

Sistema de Monitoreo Telemétrico de los Parámetros de Operación de un Vehículo Teleoperado

G. Estupiñán*, E. Lisca, W. Medina
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
gabriela.estupinan@gmail.com

Resumen

El sistema de monitoreo telemétrico diseñado permite realizar un diagnóstico oportuno de problemas en un robot de batalla operado a distancia, para evitar daños que puedan comprometer el correcto funcionamiento de dicho vehículo. El robot es un vehículo de 4 ruedas de tracción trasera con locomoción diferencial, los dos motores funcionan con señales PWM positivas y negativas según el sentido del giro y el sistema es alimentado por un banco de baterías que entrega un voltaje DC de 30 V. Por ende, los parámetros a monitorear son: una señal DC correspondiente al nivel de carga de las baterías y dos señales PWM correspondientes a los voltajes de cada motor. Uno de los principales objetivos cumplidos por nuestro diseño es no interferir en la comunicación inalámbrica de control de nuestro vehículo a monitorear, evitando de esta manera errores de comunicación en cualquiera de los dos sistemas. Se desarrolló también una codificación de los datos segura y eficiente que nos garantice la mínima tasa de error de comunicación a través de programación en microcontroladores. Además, se logra un diseño completamente global y fácilmente adaptable a diferentes aplicaciones gracias a un diseño modular en cada una de las etapas del sistema telemétrico.

Palabras Claves: Telemetría, señales PWM, microcontroladores, codificación de datos.

Abstract

The telemetric monitoring system designed allows an early diagnosis of problems in a battle robot remotely operated in order to prevent damage that could compromise the proper performance of the vehicle. The robot is a 4-wheel vehicle with rear drive differential locomotion. The two motors operate with positive and negative PWM signals according to the sense of rotation and the system is powered by a battery bank that delivers a 30 V DC voltage. So the parameters to be monitored are: a DC signal corresponding to the level of battery charge and two PWM signals for each motor voltage. One of the main objectives achieved by our design is not to interfere with our vehicle's wireless communication control, thus avoiding communication errors in either of the two systems. We also developed a secure and efficient data encryption that guarantees a low communication error rate through microcontrollers programming. Furthermore, our system is global and easily adaptable to different applications through a modular design at each stage of the telemetric system.

Keywords: Telemetry, PWM signals, microcontrollers, data encryption.

1. Introducción

El importante rol que puede llegar a cumplir el sistema de monitoreo telemétrico en cualquier sistema operado a distancia radica en el pronto diagnóstico de problemas para evitar así daños que puedan comprometer el correcto funcionamiento del sistema.

Asimismo cabe destacar la creciente importancia que está tomando la rama de la telemetría en el mundo de la ingeniería, un ejemplo claro de esto es la medición de parámetros críticos de operación en ambientes de alto riesgo como yacimientos y tuberías de transporte de petróleo. Por esta razón decidimos seguir adelante con la implementación del sistema telemétrico.

2. Consideraciones generales de diseño

Para poder definir las características de funcionamiento de nuestro sistema telemétrico es importante conocer las tareas que debe ejecutar el vehículo teleoperado a monitorear.

El vehículo teleoperado a utilizar es un robot de batalla de 4 ruedas de tracción trasera con locomoción diferencial. Los motores funcionan con señales PWM de 1 KHz de frecuencia, con rangos positivos y negativos según su sentido de giro. El sistema es alimentado por un banco de baterías de 30 V. El robot es manejado a través de un control RF de 72.75 Mhz con cobertura de 30 metros aproximadamente.

La principal característica que debe poseer nuestro sistema es ser inalámbrico para así poder cumplir con su propiedad intrínseca de medición a distancia. La elección de la frecuencia de comunicación es de suma importancia para no interferir con la comunicación de control del vehículo teleoperado. Así como también, es importante que la cobertura del transmisor RF a utilizarse en el sistema telemétrico mayor o igual a la del vehículo.

La alimentación del sistema telemétrico debe ser independiente de aquella del vehículo para así no afectar de ninguna forma el rendimiento del mismo.

La comunicación seleccionada debe soportar la transmisión de al menos tres datos digitales para cumplir con la transmisión de los datos análogos capturados. En la fase de comunicación el transceptor RF debe tener libertad de configuración para soportar un protocolo propio de comunicación y codificación, creado mediante programación de microcontroladores, con la finalidad de minimizar los errores de transmisión y recepción de datos.

