



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MONITOREO DE PH POR MEDIO  
DE RADIOFRECUENCIA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:**

**CARLOS HUMBERTO REYES ANDRÉS**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. RODOLFO PETERS LAMMEL**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2008**



# ***AGRADECIMIENTOS***

El siguiente trabajo va dedicado a mis padres Humberto Reyes y Verónica Andrés, así como también a mi abuelo Clemente Andrés, quienes a lo largo de mi carrera profesional me brindaron el apoyo necesario para cumplir este objetivo.

También es necesario reconocer a “la chiquis”, Itzel Ibis Verónica y a César Humberto quienes fueron mi brazo derecho en momentos difíciles.

Por otro lado, quiero agradecer a mis amigos Iván López, Armando Figueroa, Marco Antonio Arellano, Julio César Fernández, Víctor Macías, Diana Zaragoza, Erick Bárcenas, Arturo Gasca, Julián García, Carlos Rivera.

Karla Millán, Alejandro Marín, Pablo Pallares, Cinthya Covarrubias, Roberto Contreras, Inés Ramírez, Jezabel Vargas. Adriana Suárez, Noemí López, Ing. Pablo Correa.

Ing. Agustín Villalobos por sus sabios consejos.

A mis sinodales: Ing. Rodolfo Peters Lammel, M.C. Luis Arturo Haro, Ing. Salvador Zamora Alarcón, M.C. Benjamín Valera, M.C. Juan Manuel Gómez González.

Y en general a la Universidad Nacional Autónoma de México por su gran labor educativa en nuestro país.

*“Por mi raza hablará el espíritu”*

*José Vasconcelos*

# ***INDICE GENERAL***

Introducción.....	1
I. Planteamiento del problema.....	3
II. Principio de medición.....	5
III. Adecuación de la señal de entrada.....	10
IV. Conversión analógico digital de la señal.....	16
4.1 Tipos de señales.....	17
4.2 Teorema del muestreo.....	19
4.3 Cuantificación y codificación.....	21
4.4 Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.....	23
4.5 Especificaciones y diseño del convertidor A/D.....	25
V. Transmisión de datos por puerto serie.....	31
5.1 Tipos de transmisión serie.....	32
5.2 Parámetros de la transmisión serie.....	33
5.3 Diseño del transmisor serie.....	36
VI. Transmisión de la señal por radiofrecuencia.....	40
6.1 Propagación de la señal.....	40
6.2 Sistemas de comunicación digital.....	42
6.3 Modulación digital.....	44

6.3.1	Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).....	46
6.3.2	Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK).....	47
6.3.2.1	Modulador y demodulador FSK.....	48
6.3.3	Modulación por desplazamiento de fase (PSK).....	49
6.4	Técnicas de comunicación.....	51
6.5	Módulo de radiofrecuencia Easy-Radio.....	52
VII.	Recepción de la señal por puerto serie.....	56
VIII.	Visualización de la lectura.....	59
8.1	Configuración de la pantalla LCD.....	64
IX.	Calibración.....	67
X.	Diseño conceptual.....	75
XI.	Resultados.....	80
	Conclusiones y trabajos futuros.....	83
	Bibliografía.....	86

## ***INDICE DE FIGURAS***

2.1 Electrodo combinado.....	6
2.2 Escala de pH.....	7
2.3 pH vs mV.....	9
3.1 Amplificador seguidor de voltaje.....	11
3.2 Amplificador no inversor.....	11
3.3 Señal de pH amplificada.....	13
3.4 Curva característica del diodo zener.....	14
3.5 Amplificador de señal de pH.....	14
3.6 Configuración ICL7660.....	15
4.1 Tratamiento digital de señales analógicas.....	16
4.2 Señal analógica y digital.....	18
4.3 Teorema de muestreo.....	19
4.4 Proceso de muestreo.....	20
4.5 Señal muestreada.....	20
4.6 Escalón de cuantificación.....	22
4.7 Error de cuantificación.....	22
4.8 Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.....	24
4.9 Registro ADCON1.....	25
5.1 Formato serie marca/espacio.....	32
5.2 Transmisión serie asíncrona.....	33

6.1 Sistema de comunicación digital.....	43
6.2 Esquema de modulación.....	44
6.3 Modulación ASK.....	46
6.4 Modulación FSK.....	47
6.5 Modulador FSK.....	48
6.6 Demodulador FSK.....	49
6.7 Modulación BPSK.....	50
6.8 Módulo RF Easy-Radio.....	53
6.9 Sistema de comunicación Easy-Radio.....	53
6.10 Transmisión de datos Easy-Radio.....	54
8.1 Pantalla LCD de texto.....	64
9.1 Diagrama de flujo para la calibración.....	70
10.1 Transmisor de pH.....	76
10.2 Receptor de pH.....	77
10.3 Receptor de pH.....	78
10.4 Transmisor de pH.....	78
10.5 Resolución del transmisor.....	79

## ***INTRODUCCION***

El desarrollo de este trabajo se realizó mediante el estudio y el análisis de una señal de pH, una variable relacionada con la acidez y la alcalinidad de una solución.

En primera instancia es necesario comprender el término de pH.

Posteriormente se estudiará cómo un electrodo de un material sensible a los iones Hidrógeno es capaz de generar una diferencia de potencial proporcional a la concentración de dichos iones, así como también se analizará la curva generada en dicha medición.

Habiendo comprendido el sistema de medición, entonces será relativamente sencillo manipular la señal de tal manera que ésta sea transmitida a través de una señal de radio, en donde, para evitar problemas de ruido con otras señales, se utilizará un sistema de comunicación digital.

Dado que se trata de un sistema digital entonces es necesario manipular la señal de tal manera que se obtengan palabras binarias a diferentes valores analógicos. Es por eso que se trabajará con microcontroladores PIC, ya que estos dispositivos presentan diferentes módulos para manipular las señales. La programación de estos dispositivos se realizará mediante un compilador, por medio del cual será posible realizar operaciones lógicas y aritméticas.

El diseño de un sistema de medición de pH se analizará con base en el documento *BUENAS PRACTICAS DE LABORATORIO* impartido por el CENAM, en donde se hace mención a la teoría del pH.

Además este trabajo se basará en la teoría de las señales digitales y la comunicación digital con la finalidad de comprender la transmisión de datos por medio del módulo de radio frecuencia *EASY-RADIO*.

Finalmente se realizarán pruebas utilizando un simulador de pH y un electrodo de usos generales de la marca HANNA INSTRUMENTS, la cual es una empresa reconocida mundialmente dedicada al análisis de propiedades físico-químicas en el agua, entre ellas la división de laboratorio, la cual se enfoca en la medición de pH.

## ***CAPITULO I***

### ***PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA***

En la actualidad la medición de pH en los procesos productivos es uno de los factores más importantes a considerar para un mejor desarrollo del sector primario y secundario del país. Entre las ventajas que tiene el conocimiento y el control del pH se encuentran el poder manufacturar productos con atributos específicos, prevenir daños al medio ambiente así como satisfacer leyes ambientales, disminuir costos en la producción, e incluso para la investigación y el desarrollo de nuevos y eficientes procesos.

Dadas las diferentes aplicaciones en las que interviene la medición de pH se manejan equipos de acuerdo al modo de uso, ya sea para campo o laboratorio.

Así mismo, de acuerdo a la aplicación, se cuenta con electrodos de diferentes características, entre las que destacan el tipo de unión, el cuerpo del electrodo, sistemas de referencia, tipo de membrana de vidrio para el bulbo de medición e incluso la longitud del cable.

El cable de conexión debe ser uno coaxial con la parte interna aislada al máximo, el cual tiene un comportamiento de tipo capacitivo, en donde el tiempo de carga corresponde al tiempo necesario para obtener una lectura correcta.

Debido a esta limitación no se recomiendan longitudes de cable superiores a 5 metros. En las instalaciones industriales se hace muy difícil limitar la distancia entre el electrodo y el instrumento de medición a 5 metros. Para superar esta limitación es necesario crear una etapa de amplificación y obtener una salida de dos hilos de baja impedancia con lo cual se permite una conexión de 75 metros sin retrasos en la medida.<sup>1</sup>

Puesto que en los procesos industriales es de vital importancia la medición de pH, entonces se ha recurrido a electrodos de uso industrial con grandes longitudes de cable, lo cual en diversas ocasiones presenta una problemática en cuanto al cableado se refiere.

Una manera de corregir los problemas presentados por la longitud del cable es a través de un sistema de comunicación digital.

Dicho de otra manera, un sistema mediante el cual se tenga el electrodo conectado a un transmisor y por otro lado un receptor el cual presente el valor de pH de una solución.

Con lo anterior se soluciona la problemática del cableado, permitiendo de esta manera la reestructuración de un panel de control o bien poder visualizar el pH de un proceso desde diferentes sitios dentro de un radio determinado.

Por otro lado un sistema de este tipo permite al usuario no solamente mejorar las desventajas que presenta el cableado en cierto momento, sino que permite el monitoreo de pH en zonas de alto riesgo.

---

<sup>1</sup> Catálogo General Hanna Instruments Volumen 26

## ***CAPITULO II***

### ***PRINCIPIO DE MEDICIÓN***

El término pH está relacionado con la acidez o alcalinidad de una solución, esto se puede medir de forma precisa mediante un instrumento que mide la diferencia de potencial entre dos electrodos: un electrodo de referencia (generalmente Ag/AgCl) y un electrodo de vidrio que es sensible al ión hidrógeno.

Un medidor de pH está formado por un medidor analógico o digital y un par de electrodos, los cuales producen una diferencia de potencial proporcional a una concentración de iones de hidrógeno en la solución.

Se utilizan dos tipos de electrodos para medir el pH, y cada uno tiene un propósito específico.

El electrodo de cristal tiene un bulbo hecho de composición de cristal especial que es sensible a los iones de hidrógeno. Cuando el electrodo se sumerge en una solución, el vidrio absorbe agua hacia su red de silicato. Después de la hidratación de los iones del metal alcalino y algunos de los lugares iónicos de la red de silicato, puede registrarse un

intercambio de iones en una escala limitada con la solución externa. Algunos de los iones de hidrógeno de la solución penetran en la capa de la superficie y se liberan iones de sodio. De esta manera, se desarrolla una diferencia de potencial que depende de la actividad de los iones hidrógeno en la interface exterior vidrio-solución.<sup>1</sup>

El otro electrodo se llama “electrodo de referencia” y proporciona una diferencia de potencial estable y reproducible cuando se sumerge en una solución. Cuando los dos electrodos están conectados con el medidor de pH, la diferencia de potencial se amplifica, se procesa y se visualiza en el indicador.

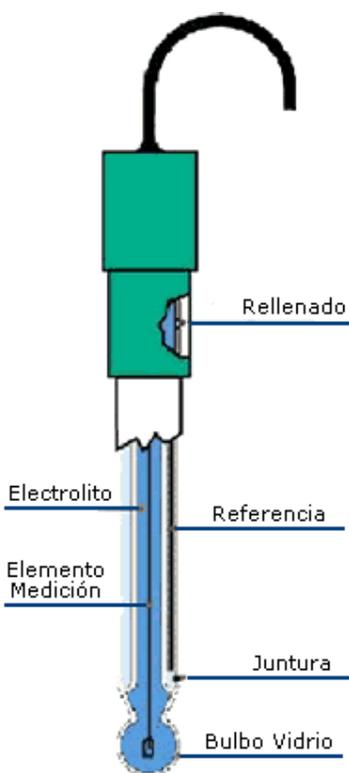


Figura 2.1 Electrodo combinado

<sup>1</sup>. Instrumentación Química. Strobel, H. A. Editorial LIMUSA. 1974.

Un electrodo que combine el bulbo de cristal sensible al pH y una celda de referencia en un mismo cuerpo se llama “electrodo combinado” y se utiliza de la misma manera que un par de electrodos (figura 2.1)

El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones Hidrógeno contenidos en una solución.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Como ya se analizó anteriormente la concentración de iones Hidrógeno presentes en una solución genera una diferencia de potencial entre los electrodos de referencia y el electrodo de medición, el cual se ve reflejado en el medidor como un valor de pH. En donde la lectura varía generalmente entre 0 y 14 (figura 2.2).

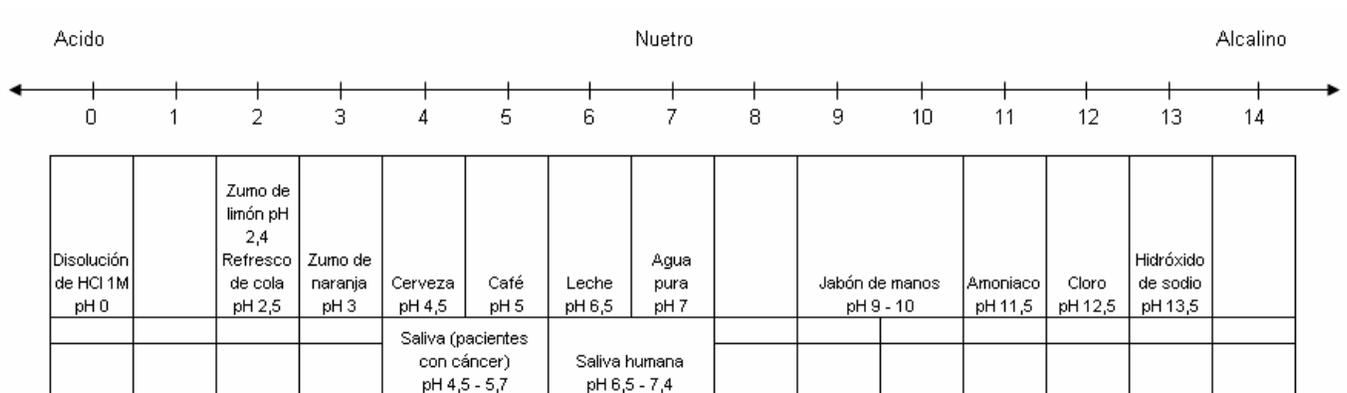


Figura 2.2 Escala de pH

Un medidor de pH está diseñado para proporcionar cero milivolts a un pH de 7.0, es decir el punto neutro.

Si la solución se hace ácida, el potencial del electrodo de vidrio se hace mayor que el potencial del electrodo de referencia, es decir que se obtiene una diferencia de potencial positiva, y conforme la solución se hace más alcalina, el potencial del electrodo de vidrio se hace menor que el potencial del electrodo de referencia dando así una diferencia de potencial negativa.

El cambio en la diferencia de potencial generado es de 59.16 mV/pH a una temperatura nominal de 25°C.

Dado lo anterior, la diferencia de potencial generada por un electrodo se puede calcular mediante la siguiente ecuación

$$mV = -59,16pH + 414,1$$

donde mV es la diferencia de potencial generada por el electrodo y pH es el valor teórico del potencial de hidrógeno de la solución analizada.

Simplificando la ecuación tenemos

$$mV = 59,16(7 - pH)$$

De la ecuación anterior se observa un comportamiento lineal, en donde las soluciones ácidas generan una diferencia de potencial positiva, mientras que las soluciones alcalinas generan una diferencia de potencial negativa. (Figura 2.3).

