

SISTEMA PORTÁTIL DE MEDICIÓN NO INVASIVA DE GLUCOSA SANGUÍNEA POR MEDIOS ESPECTROFOTOMÉTRICOS BASADO EN PDA Y PRINCIPIOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Parte III: Sistema de Medición

Israel Rivera Zárte

Profesor CIDETEC-IPN

Instituto Politécnico Nacional

1. Sistema circulatorio

El aparato circulatorio sirve para llevar los alimentos y el oxígeno a las células, para recoger los desechos metabólicos que se han de eliminar después por los riñones, en la orina y por el aire exhalado en los pulmones, rico en dióxido de carbono (CO_2). De toda esta labor se encarga la sangre, que está circulando constantemente. Además, el aparato circulatorio tiene otras destacadas funciones: interviene en las defensas del organismo y regula la temperatura corporal entre otras.

El corazón es el órgano principal del aparato circulatorio. Es un músculo hueco que se contrae rítmicamente y funciona como una bomba doble para impulsar la sangre a través del sistema circulatorio. El corazón está formado por tres tejidos que, del interior al exterior se denominan endocardio, miocardio y pericardio. El endocardio está formado por un tejido epitelial de revestimiento que se continúa con el endotelio del interior de los vasos sanguíneos. El miocardio es la capa más voluminosa, estando constituido por tejido muscular de un tipo especial llamado tejido muscular cardíaco. El pericardio envuelve al corazón completamente.

El corazón está dividido en dos mitades que no se comunican entre sí: una derecha y otra izquierda. La mitad derecha siempre contiene sangre pobre en oxígeno, procedente de las venas cava superior e inferior, mientras que la mitad izquierda siempre posee sangre rica en oxígeno y que, procedente de las venas pulmonares, será distribuida para oxigenar los tejidos del organismo a partir de las ramificaciones de la gran arteria aorta. En algunas cardiopatías congénitas persiste una comunicación entre las dos mitades del corazón, con la consiguiente mezcla de sangre rica y pobre en oxígeno, al no cerrarse completamente el tabique interventricular durante el desarrollo fetal.

Cada mitad del corazón presenta una cavidad superior, la aurícula, y otra inferior o ventrículo, de paredes musculares muy desarrolladas. Existen dos aurículas: derecha e izquierda, y dos ventrículos: derecho e izquierdo. Entre la aurícula y el ventrículo de la misma mitad cardíaca existen unas válvulas llamadas válvulas auriculoventriculares (tricúspide y mitral, en la mitad derecha e izquierda respectivamente) que se abren y cierran continuamente, permitiendo o impidiendo el flujo sanguíneo desde el ventrículo a su correspondiente aurícula. Cuando las gruesas paredes musculares de un ventrículo se contraen (sístole ventricular), la válvula auriculoventricular correspondiente se cierra, impidiendo el paso de sangre hacia la aurícula, con lo que la sangre fluye con fuerza hacia las arterias. Cuando un ventrículo se relaja, al mismo tiempo la aurícula se contrae, fluyendo la sangre por esta sístole auricular y por la abertura de la válvula auriculoventricular.

Como una bomba, el corazón impulsa la sangre por todo el organismo, realizando su trabajo en fases sucesivas. Primero se llenan las cámaras superiores o aurículas, luego se contraen, se abren las válvulas y la sangre entra en las cavidades inferiores o ventrículos. Cuando están llenos, los ventrículos se contraen e impulsan la sangre hacia las arterias. El corazón late unas setenta veces por minuto y bombea todos los días unos 10,000 litros de sangre.

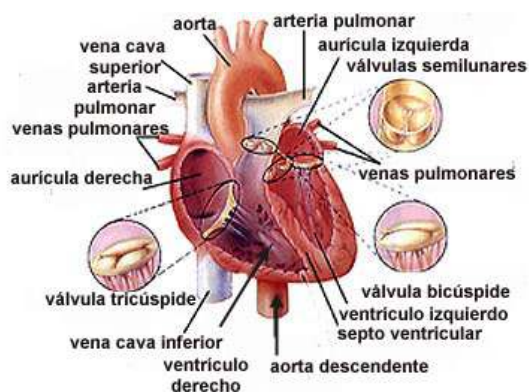


Figura 1 Principales conductos del corazón.