3. Transceptor HM-TR434

El módulo escogido, HM-TR434, se caracteriza por tener una alta tasa de transmisión de datos y una amplia cobertura de transmisión. Entre las características generales podemos notar que funciona con modulación FSK, en modo half dúplex y es robusto a la interferencia.

El módulo utiliza la banda ISM por lo que no requiere permiso de uso para utilizar dicha frecuencia. El módulo tiene la capacidad de que el usuario pueda configurar la frecuencia de operación, por lo que puede ser utilizado en aplicaciones FDMA [3]. La frecuencia escogida es de 434 Mhz.

El módulo tiene alta sensibilidad y un rango de cobertura de 230 metros. Tiene la capacidad de seleccionar los niveles lógicos de la interfaz estándar UART, TTL o RS232. Además es altamente confiable, pequeño y de fácil montaje.



Figura 1. Vista lateral del HM-TR434

4. Diseño del Sistema Telemétrico

Las señales análogas capturadas del vehículo teleoperado deben ser llevadas a rangos de 0 a 5 V aceptables para el microcontrolador PIC16F877A; éste a su vez se encarga de convertirlos de analógico a digital, transformándolas en un dato de 8 bits que puede ir desde 0 b a 255. Por último, este dato digital debe ser transmitido serialmente a través del transceptor HM-TR434.

En nuestro caso vamos a monitorear tres valores, la variación de voltaje de las baterías y el voltaje de operación de los motores de nuestro robot de batalla. Para este caso específico, estamos tratando con una señal DC de 30 V nominal, y dos señales PWM de frecuencia 1 Khz con alcances máximos de 24 V y -24 V.

Para hacer más versátil nuestro sistema, decidimos que las entradas de la señal analógica al sistema telemétrico deben soportar distintos rangos de voltaje que el usuario pueda seleccionar.

Es importante que la presentación de los valores medidos sea lo más amigable y transparente posible para el usuario, es por esto que decidimos utilizar dos pantallas LCD, una en el transmisor y una en el receptor.

5. Descripción de los Subsistemas

El sistema transmisor abarca desde las entradas de las señales analógicas, su escalamiento al rango de 0 a 5 V, su conversión de analógico a digital, presentación de los datos, codificación y transmisión de los mismos.

5.1. Sistema de Sensores

El Sistema de sensores se encarga de realizar todos los procesos pertinentes para que la señal analógica de entrada se encuentre referenciada a 0 V y con una máxima amplitud de 5V.

El subsistema de sensores está conformado por los subsistemas de Selección de Entrada, Escalamiento y Traslación de Señal, Acoplamiento de Señal DC y Convertidor PWM a DC.

5.1.1. Sistema de Selección de Entrada. Este sistema se encarga de escalar la señal entrante a un nivel de 0 y 5 V, mediante divisores de voltaje calculados adecuadamente para este propósito.

La primera parte de este sistema consiste en tres selectores en los cuales el usuario puede escoger la escala de voltaje que desea utilizar para cada una de

las entradas. Las escalas disponibles son: 20 V, 35 V, 40 V, 45 V y 50 V.

5.1.2. Sistema de Acoplamiento de Señal DC. Este sistema nos permite limitar la señal de entrada a 5 V; dándonos la seguridad de que, en caso de ocurrir una falla en el sistema monitoreado que generase un pico de voltaje que sobrepasare la escala seleccionada por el usuario, el microcontrolador recibiría el voltaje de saturación fijado en 5 V.

El circuito a utilizar en este sistema es un amplificador no inversor, de ganancia unitaria [5].

5.1.3. Sistema de Escalamiento y Traslación de Señal. Una consideración importante al momento de medir el voltaje de operación de un motor es que el movimiento de éste se ocasiona a partir de la diferencia de voltaje entre los terminales de dicho motor.

Debido a esto, nuestro diseño se basará en escalar la señal de voltaje de cada uno de los terminales para luego realizar la diferencia entre ambos valores. El resultado de esta operación será un voltaje ya sea positivo si el giro es en un sentido o negativo si el giro es en el sentido contrario; es decir, que obtenemos un rango de -5 a 5 V.