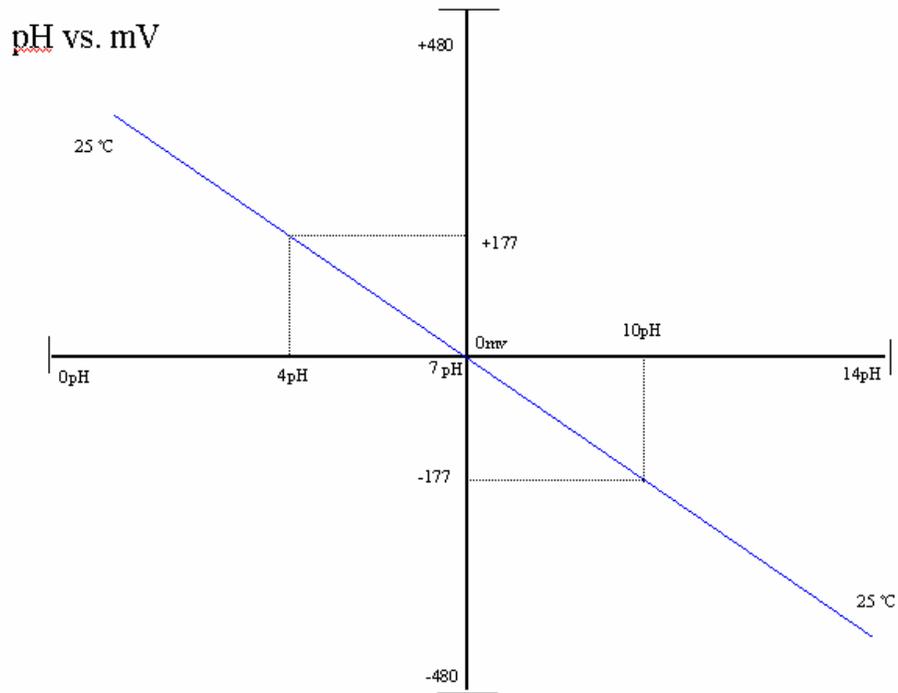


Figura 2.3 pH vs mV

Se partirá de la señal generada por el electrodo para realizar el diseño del equipo propuesto, de donde destacan 6 etapas:

1. Amplificación y adecuación de la señal de entrada
2. Conversión Analógico Digital de la señal
3. Transmisión de la señal por puerto serie
4. Etapa de transmisión de la señal por radiofrecuencia
5. Recepción de la señal por puerto serie
6. Visualización de la lectura a través de un display LCD

***CAPITULO III***  
***ADECUACION DE LA SEÑAL***  
***DE ENTRADA***

Como se analizó en la figura 2.3, la curva pH vs. mV es simétrica con pendiente negativa. Dado que el sistema de medición a implementar transmitirá una señal digital a través del módulo de radiofrecuencia Easy-Radio ER400TRS, entonces será necesario adecuar la señal de pH de tal manera que esta señal sea proporcional a una escala de 0 V a 5 V.

Una especificación establecida es la impedancia de entrada del medidor de pH. Su valor es típicamente  $10^{13} \Omega$ . Este alto valor de la impedancia es requerido para manejar la alta resistencia del bulbo de vidrio. El valor de la resistencia del bulbo de vidrio varía con la configuración y tipo de vidrio, pero está generalmente entre  $10^6 \Omega$  y  $10^9 \Omega$ . Mientras más cercano sea el valor de impedancia al valor de la resistencia de vidrio, mayor es el error posible. Por lo tanto, para aplicaciones en las cuales la muestra tiene una alta resistencia (por ejemplo, soluciones no acuosas) o cuando se usan bulbos de vidrio de alta resistencia, es importante usar un medidor de alta impedancia de entrada.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Buenas prácticas de laboratorio en mediciones de pH y conductividad. CENAM. 1997. Pp.15

Para ello se utilizará una configuración de amplificador seguidor de voltaje

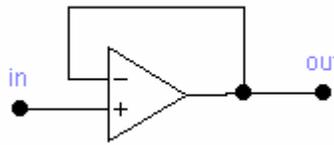


Figura 3.1 Amplificador seguidor de voltaje

en donde el voltaje de salida “sigue” al voltaje de entrada, el cual es utilizado como un amplificador de búfer con impedancia de entrada alta y a su vez impedancia de salida baja, las cuales están dadas por las siguientes ecuaciones

$$Z_{entrada} = AR_{entrada}$$
$$Z_{salida} = \frac{R_{salida}}{A}$$

En donde

Z es la impedancia de entrada o salida del seguidor

A es la ganancia del amplificador

R es la resistencia del dispositivo

El sistema de medición de pH se basará en un amplificador no inversor (figura 3.2).

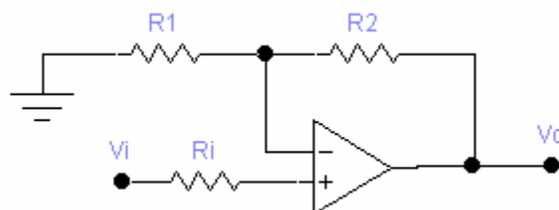


Figura 3.2 Amplificador no inversor

Para el análisis se emplean las propiedades básicas del amplificador operacional ideal.

Como la corriente a través de  $R_1$  es cero,

$$v_+ = v_-$$

Escribiendo una ecuación de nodo en el nodo  $v_-$  se obtiene

$$\frac{v_-}{R_1} + \frac{v_- - v_{out}}{R_2} = 0$$

Haciendo  $v_+ = v_-$ , y la sustitución de  $v_-$ , para obtener,

$$\frac{v_{in}}{R_1} + \frac{v_{in} - v_{out}}{R_2} = 0$$

La ganancia no inversora está dada por,<sup>2</sup>

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Como se expuso en el capítulo anterior, el electrodo genera una diferencia de potencial de  $\pm 414.12\text{mV}$  dentro del intervalo comprendido entre un pH de 0.0 y un pH de 14.0; sin embargo, para que sea posible manipular esta señal por medio del convertidor analógico digital de un microcontrolador PIC, es necesario adecuar la señal a un voltaje comprendido entre 0.0 y 5.0V tal como se muestra en la figura 3.3.

---

<sup>2</sup> Diseño electrónico. Savant Jr. Prentice Hall. 3ra Edicion. P.p. 33

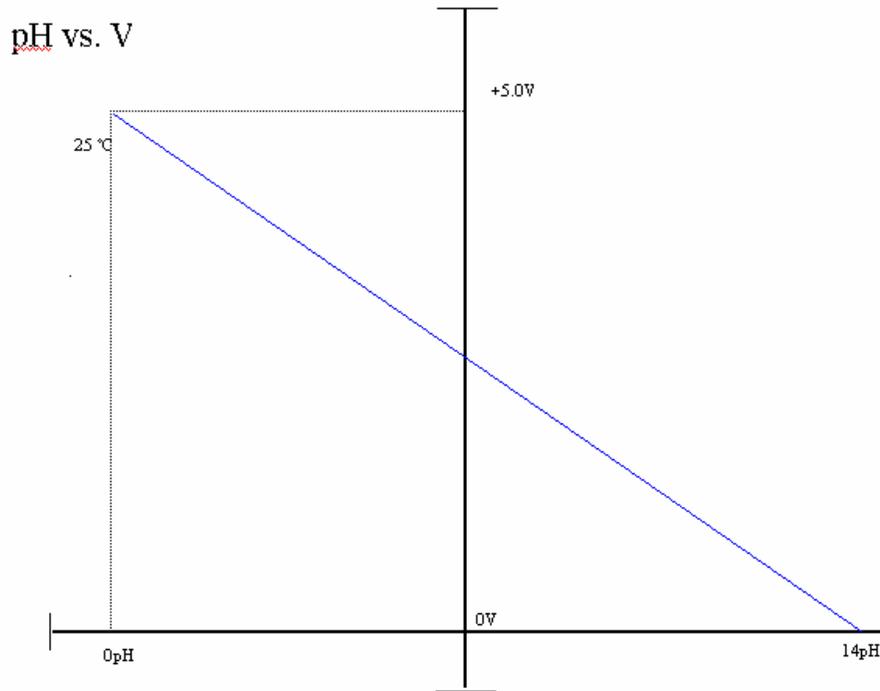


Figura 3.3 Señal de pH amplificada

El amplificador se deberá diseñar con ganancia de 6.03 para que la diferencia de potencial generada por el electrodo sea de  $\pm 2.5V$ .

La tensión negativa generada por soluciones alcalinas se soluciona conectando una fuente de voltaje en serie a la salida del amplificador. Esta fuente de voltaje será de 2.5V para obtener una curva como la mostrada en la Figura 3.3.

Una solución es mediante un el uso de un diodo zener como regulador de tensión.

El Zener es un diodo que al polarizarlo inversamente mantiene constante la tensión en sus bornes a un valor llamado tensión de Zener, pudiendo variar la corriente que lo atraviesa entre el margen de valores comprendidos entre el valor mínimo de funcionamiento y el correspondiente a la potencia de zener máxima que puede disipar. Si superamos el valor de esta corriente el zener se destruye. (Ver figura 3.4)

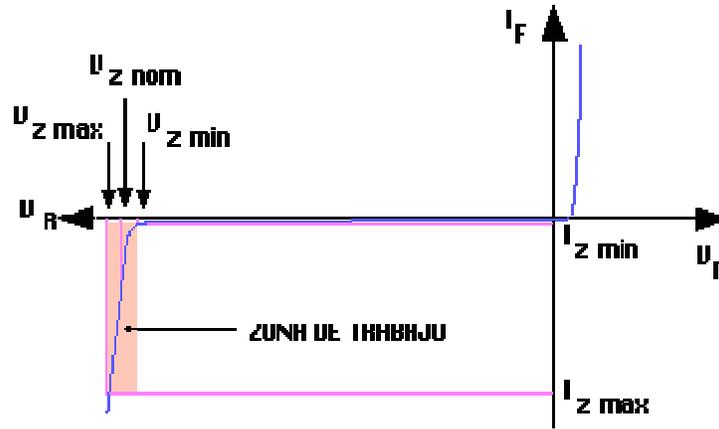


Figura 3.4 Curva característica del diodo Zener

El amplificador TLC27L2 (figura 3.5) es un amplificador doble, el cual se caracteriza por una alta impedancia de entrada, bajo consumo de potencia y alta ganancia. Además de proveer de estabilidad en el voltaje de offset. Estas ventajas que junto con el buen rechazo en modo común y el rechazo de voltaje de alimentación hacen de este un dispositivo ideal para aplicaciones de instrumentación.

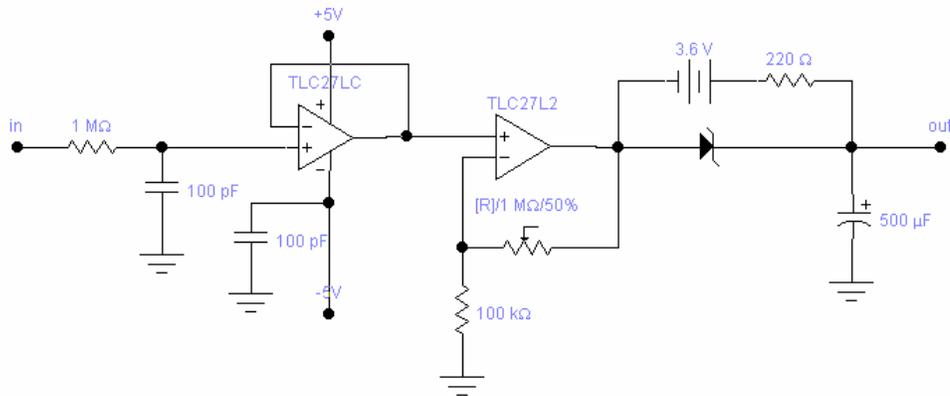


Figura 3.5 Amplificador de señal de pH

Dado que la señal de entrada se encuentra en un intervalo de  $\pm 414.12$  mV es necesario alimentar el amplificador con una fuente bipolar, es decir una de +5V y otra fuente negativa de -5V. Para ello se utilizará el convertidor de voltaje ICL7660, el cual realiza una

conversión de voltaje positivo, dentro de un intervalo de +1.5V a +10, a un voltaje negativo desde los -1.5V hasta los -10.0V.

El circuito integrado ICL7660 contiene los circuitos internos necesarios para completar el convertidor de voltaje negativo, a excepción de dos capacitores electrolíticos de 10 $\mu$ F. Los cuales se muestran en la figura 3.6

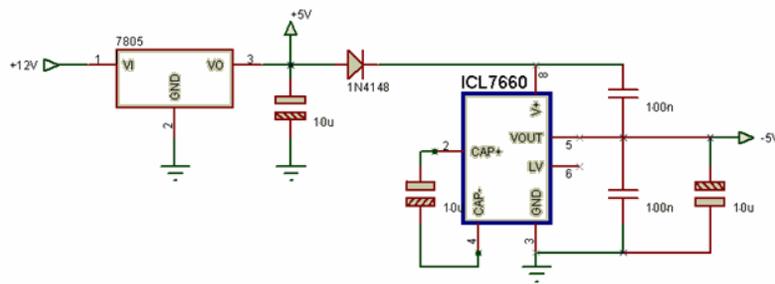


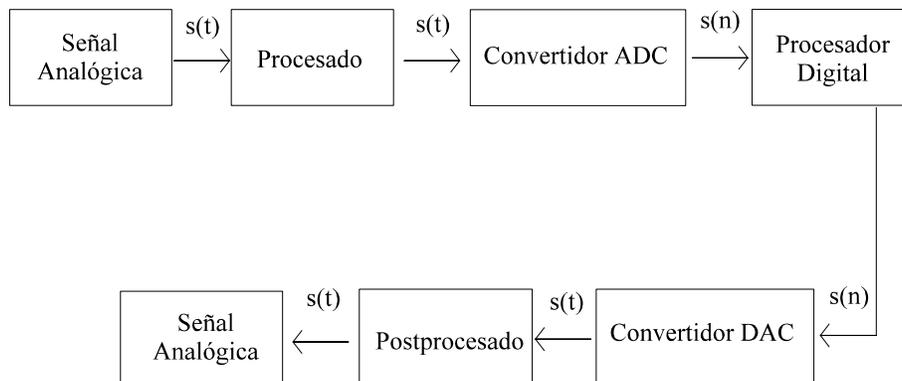
Figura 3.6 Configuración ICL7660

***CAPITULO IV***  
***CONVERSION ANALOGICO***  
***DIGITAL DE LA SEÑAL***

Los convertidores analógico-digitales (ADC) son circuitos integrados diseñados para leer una señal analógica y convertirla en una palabra binaria, la cual es interpretada de tal manera que se pueda manipular.

Los convertidores son una parte esencial dentro de la instrumentación, dado que los fenómenos naturales siempre son medidos como una señal analógica.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques en general para el tratamiento digital de señales analógicas proporcionando una variable de salida igualmente analógica.



**Figura 4.1** Tratamiento digital de señales analógicas

Como se observa en el esquema anterior, la señal analógica debe ser acondicionada para eliminar el ruido y adaptar el intervalo de amplitudes, este proceso se lleva a cabo mediante el uso de filtros, acopladores y amplificadores.

Posteriormente, la señal acondicionada es convertida a una señal digital mediante un circuito convertidor analógico digital (ADC), el cual proporciona un valor codificado en función a la amplitud de la señal analógica. Una vez que se ha obtenido una señal digital, ésta es manipulada mediante un microprocesador o un microcontrolador.

Finalmente, la señal procesada digitalmente es convertida a una señal analógica mediante el uso de un convertidor digital analógico (DAC), para que de esta manera se pueda obtener una señal analógica la cuál será procesada nuevamente mediante un filtro paso-bajo, con el fin de suavizar los cambios bruscos de nivel producidos por la secuencia de códigos digitales amplificados al convertidor D/A compuesto por valores discretos.

#### **4.1 TIPOS DE SEÑALES**

Para comprender el concepto de un convertidor analógico-digital es conveniente definir los tipos de señales.

Así pues una señal analógica es aquella que a pesar de su origen es una sucesión infinita de puntos dentro de un intervalo, no importa lo pequeño que sea el intervalo. Por ejemplo, dentro de un voltaje comprendido entre 1V y 2V se encuentran un número infinito de puntos, tales como 1.2V, 1.2345V ó 1.23456789, todos ellos pertenecientes a una señal analógica.

Por otro lado una señal digital no es infinita dentro de un intervalo. La palabra digital solamente puede cambiar en pasos predefinidos los cuáles son determinados por la resolución del convertidor.

La figura 4.2 muestra una señal analógica y su correspondiente señal digital.<sup>1</sup>

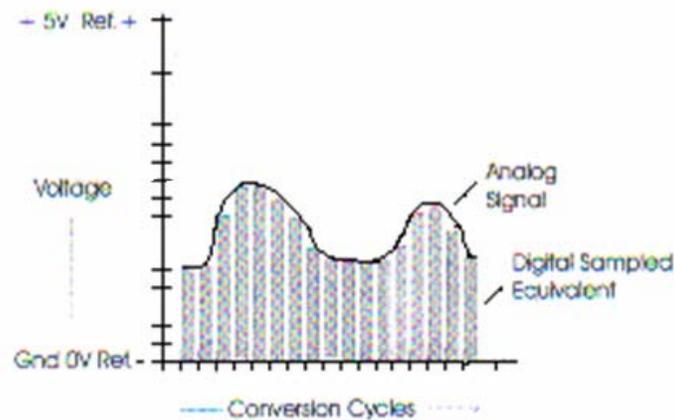


Figura 4.2 Señal analógica y digital

Cada barra representa un voltaje específico el cual puede estar por encima o por debajo del voltaje real dependiendo de la resolución del convertidor. La resolución del convertidor se puede ver por las marcas del eje vertical.

