

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE INGENIERÍA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN PARA MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**DARÍO XAVIER NARANJO MURGUEYTIO**

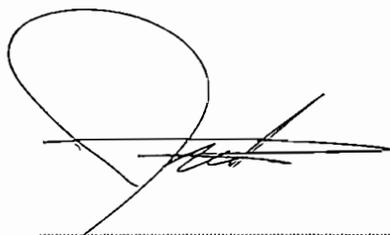
**DIRECTOR: ING. ANA RODAS**

**QUITO, MARZO DEL 2006**

## DECLARACIÓN

Yó, Darío Xavier Naranjo Murgueytio, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized loop on the left and several horizontal strokes on the right, positioned above a dotted line.

**Darío Naranjo Murgueytio**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado en su totalidad por el Sr. Darío Xavier Naranjo Murgueytio, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. RODAS', is written over a horizontal line. The signature is stylized with a large, circular initial 'A'.

Ing. Ana Rodas  
DIRECTOR DE PROYECTO

## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a DIOS, a la Virgen Dolorosa por ampararme,  
a mi familia por su apoyo y paciencia,  
y a todos mis maestros que me transmitieron sus conocimientos.

# ÍNDICE

RESUMEN ..... VIII

PRESENTACIÓN ..... IX

## CAPÍTULO I

### SISTEMAS DE MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

<b>1.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS</b> .....	<b>2</b>
1.2.1	<i>MÉTODOS PARA MEDIR NIVEL DE LÍQUIDOS</i> .....	2
1.2.1.1	Método de columna de vidrio.....	3
1.2.1.2	Método con flotadores .....	4
1.2.1.3	Método de burbujeo .....	5
1.2.1.4	Método de capacitancia.....	7
1.2.1.5	Método de presión relativa.....	8
1.2.1.6	Método de presión diferencial .....	9
1.2.1.7	Método con ultrasonido .....	11
1.2.1.8	Método radioactivo .....	12
1.2.1.9	Determinación mediante peso .....	14
<b>1.3</b>	<b>SISTEMAS DE MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS</b> .....	<b>15</b>
1.3.1	<i>SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN</i> .....	16
1.3.1.1	Rango de medida .....	16
1.3.1.2	Precisión en la medida .....	17
1.3.1.3	Características del líquido .....	18
1.3.1.4	Disposición física del recipiente.....	19
1.3.1.5	Tipo de indicación .....	20
1.3.1.6	Costo del sistema .....	20
1.3.2	<i>ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN</i> .....	21
1.3.2.1	Elemento primario .....	21
1.3.2.2	Acondicionador .....	22
1.3.2.3	Indicador .....	23
1.3.2.4	Registrador .....	24
1.3.2.5	Transmisor.....	25
<b>1.4</b>	<b>MEDICIÓN DE NIVEL DE LECHE</b> .....	<b>26</b>
1.4.1	<i>CONSIDERACIONES</i> .....	26
1.4.1.1	Recipientes de almacenamiento .....	27
1.4.1.2	Densidad y temperatura de la leche.....	28
1.4.1.3	Condiciones de higiene.....	29
1.4.2	<i>PROPUESTA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN</i> .....	30
1.4.2.1	Sensor.....	31
1.4.2.2	Sistema Microprocesado.....	32
1.4.2.3	Transmisor 4-20 mA.....	32

## CAPÍTULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE

<b>2.1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b> .....	<b>34</b>
2.1.1	<i>ETAPA DE ADQUISICIÓN</i> .....	36
2.1.2	<i>ETAPA DEL SISTEMA MICROPROCESADO</i> .....	36
2.1.3	<i>ETAPA DEL TRANSMISOR</i> .....	37
<b>2.2</b>	<b>DISEÑO DE LA ETAPA DE ADQUISICIÓN</b> .....	<b>37</b>
2.2.1	<i>SENSOR</i> .....	38
2.2.2	<i>CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO</i> .....	40
2.2.3	<i>CIRCUITO DE DETECCIÓN DE FALLA</i> .....	42
<b>2.3</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA MICROPROCESADO</b> .....	<b>43</b>
2.3.1	<i>HARDWARE PARA EL PIC</i> .....	46
2.3.2	<i>CIRCUITO DE TECLADO</i> .....	49
2.3.3	<i>MÓDULO LCD</i> .....	50
2.3.4	<i>INDICADORES DISPLAY TIPO LED</i> .....	52
<b>2.4</b>	<b>DISEÑO DEL TRANSMISOR</b> .....	<b>55</b>
2.4.1	<i>GENERACIÓN PWM</i> .....	55
2.4.2	<i>FILTRO BUTTERWORTH</i> .....	57
2.4.3	<i>EL TRANSMISOR DE 4-20 mA</i> .....	60
2.4.4	<i>CIRCUITO INTEGRADO AD694</i> .....	60
2.4.5	<i>DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DEL CJ-AD694</i> .....	63
2.4.5.1	Amplificador Buffer.....	63
2.4.5.2	Convertor Voltaje-Corriente.....	63
2.4.5.3	Generador de offset 4mA.....	64
2.4.5.4	Voltaje de referencia.....	64
2.4.6	<i>DISEÑO DEL CIRCUITO TRANSMISOR</i> .....	64

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DEL SOFTWARE

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>DESARROLLO DEL SOFTWARE</b> .....	<b>69</b>
3.2.1	<i>PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL PIC</i> .....	69
3.2.1.1	Configuración inicial, puertos y registros.....	74
3.2.1.2	Inicialización del módulo LCD.....	78
3.2.1.3	Subrutinas de retardos.....	79
3.2.1.4	Presentación del sistema.....	80
3.2.1.5	Test de sensor y falla.....	81
3.2.1.6	Conversión Analógica Digital.....	82
3.2.1.7	Generación de onda PWM.....	84
3.2.1.8	Determinación de la presión.....	86
3.2.1.9	Lectura de la densidad y determinación de la altura.....	88
3.2.1.10	Lectura del diámetro y determinación del volumen.....	90
3.2.1.11	Determinación del porcentaje de nivel máximo.....	92

3.2.1.12	Separación en dígitos .....	94
3.2.1.13	Indicación en LCD .....	95
3.2.1.14	Indicación en display .....	97
3.2.2	<i>RUTINA PARA INTERRUPCIÓN EXTERNA</i> .....	102
3.2.2.1	Menú 1. Visualizar variable .....	104
3.2.2.2	Menú 2. Cambio de unidades .....	106
3.2.2.3	Menú 3. Ingreso de parámetros .....	110
3.2.2.4	Menú 4. Cambio de clave.....	117
3.2.2.5	Salida y retorno al programa principal.....	120

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1	<b>PRUEBAS Y ANÁLISIS</b> .....	121
4.1.1	<i>PRUEBA DE NIVELES DE VOLTAJE</i> .....	122
4.1.1.1	Prueba de voltaje de entrada al PIC.....	123
4.1.1.2	Prueba de voltaje PWM .....	125
4.1.1.3	Prueba de voltaje de entrada al transmisor.....	127
4.1.2	<i>PRUEBA DE VARIABLES DETERMINADAS</i> .....	129
4.1.2.1	Prueba de presión determinada.....	130
4.1.2.2	Prueba de altura determinada .....	131
4.1.2.3	Prueba de volumen determinado .....	133
4.1.2.4	Prueba de porcentaje de nivel determinado .....	135
4.1.3	<i>PRUEBA DEL TRANSMISOR DE CORRIENTE</i> .....	137
4.1.3.1	Prueba con carga de $68\Omega$ .....	139
4.1.3.2	Prueba con carga de $119\Omega$ .....	140
4.1.3.3	Prueba con carga de $332\Omega$ .....	142
4.1.3.4	Prueba con carga de $465\Omega$ .....	143
4.1.4	<i>PRUEBAS PARA CASOS DE FALLA</i> .....	145
4.1.4.1	Prueba de desconexión del sensor .....	145
4.1.4.2	Prueba de ingreso no autorizado.....	147
4.2	<b>FOTOGRAFÍAS DEL SISTEMA</b> .....	148

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	<b>CONCLUSIONES</b> .....	151
5.2	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	153

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	155
---------------------------	-----

<b>ANEXOS</b> .....	157
---------------------	-----

## RESUMEN

Dentro de los procesos industriales la medición de nivel de líquidos se hace necesaria cuando se pretende tener una producción continua, cuando un proceso requiere de control y medición de volúmenes de líquidos o bien, en el caso más simple, para evitar que un líquido se derrame; necesaria ya sea desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

Medir nivel de líquidos dentro de un recipiente parece una tarea sencilla, pero puede convertirse en un problema más o menos difícil, sobre todo cuando el material es corrosivo o abrasivo, cuando se mantiene a altas presiones, cuando es radioactivo o cuando se encuentra en un recipiente sellado en el que no conviene tener partes móviles o cuando es prácticamente imposible mantenerlas.

La utilización de instrumentos electrónicos con microcontrolador permite añadir "inteligencia" para la determinación de variables que intervienen en procesos industriales, tales como presión, temperatura, o como en este caso nivel de líquido. De esta manera se aplica tecnología que emplea electrónica digital, la misma que sistematiza, mejora y facilita la continuidad en muchos procesos industriales.

El proyecto que aquí se diseña y construye, permite determinar nivel de líquido de manera indirecta, gracias a la determinación directa de presión. El sistema opera a base de microcontroladores y tiene la finalidad de indicar las variables asociadas a la presión y de transmitir esta última para ejercer control de la misma, esto último como posibilidad abierta para proyectos futuros.

El desarrollo del proyecto arroja resultados satisfactorios para los objetivos trazados, consiguiéndose así los valores esperados de presión, volumen, altura, etc. y observándose un comportamiento adecuado del sistema ante escenarios de falla.

## PRESENTACIÓN

El proyecto presenta el diseño y la construcción de un sistema que detecta y transmite la presión ejercida en el fondo de un tanque-silo utilizado para almacenar líquido, como caso específico leche cruda, con la finalidad de conocer su nivel. Para exponer este trabajo lógicamente y adecuadamente se lo ha dividido de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se definen aspectos teóricos acerca de los métodos que existen para la medición de nivel de líquidos, consecuentemente se analizan los sistemas que aplican los mencionados métodos, haciendo énfasis en sistemas para medir nivel de leche; para de esta forma describir conceptos que permitan comprender los principios en los que se basa el proyecto.

En el capítulo 2, se presenta el diseño e implementación de las tarjetas electrónicas que constituyen el hardware del sistema; así como sus partes constitutivas y criterios de diseño aplicados en la elección de los diferentes dispositivos.

En el capítulo 3, se expone el desarrollo de los programas que permiten controlar al sistema mediante rutinas descargadas en el microcontrolador.

El capítulo 4, exhibe las diferentes pruebas realizadas al sistema para verificar el correcto funcionamiento del mismo, además el análisis de diversos resultados obtenidos en cada prueba, los cuales ratifican la justificación del proyecto.

Finalmente el capítulo 5, contiene conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a partir del desarrollo y culminación del proyecto, además de anexos y referencias bibliográficas utilizadas.

# CAPÍTULO I

## SISTEMAS DE MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

### 1.1 ASPECTOS GENERALES

En los diferentes procesos industriales que hoy en día tienden a buscar tecnologías que proporcionen continuidad, automatización de los procesos o sencillamente reducción de operabilidad de los mismos, está la determinación de nivel de líquidos; entre otros fines, para conocer el volumen contenido por un recipiente en un momento dado cuando un proceso requiere de medición y control de volúmenes de líquidos, o simplemente para evitar que un líquido se derrame.

En muchos procesos, monitorear esta variable resulta tan importante como controlarla, sobretodo si de su estado depende la continuidad de la cadena de producción; tal es el caso, entre otros, de la pasteurización de leche de vaca y de la obtención de sus derivados.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesador al medir otras variables, tales como la presión y la temperatura, permite añadir "inteligencia" en la medida de nivel y obtener buenas precisiones en las lecturas, alrededor del 0.2%, proporcionando así confiabilidad en la medida.

Orientado en esta dirección, el objetivo del presente trabajo es el diseño y la construcción de un sistema que permita determinar la cantidad de líquido contenida en tanques de almacenamiento, denominados silos; empleando para esto indirectamente, la determinación de otras variables con las que el nivel tiene estrecha relación, en este caso con la presión en el fondo del silo.

## 1.2 MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

Elegir el método adecuado de medición es un factor muy importante en el momento de proyectar un sistema para medir las variables involucradas en los procesos industriales, entre estas el nivel de líquidos, a fin de cumplir con requerimientos tales como precisión, velocidad de respuesta, rango de medida, etc. Se debe tener especial atención en que el sistema esté acorde a las necesidades del proceso, de manera que no se perjudique la precisión en las fases posteriores, pero que tampoco se sobredimensione a un sistema disconforme en cuanto a la calidad, y por lo tanto en cuanto al costo, sobretodo si de optimizar se trata.

Además, al medir nivel se deben tomar en cuenta ciertos factores, tales como la viscosidad del líquido, tipo de medición deseada, presión si el recipiente está presurizado o no, lo cual trae como consecuencias que existan varios métodos y tipos de instrumentos medidores de nivel.

### 1.2.1 MÉTODOS PARA MEDIR NIVEL DE LÍQUIDOS

El estudio de los principales métodos de medición de nivel resulta indispensable para elegir un método que se adapte mayoritariamente a las necesidades y/o condiciones de operación, de manera que esta elección se constituya en la opción más óptima. Los principales métodos son:

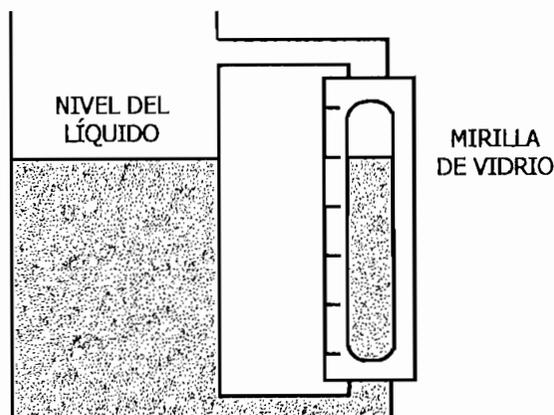
- Método de columna de vidrio
- Método con flotadores
- Método de burbujeo
- Método de capacitancia
- Método de presión relativa
- Método de presión diferencial
- Método con ultrasonido
- Método radioactivo

### 1.2.1.1 Método de columna de vidrio

Este método se usa para depósitos abiertos o cerrados; normalmente la mirilla es de vidrio y mide el nivel de líquido en forma visual aún con fluctuaciones. La mirilla puede estar montada entre dos válvulas, las cuales se utilizan para sacar de servicio al indicador en caso de rotura del cristal o una purga, sin necesidad de parar el proceso.

El nivel de cristal normal se emplea para presiones hasta de 7 kg/cm<sup>2</sup>. A presiones más elevadas el cristal es grueso, de sección rectangular y está protegido por una armadura metálica. La lectura del nivel se efectúa con un cristal a reflexión o bien por transparencia. En el primer caso, el vidrio en contacto con el líquido tiene ranuras longitudinales las que actúan como prismas de reflexión, indicando la zona del líquido con un color oscuro casi negro.

Como desventajas están la susceptibilidad de que los niveles de vidrio se ensucien por las características del líquido y además de que este método permite sólo una indicación local. Su ventaja principal es la gran seguridad que ofrece en la lectura del nivel de líquido. En la Figura 1.1 se grafica el método de columna de vidrio para la medición de nivel de un líquido.



**Figura 1.1** MÉTODO DE COLUMNA DE VIDRIO

### 1.2.1.2 Método con flotadores

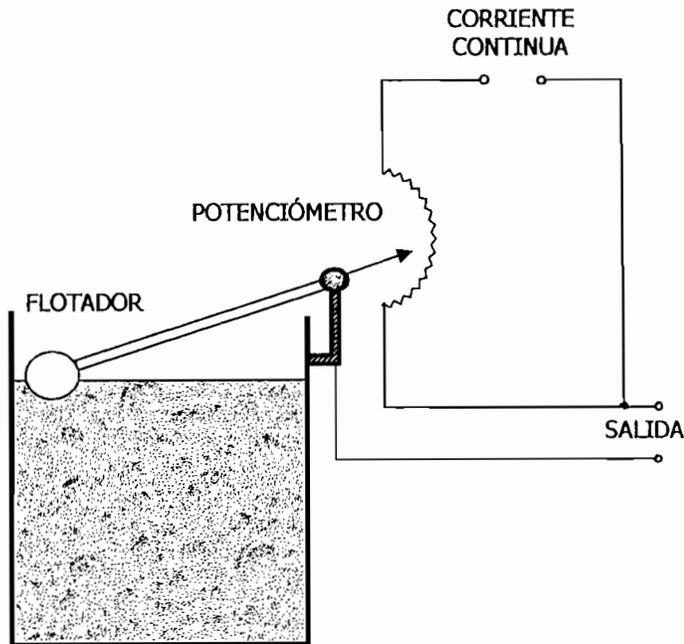
Cuando se necesita una indicación o un registro de la medición se usan métodos que tengan flotador y cinta, en depósitos cerrados, al vacío o bajo presión. Este método de medición utiliza un cuerpo hueco (flotador) el cual flota sobre la superficie del líquido variando su posición de acuerdo a los cambios de nivel, el flotador actúa sobre un indicador por medio de palancas, su rango está limitado por la dimensión del brazo de las palancas.

Se utilizan flotadores con brazo de torsión, flotadores de jaula y flotadores magnéticos, acoplados a dispositivos hidráulicos; el flotador debe ser construido de tal forma que flote dentro del líquido a medir, esto significa que la densidad del flotador debe ser menor a la del líquido que lo sostiene.

En el caso de medición con flotador y cinta, el flotador actúa al mecanismo indicador por medio de una cinta que se enrolla sobre un carrete cilíndrico, un contrapeso mantiene tensa la cinta; usando este método el rango de medición ya no es un limitante.

La rotación del eje se transforma en indicaciones por medios neumáticos, hidráulicos, eléctricos ó electrónicos para usarse en equipos remotos, para convertir el movimiento angular en una señal medible. Los instrumentos de flotador tienen una precisión de  $\pm 0.5\%$ . Como desventajas están el hecho de que las partes están expuestas al fluido y pueden romperse o que el flotador podría agarrotarse en el tubo guía por un eventual depósito de los sólidos o cristales que el líquido pueda contener, además de que los tubos guía muy largos pueden dañarse ante las olas bruscas en la superficie del líquido o ante la caída violenta del líquido en el tanque.

La Figura 1.2 muestra un ejemplo de un sistema de flotador con transmisión electrónica.

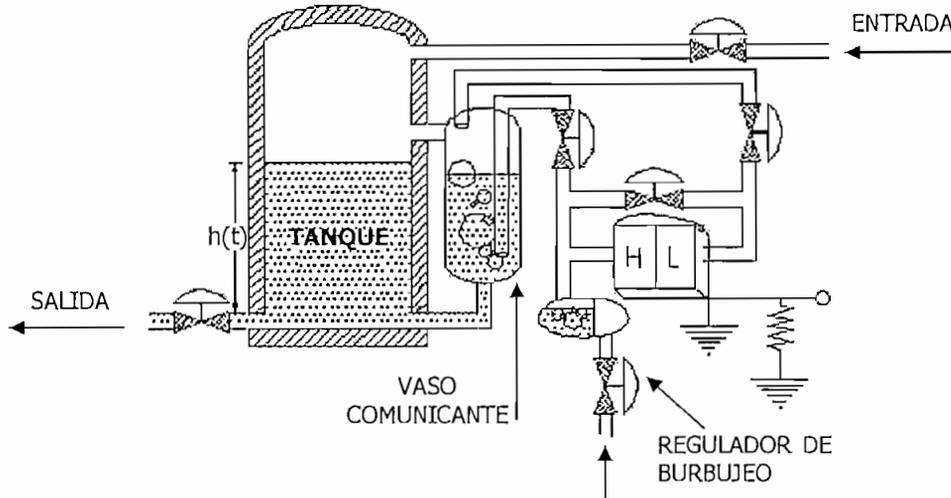


**Figura 1.2** MÉTODO DE FLOTADOR

### 1.2.1.3 Método de burbujeo

Usado en tanques cerrados, se sumerge un tubo dentro de un líquido cuyo nivel se desea medir, luego se le suministra un flujo constante de gas. La presión de gas en el extremo del tubo sumergido es la misma que la presión hidrostática a esa altura, el gas excedente abandona el tubo escapando como burbujas a través del líquido; esta presión se mide con un transmisor de presión diferencial, la corriente de aire es mantenida constante por un regulador, de esta manera se obtiene una indicación correcta incluso en los casos en los cuales el nivel es variable e intranquilo o cuando el líquido es altamente viscoso.

En la Figura 1.3 se muestra un esquema del método de burbujeo para medir el nivel de un líquido.



**Figura 1.3** MÉTODO DE BURBUJEO

El regulador de caudal hace posible mantener un caudal de aire constante a través del líquido, independientemente del nivel (por lo general el caudal es de 150 lts/h); caso contrario, se tendría una gran diferencia entre los caudales de aire necesarios para el nivel mínimo y para el nivel máximo, lo que repercutiría en un gasto de aire indebido.

La tubería empleada suele ser de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, con el extremo biselado para una fácil formación de las burbujas de aire. Al tener tuberías con menor diámetro tipo capilar se reduciría el tiempo de respuesta pero se produciría un error en la medida provocado por la pérdida de carga en el tubo. La presión de aire en la tubería, es decir, el nivel, se mide mediante un manómetro de fuelles cuyo campo de medida corresponde a la presión máxima ejercida por el líquido. El manómetro receptor puede colocarse hasta distancias de 200 metros.

No solo puede utilizarse aire sino también otros tipos de gases e incluso líquido como fluido de purga y que el tubo debe tener una longitud adecuada para evitar que las variaciones bruscas del nivel introduzcan en su interior una cierta columna de líquido que retarde el paso del aire y falsee momentáneamente la lectura.

Este método resulta simple y entrega buenos resultados, específicamente para líquidos muy corrosivos o con sólidos en suspensión y en emulsiones. No es recomendable utilizar este método si el fluido de purga perjudica al líquido y para fluidos altamente viscosos donde las burbujas formadas del aire o del gas de purga presentan el riesgo de no separarse rápidamente del tubo.

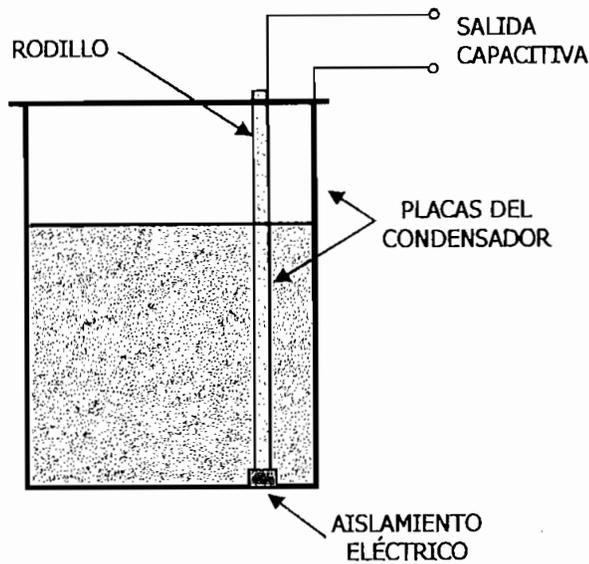
#### **1.2.1.4 Método de capacitancia**

Es un método utilizado para medir nivel de líquido en tanques cerrados. Básicamente, consiste de un elemento primario de medición y un instrumento secundario que transforma la variación de capacitancia en un movimiento que es proporcional al nivel de líquido en los tanques.

En su forma más simple una celda de capacitancia consiste en un rodillo de metal montado en el tanque; el rodillo debe estar aislado eléctricamente de la pared del líquido.

La capacitancia del sistema está formada por el rodillo, el cual se puede considerar como el electrodo vivo, y la pared del tanque que sirve como electrodo de tierra. Ya que la celda, el líquido y la pared del tanque forman un campo capacitivo, un cambio en capacitancia causado por variación del nivel del líquido se detecta en un instrumento indicador o registrador.

En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo del método capacitivo para la determinación del nivel de líquido.



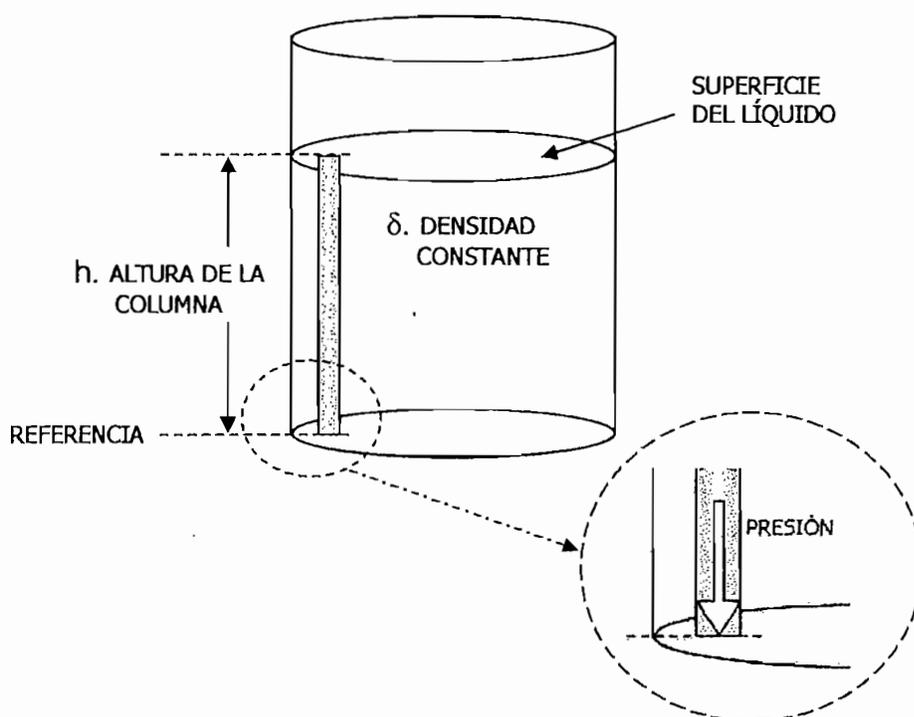
**Figura 1.4** MÉTODO DE CAPACITANCIA

#### 1.2.1.5 Método de presión relativa

Las mediciones de nivel que se basan en la presión que ejerce un líquido por su altura, implican que la densidad sea constante. El instrumento se debe calibrar para una densidad específica y cualquier cambio en ella trae consigo errores de medición. El método más simple para medir el nivel de un líquido en un recipiente abierto es conectar un medidor de presión por debajo del nivel más bajo que se va a considerar. Este nivel es, entonces, el de referencia y la presión estática indicada por el medidor es una medida de la altura de la columna del líquido sobre el medidor, y por lo tanto del nivel de líquido.

El medidor de presión cuando se usa para mediciones de nivel de líquidos, se calibra en unidades de presión, en unidades de nivel de líquido correspondientes a la gravedad específica del líquido, o en unidades volumétricas calculadas según las dimensiones del recipiente. También se puede calibrar de 0 a 100, lo que permite lecturas en términos de tanto por ciento de nivel máximo.

Para que el medidor lea cero cuando el líquido está en su nivel mínimo, a través del elemento accionador debe haber una línea horizontal aproximadamente al mismo nivel que la línea de centros de la toma de tubería de mínimo nivel. En el medidor se pueden usar tornillos de ajuste a cero para compensar pequeñas diferencias. Para controlar el límite, el medidor de presión puede ser un controlador, o puede estar ligado a un interruptor de presión. Cuando no se requiere una indicación de nivel, este último es suficiente. La Figura 1.5 grafica el método de presión relativa para medir nivel de líquido.



**Figura 1.5** MÉTODO DE PRESIÓN RELATIVA

### 1.2.1.6 Método de presión diferencial

Este es el método más común en la medición para tanques abiertos o cerrados. Las tomas de presión diferencial se hacen, una en la parte inferior otra en la parte superior; siempre y cuando se trate de tanques cerrados sometidos a presión. Cuando es para tanques abiertos la toma de baja presión se ventea a la atmósfera.

El principio de funcionamiento se basa en aplicarle al instrumento la presión existente en la superficie del líquido en ambas conexiones con la finalidad de anularla y que la presión detectada sea la presión hidrostática.

El medidor de presión diferencial consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su densidad. Es decir:

$$p = \delta gh \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

$p =$  presión

$\delta =$  densidad del líquido

$h =$  altura del líquido sobre el instrumento

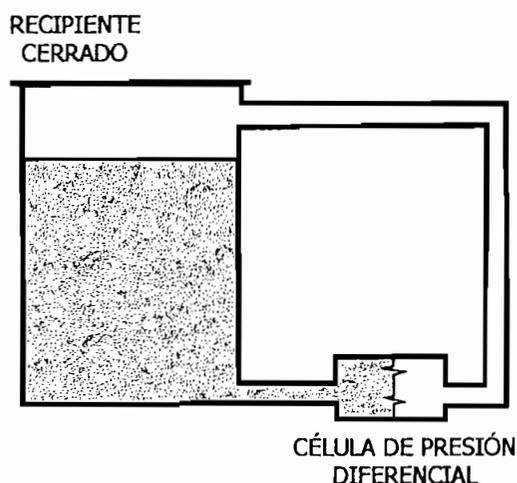
$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico, o digital de presión diferencial; está fijado en una brida que se monta rasante al tanque para permitir sin dificultades la medida de nivel de fluidos. En el caso de que el tanque esté cerrado y bajo presión, es necesaria la corrección de la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido debiendo señalar que la lectura será muy poco precisa, si la presión es grande. Se suele conectar un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y superior, utilizando transmisores de presión diferencial de diafragma.

El medidor de presión diferencial puede emplearse también en la medida de interfases. La amplitud de la medida vendrá dada por la diferencia de presiones sobre el diafragma del elemento, primero con el tanque lleno del líquido más denso y después con el líquido menos denso. La precisión de los instrumentos de presión diferencial es de  $\pm 0,5 \%$  en los neumáticos,  $\pm 0,2 \%$  a  $\pm 0,3 \%$  en los electrónicos, y de  $\pm 0,15 \%$  en los "inteligentes" con señal de salida de 4–20 mA c.c. y de  $\pm 0,1 \%$  en los que se emplean en tanques abiertos y cerrados a presión y al vacío. No tienen partes móviles dentro del tanque, son de fácil limpieza, son

precisos y confiables, admiten temperaturas del fluido de hasta 120°C y no son influidos por las fluctuaciones de presión. Sin embargo, en tanques cerrados presentan el inconveniente de la posible condensación de los vapores del tanque en el tubo de conexión al instrumento; este inconveniente se elimina fácilmente con un resorte de supresión.

Hay que señalar que el material del diafragma debe ser el adecuado para resistir la corrosión del fluido (existen materiales de acero inoxidable 316, monel, tantalio, hastelloy B, inoxidable recubierto de teflón). En la Figura 1.6 se grafica el método de presión diferencial para medición de nivel de líquido



**Figura 1.6** MÉTODO DE PRESIÓN DIFERENCIAL

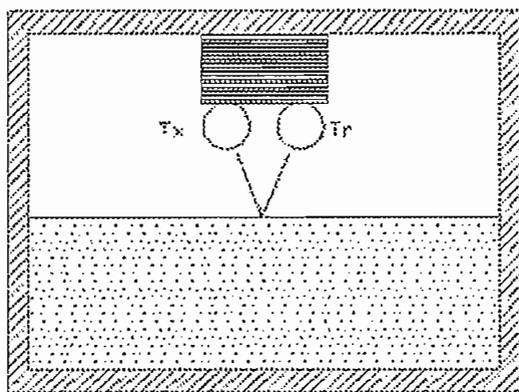
### 1.2.1.7 Método con ultrasonido

El sistema ultrasónico de medición de nivel se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

Los sensores trabajan a una frecuencia de alrededor de 20 KHz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del líquido.

La fuente ultrasónica genera impulsos que son detectados por el receptor una vez que ha transcurrido el tiempo correspondiente de ida y vuelta de la onda a la superficie del líquido. El sensor emisor dispone de un oscilador excitador para enviar un impulso ultrasónico a la superficie del fluido y el sensor receptor recibe esta señal reflejada enviando una señal función del tiempo transcurrido, y por lo tanto del nivel, a un oscilógrafo o a un indicador.

La precisión de estos instrumentos es de  $\pm 1$  a  $3\%$ . Son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos, pudiendo construirse a prueba de explosión. Presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando la superficie del nivel del líquido no es nítida como el caso de un líquido que forme espuma, ya que producen falsos ecos en los ultrasonidos. En la Figura 1.7 vemos una gráfica de este método.



**Figura 1.7** MÉTODO CON ULTRASONIDO

#### 1.2.1.8 Método radioactivo

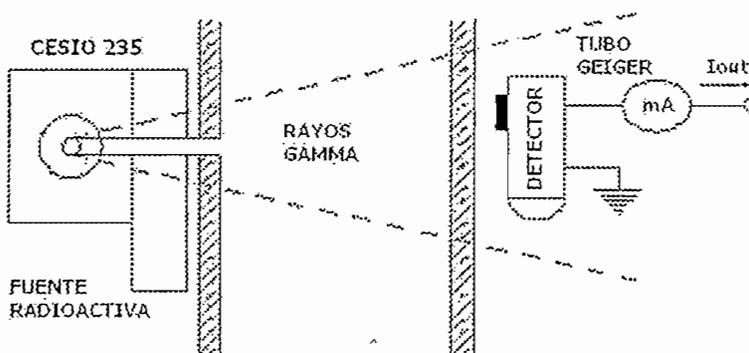
Este método consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del tanque y un contador Geiger que transforma la radiación gamma recibida en una señal de corriente continua aproximadamente de  $10-15 \text{ A}/24\text{hrs}$ , la recepción de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido que existe en el tanque ya que el líquido absorbe parte de la energía recibida.

Los rayos emitidos por la fuente son similares a los rayos X, pero de longitud de onda más corta. La fuente radioactiva pierde igualmente su radioactividad en función exponencial del tiempo. La vida media varía según la fuente empleada. En el Cobalto 60 es de 5.5 años, en el Cesio 137 es de 35 años y en el Americio 241 es de 458 años. Las paredes del tanque absorben parte de la radiación y al detector llega sólo un pequeño porcentaje. Los detectores son, en general, tubos Geiger (otros medidores emplean detectores de cámara iónica) y utilizan amplificadores de corriente.

La precisión en la medida es de  $\pm 0,5 \%$  a  $\pm 0,2 \%$ , y el instrumento puede emplearse para todo tipo de líquidos ya que no está en contacto con el proceso. Su lectura viene influida por el aire o por los gases disueltos en el líquido.