Como sabemos el microcontrolador soporta valores de voltaje de 0 a 5 V, por este motivo procedemos a reducir la escala de -2.5 a +2.5 V, para luego trasladar el rango de 0 a 5 V.

El primer proceso que debemos realizar es limitar las dos señales escaladas que provienen de los terminales del motor a un voltaje máximo de 5 V, para este efecto utilizaremos dos circuitos amplificadores no inversores de ganancia unitaria [5] para cada señal.

El siguiente proceso a cargo de este sistema será realizar la diferencia entre las dos señales resultantes de los circuitos anteriores, mediante un amplificador restador [6] de ganancia unitaria.

A la par de este proceso utilizaremos un circuito amplificador no inversor [5] para obtener una señal DC fija de 5 V; la cual la obtenemos a partir de una alimentación independiente de 9 V, que entrará a un potenciómetro que hace las funciones de un divisor de voltaje variable.

A través de un circuito sumador inversor [5] lograremos reducir la escala de la señal del circuito anterior a un rango de -2.5 a 2.5 V y la trasladaremos de manera que la escala final a la salida de este circuito sea de 0 a 5 V, valores que son soportados por el microcontrolador.

Las ganancias de este circuito son independientes para cada entrada, iguales a 1/2.

Por último, necesitamos ubicar a la salida de este sistema un circuito inversor con ganancia unitaria; ya que la salida del circuito anterior es invertida.

5.1.4. Sistema Convertidor PWM a DC. Hasta ahora lo que hacemos es traducir los voltajes de batería y de operación de los motores a niveles aceptables para el microcontrolador PIC16F877A.

Los motores son manejados por una señal PWM de frecuencia de 1 KHz. La modulación por ancho de pulsos o PWM es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo de un señal periódica para, entre otras cosas variar la velocidad de un motor.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al período. Cuanto más tiempo pase la señal en estado alto, mayor será la velocidad del motor.

Este tren de pulsos, en realidad, hace que el motor marche en un sentido o el otro alimentado por la tensión máxima de la señal durante el tiempo en que ésta se encuentra en estado alto o bajo respectivamente, y que pare en los tiempos en que la señal está en equilibrio.

Para que el microcontrolador esté en capacidad de tomar la lectura del dato analógico de voltaje con el que operan los motores, debemos transformar la señal PWM. Para esto utilizaremos un filtro activo pasa bajos que traduce la señal PWM a su valor análogo respectivo.

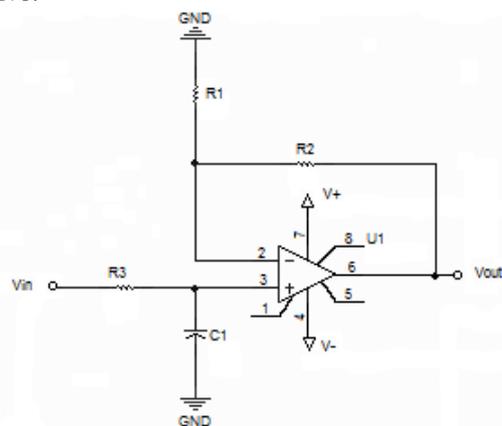


Figura 2. Configuración de un filtro activo pasa bajos

El voltaje de carga del capacitor está dado por la siguiente ecuación,

$$V_c = E + (V_o - E) e^{-t/\tau}$$

Fijamos el valor de la resistencia en 120Ω y el valor de la capacitancia en $100 \mu\text{F}$, de manera que el período de carga del circuito sea de 12 ms. El período de carga del capacitor es mayor que el período de la señal PWM (1 ms), por esta razón la señal digital queda convertida en señal análoga al pasar por este circuito.

5.2. Sistema Controlador

El Sistema controlador se encarga del procesamiento de las señales analógicas, de su codificación y su posterior transmisión serial al módulo RF y su presentación al usuario a través de una pantalla LCD. Este sistema comprende los siguientes subsistemas: Convertidor Analógico-Digital y Procesamiento.

5.2.1. Sistema Convertidor Analógico-Digital.

Está conformado por el módulo ADC (por sus siglas en inglés) del microcontrolador. El PIC16F877A tiene 8 bits disponibles para la conversión, dándonos un rango de 0 a 255 para representar valores analógicos de 0 a 5 V.