De la gráfica se puede observar que la palabra digital solamente es tomada una vez por cada ciclo de reloj, en donde cada ciclo de reloj es indicado por las marcas en el eje horizontal. A su vez se observa que entre cada ciclo de muestreo no existe ninguna lectura.

<sup>1</sup> PIC microcontroller Project book. Iovine, John. McGraw-Hill. Segunda edición. Pp.209

## 4.2 TEOREMA DEL MUESTREO

Si una señal analógica tuviese un cambio brusco y rápidamente regresa a su valor anterior, entonces el convertidor no detectará este cambio, y se perderá esta información (figura 4.3)

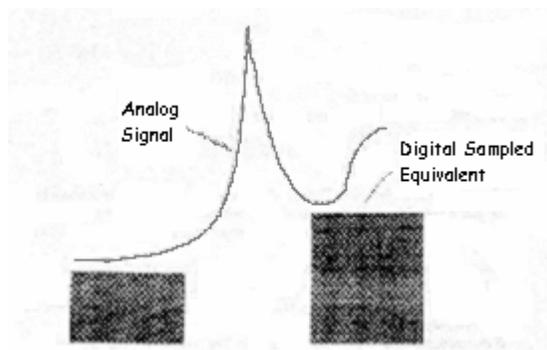


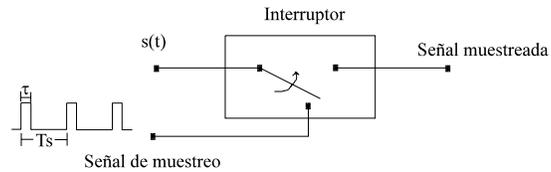
Figura 4.3 Teorema del muestreo

El muestreo se trata de una técnica que consiste en tomar una serie de muestras de la amplitud instantánea de la señal a intervalos regulares de tiempo obteniendo de este modo una serie de pulsos modulados en amplitud

El teorema del muestreo o teorema de Nyquist indica que si una señal continua  $s(t)$ , tiene una banda de frecuencia tal que  $f_m$  sea la mayor frecuencia comprendida dentro de dicha banda, dicha señal podrá reconstruirse sin distorsión a partir de muestras de la señal tomadas a una frecuencia  $f_s$ , siendo

$$f_s \geq 2f_m$$

En la figura 4.4 se muestra un esquema simplificado del proceso de muestreo



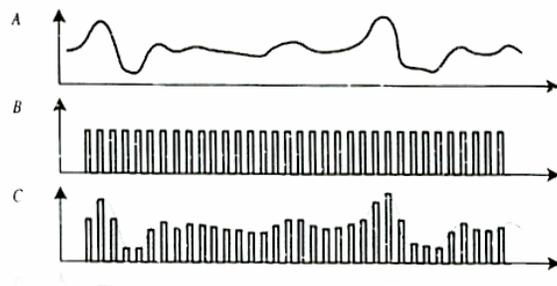
**Figura 4.4** Proceso de muestreo

Con referencia a la figura 4.4, el interruptor no es de tipo mecánico, puesto que por lo general,  $f_s$  es de un valor alto. Suelen emplearse transistores de efecto de campo como interruptores, para cumplir los requerimientos que se les exigen entre los que se encuentran:

- 1) una elevada resistencia al aislamiento cuando los interruptores (transistores) están desconectados
- 2) una baja resistencia si los interruptores están conectados o cerrados
- 3) una elevada velocidad de conmutación entre los dos estados de los interruptores.

En la figura 4.5 se ofrecen las formas de onda de las tres señales principales:

- a) Señal a muestrear
- b) Señal muestreadora
- c) Señal muestreada



**Figura 4.5** Señal muestreada

### 4.3 CUANTIFICACION Y CODIFICACION

La cuantificación de una señal consiste en la conversión de la señal, que puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo, en otra cuyos valores son discretos, o sea, varía a incrementos fijos. Esto quiere decir, que se asigna un mismo valor a todas las señales cuya magnitud se encuentre comprendida dentro de un intervalo, que constituye el *escalón de cuantificación*.

Para cuantificar una señal son necesarios dos procesos. El primero consiste en muestrear la señal continua, obteniendo una señal discreta en el tiempo, con variación continua de magnitud. El muestreo es necesario, porque el proceso de la cuantificación requiere cierto tiempo y si la señal que entra al cuantificador fuese continua en el tiempo, sería imposible para éste realizar su cometido. El segundo proceso consiste en la cuantificación propiamente dicha

En la figura 4.6 representa una función de transferencia ideal del cuantificador.

En donde se observan las siguientes características:

- Existen niveles de decisión ( $-3q/2$ ,  $-q/2$ ,  $+q/2$ ,  $+3q/2$ , etc).
- A los valores comprendidos entre dos niveles consecutivos se les asigna un valor intermedio fijo.
- La distancia entre niveles consecutivos de decisión es  $\Delta V = cte$ .

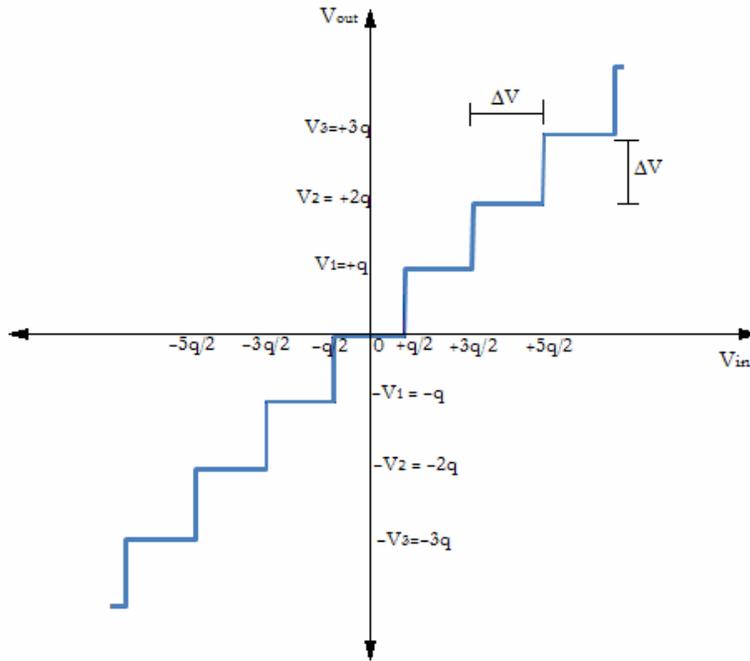


Figura 4.6 Escalón de cuantificación

El error de cuantificación tiene la forma de diente de sierra, como se muestra en la siguiente figura.

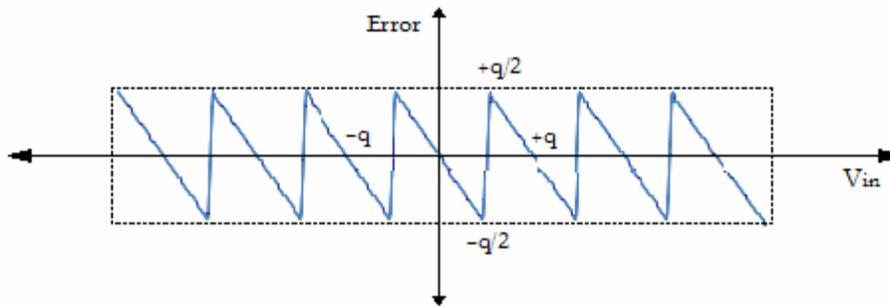


Figura 4.7 Error de cuantificación

El error de cuantificación será tanto mayor, cuanto mayor sea el desnivel de los escalones de cuantificación. Por lo tanto, para alcanzar un error pequeño hay que recurrir a un elevado número de niveles con la consiguiente complicación de los circuitos.

Si se pretende cuantificar una señal con un margen pico a pico  $M$ , usando  $p$  niveles de cuantificación, el tamaño del escalón  $\Delta V$ , se determina mediante la siguiente ecuación:

$$M = \Delta V * p$$

El proceso de codificación consiste en asignar un código digital a cada uno de los niveles de salida del cuantificador.

Para codificar estos  $p$  niveles a un sistema binario de numeración, se necesitan al menos, un número de dígitos tal que cumpla la siguiente relación

$$p \leq 2^n$$

Donde  $n$  es el número de bits

En resumen, para que una señal analógica pueda ser procesada por un sistema automático debe pasar por las tres fases siguientes: muestreo, cuantificación y codificación. Así se consigue la traducción a lenguaje maquina (binario) de la señal analógica.

#### **4.4 CONVERTIDOR A/D DE APROXIMACIONES SUCESIVAS**

Un método para generar una palabra digital a partir de un voltaje analógico es emplear aproximaciones sucesivas.

Cuando se asignan números binarios a diversos niveles de voltaje empezando con el voltaje más bajo (todos 0) y contando hacia el más alto (todos 1), es posible usar las propiedades básicas de las secuencias binarias para simplificar la conversión. El *bit más significativo* en el número binario indica si el voltaje está en la mitad superior o inferior del intervalo. El

siguiente bit divide este medio intervalo a la mitad y así sucesivamente. Esto es equivalente a la observación de que en un contador binario cada bit está oscilando a la mitad de la frecuencia del bit previo. La conversión se logra entonces mediante una serie de comparaciones con los puntos de cada división.<sup>2</sup>

En la figura 4.8 se muestra el esquema fundamental de este tipo de convertidor

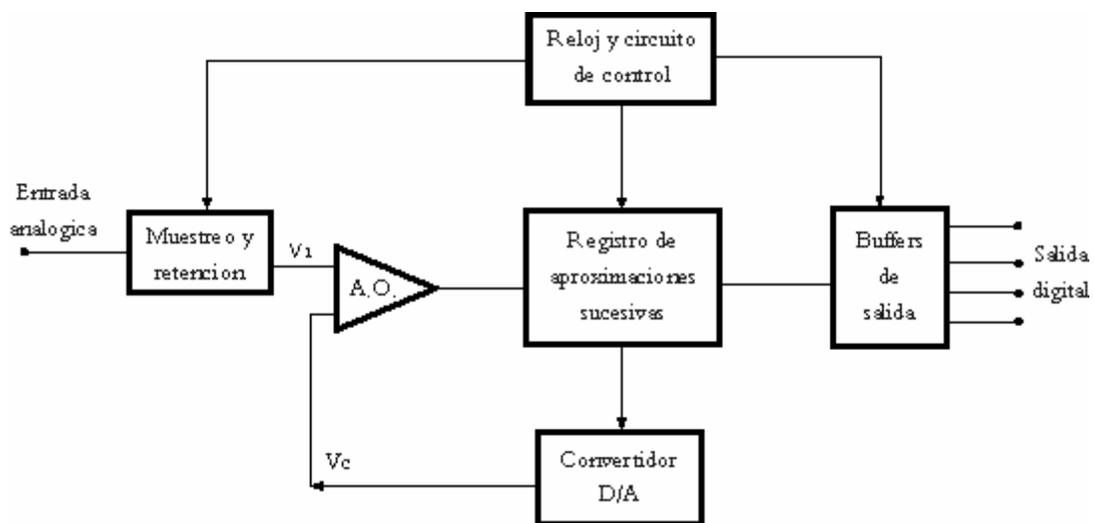


Figura 4.8 Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas

<sup>2</sup> Diseño electrónico. Savant Jr. Prentice Hall. 3ra Edición.. Pp.748

## 4.5 ESPECIFICACIONES Y DISEÑO DEL CONVERTIDOR A/D

El voltaje de referencia en un convertidor analógico-digital establece la correspondencia entre la máxima palabra digital con el valor de tensión establecido como referencia. Para el caso del microcontrolador PIC16F73, el voltaje de referencia es seleccionable por software, ya sea a través del voltaje de alimentación ( $V_{DD}$ ), o bien a través de un nivel de tensión por medio del pin RA3/ $V_{REF}$ .

La selección del voltaje de referencia se obtiene mediante la configuración del registro ADCON1 del microcontrolador (Figura 4.9). Además mediante este registro se establece el tipo de entrada para el puerto del convertidor, las cuales pueden ser entradas analógicas o digitales.

REGISTER 11-2: ADCON1 REGISTER (ADDRESS 9Fh)

U-0	U-0	U-0	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	—	—	—	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7					bit 0		

bit 7-3 Unimplemented: Read as '0'

bit 2-0 PCFG2:PCFG0: A/D Port Configuration Control bits

PCFG2:PCFG0	RA0	RA1	RA2	RA5	RA3	RE0 <sup>(1)</sup>	RE1 <sup>(1)</sup>	RE2 <sup>(1)</sup>	VREF
000	A	A	A	A	A	A	A	A	$V_{DD}$
001	A	A	A	A	$V_{REF}$	A	A	A	RA3
010	A	A	A	A	A	D	D	D	$V_{DD}$
011	A	A	A	A	$V_{REF}$	D	D	D	RA3
100	A	A	D	D	A	D	D	D	$V_{DD}$
101	A	A	D	D	$V_{REF}$	D	D	D	RA3
11x	D	D	D	D	D	D	D	D	$V_{DD}$

A = Analog input

D = Digital I/O

**Note 1:** RE0, RE1 and RE2 are implemented on the PIC16F74/77 only.

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

- n = Value at POR reset

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

Figura 4.9 Registro ADCON1

Para esta aplicación ADCON1 tomará el valor binario de 00000000b el cual corresponde a entradas analógicas en el puerto, mientras que el voltaje de referencia será tomado de la tensión de alimentación, es decir de la fuente de 5V.

El número de bits del convertidor es otro factor importante para el diseño de un convertidor, ya que de esto depende la resolución de la conversión. Cabe señalar que el microcontrolador PIC16F73 utiliza un convertidor de 8 bits, es decir que se pueden obtener 256 palabras diferentes.

La resolución de un convertidor depende de la tensión de referencia y del número de bits del convertidor, y está dada mediante la siguiente ecuación

$$res = \frac{V_{ref}}{2^n - 1}$$

Donde Vref es el voltaje de referencia y n es el número de bits del convertidor.

Volviendo al convertidor a diseñar, la resolución del convertidor será de 0.019V, es decir que por cada 0.019V existirá un cambio en la palabra binaria, en donde 0V equivale a 00000000b y de modo contrario 5V equivale a 11111111b.

La señal de pH se amplifica con el fin de obtener una señal lo más cercana posible al intervalo comprendido entre los 0V y los 5V, y utilizar de esta manera el mismo voltaje de

alimentación. Una vez que la señal sea convertida a una palabra digital, entonces será enviada a través del puerto serie hacia un transmisor de radiofrecuencia.

El microcontrolador PIC16F73 incluye un módulo de conversión de señales, el cual será utilizado al mismo tiempo que el módulo de transmisión serie para obtener un sistema completo.

Estos dispositivos pueden ser programados mediante el lenguaje ensamblador o bien a través de un lenguaje de alto nivel, el cual es compilado para generar el código hexadecimal utilizado por todos los microcontroladores.

A través del compilador PICBASIC Plus 1.24 es posible programar en lenguaje BASIC para crear las funciones y declaraciones de los módulos correspondientes.

La principal función para realizar la conversión es la función ADIN la cual lee la información (analógica) en un puerto y realiza la conversión digital.

A diferencia del lenguaje ensamblador, el lenguaje BASIC realiza la conversión mediante la función ADIN, cuya sintaxis es la siguiente:

$$\textit{Variable} = \textit{ADIN Puerto}$$

En donde “*Variable*” es una variable definida por el usuario, en la cual queda almacenada la palabra digital obtenida luego de la conversión.

Por otro lado, “*Puerto*” puede ser una constante o una expresión variable, la cual define la señal de entrada.

La configuración del convertidor está dada por las siguientes declaraciones:

**DECLARE ADIN\_RES**

**DECLARE ADIN\_TAD**

**DECLARE ADIN\_STIME**

**DECLARE ADIN\_RES 8, 10 ó 12.**

Configura el número de bits de la palabra digital.

**DECLARE ADIN\_TAD 2\_FOSC, 8\_FOSC, 32\_FOSC ó FRC.**

Configura la fuente de reloj del convertidor A/D. Todos los PIC's tienen cuatro opciones para la fuente de reloj utilizada por el convertidor A/D: 2\_FOSC, 8\_FOSC, y 32\_FOSC, las cuales son tasas de un oscilador externo; mientras que FRC es el oscilador interno RC.

Esta declaración corresponde a los bits 7-6 en el registro ADCON0.

