitados) esto no fue posible.

Construir una estación de adquisición de datos ambientales funcional capaz de desempeñarse en el campo, con al menos 10 MB de memoria para datos.

Esta expectativa fue sobrepasada, debido a la decisión de aprovechar la tecnología de las memorias USB, que debido a su avance, se encuentran a muy bajo costo en el mercado, permitiendo por ejemplo contar con una memoria de 1 GB en el momento de realización de este proyecto a un valor de menos de \$10.

Poner a disposición la información necesaria para construir y utilizar estas nuevas tecnologías en un sitio en la red, convirtiéndolas en abiertas.

Cuando el proyecto se aprobó por un año, se aceptó con la condición de que este objetivo no podría ser cumplido, ya que a pesar de que se cuenta con toda la información para la realización de este objetivo, el tiempo disponible era poco para poder realizar todas las pruebas de campo, y este no podía ser reducido, pues no hubiera permitido cumplir con los objetivos de diseño.

Cumplimiento del objetivo general

Desarrollar un anemómetro piezoeléctrico y un sistema de adquisición de datos para sensores ambientales, que sean de bajo costo, de código y arquitectura abiertos, con autonomía de varias semanas, útiles para la adquisición de datos a usarse para vigilancia y para las investigaciones ambientales.

En general, podemos manifestar que de manera satisfactoria se ha desarrollado un sensor que prueba que los sensores piezoeléctricos pueden ser utilizados para la medición del viento. Además, que el sistema de adquisición de datos tiene la memoria suficiente para usarse incluso 6 meses o más para la obtención de datos en el campo, debido a la utilización de memoria de alta capacidad comparadas con el tamaño de los datos. Así, esta primera propuesta se ha convertido en la base de varios sistemas a desarrollar en la institución actualmente en desarrollo para proyectos, principalmente los relacionados con la protección del medio ambiente.

2. Limitaciones y problemas encontrados

En la opinión de los investigadores a cargo de esta investigación, son dos los problemas principales para el desarrollo de proyectos de este tipo. El primero se refiere a la cantidad de tiempo en la cual se aprueban este tipo de proyectos en la institución (únicamente un año). En los proyectos en general de desarrollo de productos, un año no es suficiente para producir un resultado palpable, y por lo tanto, el desarrollo de la versión “alfa” tuvo que ser apresurado para cuestiones de “cumplimiento de objetivos” hacia la institución. Se considera que estos tiempos tienen que ser ampliados de acuerdo a los alcances y los tipos de proyectos en los que se está trabajando. Afortunadamente, para el sistema de adquisición de datos, una ampliación de este proyecto pudo ser aprobado, para la continuación y aprovechamiento de lo logrado hasta ahora, pero para que en proyectos futuros puedan entrar por ejemplo doctorandos, se necesitan plazos más largos de aprobación.

La segunda limitación es de corte estrictamente administrativa. La eficiencia con la que se adquieren los dispositivos con los que se espera contar, y el hecho de que sean los investigadores los que tengan que lidiar con toda la burocracia para adquirir equipo

especializado, produce retrasos innecesarios para la adquisición de componentes, que en el caso de este proyecto, provocaron que parte de un objetivo no fuera cumplido, ya que no se pudo adquirir un sistema de adquisición de datos de referencia, y esto nos fue comunicado cuando el proyecto estaba muy avanzado (Octubre 2008)

3. Observaciones y recomendaciones

A pesar de las limitaciones, se considera que este primer acercamiento a un sistema de alta capacidad y bajo costo ha producido experiencias muy valiosas, y propuestas generales para proyectos de más alta envergadura, que se ven reflejadas sobre todo en el artículo presentado a la conferencia WseNA08, del cual se recomienda su lectura a cualquier persona interesada en el desarrollo del tema.

Se recomienda decididamente dar continuidad a ambos componentes de este proyecto, que demostraron excelente viabilidad para los desarrollos que se habían propuesto inicialmente, los cuales apenas pudieron ser realizados parcialmente debido al corto tiempo otorgado.