Como desventajas en su aplicación está el blindaje de la fuente y el cumplimiento de las leyes sobre protección de radiación. El sistema se emplea en caso de medida de nivel en tanques de acceso difícil o peligroso.

Es ventajoso cuando existen presiones elevadas en el interior del tanque que impiden el empleo de otros sistemas de medición. Hay que señalar que el sistema es caro y que la instalación no debe ofrecer peligro alguno de contaminación radioactiva siendo necesario señalar debidamente las áreas donde están instalados los instrumentos y de realizar inspecciones periódicas de seguridad. En la Figura 1.8 se grafica la aplicación de este método para medición de nivel.



**Figura 1.8** MÉTODO RADIOACTIVO

### 1.2.1.9 Determinación mediante peso

Otra forma de determinar el nivel que alcanza un líquido en un recipiente es determinar el peso que tiene dicha masa; para esto se utilizan elementos primarios, por ejemplo: las galgas extensiométricos, basados en el principio resistivo, o los LVDT basados en el principio reluctivo de transducción.

Una vez determinado el peso del líquido, se puede determinar la masa de acuerdo a la ecuación 1.2; la que a su vez está en función de la densidad y del volumen ocupado por dicho líquido, como se muestra en la ecuación 1.3.

$$w = mg \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$m = \delta V \quad \text{Ec. 1.3}$$

$w = \text{peso}$

$m = \text{masa del líquido}$

$g = \text{gravedad terrestre } (9.8 \text{ m/s}^2)$

$\delta = \text{densidad del líquido}$

$V = \text{volumen}$

Al determinar el volumen, despejándolo de la ecuación 1.3 se puede encontrar el valor de la altura que tiene el líquido si se conocen las dimensiones del recipiente, mediante fórmulas geométricas. En la Figura 1.9 se grafica la determinación mediante peso a través de una célula de carga.



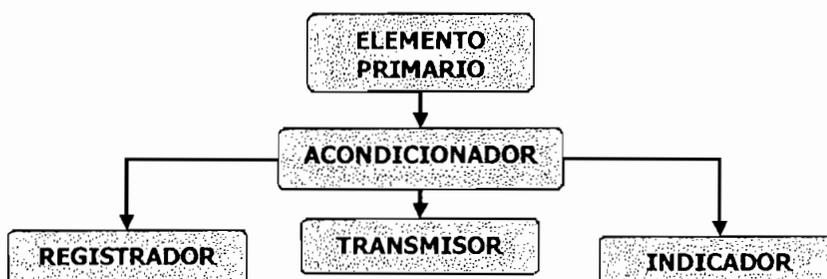
**Figura 1.9** SISTEMA DE CÉLULA DE CARGA

Después de revisar la teoría de los principales métodos de medición de nivel de líquidos se concluye con la selección del método a utilizarse en el presente proyecto; esta decisión se basa en criterios que garantizan la mejor elección. Se selecciona el método de presión relativa cuya aplicación no resulta tan rudimentaria como lo es utilizar una columna de vidrio pero que tampoco llega a ser tan sofisticada como aplicar el método ultrasónico o el radioactivo.

El método de presión relativa resulta una opción adecuada en la medida de que la densidad del líquido y/o su temperatura puedan ser compensadas para no incurrir en errores; esto es posible en el presente proyecto gracias a la inclusión de elementos "inteligentes" como se ha proyectado en el diseño; una vez compensada la densidad del líquido la presión relativa mantiene una estrecha relación con su nivel, considerando la precisión que se alcanza, la factibilidad de uso, confiabilidad y el costo de implementación, este método se convierte en la mejor opción.

### 1.3 SISTEMAS DE MEDICIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

Los sistemas de medición en la industria se constituyen por elementos mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos, etc. Incluso se pueden dar combinaciones entre estos para optimizar y asegurar su funcionamiento. En cualquier caso, los bloques que conforman un sistema de medición son los mismos, independientemente del tipo de elementos que se utilice. La Figura 1.10 muestra un diagrama típico de los bloques constitutivos de un sistema industrial de medición.



**Figura 1.10** BLOQUES CONSTITUTIVOS DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN

Los sistemas para medición de nivel de líquidos, pueden variar en función de las necesidades del proceso, tales como precisión, rango de medida, velocidad de respuesta, etc.; y su elección depende de parámetros como las características del líquido, disponibilidad física del recipiente, entre otros; por lo tanto considerar y estudiar los diferentes criterios de diseño y selección del sistema adecuado resulta una tarea muy importante en el presente proyecto.

### 1.3.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para la correcta elección del sistema a implementarse se han tomado en cuenta varios factores. En el cuadro de la Figura 1.11, se enumeran algunas consideraciones que se deben tomar:

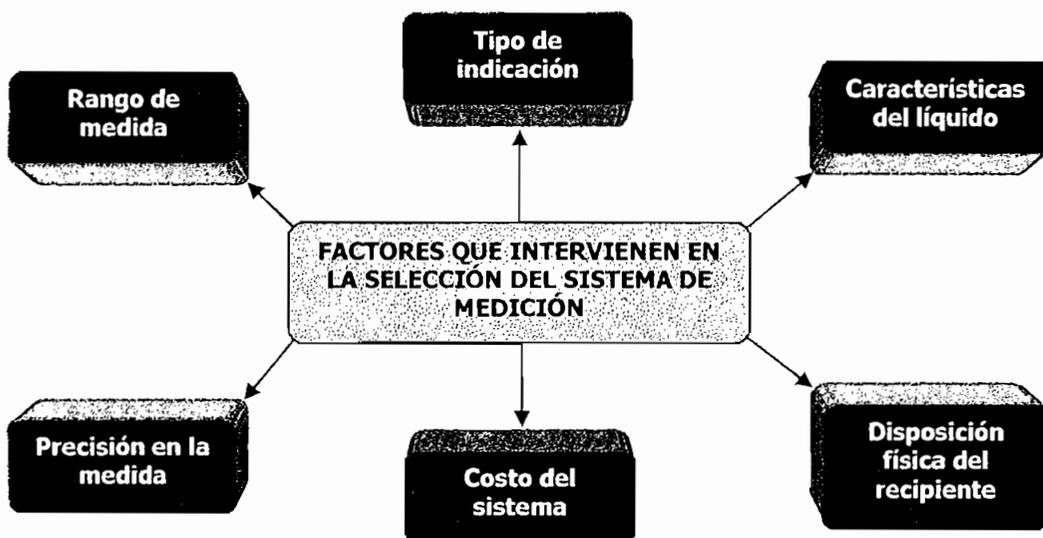


Figura 1.11 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA SELECCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

#### 1.3.1.1 Rango de medida

Al hablar del rango, implícitamente se habla del alcance; ya que el rango es el espectro de valores de la variable a medirse y está comprendido dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, mientras que el alcance es la diferencia algebraica entre estos dos límites.

Tanto el rango como el alcance se deben considerar al momento de dimensionar los elementos primarios o sensores, que en definitiva son los que ejecutan la labor principal que es informar el estado de la variable. Por lo tanto, previo a la elección del sistema de medición y al dimensionamiento de sensores, está el determinar que rango, o conjunto de valores se desean medir. El rango a medirse está relacionado con la altura del recipiente, esta altura puede ser absoluta si se desea conocer el nivel total del líquido, a partir del nivel cero o del nivel mínimo. También podrá ser una altura relativa cuando se desee conocer el nivel con relación a una referencia, por ejemplo cuando se desea medir interfases.

### **1.3.1.2 Precisión en la medida**

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del sistema y define los límites de error que eventualmente se cometan cuando el sistema trabaje en condiciones normales de servicio.

La precisión del sistema está íntima, aunque no totalmente relacionada con la precisión del elemento primario, puesto que si se usan sensores con mejor precisión que la de elementos electrónicos, mecánicos, neumáticos, etc. que constituyan el sistema además del sensor, la precisión total del sistema se verá afectada y será infructuoso, aunque no perjudicial, contar con elementos de mejor precisión. Es por esto que en lo posible se debe estandarizar la precisión de todos los elementos que constituyen el sistema.

Además se debe considerar el hecho de que el sistema forme parte de un proceso, en el que la precisión en la medida de la variable sea un factor preponderante, si se va a realizar control sobre la misma, o bien; si únicamente se desea visualizar y tener una vaga idea del nivel del líquido.

A continuación, en la Tabla 1.1 se presenta un cuadro comparativo para la selección del método en que se basa el sistema de medición, de acuerdo a la precisión requerida:

Precisión	Método
$\pm 0,2$ a $0,3$ %	Presión diferencial (electrónico)
$\pm 0,2$ a $0,5$ %	Radioactivo
$\pm 0,5$ %	Flotador, Presión diferencial (neumático)
$\pm 1$ a $3$ %	Ultrasonido

**Tabla 1.1** MÉTODOS DE MEDICIÓN EN FUNCIÓN DE LA PRECISIÓN

### 1.3.1.3 Características del líquido

Debido a que los sistemas de medición de nivel contemplan cualquier líquido, es necesario conocer las características del mismo, entre otras: temperatura, viscosidad, densidad, conductividad, que tan corrosivo y limpio es el líquido, si contiene sólidos en suspensión o bien; si produce espuma o burbujas, incluso si el líquido tiene gases o vapores condensables.

Se deben considerar las características del líquido para el correcto dimensionamiento del elemento primario en caso de que este vaya a estar en contacto con el líquido, para evitar daños por exceso de temperatura y presión, por obstrucción de las cavidades o por corrosión de los materiales.

En la Tabla 1.2 se presentan algunos elementos primarios que se deben utilizar en función de las características del líquido.

Líquido	Elemento primario
Limpio	Flotador
Viscoso, con sólidos	Presión diferencial
Corrosivo	Burbujeo
Sin espuma	Ultrasonico
Todo tipo	Radioactivo

**Tabla 1.2** ELEMENTOS PRIMARIOS EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL LÍQUIDO

### 1.3.1.4 Disposición física del recipiente

La disposición física del recipiente contempla dimensiones, ubicación, accesibilidad, etc.; parámetros que se deben conocer al momento de seleccionar el sistema y en especial el elemento primario, ya que si además de medir nivel se va a determinar volumen, peso o si se expresa la variable en términos de tanto por ciento del nivel máximo, será necesario introducir fórmulas matemáticas que, en base a elementos que permitan realizar estos cálculos entreguen la información requerida, tomando como variables de entrada las dimensiones del recipiente.

Se debe también analizar si el recipiente es de fácil acceso para eventualmente seleccionar sistemas basados en el método de columna de vidrio, o bien en el método de flotador, método que no podría ser aplicado para recipientes que tengan diámetro reducido si el flotador tiene brazo de torsión.

También se deberá conocer si el recipiente va a estar siempre cerrado o abierto para analizar la posibilidad de ubicar sensores de presión absoluta o diferencial por ejemplo y realizar así el sistema basado en este método, o en el método de burbujeo si el tanque permanece siempre cerrado.

En la Tabla 1.3 se muestra algunos ejemplos del tipo de sensor que se utiliza para tanques abiertos o cerrados.

Abierto	Cerrado
Flotador	Flotador
Columna de vidrio	Columna de vidrio
Presión diferencial	Presión diferencial
Ultrasonido	Burbujeo
	Radioactivo
	Ultrasonido

**Tabla 1.3** ELEMENTOS PRIMARIOS EN FUNCIÓN DEL TIPO DE TANQUE

### 1.3.1.5 Tipo de indicación

Si el proceso al que pertenece el sistema de medición exige que la variable sea transmitida a un cuarto de control o a otra fase del proceso que esté ubicado a una distancia considerable del recipiente, se deberá tener una indicación remota de la variable por el medio más adecuado.

Caso contrario si el sistema no forma parte de un proceso; o bien si el control del proceso está cerca del recipiente, se requerirá una indicación local y no sería necesario trasladar la señal más allá de los límites normales, como en el caso de que únicamente se necesite visualizar el nivel junto al recipiente.

### 1.3.1.6 Costo del sistema

Previo a la selección del sistema se deberá decidir que tan precisa, exacta, sensible (entre otras consideraciones) debe ser la medida, ya que entre otros aspectos, de esta decisión dependerá el costo del sistema; al utilizar una mejor tecnología y elementos que, basados en la mejor tecnología sean de mayor precisión, exactitud, sensibilidad, etc.; el sistema será mucho más costoso frente a elementos que se basen en tecnologías anteriores, por lo tanto de menor calidad y de menor precio.

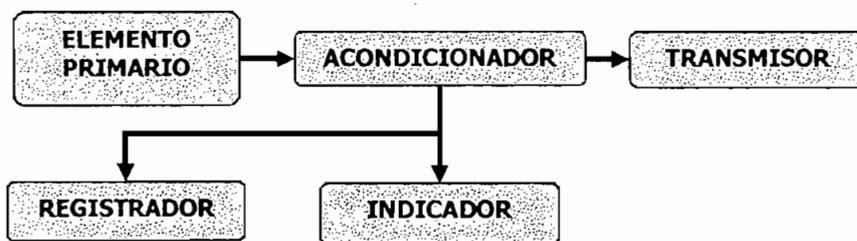
Esta decisión está hecha en función de las necesidades que debe satisfacer el sistema y de los requerimientos del proceso del cual forme parte el sistema, así entonces se implementa un sistema basado en el método de presión relativa con un sensor de diafragma de presión manométrica para una columna de líquido de hasta 10 metros de altura que mantenga una precisión de alrededor de  $\pm 0.2\%$  FS, además de que permita la compensación de densidad y dimensiones del recipiente, con indicación local y que permita también el traslado de la señal, el sistema está basado en tecnología que emplea electrónica digital

### 1.3.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Para establecer el sistema que se utiliza en la medida de nivel se deberá determinar los elementos que lo constituyen, esta determinación debe estar orientada a cumplir los objetivos del proyecto. Para esto, en base a los factores de selección del sistema se conciben los siguientes elementos:

- Elemento primario
- Acondicionador
- Indicador
- Registrador
- Transmisor

La Figura 1.12 muestra los elementos del sistema de medición.



**Figura 1.12** ELEMENTOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

#### 1.3.2.1 Elemento primario

El elemento primario es el encargado de recoger el estado de la variable, es decir, es el que realiza la medida y entrega una señal utilizable, pudiendo ser esta eléctrica, electrónica, mecánica, hidráulica, neumática, etc. dependiendo del principio de transducción en el que esté basado el elemento primario.

Entre los principales principios de transducción cabe mencionar los siguientes:

- Capacitivo
- Inductivo
- Resistivo
- Extensiométrico
- Termoeléctrico
- Fotoconductor
- Fotovoltáico
- Piezoeléctrico

Los elementos primarios también definidos como sensores, sondas, detectores, captadores, medidores o transductores; pueden ser de tipo activo o pasivo. En el primer caso la señal de salida puede ser voltaje o corriente, por lo que se constituyen como una fuente. Para el segundo caso, la señal de salida es cualquier otra que no sea voltaje ni corriente, y necesitan alimentación para tener salida de tipo activo.

Como se definió anteriormente, los criterios de selección del elemento primario están estrechamente relacionados con los criterios de selección del sistema, entre los que se anotan el rango, el objetivo de la medición, precisión, exactitud, etc. Por lo tanto para un sistema de medición de nivel de líquido, el elemento primario o sensor deberá ser capaz de medir todo el rango de nivel para la capacidad del recipiente, además deberá tener la precisión y exactitud que se necesita para el sistema del que éste forma parte, por último, deberá entregar una señal del tipo requerido para su posterior manipulación y/o indicación.

### **1.3.2.2 Acondicionador**

Una vez que se escoge el elemento primario y se conoce la señal que este va a entregar, se deberá llevar esta señal a valores deseables para su posterior tratamiento, es decir, acondicionarla o normalizarla. Dependiendo del tipo de señal que entregue el elemento primario se contempla la introducción de filtros que purifiquen la señal y la hagan más manejable para los elementos posteriores.

Los valores de señal normalizada cuando la señal es eléctrica o electrónica son 0-5 V, 0-10 V en voltaje continuo o 4-20 mA de corriente continua, cuando la señal es mecánica o neumática el valor normalizado es de 3-15 psi.

El tipo de acondicionamiento a realizar depende del tipo de señal que se tiene en el elemento primario, de esta manera se puede utilizar elementos mecánicos o neumáticos como reguladores de presión, válvulas reductoras o amplificadoras, acumuladores, etc. Si se trata de señal eléctrica se utilizan bobinas, capacitores, resistores, etc., o bien si la señal es electrónica se pueden utilizar diodos, transistores, amplificadores operacionales, etc.

Si la señal es electrónica y de tipo análoga, de ser necesario, deberá ser convertida a señal digital sobretodo si se trabaja con dispositivos digitales como microprocesadores, microcontroladores, PLC, PC. Para esta conversión A/D se pueden emplear los diversos métodos desarrollados por la tecnología actual, tales como redes RC, utilizando amplificadores operacionales o incluso con la ayuda de circuitos integrados que en un solo chip realizan dicho trabajo de conversión. Algunos microcontroladores, como los PIC, controlador de interfaces periféricas, tienen integrados estos convertidores A/D como una más de sus funciones; de igual manera a los PLC también se pueden acoplar tarjetas de adquisición de datos, DAQ, que conectadas a la tarjeta principal de un PC permiten la manipulación de la señal en un computador, haciendo más versátil el sistema gracias a las utilidades que éste posee.

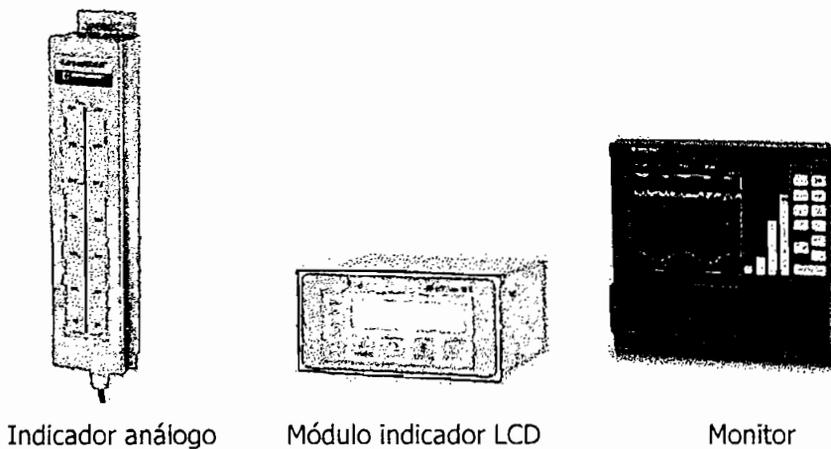
### **1.3.2.3 Indicador**

Uno de los principales objetivos de un sistema de medición es visualizar el estado de la variable en un momento dado, es decir, indicar por medios visuales la cantidad de líquido que contiene el recipiente. Para esto se pueden utilizar indicadores de cristal, basados en el método de la columna de vidrio, indicadores mecánicos parecidos a un manómetro analógico, o mejor aún indicadores digitales como display, módulos LCD. Incluso hasta se puede indicar la señal en

un monitor de PC en forma gráfica, gracias a software para desarrollo de interfaces HMI.

El tipo de indicador y de indicación a utilizar dependen del ambiente en el que se encuentra el sistema y de las características que éste debe cumplir; así entonces, por ejemplo, en un ambiente industrial con poco nivel de iluminación, se deberá ubicar fuentes de iluminación extras y exclusivas para mejorar la visualización; si la indicación se hace por una columna de vidrio éste deberá estar limpio por dentro y por fuera; si el indicador es un módulo LCD éste deberá tener backlight, etc.

En la Figura 1.13 se muestran ejemplos de indicadores.



**Figura 1.13** EJEMPLOS DE INDICADORES

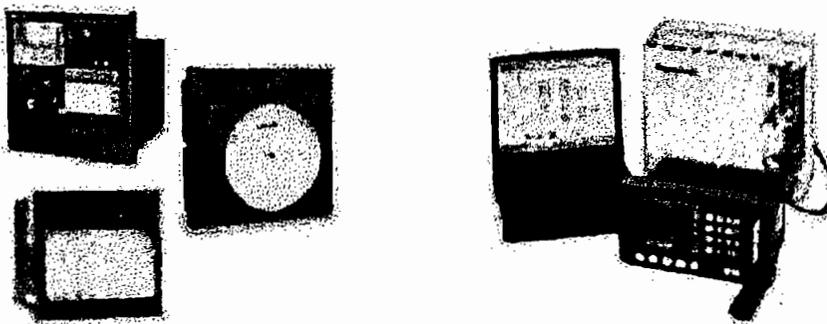
#### 1.3.2.4 Registrador

Algunos sistemas de medición pueden contar con registradores que almacenan de manera cronológica los estados de la variable. Se los utiliza en caso de ser necesario llevar registros históricos para análisis y monitoreo que a su vez ayudan a las proyecciones para mantenimiento o si el sistema forma parte de un proceso

en el que resulta imprescindible recolectar datos para toma de decisiones acerca de las cantidades de líquido a utilizarse en los diferentes procesos, esto si el líquido se considera como materia prima en la cadena de producción.

Ciertos registradores imprimen directamente la información que obtienen en medios físicos pero no la almacenan; también hay registradores que almacenan digitalmente la información y además ofrecen funciones de impresión y de transferencia a otros equipos compatibles. Tanto el registrador como el transmisor pueden o no formar parte de un sistema de medición.

En la Figura 1.14 se muestran ejemplos de registradores.



**Figura 1.14** EJEMPLOS DE REGISTRADORES

#### 1.3.2.5 Transmisor

Se denomina así al conjunto formado por el elemento primario y una fuente de corriente constante, sin embargo, actualmente los transmisores también están constituidos por el sensor y una fuente de voltaje, lo cual derivó del concepto original que era transmitir el estado de la variable por corriente y que no deja de ofrecer mejores prestaciones, sobre todo, una mayor distancia de transmisión y la inmunidad al ruido generado en un ambiente industrial.

Por ejemplo, los transmisores de corriente 4-20 mA convierten una magnitud como temperatura, presión, etc., en una señal eléctrica del orden de miliamperios que puede enviarse sobre un medio físico a larga distancia. En ciertas aplicaciones se toma 4 mA como cero lógico y 20 mA como 1 lógico; para trabajar con señales digitales.

Los transmisores de corriente presentan ciertas ventajas frente a los transmisores de voltaje como por ejemplo su inmunidad al ruido, inmunidad a las caídas de voltaje debido a conexiones mal realizadas, capacidad de proveer energía al transductor alejado, detección fácil de la falla por rotura del lazo, etc.

## **1.4 MEDICIÓN DE NIVEL DE LECHE**

Dentro de la industria alimenticia se incluye aquella denominada láctea, dedicada al procesamiento de leche cruda de vaca y la obtención de los diferentes productos derivados de la misma.

### **1.4.1 CONSIDERACIONES**

Previo a los diferentes procesos a los que se ve sometida la leche cruda como son: el desnatado, estandarización, homogeneización, pasteurización, etc., resulta necesario el almacenamiento de este líquido, por lo tanto, es necesaria la medición de nivel del mismo. En este sentido, esto es, para medir el nivel de la leche cruda en un tanque se debe considerar:

- Recipientes de almacenamiento
- Densidad y temperatura de la leche
- Condiciones de higiene

#### 1.4.1.1 Recipientes de almacenamiento

La leche se almacena en recipientes de gran capacidad, denominados tanques-silos. Los silos deben ser de acero inoxidable que permitan aislarse, poner intercambiadores de calor y que sean de fácil limpieza; además deben tener sistemas de agitación que permiten la ruptura de glóbulos de grasa y disminuyen la susceptibilidad de ataques enzimáticos.

El llenado de los silos debe ser realizado por la parte inferior para evitar excesivo movimiento mecánico, formación de espuma y fraccionamiento de la grasa.

La temperatura de almacenamiento debe estar entre 4 y 12°C, el valor óptimo es de 6°C y el tiempo de almacenamiento no debe superar las 48 horas. Los silos para almacenamiento de leche tienen capacidades en el orden de decenas de miles de litros y pueden tener diferentes formas, por lo general son de forma cilíndrica con tolvas en su parte inferior y son instalados verticalmente.

En la Figura 1.15 se muestran tanques-silos para almacenamiento de leche en una planta pasteurizadora.



**Figura 1.15** TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LECHE

### 1.4.1.2 Densidad y temperatura de la leche

La leche es un líquido blanco, opaco, de sabor ligeramente dulce. Su densidad o peso específico tiene un valor promedio casi constante. Al igual que la mayoría de los líquidos, el valor de la densidad varía en forma inversamente proporcional con la temperatura, así entonces un aumento de 5°C en la temperatura de la leche disminuye su densidad en aproximadamente un milésimo.

Los valores de densidad de la leche están comprendidos entre un mínimo de 1.028 gr/ml y un máximo de 1.033 gr/ml. Con su medición se descubre la adulteración más simple como el aguamiento por ejemplo, que es la incorporación de agua de densidad 1 gr/ml, lo que disminuye la densidad de la leche.

En la práctica, de acuerdo a numerosas experiencias y muestras se puede considerar que la densidad de la leche cruda sin adulteraciones, para un rango de temperatura entre 6°C y 12°C se mantiene entre 1.031 gr/ml y 1.029 gr/ml, en este rango se toma un valor promedio constante de densidad de 1.030 gr/ml; valor con el que se efectúan cálculos de nivel y volumen sin riesgo de caer en errores considerables, para demostrar esto se considera la ecuación  $p = \delta gh$  (Ec.1.1) en dos instancias: una con el valor promedio de densidad (1.030 gr/ml) y otra con el valor superior del rango considerado (1.031 gr/ml), así entonces el valor de la presión hidrostática, que permanece inalterable, será:

$$p = 1.030gh_1 = 1.031gh_2$$

Esto proporciona una relación entre los niveles de la columna de líquido para sus respectivos valores de densidad:

$$h_1 = 1.001h_2$$

En caso de utilizar el valor promedio de densidad (1.030 gr/ml) que corresponde a la altura  $h_1$  se incurriría en un error relativo porcentual de:

$$\begin{aligned}\varepsilon r_{\%} &= \frac{h_1 - h_2}{h_2} 100 \% \\ &= \frac{1.001 h_2 - h_2}{h_2} 100 \% \\ \varepsilon r_{\%} &= 0.1 \%\end{aligned}$$

El error relativo no alcanza para ningún caso el punto porcentual, esto ratifica que el considerar el valor promedio de densidad como una constante no representa un error.

#### 1.4.1.3 Condiciones de higiene

Por la especial constitución de la leche, las industrias lácteas son muy sensibles frente a posibles alteraciones de sus elaborados como consecuencia de una incorrecta limpieza de sus instalaciones.

En los recipientes de almacenamiento, especialmente en recodos y ángulos se acumulan organismos que descomponen los restos de leche si no son debidamente lavados y desinfectados después de su uso. Para esto se utilizan productos de carácter alcalino formulados sobre una base cáustica en combinación con una alta cantidad de humectantes y emulsionantes que facilitan la penetración en la suciedad orgánica y la disgregación de residuos de grasa y proteína, además de agua y vapor de hasta 70 °C.

En el caso de que el elemento primario tenga contacto con el líquido y los agentes de limpieza, agua y vapor; se deberá tener especial atención en que las partes en contacto soporten las temperaturas indicadas y que sean de material acero inoxidable con acabado espejo de fácil limpieza y de alta resistencia.

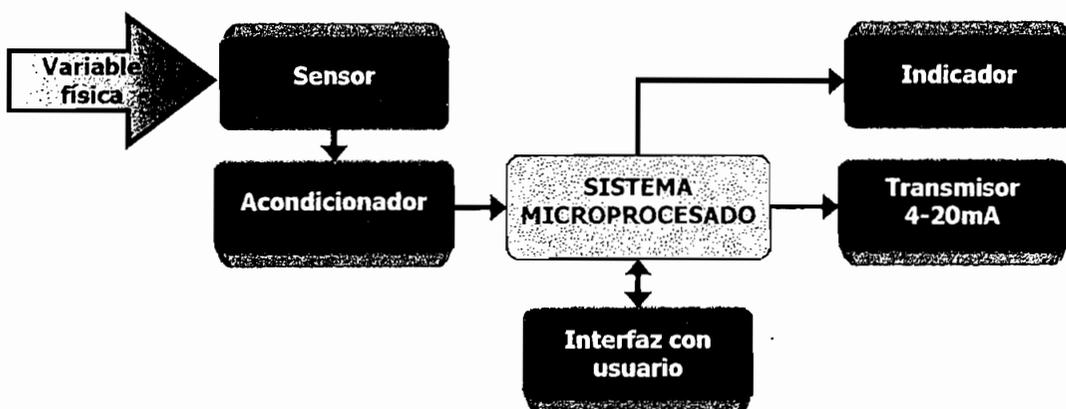
### 1.4.2 PROPUESTA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

En función de los conceptos descritos hasta aquí, se propone un sistema de medición de nivel de leche diseñado para plantas pasteurizadoras de leche cruda.

La propuesta se hace tomando en cuenta que el sistema de medición no forma parte de un proceso automatizado ni tampoco que está centralizado hacia una unidad de control; es decir, el sistema es independiente; no obstante, el diseño contempla que para futuras aplicaciones el sistema de medición pueda ser conectado a otros controladores, ya sea para ejercer control en la variable o para integrarlo como punto de partida para otros procesos.

De este modo, la solución es implementada con un sistema microprocesado, el que permite indicar y transmitir la variable, ingresar parámetros mediante una interfaz con el usuario para calibraciones. La propuesta arranca desde el escogimiento del elemento primario ó sensor, hasta la transmisión de la señal.

Por lo expuesto, la mejor alternativa se muestra en la Figura 1.16.



**Figura 1.16** DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA PROPUESTO

### 1.4.2.1 Sensor

Para el presente proyecto se ha tomado en cuenta la presión hidrostática que se transmite al fondo del recipiente debido a la columna de líquido; es decir, basado en el método de presión relativa.

De acuerdo a la ecuación  $p = \delta gh$  (Ec.1.1), la presión que se ejerce por la columna depende de la altura a la que está la superficie del líquido con respecto a un punto de referencia situado por debajo de la superficie, en el fondo del recipiente; también depende del peso específico que a su vez está en función de la densidad del líquido, la misma que varía con la temperatura, no obstante, para el sistema de medición propuesto se considera un valor de densidad constante para una temperatura de almacenamiento que oscila entre 6 y 12°C; que, como quedo demostrado en el subcapítulo 1.4.1.2 no representa errores significativos.

Como se mencionó al describir el método de presión relativa, las mediciones implican que la densidad del líquido sea constante; caso contrario al variar la densidad variará indistintamente el valor de presión y la medida se verá sujeta a descalibraciones inesperadas. Sin embargo la utilización de elementos electrónicos “inteligentes” como microcontroladores permite la compensación por densidad al permitir el ingreso de estos parámetros variables.

Es importante mencionar que el elemento primario a utilizarse deberá medir la presión relativa o manométrica más no la presión absoluta; con esto se consigue independizar la medida de la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentra el sistema, es decir, no se toma en cuenta la presión atmosférica, la misma que varía con la altura sobre el nivel del mar.

Se propone entonces la utilización de un sensor que tenga una precisión, rango y calidad medias, lo que a su vez hace que su costo no sea tan elevado, además que permita su conexión al sistema microprocesado a implementarse, tal es el caso de un sensor de presión.

El acondicionamiento de la señal entregada por el sensor, es realizado mediante dispositivos electrónicos para amplificar, atenuar, filtrar y llevar la señal a niveles aptos para el sistema microprocesado.

Es importante anotar que si el sensor va a estar en contacto con la leche deberá ser apto para ello; es decir, que sea de material adecuado para evitar contaminación del producto, que pueda ser sometido a la temperatura a la que se almacena el líquido, y de fácil limpieza, además que no tenga problema al estar en contacto con los agentes de limpieza. Para esto también el sensor deberá cumplir ciertas normas, dependiendo del montaje e instalación.

#### **1.4.2.2 Sistema Microprocesado**

El utilizar microprocesadores o microcontroladores otorga ventajas en el sentido de tener fácil indicación de la variable, registro del estado de la variable y el desarrollo de interfaces sencillas con el usuario por medio de pulsadores, botones, módulos LCD, o bien HMI desplegadas en PC.

Por estas ventajas, además del bajo costo que representa utilizar un microcontrolador se incluye un sistema microprocesado basado en PIC, interconectado a un módulo LCD que junto a un teclado conforman la interfaz; además se incluyen displays tipo LED para ampliar la indicación de la variable.

La inclusión de un dispositivo "inteligente" como un microcontrolador, en este caso, hace más versátil al sistema de medición, en el sentido de permitir calibraciones en la medida, visualizar variables relacionadas al nivel, cambio de unidades, etc.

#### **1.4.2.3 Transmisor 4-20 mA**

El sistema propuesto incluye un transmisor análogo de corriente 4-20 a dos hilos, para transmitir la señal de presión en el fondo del recipiente como medida

indirecta del nivel de leche, la transmisión de esta señal permite la interconexión del sistema de medición con otros controladores, procesos automatizados o HMI.

El transmisor requiere una señal análoga de la variable que, en un lazo de control adiciona 4 mA a la referencia y mantiene su salida en este valor para el estado mínimo y en 20 mA para el estado máximo de la variable, la salida de corriente debe mantenerse independientemente de la carga conectada. Este tipo de transmisores presentan la ventaja de tener un valor offset de 4 mA para el valor mínimo, pues, en caso de falla o ausencia de la señal el valor transmitido será nulo con lo que se puede detectar fallas.

El lazo de control puede ser implementado por medio de fuentes de corriente, con realimentación o bien con la ayuda de circuitos integrados que cumplen esta función, el sistema propuesto incluye un circuito integrado que no representa un costo elevado frente a las prestaciones que brinda.

## **CAPÍTULO II**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE**

#### **2.1 ASPECTOS GENERALES**

El presente trabajo tiene como objetivo principal medir indirectamente el nivel de líquido por la determinación de la presión en el fondo de un silo, considerando la relación que existe entre la altura y la presión hidrostática. Esta relación es determinada por una fórmula que es definida en un microcontrolador PIC y en base a parámetros ingresados por medio de un teclado se puede variar la densidad del líquido entre 1,000 y 1,999 gr/ml, además de las dimensiones del silo para obtener el volumen y el porcentaje del nivel máximo.

Para resolver este problema se pensó en un sensor cuya señal de salida sea de tipo voltaje continuo, la misma que tras acondicionarla se la ingresa por medio del convertidor análogo digital del PIC. El sensor deberá tener un offset para detección de voltaje cero en caso de falla. Se pensó un PIC porque dota al sistema de la inteligencia necesaria y buscando la mejor alternativa económica.