Es necesario tener cuidado en esta declaración, ya que un tipo equivocado en la fuente de reloj puede causar una baja resolución o bien, que no se realice la conversión en su totalidad. El uso del parámetro FRC producirá una pequeña reducción en la resolución y una conversión rápida, sin embargo se garantiza la conversión desde la primera muestra, por tal motivo FRC es el parámetro predeterminado en dado caso de que la declaración no fuese mencionada.

**DECLARE ADIN\_STIME 0 to 65535 microseconds ( $\mu$ s).**

Esta declaración configura el tiempo de carga del capacitor interno antes de que sea tomada una muestra. Esto puede ser un valor entre 0 y 65535 microsegundos ( $\mu$ s).

Un valor muy chico puede causar una reducción en la resolución, mientras que un valor muy grande causará una lenta conversión sin que se llegue a alcanzar una extra resolución.

El valor recomendado para ADIN\_STIME se encuentra entre 50 y 100. Esto permite adecuar el tiempo de carga sin perder velocidad de conversión.

En caso de no utilizar esta declaración, se utiliza el valor de 50 como parámetro predeterminado.

Con base a las declaraciones analizadas el código para configurar el convertidor A/D es el siguiente:

```
***** DECLARACION ADC *****
```

```
    DECLARE ADIN_RES 8
    DECLARE ADIN_TAD FRC
    DECLARE ADIN_STIME 50
    TRISA = %11111111
    ADCON1 = %00000000
```

```
INICIO: TEMP = ADIN 0
```

```
    DELAYMS 250
    GOTO INICIO
```

Mediante la declaración anterior se ha establecido la resolución del convertidor de 8 bits, el reloj interno del convertidor se tomará del oscilador RC interno del microcontrolador PIC para obtener una conversión rápida, así mismo se configuró el tiempo de carga del capacitor interno a 50µs.

A través del registro ADCON1 se le indica al microcontrolador que las señales de entrada en el puerto A serán señales analógicas, así mismo que el voltaje de referencia será tomado de la misma alimentación Vcc.

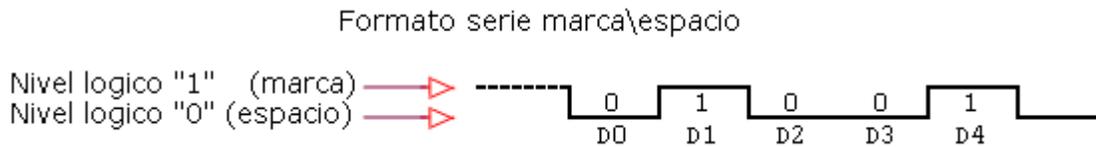
Como ya se revisó, la conversión es realizada mediante la función ADIN. El programa anterior recibe una señal analógica a través del pin 0 del puerto A, realiza la conversión de la señal por medio de aproximaciones sucesivas. La palabra hexadecimal la guarda en la variable TEMP. Posteriormente espera 250ms antes de hacer una nueva conversión.

***CAPITULO V***  
***TRANSMISION DE DATOS***  
***POR PUERTO SERIE***

La comunicación tipo serie es aquella en la cual la información es enviada un bit detrás de otro, lo que hace que sean mucho más lentas que la comunicación tipo paralelo en las que se transmiten varios bits a la vez. La ventaja es que puede utilizarse un solo par de líneas, o incluso una sola.

Dentro de las múltiples posibilidades existentes nos centraremos en la comunicación serie a través de la interpretación de dos niveles lógicos de tensión o corriente denominado *formato marca/espacio*.

El nivel lógico "1" representa un estado de tensión o corriente denominado marca, el nivel lógico "0" representa un estado de tensión o corriente denominado espacio (Figura 5.1)



**Figura 5.1** Formato serie marca\espacio

## 5.1 TIPOS DE TRANSMISIÓN SERIE

La transmisión serie se puede presentar en 2 formatos, los cuales se describen a continuación.

**Síncrona:** Es aquella en la cual los dispositivos que se comunican son sincronizados en el momento inicial de la transmisión y constantemente se intercambian información. Con objeto de mantener la sincronización, cuando no existen datos que enviar se transmite caracteres sin valor (idle characters). Esta transmisión es más rápida que la asíncrona porque no es necesario transmitir señales de inicio o fin de dato.

**Asíncrona:** En este modo de transmisión no existe sincronización; no es necesario enviar caracteres de relleno, pero hay que indicar cuando empieza un dato y cuando termina. Esto se hace incluyendo señales de inicio y fin de dato. En la comunicación asíncrona, la información es enviada en el interior de un cuadro (Frame) de tamaño variable, que comienza con la mencionada señal de inicio y termina con la de final; es el tipo de comunicación utilizada en los puertos serie del PC.

La característica fundamental de este modo de transmisión es la capacidad de manejar datos en tiempo real, con un intervalo de longitud arbitraria entre caracteres sucesivos. Al final de cada carácter, la línea va a 1 en el bit de parada y permanece en ese estado durante un número arbitrario de bits ociosos. El inicio del nuevo carácter estará definido por la transición a 0 del bit de inicio. Figura 5.2

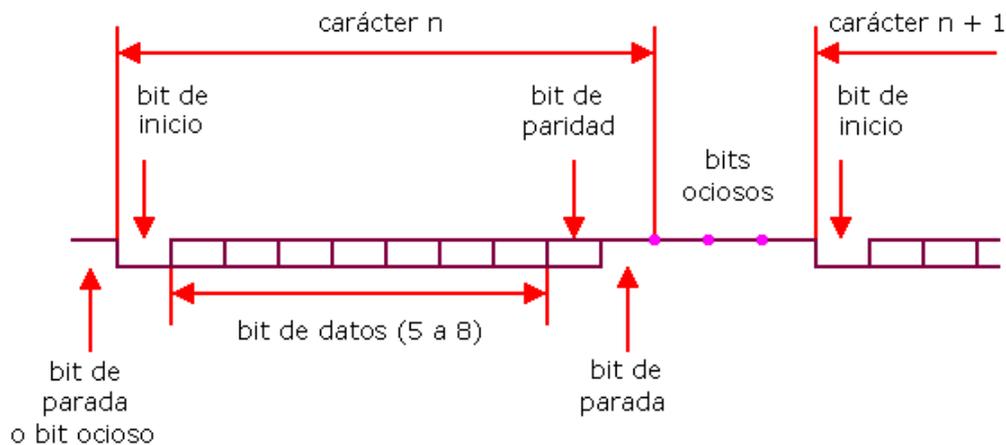


Figura 5.2 Transmisión serie asincrónica

## 5.2 PARAMETROS DE LA TRANSMISION SERIE

Con frecuencia suelen expresarse estos datos en forma resumida. Por ejemplo: **1200 8 N 1** para indicar una transmisión de 1200 baudios con 8 bits de datos sin paridad y un bit de Stop.

Los parámetros anteriores están relacionados con la forma en que se transmite la información serie. En esta comunicación cada carácter va incluido en un cuadro (Frame);

generalmente el comienzo es un bit de inicio (siempre un 1); después le sigue el dato, que puede ser de 5 a 8 bits de longitud; después puede haber un bit de control de paridad, y por último un bit final (siempre es un 1) de longitud variable (el equivalente a 1, 1.5 o 2 bits).

Los parámetros que caracterizan estas comunicaciones son:

- Velocidad
- Paridad
- Bits de datos
- Bits de parada

**Velocidad de transmisión** es la cantidad de datos transmitidos en unidad de tiempo.

La velocidad de transmisión de datos es expresada en bits sobre segundo o baudios. El baudio es un concepto más general que bit sobre segundo.

El primero queda definido como el número de estados de la señal por segundo, si sólo existe dos estados (que pueden ser representados por un bit, que identifica dos unidades de información) entonces baudio es equivalente a bit por segundo. Baudio y bit por segundo se diferencian cuando es necesario más de un bit para representar más de dos estados de la señal.

La velocidad de transmisión queda básicamente establecida por el reloj. Su misión es examinar o muestrear continuamente la línea para detectar la presencia o ausencia de los niveles de señal ya predefinidos. El reloj sincroniza además todos los componentes internos.

**Longitud del carácter.** Se han utilizado caracteres de 5, 6, 7 y 8 bits, aunque actualmente los datos son enviados como caracteres ASCII, por lo que pueden utilizarse 7 u 8 bits según se trate del juego de caracteres US-ASCII o el extendido. El conjunto de bits que componen un carácter se denominan *bits de dato*.

**Paridad.** Para poder comprobar la calidad de la transmisión se suele utilizar un sistema de control de paridad que añade un bit a los bits de datos.

Los sistemas utilizados son:

- Paridad par ("**E**ven")
- Paridad impar ("**O**dd")
- Paridad marca ("**M**arck")
- Paridad espacio ("**S**pace")
- Sin paridad (no se añade ningún bit de paridad al datagrama)

Los sistemas de paridad **par** e **impar** se ha explicado al tratar de la memoria; ambos métodos cuentan el número de unos contenidos en los bits de datos y añade un uno o un cero según el resultado. Por su parte la paridad **Marca** indica que se incluirá siempre una marca (bit de valor "1") como bit de paridad, mientras que la paridad **Espacio** añade siempre un espacio ("0").

Evidentemente estos dos últimos sistemas no aportan absolutamente ninguna información, por lo que son usados muy raramente.

La velocidad y el modo de transmisión son determinados configurando la tasa de transmisión y el modo de transmisión de datos. En general el modo de 7 bits y 1 bit de

paridad es utilizado para información de texto (7E), y el modo de 8 bits sin bit de paridad (8N) es orientado para transmitir un byte de datos. Este último modo de operación es el más utilizado aun y en transmisión de texto. La finalidad de la mayoría de los dispositivos que utilizan 7 bits es para aprovechar la ventaja del bit de paridad y poder detectar errores en la transmisión, pero el usarlo implica la pérdida de un bit. Es por eso que cuando se transmite en el modo 7E solamente se pueden representar valores de 0 a 127, mientras que con el modo 8N se representan los valores de 0 a 255.

**Bits de parada.** Después que se envía un carácter se envía un bit de parada, que tienen el valor "1" (marca); la duración de este bit puede ser 1, 1.5 o 2 periodos.

### 5.3 DISEÑO DEL TRANSMISOR SERIE

Como ya se ha analizado anteriormente, el microcontrolador PIC es un dispositivo que además de contener un módulo ADC, algunos modelos soportan un módulo de transmisión de datos, es por eso que se analizará la configuración de dicho módulo a través del compilador PICBASIC PLUS.

La función principal para la transmisión de datos en forma asíncrona es la función **RSOUT**, la cual envía uno o más elementos por un pin determinado, a una velocidad de transmisión determinada, sin bit de paridad y con un bit de parada.

La sintaxis de esta función es:

RSOUT *dato* {*dato...*}

Donde *dato* es la palabra binaria que será transmitida.

Existen cuatro declaraciones para configurar el modo de transmisión serie asíncrono, las cuales son:

**DECLARE RSOUT\_PIN PORT.PIN**

Asigna el puerto y el pin que serán utilizados como salida de la transmisión serie.

**DECLARE RSOUT\_MODE INVERTED , TRUE or 1 , 0**

Establece el modo en el que serán transmitidos los datos. Estos pueden ser en modo inverso o directo. O bien, un valor de 1 puede ser sustituido para representar un modo inverso, o un valor de 0 para designar el modo directo.

**DECLARE SERIAL\_BAUD 0 to 65535 bps (baud)**

Por medio de esta declaración se programa la velocidad de transmisión a la cual se envía la información. Dado el intervalo que abarca esta declaración se pueden tomar diferentes velocidades de transmisión, sin embargo existen valores estándar, los cuales son de 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, and 19200.

Cuando se utiliza un cristal de 4MHz, la máxima velocidad de transmisión que se puede alcanzar es de 9600 bps. Sin embargo, si se incrementa la velocidad del oscilador entonces se podrá utilizar una velocidad de transmisión mayor, incluso de 38400 bps.

El valor predeterminado para esta declaración es de 9600, el cuál es la velocidad de transmisión que se tendrá en caso de omitir la declaración.

### **DECLARE RSOUT\_PACE 0 to 65535 microseconds ( $\mu$ s)**

A través de esta declaración es posible que se obtenga un retraso entre los caracteres transmitidos con el comando RSOUT.

En ocasiones, los caracteres transmitidos en modo serie son difíciles de recibir por el receptor dada la velocidad con la que llegan y las operaciones que realiza el receptor, lo cual lleva a una pérdida de caracteres. Para corregir esto es necesario que se implemente un tiempo entre la transmisión de cada caracter.

El valor predeterminado para esta declaración es de 0 microsegundos, es decir que si se omite esta declaración se enviaría un bit de inicio, 8 bits de datos, un bit de parada e inmediatamente un nuevo bit de inicio.

La configuración del módulo de comunicación serie desarrollado en PICBASIC PLUS para la implementación de la transmisión serie al módulo de radiofrecuencia es el siguiente:

```
'***** DECLARACION COMUNICACION SERIAL *****'
```

```
DECLARE RSOUT_PIN PORTC.6
```

```
DECLARE RSOUT_MODE TRUE
```

```
DECLARE SERIAL_BAUD 19200
```

```
DECLARE RSOUT_PACE 500
```

```
INICIO:    TEMP = ADIN 0  
  
          RSOUT TEMP  
  
          DELAYMS 250  
  
          GOTO INICIO
```

En este programa se ha configurado la salida a través del pin 6 del puerto C, un tipo de transmisión directa, una tasa de transmisión de 19200 bps (dado que es la velocidad que soporta el módulo de radiofrecuencia ER400TS) y un tiempo entre caracteres de 500µs.

El programa toma una entrada analógica y realiza la conversión digital.

Una vez que se realiza la conversión se obtiene una palabra hexadecimal de 8 bits correspondiente a la señal de pH, la cuál es almacenada en la variable TEMP.

Posteriormente la información guardada en el registro TEMP es enviada a través del pin 6 del puerto C con un formato de transmisión serie asíncrona.

Cuando la palabra digital es enviada el microcontrolador espera 250ms para volver a hacer una nueva conversión y enviar un nuevo dato.

***CAPITULO VI***  
***TRANSMISION DE LA SEÑAL***  
***POR RADIOFRECUENCIA***

Los sistemas de comunicación juegan un papel fundamental en el mundo moderno en la transmisión de información entre la gente, los sistemas y las computadoras.

En términos generales un sistema de comunicaciones digitales está formado por un mensaje de entrada, ya sea voz, audio, video, imagen, o alguna señal de temperatura o presión.

Este mensaje es transformado a una señal eléctrica mediante un transductor, y posteriormente convertido en una señal digital mediante un convertidor analógico-digital, la cual se enviará a través de un sistema de comunicación digital.

### **6.1 PROPAGACION DE LA SEÑAL**

La característica fundamental de las redes inalámbricas, al margen de cuál sea su aplicación, y que las diferencia de cualquier otro tipo de red, es que el medio de transmisión

empleado es el aire. En las redes inalámbricas la información a transmitir se convierte, mediante el tratamiento adecuado, en una señal eléctrica que será radiada por una antena en el transmisor y captada en el extremo receptor de otra antena.

La propagación de las señales de radio está influida por una serie de factores. A estas frecuencias, las paredes, los suelos y otros obstáculos tienden a reflejar la señal y el ruido de fondo dificulta el proceso de la demodulación. Todo ello, junto con los efectos de las sombras, hacen que las características del canal de radio varíen dinámicamente con el tiempo. Este comportamiento tan complejo hace muy difícil el cálculo de un rango de alcance máximo que sirva como base para establecer un área de cobertura bien definida.

La potencia transmitida es una medida de la fuerza con la que se produce la transmisión. Resulta obvio que, cuanto mayor sea la potencia transmitida tanto mayor será el alcance de la señal y así fácilmente se distinguirá entre señal útil y ruido pero, como contrapartida, menor será la vida de la batería puesto que se consumirá más energía.

Una vez que la señal ha sido transmitida, viaja por el aire hasta alcanzar el receptor. Durante su viaje, la señal va perdiendo potencia debido, fundamentalmente, a dos efectos: La propia propagación de la señal y los obstáculos que ésta encuentra en su camino. Además, la señal se refleja en dichos obstáculos de manera que la señal recibida es la suma de la señal original junto con sus versiones retardadas fruto de dichas reflexiones (propagación multicamino). El resultado es que el receptor trabajará con un nivel de señal menor que el de la transmitida. Debido a las limitaciones del equipo receptor, existe un

valor mínimo de la potencia recibida requerido por éste para demodular la señal y que recibe el nombre de sensibilidad del receptor.

La relación señal a ruido (SNR) define la diferencia de potencia entre los niveles de ambos. Durante el proceso de decodificación es necesaria una relación señal a ruido mínima, que viene fijada por la sensibilidad del receptor.