En el caso del voltaje de operación de los motores, un dato digital de 0 representa el voltaje mínimo negativo de la señal PWM, mientras que un dato digital de 128 representa el nivel 0 del voltaje, de la misma manera el dato digital 255 representa el voltaje máximo positivo de la señal.

Para el caso del voltaje de las baterías, un dato digital de 0 corresponderá al nivel 0 de dicho voltaje y 255 corresponde al voltaje máximo que entregan las baterías.

5.2.2. Sistema de Procesamiento de la Señal. Este sistema se encarga de darle el tratamiento adecuado a los datos para poderlos transmitir a través del transreceptor HM-TR434 minimizando el índice de error en la comunicación.

Dentro de las tareas de este sistema está la de preparar los datos digitales para ser presentados en la pantalla LCD mediante operaciones aritméticas que llevarían el dato digital al valor real de voltaje dentro de la escala seleccionada por el usuario.

Todos estos procesos se realizan a través de la programación del microcontrolador. El transreceptor es capaz de transmitir una palabra de 8 bits; esto nos lleva a realizar una codificación, en la que cada dato análogo convertido en un dato digital de 8 bits será separado en dos palabras. En la primera palabra se almacenan los 4 bits más significativos y al nombre de la variable le agregamos una h (por high) al final para su mejor identificación, en la segunda palabra

almacenamos sus 4 bits menos significativos, y el nombre de la variable va seguido de una l (por low).

Esta separación nos permite ponerle a cada dato una codificación para garantizar una transmisión libre de error. En la palabra resultante de cada separación almacenamos la mitad correspondiente del dato real en los 4 bits menos significativos, mientras que los 4 bits más significativos se utilizan para la codificación correspondiente que nos permite identificar a qué dato pertenece la palabra y su posición dentro del dato (h o l). En la tabla podemos apreciar la codificación a utilizarse.

Tabla 1. Codificación de la transmisión de datos

Codificación	
Dato	Código
dato1h	0001XXXX
dato1l	0010XXXX
dato2h	0011XXXX
dato2l	0100XXXX
dato3h	0101XXXX
dato3l	0110XXXX

Para transmitir el dato nos valemos de un contador que llegue a 3, en el primer tiempo transmitiremos las palabras correspondientes al dato alto y bajo codificado, y generamos una palabra de 8 bits que sirve como llave de identificación para una futura comprobación en el receptor y la transmitimos a continuación de los datos anteriores; repetimos el proceso para los dos datos restantes, cada uno con su propia llave. En la tabla a continuación detallamos las llaves de identificación para cada dato,

Tabla 2. Llaves de identificación de la transmisión de datos

Llaves de identificación	
Llave	Código
Llave1	11110000
Llave2	11001100
Llave3	11000011

Otro proceso aparte es el de presentación de los datos. Tomamos el valor digital y, mediante las fórmulas a continuación, convertimos la palabra de 8 bits en la medición real en voltios, tanto para el voltaje de operación de los motores como para el voltaje de baterías.

Fórmula para Voltaje de Motores:

$$\text{dato} = \frac{\text{dato digital} * \text{constante1}}{255} - \frac{\text{constante1}}{2}$$

Fórmula para Voltaje de Baterías:

$$\text{dato} = \frac{\text{dato digital} * \text{constante2}}{255}$$

Los tres datos que obtenemos de estas conversiones se presentan en la pantalla LCD, para eso utilizamos un contador que permite que el programa completo corra tres veces antes de enviar los tres datos a la pantalla; asegurándonos de esta manera que antes de presentarlos en pantalla ya se hayan transmitido y el receptor los haya recibido correctamente, de modo que la pantalla del receptor esté en capacidad de mostrar los mismos datos que el transmisor.

5.3. Sistema Receptor

El sistema receptor consiste en dos etapas, la primera recibe palabras de 8 bits del transreceptor HM-TR434, mediante un programa que maneja el microcontrolador PIC16F877A decodificamos dichas palabras para identificar qué dato representan y de qué variable provienen. En la segunda etapa usamos un segundo microcontrolador PIC16F877A que se encarga de transformar los valores decodificados por el primer PIC en los valores reales de medición para que sean presentados a través de una pantalla LCD.

El proceso que realizamos en la programación comienza con la captura de tres datos por cada ciclo de programa, entiéndase por ciclo de programa el tiempo que tarda en correr el programa completamente. Para validar los tres datos capturados, almacenamos en variables auxiliares los 4 bits más significativos de los dos primeros datos, que corresponden al valor de medición de voltaje codificado por el sistema transmisor, y los 2 bits más significativos del tercer dato que corresponden a la llave de identificación.