1.1 Funcionamiento del corazón

El corazón tiene dos movimientos: uno de contracción llamado sístole y otro de dilatación llamado diástole. Pero la sístole y la diástole no se realizan a la vez en todo el corazón; se distinguen tres tiempos:

Sístole Auricular: se contraen las aurículas y la sangre pasa a los ventrículos que estaban vacíos.

Sístole Ventricular: los ventrículos se contraen y la sangre que no puede volver a las aurículas por haberse cerrado las válvulas bicúspide y tricúspide, sale por las arterias pulmonares y aorta. Estas también tienen al principio sus válvulas llamadas válvulas sigmoideas, que evitan el reflujo de la sangre.

Diástole general: las aurículas y los ventrículos se dilatan y la sangre entra de nuevo a las aurículas. Los golpes que se producen en la contracción de los ventrículos originan los latidos, que en el hombre oscilan entre 70 y 80 latidos por minuto.

Los vasos sanguíneos (arterias, capilares y venas) son conductos musculares elásticos que distribuyen y recogen la sangre de todos los rincones del cuerpo. Se denominan arterias a aquellos vasos sanguíneos que llevan la sangre, ya sea rica o pobre en oxígeno, desde el corazón hasta los órganos corporales. Las grandes arterias que salen desde los ventrículos del corazón van ramificándose y haciéndose más finas hasta que por fin se convierten en capilares, vasos tan finos que a través de ellos se realiza el intercambio gaseoso y de sustancias entre la sangre y los tejidos. Una vez que se lleva a cabo este intercambio sangre-tejidos a través de la red capilar, los capilares van reuniéndose en vénulas y venas por donde la sangre regresa a las aurículas del corazón.

1.2 Arterias

Son vasos gruesos y elásticos que nacen en los ventrículos, aportan sangre a los órganos del cuerpo; por ellas circula la sangre a presión, debido a la elasticidad de las paredes. Del corazón salen dos arterias:

La **Arteria Pulmonar** sale del Ventrículo derecho y lleva la sangre a los pulmones. La **Arteria Aorta** sale del Ventrículo izquierdo y se ramifica; de esta última arteria salen otras principales entre las que se encuentran: las carótidas (aportan sangre oxigenada a la cabeza), subclavias (aportan sangre oxigenada a los brazos), hepática (aporta sangre oxigenada al hígado), esplénica (aporta sangre oxigenada al bazo), mesentéricas (aportan sangre oxigenada al intestino), renales (aportan sangre oxigenada a los riñones) e ilíacas (aportan sangre oxigenada a las piernas).

Los Capilares son vasos sumamente delgados en que se dividen las arterias y que penetran por todos los órganos del cuerpo; al unirse de nuevo forman las venas.

1.3 Venas

Son vasos de paredes delgadas y poco elásticas que recogen la sangre y la devuelven al corazón; desembocan en las Aurículas. En la Aurícula derecha desembocan: la Cava superior formada por las yugulares que vienen de la cabeza y las subclavias que proceden de los miembros superiores. La Cava inferior a la que van las Ilíacas que vienen de las piernas, las renales de los riñones, la suprahepática del hígado y la Coronaria

que rodea el corazón. En la Aurícula izquierda desembocan las cuatro venas pulmonares que traen sangre desde los pulmones y que curiosamente es sangre arterial.

2. Obtención de señal analógica del sensor

Para comenzar a desarrollar este trabajo, se seleccionó el sensor a usarse, tal que no fuese invasivo para el paciente y además de que el precio fuese accesible. Es por ello que se seleccionó un sensor que contara con los dos emisores rojo e infrarrojo, además del receptor acoplado en forma correcta. Otro aspecto importante es que el sensor es desechable después de algunos días de uso. La figura siguiente muestra de manera más detallada este sensor.

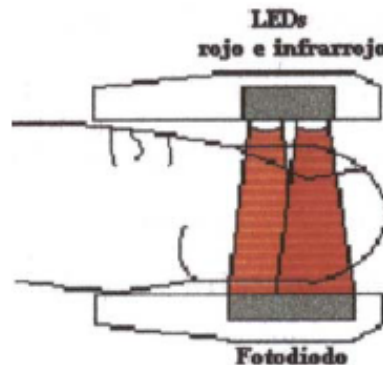


Figura 2 Sensor óptico utilizado en el sistema.