## **6.2 SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL**

Un sistema digital es la transmisión de información por medio de señales y sistemas digitales.

La figura 6.1 representa el diagrama de bloques de un sistema de comunicación digital, en donde el sistema codifica, encripta y modula una señal para poder ser transmitida a través de un canal de transmisión.

Luego viene el proceso inverso, es decir la entrada de la señal a un receptor, el cual reprocesa la señal, trata de corregir los deterioros en la información ocasionada en el trayecto. El receptor desencripta, decodifica, filtra y amplifica la señal. Este procesamiento es necesario por varias razones. En particular, es común que cualquier canal de comunicación específico tenga asociado un intervalo de frecuencia, a través del cual la señal se puede transmitir en condiciones óptimas y fuera del cual la comunicación se degrada en gran medida o resulta imposible.

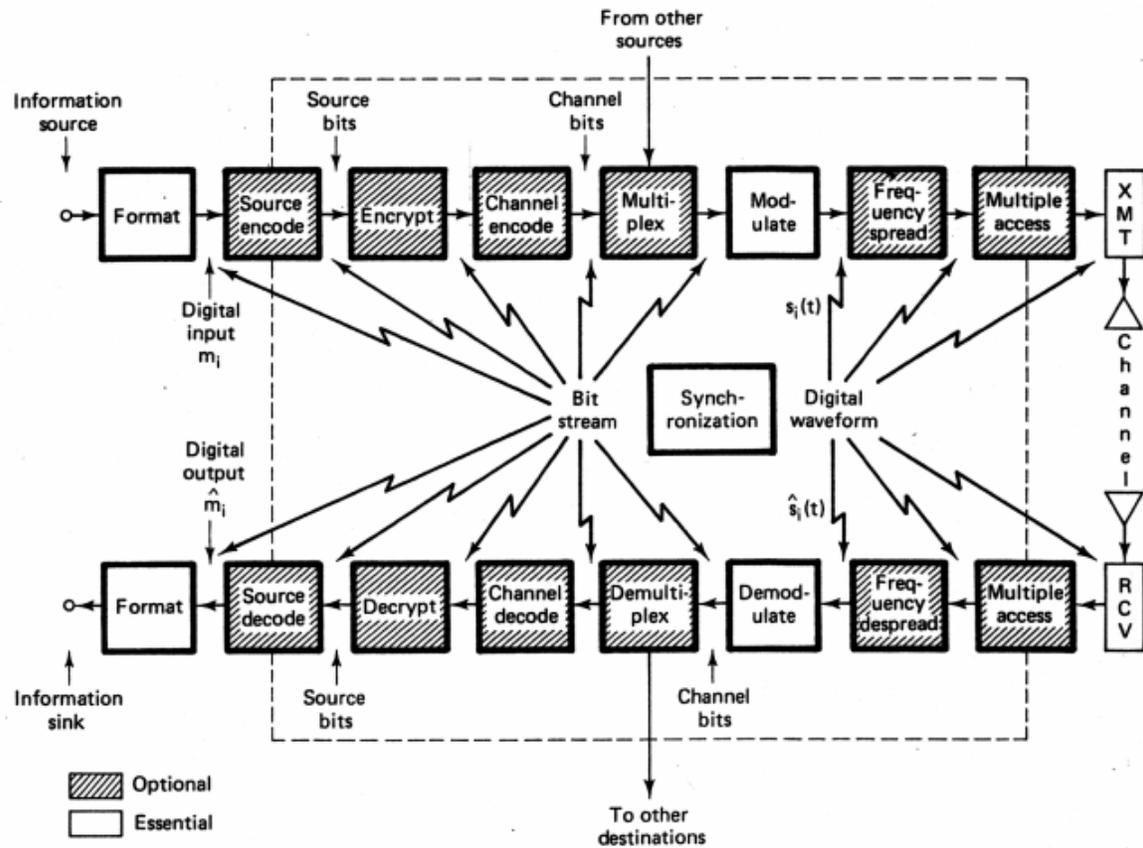


Figura 6.1 Sistema de comunicación digital

Cuando el enlace es a través de radio, el modulador es indispensable para, mediante una portadora, acondicionar la señal digital y transmitirla por radio analógico. El convertidor digital-analógico del receptor regresa la señal a su forma digital original.

La propiedad que distingue a un sistema de radio digital de un sistema de radio convencional de AM o FM consiste en que en el sistema de radio digital las señales moduladoras y demoduladoras son pulsos digitales en lugar de formas de onda analógicas. El radio digital emplea portadoras analógicas tal y como lo hacen los sistemas convencionales.

Existen tres técnicas de modulación digital:

- Modulación por desplazamiento de amplitud (ASK)
- Modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK)
- Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

### 6.3 MODULACION DIGITAL

Se denomina modulación, a la operación mediante la cual ciertas características de una onda denominada portadora, se modifican en función de otra denominada moduladora, que contiene información, para que esta última pueda ser transmitida. Así pues, la modulación digital es el proceso por medio del cual una palabra digital es transformada en formas de onda que son compatibles con las características de una canal de transmisión.

La onda en condiciones de ser transmitida. Se denomina señal modulada.

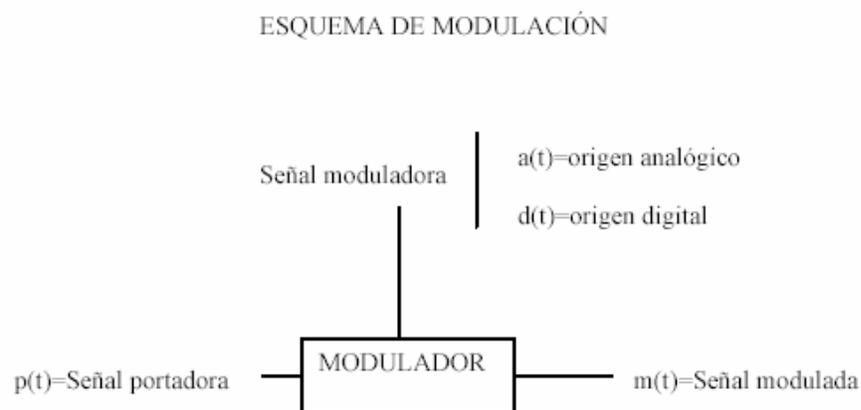


Figura 6.2 Esquema de modulación

El propósito de modular una señal para su transmisión se debe a que la transmisión de un campo electromagnético a través del aire se complica en el diseño de antenas. Para obtener una transmisión eficiente, la antena debe ser tan grande como la longitud de onda de la señal transmitida.

La longitud de onda de una señal se expresa como

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde c es la velocidad de la luz y f la frecuencia de la señal transmitida.

De la ecuación anterior se observa que a mayores frecuencias, la longitud de onda de la señal es menor, reduciendo de esta manera las dimensiones de la antena.

Por medio de la modulación se puede colocar una señal dentro de una banda de frecuencia dados los requerimientos del sistema de comunicación.

El proceso inverso, que consiste en separar de la señal modulada, la onda que contiene solamente la información, se llama demodulación.

La modificación debe hacerse de tal forma, que la información no se altere en ninguna parte del proceso.

### 6.3.1 MODULACION POR DESPLAZAMIENTO DE AMPLITUD (ASK)

Se denomina modulación en amplitud, a aquella en la que la amplitud de la portadora varía de acuerdo a la fuente binaria, es la amplitud como se muestra en la figura 6.3.

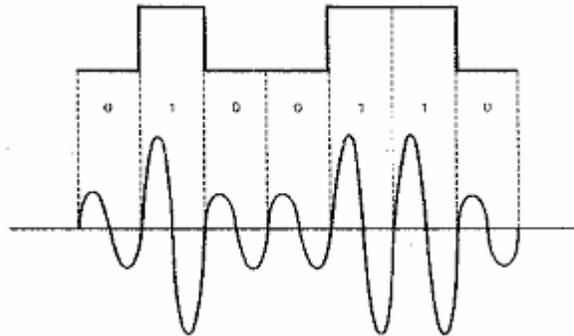


Figura 6.3 Modulación ASK

Este tipo de modulación está representado por la función

$$s(t) = Am(t)\cos \omega_c t$$

Donde  $m(t)$  corresponde a una constante dependiendo del valor binario y  $\omega_c$  representa la frecuencia de la portadora.

Existen dos tipos de modulación en amplitud:

- Por variación de nivel de la onda portadora. Es aquella en la cual  $m(t)$  toma 2 valores diferentes entre sí y a su vez diferentes de cero, de tal manera que la amplitud es diferente para 2 estados lógicos.

- Por supresión de onda portadora. Es aquella en la que  $m(t)$  toma el valor de cero para un estado lógico bajo.

### 6.3.2 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA (FSK)

Se denomina modulación desplazamiento por frecuencia (FSK), a aquella en la cual el parámetro de la señal senoidal de la portadora que se hace variar, es la frecuencia.

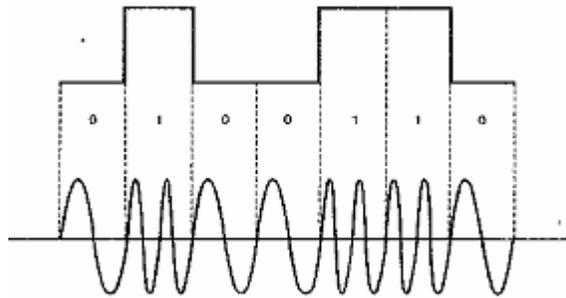


Figura 6.4 Modulación FSK

Cuando la señal moduladora es de origen digital, la señal modulada tomará un número discreto de valores de la frecuencia, iguales al número de valores que correspondan a la señal moduladora.

Esta es la primera técnica que se implementó en términos prácticos, para modular señales digitales de datos (mediante normas internacionales). En la actualidad si bien no es usada con exclusividad en los sistemas de transmisión de datos, se continúa empleando en radiocomunicaciones (en estaciones de radiodifusión pública).

La señal modulada para un sistema FSK es representada por

$$s_1(t) = A \cos \omega_1 t$$
$$s_0(t) = A \cos \omega_0 t$$

Para un valor lógico de 1 y 0 respectivamente.

Otra opción de representar las formas de onda de esta modulación se obtiene sustituyendo

$$f_i = f_c - \Delta f \quad y \quad f_o = f_c + \Delta f$$

de tal manera que

$$s_1(t) = A \cos(\omega_c - \Delta \omega)t$$
$$s_0(t) = A \cos(\omega_c + \Delta \omega)t$$

Donde  $\Delta f$  es la desviación en frecuencia.

### 6.3.2.1 MODULADOR Y DEMODULADOR FSK

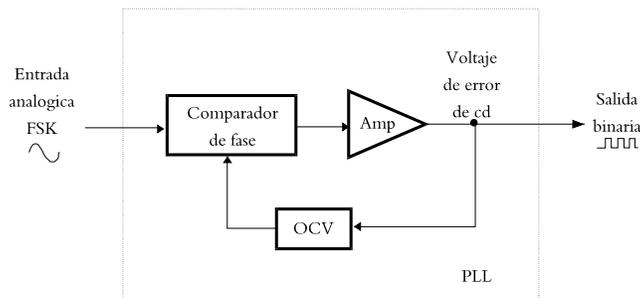
Con frecuencia, la FSK se genera con un oscilador controlado por voltaje (OCV) como se muestra en la figura 6.5.



Figura 6.5 Modulador FSK

El circuito más común para la demodulación de señales FSK es el circuito de fase fija (PLL) que se ilustra en la figura 6.6. El demodulador PLL-FSK opera de manera muy similar al demodulador PLL-FM. A medida que la entrada del PLL cambia entre  $f_m$  y  $f_c$ , el

voltaje de error de cd en la salida del comparador de fase cambia en concordancia. Como sólo existen dos frecuencias de entrada, sólo existen dos voltajes de error de salida, uno representa el 1 lógico y otro al 0 lógico. Así, la salida es la representación de dos niveles (binaria) de la entrada FSK. Por lo general la frecuencia natural del PLL se hace igual a la frecuencia central del modulador FSK. Como resultado los cambios en el voltaje de error de cd siguen a los cambios de frecuencia en la entrada analógica y son simétricos con respecto a 0V.



**Figura 6.6** Demodulador FSK

FSK representa un comportamiento de error más pobre que PSK. Su utilización se restringe a los módems de datos síncronos de costo y desempeño bajos que se emplean para la comunicación de datos sobre líneas telefónicas en la banda de voz.

### 6.3.3 MODULACIÓN POR DESPLAZAMIENTO DE FASE (PSK)

En este tipo de modulación la fase de la portadora varía de acuerdo al estado lógico de la señal moduladora.

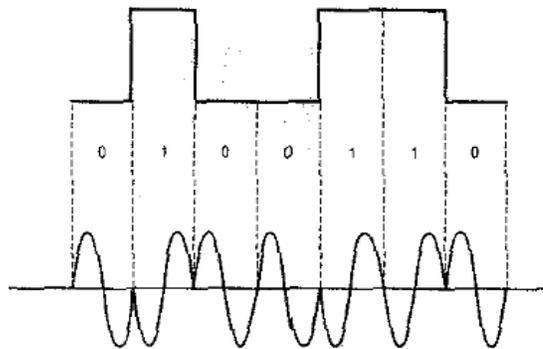
Para una transmisión binaria la fase de la portadora es desplazada  $180^\circ$  para representar un estado lógico alto y es llamada **Modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK)**.

La forma de onda de una modulación BPSK está dada por la siguiente ecuación

$$s(t) = \pm A \cos \omega_c t$$
$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \phi_j)$$

Donde  $\phi_j$  toma el valor de  $0$  ó  $\pi$ .

En la figura 6.7 se representa la forma de onda descrita con la ecuación anterior



**Figura 6.7** Modulación BPSK

Este tipo de modulación, es la más usada para modular señales digitales mediante el uso de modem de datos.

## 6.4 TECNICAS DE COMUNICACION

Se pueden establecer canales para la comunicación de acuerdo a tres técnicas:

- a. Simplex
- b. Half duplex
- c. Full duplex

**Simplex:** Es aquella en la cual la comunicación usa una dirección y una línea de comunicación. Siempre existirá un transmisor y un receptor, no ambos.

La ventaja de este sistema consiste en que es necesario sólo un enlace a dos hilos.

La desventaja radica en que el extremo receptor no tiene ninguna forma de avisar al extremo transmisor sobre su estado y sobre la calidad de la información que se recibe. Esta es la razón por la cual, generalmente, no se utiliza.

**Half duplex:** La comunicación serie se establece a través de una sola línea, pero en ambos sentidos.

En un momento el transmisor enviará información y en otro recibirá, por lo que no se puede transferir información en ambos sentidos de forma simultánea.

Este modo permite la transmisión desde el extremo receptor de la información, sobre el estado de dicho receptor y sobre la calidad de la información recibida por lo que permite así la realización de procedimientos de detección y corrección de errores.

**Full duplex:** Se utilizan dos líneas (una transmisora y otra receptora) y se transfiere información en ambos sentidos. La ventaja de este método es que se puede transmitir y recibir información de manera simultánea.

La mayoría de los dispositivos especializados para la comunicación pueden transferir información tanto en full duplex como en half duplex (el modo simplex es un caso especial dentro de half duplex).

## **6.5 MODULO DE RADIOFRECUENCIA EASY-RADIO**

Los módulos de transmisión y recepción de datos Easy-Rdio combinan microcontroladores de baja potencia para producir módulos “inteligentes” que proporcionan un manejo sencillo para la transmisión de datos inalámbricos. Esta transmisión puede ser utilizada para un tipo de control de conmutación (On/off) o bien para enviar y recibir datos en un formato estándar entre sistemas.

El mismo dispositivo se encarga de codificar y decodificar datos en un formato apropiado, para posteriormente ser enviadas a través de una señal de radio. Estos módulos también se encargan de la detección de errores, que nos asegura la integridad del mensaje.

El módulo de radiofrecuencia Easy-Radio se basa en el modo de transmisión FM (FSK) y con un modo de comunicación tipo Half duplex, que en combinación con un microcontrolador y un regulador de voltaje proporcionan la transmisión de datos a través del aire.

La figura 6.8 muestra el diagrama de bloques de estos módulos.

Además de los pines de alimentación (Vcc) y la línea de tierra (Gnd), el transmisor tiene un pin por donde es enviada la información del microcontrolador hacia el transmisor (TXD). Por otro lado el receptor maneja un pin de salida de datos hacia un microcontrolador, un pin indicador de potencia de la señal recibida (RSSI) y tres pines de propósito general de entrada y/o salida (GPIO).