Se ingresan parámetros de temperatura, densidad del líquido y dimensiones del silo. En caso de que se necesite cambiar dichos parámetros se utiliza una interfaz con el usuario, implementada con un módulo LCD y un teclado de 5 teclas. Esta interfaz tiene funciones adicionales como cambio de variable a visualizar, cambio de unidades de las variables y funciones de seguridad.

Además del módulo LCD para la visualización de estas variables, se incluyen cinco displays tipo led que permiten desplegar la información de mejor manera, considerando que un carácter del LCD es de menor tamaño que un display tipo led de 7 segmentos.

Dentro de los objetivos está transmitir la presión, para esto se hace uso del módulo PWM del microcontrolador que entrega una onda de este tipo, que filtrada y acondicionada arroja una señal de voltaje continuo, señal que es convertida a corriente y mediante un lazo de control implementado gracias a circuitos integrados adecuados, posibilita la transmisión de la señal por corriente 4-20 mA en dos hilos.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema a diseñarse y construirse.

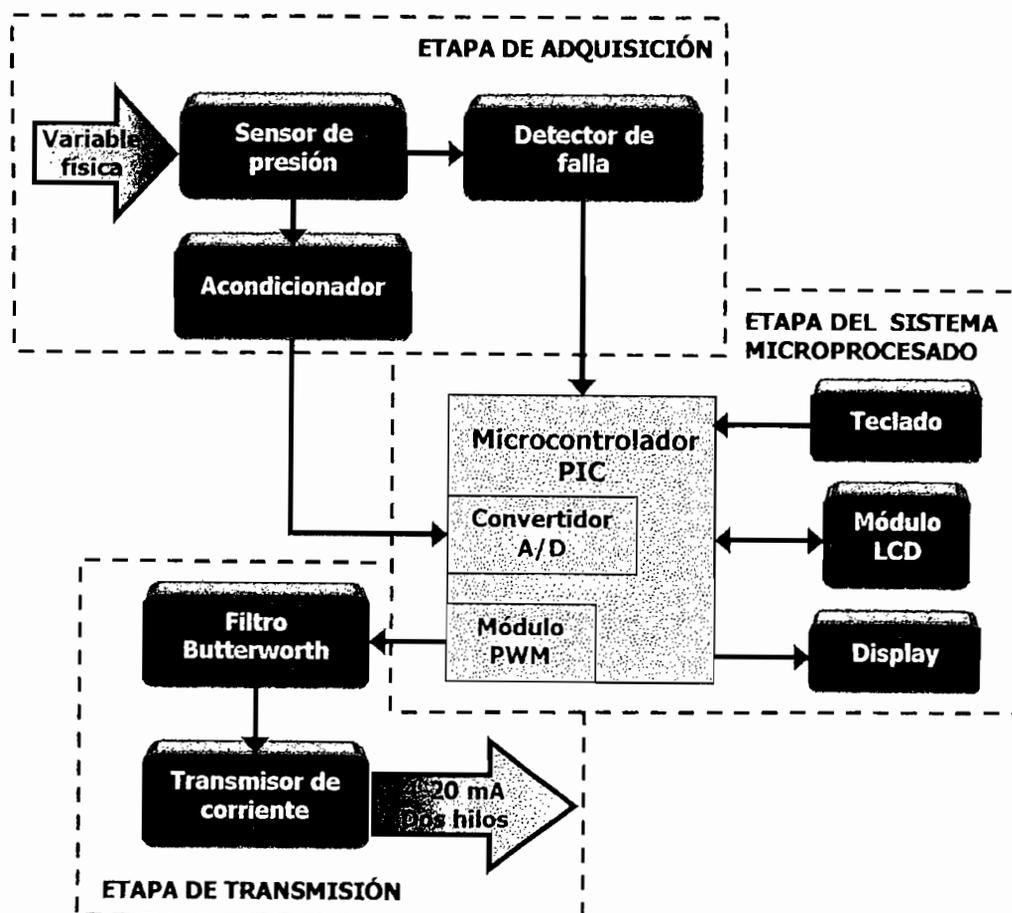


Figura 2.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA

### **2.1.1 ETAPA DE ADQUISICIÓN**

Esta etapa tiene la finalidad de recoger el valor de la variable desde el medio físico y representarla en términos conocidos para su tratamiento en la etapa siguiente.

La señal entregada por el sensor de presión es ingresada al circuito de acondicionamiento para restar el offset de voltaje y llevarla a valores normalizados, en este caso de 0-5V para ingresarla como señal análoga al PIC.

Paralelamente al acondicionamiento se tiene un circuito detector de falla, que toma la señal del sensor y genera una condición de estado de tipo digital, permitiendo que el PIC reconozca si la conexión del sensor tiene falla, es decir, si hay ausencia de la señal.

### **2.1.2 ETAPA DEL SISTEMA MICROPROCESADO**

Esta etapa es básicamente el sistema que maneja periféricos por medio del PIC, controlador de interfaces periféricas; hasta la generación de una onda tipo PWM necesaria en la etapa de transmisión.

Se realiza el diseño y aplicación de circuitos para funcionamiento del microcontrolador, como el circuito de reloj y de reset, el circuito necesario para conexión del módulo LCD, el circuito de barrido de display, así como los circuitos que constituyen el teclado

Debido a que el microcontrolador manipula digitalmente las señales por medio de software, en esta etapa se diseña el hardware que dicho software requiere para ejecutar sus rutinas de manejo y control, rutinas que serán ampliadas en detalle en el siguiente capítulo.

### **2.1.3 ETAPA DEL TRANSMISOR**

Esta etapa tiene la función de transmitir la señal de presión, que al pasar por el microcontrolador es convertida a una onda de tipo PWM; el ancho de pulso de esta onda es modulado por la variación de la presión, posteriormente a esta onda PWM se le aplica un filtro activo pasa bajo de segundo orden que permite extraer la componente continua.

La componente continua de dicha onda estará comprendida entre 0 y 5 V, y también variará en función de la presión; esta señal de voltaje continuo es la entrada para un circuito integrado que cumple la función de transmisor de corriente, esto quiere decir que el chip, además de convertir voltaje a corriente, adiciona un offset de 4 mA y realimenta la señal de salida mediante una lazo de control interno; con el objeto de desempeñarse como un transmisor de corriente a dos hilos que entrega los valores correspondientes independientemente de la carga a la que es conectado.

## **2.2 DISEÑO DE LA ETAPA DE ADQUISICIÓN**

Los circuitos de la etapa de adquisición se incluyen en la tarjeta principal del sistema que debe estar alimentada por fuentes de  $\pm 12V$ ,  $+5V$ . Además debido a que el sistema va a operar en un ambiente industrial se han tomado las debidas precauciones para evitar que ingresen ruidos indeseables que distorsionen la señal medida.

La mayor fuente de ruido ingresa por los conductores de la señal del sensor, especialmente si estos están cerca o en la misma tubería que lleva las líneas de alimentación; para esto los conductores del sensor deben estar apantallados.

En esta etapa se encuentra: el sensor, el circuito de acondicionamiento y el circuito de detección de falla.

### 2.2.1 SENSOR

Como se anotó anteriormente, se puede recurrir a una determinación indirecta del nivel por medio de una medida de presión o peso, los sensores de peso basados en galgas suelen resultar muy costosos y su acondicionamiento es meticuloso; considerando esto se optó por un sensor de presión manométrica.

La serie de sensores de presión PX303/313 de la marca Omega® para propósito general, ofrece características adecuadas para la medida que se requiere; no obstante se hizo un análisis de otros sensores de presión de otras marcas y modelos previo a la selección definitiva y tomando en cuenta el material del que está construido, el tipo de salida, niveles de precisión, rango y temperatura, costo, en fin; se escoge esta alternativa basada en criterios de selección y en los requerimientos que debe satisfacer el sistema de medición.

En la Tabla 2.1 se muestran las características principales de esta serie de sensores:

Construcción en acero inoxidable	Balance de zero $\pm 0.4$ % FS
Norma NEMA 4	Tolerancia de rango $\pm 0.8$ % FS
Protección de polaridad reversa	Temperatura de operación: -18 a 71 °C
Precisión 0.25% de fondo de escala	Tiempo de respuesta: 1 mseg
Excitación 9 a 30 V	Peso: 281 g a 1000 psi
Salida 0.5 a 5.5 V	Presión de prueba: 200%

**Tabla 2.1** CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA SERIE PX303/313 DE OMEGA®

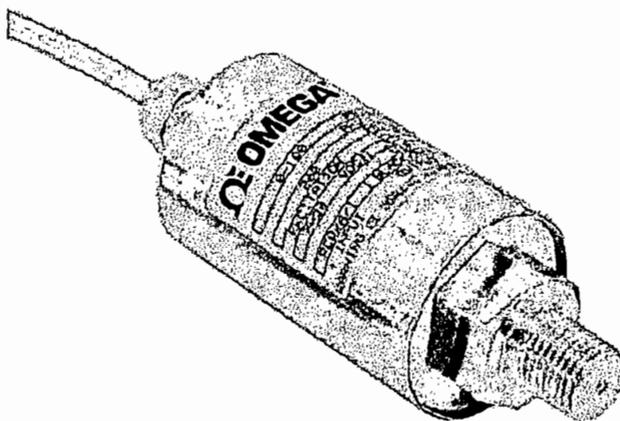
Antes de seleccionar el modelo que cumpla con el rango a medirse se debe tener una idea de la presión hidrostática máxima en el fondo del tanque, para esto se utilizó la siguiente ecuación  $p = \delta gh$  (Ec. 1.1) con un valor máximo de densidad de leche de 1.033 gr/ml, y una altura máxima del tanque de 10 m; entonces se obtiene una presión hidrostática máxima de 101.2 KPa o 14.17 psi. De esta serie

de sensores se escoge el modelo PX303-015G5V de tipo cable, que tiene un rango de presión de 0 a 15 psig.

Por la construcción del sensor y el material del que está hecho, acero inoxidable, es posible ubicar este sensor en contacto con la leche, por lo tanto es de fácil limpieza y puede soportar temperaturas de hasta 70°C. Además esta serie de sensores de propósito general incluye su aplicación para vapor y líquidos livianos como agua o aceites livianos, así entonces puede ser sometido a los agentes de limpieza utilizados en los silos.

Este sensor necesita una alimentación entre 9 y 30 Vdc; se lo alimenta desde la fuente +12V con que contará el sistema. El sensor entrega una señal de salida entre 0.5 y 5.5 Vdc, de tal modo que cuando la salida sea 0 V se pueda detectar ausencia de la señal por una falla en la conexión. El tipo de conductor es apantallado para conectarlo a masa con lo que se eliminan los ruidos en modo diferencial; para que el apantallamiento sea efectivo debe hacerse de tal manera de no añadir efectos indeseados debido a las tensiones generadas en los lazos de masa.

En la Figura 2.2 se muestra una fotografía del sensor de presión utilizado.



**Figura 2.2** SENSOR DE PRESIÓN OMEGA® PX303-015G5V

### 2.2.2 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

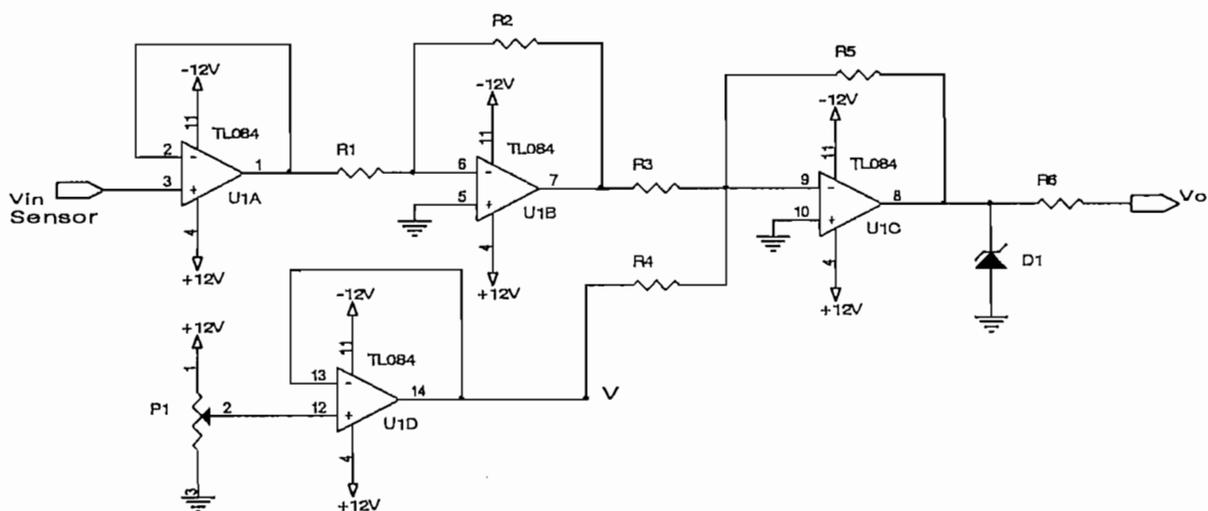
En el diseño de este circuito se utilizó amplificadores operacionales TL084 de la casa STMicroelectronics®, es un circuito integrado con cuatro amplificadores para propósito general con entrada J-FET de bajo ruido, baja corriente de offset y alta velocidad, haciéndolo apropiado para aplicaciones de instrumentación. En la Tabla 2.2 se mencionan las características de este amplificador operacional.

Rango ancho en modo común y voltaje diferencial	Compensación interna de frecuencia
Baja entrada bias y corriente de offset	Libre operación latch up
Protección de salida en coro circuito	Alta slew rate: 16V/ $\mu$ s (typ)
Alta impedancia de entrada etapa J-FET	

**Tabla 2.2** CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL TL084

El circuito de acondicionamiento toma la señal entregada por el sensor que es de 0.5V para 0 psi y de 5.5V para 15 psi, y la lleva a valores normalizados, es decir, es un circuito restador que quita la diferencia  $V_{ref}$  de 0.5V, por lo tanto a la salida del acondicionador, se tendrá 0V para 0 psi y 5V para 15 psi.

Para esto se implementa el circuito restador de la Figura 2.3



**Figura 2.3** CIRCUITO RESTADOR PARA ACONDICIONAMIENTO

El comportamiento de este circuito restador está gobernado por la ecuación 2.1:

$$V_o = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} V_{in} - \frac{R_5}{R_4} V \quad \text{Ec. 2.1}$$

Para el diseño se toman en cuenta las dos condiciones límites esperadas, esto es, para voltaje de entrada  $V_{in} = 0.5V$  se requiere un voltaje de salida  $V_o = 0V$  y para  $V_{in} = 5.5V$  se requiere un  $V_o = 5V$ .

Se plantea un sistema de dos ecuaciones con cada una de las dos condiciones:

$$\begin{cases} 0 = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} 0.5 - \frac{R_5}{R_4} V \\ 5 = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} 5.5 - \frac{R_5}{R_4} V \end{cases}$$

Al resolver el sistema se llega a las relaciones  $R_2 R_5 = R_1 R_3$  y  $R_4 = 2R_5 V$ ; para lo cual es necesario asumir ciertos valores. En este caso se asume que las resistencias  $R_2$ ,  $R_5$ ,  $R_1$  y  $R_3$ , serán iguales de valor  $20\text{ K}\Omega$ , con esto se cumple la primera relación. Para la segunda relación se asume un voltaje de referencia  $V = 2.5\text{ V}$  lo que hace que la resistencia  $R_4$  sea de  $100\text{ K}\Omega$ ; se han escogido valores altos de resistencia para aumentar la impedancia del circuito y para obtener valores estándar.

Se han incluido dos acopladores de impedancias (U1A, U1D) para evitar caídas de voltaje, un diodo zener  $D_1$  de  $5.1\text{ V}$  que limita el voltaje de entrada al microcontrolador, además de un divisor de voltaje para restar el offset, implementado con el potenciómetro  $P_1$  de  $10\text{ K}\Omega$ .

El módulo conversor A/D del PIC necesita una resistencia externa para cumplir con las especificaciones de corriente en el pin y además para fijar un tiempo de adquisición, los valores para esta resistencia externa son recomendados por el fabricante, de lo que se escoge una resistencia máxima de  $R_6 = 10\text{ K}$ .

### 2.2.3 CIRCUITO DE DETECCIÓN DE FALLA

Una de las funciones que se incluye en el sistema es la de detección de falla, para esto se hace uso de la señal de salida del sensor que si es nula (0V) representa ausencia de la señal o desconexión entre el sensor y la tarjeta principal. Para ello se ha implementado un circuito detector que, al tener entrada positiva mayor a 0.5V (condición normal) satura un amplificador operacional, caso contrario si la entrada es nula o negativa (condición de falla) la salida es cero.

De esta manera se discretiza en dos estados la señal del sensor, nivel alto o uno lógico y nivel bajo o cero lógico; estas dos condiciones permiten que el microcontrolador ejecute un subrutina asociada a la condición de falla o a su vez que admita la operación normal. Todo esto se visualiza con un indicador implementado por medio de un led, conectado a uno de los pines del PIC de tal manera que en condiciones de falla el led de color rojo se encienda a modo de alarma.

El circuito detector de falla también debe contar con las debidas protecciones para evitar que al saturarse el amplificador operacional el voltaje de saturación de alrededor  $\pm 11V$  le llegue al microcontrolador; así entonces también se limita mediante un diodo zener  $D_2$  de 5.1V, se anexa un diodo rectificador  $D_3$  de capacidad mínima como lo es el 1N4001 (600V, 1A) para evitar retornos de corriente y una resistencia limitadora para mantener las especificaciones eléctricas del pin.

Las entradas análogas del PIC admiten una corriente de entrada máxima de 20 mA por pin. Tomando en cuenta esto, el dimensionamiento de la resistencia limitadora se rige por la ley de Ohm:

$$R_7 = \frac{V}{I_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$$R_{7,m\acute{a}x} = \frac{5V}{20mA} = 250\Omega$$



ventaja que también se refleja en una reducción de la circuitería. Además de esto, el costo de un PIC es bajo en comparación al de otro tipo de microcontroladores que cumplen las mismas funciones.

Su programación es fácil de implementar y puede soportar decenas de grabaciones. Además la programación no requiere de dispositivos adicionales como programadores sofisticados, y se lo puede efectuar directamente, por ejemplo, desde un puerto paralelo.

Dentro de las diferentes familias de microcontroladores PIC se tienen algunos modelos, en este caso se utilizó el PIC de gama media 16F877 básicamente por la cantidad de memoria y el número de entradas y salidas requeridas, presupuestando una futura ampliación del sistema y además por la facilidad de manejo y programación.

En la Tabla 2.3 se anotan las principales características del PIC16F877:

CPU tipo RISC	Elevado manejo de corriente	Puerto serie sincrónico con modos SPI, I <sup>2</sup> C
Memoria de Programa tipo flash de 8K x 14 words	Módulo conversor A/D	Comunicación serial asincrónica
RAM de 368 x 8 bytes	Módulo generador PWM	3 Timers
EEPROM de 256 x 8 bytes	14 tipos de interrupciones	Reset POR, PWRT, WDT, BOR
5 Puertos	Puerto paralelo	Bajo consumo de energía: < 0.6 mA @ 3V, 4MHz

**Tabla 2.3** CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES PIC16F877

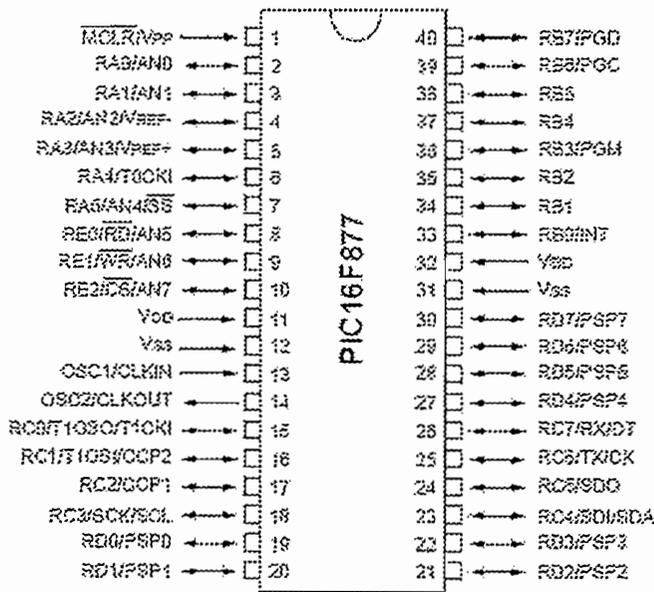
En la Tabla 2.4 se presenta una breve descripción de los pines del PIC16F877:

PIN	DESCRIPCIÓN
V <sub>DD</sub> , V <sub>SS</sub>	Señales de polarización +5V
OSC1, OSC2	Entrada del oscilador de cristal
MCLR /VPP	Reset, voltaje de programación, voltaje de test

<b>PORTA</b>	Puerto bidireccional de entradas y salidas
RA0/AN0	Entrada analógica o entrada/salida TTL
RA1/AN1	Entrada analógica o entrada/salida TTL
RA2/AN2/VREF-	Entrada analógica o entrada/salida TTL, voltaje negativo de referencia
RA3/AN3/VREF+	Entrada analógica o entrada/salida TTL, voltaje positivo de referencia
RA4/T0CKI	Entrada de reloj para TIMER0. Salida en colector abierto
RA5/SS/AN4	Entrada analógica o entrada/salida TTL
<b>PORTB</b>	Puerto bidireccional de entradas y salidas
RB0/INT	Interrupción externa o entrada/salida TTL
RB1	Entrada/salida TTL
RB2	Entrada/salida TTL
RB3/PGM	Entrada/salida TTL, entrada de voltaje para programación
RB4	Entrada/salida TTL, interrupción por cambio de estado
RB5	Entrada/salida TTL, interrupción por cambio de estado
RB6/PGC	Entrada/salida TTL, int. por cambio de estado, reloj de programación
RB7/PGD	Entrada/salida TTL, int. Por cambio de estado, datos de programación
<b>PORTC</b>	Puerto bidireccional de entradas y salidas
RC0/T1OSO/T1CKI	Entrada/salida ST, salida del oscilador, entrada reloj del TIMER1
RC1/T1OSI/CCP2	Entrada/salida ST, entrada del oscilador, entrada Captura2, salida CCPWM2
RC2/CCP1	Entrada/salida ST, entrada del oscilador, entrada Captura1, salida CCPWM1
RC3/SCK/SCL	Entrada/salida ST, reloj serial, salida modo I <sup>2</sup> C, SPI
RC4/SDI/SDA	Entrada/salida ST, entrada de datos modo SPI, I/O de I <sup>2</sup> C
RC5/SDO	Entrada/salida ST, salida de datos modo SPI
RC6/TX/CK	Entrada/salida ST, Transmisión USART, Reloj com. sincrónica
RC7/RX/DT	Entrada/salida ST, Recepción USART, Datos com. Sincrónica
<b>PORTD</b>	Puerto bidireccional de entradas y salidas, Puerto paralelo
RD0/PSP0	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD1/PSP1	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD2/PSP2	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD3/PSP3	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD4/PSP4	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD5/PSP5	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD6/PSP6	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
RD7/PSP7	Entrada/salida ST/TTL, Puerto paralelo
<b>PORTE</b>	Puerto bidireccional de entradas y salidas
RE0/ $\overline{RD}$ /AN5	Entrada/salida ST/TTL, Control de lectura puerto paralelo
RE1/ $\overline{WR}$ /AN6	Entrada/salida ST/TTL, Control de escritura puerto paralelo
RE2/ $\overline{CS}$ /AN7	Entrada/salida ST/TTL, Control de selección puerto paralelo

**Tabla 2.4** FUNCIÓN DE LOS PINES DEL PIC16F877

En la Figura 2.5 se presenta el diagrama de distribución de pines del PIC 16F877.

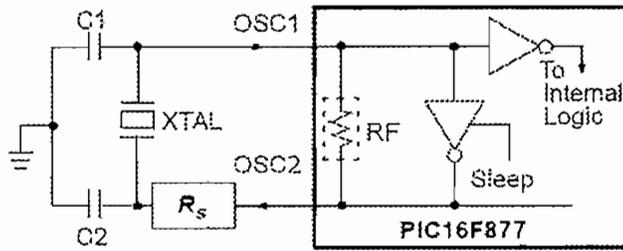


**Figura 2.5** DIAGRAMA DEL PIC 16F877

El circuito microprocesado basado en microcontrolador PIC, incluye dispositivos digitales de niveles TTL, por lo tanto requiere alimentación de +5V, además se prevee que todas las señales conectadas como entrada al PIC mantengan los niveles máximos de voltaje y que no se exceda la capacidad de manejo de corriente por pin.

### 2.3.1 HARDWARE PARA EL PIC

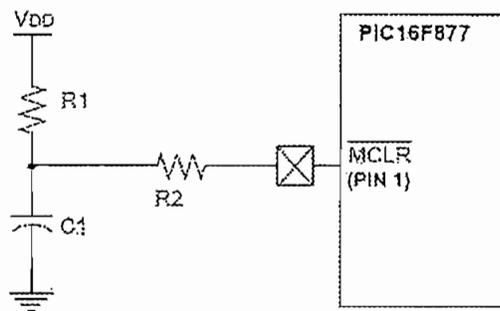
El PIC requiere para su funcionamiento un circuito oscilador; para esta aplicación se utiliza un oscilador implementado con cristal cerámico conectado en los pines OSC1 y OSC2. El fabricante recomienda la configuración mostrada en la Figura 2.6.



**Figura 2.6** CONFIGURACIÓN PARA OSCILADOR DEL PIC

Es recomendable trabajar a una frecuencia de oscilación de 4 MHz, para lo cual los valores recomendados de los capacitores  $C_1$  y  $C_2$  están entre 15 y 68 pF, la resistencia en serie  $R_s$  es requerida para cristales con franja corta, en este caso no resulta necesaria.

Además del circuito oscilador, muchas veces resulta necesario llevar la ejecución de las instrucciones del PIC a un estado conocido inicial, para lo cual se implementa un circuito de reset. Este circuito genera un pulso a cero lógico en el pin 1 ( $\overline{\text{MCLR}}$ ) por lo menos durante 2  $\mu\text{s}$ , para provocar un Master Clear Reset. El manual del dispositivo recomienda la configuración mostrada en la Figura 2.7.



**Figura 2.7** CONFIGURACIÓN PARA RESET DEL PIC

La resistencia pull-up  $R_1$  se recomienda que sea menor a 40 K $\Omega$ , no obstante se debe procurar no reducirla de tal modo que se violen las especificaciones eléctricas del dispositivo. La resistencia  $R_2$  se recomienda que sea mayor a 1K $\Omega$  y debe limitar cualquier corriente que ingrese a través del pin desde el capacitor

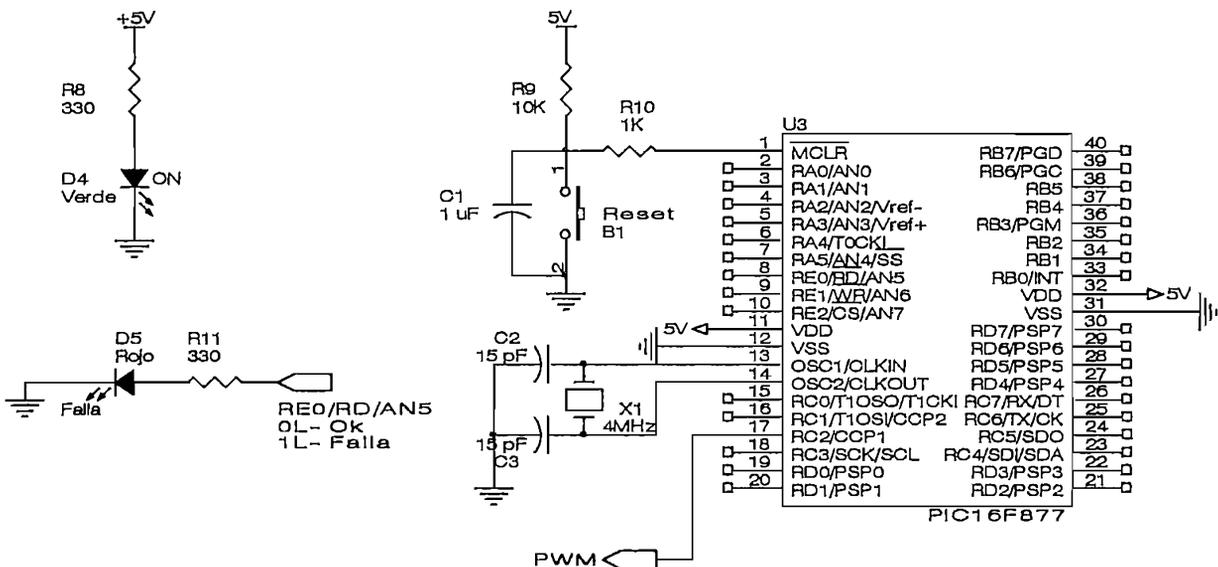
externo  $C_1$  en caso de avería en el reset externo debido a descargas electrostáticas o sobrecarga eléctrica.

Como se mencionó anteriormente cuando hay una condición de falla en el sistema, esto es, por ausencia de la señal del sensor o por ingreso erróneo de contraseña, se pretende que se puede alertar de esta condición mediante un indicador visual; implementado con un diodo led rojo  $D_5$  conectado a través de una resistencia  $R_{11}$  limitadora de corriente desde un pin del PIC.

Esta resistencia debe limitar la corriente de manera que no se sobrepase la especificación eléctrica del pin ( $<25$  mA) y asegurar el encendido del led ( $>10$  mA), así entonces utilizando la ley de ohm se podrá utilizar una resistencia limitadora de  $330\Omega$ , lo cual implica una corriente de  $15$  mA.

Se ha añadido también un diodo led verde  $D_4$ , que indica que el circuito microprocesado está energizado, para esto se adopta la misma configuración del led de aviso de falla.

Los circuitos implementados de reset, oscilador e indicadores visuales son mostrados en la Figura 2.8.



**Figura 2.8** CIRCUITOS DE RESET Y OSCILADOR PARA EL PIC

### 2.3.2 CIRCUITO DE TECLADO

El sistema también cuenta con un teclado que permite la introducción de parámetros para calibración por parte del usuario, además del cambio de variable a visualizarse en el indicador, cambio de unidades de la variable a visualizar y hasta el ingreso de una clave de acceso a las instancias de calibración.

Se implementa un teclado de cinco teclas: Menú, Entrada, Salida, Subir y Bajar que son suficientes para acceder a todas las funciones del módulo. Cada uno de estos botones necesita eliminación de rebotes por software y/o hardware y en el presente proyecto se han conjugado las dos herramientas

El circuito para eliminación de rebotes requiere una resistencia pull-up menor a  $40K\Omega$  en serie con un capacitor cuyo valor produzca una constante de tiempo tal que el PIC pueda detectar el cambio de estado en el pin sin rebotes. Un ciclo de instrucción del PIC dura  $1\mu s$ , por lo tanto, si la red mantiene el nuevo estado en el pin durante  $1ms$  o más, el microcontrolador detectará el pulso sin rebotes. Así entonces, asumiendo resistencias pull-up  $R_{12} = R_{14} = R_{16} = R_{18} = R_{20} = 10 K\Omega$ :

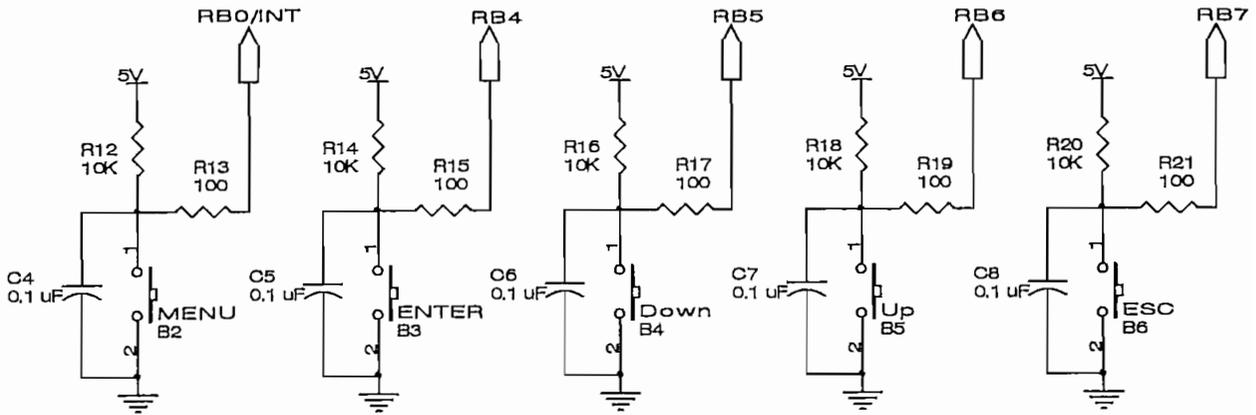
$$RC = 1ms$$

$$C = \frac{1ms}{R} = \frac{1ms}{10 K\Omega}$$

$$C = 0.1 \mu F = C_4 = C_5 = C_6 = C_7 = C_8$$

Se puede incluir resistencias limitadoras para la corriente que ingresa a través del pin desde el capacitor  $C$ . Estas resistencias  $R_{13} = R_{15} = R_{17} = R_{19} = R_{21} = 100\Omega$  son de valor bajo debido a que el capacitor se descarga por la inclusión del pulsante en paralelo.

El circuito implementado que constituye el teclado con eliminación de rebotes por hardware se muestra en la Figura 2.9.



**Figura 2.9** ESQUEMA DEL TECLADO

### 2.3.3 MÓDULO LCD

La visualización de los datos ingresados por teclado, así como la visualización de las distintas variables, mensajes al usuario, claves de acceso, etc. se obtiene mediante un LCD que posee dos filas de pantalla de 16 caracteres, incluyendo operación de backlight.

El LCD posee las siguientes características:

- Backlight, fondo verde, esta operación es independiente del resto del LCD.
- Tiene 4 u 8 bits de transferencia de datos.
- Limpia la memoria RAM automáticamente al eliminar la energía.
- Caracteres de 5x7 puntos en las 2 líneas.
- Más de 11 tipos de instrucciones, para la operación del LCD.
- Alimentación de +5 voltios.
- Memoria ROM para generar 192 tipos de caracteres.
- Tres terminales que controlan las funciones del LCD.
- Terminal Vo que regula el contraste de la pantalla.

Para la polarización del LCD se debe tener especial cuidado ya que actualmente la distribución de pines de los LCD no está estandarizada y una mala conexión puede ocasionar que se averíe el mismo.

Los datos del LCD son enviados mediante 8 pines desde el PIC, además se interconectan tres líneas de control: una de instrucciones o datos (RS), otra para escritura o lectura (R/W) y una línea de habilitación del LCD (E).