Para la operación del sensor se realizó un barrido de pulsos a una frecuencia relativamente alta con respecto a la frecuencia cardíaca, ya que de esta manera al realizar este barrido, se pueden tener las tres señales del R, IR y LA en cualquier instante de la lectura después del switch. Ya que los emisores se encuentran en anti-paralelo, se tienen que polarizar cada uno de ellos en instantes diferentes y un pulso en el que no se polarice ninguno de ellos. La señal que entrega el receptor se encuentra en el orden de los mV, además de entregar una señal invertida por la polarización inversa del diodo, como se muestra en la figura siguiente, donde además se muestran más a detalle cada una de las conexiones del sensor con las terminales del micro que son las encargadas de activar a los emisores.

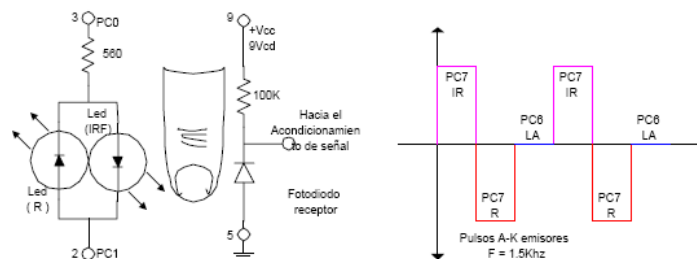


Figura 5 Conexión del sensor con el micro y el cto. de acondicionamiento de señal, además de los pulsos ánodo-cátodo en los emisores.

Figura 3 Esquema eléctrico del sistema de pulso.

3. Tratamiento de señal

Una vez que se logró el correcto funcionamiento de esta parte del sistema, se comenzó a trabajar en la primer parte del acondicionamiento de señal. Como la señal se encuentra en el orden de los mV, primero

se pre-amplificó 16 veces por medio de un amplificador no inversor y se implementó un filtro pasa-banda de tercer orden activo por medio del amplificador y de un filtro pasa-bajas y otro pasa-altas de segundo orden activos también.

Cabe hacer notar que para la implementación del filtro pasa-bajas en el amplificador no inversor, así como en los sumadores y amplificadores no inversores, la resistencia que se toma en cuenta para el cálculo de la frecuencia de corte es la de retroalimentación. Para los filtros de segundo orden se realizaron los siguientes cálculos para cada uno de ellos.

$$\omega_c = 2 * \pi * 0.1 = 0.628 \text{ rad}$$

$$R_1 = \frac{1.414}{\omega_c} \dots (10) \quad R_2 = \frac{0.707}{\omega_c} \dots (11) \quad \text{Se propone } C = 1 \mu F$$

$$R_1 = \frac{1.414}{0.628} = 2.2504 \Omega \quad R_2 = \frac{0.707}{0.628} = 1.1252 \Omega$$

Escalando en magnitud: $R_1 = 220k\Omega$ y $R_2 = 120k\Omega$, $C_1 = C_2 = 10 \mu F$

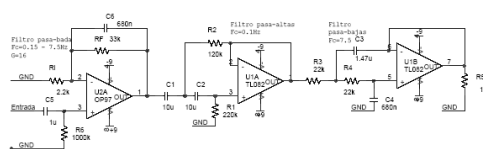


Figura 6 Circuito de pre-amplificación $G = 16$ y el filtro pasa-banda con frecuencias de corte de 0.1-7.5Hz.

Figura 4 Circuito de acondicionamiento de la señal.

La simulación de este circuito (figura 5) muestra un barrido en frecuencia, donde se puede apreciar claramente la ganancia que presenta con respecto a la entrada y la banda de paso del filtrado.

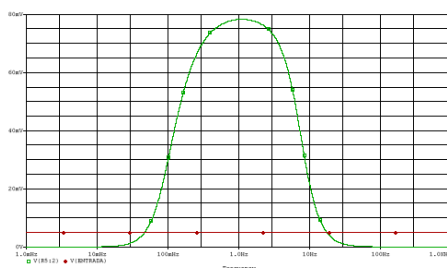


Figura 7 Respuesta en frecuencia y magnitud de la etapa de preamplificación y filtrado antes del switch.

Figura 5 Simulación del circuito de acondicionamiento.

Una vez que se obtuvo una señal libre de ruido no deseado se volvió a amplificar e invertir la señal por medio de un amplificador inversor, con una ganancia de 40 y un filtro pasa-bajas con frecuencia de corte de 7.5 Hz.