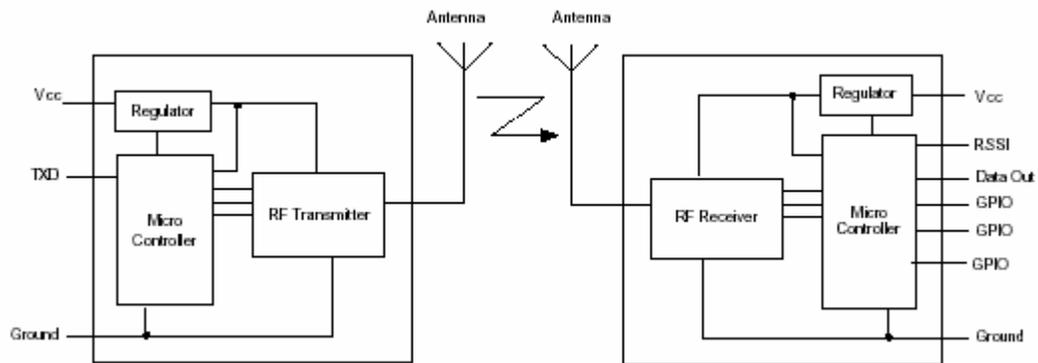


Figura 6.8 Módulo RF Easy-Radio

La figura 6.9 muestra el diagrama de bloques típico de un sistema de comunicación de radiofrecuencia utilizando el módulo Easy-Radio. En donde el sistema B procesa la información que es enviada del sistema A.

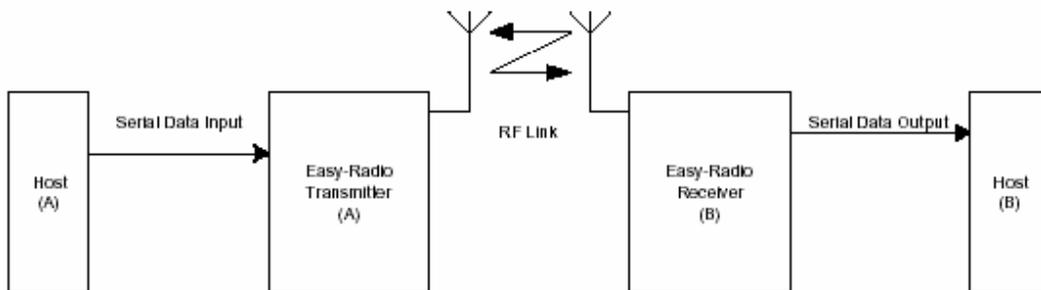
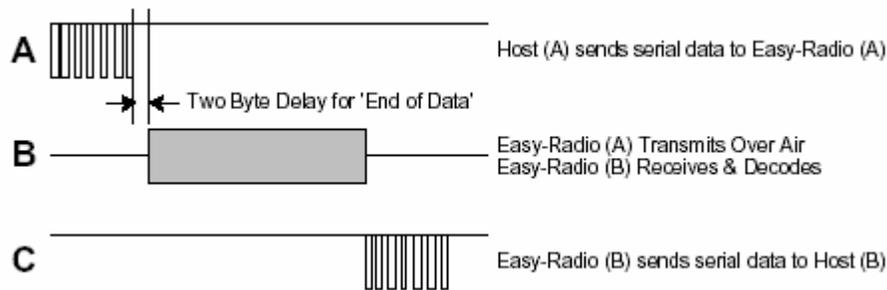


Figura 6.9 Sistema de comunicación Easy-Radio

El Host A debe proporcionar una serie de datos binarios por medio de una comunicación tipo serie al pin de entrada TXD del transmisor. Los datos son codificados y enviados hacia el receptor a través de radiofrecuencia. Una vez que el receptor obtiene la información, ésta es decodificada y enviada al Host B a través de un formato de comunicación serie.



**Figura 6.10** Transmisión de datos Easy-Radio

Como se muestra en la figura 6.10, el modo de operación del módulo Easy-Radio es el siguiente:

- A. El Host A envía datos a través del puerto serie hacia el Transmisor A. Los datos deben ser enviados continuamente a una velocidad de transmisión. Estos datos llenan un buffer interno hasta que se hayan recibido 128 bytes o hasta que se haya detectado un espacio de 2 bytes en blanco.
- B. Cuando se haya detectado ya sea el fin de dato o se haya llenado el buffer del transmisor, el controlador habilita la transmisión en radiofrecuencia y envía un bit de inicio seguido por el dato en el buffer por medio de una codificación tipo Manchester<sup>1</sup> a 19,200 bps para hacer eficiente la transmisión a través de la radiofrecuencia. Cualquier

<sup>1</sup> Tipo de codificación en la cual un nivel lógico alto ó “1” es representado por la transición de un nivel bajo a un nivel alto; mientras que un nivel lógico bajo ó “0” se representa por la transición de un nivel alto a un nivel bajo.

receptor Easy-Radio que se encuentre dentro del intervalo de frecuencia del transmisor detendrá la recepción hasta que haya finalizado de recibir y decodificar el dato para posteriormente colocarlo en el buffer del receptor.

- C. Después de que se haya revisado el dato dentro del buffer del receptor, entonces la información se enviará al Host B a una velocidad de transmisión seleccionada (19200 bps). En este proceso no existe la retroalimentación al transmisor, por lo que el usuario debe asegurar un tiempo suficiente para que se complete el proceso de transmisión y recepción de datos. El transmisor debe permitir un tiempo para que el dato viaje a través del medio de comunicación y sea recibida, posteriormente descargada por el receptor antes de enviar otro dato. Por otro lado el receptor siempre debe estar listo y esperando un dato que descargar para que la transmisión pueda ser llevada a cabo.

***CAPITULO VII***  
***RECEPCION DE LA SEÑAL***  
***POR PUERTO SERIE***

Como ya se analizó en el capítulo anterior, en todo sistema de comunicaciones la señal recibida por el receptor es procesada para poder ser utilizada en algún proceso.

En este caso se pretende monitorear una lectura de pH, por lo que una vez que la señal es enviada entonces será necesario convertir la palabra digital a una variable que indique el valor de pH en la solución que se está analizando.

Desde este punto de vista la recepción de la señal se divide en los siguientes módulos:

- Recepción de datos
- Conversión de la palabra binaria a una señal de pH
- Visualización en un display

De manera similar a la transmisión de un dato por el puerto serie, el compilador PICBASIC PLUS cuenta con la instrucción RSIN para recibir información en formato serie, cuya sintaxis es:

*RSIN VARIABLE*

En donde *VARIABLE* es el nombre de la variable donde será almacenado el dato.

Con base en las especificaciones, el módulo de radiofrecuencia ER400RS-02 entrega una señal digital a través de un formato de comunicación serie asíncrono, dado lo anterior es necesario establecer los parámetros principales como son la velocidad de transmisión, el número de bits del que consta la palabra recibida así como también el retardo para recibir un nuevo carácter. Estos parámetros son configurados mediante las siguientes declaraciones:

**DECLARE RSIN\_PIN PORT.PIN**

Asigna el puerto y el pin por el cual entrará un dato serie a través del comando RSIN.

**DECLARE RSIN\_MODE INVERTED , TRUE or 1 , 0**

Establece el modo en el que serán recibidos los datos. Estos pueden ser en modo inverso o directo. O bien, un valor de 1 puede ser sustituido para representar un modo inverso, o un valor de 0 para designar el modo directo.

### **DECLARE SERIAL\_BAUD 0 to 65535 baud (baud)**

Por medio de esta declaración se programa la velocidad de transmisión con la que es recibida la información.

Cuando se utiliza un cristal de 4MHz, la máxima velocidad de transmisión que se puede alcanzar es de 9600 baud. Sin embargo, si se incrementa la velocidad del oscilador entonces se podrá utilizar una velocidad de transmisión mayor, incluso de 38400 baud.

### **DECLARE RSIN\_TIMEOUT 0 to 65535 milliseconds (ms)**

Establece el tiempo, en milisegundos, que el comando RSIN esperará para detectar un bit de inicio.

De tal manera que el programa para recibir la señal digital quedaría de la siguiente manera:

```
'***** DECLARACION COMUNICACION SERIAL *****'
```

```
DECLARE RSIN_PIN PORTC.7  
DECLARE RSIN_MODE TRUE  
DECLARE SERIAL_BAUD 19200  
DECLARE RSIN_TIMEOUT 100
```

```
INICIO: RSIN TEMP  
GOTO INICIO
```

La declaración anterior configura la recepción de datos a través del pin7 del Puerto C, modo directo para la recepción de un dato de 8 bits, a una velocidad de 19200 baud.

Por otro lado el dato que recibe el microcontrolador es almacenado en la variable TEMP.

## ***CAPITULO VIII***

### ***VISUALIZACION DE LA LECTURA***

Hasta ahora se ha logrado manipular una señal de pH y enviar su correspondiente palabra digital, sin embargo no se ha logrado el monitoreo de una señal ya que el microcontrolador solamente detecta una señal digital proporcional a la medición de pH.

Como se manejó al principio de este texto, el pH presenta un comportamiento inversamente proporcional al milivoltaje generado por el electrodo.

Aun y después de realizada la transmisión se obtiene la linealidad en la curva de pH. Por lo que para establecer el modelo matemático que rige el comportamiento de la medición es necesario establecer la pendiente y la ordenada al origen de la curva.

Con base en la ganancia del amplificador de 5.8 y considerando un diodo zener de 2.4V, se tienen las siguientes magnitudes en tensión

pH	Volts
0	4.8
7	2.4
14	0.0

Como se analizó anteriormente, la resolución está dada por la siguiente expresión.

$$res = \frac{V_{ref}}{2^n - 1}$$

por lo que la resolución del convertidor es igual a

$$res = \frac{5}{2^8 - 1} = 0.01960784$$

Conociendo la resolución del convertidor es posible deducir el valor que arroja el convertidor a los niveles de tensión analizados.

pH	Volts	Bin	Dec
0	4.8	1111 0100	244
7	2.4	0111 1010	122
14	0.0	0000 0000	0

Con base en la tabla anterior es posible calcular los parámetros involucrados en el modelo matemático que caracterizan la curva de calibración; en donde la variable independiente estará dada por la variable DEC, el cual corresponde al valor decimal que recibe el microcontrolador.

Utilizando la fórmula general de una recta

$$y = mx + b_0$$

y sustituyendo por las variables de la recta de pH se tiene

$$pH = m \cdot DEC + b_0$$

resolviendo el sistema de ecuaciones para los datos obtenidos anteriormente se tiene que la pendiente y la ordenada al origen son iguales a:

$$m = -0.0573 \left[ \frac{pH}{V} \right]$$
$$b_0 = 14.000$$

Por lo que la función a programar será:

$$PH = 14.000 - 0.0573 \cdot TEMP$$

En donde PH es una variable que almacena el valor registrado de pH, mientras que TEMP es la variable que almacena el valor decimal recibido.

Hasta ahora se ha desarrollado un módulo de comunicación digital, el cual es capaz de registrar el pH de una solución analizada. Sin embargo esta señal puede ser manipulada de

acuerdo a diferentes aplicaciones, tal como pudiera ser el control de un sistema de riego o bien el monitoreo a través de una central en una planta de tratamiento de agua.

Dado el alcance de este proyecto se analizará el monitoreo a través de una pantalla LCD. Así pues una pantalla LCD (Liquid Crystal Display) se trata de un sistema eléctrico de presentación de datos formado por 2 capas conductoras transparentes y en medio un material especial cristalino que tiene la capacidad de orientar la luz a su paso.

Cada LCD se compone de una pequeña placa integrada que consta de:

- La propia pantalla LCD.
- Un microcontrolador.
- Una pequeña memoria que contiene una tabla de caracteres.
- Una interfaz de contactos eléctricos, para conexión externa.
- Opcionalmente, una luz trasera para iluminar la pantalla.

El controlador simplifica el uso del LCD proporcionando una serie de funciones básicas que se invocan mediante el interfaz eléctrico, destacando:

- La escritura de caracteres en la pantalla.
- La posición de un cursor.
- El desplazamiento horizontal de los caracteres de la pantalla (*scrolling*).

La memoria implementa un mapa de bits para cada carácter de un juego de caracteres, es decir, cada octeto de esta memoria describe los pixeles que deben iluminarse para representar un carácter en la pantalla. Generalmente se pueden definir caracteres

modificando el contenido de esta memoria. Así es posible mostrar símbolos que no están originalmente contemplados en el juego de caracteres.

La interfaz de contactos eléctricos suele ser de tipo paralelo, donde varias señales eléctricas simultáneas indican la función que debe ejecutar el controlador junto con sus parámetros.

Por tanto, se requiere cierta sincronización entre estas señales eléctricas.

La luz trasera facilita la lectura de la pantalla LCD en cualquier condición de iluminación ambiental.

Existen dos tipos de pantallas LCD en el mercado: pantallas de texto y pantallas gráficas.

La pantalla LCD de texto (figura 8.1) está basada en un controlador **Hitachi HD44780** y se ha convertido en un estándar de industria cuyas especificaciones funcionales son imitadas por la mayoría de los fabricantes.

Este controlador cuenta con las siguientes interfaces eléctricas:

- **D0-D7**: ocho señales eléctricas que componen un bus de datos.
- **R/W**: una señal que indica si se desea leer o escribir en la pantalla.
- **RS**: una señal que indica si los datos presentes en D0-D7 corresponden bien a una instrucción y a sus parámetros.
- **E**: una señal para activar o desactivar la pantalla.
- **V0**: señal eléctrica para determinar el contraste de la pantalla. Generalmente en el rango de cero a cinco volts. Cuando el voltaje es de cero volts se obtienen los puntos más oscuros.
- **Vss y Vdd**: señales de alimentación. Generalmente a cinco volts.



**Figura 8.1** Pantalla LCD de texto

## **8.1 CONFIGURACIÓN DE LA PANTALLA LCD**

Mediante el compilador PIC BASICPLUS es posible configurar la salida de datos a través de un puerto del microcontrolador PIC, para ello se analizarán las seis declaraciones para configurar el dispositivo una pantalla LCD de texto.

### **DECLARE LCD\_TYPE 1 or 0, GRAPHIC or ALPHA**

Esta declaración especifica el tipo de LCD que se utilizará, es decir si será de texto o de gráficos.

### **DECLARE LCD\_DTPIN PORT.PIN**

Asigna el puerto y los pines que proporcionan la línea de datos a la pantalla LCD.

La pantalla LCD puede estar conectada ya sea a un bus de cuatro o de ocho pines dependiendo del modelo del dispositivo.

### **DECLARE LCD\_ENPIN PORT.PIN**

Asigna el puerto y el pin con el cual se habilita el funcionamiento de la pantalla LCD.

### **DECLARE LCD\_RSPIN PORT.PIN**

Asigna el puerto y el pin por medio del cual la pantalla LCD identifica si el dato enviado corresponde a una cadena de caracteres o bien a una instrucción.

### **DECLARE LCD\_INTERFACE 4 or 8**

Indica al compilador si se requiere una interfaz ya sea de 4 bits o una de 8 bits.

### **DECLARE LCD\_LINES 1 , 2 , or 4**

Informa al microcontrolador el número de líneas con las que cuenta la pantalla LCD.

Con base en las declaraciones anteriores se configurará el PIC 16F876A para que despliegue una cadena de caracteres en una pantalla LCD de texto, la cuál constará de 2 líneas de texto y un bus de datos de 4 bits.

Los pines que se utilizan para la configuración serán el puerto B del PIC, en donde el segundo PIN habilita la pantalla LCD y el pin 3 verifica el tipo de dato que envía el microcontrolador, mientras que el carácter a mostrar estará dado por los pines 4, 5, 6 y 7 del mismo puerto.