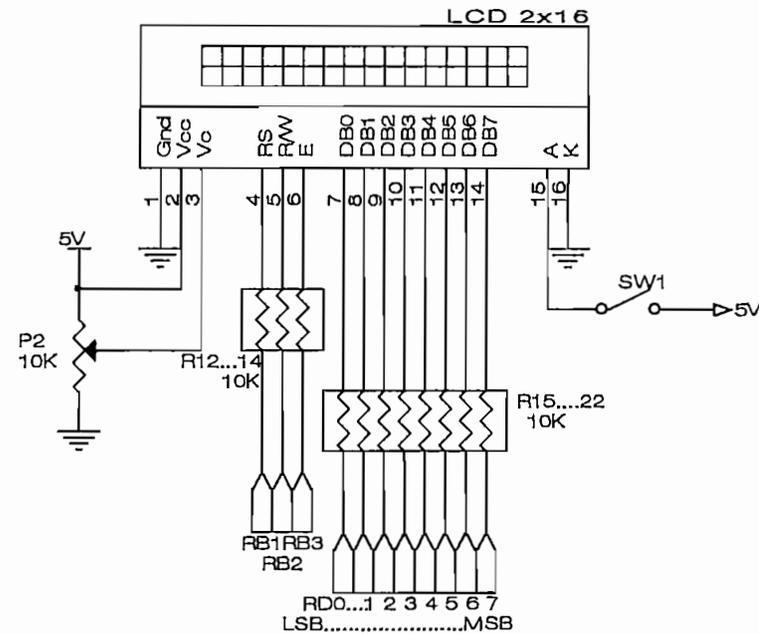
- **Señal de selección de registro RS.-** Esta señal ingresa por RS (pin 4 del LCD) y permite seleccionar que tipo de caracteres va a manejar el LCD, datos o comandos. El PIC controla esta señal mediante niveles TTL: 0 lógico para instrucciones y 1 lógico para datos, seleccionados mediante programa cada vez que se ejecute una operación.
- **Señal de selección para escritura / lectura.-** Esta señal ingresa por R/W (pin 5 del LCD) y permite seleccionar modo de lectura o modo de escritura en la RAM o en la ROM del LCD. El PIC controla esta señal mediante niveles TTL: 0 lógico para escritura y 1 lógico para lectura, seleccionados mediante programa.
- **Señal de habilitación de operación.-** Esta señal ingresa por E (pin 6 del LCD) y permite la ejecución de cada comando que pueda interpretar el LCD, requiere de una transición de 1 lógico a 0 lógico. El PIC controla esta señal mediante niveles TTL, seleccionados mediante programa.

Los datos o instrucciones son transferidos por el PIC conjuntamente con las señales de control, que permiten interpretar los comandos para poder mostrar los datos o caracteres en el LCD o ejecutar ciertas instrucciones.

Gnd y Vcc permiten la polarización del LCD, Vcc (pin 2) requiere de +5 voltios, mientras que Gnd (pin 1) se conecta a la tierra del circuito. El voltaje que ingresa por Vc (pin 3) permite variar el contraste de la pantalla del LCD.

El LCD escogido posee backlight que permite observar los datos de pantalla cuando existe poca iluminación o ninguna, esta señal ingresa por A (pin15) y K (pin16) y requiere niveles lógicos de +5V y tierra respectivamente.

El esquema de la conexión del módulo LCD se muestra en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL LCD

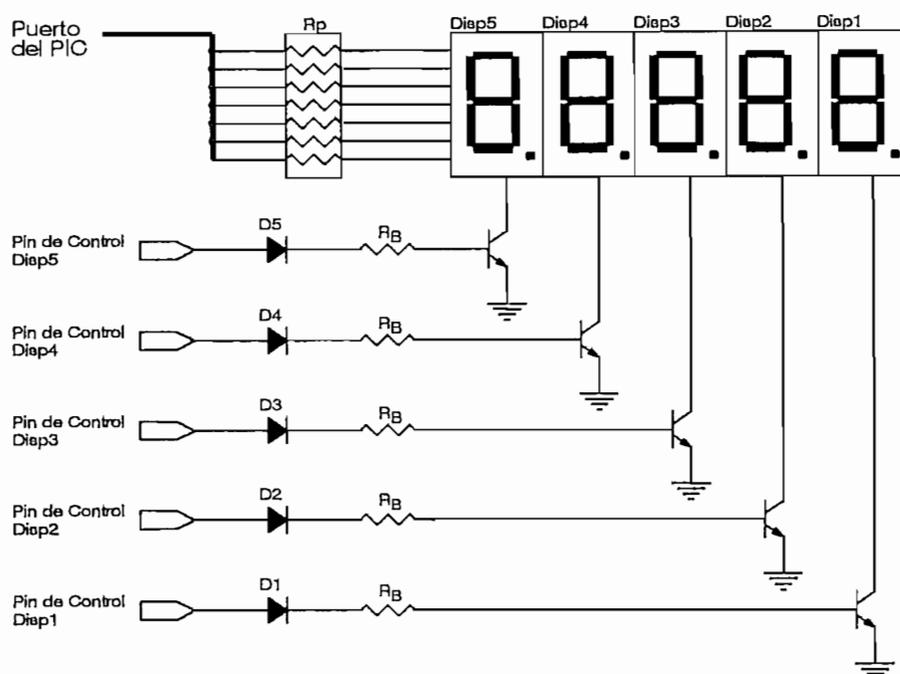
### 2.3.4 INDICADORES DISPLAY TIPO LED

Los indicadores de display también permiten visualizar la variable que se ha configurado a través de la interfaz. Se utilizan display tipo led de siete segmentos que son de mayor tamaño que un carácter del módulo LCD, con el objeto de indicar el estado de la variable más ampliamente.

El manejo de los display es realizado mediante la técnica de barrido por medio del PIC, es decir, que se enciende un display a la vez utilizando para esto un puerto de ocho bits del microcontrolador y cinco líneas de control para los cinco displays,

cada segmento es conectado en paralelo al segmento correspondiente de los demás displays con resistencias comunes al puerto del PIC.

Siguiendo las especificaciones eléctricas del puerto que indican una corriente de salida máxima de 25mA por pin y 200mA por puerto resulta necesario amplificar la corriente en los pines de control. Para este propósito se adopta la configuración mostrada en la Figura 2.11.



**Figura 2.11** MANEJO DE DISPLAY POR BARRIDO

Los displays a utilizarse son de cátodo común, y de acuerdo a la configuración, si el pin de control tiene su salida en nivel lógico alto se tendrá una corriente de base que satura al transistor, de esta manera la corriente fluye desde el cátodo común del display a través del colector y emisor. Por lo tanto, para encender los led se necesitará también una salida en nivel lógico alto en los pines del puerto.

Las resistencias  $R_p$  se calculan de tal manera que se satisfaga la corriente requerida por cada segmento para su correcto encendido y para que no se violen las especificaciones eléctricas del puerto, también se debe tomar en cuenta que

los display van a estar encendidos uno a la vez y por lo tanto deberán cumplir con una relación de trabajo. La frecuencia a la que son encendidos estos displays deberá permitir la visualización para el ojo humano, esto es, entre 300 Hz y 2KHz.

$$R_p = \frac{V_{cc} - V_{led} - V_{CE(sat),m\acute{a}x}}{I_p} \quad \text{Ec. 2.3}$$

$$R_p = \frac{5 - 0.6 - 3.3}{20mA}$$

$$R_p = 55\Omega$$

Estandarizando se tendrá un valor de resistencia de  $56\Omega$ , por la que circulará 19.6 mA que fácilmente enciende un segmento y que no excede la especificación de corriente para los pines.

Las resistencias  $R_B$  fijan una corriente de base para saturar los transistores, para el diseño de estas resistencias cabe indicar que los transistores utilizados son tipo darlington npn, con un  $h_{FE}$  de 1000, así entonces la corriente máxima en el colector es:

$$I_{C,m\acute{a}x} = 8 \times 19.6mA = 156.8mA$$

La corriente mínima necesaria en la base será:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$I_{B,min} = \frac{156.8mA}{1000} = 156.8 \mu A$$

Por lo tanto la resistencia máxima en la base será:

$$R_{B,max} = \frac{V_{pin} - V_{AK,diodo} - V_{BE}}{I_{B,m\acute{a}x}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$R_{B,max} = \frac{5 - 0.7 - 2.8}{156.8 \mu A} = 9.57K$$

En el diseño se ha escogido un valor de resistencia de  $1K\Omega$ , lo cual hace que se tenga una corriente en la base del transistor de  $1.5mA$ , proporcionando así una corriente máxima de colector de  $12 mA$ , suficiente para el encendido de los ocho segmentos en el caso de que se presente en el display el dígito 8 y el punto decimal a la vez.

## **2.4 DISEÑO DEL TRANSMISOR**

La etapa de transmisión permite cumplir con el objetivo principal del proyecto, que es transmitir el valor de la variable presión bajo el estándar de corriente  $4-20 mA$  en dos hilos.

En esta etapa se ha incluido la conversión de digital a análogo de la señal, mediante la técnica de extraer la componente continua de la onda PWM que genera el PIC en función del valor digital de la presión. También se incluye la parte medular del transmisor de corriente, que es la conversión de voltaje a corriente y adición de offset de  $4 mA$ , además del suministro de energía por medio de los dos hilos ya que esta es la característica principal de los transmisores industriales.

Al igual que las etapas anteriores, ésta forma parte de un mismo circuito electrónico que lo constituyen etapas de amplificación, filtrado, conversión a corriente y transmisión; este circuito consta de integrados que requieren, al igual que la primera etapa, de fuentes de  $\pm 12V$  y de  $+5V$ .

### **2.4.1 GENERACIÓN PWM**

Se utiliza el módulo PWM del PIC como un conversor D/A, para esto se genera por software una onda cuadrada de frecuencia y período fijos y ancho de pulso variable, es decir, una onda PWM.

El sensor entrega una señal de voltaje continuo que representa la presión, esta señal se digitaliza a través del módulo A/D del PIC para posteriormente trasladarla como valor digital a un registro del módulo PWM, registro que representa el ancho de pulso; de esta manera se consigue que un cambio de la señal de presión se refleje en un cambio del ancho de pulso.

En la Figura 2.12(a) se indica un ejemplo donde se tiene una muestra de la señal del sensor de 1V, que es el 20% del valor máximo de la señal del sensor, al digitalizar esta muestra se obtiene el 20% del valor digital máximo. El valor digitalizado es trasladado al registro que representa el ancho de pulso de la onda PWM con período fijo de 4.1 ms, por lo tanto, el ancho de pulso será el 20% de este período, es decir, 0.82 ms; esto se indica en la Figura 2.12 (b).

En las Figuras 2.12 (c) y (e) se dan otros ejemplos con valores de la señal de 2.5 y 4 V respectivamente, que representan el 50 y 80% de la señal. Se observa en las Figuras 2.12 (d) y (f) que al incrementar la señal del sensor, incrementa el ancho de pulso de la onda PWM generada por el PIC, el período de 4.1 ms se mantiene fijo.

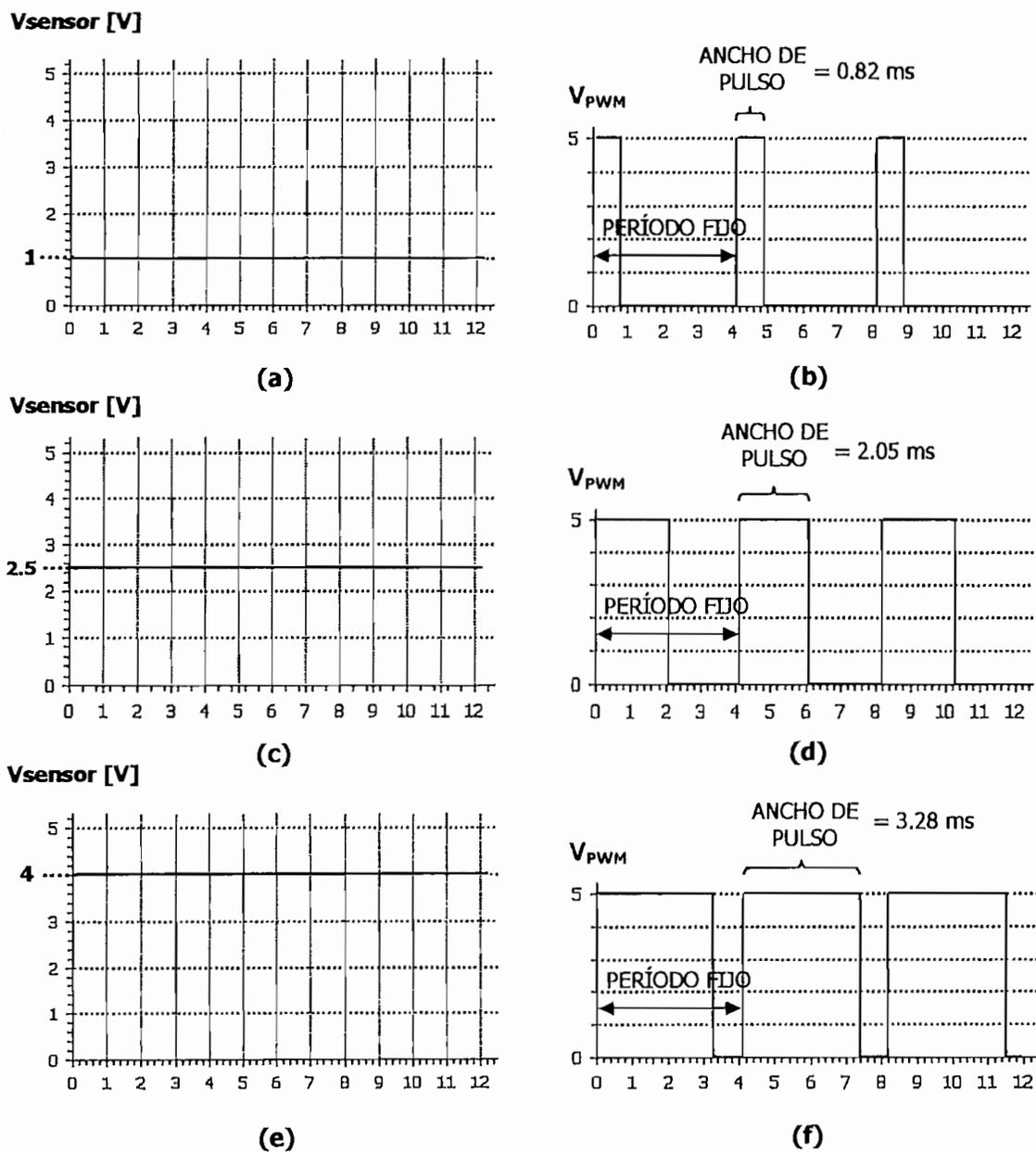


Figura 2.12 VARIACIÓN DEL ANCHO DE PULSO

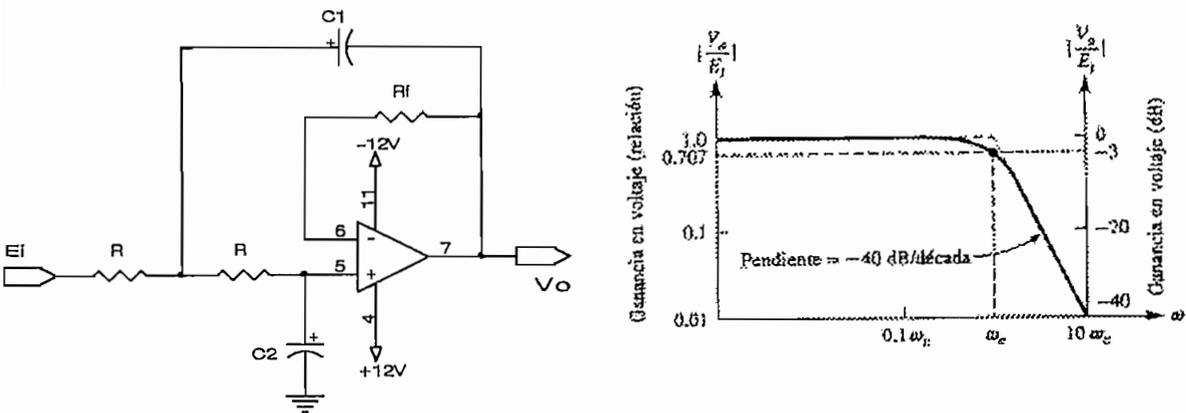
## 2.4.2 FILTRO BUTTERWORTH

Con el objeto de extraer la componente continua de la señal PWM, esta onda debe ser filtrada para atenuar las componentes de mayor frecuencia; por esta razón se aplica un filtro activo pasa bajo de segundo orden que utiliza elementos activos como transistores o amplificadores operacionales. Todas aquellas

componentes de frecuencia mayor a la frecuencia de corte serán atenuadas y se extraerán las componentes con frecuencia bajo la frecuencia de corte.

La elección de un filtro butterworth se debe a que se necesita que la ganancia de lazo cerrado se aproxime lo más posible a 1 dentro de la banda de paso, además de que no se requiere mantener un ángulo de fase constante en la frecuencia de corte, este tipo de filtros aumenta la fase en  $-45^\circ$  por cada aumento de  $-20$  dB/dec en la pendiente. Tomando en cuenta estos parámetros se ha elegido un filtro de segundo orden con una pendiente de  $-40$  dB/dec con ángulo de fase de  $-90^\circ$  en la frecuencia de corte; la misma que estará en función de la frecuencia de la onda PWM generada por el PIC; es decir, de 244 Hz.

En la Figura 2.13 se muestra la configuración de un filtro butterworth pasa bajo de segundo orden con pendiente  $-40$  dB/dec, así como la gráfica de la respuesta de frecuencia.



**Figura 2.13** CIRCUITO Y RESPUESTA DE FRECUENCIA DEL FILTRO PASA BAJOS DE  $-40$  DB/DEC

En la respuesta de frecuencia del filtro (Figura 2.13) se puede observar un rango superior de valores de frecuencia entre  $\omega_c$  y  $10\omega_c$ , en este rango la señal no es atenuada completamente debido a la pendiente de  $-40$  dB/dec, por lo tanto, para asegurar una atenuación total de las frecuencias superiores a  $\omega_c$  se escoge una frecuencia de corte de  $\omega_c/10$  ó menor; esto asegura la atenuación total de las

frecuencias superiores a  $\omega_c$ . Así entonces, se puede escoger una frecuencia de diseño para el filtro menor o igual a 24 Hz debido a que la onda PWM tiene una frecuencia de 244 Hz.

La ecuación de diseño del filtro es:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi RC_2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Además se debe cumplir con las siguientes condiciones:

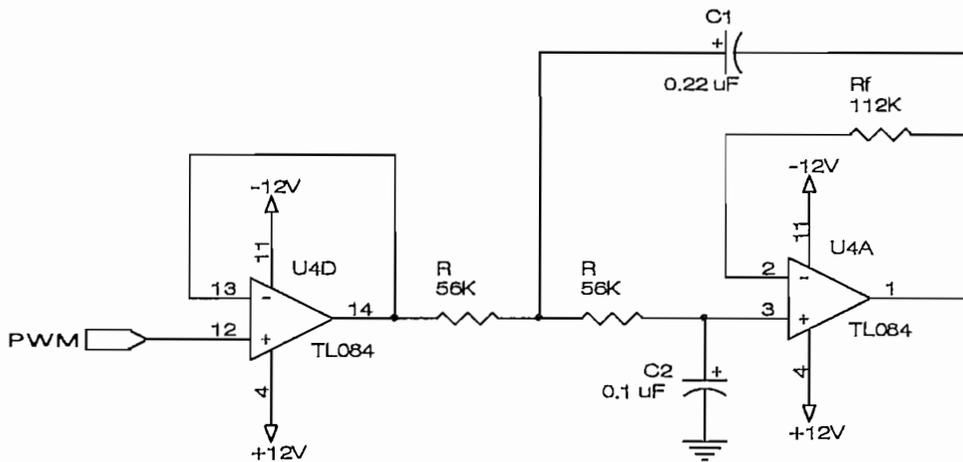
$$C_1 = 2C_2 \quad R_f = 2R$$

Se asume un valor de  $C_2$  comprendido entre 100 pF y 0.1  $\mu$ F, en este caso se toma  $C_2 = 0.1 \mu$ F y finalmente se hallan los valores de los demás elementos.

$$R = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi f_c C_2} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi(24)(0.1\mu F)} = 47K\Omega$$

Se puede elegir una resistencia de valor más alto a la calculada, lo cual disminuye la frecuencia de diseño asegurando aún más la atenuación de las frecuencias mayores, así entonces se tiene:  $R = 56K\Omega$ ,  $R_f = 112K\Omega$ ,  $C_2 = 0.1 \mu$ F,  $C_1 = 0.22 \mu$ F,  $f_c = 20.1$  Hz.

Se incluye un acoplador de impedancias para evitar caídas de tensión. El diagrama esquemático del filtro se muestra en la Figura 2.14.



**Figura 2.14** ESQUEMA DEL FILTRO BUTTERWORTH PASA BAJOS

### 2.4.3 EL TRANSMISOR DE 4-20 mA

En la industria se utilizan transmisores para comunicar la información análoga sobre pares de alambre; el transmisor más popular es el de 4 a 20 mA. Las razones principales para utilizar este tipo de transmisor son:

- Inmunidad al ruido
- Inmunidad frente a caídas de voltaje por conexiones defectuosas
- Capacidad de proveer energía al transductor alejado
- Detección de falla por rotura del lazo

El valor análogo es representado por una corriente continua que va de 4 mA para un nivel cero de la señal a 20 mA para el nivel a gama completa. Aún así en el límite más bajo, 4 mA, se asegura que la corriente del lazo este siempre disponible aún para el caso de valor nulo en la variable medida.

### 2.4.4 CIRCUITO INTEGRADO AD694

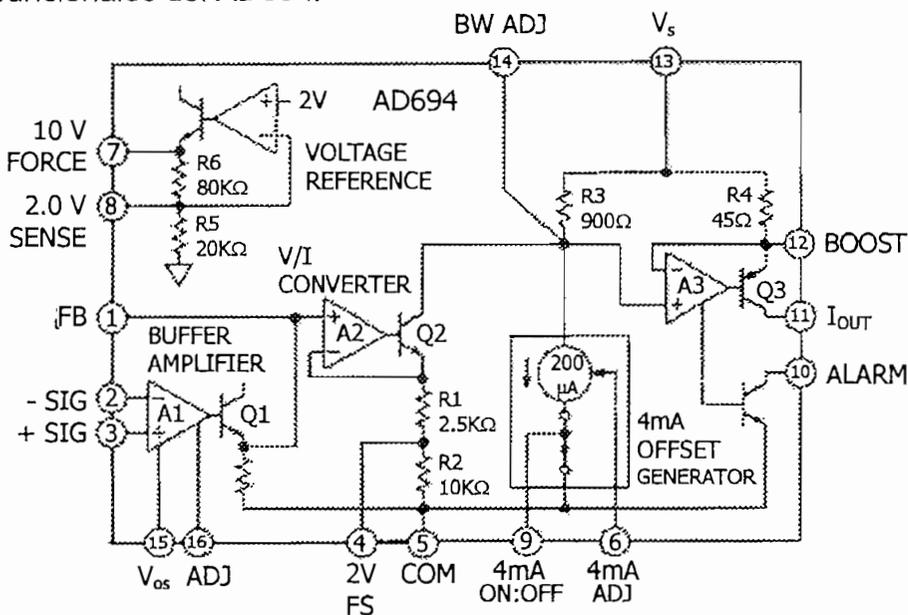
Para el diseño del transmisor se utiliza el circuito integrado AD694, que es un transmisor monolítico de corriente que acepta entradas de señal de alto nivel para

manejar lazos de corriente estándar de 4-20 mA para el control de válvulas, actuadores y otros dispositivos comúnmente utilizados en control de procesos.

La señal de entrada es protegida por un amplificador que puede ser utilizado para escalar la señal de entrada o para amplificar la salida de un conversor digital/análogo. Los rangos de entrada al transmisor se los puede seleccionar de 0V a 2V y de 0V a 10V. Otros intervalos pueden ser programados con resistencias externas.

El AD694 tiene circuito de alarma interna, que advierte cuando el lazo de corriente de salida está abierto, o cuando el voltaje en  $I_{out}$  es superior a  $V_s - 2V$ . Además un transistor externo de paso puede ser utilizado como descarga de la disipación de energía extendiendo la gama de temperaturas de operación.

Este circuito integrado es ideal en sistemas que requieren la transmisión 4-20 mA inmune al ruido para accionar válvulas, actuadores y otros dispositivos de control, también para la transmisión de parámetros de procesos tales como presión, temperatura o flujo. Se lo recomienda como reemplazo para diseños discretos en una variedad de aplicaciones en control de procesos industriales, automatización de fábricas y sistemas de monitoreo. En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de bloques funcionales del AD694.



**Figura 2.15** DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONALES DEL AD694

Las características del transmisor monolítico de corriente AD694 son:

- Rangos de salida de 4-20 mA, o 0-20 mA
- Rangos de entrada precalibrados de 0V a 2V o 0V a 10V
- Referencia de voltaje de precisión programable a 2V o 10V
- Operación sola o dual de la fuente
- Gama ancha de fuente de alimentación: +4.5V a +36V
- Amplificador de protección de entrada
- Alarma de lazo abierto
- Transistor externo opcional de paso para reducir errores de autocalentamiento y extensión del rango de temperatura de trabajo

En la Tabla 2.5 se describe la función de cada uno de los pines del AD694.

# Pin	Designación	Descripción
1	FB	Entrada no invertida de convertor V/I
2	- SIG	Entrada invertida del transmisor
3	+ SIG	Entrada no invertida del transmisor
4	2V FS	2V a gama completa
5	COM	Campo común
6	4mA ADJUST	Ajuste de 4 mA
7	10V FORCE	Voltaje de referencia de 10 V
8	2V SENSE	Voltaje de referencia de 2 V
9	4mA ON:OFF	Control 4 mA
10	ALARMA	Alarma para lazo de corriente
11	$I_{OUT}$	Salida actual
12	BOOST	Impulso
13	$V_S$	Fuente positiva
14	BW ADJ	Ajuste del ancho de banda
15	$V_{OS}$	Ajuste compensado del voltaje
16	ADJ	Control de ajuste compensado del voltaje

**Tabla 2.5** FUNCIÓN DE LOS PINES DEL AD694

## 2.4.5 DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DEL CI-AD694

Para facilitar el entendimiento de la operación del AD694, se divide el diagrama de bloques del AD694 en tres partes funcionales, primero un amplificador, que conduce a una segunda etapa, en esta se tiene un convertor de voltaje a corriente en el cual se obtiene la señal de 0 mA a 16 mA. Finalmente en la tercera sección un circuito que tiene un voltaje de referencia y un generador de offset provee los 4 mA de offset de corriente.

### 2.4.5.1 Amplificador Buffer

Es un amplificador que puede ser utilizado con ganancia unitaria, amplificador de salida de corriente para un convertor D/A o como bloque de ganancia para amplificar señales de bajo nivel. El rango de entrada de voltaje se extiende desde alrededor de 1 mV hasta  $V_S - 2.5V$  cuando el amplificador esta en configuración de seguidor emisor, el amplificador puede proporcionar una máxima carga de 5 K $\Omega$  pero puede descender únicamente tanto como su resistencia interna de 10K $\Omega$  así lo permita.

### 2.4.5.2 Convertor Voltaje-Corriente

La señal de entrada referenciada desde el amplificador es convertida a una corriente de 0 a 0.8 mA por el amplificador A2 en un factor de 20, haciendo que la señal de corriente sea de 0 a 16 mA, este amplificador A2 fuerza el voltaje en el pin1 a través de la resistencia  $R_1$  y  $R_2$  conduciendo al transistor darlington Q2. El amplificador A3 fuerza el nivel desplazado de la señal a través de la resistencia de 45 $\Omega$  para obtener una ganancia de corriente de 20. Por lo tanto la función de transferencia de la etapa V/I es:

$$I_{OUT} = \frac{20 * V_{PIN1}}{R_1 + R_2} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Resultando en una corriente de salida de 0-16 mA para una entrada de 0-10V.

### 2.4.5.3 Generador de offset 4mA

Este generador convierte un voltaje constante desde el voltaje de referencia a una corriente constante de aproximadamente  $200\mu\text{A}$ ; que es adicionada a la corriente de la señal en el pin 14 (BW ADJ), lo que resulta en la corriente constante de 4 mA offset en la salida ( $I_{\text{OUT}}$ ), el ajuste de 4 mA a través del pin 6, permite que la corriente offset sea ajustada a cualquier corriente en el rango de 2 mA a 4.8 mA. El pin 9 (4 mA On/Off) permite apagar completamente la corriente offset si el pin es llevado a 3V o más, posibilitando así la operación 0 a 20 mA del AD694. En operación normal 4 a 20 mA, este pin es conectado a tierra.

### 2.4.5.4 Voltaje de referencia

Un voltaje de referencia de 2V o de 10V está disponible para distintas aplicaciones. La opción del voltaje de referencia de 2V está disponible para fuentes de voltaje de valores comprendidos entre 4.5V a 36V, mientras que la opción de 10V está disponible al utilizar una fuente de voltaje mayor a 12.5V. La referencia podrá suministrar valores por encima de 5 mA para las diversas aplicaciones, además un transistor de impulso puede ser adicionado para incrementar la capacidad de manejo de corriente en el modo de 2V.

## 2.4.6 DISEÑO DEL CIRCUITO TRANSMISOR

Para el diseño se considera los rangos precalibrados para el AD694 que recomienda el fabricante. De entre dos posibilidades para el rango de entrada, esto es, 0-10 V o 0-2 V con rango de salida 4-20 mA cada una, se escoge la segunda opción debido a que la primera requiere una alimentación mínima de 12.5 V frente a la segunda opción que requiere alimentación mínima de 4.5 V; y

ya que la fuente de voltaje del sistema proporciona máximo +12V se escoge el rango de entrada 0-2V.

Definido el rango de entrada de voltaje entre 0 y 2V y, tomando en cuenta que la señal continua extraída en el filtro pasa bajos tiene un rango entre 0 y 5V, se deberá amplificar esta señal por una ganancia menor a la unidad, concretamente por el valor que se obtiene de la ecuación 2.8 para ganancia de voltaje:

$$A_v = \frac{V_o}{V_{in}} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$A_v = \frac{2}{5} = 0.4$$

Ya que el amplificador no inversor no permite obtener ganancias menores a la unidad, se recurre a un amplificador multietapa que en primera instancia amplifica e invierte la señal con una ganancia de voltaje de 0.4 y posteriormente la invierte con una ganancia unitaria.

Para esto se utiliza un amplificador inversor cuyo comportamiento se gobierna por la ecuación 2.9.

$$V_o = -\frac{R_{f1}}{R_1} V_{in} \quad \text{Ec. 2.9}$$

De donde se obtiene para las resistencias la relación  $R_{f1} = 0.4 \cdot R_1$ , la misma que debe ser cumplida irrestrictamente ya que de esto dependerá el correcto funcionamiento del transmisor. Así entonces, se asume un valor de resistencia  $R_1$  tal que provoque que el valor de  $R_{f1}$  se acerque lo más posible al valor fijo de un potenciómetro. Tomando en cuenta este criterio se asume  $R_1 = 22 \text{ K}\Omega$ , con lo cual  $R_{f1}$  deberá tener un valor exacto de  $8.8 \text{ K}\Omega$  esto se puede conseguir gracias a un potenciómetro de  $10 \text{ K}\Omega$ .

Finalmente el amplificador inversor de ganancia unitaria podrá tener cualquier valor de resistencia para  $R_{f2}$  y  $R_2$ , siempre y cuando sean del mismo valor y de

preferencia valores altos para aumentar la impedancia. Se escogen resistencias  $R_{f2} = R_2 = 100K\Omega$ .

Para el AD694, de acuerdo al rango de voltaje, al rango de salida y al voltaje de referencia escogidos, el fabricante indica en el manual la configuración para un funcionamiento correcto del transmisor, además se recomienda incluir un capacitor de  $0.1 \mu F$  entre la alimentación y tierra para desacoplamiento.

De igual manera, debido al desconocimiento del tipo de carga a conectarse, pudiendo ser esta resistiva o no, se recomienda incluir otro capacitor de  $0.01 \mu F$  entre el pin 11 (lout) y tierra además de dos diodos 1N4001 entre la alimentación, el pin 11 y tierra para garantizar la estabilidad al manejar cargas no resistivas.

Para la interconexión del transmisor a otros equipos y las pruebas a realizarse es importante mencionar que el AD694 puede manejar una carga máxima, dada por la ecuación 2.10 proporcionada por el fabricante.

$$R_{L,m\acute{a}x} = \frac{[V_s - 2V]}{20mA} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Por lo tanto la carga máxima que puede manejar el transmisor para este diseño será:

$$R_{L,m\acute{a}x} = \frac{12 - 2}{20mA} = 500\Omega$$

El diagrama total del hardware implementado se muestra en la Figura 2.16.

