

# **Sistema Vocalizador de Mediciones con Conectividad Inalámbrica para Aplicaciones Industriales**

**Sisti Martin, Osio Jorge R., Rapallini José A., Donato Pablo H..**

**Centro de técnicas Analógico y Digitales, CeTAD, Depto. de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería, UNLP. Calle 48 y 116 2º Piso, [msisti2@gmail.com](mailto:msisti2@gmail.com)**

**Palabras Clave:** Conectividad Inalámbrica, Sistemas Embebidos, Síntesis de Voz.

## **INTRODUCCIÓN**

Considerando que los procesos productivos son cada vez más complejos y se ven involucradas más y más variables a controlar. Aunque una buena parte de las tareas de control hoy en día han sido relegadas a los microprocesadores, aún se hace necesario que operarios realicen la supervisión y calibración de uno o más sistemas automáticos en campo. Estos operarios por lo general deben verificar una gran cantidad de variables y a la vez estar alerta para reaccionar a los cambios en dichas variables. A esto se le suma la escasa visibilidad en algunos sectores ya sea por vapor, mala iluminación, etc. Paradójicamente, esta situación aumenta el estrés de los mismos, haciendo más difícil que actúen consecuentemente con las mediciones registradas.

En este escenario, el simple acto de observar uno por uno los indicadores de todas las magnitudes representa un estorbo que consume la atención del operario y reduce su eficiencia. Esta circunstancia es la que nos impulsa al diseño de un sistema que por un lado sea capaz de adquirir mediciones de diversas magnitudes con prestaciones suficientes para hacerlo apto para el ambiente industrial (rango de medida, exactitud, reducidas dimensiones, etc.). Por el otro, debe ser capaz de vocalizar las medidas obtenidas de manera que puedan ser interpretadas por el usuario sin necesidad de fijar la vista en algún elemento indicador. Con lo cual, por ejemplo, pueden emitirse los valores de las variables menos críticas solo cuando superen ciertos valores prefijados, haciendo más cómoda la tarea del operario.

Como punto de partida se decidió diseñar un prototipo funcional que solo sense temperatura, luego se expandirán las posibilidades del dispositivo en base al resultado obtenido con el prototipo. El Sistema, en principio, mide temperatura puntual mediante una sonda para su posterior análisis. Luego debe leer la medida obtenida en un formato entendible para el operador, tanto la magnitud como la unidad de medida. Por lo tanto, el sistema necesariamente incluye un parlante y un circuito capaz de proporcionarle una señal de audio de suficiente potencia como para que la medida sea oída (y entendida) por el usuario.

La tarea de generar señales de voz ofrece una relativa complejidad, por lo que debe emplearse algún procesador de datos (microcontrolador en este caso) para gobernar el circuito de audio. A su vez, esto implica que la señal proveniente de la sonda deba ser digitalizada mediante un conversor A/D.

## **PARTE EXPERIMENTAL**

Para dirigir los subsistemas de sonido y sensor de temperatura se emplea un microcontrolador de 8 bits, el MC68HC908qy4[1]de Freescale en particular. Este modelo incluye un conversor A/D de 8 bits de resolución con el que se pueden adquirir las medidas

de temperatura provenientes del sensor (como sensor de temperatura empleamos el circuito integrado LM35[2]). El microcontrolador también posee un bloque de memoria flash, pero es muy pequeño para almacenar todas las palabras que debe leer el circuito de audio. Por este motivo, también debe emplearse algún tipo de memoria no volátil externa. Dada la limitada cantidad de patas disponibles del microcontrolador, la comunicación con dicha memoria debe realizarse en forma serial (SPI, I2C, UART, etc). También es conveniente que la memoria sea borrable eléctricamente (eeprom, flash, F-ram, etc).

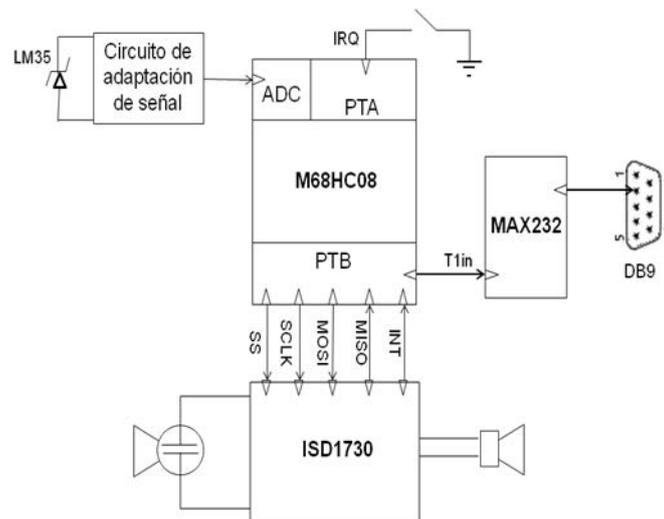


Figura 1. Diagrama en bloques del circuito de Sensado y Control.