El código de la configuración mencionada anteriormente se muestra a continuación:

```
'***** DECLARACION DE LCD *****'
```

```
    DECLARE LCD_TYPE ALPHA
    DECLARE LCD_INTERFACE 4
    DECLARE LCD_LINES 2
    DECLARE LCD_RSPIN PORTB.3
    DECLARE LCD_ENPIN PORTB.2
    DECLARE LCD_DTPIN PORTB.4
    CLS
```

```
    TRISB = $80
    PORTB = $00
```

INICIO:

```
    RSIN TEMP
    PH=14.000-0.0573*TEMP

    PRINT AT 1,4,"pH = ",@PH
    PRINT AT 2,1,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32,32
```

## ***CAPITULO IX***

### ***CALIBRACIÓN***

Tomando en cuenta que la respuesta del electrodo varía con el tiempo debido al deterioro físico, es necesario calibrar el equipo de acuerdo a las características físicas del electrodo de medición. Dicho de otra manera se calibrará el equipo de manera trazable a un patrón de referencia. Entendiéndose la trazabilidad como la propiedad de un resultado de medición consistente en poder relacionarlo con los patrones apropiados generalmente internacionales o nacionales por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones.<sup>1</sup>

De acuerdo al vocabulario de términos fundamentales y globales de metrología, la calibración se define como el conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición, o los valores presentados por una medida materializada y los valores conocidos correspondientes de una magnitud de medida.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Norma Oficial Mexicana de Metrología NOM-Z-55-1986. Metrología – Vocabulario de términos fundamentales y generales.

<sup>2</sup> Norma Oficial Mexicana de Metrología NOM-Z-55-1986. Metrología – Vocabulario de términos fundamentales y generales.

De acuerdo a la definición, para un medidor de pH, la calibración es la comparación entre el valor que indica el equipo y el valor conocido. Por lo tanto es necesario contar con un patrón adecuado. Patrón, según el Vocabulario de términos de metrología, es el valor de medición materializado, aparato o sistema de medida con el que se intenta definir, realizar, conservar, o reproducir una unidad física o bien uno o varios valores conocidos de una magnitud con el fin de que sirvan de comparación a otros elementos de medida.<sup>3</sup>

Como el patrón es aquello a lo que se va a comparar una medición, siempre que sea posible se deberán utilizar patrones con elevado nivel metrológico, es decir elevada trazabilidad y baja incertidumbre, de preferencia materiales certificados. Así mismo, se deberá calibrar el instrumento en las mismas condiciones en que se trabaja habitualmente.

La importancia de la calibración reside en que mediante este proceso se puede visualizar el estado del instrumento o sistema en determinado momento, a partir del cual se puede realizar una o varias correcciones para asegurar un correcto funcionamiento.

El medidor de pH puede ser calibrado a un solo punto con el 100% de pendiente o con una calibración de dos puntos relacionando un primer punto de calibración con un segundo mediante un ajuste utilizando el control de pendiente.

El propósito del control de pendiente es proporcionar una lectura lo más cercana posible a la respuesta del electrodo incrementando así la exactitud de las mediciones.

La calibración del medidor de pH se realiza utilizando una serie de soluciones estándares de pH conocidas, o soluciones buffer de pH.

---

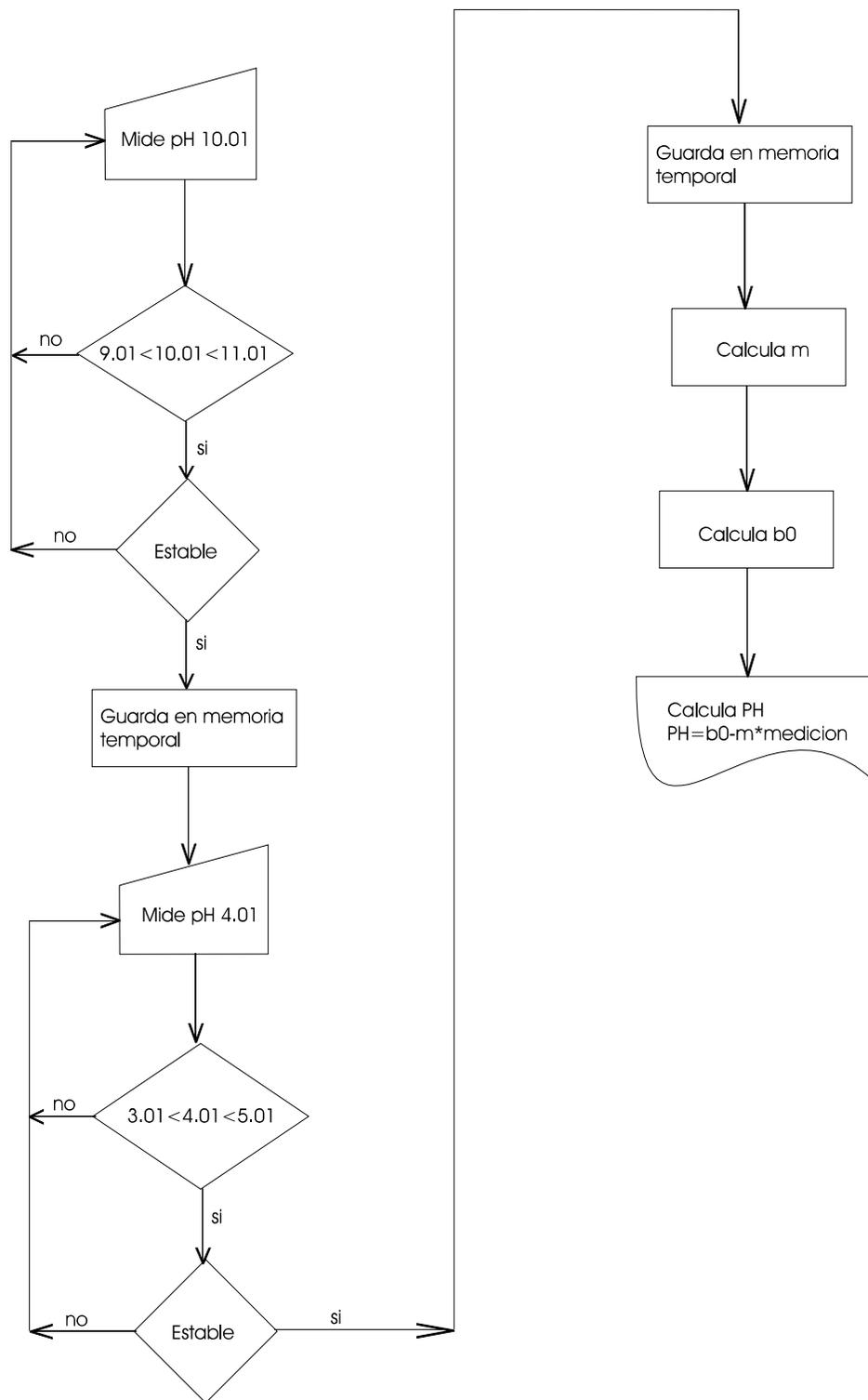
<sup>3</sup> Norma Oficial Mexicana de Metrología NOM-Z-55-1986. Metrología – Vocabulario de términos fundamentales y generales.

La calibración del equipo a diseñar se llevará a cabo mediante una recta entre la sección negativa y la sección positiva, utilizando de esta manera dos soluciones estándares de valor conocido.

En primera instancia se analizará una solución alcalina (buffer pH 10.01), en donde el equipo, de manera automática, reconocerá este valor siempre y cuando se encuentre dentro un intervalo de tolerancia establecido de  $\pm 1.0\text{pH}$ , en donde el equipo reconoce que se encuentre dentro del intervalo de medición así como una lectura estable. Al cumplirse estas dos condiciones el software del equipo realiza un ajuste en este primer punto, posteriormente se analiza una solución alcalina (buffer pH 4.01), en donde se establece el mismo criterio para efectuar el ajuste en un segundo punto.

La estabilidad en la medición se realiza mediante una serie de comparaciones en las lecturas a diferentes periodos de tiempo, las cuales deben ser iguales para garantizar la estabilidad en la medición.

Con base en lo anterior, el diagrama de flujo correspondiente a la calibración queda representado en la figura 10.1



**Figura 9.1** Diagrama de flujo para la calibración

El equipo almacena los valores obtenidos de las soluciones de calibración en dos variables temporales llamadas BIT10 y BIT4 para solución Buffer 10 y solución Buffer 4 respectivamente.

La pendiente y la ordenada al origen se calcularán utilizando un el mismo criterio del cálculo de la pendiente y la ordenada al origen expresado en el capítulo anterior.

El procedimiento para el cálculo de estos parámetros estará dado por las siguientes ecuaciones:

$$m = -\frac{10-4}{BIT_{10} - BIT_4}$$
$$b_0 = 4 + m \cdot BIT_4$$

Estos valores calculados serán guardados dentro de la memoria EEPROM contenido en el mismo microcontrolador PIC con la finalidad de que el equipo guarde la calibración aún y dejando sin alimentación al circuito.

De esta manera cada vez que el equipo realice una medición se tomarán los últimos valores guardados en la memoria EEPROM.

A lo largo del texto se ha enfatizado en el uso del compilador PICBASIC PLUS, esto debido a la capacidad de programar un PIC de una manera más sencilla.

Existen dos instrucciones para configurar la lectura y escritura de la memoria EEPROM.

La escritura de datos se realiza mediante la instrucción EWRITE, cuya sintaxis es la siguiente:

$$\text{EWRITE } \textit{direccion}$$

En donde *direccion* es una constante o variable que indica una localidad de memoria en donde estará contenida el dato a guardar.

De manera análoga la lectura de datos se obtiene mediante la instrucción EREAD, cuya sintaxis es la siguiente:

$$\textit{variable} = \text{EREAD } \textit{direccion}$$

En donde *variable* es la variable definida por el usuario que guardará el dato leído, y en donde *direccion* es la localidad de memoria que leerá el microcontrolador.

De esta manera y con base en el diagrama de flujo para la calibración se obtiene el código BASIC para calibrar el equipo a dos puntos y de manera automática.

' \*\*\*\*\* CALIBRACION \*\*\*\*\*

CALIBRA:

CALPH10: PRINT AT 1,1," CAL BUFFER 10 "

DELAYMS 5000

CALL MIDE

IF PH1=PH2 AND PH2=PH3 THEN

IF PH1>9.0 AND PH1<11 THEN

BIT10=TEMP

ELSE

PRINT AT 1,1," WRONG BUFFER "

DELAYMS 5000

GOTO CALPH10

ENDIF

ELSE

GOTO CALPH10

ENDIF

CALPH4: PRINT AT 1,1," CAL BUFFER 4 "

DELAYMS 15000

CALL MIDE

IF PH1=PH2 AND PH2=PH3 THEN

IF PH1>3.0 AND PH1<5.0 THEN

BIT4=TEMP

ELSE

PRINT AT 1,1," WRONG BUFFER "

DELAYMS 5000

GOTO CALPH4

ENDIF

ELSE

GOTO CALPH4

**ENDIF**

PEND: M0=6/(BIT4-BIT10)  
B0=4+M0\*BIT4  
**EWRITE 1**, [B0]  
**EWRITE 11**, [M0]  
**GOTO INICIO**

LIMPIA: **EWRITE 1**, [14.000]  
**EWRITE 11**, [0.0573]  
**GOTO INICIO**

MIDE: **RSIN TEMP**  
B0 = **ERead 1**  
M0 = **ERead 11**  
PH=B0-M0\*TEMP  
PH1=PH  
**DELAYMS 3000**  
**RSIN TEMP**  
B0 = **ERead 1**  
M0 = **ERead 11**  
PH=B0-M0\*TEMP  
PH2=PH  
**DELAYMS 3000**  
**RSIN TEMP**  
B0 = **ERead 1**  
M0 = **ERead 11**  
PH=B0-M0\*TEMP  
PH3=PH  
**RETURN**

## ***CAPITULO X***

### ***DISEÑO CONCEPTUAL***

Como se comentó en los primeros capítulos, un medidor de pH está formado por un medidor analógico o digital y un par de electrodos, los cuales generan una diferencia de potencial proporcional a la concentración de iones Hidrógeno contenidos en una solución. Dado lo anterior y con base en los capítulos anteriores se diseñará un medidor que cumpla con las especificaciones mínimas para el monitoreo de pH en un proceso industrial.

Gran parte de la instrumentación de proceso para la medición de pH se suministra para un montaje en panel, esto se debe a la necesidad de instalar instrumentos de medición cerca de comandos como interruptores, relés de potencia para el control de bombas dosificadoras o electro-válvulas.

Debido al alcance de este trabajo se enfocará al diseño electrónico del medidor, en donde se realiza el circuito correspondiente a un transmisor y a un receptor de pH con un alcance de 250m con línea de vista. La principal ventaja de este sistema es evitar los problemas que

involucran al cableado, así como el hecho de tener móvil un sistema de monitoreo, en donde el receptor pueda o no estar fijo dentro de un panel.

Mediante el uso de microcontroladores y módulos de transmisión en radiofrecuencia, el diseño de un instrumento de medición se reduce a unos cuantos componentes, lo que beneficia en gran medida el tamaño y al costo del sistema.

En las figuras 10.1 y 10.2 se observa el circuito correspondiente al transmisor y al receptor de pH respectivamente.