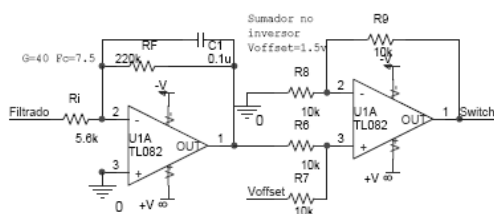


Figura 8 Amplificador inversor con $G = 40$ y filtro pasa-bajas $F_c = 7.5 \text{ Hz}$. y un offset de 1.5v para enviarlo al multiplexor analógico.

Figura 6 Amplificador inversor con filtro pasa-bajas (ganancia 40, $f_c = 7.5 \text{ Hz}$).

4. Interfaz con el PDA

A continuación se muestra un diagrama a bloques de la interfaz de comunicación RS-232 entre el micro-controlador y la PDA.

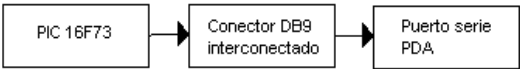


Figura 7 Diagrama a bloques de la interfaz de comunicación.

Para realizar el protocolo de comunicación RS-232 se necesitó recordar las señales que participan en la transferencia entre dos dispositivos de comunicación serial. Esta comunicación está coordinada por dos salidas de HandShake, DTR' (terminal de datos lista) y RTS' (petición para enviar), y dos entradas de apretón de manos, DSR' (conjunto de datos listo) y CTS' (limpiar para enviar).

Tanto la PDA como el microcontrolador cuentan con estas líneas. La comunicación inicia de la siguiente forma: la PDA manda a bajo sus DTR' y RTS', indicándole al microcontrolador que la PDA está lista y que solicita permiso para enviar datos. Las líneas DTR' y RTS' de la PDA están conectadas a las líneas DSR' y CTS' del microcontrolador respectivamente.

Cuando están encendidas y listas para enviar datos, el microcontrolador pone sus líneas DTR' y RTS' en bajo; éstas se conectan a las líneas DSR' y CTS' de la PC. Debido a las características propias del proyecto, este HandShake no se llevó a cabo; para sustituirlo se recurrió a engañar al puerto serie de la PDA, a través de una tarjeta que cruza las terminales DTR' y DSR' del conector DB9 del craddle de la PDA y RTS' con CTS'. La tabla 1 muestra las señales más comúnmente usadas en este protocolo.

Cuadro 1 Señalización de la interfaz RS-232.

Señal RS-232	Abreviación	Dirección
Tierra	—	—
Transmisión de datos	TxD	Salida
Recepción de datos	RxD	Entrada
Petición para enviar	RTS	Salida
Limpiar para enviar	CTS	Entrada
Terminal de datos lista	DTR	Salida
Conjunto de datos listo	DSR	Entrada
Detección de portadora de datos	DCD	—
Indicador de llamada	RI	—
Tierra de chasis	—	—

5. Características del protocolo de comunicación RS-232

El protocolo de comunicación RS-232 es un estándar de la *Electronic Industries Association* (EIA) que especifica las características eléctricas, requerimientos de conector y funciones de señal para una interfase serial. En lugar de los niveles TTL, los niveles lógicos en una línea RS-232 son de -3 a -15 volts para un 1 lógico, y de $+3$ a $+15$ volts para un 0 lógico; ± 12 volts se usan en un sistema PC.

Esto da una excursión de voltaje mayor, así como un cruce por cero, y es un esquema de señalización más inmune al ruido que el TTL. Las señales se envían sobre un cable que puede ser de cualquier longitud, tal que la capacitancia total del cable sea menor de 2500 pF. La velocidad de datos serie se permite para ser tan alta como 20 Kbits por segundo; en la práctica a menudo se usan velocidades mucho más altas (hasta 115 200 bps) con buen éxito, siempre que la longitud del cable se mantenga corta (1 ó 2 metros).

La línea que transmite los datos en serie está inicialmente en estado alto; al comenzar la transferencia se envía un bit a 0, o bit de inicio. Tras él irán los 8 bits de datos a transmitir (en ocasiones son 7, 6 ó 5): estos bits están espaciados con un intervalo temporal fijo y preciso, ligado a la velocidad de transmisión que se

está empleando.