La duración de todas las palabras juntas que deben almacenarse es de poco menos de 30 segundos. Esto ocupa cerca de 256KBytes en memoria no volátil si se emplea la codificación PCM típica de telefonía (8000 muestras/segundo con una resolución de 8 bits). Es difícil conseguir en el país chips de memoria no volátil de ese tamaño y que cumplan el resto de los requisitos (interfaz serial, alimentación de 5V, bloques de programación de 64 bytes o menores, etc.), lo cual obligaría a emplear varios chips, con el subsecuente incremento del costo y de la complejidad del circuito impreso. Podría emplearse otra codificación para consumir menos memoria, pero se complicaría mucho el programa a ejecutar e incluso puede que se requiera una velocidad de procesamiento mayor que la que puede ofrecer el microcontrolador elegido. Una solución más sencilla es emplear un circuito integrado grabador de voz, como la serie ISD1700 [3] o la APR6000 [4 y 5]. Si bien esta última serie de circuitos integrados puede grabar una longitud mucho mayor de sonido, elegimos la serie ISD1700 por poder controlar directamente a un parlante y recibir señales directamente de un micrófono, por su menor costo, mayor precisión en el direccionamiento de la memoria interna, entre otras razones.

El programa que ejecuta el microcontrolador consiste en esencia en un loop infinito en el que el sistema permanece dormido la mayor parte del tiempo hasta que el usuario presione un pulsador. Una vez producido este evento, el ADC realiza una conversión de la tensión de salida del sensor. El dato obtenido pasa por una rutina de acondicionamiento y luego es convertida a formato decimal, separando sus cifras (décimas, unidades, decenas, centenas y signo) para luego leer cada una en forma ordenada (en forma entendible para un humano, claro) después de buscar en una tabla la dirección de memoria dónde están almacenadas. Al terminar de leer la medida de temperatura, el microcontrolador vuelve al estado de reposo.

## - Sensado de Temperatura:

Según la hoja de datos correspondiente, el rango de temperaturas que soporta el sensor va de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . La salida del sensor es aproximadamente proporcional a la temperatura con una pendiente de alrededor de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , con lo cual el rango de tensiones de salida es de  $-0,55\text{V}$  a  $1,5\text{V}$ . Pero el ADC del microcontrolador solo reconoce señales comprendidas entre  $0\text{V}$  y su tensión de alimentación ( $5\text{V}$  en este caso). Para poder medir temperaturas bajo cero y para aprovechar al máximo la resolución del ADC, se debe adaptar la señal del sensor multiplicándola por una ganancia y elevándola un cierto desplazamiento. Esto se logra con un circuito similar al de la siguiente figura:

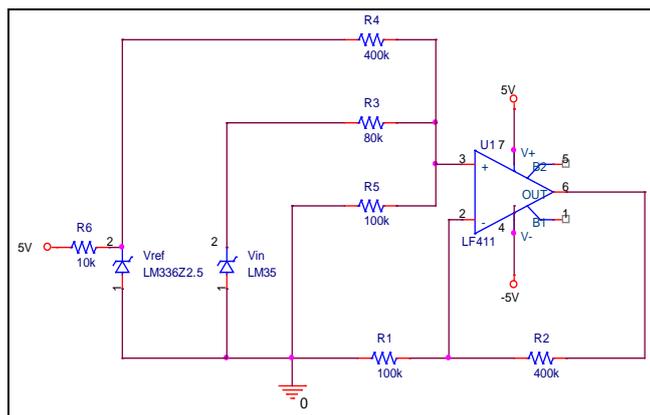


Figura 2. Circuito de adaptación del sensor

El circuito es básicamente un amplificador no inversor con la particularidad de que en la entrada se realiza la suma ponderada de dos señales [9 - 10], una de ellas es la que genera el sensor de temperatura. La otra es una tensión constante de  $2,5\text{V}$  generada por el diodo de referencia LM336Z2.5 [6], el cual se alimenta a través de la resistencia R6 (el valor es mayor que el sugerido por el fabricante para reducir el consumo de corriente sin perjudicar la polarización). La tensión de salida obedece la ecuación (1).