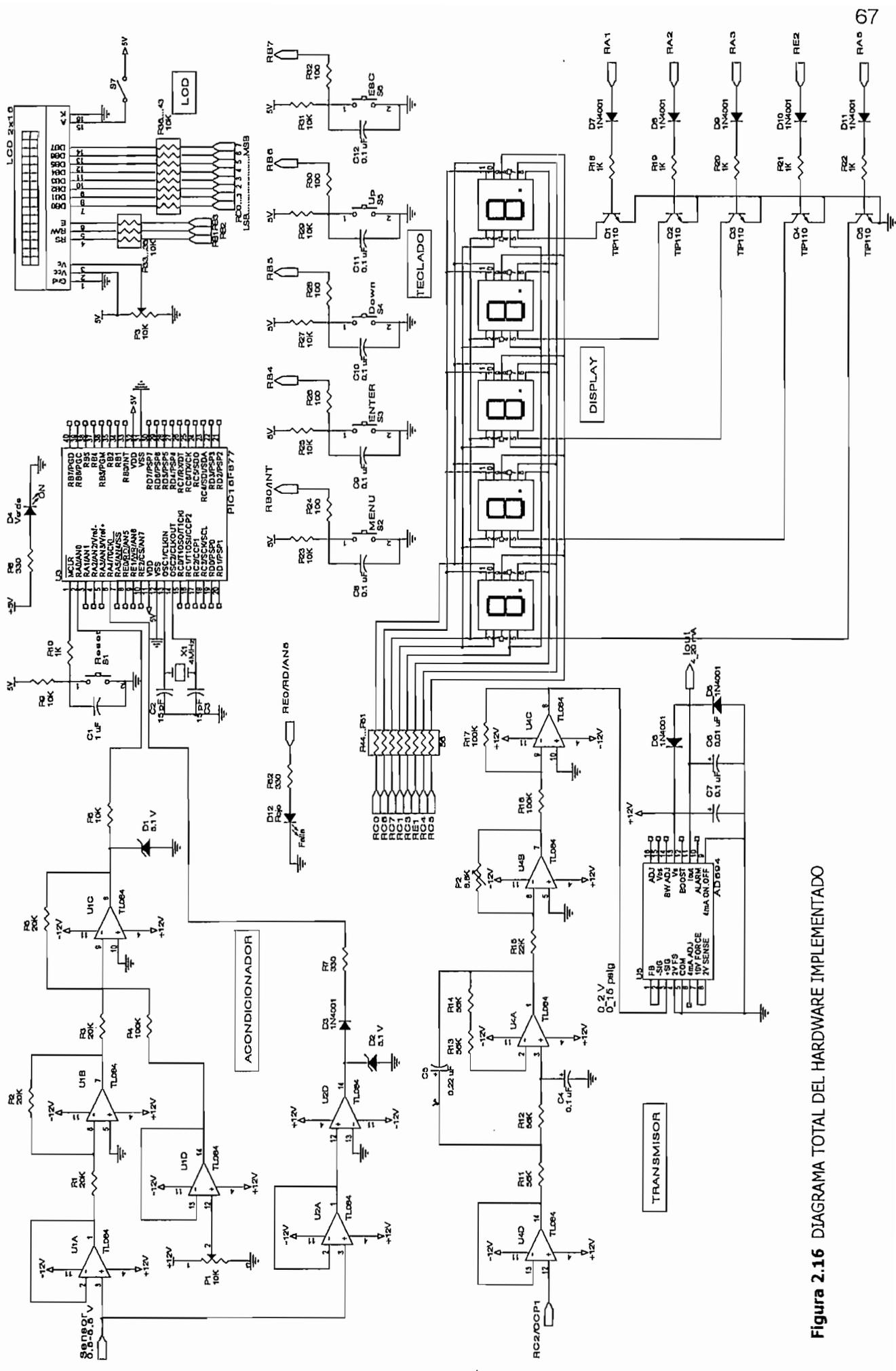


Figura 2.16 DIAGRAMA TOTAL DEL HARDWARE IMPLEMENTADO

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL SOFTWARE**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El software implementado en el microcontrolador maneja el sistema. Dentro de los objetivos del sistema microprocesado están: determinar e indicar las variables asociadas a la presión, constituir una interfaz con el usuario para la introducción de datos y crear el punto de partida para el transmisor.

Para lograr los objetivos planteados se ha desarrollado un programa para el PIC que controla el módulo conversor análogo digital así como el módulo PWM, con la señal digitalizada de presión se calculará internamente las variables asociadas en base a parámetros ingresados por defecto o vía teclado y se manejará el módulo LCD y displays para indicar la variable así configurada.

Se contempló la necesidad de tener un sistema que se calibre con parámetros por defecto después de cada reset, estos parámetros se han establecido para la aplicación específica del sistema que es medir volumen de leche en un tanque-silo con dimensiones fijas; no obstante el software permite que el sistema sea calibrado con otros parámetros y/o dimensiones que eventualmente podrían cambiar para permitir el funcionamiento en otras plantas.

Cabe destacar además que se ha dotado de funciones de seguridad al sistema con el objeto de evitar descalibraciones premeditadas; así entonces, el ingreso manual de parámetros solo podrá ser realizado con el conocimiento de una contraseña.

## **3.2 DESARROLLO DEL SOFTWARE**

El software fue desarrollado de una manera modular y se explicará partiendo desde el programa principal hacia las diferentes subrutinas, detallando las diferentes localidades de memoria RAM utilizadas y mostrando el diagrama de flujo de las rutinas.

Además del programa principal, se ha desarrollado en la página 1 de memoria una rutina para atender la única interrupción que se utiliza, la interrupción externa. Esta interrupción se provoca al presionar la tecla MENÚ y permite acceder a los menús de configuración, cambio de parámetros y contraseña para establecer la interfaz con el usuario.

### **3.2.1 PROGRAMA PRINCIPAL PARA EL PIC**

El programa principal contiene las tareas neurálgicas del funcionamiento del sistema, así, entre otras, se incluyen rutinas de prueba de la conexión del sensor, manejo de periféricos, cálculo interno de variables y su indicación. Dentro de cada una de estas rutinas existen subrutinas que ejecutan funciones más básicas, tales como multiplicar dos números o presentar mensajes en el LCD.

El programa principal en sí es un lazo infinito que se encarga de realizar todas estas tareas con eventuales interrupciones provocadas por el usuario vía teclado, estas interrupciones permitirán el ingreso de parámetros, cambio de variable, de unidades y/o de contraseña, luego de lo cual el sistema se recalibrará automáticamente en función de los parámetros cambiados.

Debido a la extensión del programa y considerando una futura expansión del sistema para un segundo silo se ha utilizado las tres primeras páginas de la memoria de programa del PIC y los dos primeros bancos de registros para propósito general de la memoria RAM; el programa principal se ubica en la primera página.

El programa principal y las demás rutinas excepto las de retardos para el LCD, utilizan los registros de propósito general del banco 0, que van desde la localidad de memoria RAM 20h hasta la 7Fh. Las rutinas de retardos, necesarios para la operación del módulo LCD, utilizan catorce de los registros de propósito general del banco 1, desde la localidad de memoria RAM A0h hasta la ADh.

A continuación en la Tabla 3.1 se listan las etiquetas del banco 0 utilizadas por el programa, así como las direcciones de memoria que usan y que función cumplen.

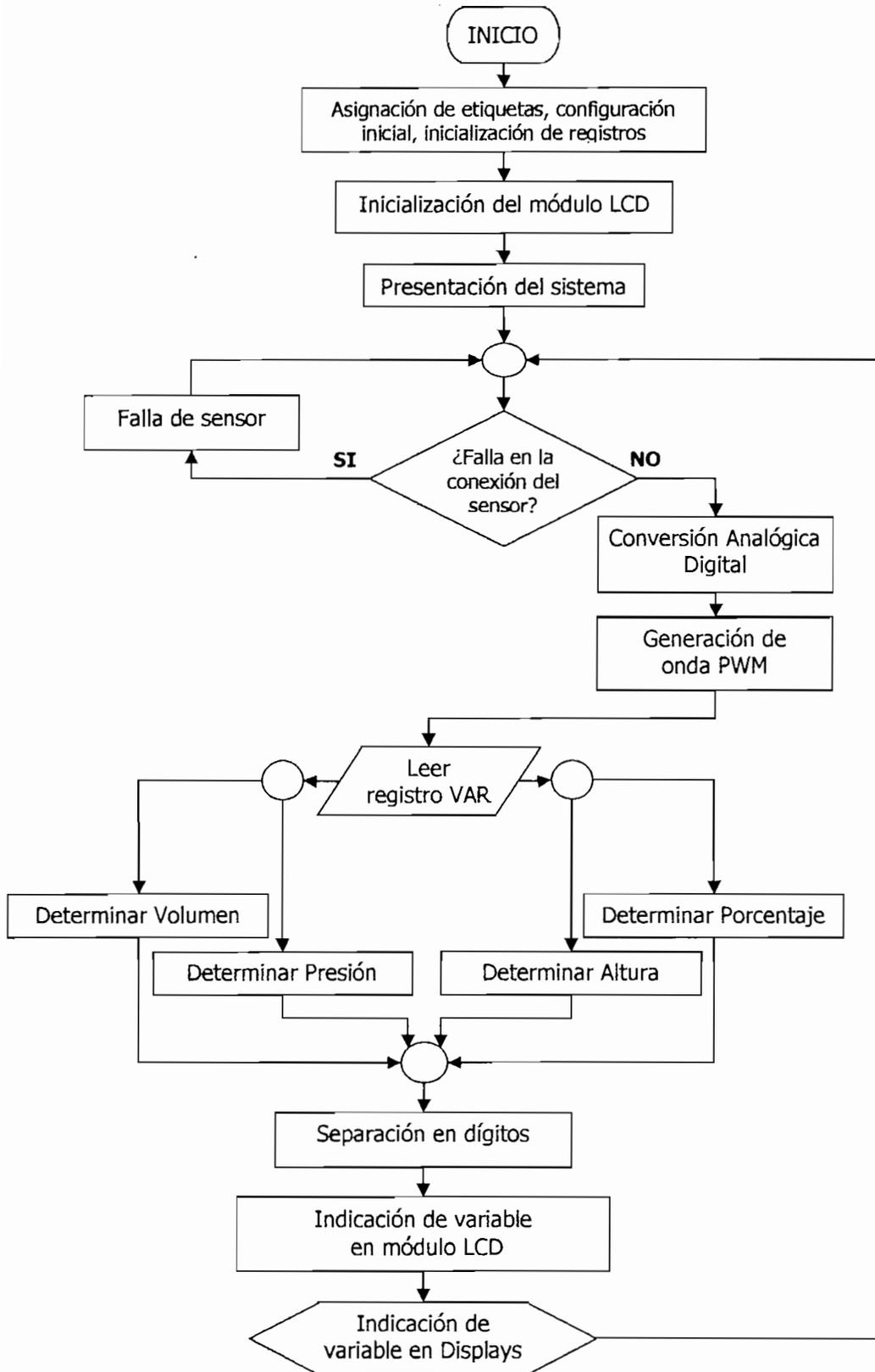
Etiqueta	Dirección	Función
W_TEMP	20h	Registro para respaldo de Acumulador
STATUS_TEMP	21h	Registro para respaldo de STATUS
VAR	22h	Registro para variable a visualizar
VAR_aux	23h	Registro auxiliar para variable a visualizar
UNI1	24h	Registro para unidad 1 de variable a visualizar
UNI_aux1	25h	Registro auxiliar para unidad 1 de variable a visualizar
UNI2	26h	Registro para unidad 2 de variable a visualizar
UNI_aux2	27h	Registro auxiliar para unidad 2 de variable a visualizar
CLV1	28h	Decenas de la clave
CLV_aux1	29h	Registro auxiliar para decena de la clave
INTENTO_CLAVE	2Ah	Registro para intentos de ingreso de clave
CLV2	2Bh	Unidades de la clave
CLV_aux2	2Ch	Registro auxiliar para decena de la clave
TEMP_aux1	2Dh	Registro auxiliar para unidades de temperatura
TEMP_aux2	2Eh	Registro auxiliar para decenas de temperatura
TEMP1	2Fh	Registro para unidades de temperatura
TEMP2	30h	Registro para decenas de temperatura
DENS_aux1	31h	Registro auxiliar para unidades de densidad
DENS_aux2	32h	Registro auxiliar para decenas de densidad
DENS1	33h	Registro para unidades de densidad
DENS2	34h	Registro para decenas de densidad
DIA1	35h	Registro para unidades de diámetro
DIA2	36h	Registro para decenas de diámetro
DIA3	37h	Registro para centenas de diámetro
ALT1	38h	Registro para unidades de altura
ALT2	39h	Registro para decenas de altura
ALT3	3Ah	Registro para centenas de altura
ALT4	3Bh	Registro para miles de altura
CLV_ax1	3Ch	Registro auxiliar para decena de la clave
CLV_ax2	3Dh	Registro auxiliar para unidades de la clave
DIA_aux1	3Eh	Registro auxiliar para unidades de diámetro
DIA_aux2	3Fh	Registro auxiliar para decenas de diámetro
DIA_aux3	40h	Registro auxiliar para centenas de diámetro
ALT_aux1	41h	Registro auxiliar para unidades de altura

ALT_aux2	42h	Registro auxiliar para decenas de altura
ALT_aux3	43h	Registro auxiliar para centenas de altura
ALT_aux4	44h	Registro auxiliar para miles de altura
a_2	45h	Registro byte alto para multiplicación 16 bits
a_1	46h	Registro byte bajo para multiplicación 16 bits
b_2	47h	Registro byte alto para multiplicación 16 bits
b_1	48h	Registro byte bajo para multiplicación 16 bits
c_4	49h	Registro byte más alto para producto 16 bits
c_3	4Ah	Registro byte alto para producto 16 bits
c_2	4Bh	Registro byte bajo para producto 16 bits
c_1	4Ch	Registro byte más bajo para producto 16 bits
cont1_MUL16	4Dh	Registro1 contador para multiplicación 16 bits
cont2_MUL16	4Eh	Registro2 contador para multiplicación 16 bits
PCLATH_TEMP	4Fh	Registro para respaldo de PCLATH
cont_prom	50h	Registro para contar promedio de muestras
x_1	51h	Registro byte alto para dividendo DIV_24 bits
x_2	52h	Registro byte medio para dividendo DIV_24 bits
x_3	53h	Registro byte bajo para dividendo DIV_24 bits
y_1	54h	Registro byte alto para divisor DIV_24 bits
y_2	55h	Registro byte medio para divisor DIV_24 bits
y_3	56h	Registro byte bajo para divisor DIV_24 bits
r_1	57h	Registro byte alto para residuo DIV_24bits
r_2	58h	Registro byte medio para residuo DIV_24bits
r_3	59h	Registro byte bajo para residuo DIV_24bits
aux1_DIV24	5Ah	Registro auxiliar 1 para DIV_24bits
aux2_DIV24	5Bh	Registro auxiliar 2 para DIV_24bits
aux3_DIV24	5Ch	Registro auxiliar 3 para DIV_24bits
cont_DIV24	5Dh	Registro contador para DIV_24bits
mostrar_1	5Eh	Registro alto de variable a mostrar
mostrar_2	5Fh	Registro bajo de variable a mostrar
altura_alto	60h	Registro alto para altura calculada
altura_bajo	61h	Registro bajo para altura calculada
alt_hex_1	62h	Registro alto para altura ingresada
alt_hex_2	63h	Registro bajo para altura ingresada
s_1	64h	Registro byte alto para 1er sumando en 16bits
s_2	65h	Registro byte bajo para 1er sumando en 16bits
s_3	66h	Registro byte alto para 2º sumando en 16bits
s_4	67h	Registro byte bajo para 2º sumando en 16bits
s_5	68h	Registro byte alto para suma en 16bits
s_6	69h	Registro byte bajo para suma en 16bits
dia_hex_1	6Ah	Registro alto para diámetro ingresado
dia_hex_2	6Bh	Registro bajo para diámetro ingresado
volumen_alto	6Ch	Registro alto para volumen calculado
volumen_bajo	6Dh	Registro bajo para volumen calculado
dig_decmil	6Eh	Registro para decenas de mil de variable a mostrar
dig_mil	6Fh	Registro para miles de variable a mostrar
dig_cen	70h	Registro para centenas de variable a mostrar
dig_dec	71h	Registro para decenas de variable a mostrar
dig_uni	72h	Registro para unidades de variable a mostrar
var_pant	73h	Registro de variable de pantalla LCD
temp1	74h	Registro temporal 1

temp2	75h	Registro temporal 2
temp3	76h	Registro temporal 3
DENS3	77h	Registro para centenas de densidad
DENS_aux3	78h	Registro auxiliar para centenas de densidad
dens_hex_1	79h	Registro alto para densidad ingresada
dens_hex_2	7Ah	Registro bajo para densidad ingresada
cont_PWM	7Bh	Registro para contador onda PWM
presion_alto	7Ch	Registro alto para presión
presion_bajo	7Dh	Registro bajo para presión
pr_alto_aux	7Eh	Registro auxiliar alto para presión
pr_bajo_aux	7Fh	Registro auxiliar bajo para presión

**Tabla 3.1** ETIQUETAS EN BANCO 0 DE MEMORIA RAM

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo del programa principal.



**Figura 3.1** DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL

### 3.2.1.1 Configuración inicial, puertos y registros

Al empezar el programa se requieren configuraciones iniciales para los diferentes periféricos que controlará el PIC, así como la inicialización de los registros que se utilizarán en las diferentes rutinas de manejo y configuración de puertos. Para la aplicación en curso resulta necesario también que en esta instancia se definan valores iniciales de parámetros tales como la temperatura, densidad, dimensiones y hasta la contraseña, es decir, que se carguen los valores por defecto que utilizará el sistema.

Dicha configuración inicial empieza desde los registros de funciones especiales ubicados en el banco 1 de la memoria RAM. Así entonces, se configura el registro OPTION\_REG (81h) de tal manera que se habiliten las entradas pull-up del PORTB y que la interrupción externa sea detectada en flanco de bajada, es decir, en un cambio desde nivel lógico alto a bajo.

Posteriormente se configuran los seis pines del PORTA por medio del registro TRISA (85h) de manera que los pines RA1, RA2, RA3 y RA5 se configuren como salidas para control de los displays D1, D2, D3 y D5 respectivamente para esto se limpia o se escribe un cero lógico en el bit correspondiente; los pines RA0 y RA4 se configuran como entradas escribiendo un uno lógico en sus bits, ya que a través de estos dos pines se recoge el estado de la señal desde el acondicionador, en el caso de RA0 será entrada analógica y en RA4 será entrada digital la misma que indica al sistema una eventual desconexión del sensor.

El PORTB es configurado a través del registro TRISB (86h) de manera que se tengan los pines RB0, RB4, RB5, RB6 y RB7 como entradas, necesarias para la implementación de las cinco teclas; se utilizará para esto la interrupción externa a través de la tecla MENU en el pin RB0/INT. Los pines restantes del PORTB, es decir, RB1, RB2 y RB3 se configuran como salidas para enviar instrucciones de control hacia el módulo LCD.

Los puertos PORTC, PORTD y PORTE son todos configurados como salidas, asignados estos para el manejo de los displays, módulo LCD, led de aviso de falla, y salida PWM para el transmisor. Esto se consigue escribiendo cero en los respectivos registros de configuración de cada puerto; es decir, en TRISC (87h), TRISD (88h) y TRISE (89h).

Dentro de la configuración inicial se incluye también la especificación del período de la onda PWM para lo cual el manual del fabricante proporciona la ecuación 3.1.

$$T_{PWM} = [(PR2)+1] * 4 * T_{OSC} * (TMR2 \text{ Prescale Value}) \quad \text{Ec. 3.1}$$

El valor del prescaler para el TIMER2 debe ser el máximo; es decir, 16, ya que se busca tener una onda con período lo más alto posible, es decir, de baja frecuencia para evitar la inclusión de ruido que se produce al trabajar con altas frecuencias.

Con este valor de prescaler, el máximo período PWM estará dado por el máximo valor que se pueda escribir en el registro PR2 (92h) de ocho bits, es decir, 255d, finalmente el período del oscilador estará dado por el inverso de la frecuencia del cristal, que en este caso tiene un valor de 4MHz.

Así entonces el período PWM será:

$$T_{PWM} = [(255)+1] * 4 * \frac{1}{4MHz} * 16$$

$$T_{PWM} = 4.096 \text{ ms}$$

Lo cual redundará en una frecuencia de la onda PWM de 244 Hz, dato necesario para el diseño del filtro butterworth aplicado.

Dentro de las configuraciones para el módulo PWM se debe manipular dos registros adicionales, el registro CCP1CON (17h) permite que el módulo Capture/Compare/PWM del PIC trabaje en modo PWM y el registro T2CON (12h)

que configura al TIMER2 que es el encargado de generar la onda; en este registro se fija el postscale 1:1, el prescaler en 16 y se enciende el temporizador.

Para la configuración del módulo convertidor análogo digital se utilizan los registros ADCON0 (1Fh) y ADCON1 (9Fh) en los cuales se fija el reloj de conversión, el canal análogo a utilizarse y se inicia la operación del módulo A/D.

El registro ADCON1 permite además determinar la justificación del resultado en el par de bytes ADRESH; ADRESL en donde se sitúa el resultado de la conversión con resolución de 10 bits.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de configuraciones iniciales anteriormente descrito.

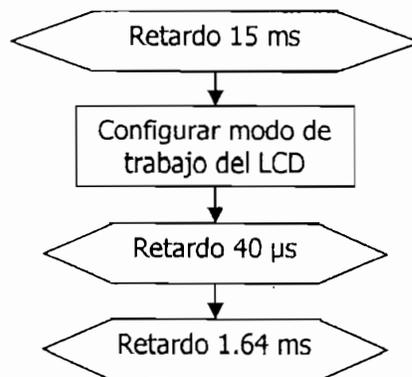
temperatura, densidad dimensiones del silo, contraseña de acceso, así como la variable que se mostrará y las unidades en las que será presentada.

Los registros se cargan de tal manera que la temperatura sea de 9°C, la densidad de 1.030 gr/ml, altura del silo de 7.06 mts, diámetro del silo 2.72 mts, la contraseña de acceso original es el número 02, la variable a mostrarse por defecto es volumen y presentada en litros. Finalmente en esta instancia se cargan los valores de registros auxiliares para subrutinas de retardo y las condiciones iniciales de los puertos y pines de salida.

### 3.2.1.2 Inicialización del módulo LCD

Al iniciar el programa debe inicializarse también el módulo LCD de acuerdo a las referencias técnicas del fabricante. En este caso el módulo LCD se configura para que trabaje con 8 bits, dos filas con matrices 5x7 por caracter, cursor apagado y desplazamiento hacia la derecha. Antes de enviar la configuración el fabricante recomienda un retardo de mínimo 15 ms necesario para estabilizar los voltajes en el módulo, después de cada instrucción enviada se necesita un retardo de 40  $\mu$ s, necesario para que el módulo entienda las instrucciones y al finalizar la configuración del LCD se requiere un último retardo de 1.64 ms.

En la Figura 3.3 se indica el diagrama de bloques para la inicialización del módulo LCD.



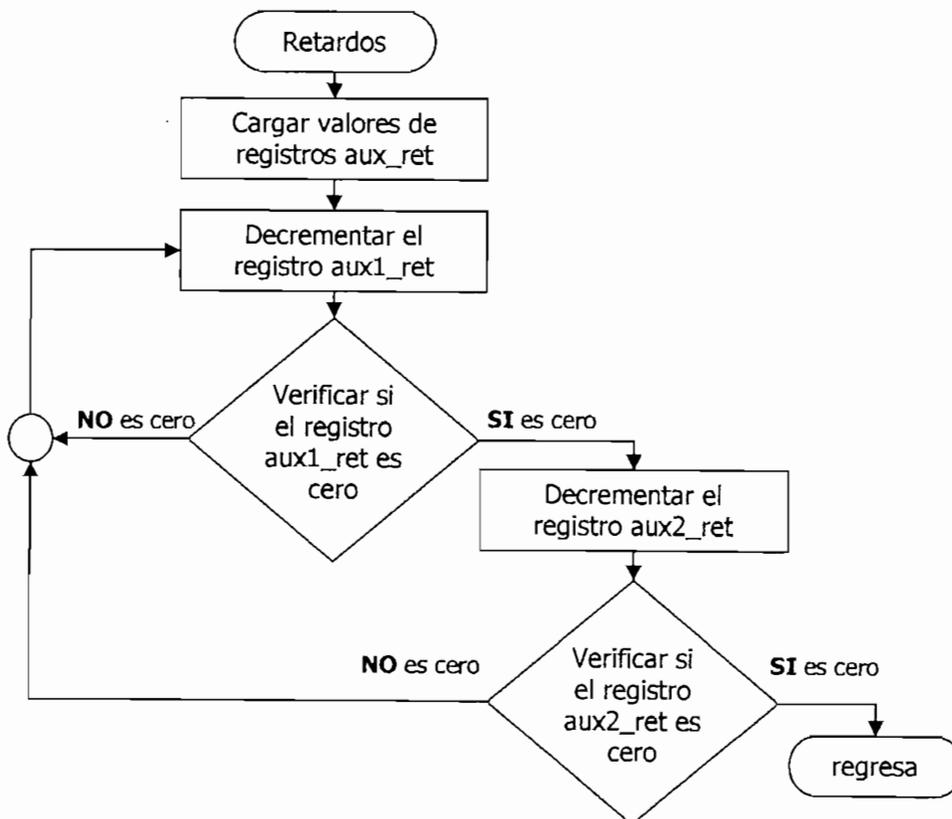
**Figura 3.3** INICIALIZACIÓN DEL LCD

### 3.2.1.3 Subrutinas de retardos

Para generar los intervalos de tiempo requeridos se han implementado subrutinas de retardo que duran como mínimo dichos valores de tiempo, la implementación de estos retardos está basada en decrementar registros y reestablecerlos, considerando además el ciclo de máquina de acuerdo a la ecuación 3.2.

$$CM = \frac{4}{f_{osc}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Puesto que la frecuencia del oscilador es de 4 MHz se tiene un ciclo de máquina de 1  $\mu$ s de duración lo cual permite calcular el número de decrementos necesarios para cumplir con el retardo respectivo. Así entonces se han desarrollado seis subrutinas de retardo con tiempos de: 40  $\mu$ s, 1.64 ms, 15 ms, 0.25 s, 0.5 s y de 1 s; todas estas utilizadas para el manejo del LCD, la subrutina se presenta en la Figura 3.4.

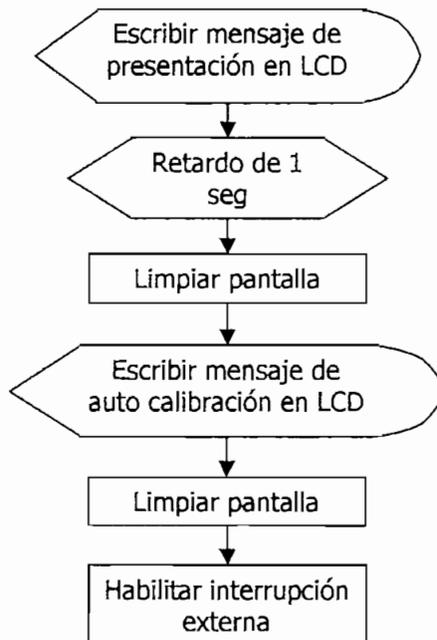


**Figura 3.4** SUBROUTINA DE RETARDOS

### 3.2.1.4 Presentación del sistema

Antes de iniciar el programa principal se muestra un mensaje de presentación en el LCD y un mensaje que indica que el módulo se autocalibra con los parámetros por defecto del sistema. Es importante indicar que en esta parte del programa se habilita la interrupción externa, la misma que permite el funcionamiento del teclado. De este modo se puede acceder a la interfaz con el usuario una vez que el PIC y el LCD estén completamente configurados y que los valores iniciales hayan sido cargados con éxito.

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de presentación del sistema.



**Figura 3.5** PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

### 3.2.1.5 Test de sensor y falla

El lazo principal del programa inicia con una prueba de la conexión del sensor, haciendo uso del circuito detector de falla que discretiza la señal del sensor en dos estados 0L (falla) y 1L (condición normal), esta señal discretizada es ingresada por el pin RA4 que es leído al iniciar la rutina de test. En caso de que el pin RA4 esté en nivel alto (condición normal) se continúa la ejecución del programa con la conversión A/D; caso contrario si el pin RA4 está en nivel bajo (falla) se presenta un mensaje de error en el módulo LCD, se apagan los displays, se anula la onda PWM y se levanta el estado del pin RE0 para encender el led de color rojo a modo de alarma visual; se continúa verificando el estado del pin RA4 sucesivamente para detectar una eventual desconexión del sensor. En la Figura 3.6 se indica el diagrama de test del sensor.

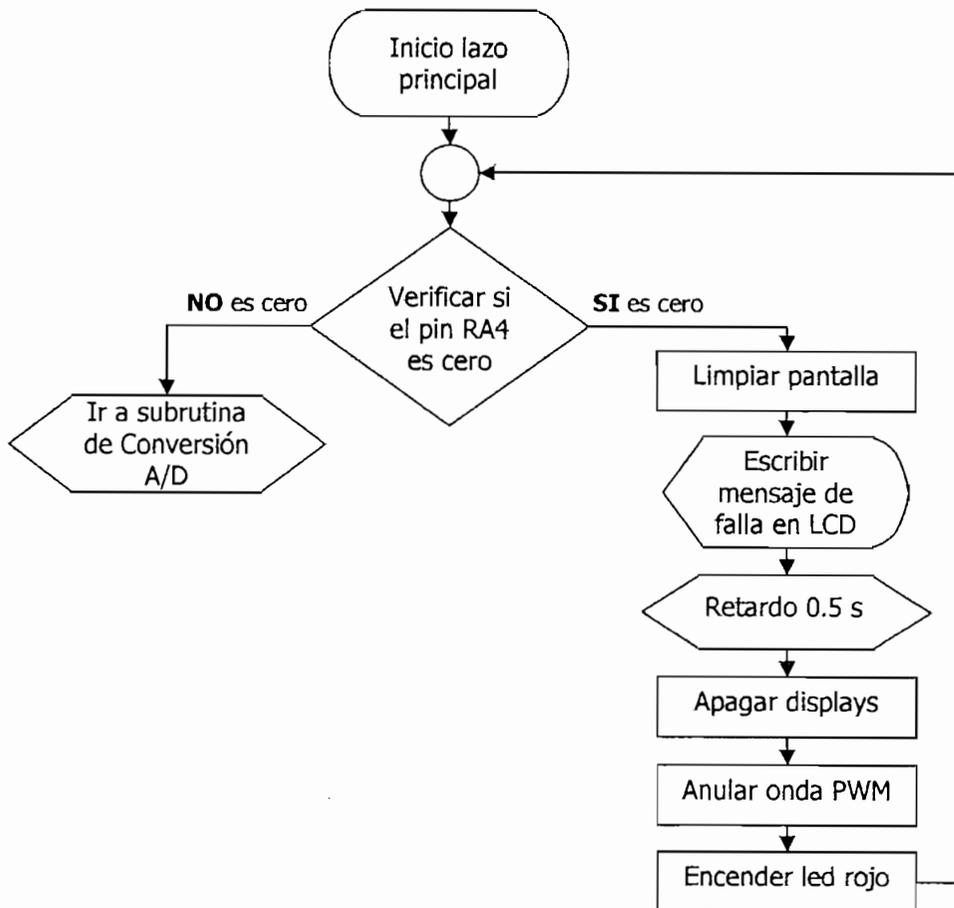
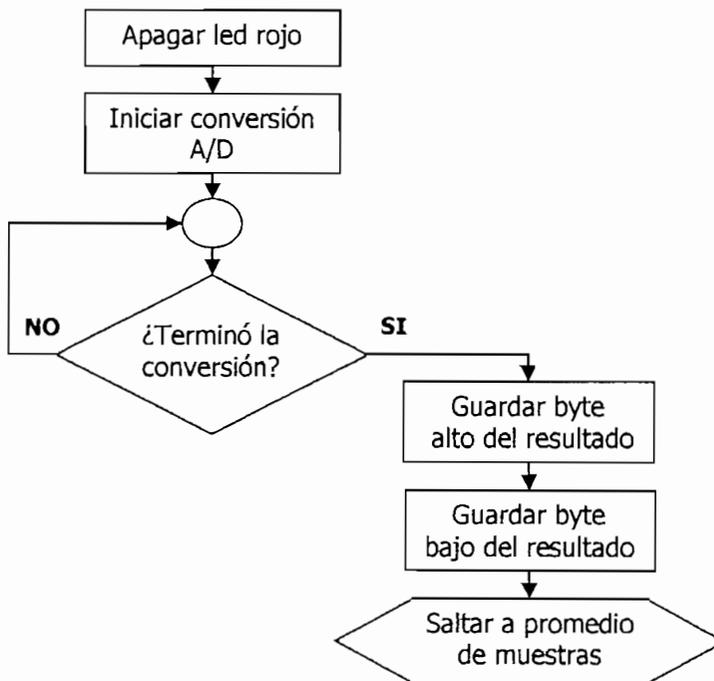


Figura 3.6 TEST DEL SENSOR

### 3.2.1.6 Conversión Analógica Digital

Esta rutina tiene la función de tomar el valor análogo de la señal y convertirlo a valor digital para su tratamiento interno en el PIC. Después de haber verificado que la conexión del sensor esté correcta, se apaga el led rojo de alarma en el supuesto caso de que éste haya sido encendido en la rutina anterior. Para iniciar la conversión se levanta el bit 2 del registro ADCON0, este bit es limpiado automáticamente por hardware cuando la conversión se ha completado. Se debe esperar que esto suceda para continuar con la rutina, de manera que no se pierdan datos en el proceso de conversión. Una vez que el bit 2 del registro ADCON0 está en nivel bajo, es decir, que la conversión terminó, se guarda el resultado en un par de registros. Se guarda el resultado en dos registros, para almacenar diez bits, debido a que se realiza la conversión analógica a digital utilizando la máxima resolución del módulo convertidor que es de 10 bits, para obtener así mayor precisión en la lectura de la presión.

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de la conversión análoga-digital.



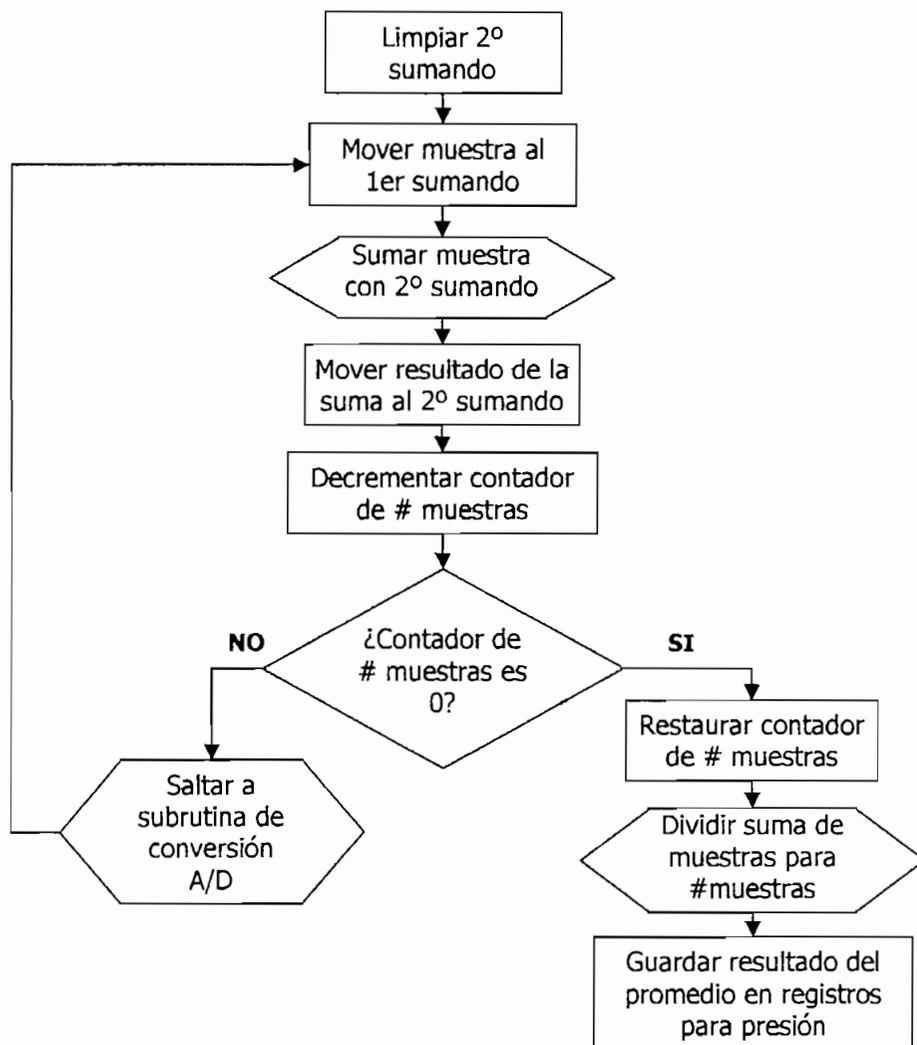
**Figura 3.7** CONVERSIÓN A/D

Para obtener un valor digital de la señal más acertado, se ha implementado una rutina que toma varias muestras de la señal por el mismo canal análogo, las guarda y las promedia, generando así un valor promedio de entre 64 muestras.