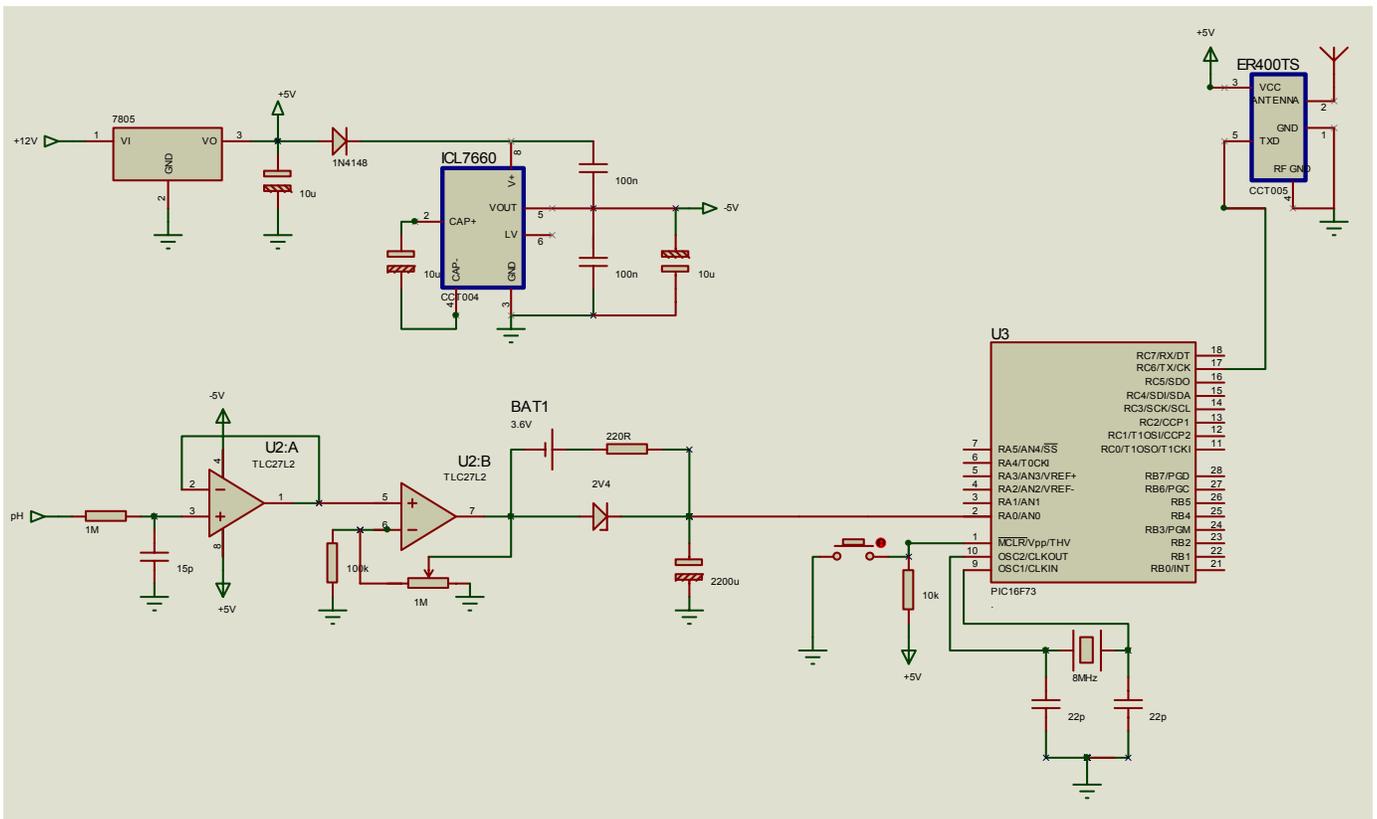


Figura 10.1 Transmisor de pH

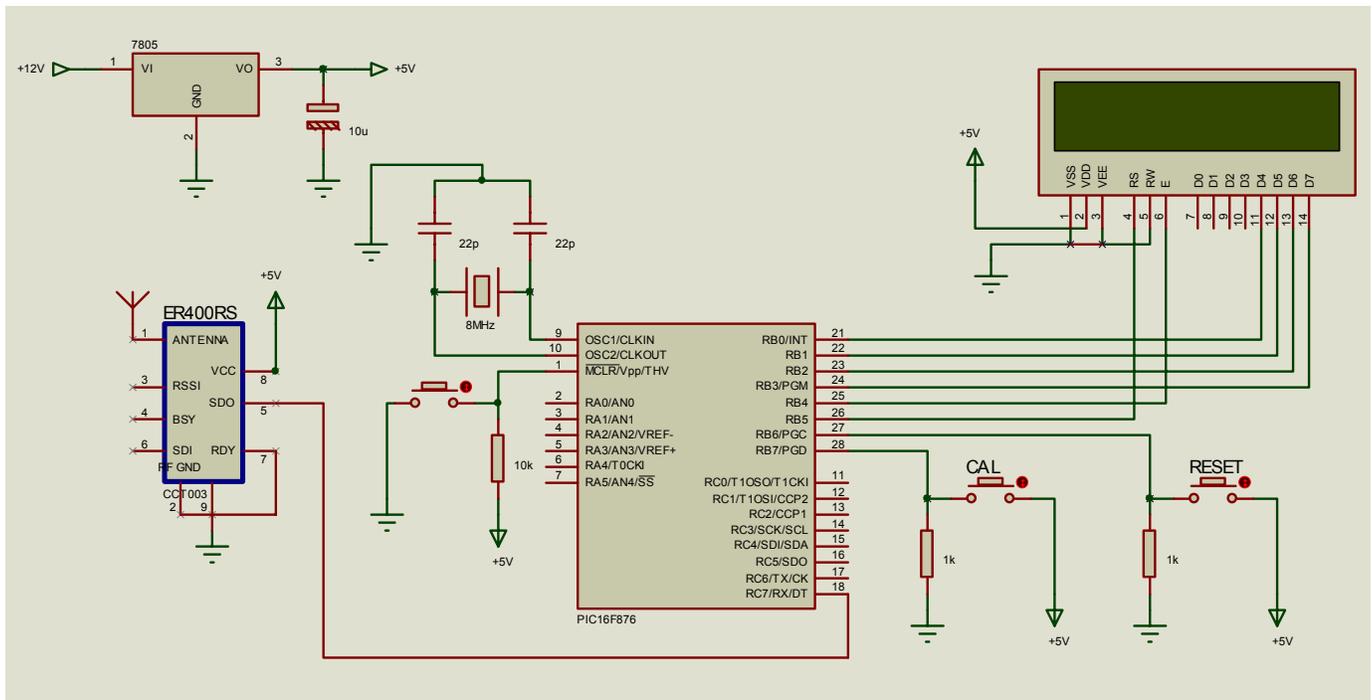
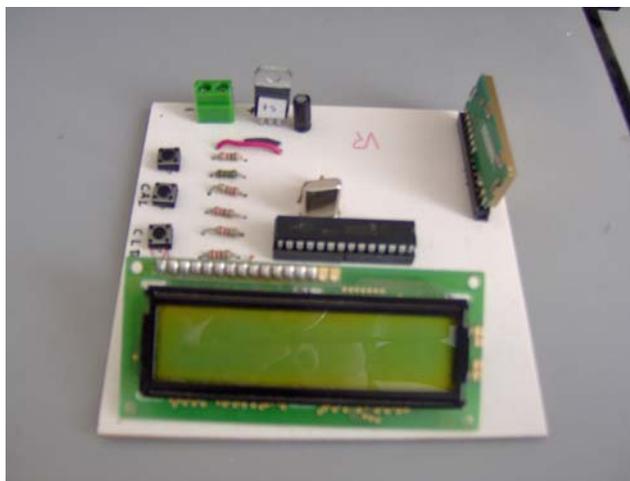


Figura 10.2 Receptor de pH

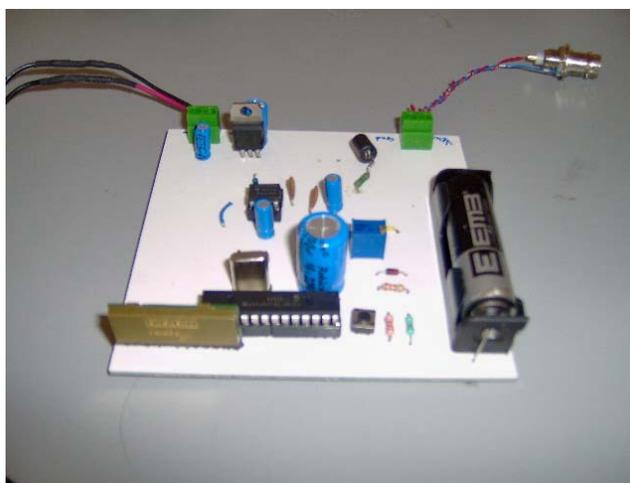
El primer prototipo es desarrollado en placa fenólica de 10cm x 10cm, sin embargo este tamaño se puede reducir mediante el uso de componentes de montaje superficial, lo que beneficia en gran medida la instalación de estos instrumentos.

Así mismo en la figura 10.4 se muestra el receptor, el cual por medio de una pantalla LCD muestra la lectura de pH. Cabe señalar que el primer prototipo tiene la opción de calibrar de manera automática según la solución buffer indicada.



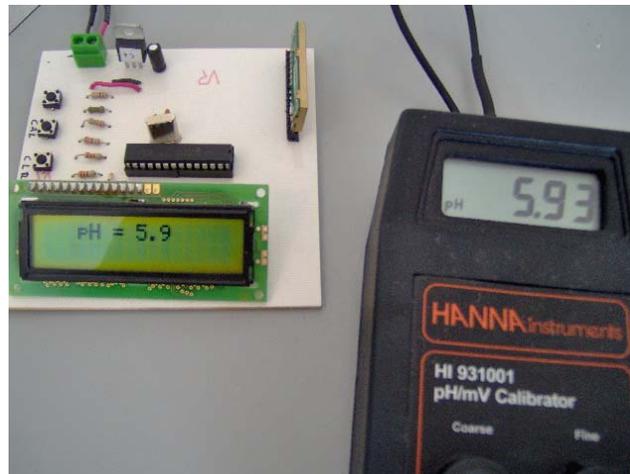
**Figura 10.3** Receptor de pH

El transmisor (figura 10.5) se encarga de tomar la señal de pH, procesarla y enviarla por medio de señales de radio, una característica importante en este dispositivo es que presenta un conector estándar de tipo BNC, lo cual garantiza la compatibilidad de cualquier electrodo sin importar la marca o la aplicación para la cual es diseñado dicho sensor.



**Figura 10.4** Transmisor de pH

En la actualidad las compañías dedicadas a la instrumentación electro-analítica diseñan equipos con una resolución muy amplia, hasta 0.001pH, lo cual en áreas como investigación o laboratorio es de suma importancia, sin embargo en aplicaciones industriales, la resolución mínima debe ser de 0.1pH (figura 10.6).



**Figura 10.5** Resolución

## ***CAPITULO XI***

### ***RESULTADOS***

Finalmente, y teniendo el equipo diseñado físicamente se realizaron diferentes pruebas para verificar su funcionamiento, tiempo de respuesta y exactitud.

La primera prueba es mediante el uso de un simulador de pH modelo HI931001. La prueba consistió en conectar el simulador de pH al equipo diseñado, en donde se analizó la diferencia que existía entre el valor teórico y el valor medido, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

<b>Muestra</b>	<b>PH simulador</b>	<b>PH medido</b>	<b><math>\Delta</math>pH</b>
1	1.00	1.0	0
2	2.00	2.0	0
3	3.00	3.0	0
4	4.00	4.0	0
5	5.00	5.0	0
6	6.00	6.0	0
7	7.00	7.0	0
8	8.00	7.9	0.1

9	9.00	9.0	0
10	10.00	10.0	0
11	11.00	10.9	0.1
12	12.00	12.0	0
13	13.00	12.9	0.1
14	14.00	14.0	0
15	0.00	0.0	0
16	10.06	10.0	0.06
17	6.20	6.2	0
18	4.74	4.8	0.06
19	6.89	6.9	0.01
20	9.75	9.7	0.05
21	13.07	13.0	0.07
22	12.26	12.2	0.06
23	6.14	6.1	0.04
24	4.26	4.2	0.06
25	2.99	3.0	0.01
26	1.71	1.7	0.01
27	0.39	0.4	0.01
28	0.92	0.9	0.02
29	3.28	3.3	0.02
30	5.51	5.5	0.01
31	7.15	7.1	0.05
32	8.94	8.9	0.04
33	10.31	10.2	0.11
34	11.63	11.6	0.03
35	9.19	9.2	0.01
36	8.23	8.2	0.03
37	12.60	12.5	0.1
38	11.15	11.1	0.05
39	9.94	9.9	0.04
40	9.25	9.2	0.05
41	7.73	7.7	0.03
42	7.04	7.0	0.04
43	6.31	6.3	0.01
44	5.37	5.3	0.07
45	4.52	4.5	0.02
46	3.70	3.7	0
47	3.27	3.3	0.03
48	2.83	2.8	0.03
49	1.17	1.2	0.03

50	0.68	0.6	0.08
51	3.65	3.6	0.05
52	6.11	6.1	0.01
53	7.55	7.5	0.05
54	8.99	8.9	0.09
55	10.64	10.6	0.04

Con base en los datos obtenidos se puede observar que el promedio entre la diferencia de un pH teórico y un pH medido durante este muestreo fue de 0.0342, mientras que la máxima diferencia entre el valor teórico y el práctico es de 0.11, por lo que para fines prácticos se puede considerar una exactitud de  $\pm 0.15\text{pH}$ .

La segunda prueba realizada fue con un electrodo de usos generales modelo HI1131B.

La prueba consistió en tomar lecturas de zumo de limón, refresco de cola y leche, así como de las soluciones buffer de pH4.01, pH7.01 y pH10.01.

La prueba se realizó tanto con el equipo calibrado como sin calibrar, y los resultados se muestran a continuación:

<b>Solución</b>	<b>pH teórico</b>	<b>pH medido Sin calibrar</b>	<b>pH medido Calibrado</b>
Buffer pH 4.01	4.01	4.3	4.0
Buffer pH 7.01	7.01	7.1	7.0
Buffer pH 10.01	10.01	9.7	10.0
Zumo de limón	2.4	2.6	2.2
Leche	6.5	6.5	6.3
Refresco de cola	2.5	2.8	2.5

## ***CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS***

El equipo diseñado fue probado en las instalaciones de la empresa Hanna Instruments, la cual se ha mantenido como una de las principales empresas en el ramo de la instrumentación para el análisis de agua.

Las pruebas se realizaron con un simulador de pH modelo HI931001, con el cual se probaron diferentes puntos tanto ácidos como alcalinos, abarcando de esta manera toda la escala de pH.

Además se realizaron pruebas con un electrodo de vidrio de usos generales modelo HI1131B, con el cual se realizó la calibración de las soluciones buffer pH 4.01 y pH 10.01, y comprobando la calibración con la solución buffer pH 7.01.

La prueba principal se presentó con el hecho de tener el transmisor dentro del laboratorio de control de calidad y servicio técnico, mientras que el receptor se encontraba en constante movimiento a través de las instalaciones de la empresa.

Cada cambio de pH realizado con el simulador o bien al cambiar de solución buffer, fue confirmado mediante sistemas de comunicación de telefonía móvil, con lo que se verificaban las lecturas y a su vez se analizaba la estabilidad y la inmunidad al ruido.

Los resultados fueron satisfactorios ya que se cumplió con el objetivo de obtener un sistema confiable de medición para monitorear un proceso a larga distancia.

El sistema de medición diseñado puede ser útil en aplicaciones donde el monitoreo es constante y se presentan las desventajas de tener grandes distancias entre el punto de muestreo y el tablero de control tal como pudiera ser dentro de un invernadero, o bien en aplicaciones donde existe riesgo para el operador tal como en calderas, torres de enfriamiento o en una planta de tratamiento de aguas residuales.

Sin embargo el análisis del pH en procesos productivos no se reduce al monitoreo, ya que si bien es cierto que es de suma importancia tener presente el valor que se obtiene en un momento determinado, también es importante tener el control de éstas variables, y entendiéndose como control a un sistema el cual permita obtener una adquisición de datos para que de manera automática y con base a un algoritmo para la toma de decisiones, el sistema pueda reducir los errores.

Dicho de otra manera, es posible diseñar un sistema el cual detecte el nivel de pH en un proceso y éste pueda ser almacenado como una base de datos en una PC, es decir, crear un sistema de monitoreo con adquisición de datos.

A su vez, es posible crear un sistema con el cual se registren los datos hacia una PC, y en donde el operador pueda, ya sea activar bombas dosificadoras o programar la configuración

para automatizar los puntos de consigna de un sistema de control sin necesidad de realizar estas operaciones *in situ*, es decir se puede establecer un lugar con la infraestructura necesaria para tener un cuarto de monitoreo y control de procesos.

## ***BIBLIOGRAFÍA***

1. Electrónica digital: Introducción a la lógica digital. Acha Alegre, Santiago; Pérez Martínez, Julio. Grupo editor alfaomega S.A. de C.V. México D.F. 2003
2. Electrónica digital moderna. Angulo Usategui, José María. Editorial paraninfo. Tercera edición. España. 1996.
3. Diseño electrónico Circuitos y sistemas. C.J. Savant Jr. Prentice Hall. 3ra edición. 2000.
4. Señales y sistemas. Alan V. Oppenheim. Pearson Educación. Segunda edición. 1997.
5. Digital communications, Fundamentals and applications. Sklar, Bernard. PTR Prentice Hall. USA. 1988.
6. Digital transmission systems. Smith, David R. Kluwer Academic Publishers. 3rd edition. USA. 2004.
7. Comunicaciones II. Comunicación digital y ruido. Herrera Pérez, Enrique. Editorial Limusa. 1ra edición. México. 2002
8. PIC microcontroller Project book. John Iovine. McGraw-Hill. Second edition. 2004.
9. Buenas prácticas de laboratorio en mediciones de pH y conductividad. CENAM; Área de metrología; División de materiales orgánicos. Publicación técnica CNM-MRD-PT-024. Torres Lozano, Maritza. Tercera impresión. México. 2000

10. Instrumentación Química. Strobel, Howard A. Editorial Limusa. Primera reimpresión. México. 1974.
11. Hanna Instruments General Catalog. Volume 26. 2005
12. Convertidor Analógico Digital de rampa discreta. Sánchez Pedro. Electrónica digital II. [www.ece.buap.mx/comunikece/archivos/ADC.pdf](http://www.ece.buap.mx/comunikece/archivos/ADC.pdf)
13. El amplificador operacional. Universidad Nacional Experimental del Táchira. <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/EI%20Amplificador%20Operacional.htm>
14. Sistemas de comunicaciones. Mayné, Jordi. 2004. Silica an avnet division [http://www.bairesrobotics.com.ar/data/Sistemas\\_Comunicaciones\\_r35\\_Silica.pdf](http://www.bairesrobotics.com.ar/data/Sistemas_Comunicaciones_r35_Silica.pdf)
15. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de sistemas electrónicos y de control. Sistemas digitales II. Microprocesadores. Tecnicas de E/S serie. [http://www.sec.upm.es/docencia/plan\\_00/sdii/descarga\\_SDII/curso2002-2003/ES\\_SERIE.pdf](http://www.sec.upm.es/docencia/plan_00/sdii/descarga_SDII/curso2002-2003/ES_SERIE.pdf)
16. Toboso, Emilio. La comunicación serie. Version 2.5. 2006 <http://perso.wanadoo.es/pictob/comserie.htm>
17. Modulación Digital. Jairo Alfonso Ruiz. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2003 <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/jruiz/jairocd/texto/usm/cd/modulacion.pdf>
18. Low Power Radio Solutions Ltd. ERx00-02 Series Data Sheet (Rev 2.3). Reino Unido. 2005.
19. Microchip Technology Inc. PIC16F7x Data Sheet. E.U.A. 2002.
20. Microchip Technology Inc. PIC16F87x Data Sheet. E.U.A. 2001.

21. PROTON+ Compiler Version 1.24x. PICBASIC User's guide. Cambridge, Inglaterra. 2004.
22. ¿Que es el pH?. Aguamarket. 2005  
[http://www.aguamarket.com/sql/temas\\_interes/198.asp](http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/198.asp)