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(V_{in} \cdot \frac{R_5 // R_4}{R_5 // R_4 + R_3} + V_{ref} \cdot \frac{R_3 // R_5}{R_3 // R_5 + R_4}\right) \quad (1)$$

Los valores que se ven en la Figura 2 fueron calculados para que la ganancia aplicada a la señal del sensor sea 2,5. De esta manera el rango de temperaturas de entrada que es aproximadamente  $(150^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C})$  se convierte en  $200^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{mV}/^{\circ}\text{C} \cdot 2,5 = 5\text{V}$  a la salida, y la pendiente de la curva (se aproxima mediante una recta) tensión/temperatura global es  $25\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ . También se busca que el desplazamiento (tensión de salida cuando la señal del sensor es  $0\text{V}$ ) sea  $1,25\text{V}$ , que son equivalentes a  $50^{\circ}\text{C}$  según la ganancia antes calculada.

Se deduce entonces que los límites de la tensión de salida son  $0\text{V}$  cuando la temperatura es  $-50^{\circ}\text{C}$ , y  $5\text{V}$  cuando la temperatura es  $150^{\circ}\text{C}$ . Cae sobre el microcontrolador la tarea de restarle a esta tensión de salida el desplazamiento que se aplicó para poder medir temperaturas bajo cero.

## - Emisión de sonido

Obviamente, no se pueden grabar en la memoria no volátil todas las posibles medidas que pueden leerse porque la cantidad de memoria consumida sería enorme. En cambio, antes de leer cada medida, el microcontrolador debe ensamblarla partiendo de algún tipo de bloque fundamental (palabras, sílabas, fonemas, etc), los cuales son los únicos sonidos guardados en memoria. De manera general, mientras más cortos sean los bloques básicos,

se hará un uso más eficiente de la memoria y se podrán leer mensajes más variados, pero el sistema (el software en particular) se hace más complicado. Dado el limitado vocabulario necesario para leer una medida de temperatura, la solución óptima es que los sonidos guardados sean palabras o frases (de aquí en adelante hablaremos de palabras para referirnos a ambas).

Otra ventaja de leer las medidas palabra por palabra es que existen circuitos integrados pensados para este tipo de soluciones como la familia ISD1700. Estos circuitos integrados pueden controlar directamente un parlante de 8Ω y grabar señales de audio provenientes directamente de un micrófono electret, lo cual simplifica mucho el circuito de audio ya que no se necesitan amplificadores o preamplificadores, ni Conversores A/D ni D/A.

En total se emplean 38 palabras para leer una medida de temperatura comprendida en el rango que puede medir el sensor:

- Números entre 0 y 9.
- Decenas (“diez”, “veinte”, etc).
- Decenas terminadas en “i” (“dieci”, “veinti”, etc).
- Números del 11 al 15.
- “Cien” y “ciento”.
- Frases del final de la medida (“coma”, “grados centígrados” y “bajo cero”)

Si bien es una cantidad relativamente grande de palabras, la mayoría es muy corta, y en total ocupan alrededor de 25 segundos. Por lo tanto, el modelo que elegimos para este proyecto es el ISD1730, que posee suficiente memoria para almacenar 30 segundos de audio con una frecuencia de muestreo de 8Khz.

El microcontrolador se comunica con el ISD1730 mediante una interfaz SPI (se requieren 4 pines del microcontrolador), siendo este último el esclavo. Mediante interfaz SPI el microcontrolador le envía los comandos necesarios al circuito de audio para que cumpla dos funciones distintas:

#### - **Grabado de mensajes**

Antes de implementar el circuito definitivo, debió armarse un circuito para grabar las palabras en la memoria del ISD1730 (el circuito en cuestión es muy similar al que se encuentra en la página 76 de la referencia 3).

Además de los comandos más básicos (grabar, reproducir, borrar, etc.), la orden más importante que el microcontrolador le envía al ISD1730 es la de recuperar la dirección de inicio de la última palabra guardada. El microcontrolador almacena estas direcciones en una tabla que luego, cuando el usuario lo indique al presionar un pulsador, es enviada a una computadora por el puerto serie y así tener esas direcciones disponibles para elaborar el programa definitivo. Para tal fin, se incluye un circuito integrado MAX232.