La validación de los datos recibidos la realizamos mediante la regla de correspondencia detallada en la siguiente tabla,

Tabla 3. Validación de datos recibidos

Validación Datos		
	Dato Entrante de 8 bits	
Caso	Parte alta	Parte baja
16	0001	dato1h
32	0010	dato1l
48	0011	dato2h
64	0100	dato2l
80	0101	dato3h
96	0110	dato3l
192	1100	Key

El dato entrante de 8 bits está formado por la parte alta (4 bits más significativos) que corresponde a la codificación y la parte baja (4 bits menos significativos) que almacena el dato medido en el transmisor.

Para la validación de la llave de identificación almacenamos en una variable auxiliar los 6 bits menos significativos de la llave, y la verificación de este proceso se realiza con la regla de correspondencia de la siguiente tabla,

Tabla 4. Validación de las llaves de identificación

Validación Llave de identificación			
	Dato de 8 bits		
Llave	Parte alta	Parte baja	Caso
dato1	11	000011	3
dato2	11	001100	12
dato3	11	110000	48

En caso de ser satisfactoria la validación de los tres datos (la parte alta, la parte baja y la llave de identificación) en cada ejecución completa del programa, los datos están listos para ser procesados y formar el dato original medido. Si falla alguna de las tres validaciones el dato se descarta; de esta manera logramos minimizar notablemente el índice de error en la comunicación.

Para formar el dato original de medición decodificamos los dos datos recibidos. La decodificación de la parte alta del dato consiste en trasladar los 4 bits menos significativos a la izquierda para que queden en las posiciones más significativas; mientras que la decodificación de la parte baja del dato consiste simplemente en la eliminación de sus 4 bits más significativos. Una vez realizada la decodificación procedemos a sumar los dos valores obtenidos para generar así el dato original de medición.

Para transmitir el dato obtenido al segundo microcontrolador generamos una llave de identificación y transmitimos el dato seguido de su llave correspondiente. La llave de identificación cumple la regla detallada en la siguiente tabla,

Tabla 5. Llaves de identificación para la segunda transmisión de datos

Llaves de identificación	
Dato	Llave
dato1	00000001
dato2	00000010
dato3	00000100

El segundo microcontrolador realiza una verificación mucho más sencilla de los datos. Primero se reciben dos datos, donde el primero sea el dato en sí y el segundo sea la llave de identificación. Se autentica la llave, de ser favorable se procede a utilizar la operación matemática correspondiente que convierte el dato digital en el dato análogo correspondiente a la lectura de voltaje, según las fórmulas detalladas a continuación,

Fórmula para Voltaje de Motores:

$$dato = \frac{dato\ digital * constante1}{255} - \frac{constante1}{2}$$

Fórmula para Voltaje de Baterías:

$$dato = \frac{dato\ digital * constante2}{255}$$

Una vez convertidos los tres datos, presentamos los resultados en la pantalla LCD; es decir que el programa se ejecuta completamente tres veces.

La velocidad de ejecución de los programas nos permite mostrar los datos al usuario después de ejecutarlos tres veces, de tal manera que el retraso

generado por estos conteos sea imperceptible al ojo humano. El cambio de datos presentados en el receptor se realiza cada 0.7 segundos aproximadamente. Este tiempo fue medido por medio de la simulación del sistema completo en el programa ISIS.

6. Conclusiones

En nuestro sistema telemétrico se creó, en programación, una codificación robusta para nuestra comunicación serial con el fin de minimizar la tasa de error de nuestro sistema de comunicación. Nuestra codificación busca la correcta identificación de los datos sin sacrificar la simplicidad y eficiencia de los recursos; asimismo, nuestra codificación es eficiente porque, además de cumplir su principal tarea de reducir el error inducido por el ruido, mantiene también la simplicidad en su código y no usa más datos (bits) de los necesarios.

El sistema está en la capacidad de recibir la señal de cualquier sensor que represente sus lecturas en una escala de 0 a 5 V, esto hace que el sistema tenga la versatilidad de ser aplicado a cualquier sistema teleoperado en el que se necesite monitorear algún parámetro.