Tras ellos podría venir o no un bit de paridad que indica si se ha enviado un número par o impar de unos en la palabra. Al final aparecerá un bit (a veces un bit y medio ó dos bits) a 1, que son los bits de parada o bits de stop. La presencia de bits de inicio y parada permite sincronizar la estación emisora con la receptora. A la hora de transmitir los bytes de datos unos tras otros, existe flexibilidad en los tiempos, de ahí que este tipo de comunicaciones se consideren asíncronas.

6. Pruebas y Resultados

6.1 Pruebas

Las pruebas realizadas en el laboratorio con el sistema de adquisición de la señal se realizaron por partes para tener la posibilidad de detectar errores en cada una de las etapas si es que estos existieran. Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

Prueba 1.

- Se probó la etapa de amplificación introduciendo señales diferenciales en el rango de 1 a 2 mV al amplificador de instrumentación TL086, obteniendo resultados positivos.
- Como siguiente paso se probó el amplificador de instrumentación con una señal de 1 mV obtenida de un simulador de paciente, obteniendo resultados positivos.

Prueba 2. La señal de salida de la etapa de acondicionamiento se mandó al microcontrolador para iniciar la conversión Analógica-Digital, notando que ésta presentaba problemas ya que encontraba componentes negativos dentro de la señal de electrocardiografía amplificada. Para resolver este problema se adicionó una etapa de acondicionamiento extra: un sumador que suma un offset a la señal acondicionada para obtener solamente valores positivos de la misma.

Prueba 3. Se probó la etapa de adquisición de la IPAQ introduciendo señales senoidales, cuadradas y triangulares con amplitud de 0.1 a 5 volts, con un rango de frecuencia menor a 100 Hz. Al programar el PIC a una frecuencia de conversión de 20 ms se sabe que este no realizaría adecuadamente la conversión de señales fuera de este rango. Los resultados obtenidos de esta prueba fueron positivos; a estas señales se les sumó un offset con el mismo generador.

Se eligió la frecuencia de conversión de 20 ms ya que ésta permite convertir señales con frecuencia hasta de 100 Hz sin mayor problema; basta recordar que la señal de una persona adulta normal se encuentra en el rango de 50 a 80 latidos por minuto.

Prueba 4. Para la realización del protocolo de comunicación RS-232 entre la IPAQ y el microcontrolador fue necesario crear una tarjeta que engañara al puerto serie de la IPAQ, conectando las señales DTR', DSR', RTS', CTS' entre ellas de la siguiente forma: la señal DTR' del puerto de la PDA se conectó con la señal DSR' del mismo puerto; la señal RTS' del puerto de la PDA se conectó con la señal CTS', con el fin de simular un Hand Shake entre la PDA y el microcontrolador.

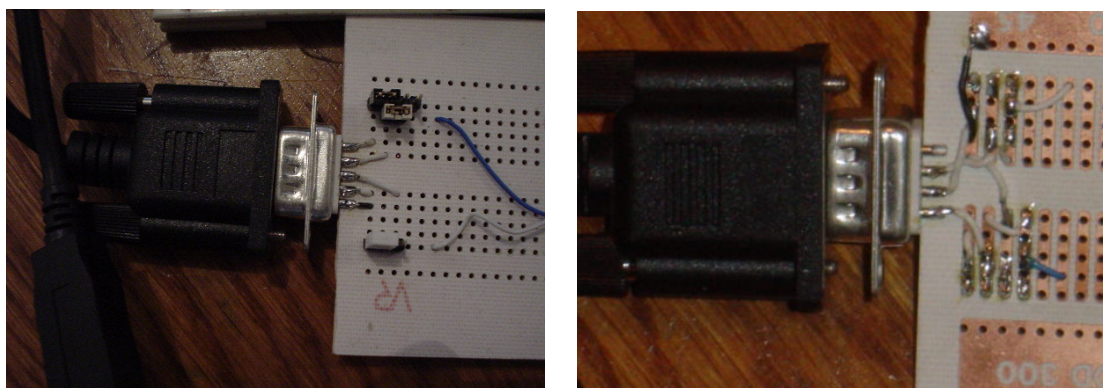


Figura 8 Vista superior e inferior del Conector DB9.

Dada la forma de programación del PIC para que éste iniciara la conversión Analógica-Digital, ninguna de las señales antes descritas fue necesaria, por lo que el único pin o canal que se conecta entre el microcontrolador y la PDA es S0, que se conecta con Tx del puerto serie de la PDA, encargado de la recepción de datos.