#### - **Lectura de Mediciones**

En el circuito final, al ISD1730 solo se le debe enviar la instrucción de leer una palabra desde una posición de medida determinada (no es necesario el micrófono que se ve en la figura 1). Dicha dirección se obtiene de la tabla de direcciones iniciales, la cual se recuperó del circuito de sonido en el paso anterior.

## - Programación

Como se indicó en el punto anterior, se utilizan dos programas: uno para la lectura de medidas de temperatura (el que se usa con en el circuito definitivo), y otro para grabar las palabras en el circuito grabador de sonido y recuperar las direcciones dónde se almacenan las mismas.

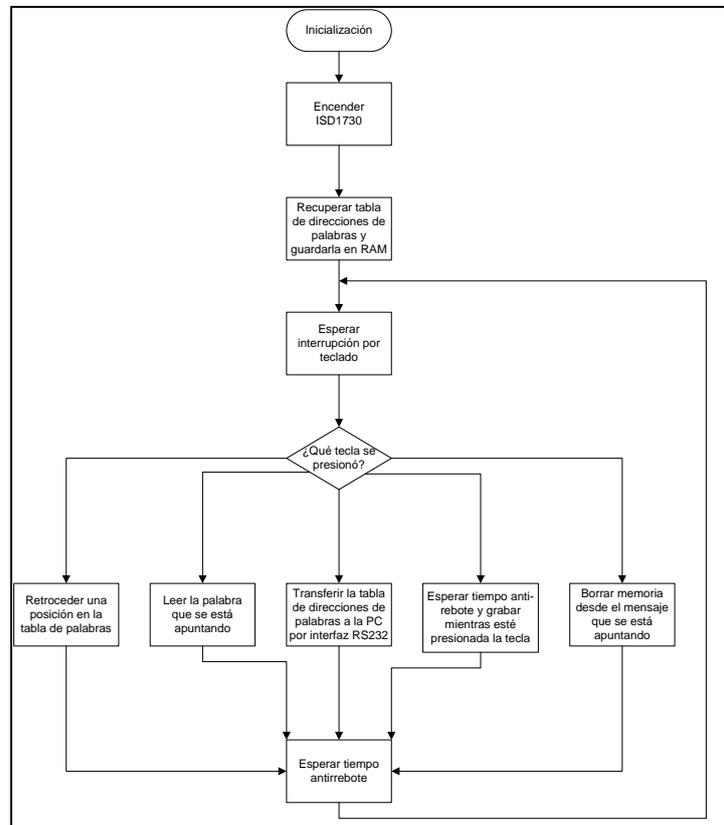


Figura 3. Diagrama de flujo del programa grabador de palabras

Como se observa en el diagrama de la Figura 3, después de la inicialización típica (escritura de registros de configuración, clasificación de puertos como entrada o salida, etc) lo primero que se hace es encender el ISD1730, para lo cual se envía la instrucción “power up” por interfaz SPI y luego se espera un cierto tiempo de encendido. Luego, se interroga al ISD1730 la dirección del primer mensaje grabado, se avanza una posición y se obtiene la dirección del segundo mensaje. Este ciclo se repite hasta que no se encuentren mensajes de manera de obtener la tabla de direcciones de mensajes del ISD1730 y almacenarla en la memoria ram del microcontrolador [11]. Finalmente, se ejecuta un bucle infinito en el que se espera que se presione una tecla y se ejecuta la subrutina correspondiente. Dichas subrutinas consisten básicamente en enviar al ISD1700 las instrucciones necesarias para realizar las operaciones típicas de un grabador y comprobar errores; con la excepción de la subrutina para transferir la tabla de direcciones. En este último caso se envían bit a bit las direcciones de inicio de cada palabra a través de un pin del microcontrolador en formato RS232.