Además mantiene la escalabilidad que buscamos desde un inicio en su diseño, teniendo éste la capacidad de adquirir hasta 6 señales analógicas. Fue posible lograr esto gracias a la codificación que desarrollamos para el envío de los datos digitales. La codificación utilizada por nuestro sistema nos permite codificar y enviar a través del transreceptor hasta 12 datos digitales con su respectiva identificación, los que corresponden a 6 señales analógicas.

Tenemos disponibles para la codificación de cada palabra 4 bits, los cuales nos permitirían codificar 16 palabras en total; sin embargo, la combinación "11" de los 2 bits más significativos está reservada para la llave de identificación enviada junto con cada dato. Por esta razón, a las 16 posibles palabras debemos restringirles sus 4 últimas combinaciones, ya que éstas corresponden a las llaves de identificación, es así que nos quedan 12 palabras disponibles para almacenar los datos digitales a ser enviados.

El estudio de consumo de potencia de cada subsistema fue esencial en el diseño de nuestro sistema. De nuestra experiencia, podemos aseverar que un estudio subestimado de consumo de potencia conllevará al mal funcionamiento del sistema, impidiendo que la codificación y decodificación de los datos sea realizada correctamente.

En nuestro diseño se procuró que la obtención y manejo de los datos analógicos capturados del vehículo teleoperado se realice con mucha precisión. Los datos analógicos capturados pasan por etapas de escalamiento y traslación de las señales, por lo que fue de suma importancia trabajar con resistores de buena calidad y hacer pruebas con éstos, ya que el mayor error inducido a los datos en esta etapa proviene de los resistores.

Fue necesario incluir en la etapa de sensores un sistema de escalas que cubra las posibles entradas analógicas que podamos obtener de diferentes vehículos teleoperados, de esta manera nos aseguramos de poseer un diseño dinámico y versátil, útil para múltiples aplicaciones.

7. Recomendaciones

Recomendamos al usuario escoger una escala que sobrepase a su valor máximo nominal por al menos 5 V, de esta manera evitamos tener lecturas erróneas en el receptor provocadas por el error de factor de escala y protegemos el equipo de una sobrecarga de voltaje.

Es necesario que la carcasa del equipo transmisor se encuentre aterrizada a la carcasa del vehículo teleoperado para que cualquier fricción entre nuestro equipo y el chasis del vehículo no genere ruido que afecte a las señales RF.

Es recomendable que el encendido del sistema transmisor de nuestro sistema telemétrico se realice en el siguiente orden: primero encender el interruptor 1, que corresponde al encendido del subsistema controlador, luego encender los tres interruptores restantes, los que corresponden a la alimentación del subsistema de sensores.

El encendido se realiza de esta manera, para asegurar que el subsistema controlador estabilice su operación antes de que el subsistema de sensores empiece a trabajar y procesar los datos analógicos adquiridos.

Al inicio de la operación del sistema transmisor de nuestro equipo, el usuario debe, por seguridad, poner todos los selectores en la posición de apagado (OFF) para asegurarse a partir de esta posición la colocación de la escala correcta en los mismos. Además es recomendable que la calibración de la etapa de sensores se realice en la posición de apagado (OFF) de los selectores, el usuario debe maniobrar los potenciómetros correspondientes para encerrar el valor obtenido en pantalla.

8. Referencias

- [1] Frenzel L., "Sistemas Electrónicos de Comunicaciones", Alfaomega, México, 2003, pp. 15-22.
- [2] Tomasi, "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", Pearson Educación, México, 1996, pp. 5-8, 457-462.
- [3] Hope RF, "HM-TR434 Datasheet".
- [4] Sklar B., "Digital Communications Fundamentals and Applications", Prentice-Hall, USA, 2008, pp. 175-194.
- [5] Boylestad y Nashelsky, "Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos", Pearson Educación, México, 2003, pp. 675-746.
- [6] Johnson D., Jayakumar V., "Operational Amplifier Circuits Design and Application", Prentice-Hall, USA, 1982, pp. 53-67.
- [7] Lurch N., "Fundamentals of Electronics", John Wiley & Sons, New York, 1981, pp. 451-488.
- [8] SGS-Thomson Microelectronics, "UA741 Datasheet", Octubre 2010.
- [9] Microchip, "PIC16F87XA Datasheet", Octubre 2010.