Se toman 64 muestras porque con este número se tiene un valor máximo de 65472d, valor que puede ser cargado en 16 bits que significan los dos registros asignados para guardar el valor digital de la señal.

Resulta necesario incluir subrutinas de suma y división para realizar la rutina de promedio de muestras, se implementa la subrutina de división ya que el PIC no cuenta con instrucciones para realizar esta operación, por lo que se hace uso del algoritmo digital de restas y desplazamientos para división.

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de promedio de muestras.

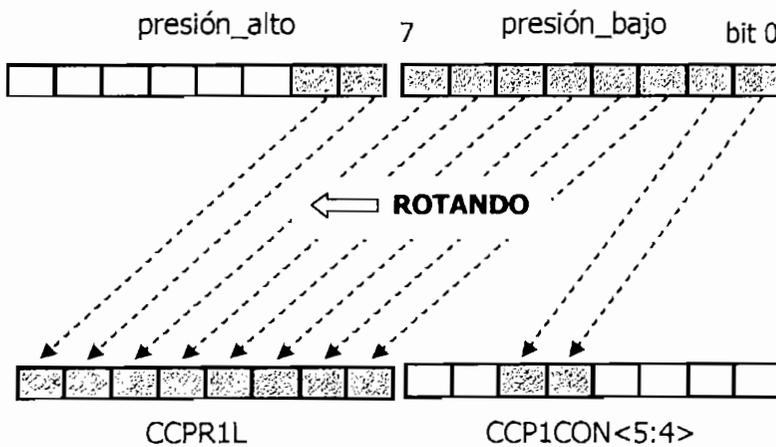


**Figura 3.8** PROMEDIO DE MUESTRAS

### 3.2.1.7 Generación de onda PWM

La rutina de generación PWM se implementa de tal manera que el ancho de pulso varía proporcionalmente con el valor digital de la presión. El ancho de pulso de la onda PWM se especifica escribiendo en el registro de 8bits (CCPR1L) y en los bits CCP1CON <5:4> que son los dos bits menos significativos. Así entonces, los 10bits del ancho de pulso se representan por los registros CCPR1L:CCP1CON<5:4>; el valor digital de la presión obtenido del promedio de

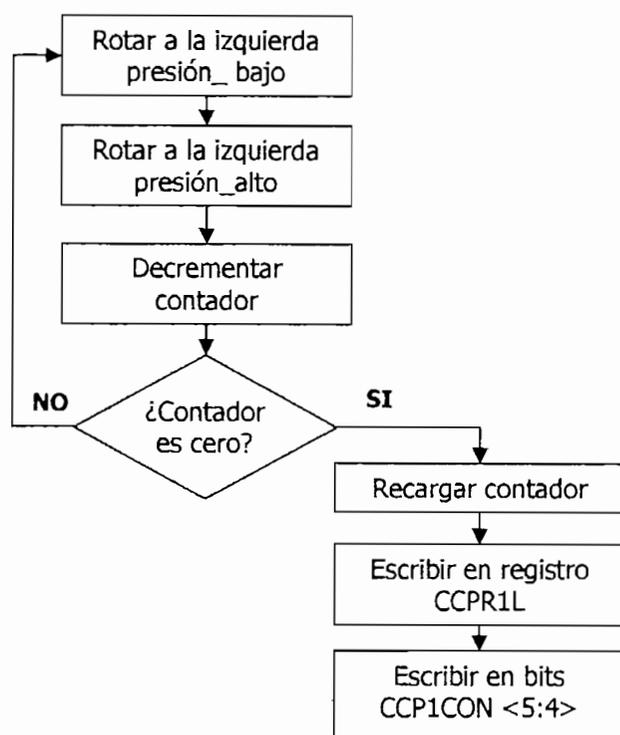
muestras es cargado en estos registros, sin embargo, se considera que el valor digital de presión está dado en 10bits cuyos 8bits bajos están en un byte (presión\_bajo) y los dos bits altos restantes están en los bits menos significativos de otro byte (presión\_alto), de manera que estos registros son rotados para trasladar los 8bits más altos al registro CCP1L y los 2 bits restantes a CCP1CON<5:4>. En la Figura 3.9 se grafica esta idea.



**Figura 3.9** TRASLADO DE VALOR DIGITAL A PWM

La rutina de generación de la onda PWM contempla este proceso de rotación de los registros para garantizar que el valor del ancho de pulso represente el valor digital de la presión.

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de generación PWM.



**Figura 3.10** GENERACIÓN PWM

### 3.2.1.8 Determinación de la presión

Antes de iniciar las rutinas de determinación de las variables presión, volumen, altura y porcentaje del nivel máximo, el PIC debe revisar que variable está configurada para ser visualizada y en que unidades. Para esto se utilizan dos registros en los que se cargan dos números que representan la variable y las unidades, la configuración por defecto hace que se indique el volumen expresado en litros.

Para poder indicar la presión tanto en el LCD como en los displays es necesario manipular el valor digital de esta variable; para esto se define el rango de valores digitales que constituye el rango de presión. El máximo valor digital que se puede

representar está dado por:  $2^n - 1$ , donde  $n$  es el número de bits, que en este caso es 10, por ser la resolución del conversor A/D.

Así entonces, el máximo valor digital de presión es 1023d que representa la presión máxima de 15psi y el mínimo valor digital de presión que es 0d representa la presión mínima de 0psi; la presión debe ser una función lineal del valor digital de modo que la variación sea proporcional en todo el rango. Considerando esto, se concibe la ecuación 3.3 para determinar la presión en psi en función de su valor digital.

$$p = \frac{1500}{1023} \# \text{ [psi]} \quad \text{Ec. 3.3}$$

El símbolo # representa el valor digital que arroja el proceso de conversión A/D. La variable se indica con dos decimales. Puesto que el PIC no cuenta con aritmética de punto flotante se manejan los valores multiplicados por 100, por esta razón se tiene el número 1500 que representa 15.00 psi.

El módulo ofrece la posibilidad de indicar la presión en psi y en KPa. Para indicar la presión en KPa se debe considerar que el máximo valor digital representa la presión máxima en estas unidades, es decir, 15psi = 107.13KPa, tomando en cuenta este cambio se concibe la ecuación 3.4 para determinar la presión en KPa en función de su valor digital.

$$p = \frac{10713}{1023} \# \text{ [KPa]} \quad \text{Ec. 3.4}$$

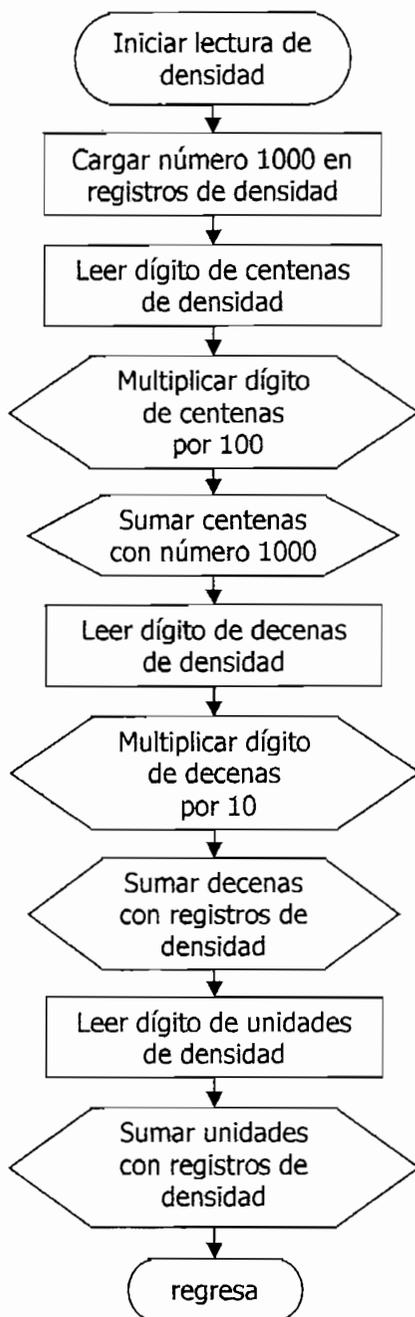
La dos ecuaciones anteriores deben ser desarrolladas por el PIC, para esto se hace uso de las subrutinas de multiplicación y división implementadas con algoritmos de sumas, restas y desplazamientos.

### 3.2.1.9 Lectura de la densidad y determinación de la altura

De acuerdo a la ecuación  $p = \delta gh$  (Ec.1.1), la altura depende de la presión y de la densidad del líquido; la densidad de la leche es de 1,030 gr/ml y es cargado por defecto; no obstante, puede ser modificado por el usuario entre 1,000 y 1,999 gr/ml por lo que el PIC debe leer el valor de la densidad para no incurrir en un error.

Para leer el valor de la densidad se desarrolla la subrutina recupera\_dens. En esta subrutina se lee la parte decimal del valor de densidad que es lo que se puede modificar, se lee dígito por dígito y se lo concatena en un valor entero entre 1000 y 1999.

El diagrama de la subrutina para leer la densidad se indica en la Figura 3.11.



**Figura 3.11** SUBROUTINA DE LECTURA DE DENSIDAD

Una vez que se tiene la presión y la densidad se calcula la altura, para esto se utiliza la presión dada en psi y la ecuación de la presión hidrostática.

Despejando la altura de la ecuación  $p = \delta gh$  (Ec. 1.1) se tiene que:

$$h = \frac{P}{\delta g}$$

Para hallar la altura en centímetros la presión debe estar en Pa para ser congruente con el Sistema Internacional de medida, por lo que se utiliza la relación 1 psi = 7142 Pa en la ecuación 3.3; la gravedad es 9.8 m/s<sup>2</sup>.

Reemplazando estos valores en la ecuación anterior se tiene:

$$h = \frac{1500 \# \text{ psi} * 7142 \text{ Pa}}{1023} * \frac{1}{1 \text{ psi}} * \frac{1}{9.8 * \delta}$$

$$h = \frac{1068 \#}{\delta} \text{ [cm]} \quad \text{Ec. 3.5}$$

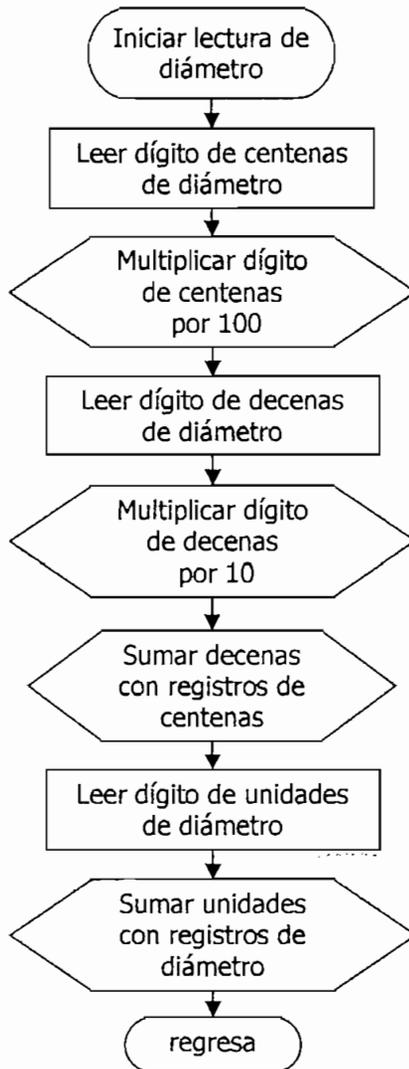
Debido a que el PIC no puede manejar números con parte decimal, se consideran todos los valores enteros, de modo que se incluyan dos dígitos decimales. Al igual que en las ecuaciones de presión, para hallar la altura se utilizan las subrutinas de multiplicación y división. La ecuación 3.5 permite calcular la altura de la columna del líquido en función del valor digital de la presión y de la densidad de este líquido.

### 3.2.1.10 Lectura del diámetro y determinación del volumen

Para determinar el volumen que ocupa el líquido se recurre a fórmulas geométricas. Considerando que el tanque-silo es un cilindro se necesita conocer su diámetro para determinar el área que, multiplicada por la altura resulta en el volumen que ocupa el líquido. El diámetro del silo para esta aplicación específica es de 2.72 mts, no obstante, este valor puede ser cambiado por el usuario lo que significa un cambio en el volumen.

Para leer el diámetro del silo se realiza la rutina recupera\_dia en la que se leen dígito por dígito los valores de centenas, decenas y unidades del diámetro

expresado en centímetros; se concatenan estos valores en un número entero que representa el valor digital del diámetro del silo. En la Figura 3.12 se muestra el diagrama de la subrutina para leer el diámetro.



**Figura 3.12** SUBROUTINA DE LECTURA DE DIÁMETRO

Para implementar la fórmula del volumen de un cilindro  $V = \pi r^2 h$ , en el PIC; se considera que el radio ( $r$ ) es la mitad del diámetro ( $\phi$ ) expresado en centímetros, al igual que la altura. Desarrollando la fórmula del volumen se tiene:

$$V = \pi \left( \frac{\phi}{2} \right)^2 h$$

$$V = \frac{\pi \phi^2 h}{4} \text{ cm}^3 * \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$V = \frac{\phi^2 h}{1273} \text{ [lts]} \quad \text{Ec. 3.6}$$

La ecuación 3.6 determina el volumen ocupado por el líquido en el tanque-silo cilíndrico en función de su diámetro y de la altura de la columna del líquido, el valor de la altura es determinado por el PIC mediante la ecuación 3.5.

El sistema permite visualizar la variable volumen en litros y en  $\text{m}^3$ , para expresar el volumen en  $\text{m}^3$  se considera la equivalencia entre estas unidades:  $1\text{m}^3 = 1000$  lts y se incluye esta relación en la ecuación 3.6, de donde se obtiene la ecuación 3.7 para determinar el volumen ocupado por el líquido expresado en  $\text{m}^3$ .

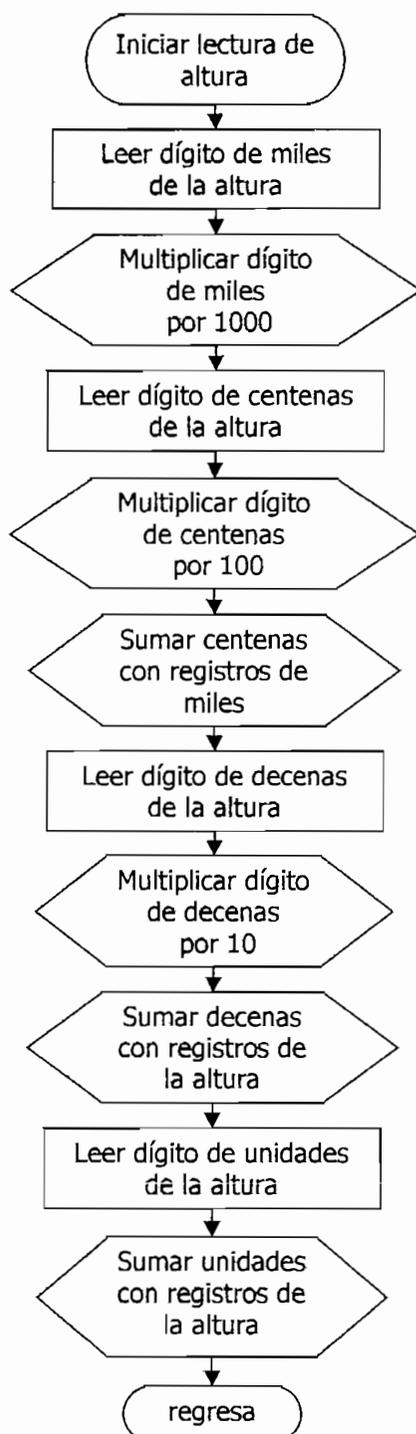
$$V = \frac{\phi^2 h}{1,273} \text{ [m}^3\text{]} \quad \text{Ec. 3.7}$$

### 3.2.1.11 Determinación del porcentaje de nivel máximo

El sistema permite también indicación en términos de porcentaje del nivel máximo, lo que quiere decir que, cuando la columna de líquido ha alcanzado la altura máxima del tanque, es decir, cuando el tanque está completamente lleno se tiene el 100% del nivel máximo y cuando el tanque está vacío se tiene el 0% del nivel máximo. Este porcentaje de nivel máximo debe ser una función lineal de la altura del tanque de modo que la variación sea proporcional en todo el rango.

La altura ingresada por defecto del tanque es 7.06 mts, sin embargo, este valor puede ser modificado por el usuario entre 0 y 10 mts, accediendo al menú de ingreso de parámetros. Por esta razón el PIC debe leer la altura ingresada del

tanque antes de efectuar el cálculo del porcentaje; para esto se ha desarrollado la subrutina recupera\_alt que lee por dígitos los valores de miles, centenas, decenas y unidades de la altura del tanque en centímetros, que eventualmente podrá ser cambiada por el usuario. El diagrama de la subrutina para leer la altura máxima se muestra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13** SUBROUTINA DE LECTURA DE ALTURA

Una vez leída la altura del tanque, se llama a la subrutina para calcular la altura de la columna del líquido implementada en base a la ecuación 3.5 y se puede determinar entonces el porcentaje de acuerdo a la ecuación 3.8:

$$\%n = \frac{100 * h}{h_{\text{tanque}}} \quad [\%] \quad \text{Ec. 3.8}$$

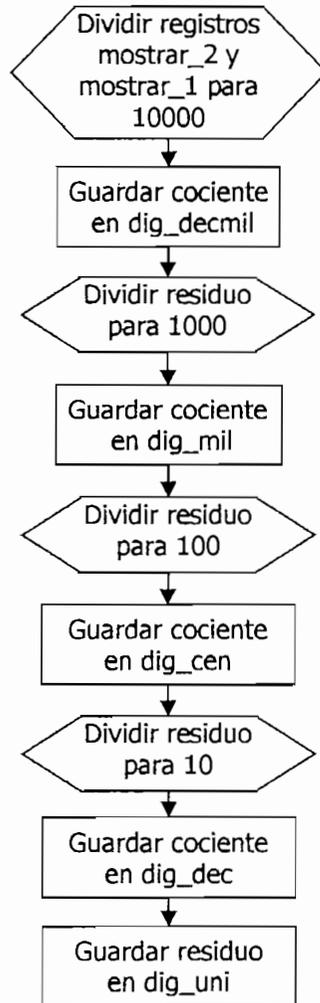
Para indicar el porcentaje no se considera parte decimal, se toma sólo la parte entera de los resultados de las subrutinas de multiplicación y división sin incurrir en errores considerables.

### 3.2.1.12 Separación en dígitos

Esta parte del programa principal tiene la finalidad de separar el valor digital de la variable en dígitos, de manera que se pueda manipular para mostrarse en los displays y en el módulo LCD. El valor de la variable a indicarse es cargado en dos registros (mostrar\_2, mostrar\_1), este valor se divide para 10000 para obtener el dígito de las decenas de mil, el residuo de esta división se divide para 1000 de lo que se obtiene el dígito de las unidades de mil y así sucesivamente se divide el residuo para 100 y 10 obteniéndose las centenas y decenas respectivamente, el residuo final es el dígito de las unidades.

Todos los resultados de las divisiones son guardados en los registros dig\_decmil, dig\_mil, dig\_cen, dig\_dec y dig\_uni respectivamente, estos valores posteriormente se convierten a código ASCII, para indicar la variable en el LCD, y mediante una tabla de conversión HEX\_7segmentos para indicar la variable en los displays.

En la Figura 3.14 se muestra el diagrama de separación en dígitos.



**Figura 3.14** SUBROUTINA DE SEPARACIÓN EN DÍGITOS

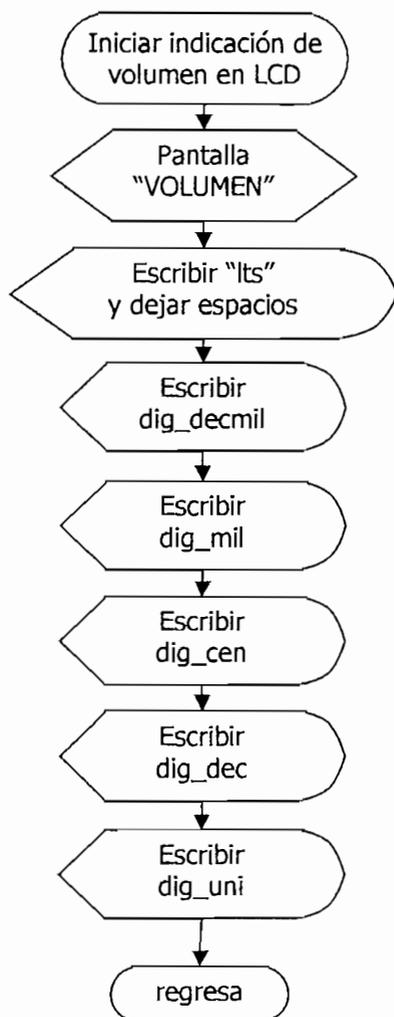
### 3.2.1.13 Indicación en LCD

Esta parte del programa se encarga de mostrar en la pantalla del LCD el estado de la variable seleccionada en las unidades seleccionadas. Después de determinar y calcular la variable se carga en el registro var\_pant un número que representa la pantalla de la variable a mostrarse, pudiendo ésta ser: volumen en litros, volumen en  $m^3$ , presión en psi, presión en KPa, altura en metros o porcentaje del nivel máximo.

Se escribe una pantalla genérica dependiendo de la variable, en esta pantalla se muestra: el nombre de la variable, la unidad en la que está expresada y de ser necesario, el punto decimal, dejando los espacios suficientes para escribir los dígitos. Para indicar la variable en números de base decimal se convierte a código ASCII sumando 48 a los registros obtenidos en la rutina de separación en dígitos.

Al iniciar esta rutina se verifica el número del registro `var_pant` y dependiendo de su valor se ejecuta un salto a la subrutina correspondiente; en cualquier caso, todas estas subrutinas siguen el mismo esquema.

En la Figura 3.15 se muestra el diagrama para indicar el volumen en litros en el LCD.



**Figura 3.15** DIAGRAMA DE INDICACIÓN DE VOLUMEN EN LITROS EN EL LCD

#### 3.2.1.14 Indicación en display

La variable indicada en el módulo LCD se presenta también en cinco displays tipo led de siete segmentos con la finalidad de mejorar la visualización. Para esto se desarrolla la subrutina DISPLAY, la cual toma los registros obtenidos en la rutina de separación en dígitos y mediante una tabla de conversión HEX\_7segmentos los transforma a valores que permiten indicar números en un display de 7 segmentos.

Según el hardware diseñado, los segmentos se encienden cuando se escribe un uno lógico en el pin del PORTC en el que están conectados los segmentos, por lo que la subrutina para indicar la variable en display toma el dígito y lo convierte en un número binario, que tiene 1L en los lugares de los segmentos que se desea encender y tiene 0L en los lugares de los segmentos que se desea mantener apagados.

La Tabla 3.2 muestra la conversión HEX a 7segmentos.

Dígito a escribirse [HEX]	Valor binario 7segmentos a escribir en PORTC
0	B '11111010'
1	B '01100000'
2	B '11011001'
3	B '11110001'
4	B '01100011'
5	B '10110011'
6	B '10111011'
7	B '11100000'
8	B '11111011'
9	B '11110011'

**Tabla 3.2** TABLA DE CONVERSIÓN HEX A 7SEGMENTOS

Para obtener los valores digitales se suma el contador de programa, PCL, con el acumulador, en el que se carga previamente el dígito que se desea representar y mediante una instrucción de retorno y carga se regresa de la tabla, que es otra subrutina, con el acumulador cargado con el valor binario correspondiente.

Hay que tomar en cuenta que uno de los pines del PORTC, específicamente el RC2 está asignado como salida para la onda PWM; por lo que no se puede modificar su estado y se tiene que enmascarar. Esto quiere decir que, para mostrar en el display un número, se realiza la operación lógica OR entre el PORTC y el valor binario obtenido en la tabla de conversión. Nótese en dicha tabla que todos los valores binarios tienen en el bit 2 un cero lógico, de manera que con la operación OR el estado anterior del pin 2 donde se tiene la generación PWM no se modifica, indiferentemente del valor que tenga el pin 2, uno o cero lógico.

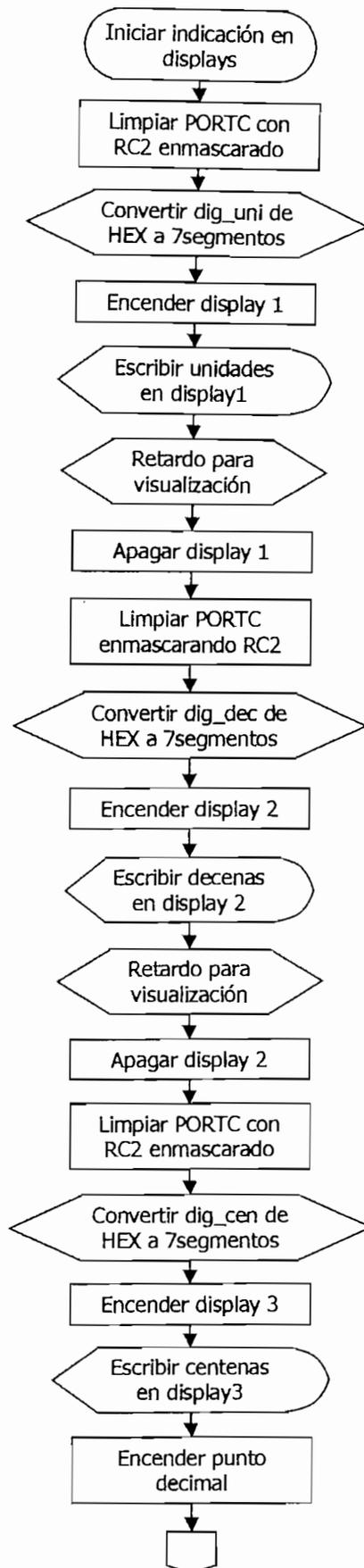
Para limpiar el puerto antes de escribir otro número, se realiza la operación lógica AND entre el PORTC y el número B'00000100' de manera que el bit 2 no se modifica y el resto de pines se borran, lo que apaga todos los segmentos.

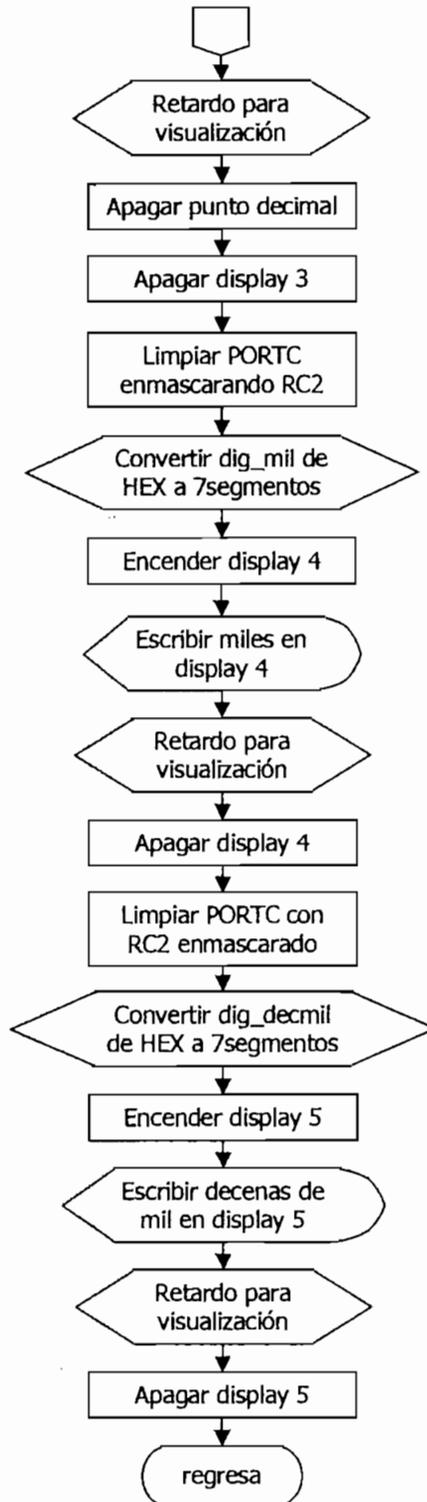
La subrutina DISPLAY enciende mediante la técnica de barrido uno de los cinco displays a la vez, escribiendo un uno lógico en su correspondiente pin de control; posteriormente se limpia el PORTC excepto RC2, se llama a la subrutina TABLA para convertir el número que se desea mostrar en su valor binario correspondiente de 7segmentos, se escribe en el PORTC con el bit 2 enmascarado y se llama a un retardo que mantiene encendidos los segmentos durante el tiempo necesario para que se pueda visualizar por el ojo humano; finalmente se apaga el display escribiendo un cero lógico en su correspondiente pin de control.

Esta secuencia es repetida tantas veces como dígitos tenga la variable que se está mostrando. Cabe anotar que, al mostrar ciertas variables como la presión en psi, presión en KPa, volumen en m<sup>3</sup> y altura, se debe considerar la presencia de dos dígitos decimales por lo que las subrutinas para indicar estas variables encienden el punto decimal del display correspondiente.

La extensión y complejidad de las subrutinas para indicar en display las diferentes variables depende del número de dígitos que estas tengan y de la presencia o no de decimales. Por ejemplo, la subrutina para indicar el porcentaje de nivel máximo no tiene parte decimal y solo tiene tres dígitos, siendo ésta la subrutina más corta y sencilla. Por el contrario, la subrutina para indicar la presión en KPa tiene parte decimal y cinco dígitos, lo que hace de ésta la subrutina más extensa y compleja.

En la Figura 3.16 se muestra el diagrama de ésta última.





**Figura 3.16** SUBROUTINA DE INDICACIÓN EN DISPLAYS

El registro `var_pant`, utilizado para conocer la pantalla a indicarse en el LCD, es también utilizado para ejecutar saltos a las subrutinas para mostrar las variables

en los displays. La subrutina para indicar volumen en  $m^3$  se utiliza cuando se desea indicar presión en psi y altura, ya que en los tres casos se tienen cuatro dígitos y parte decimal, tomando en cuenta que la subrutina DISPLAY toma los registros obtenidos a partir de la separación en dígitos y los manipula para poder indicar la variable en los displays, independientemente de la variable.

Para las subrutinas de indicar volumen en litros, presión en KPa y porcentaje se considera que sólo las dos primeras tienen cinco dígitos mientras que la subrutina para indicar porcentaje solo muestra tres dígitos, además que la rutina para indicar presión en KPa tiene parte decimal, mientras que las otras dos no la tienen.

### **3.2.2 RUTINA PARA INTERRUPCIÓN EXTERNA**

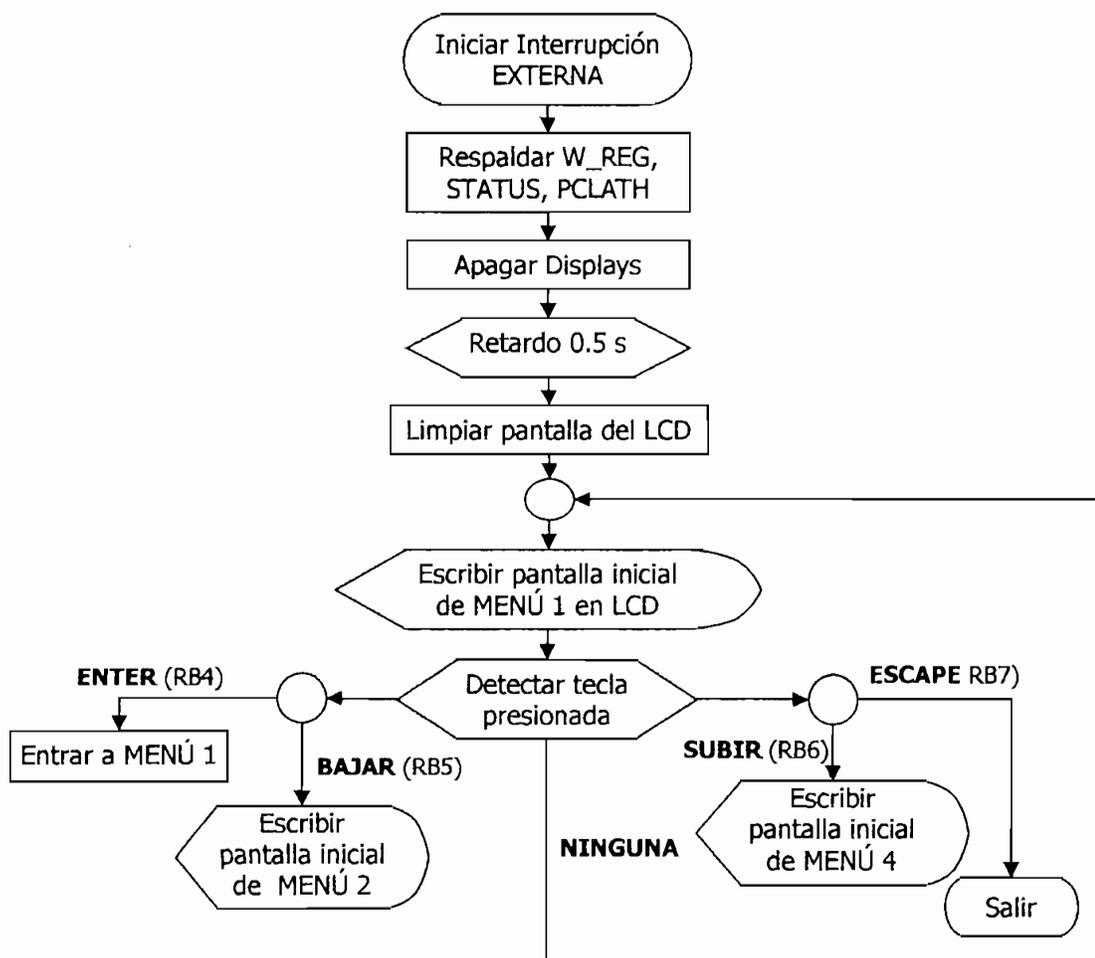
El software desarrollado para el PIC incluye una rutina para atender la interrupción externa, esta interrupción ocurre cuando se detecta un cambio de estado en el pin RB0/INT, en el que se conecta la tecla MENÚ del teclado implementado. Es decir, que la rutina para interrupción externa permite acceder a los menús de configuración y calibración del sistema.