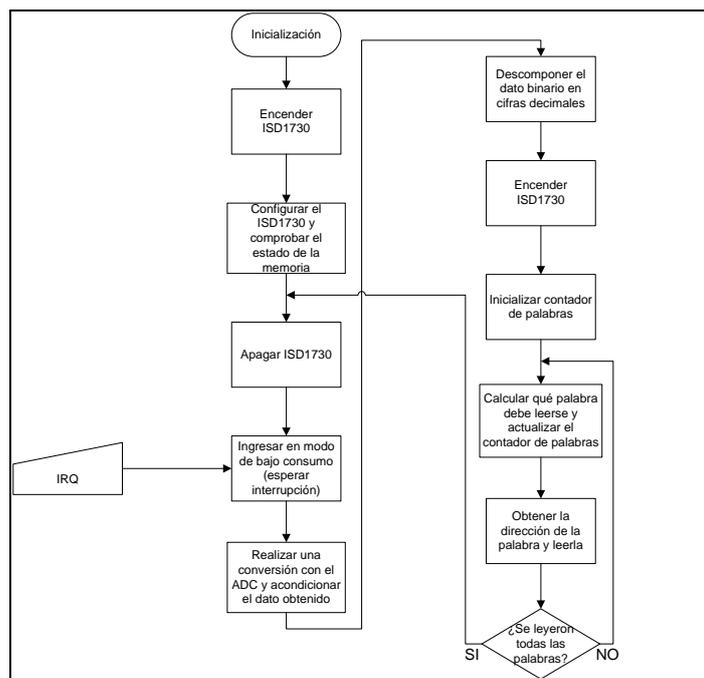


Figura 4. Diagrama de flujo del programa lector de medidas

En la Figura 4 se Muestra el Diagrama del Programa para leer mediciones. Se observa que el inicio es bastante similar al del programa anterior. En este caso no es necesario recuperar las direcciones de las palabras porque éstas se introducen en el programa.

Como el circuito definitivo está pensado para ser energizado por baterías, se toman medidas para reducir el consumo de potencia cuando no se está empleando el dispositivo. Tales medidas consisten en enviar la instrucción de apagado al ISD1730 e ingresar el microcontrolador en modo de bajo consumo mediante la instrucción STOP (o WAIT si el tiempo de recuperación requerido por la instrucción STOP es un problema) mientras se espera una interrupción externa [11]. Se sale de dicho estado de bajo consumo al recibir la interrupción externa (cuando se presiona un pulsador, por ejemplo) y la primera instrucción que debe enviarse al circuito de sonido es la de encendido, para que pueda recibir las subsiguientes.

Luego se realiza una conversión con el ADC. Al dato obtenido se le resta el desplazamiento y se lo divide por la ganancia del circuito sensor de temperatura que introduce dicho circuito. El valor resultante es la temperatura medida en grados, pero está almacenada en formato binario, se debe descomponer en signo y cifras decimales (centenas, decenas, unidades y décimas) para poder decidir qué palabras deben leerse con mayor facilidad.

Solo resta deducir qué palabras deben leerse en base a las cifras antes obtenidas, obtener las direcciones de dichas palabras y enviarle al ISD1730 las instrucciones necesarias para que las reproduzca una tras otra. Luego de leer todas las palabras, se vuelve al estado de bajo consumo para esperar una interrupción externa [11].

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la hoja de datos del LM35 el máximo error que puede haber presente a la salida del sensor es  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ . Pero el error por alinealidad máximo es de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Esto quiere decir que si se miden con precisión la pendiente y la ordenada de origen de la curva (se aproxima a una recta) tensión/temperatura del sensor, se obtiene un error máximo de  $0,5^{\circ}\text{C}$  (el resto de los errores, como el de autocalentamiento, son despreciables). Para cumplir con la hipótesis

anterior, basta medir la tensión de salida del sensor para dos temperaturas conocidas (por ejemplo el punto de fusión y ebullición del agua).

El amplificador operacional empleado (LF411 [7]) posee una tensión de offset a la entrada de tan solo 0,5mV. El resto de sus fuentes de error también es despreciable teniendo en cuenta la exactitud del sensor.

Se deduce entonces que el principal limitante de la precisión y el rango de medidas del termómetro es el conversor A/D del microcontrolador. Como discrimina solo entre 256 niveles de tensión a la entrada y el rango de medidas es de 256°C, la máxima resolución del termómetro es de un grado (aún si se adapta perfectamente la señal del sensor), a menos que se reduzca el rango de medidas a la mitad. En este último caso la resolución también se reduciría a la mitad, y se aprovecharía la exactitud de 0,5°C del sensor.

En su respectiva hoja de datos [1] se indica que la máxima corriente que consume el microcontrolador en modo STOP con una alimentación de 5V es de 1µA, lo cual implica una potencia de 5µW. En cuanto al ISD1730, según su hoja de datos [3] consume como máximo 10µA, o sea unos 50µW si la tensión de alimentación es de 5V. Se midió experimentalmente la potencia de consumo del circuito sensor de temperatura (a temperatura ambiente), dando como resultado unos 32mW.

Después de unas pruebas de campo se comprobó que si el prototipo opera en lugares con muchos artefactos eléctricos que generen perturbaciones electromagnéticas, se introduce un error importante en las mediciones. Este problema se solucionó fácilmente modificando el programa para leer mediciones de manera que al inicio realice 100 conversiones con el ADC y luego obtenga el promedio de las mismas. Además, se incluyó un simple filtro pasa-bajos a la entrada de la red de adaptación.