Se logró el desarrollo de la aplicación propuesta de adquisición y despliegue de la señal en la pantalla de la IPAQ.

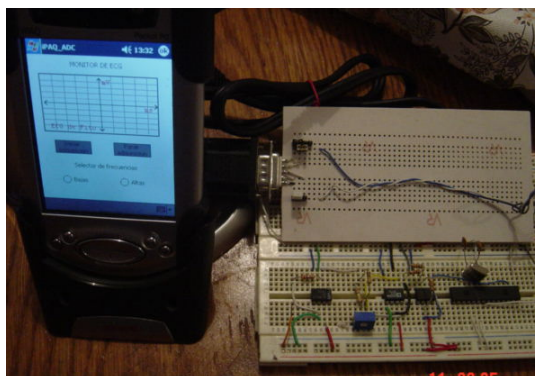


Figura 9 Pantalla de la IPAQ.

En cuanto a la aplicación misma, podemos concluir que ésta cumple con los objetivos propuestos por el proyecto de una manera parcialmente sobresaliente, debido a las propias limitaciones del software de control.

6.2 Resultados

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto son los siguientes:

1. Se logró el acondicionamiento adecuado para una señal de prueba con amplitud de 1 mV, amplificándola hasta amplitudes entre 1 y 5 Volts utilizando el amplificador de instrumentación TL086.

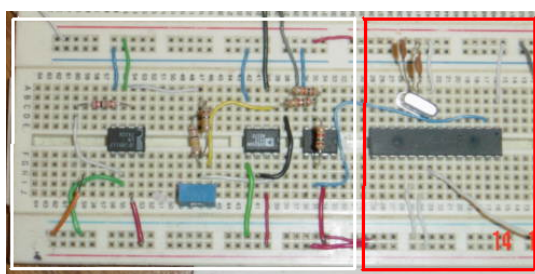


Figura 10 Circuito de acondicionamiento de la señal (etapa final).

La sección marcada con un recuadro blanco se trata de la etapa de acondicionamiento compuesta en su primera parte por el TL086, encargado de amplificar la señal hasta voltajes entre 1 y 5 Volts. La segunda parte de esta sección se trata de un amplificador en configuración sumador que suma un offset de 1 volt a la señal de salida proporcionada por el amplificador de instrumentación TL086, con el fin de que ésta pueda ser convertida sin ningún problema por el PIC.

2. Programación del PIC 16F73 de manera óptima a través de un lenguaje de programación de alto nivel como Pic Basic Compiler, logrando con esto satisfacer los objetivos propuestos para este proyecto, los cuales son: conversión Analógica-Digital de la señal biológica a una frecuencia de 20 ms y realización de protocolo de comunicación entre la PDA y microcontrolador para la adquisición por el puerto serie de la IPAQ.

Se eligió la frecuencia de conversión de 20 ms ya que ésta permite convertir señales con frecuencia hasta de 100 Hz sin mayor problema.

3. Para la realización del protocolo de comunicación RS-232 entre la IPAQ y el microcontrolador fue crear una tarjeta que engañara al puerto serie de la IPAQ, conectando las señales DTR', DSR', RTS', CTS' de la forma descrita anteriormente.

4. Se logró el desarrollo de la aplicación propuesta de adquisición y despliegue de la señal en la pantalla de la IPAQ, cumpliendo de una manera sobresaliente el objetivo propuesto al probarse en conjunto todo el sistema con una señal obtenida del simulador de paciente con una amplitud de 1 mV, obteniendo una gráfica en la pantalla de la PDA con una amplitud de 5 Volts.

Limitaciones de la aplicación

La aplicación cumple con los objetivos propuestos de una manera parcialmente sobresaliente, debido a las propias limitaciones del software de control:

1. La propiedad Comm Event del Objeto Comm de Visual Basic Embedded no permite adquirir datos con una frecuencia de conversión mayor a 20 ms, ya que como se maneja por interrupciones genera problemas a la aplicación dado que no puede leer los datos que se encuentran en el puerto y seguir con la ejecución del programa.

2. A pesar de que Visual Basic Embedded permite guardar datos obtenidos en colas para ser procesados momentos después de su adquisición, no fue posible implementar esto en nuestra aplicación ya que sería necesario agregar un subprocedimiento más que llenara esta cola, lo cual generaría que se programara una frecuencia de conversión más lenta para darle tiempo a la aplicación de leer un dato y almacenarlo.