La rutina para atender la interrupción externa se carga en el vector de interrupción que está en la dirección 04h de la página 0 de la memoria de programa, en donde se produce un salto a la rutina que está en la página 1 de la memoria de programa a partir de la dirección 800h. Además del salto ejecutado se respalda los valores de ciertos registros de estado y operación que se utilizan en el programa principal, con la finalidad de que al retornar de la rutina de interrupción no se modifique la ejecución del programa principal; indistintamente de la instrucción que se estaba ejecutando antes de producirse la interrupción. Estos registros son: Acumulador (W\_REG), STATUS (03h) y PCLATH (0Ah).

Al ingresar a la rutina de interrupción, se apagan los displays, se mantiene la salida PWM para la transmisión de presión y, el módulo LCD junto con el teclado se constituye en la interfaz hombre-máquina o HMI.

En primera instancia, la rutina para interrupción externa además de respaldar los registros mencionados y de apagar los displays, aplica un retardo de 0.5 s para eliminar los rebotes que se dan al presionar el pulsador, éste llamado al retardo de 0.5 s se aplica en adelante para todas las teclas.

Al concluir el retardo, se limpia la pantalla del LCD y de inmediato se presenta la pantalla del primer menú del software; a continuación la rutina ingresa en un lazo para detección de la siguiente tecla presionada. El diagrama inicial de la rutina para interrupción externa se muestra en la Figura 3.17.



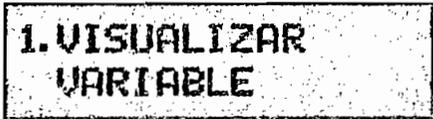
**Figura 3.17** DIAGRAMA INICIAL DE LA RUTINA PARA INTERRUPCIÓN EXTERNA

Si la tecla presionada es la tecla ESCAPE la rutina sale del menú y regresa al programa principal, justo a la instrucción en la que se produjo la interrupción. Si la tecla presionada es la tecla ENTER la rutina ingresa en el primer menú y si se presiona las teclas SUBIR o BAJAR se visualizan las pantallas de los menús adyacentes, es decir, con la tecla SUBIR se podrá cambiar al menú 2 y con la tecla BAJAR se podrá cambiar al menú 4. Para cambiar al menú 3 se presiona la tecla SUBIR cuando se visualiza la pantalla del menú 2 o se presiona la tecla BAJAR cuando se visualiza la pantalla del menú 4. Los cuatro menús definidos son:

- **MENÚ 1. VISUALIZAR VARIABLE**
- **MENÚ 2. CAMBIO DE UNIDADES**
- **MENÚ 3. INGRESO DE PARÁMETROS**
- **MENÚ 4. CAMBIO DE CLAVE**

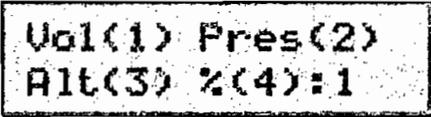
### 3.2.2.1 Menú 1. Visualizar variable

Esta primera parte de la rutina para interrupción externa constituye el primer menú del software, que permite elegir la variable que se desea visualizar en el LCD y en los displays a la vez, pudiendo escogerse de entre: volumen, presión, altura o porcentaje del nivel máximo. Para ingresar en este menú se presiona la tecla ENTER cuando se muestra la pantalla inicial del menú 1, que es la siguiente.



1. VISUALIZAR  
VARIABLE

Al presionar la tecla ENTER se accede al menú 1 en donde se puede escoger la variable, para ello se muestra la siguiente pantalla.

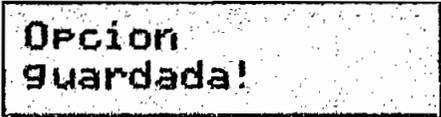


Vol(1) Pres(2)  
Alt(3) % (4):1

Con las teclas SUBIR y BAJAR se puede modificar el número que representa a la variable que se visualizará; como se ve en la pantalla anterior el número que sigue a los dos puntos es el 1, que representa el volumen. Si se presiona la tecla ESC se regresa al menú anterior sin guardar los cambios.

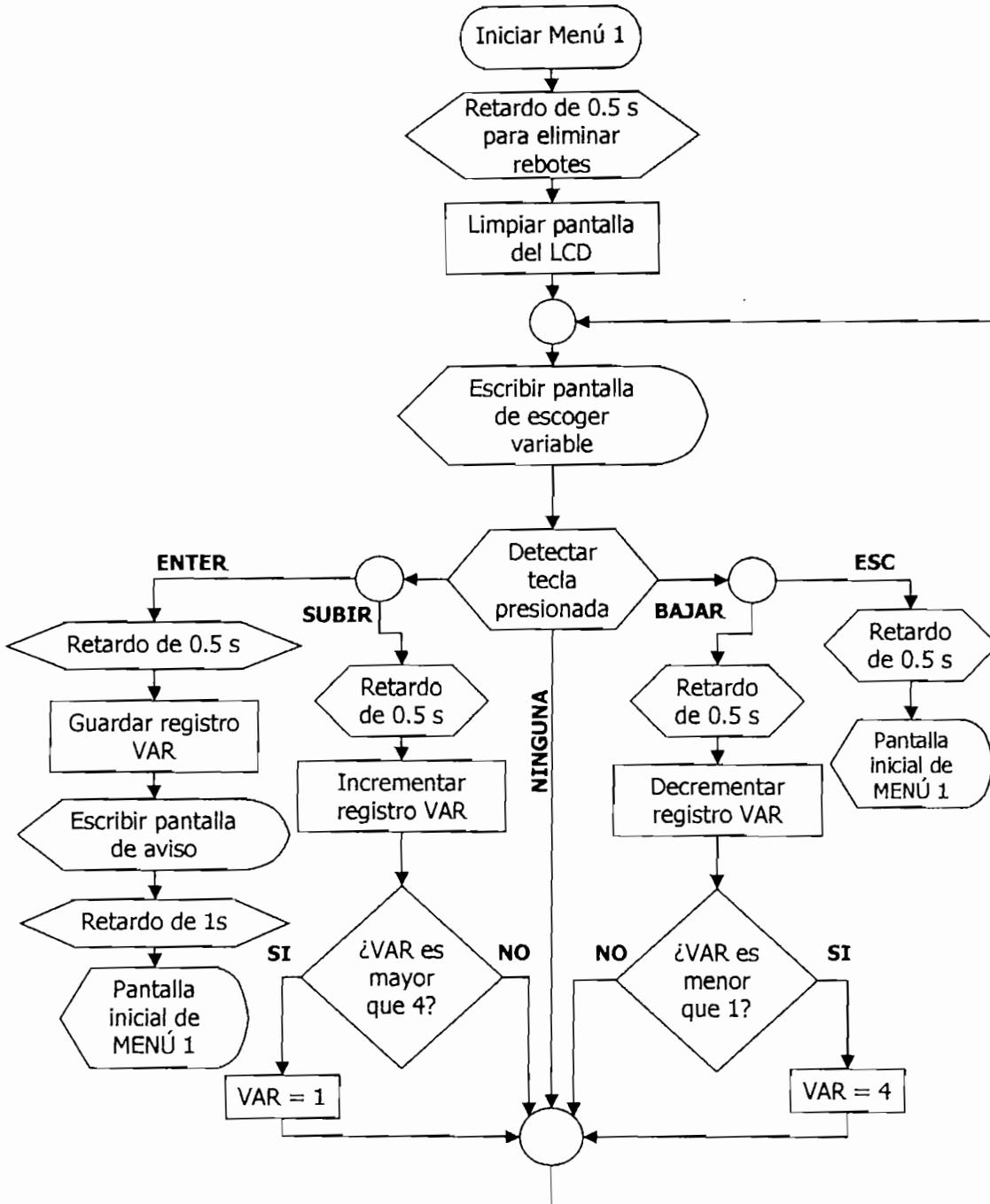
Una vez que se ha escogido la variable, se presiona la tecla ENTER para guardar los cambios, lo que actualiza el registro VAR, para informar esto se presenta a continuación una pantalla de aviso al usuario, seguida por un retardo de 1s, después de lo que se regresa a la pantalla inicial del menú 1.

La pantalla de aviso es la siguiente.



Opcion  
guardada!

El diagrama de la subrutina para el menú 1 se muestra en la Figura 3.18.



**Figura 3.18** DIAGRAMA DE LA SUBROUTINA DEL MENÚ 1 PARA VISUALIZAR VARIABLE

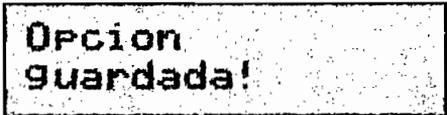
### 3.2.2.2 Menú 2. Cambio de unidades

El segundo menú del software que es parte de la rutina para interrupción externa, permite que el usuario pueda cambiar las unidades de volumen o presión cuando estas variables son seleccionadas en el menú 1. Para acceder a este menú se

Al presionar las teclas SUBIR y BAJAR se verifica que el número en pantalla no sea menor a "1" o mayor a "2", para esto se compara los registros de unidades (UNI1, UNI2) con los valores ASCII de los caracteres "1" cuando se decrementa y "2" cuando se incrementa. En caso de que los registros UNI1 o UNI2 sean menores al código ASCII del carácter "1" o mayores al código ASCII del carácter "2", se reestablecen estos registros con los valores ASCII de los caracteres permitidos, es decir, "1" o "2", según sea el caso.

En cualquiera de los dos casos anteriores, sea unidades de volumen o de presión, al presionar la tecla ESC la rutina sale de este menú sin guardar los cambios y presenta la pantalla inicial del menú 2; si la tecla presionada es la tecla ENTER, la rutina muestra una pantalla de aviso al usuario que se ha guardado la opción, actualiza el registro UNI1, si se trata de volumen, o el registro UNI2, si se trata de presión, y regresa a mostrar la pantalla inicial del menú 2.

La pantalla de aviso al usuario de que se ha guardado la opción de unidades es la siguiente.

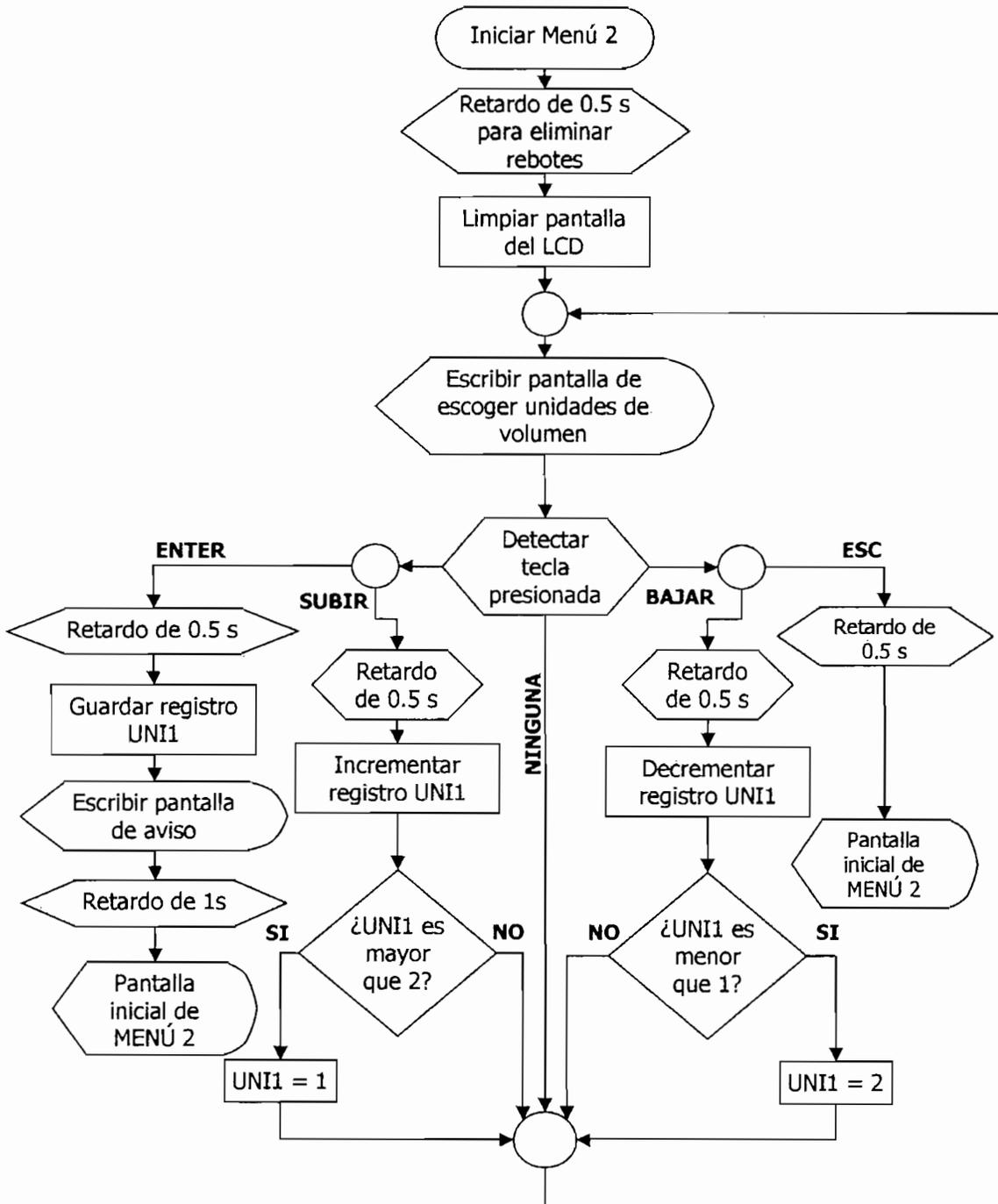


**Opcion  
guardada!**

Cada vez, después de que se presiona una tecla se aplica el retardo de 0.5s para eliminación de rebotes y después de las pantallas de aviso al usuario se aplica el retardo de 1s para permitir su lectura.

La subrutina para cambiar unidades de volumen es la misma que la subrutina para cambiar unidades de presión, con la diferencia de que la pantalla para escoger unidades de volumen tiene las opciones litros y  $m^3$ , mientras que la pantalla para escoger unidades de presión tiene las opciones psi y KPa; por lo tanto el registro que se manipula es UNI1 para volumen y UNI2 para presión.

En la Figura 3.19 se muestra el diagrama de la subrutina para el menú 2 cuando se desea cambiar unidades de volumen.



**Figura 3.19** DIAGRAMA DE LA SUBROUTINA DEL MENÚ 2 PARA UNIDADES DE VOLUMEN

### 3.2.2.3 Menú 3. Ingreso de parámetros

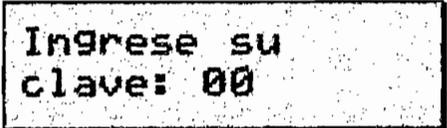
El tercer menú del software se ha desarrollado para permitir el ingreso de parámetros de calibración, tales como temperatura de la leche, densidad de la leche, diámetro del tanque y altura del tanque.

Debido a que un cambio indebido de alguno o algunos de estos parámetros provocarían descalibraciones en el sistema de medida, se requiere el ingreso previo de una contraseña cuyo conocimiento está restringido a personal técnico autorizado. Para acceder al menú de ingreso de parámetros se presiona la tecla ENTER cuando se muestra en el LCD la pantalla inicial del menú 3, ésta pantalla se muestra a continuación.



3. INGRESO DE  
PARAMETROS

Al presionar la tecla ENTER se ingresa al submenú 3.1, que inicia con la pantalla de solicitud de la clave de acceso de dos dígitos, la pantalla de solicitud de clave es la siguiente.

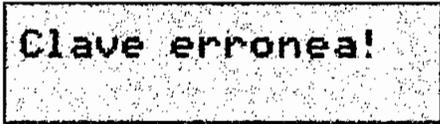


Ingrese su  
clave: 00

Además de presentar esta pantalla, la subrutina también ejecuta un lazo en el que se detecta si una de las teclas es presionada. En caso de detectar que se ha presionado la tecla ESC se ejecuta un salto en la rutina para mostrar nuevamente la pantalla inicial del menú 3; si se presionan las teclas SUBIR o BAJAR se hace un llamado a las subrutinas que permiten incrementar o decrementar, respectivamente, el valor de la clave mostrado en pantalla, valor que puede ser modificado entre 00 y 99; el valor inicial de la clave que se muestra en pantalla siempre es 00, indistintamente del valor real que tenga la clave. El valor de la clave por defecto es 02.

Si se detecta que se ha presionado la tecla ENTER, se llama a una subrutina para comprobación de clave, en la que se compara el valor real de la clave con el valor de la clave mostrada en pantalla, es decir, con el valor ingresado por el usuario.

En primera instancia se compara el registro de unidades y, en caso de que éste valor coincida con el almacenado se procede a comparar el registro de las decenas. Si por lo menos uno de los dos registros no coincide con los almacenados, es decir, si la clave ingresada no es válida, se muestra la siguiente pantalla.

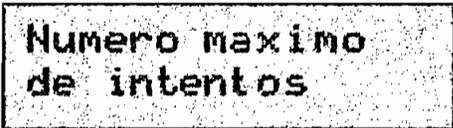


**Clave erronea!**

Después de mostrar la pantalla anterior, se llama al retardo de 1s para permitir la lectura del mensaje y se muestra nuevamente la pantalla de solicitud de clave. No obstante, cada intento de ingreso de clave es contabilizado en el registro INTENTO\_CLAVE, de manera que este registro es comparado con el número 3 cada vez que se ingresa una clave y, en caso de ser 3 se enciende el led de alarma, se presenta una pantalla en el LCD y el PIC entra en un lazo infinito, de modo que se inhabilita el sistema.

La única manera de reestablecer la operación del PIC es reseteándolo con el circuito de reset implementado, que por estar en la tarjeta principal es de acceso restringido. Esta función de seguridad del sistema evita descalibraciones premeditadas y detecta intentos de ingreso no autorizados.

La pantalla de aviso que se muestra en el LCD al incurrir en este error es la siguiente.



**Numero maximo  
de intentos**

El diagrama de la subrutina para ingreso de clave se muestra en la Figura 3.20.

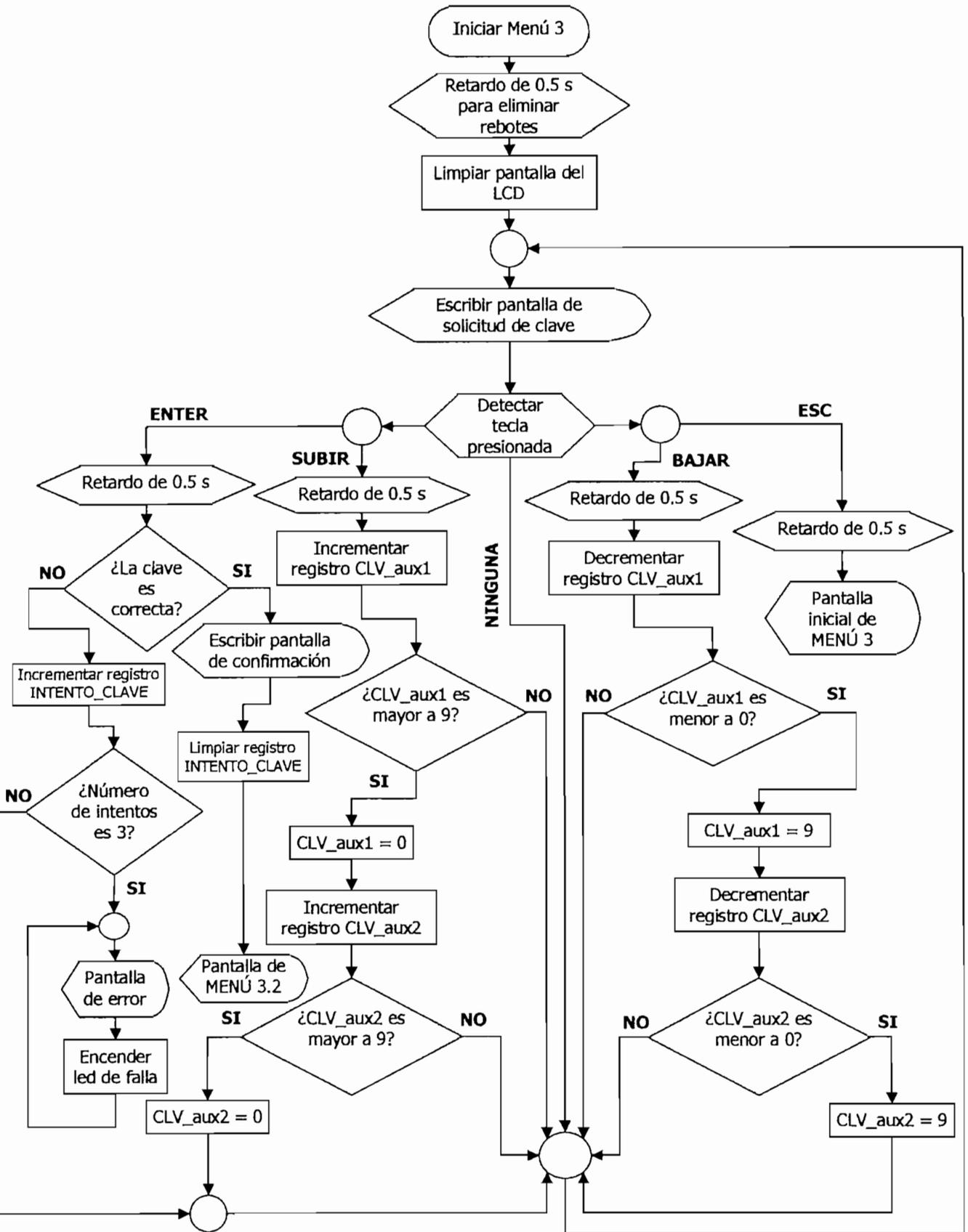
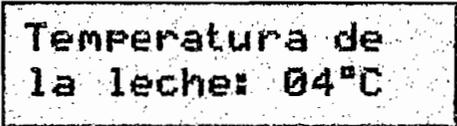


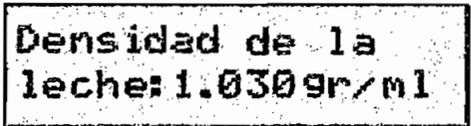
Figura 3.20 DIAGRAMA DE LA SUBROUTINA DEL MENÚ 3 PARA INGRESO DE CLAVE

Si la clave ingresada es correcta se muestra un mensaje de confirmación en la pantalla, se limpia el registro INTENTO\_CLAVE y se ingresa al menú 3.2. El menú 3.2 permite el ingreso de temperatura de la leche que puede estar entre 00 y 50°C, el valor por defecto es de 09°C. La pantalla de solicitud de temperatura es la siguiente.



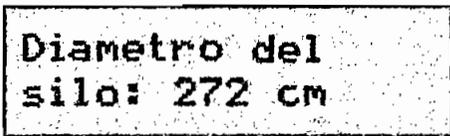
Temperatura de  
la leche: 04°C

Presionando la tecla ENTER se guarda el valor ingresado de temperatura en los registros TEMP1 y TEMP2, entonces se muestra la pantalla de aviso al usuario de opción guardada y se accede inmediatamente al menú 3.3. El menú 3.3 permite el ingreso de la densidad de la leche, valor que puede ser modificado entre 1,000 gr/ml y 1,999 gr/ml, el valor por defecto de este parámetro es de 1,030 gr/ml. La pantalla de solicitud de densidad es la siguiente.



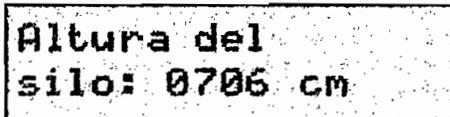
Densidad de la  
leche: 1.030 gr/ml

Al presionar la tecla ENTER se actualizan los registros DENS1, DENS2 y DENS3 que contienen las unidades, decenas y centenas respectivamente de la parte decimal del valor de densidad que se ha seleccionado; se muestra la pantalla de opción guardada y automáticamente se escribe la pantalla de solicitud del menú 3.4. El menú 3.4 permite al usuario modificar el diámetro del tanque-silo entre 000 y 280 cm, el valor por defecto de este parámetro es de 272 cm. La pantalla de solicitud de diámetro es la siguiente.



Diametro del  
silo: 272 cm

Presionando las teclas SUBIR y BAJAR se puede variar el diámetro, para ingresar el valor deseado se presiona la tecla ENTER, se indica la pantalla de opción guardada y se actualizan los registros DIA1, DIA2 y DIA3 que contienen las unidades, decenas y centenas del diámetro del silo que se ha seleccionado. Inmediatamente se muestra la pantalla de solicitud del menú 3.5, en el que se solicita al usuario la introducción de la altura del tanque-silo, este valor se puede modificar entre 0000 y 1000 cm, el valor por defecto de este parámetro es de 706 cm. La pantalla de solicitud de altura es la siguiente.



```
Altura del
silo: 0706 cm
```

Una vez elegido el valor, se presiona la tecla ENTER y se muestra la pantalla de opción guardada, se actualizan los registros ALT1, ALT2, ALT3 y ALT4 que contienen las unidades, decenas, centenas y miles de la altura seleccionada, finalmente se regresa a la pantalla inicial del menú 3.

Las subrutinas implementadas para ingresar la temperatura, densidad, diámetro y altura son independientes, pero siguen el mismo esquema, a pesar de tener diferencias entre sí como el número de dígitos o los valores máximos. Todas las subrutinas escriben la pantalla de solicitud del parámetro y entran en un lazo para detectar la tecla presionada, en todos los casos al presionar la tecla ESC se ejecuta un salto para indicar la pantalla inicial del menú 3 sin guardar los cambios, aunque se haya modificado el valor en pantalla del parámetro. En cada subrutina al presionar la tecla ENTER se muestra una pantalla que indica que se han guardado los cambios, se actualiza el valor del parámetro en sus registros respectivos y se ejecuta un salto al submenú siguiente.

La diferencia entre estas subrutinas está en los límites que se debe poner al valor del parámetro y en el número de dígitos. Por ejemplo, la subrutina para ingreso de temperatura tiene dos dígitos y admite valores entre 00 y 50, mientras que la subrutina para ingreso de altura tiene cuatro dígitos y admite valores entre 0000 y

1000. En todo caso, se verifica que los registros no sean menores al código ASCII del carácter "0" y mayores al código ASCII del carácter "9", si esto sucede se actualizan los registros con valores ASCII permitidos, de manera que los valores de los parámetros estén dados en base decimal.

El diagrama de la subrutina para ingreso de altura del silo se indica en la Figura 3.21.

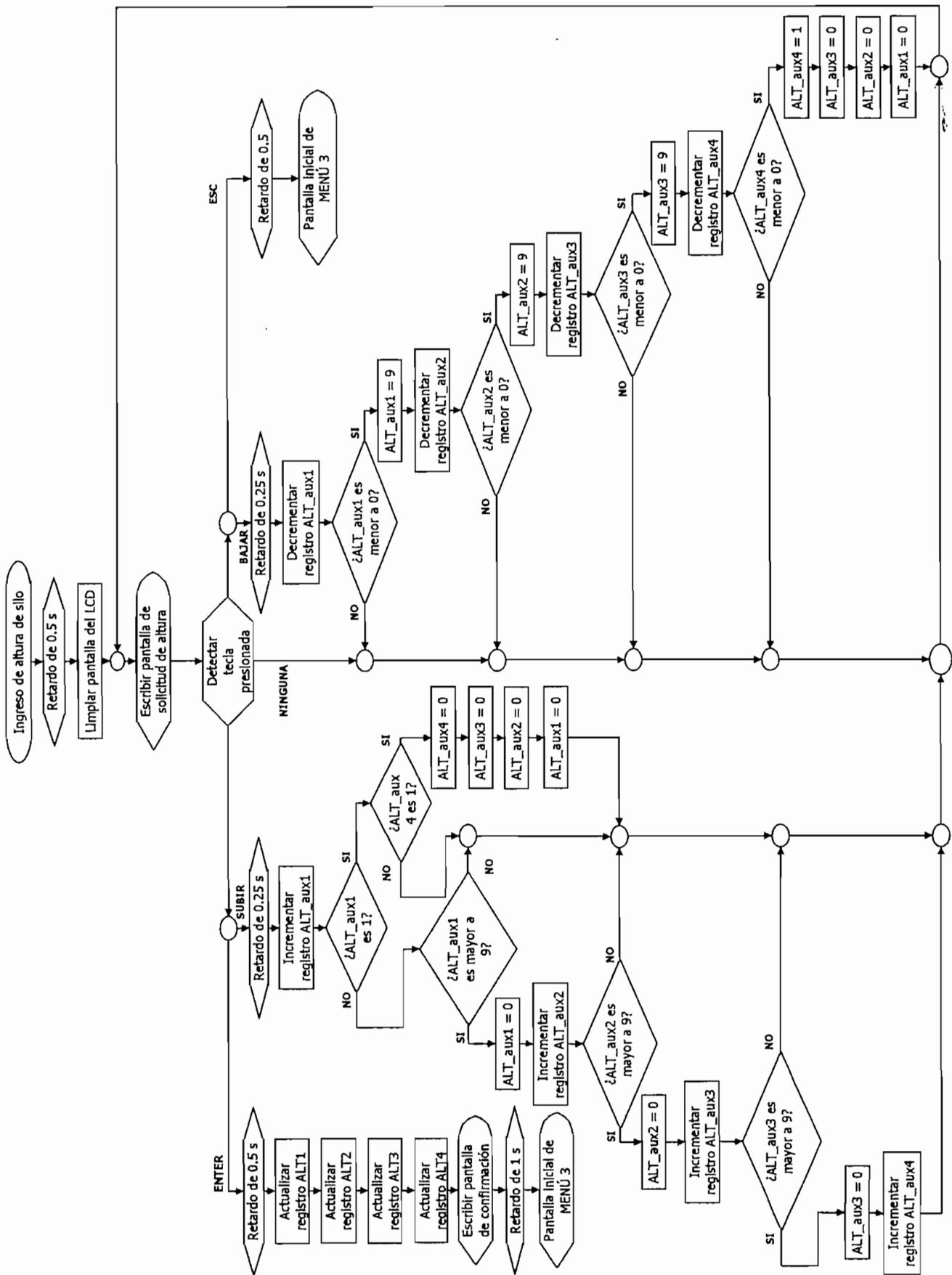
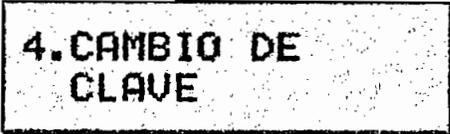


Figura 3.21 DIAGRAMA DE LA SUBROUTINA PARA INGRESO DE ALTURA

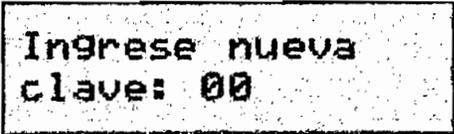
### 3.2.2.4 Menú 4. Cambio de clave

El cuarto y último menú del software permite cambiar la clave de acceso al menú para ingreso de parámetros; para acceder a este menú se presiona la tecla ENTER cuando se muestra en el LCD la pantalla inicial del menú 4, que es la siguiente.

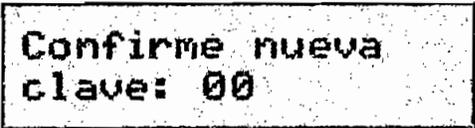


4. CAMBIO DE  
CLAVE

Si se presiona la tecla ENTER al visualizar la pantalla inicial del menú 4, se solicita la clave anterior mediante la pantalla de solicitud que se utilizó en el menú de ingreso de parámetros; para ingresar la clave anterior se tiene hasta tres intentos, si se excede este número sin ingresar correctamente la clave anterior el software ejecuta la misma subrutina del menú 3 para ingreso de parámetros cuando la clave ingresada es errónea, es decir, se ingresa en un lazo infinito en el que se muestra continuamente un pantalla de aviso y se enciende el led de alarma. Al ingresar correctamente la clave anterior, la rutina presenta una pantalla de solicitud de la nueva clave, que puede ser modificada entre 00 y 99 con las teclas SUBIR y BAJAR, al elegir una nueva clave con la tecla ENTER se solicita la confirmación de ésta, la rutina compara estos dos valores y de ser correctos actualiza los registros CLV1 y CLV2 con los valores nuevos. La pantalla de solicitud de nueva clave y la pantalla de confirmación se muestran a continuación.



Ingrese nueva  
clave: 00



Confirme nueva  
clave: 00

Una vez actualizada la clave con los valores nuevos, se muestra en la pantalla del LCD un mensaje de aviso y de inmediato se sale de la rutina de interrupción externa para continuar con el programa principal.

En la Figura 3.22 se muestra la rutina para cambio de clave.