Actualmente se han solucionado estos problemas empleando un sensor digital, el DS18S20 [8], en lugar del sensor analógico y su respectiva red de adaptación. Este sensor tiene una exactitud de 0,5 °C en la mayor parte de su rango de medida (-10°C a 85°C) y en estado de reposo consume una corriente máxima de 1µA (5µW de potencia para una tensión de alimentación de 5V). También posee un identificador de 64 bits en memoria ROM, lo cual le da la enorme ventaja de permitirle al microcontrolador dirigir a una gran cantidad de sensores conectados a un solo pin. También cabe destacar que la única "red" de adaptación que necesita es una resistencia de pull-up y que es inmune a las interferencias electromagnéticas. Todo esto a expensas de ser más costoso y tener un rango de medida menor (-55°C a 125°C).

En cuanto a la conectividad Inalámbrica, se ha implementado el envío de datos mediante 2 módulos ZigBee con interfaz serial hacia nuestro sistema. Aunque el módulo inalámbrico aun no se ha incluido dentro del diseño de Hardware del Sistema, se han realizado las pruebas con módulos independientes.

## **CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

En este trajo se logró obtener un prototipo funcional de un sistema que permite el sentido de variables a muy bajo costo utilizando un dispositivo Microcontrolador de baja gama y componentes de muy bajo costo. Además, se logró implementar el protocolo ZigBee, mediante módulos de freescale, el cual permite el envío de datos a gran distancia de forma inalámbrica a baja potencia de transmisión.

El principal limitante de la resolución del termómetro es el ADC del microcontrolador. Con un Conversor de 12 bits Podría alcanzarse una precisión de 0,1°C. Para que dicha resolución tenga sentido, debería cambiarse el sensor de temperatura por otro de mayor exactitud, por ejemplo un termistor o una resistencia de platino y una fuente de corriente. Actualmente el

termómetro lee décimas de grado pero solo como medida preventiva para cuando se aumente la exactitud global del sistema.

Por otro lado, con pocas modificaciones podría ampliarse el circuito para que mida y lea otras magnitudes, como presión, humedad, etc. Si se emplea una gran cantidad de sensores, sería conveniente que los mismos sean digitales y se controlen por una interfaz serial que permita conectar muchos dispositivos a un mismo pin del microcontrolador, como I2C o 1-wire. En este caso es probable que deba reemplazarse el circuito integrado grabador de sonido por uno de mayor capacidad. Por ejemplo, por solo 3U\$ extra puede reemplazarse el circuito integrado ISD1730 por el ISD1790 que tiene el triple de capacidad de grabación de audio.

Sería conveniente reemplazar la interface de transmisión de datos RS232 por un estándar más utilizado en la industria, como RS485. De cualquier manera se ha implementado una interfaz inalámbrica de bajo consumo de potencia (protocolo Zigbee), cuya característica principal es su baja relación señal ruido, lo que la hace ideal para ambientes industriales y permite la transmisión de datos utilizando menor potencia que otros sistemas inalámbricos. También puede extenderse el software para que almacene medidas e incluso les aplique un procesamiento, como hallar el promedio, máximo y mínimo, etc.

Como se expresó en el inciso anterior, cuando el sistema no está leyendo una medida, el circuito que consume mayor potencia es el relacionado con el sensor de temperatura. Podría reducirse enormemente el consumo de potencia si se incluyese algún elemento de corte, (switch digital, SCR, transistor, etc), dirigido por el microcontrolador, que interrumpa el flujo de corriente a esta sección durante el ciclo de espera de interrupciones.

## **Bibliografía:**

- [1] MC68HC908QY4 datasheet.
- [2] LM35 datasheet.
- [3] ISD1700 series designer guide.
- [4] APR6008 datasheet.
- [5] APR6016 datasheet.
- [6] LM136-2.5, LM236-2.5, LM336-2.5V datasheet.
- [7] LF411 datasheet.
- [8] DS18S20 datasheet.
- [9] H. Taub: "Circuitos Digitales y Microprocesadores", Mc Graw-Hill, 1989.
- [10] James W. Bignell y Robert L. Donovan, "Electrónica Digital" . México: Editorial Continental, 2005.
- [11] Reference Manual: CPU Central Processor Unit Microprocesador, CPU08RM, Rev. 4, 02/2006