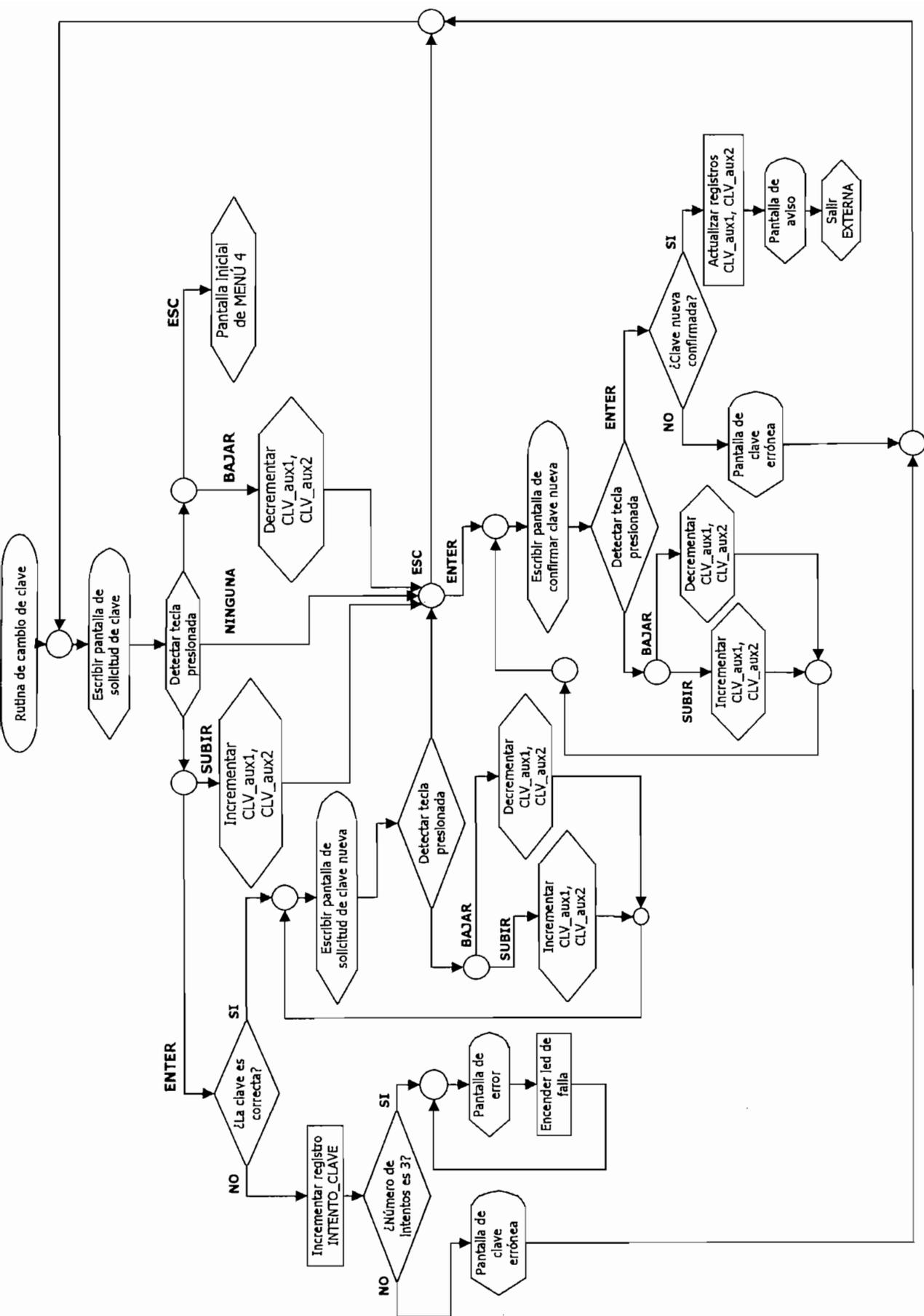


Figura 3.22 DIAGRAMA DE LA SUBROUTINA PARA CAMBIO DE CLAVE

# CAPÍTULO IV

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 PRUEBAS Y ANÁLISIS

El objetivo del proyecto es medir y transmitir la presión en el fondo de un tanque para determinar nivel de líquido en dicho tanque de almacenamiento de leche cruda, además de la determinación de otras variables asociadas a la altura. Para comprobar el cumplimiento de estos objetivos trazados, se diseñó una serie de pruebas para establecer su correcto funcionamiento.

- La primera prueba se desarrolló para comprobar los niveles de voltajes que se establecen con la variación de la señal del sensor.
- Una segunda prueba se diseñó para comparar los valores determinados de las variables asociadas a la presión con los valores teóricos.
- La tercera prueba permitió comprobar el funcionamiento del transmisor de corriente para diferentes valores de carga.
- Una cuarta prueba se diseñó para comprobar la respuesta del sistema ante eventuales casos de falla (desconexión del sensor o intento de ingreso no autorizado).

Para efectuar estas pruebas se tomaron muestras de los parámetros en intervalos de valor fijo, considerando el volumen máximo del tanque-silo como límite superior; mientras que para realizar las pruebas de fallas se emularon los posibles casos de error. Los valores teóricos de las variables han sido determinados mediante fórmulas geométricas y ecuaciones establecidas, las mismas que son enumeradas a continuación:

$$V_{in,PIC} = V_{SENSOR} - 0.5V$$

*Ecuación para calcular el voltaje teórico de entrada al PIC*

$$V_{PWM} = V_{in,PIC}$$

*Ecuación para calcular el voltaje teórico medio de la onda PWM*

$$V_{in,TRX} = 0.4 * V_{PWM}$$

*Ecuación para calcular el voltaje teórico de entrada al transmisor*

$$P_{TEÓRICO} = \frac{15}{5} * V_{in,PIC}$$

*Ecuación para calcular la presión teórica en psi*

$$h = \frac{P_{TEÓRICO}}{\delta * g}$$

*Ecuación para calcular la altura teórica*

$$V_{TEÓRICO} = \pi * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 * h$$

*Ecuación para calcular el volumen teórico en m<sup>3</sup>*

$$\% = \frac{h}{h_{TANQUE}} * 100\%$$

*Ecuación para calcular el porcentaje teórico de nivel máximo*

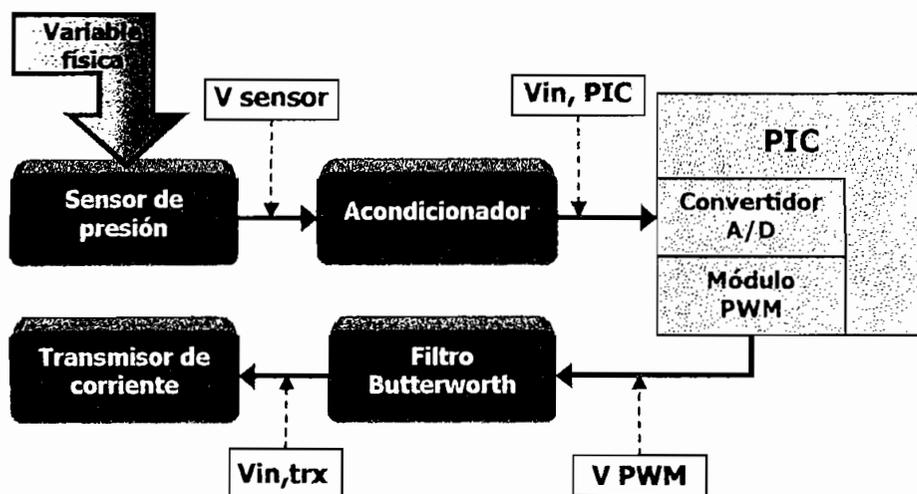
$$I_{OUT} = 4 + \frac{16}{15} * P_{TEÓRICO}$$

*Ecuación para calcular la corriente teórica de salida del transmisor*

#### 4.1.1 PRUEBA DE NIVELES DE VOLTAJE

Esta primera prueba se hizo para comprobar el correcto funcionamiento de los circuitos electrónicos diseñados, tomando como punto de partida la señal de voltaje que entrega el sensor, es decir, la presión hidrostática detectada.

Para comprobar el funcionamiento de los circuitos, se toman muestras de voltaje a través de todo el rango de medición en cuatro puntos principales del sistema. Estos principales puntos son destacados en la Figura 4.1 que representa en diagrama de bloques del circuito electrónico total.



**Figura 4.1** PRINCIPALES PUNTOS DE VOLTAJE DEL SISTEMA

Las mediciones de voltaje en los cuatro puntos son realizadas con respecto a la misma referencia que es el punto de tierra del sistema; estas muestras han sido realizadas partiendo desde el voltaje que entrega el sensor para condiciones iniciales, es decir, cuando no existe presión debido a que el tanque se encuentra vacío.

El rango de medición abarca hasta el límite superior que se da cuando el tanque está completamente lleno. En este rango de medición se han tomado 15 muestras en intervalos de 0.25V

#### 4.1.1.1 Prueba de voltaje de entrada al PIC

La señal de voltaje que ingresa al PIC es una representación eléctrica de la señal de presión que detecta el sensor y, por lo tanto, de la calidad de esta señal de voltaje depende una correcta interpretación en la medida y transmisión de la presión y de las variables asociadas.

El voltaje que ingresa al PIC por el canal análogo se origina a partir del circuito acondicionador en la etapa de adquisición, este circuito resta el offset de 0.5V que tiene la señal del sensor, para obtener valores normalizados.

Consecuentemente, la medida del voltaje de entrada al PIC permite comprobar el funcionamiento del circuito acondicionador, para esto se toman muestras de voltaje a la salida de este circuito. Este voltaje de salida se espera que sea el voltaje que entrega el sensor restado 0.5V. Así entonces, se determina la ecuación 4.1 para determinar el voltaje teórico de entrada al PIC.

$$V_{in,PIC} = V_{SENSOR} - 0.5V \quad \text{Ec. 4.1}$$

En la Tabla 4.1 se indican las muestras tomadas y los errores para cada valor del voltaje del sensor en intervalos de 0.25V.

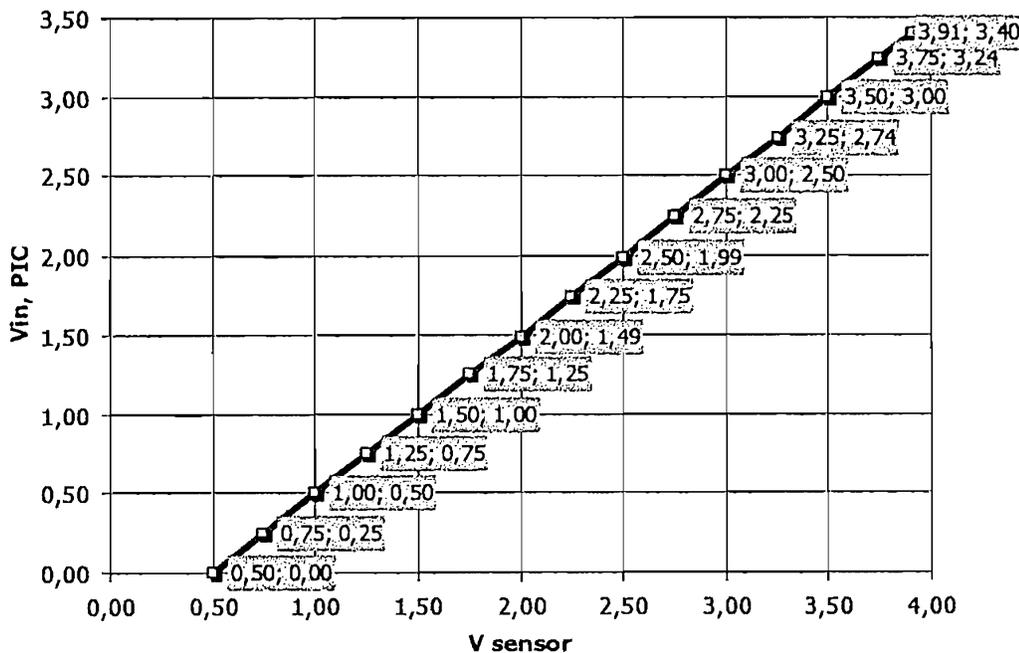
Vin, PIC			
Vsensor	Teórico	Medido	Error relativo %
0,50	0,00	0,00	0,00
0,75	0,25	0,25	0,00
1,00	0,50	0,50	0,00
1,25	0,75	0,75	0,00
1,50	1,00	1,00	0,00
1,75	1,25	1,25	0,00
2,00	1,50	1,49	-0,67
2,25	1,75	1,75	0,00
2,50	2,00	1,99	-0,50
2,75	2,25	2,25	0,00
3,00	2,50	2,50	0,00
3,25	2,75	2,74	-0,36
3,50	3,00	3,00	0,00
3,75	3,25	3,24	-0,31
3,91	3,41	3,40	-0,29

**Tabla 4.1** MUESTRAS DE VOLTAJE DE ENTRADA AL PIC

Como se observa en la Tabla 4.1, las muestras de voltaje del sensor se toman desde el valor inicial de 0.5V, es decir, desde la presión nula en intervalos de 0.25V hasta el último valor que se obtuvo al detectar la máxima presión, es decir, para el tanque completamente lleno. El voltaje teórico de entrada al PIC es el que se espera, es decir, el voltaje que entrega el sensor restado el offset de 0.5V.

Los niveles de error porcentual indicados en la Tabla 4.1, revelan un funcionamiento correcto del circuito acondicionador, considerando que en todo el rango un punto porcentual equivale a 0.05V, valor que no se supera en ningún caso.

La variación del voltaje de entrada al PIC debe ser una función lineal del voltaje que entrega el sensor, de tal manera que la variación sea proporcional en todo el rango. En la Figura 4.2 se grafica esta curva en donde se nota la característica de linealidad.



**Figura 4.2** VOLTAJE DE ENTRADA AL PIC EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE DEL SENSOR

#### 4.1.1.2 Prueba de voltaje PWM

Como se vio en el capítulo anterior, para generar la onda PWM se traslada por software el valor digital obtenido de la conversión A/D, es decir, el valor digital de la presión, hacia el módulo PWM. Por lo tanto, el valor medio de la onda PWM generada está en función del voltaje que ingresa al canal análogo del PIC.

Por consiguiente, la prueba de voltaje medio de la onda PWM permite comprobar el correcto funcionamiento de los módulos A/D y PWM del PIC, además de comprobar el correcto desarrollo del software para su manejo.

Se espera entonces, que el voltaje que ingresa al canal análogo del PIC sea igual al voltaje medio de la onda PWM, para lo cual se define la ecuación 4.2.

$$V_{PWM} = V_{in,PIC}$$

Ec. 4.2

Para ratificar esto se han tomado muestras del voltaje medio de la onda PWM en función del voltaje medido que ingresa al PIC, que se indican en la Tabla 4.2.

Vin, PIC medido	V <sub>PWM</sub>		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,25	0,25	0,00
0,50	0,50	0,49	-2,00
0,75	0,75	0,74	-1,33
1,00	1,00	1,00	0,00
1,25	1,25	1,25	0,00
1,49	1,49	1,49	0,00
1,75	1,75	1,75	0,00
1,99	1,99	1,99	0,00
2,25	2,25	2,24	-0,44
2,50	2,50	2,50	0,00
2,74	2,74	2,75	0,36
3,00	3,00	2,99	-0,33
3,24	3,24	3,24	0,00
3,40	3,40	3,40	0,00

**Tabla 4.2** MUESTRAS DE VOLTAJE MEDIO DE ONDA PWM

En la tabla anterior se observa que los valores esperados o teóricos de voltaje medio son iguales al voltaje que ingresa al PIC, las mediciones han sido efectuadas en todo el rango, desde la condición inicial de presión nula en la que el acondicionador entrega 0V a la entrada del canal análogo del PIC hasta la condición límite de presión máxima, a través del rango de medida por intervalos de 0.25V.

Los valores de error expuestos en la tabla anterior están por debajo de los dos puntos porcentuales, lo que ratifica el correcto funcionamiento de los módulos A/D y PWM del PIC y del software desarrollado para su manejo.

#### 4.1.1.3 Prueba de voltaje de entrada al transmisor

Para transmitir la señal de presión, el circuito integrado que cumple esta función, necesita una señal de voltaje de entrada, de tipo continuo y que varíe entre 0 y 2V. Este voltaje continuo de entrada al transmisor se origina extrayendo la componente continua de la onda PWM por medio del filtro y posteriormente atenuando su valor en un 40% de manera que, si la componente continua extraída tiene un valor máximo de 5V, la atenuación provoque que se tenga 2V a la entrada del transmisor.

La señal de voltaje por debajo de estos valores máximos, debe seguir una función lineal de modo que la variación sea proporcional en todo el rango de medida.

La prueba del voltaje de entrada al transmisor permite comprobar el funcionamiento correcto del filtro y del amplificador de ganancia menor a la unidad, así entonces, el valor teórico de voltaje de entrada al transmisor se determina por la ecuación 4.3.

$$V_{in,TRX} = 0.4 * V_{PWM} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Para efectuar esta prueba se han tomado muestras de voltaje de entrada al transmisor después del filtro, en función del voltaje medio PWM.

En la Tabla 4.3 se indican los valores medidos y esperados del voltaje de entrada al transmisor y sus niveles de error.

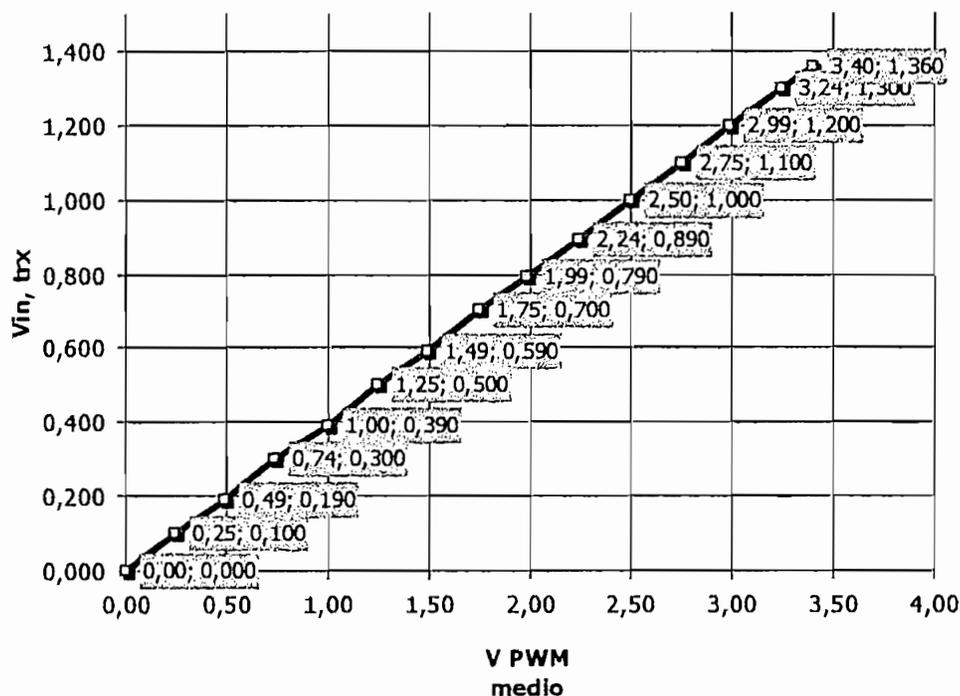
$V_{\text{PWM}}$ medido	$V_{\text{in,TRX}}$		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0,000	0,000	0,00
0,25	0,100	0,100	0,00
0,49	0,196	0,190	-3,06
0,74	0,296	0,300	1,35
1,00	0,400	0,390	-2,50
1,25	0,500	0,500	0,00
1,49	0,596	0,590	-1,01
1,75	0,700	0,700	0,00
1,99	0,796	0,790	-0,75
2,24	0,896	0,890	-0,67
2,50	1,000	1,000	0,00
2,75	1,100	1,100	0,00
2,99	1,196	1,200	0,33
3,24	1,296	1,300	0,31
3,40	1,360	1,360	0,00

**Tabla 4.3** MUESTRAS DE VOLTAJE DE ENTRADA AL TRANSMISOR

Como se ve en la tabla anterior, el voltaje teórico o esperado de entrada al transmisor es siempre el 40% del voltaje medio de la onda PWM que se midió para la prueba anterior; los valores medidos de voltaje de entrada al transmisor no varían significativamente con respecto a los valores teóricos, lo que se refleja en los niveles de error porcentual obtenidos e indicados en la misma tabla. El mayor error es de -3.06% para la tercera muestra, esto representa un error absoluto de 6mV; por lo tanto se ratifica el correcto funcionamiento de las etapas en prueba.

Para corroborar este resultado, se presenta la gráfica del voltaje de entrada al transmisor en función del voltaje medio de la onda PWM, en donde se nota claramente que la función es lineal y que la variación del voltaje de entrada es proporcional en un 40% del voltaje medio PWM, en todo el rango de medida.

En la Figura 4.3 se grafica el voltaje de entrada al transmisor en función del voltaje medio PWM.



**Figura 4.3** VOLTAJE DE ENTRADA AL TRANSMISOR EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE PWM MEDIO

#### 4.1.2 PRUEBA DE VARIABLES DETERMINADAS

Esta segunda prueba permite comprobar el funcionamiento del software en el sentido de implementar fórmulas en el PIC, para el presente proyecto no se requiere una medición tan precisa de la presión ni de las variables asociadas a ésta, es por esto que, las fórmulas implementadas para determinar las variables no contemplan cálculos exactos y en algunos casos sólo se tomaron en cuenta dos dígitos decimales. No obstante, las diferencias entre los valores teóricos y los valores medidos no deberían ser muy significativas, para evidenciar así la correcta aplicación del PIC en los cálculos matemáticos.

Para realizar estas pruebas se considera que el voltaje que ingresa al PIC, tras haber sido acondicionado después del sensor, representa la presión detectada en el tanque-silo.

Así entonces, un voltaje de ingreso nulo al PIC significaría una presión nula en el tanque y un voltaje de ingreso máximo significaría que se tiene la presión máxima en el tanque-silo, es decir, cuando el tanque se encuentra completamente lleno.

Para tener una referencia acerca de que tan correctos son los valores determinados mediante las fórmulas en el PIC, se han calculado los valores teóricos de las diferentes variables mediante fórmulas geométricas y ecuaciones establecidas.

#### 4.1.2.1 Prueba de presión determinada

Para establecer los valores teóricos de la presión, se parte del hecho que el voltaje que ingresa al PIC, es decir, el voltaje que entrega el sensor, es proporcional al valor real de la presión. Se establece a partir de esto dos condiciones límites, necesarias para concebir la ecuación que relaciona el voltaje de entrada con la presión. La primera condición indica que al tener presión nula, se tiene voltaje de entrada nulo; y la segunda indica que a la presión máxima que puede medir el sensor (15psi), el voltaje de entrada es de 5V. La relación entre voltaje de entrada y presión está dada por la ecuación 4.4:

$$P_{TEÓRICO} = \frac{15}{5} * V_{in,PIC} \quad [psi] \quad \text{Ec. 4.4}$$

Esta relación permite obtener los valores teóricos o esperados de presión tomando como dato el voltaje de entrada al PIC. En esta prueba se han tomado 15 muestras, al igual que en las pruebas anteriores, con intervalo fijo de 0.25V para todo el rango de operación.

La Tabla 4.4 indica los valores teóricos y los valores procedentes de los cálculos del PIC o valores medidos para la presión, así como los errores relativos porcentuales generados.

V <sub>in</sub> PIC medido	Presión (psi)		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0,00	0,01	1,00
0,25	0,75	0,74	-1,33
0,50	1,50	1,48	-1,33
0,75	2,25	2,21	-1,78
1,00	3,00	2,94	-2,00
1,25	3,75	3,69	-1,60
1,49	4,47	4,41	-1,34
1,75	5,25	5,16	-1,71
1,99	5,97	5,86	-1,84
2,25	6,75	6,59	-2,37
2,50	7,50	7,34	-2,13
2,74	8,22	8,06	-1,95
3,00	9,00	8,82	-2,00
3,24	9,72	9,53	-1,95
3,40	10,20	10	-1,96

**Tabla 4.4** MUESTRAS DE LA PRESIÓN

Los niveles de error y los resultados indicados en la tabla anterior, evidencian la correcta implementación del software para calcular e indicar la presión por parte del PIC.

#### 4.1.2.2 Prueba de altura determinada

Una de las variables asociadas a la presión es la altura a la que llega el nivel de líquido en el tanque. Para determinar los valores teóricos de la altura se utiliza la ecuación de presión hidrostática,  $p = \delta gh$  (Ec.1.1); para realizar la prueba se tomaron los valores por defecto de los parámetros para la aplicación específica, es decir, para medir nivel de leche con densidad de 1,030 gr/ml, la gravedad de  $9,8 \text{ m/s}^2$  y con los valores teóricos de presión obtenidos en la prueba anterior mediante la ecuación 4.1.

Esta prueba permite evaluar la rutina para determinar la altura, en función de la lectura de la densidad y del valor digital de la presión almacenado en el PIC o presión teórica. Los valores de altura indicados en el módulo LCD y display

representan los valores medidos y los valores teóricos de altura son los obtenidos a partir de la ecuación 4.5.

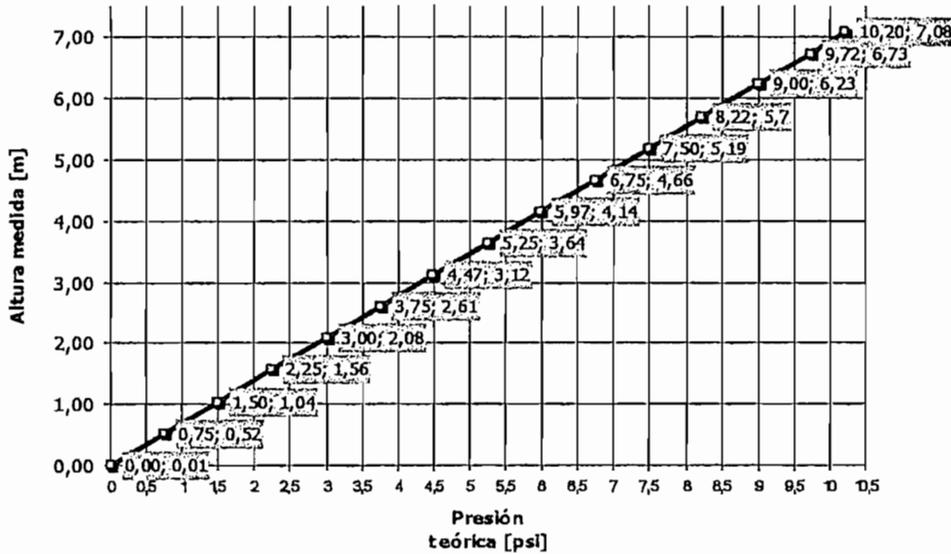
$$h = \frac{P_{teórica}}{\delta * g} \quad \text{Ec. 4.5}$$

En la Tabla 4.5 se indican estas muestras y sus errores.

P <sub>teórica</sub> [psi]	Altura (m)		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0,00	0,01	1,00
0,75	0,53	0,52	-2,01
1,50	1,06	1,04	-2,01
2,25	1,59	1,56	-2,01
3,00	2,12	2,08	-2,01
3,75	2,65	2,61	-1,63
4,47	3,16	3,12	-1,35
5,25	3,71	3,64	-2,01
5,97	4,22	4,14	-1,99
6,75	4,78	4,66	-2,43
7,50	5,31	5,19	-2,20
8,22	5,82	5,7	-2,00
9,00	6,37	6,23	-2,17
9,72	6,88	6,73	-2,14
10,20	7,22	7,08	-1,90

**Tabla 4.5** MUESTRAS DE LA ALTURA

La variación de la altura determinada por el PIC debe ser proporcional al valor de la presión de acuerdo a la ecuación de presión hidrostática, esto se muestra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4** ALTURA MEDIDA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN TEÓRICA

#### 4.1.2.3 Prueba de volumen determinado

Para realizar esta prueba se hace uso de la ecuación geométrica del volumen para un cilindro (Ec. 4.6), ya que el tanque-silo tiene esta forma.

$$V_{TEÓRICO} = \pi \left( \frac{\phi}{2} \right)^2 h \quad [l] \quad \text{Ec. 4.6}$$

Para obtener la superficie de la circunferencia se utiliza el diámetro ingresado, cuyo valor por defecto para la aplicación específica es de  $\Phi=2.72$  m. La altura del nivel de líquido está determinada por los valores de altura teórica, obtenidos en la prueba anterior.

Esta prueba permite evaluar el funcionamiento de la subrutina para determinar el volumen en función de la altura de la columna del líquido y del diámetro ingresado. Los valores medidos son los desplegados por el display y LCD, mientras que los valores teóricos son los que se esperan obtener mediante la

ecuación 4.6. En la Tabla 4.6 se muestran los valores teóricos y medidos del volumen, así como sus niveles de error.

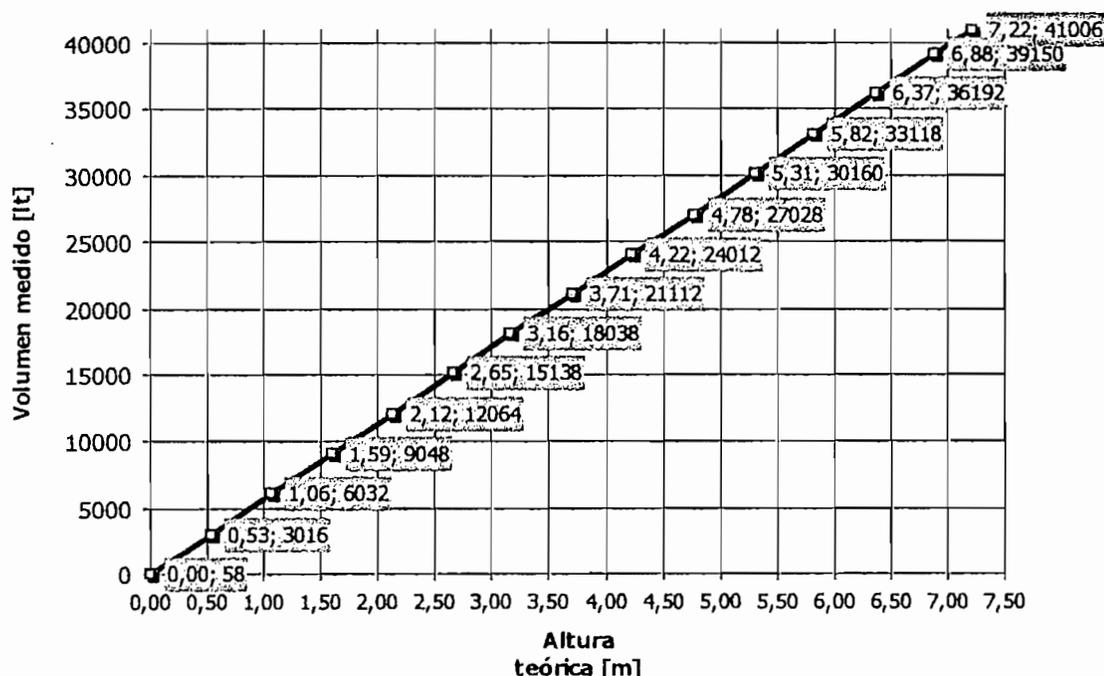
Altura teórica	Volumen (lt)		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0	58	0,58
0,53	3084	3016	-2,19
1,06	6167	6032	-2,19
1,59	9251	9048	-2,19
2,12	12334	12064	-2,19
2,65	15418	15138	-1,81
3,16	18378	18038	-1,85
3,71	21585	21112	-2,19
4,22	24545	24012	-2,17
4,78	27752	27028	-2,61
5,31	30835	30160	-2,19
5,82	33795	33118	-2,00
6,37	37002	36192	-2,19
6,88	39962	39150	-2,03
7,22	41936	41006	-2,22

**Tabla 4.6** MUESTRAS DEL VOLUMEN

Los niveles de error obtenidos no superan los tres puntos porcentuales, lo cual no es significativo, considerando la capacidad del tanque que es de 41000 lt y tomando en cuenta que en la planta para estas mediciones se admiten errores porcentuales de hasta cinco por ciento, que representaría un error absoluto de 2000 lt, lo cual no se da en ningún caso.

La variación de los valores indicados en display o valores medidos de volumen, debe seguir una función lineal y tener una variación proporcional con los valores teóricos de la altura.

Para graficar esto se presenta la Figura 4.5 en la que se grafica el volumen medido por el sistema en función de la altura teórica.



**Figura 4.5** VOLUMEN MEDIDO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA TEÓRICA

#### 4.1.2.4 Prueba de porcentaje de nivel determinado

El porcentaje de nivel máximo determinado por el sistema se relaciona con la altura de la columna de líquido, de manera que cuando el líquido alcanza la altura máxima en el interior, es decir, cuando el tanque esté completamente lleno se tiene un cien por ciento del nivel máximo, para esto se ha concebido la ecuación 4.7 que relaciona estos parámetros.

$$\% = \frac{h}{h_{TANQUE}} 100\% \quad \text{Ec. 4.7}$$

La altura del tanque ( $h_{TANQUE}$ ), es aquella ingresada ya sea, por el usuario a través del teclado o mediante el valor por defecto para la aplicación específica que es de 7.06 m. La altura de la columna ( $h$ ) es la determinada a partir de la ecuación de presión hidrostática,  $p = \delta gh$  (Ec.1.1), que se utilizó en los cálculos de volumen

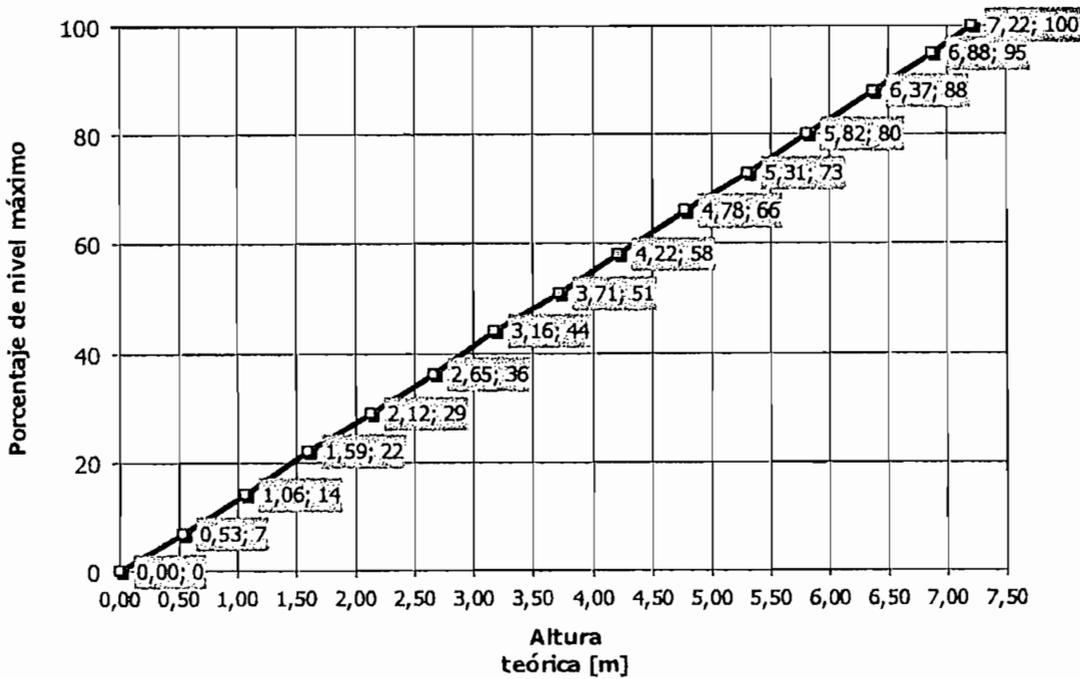
teórico y que representa el valor esperado o teórico de altura a la que llega la columna de líquido en el interior del tanque. En la Tabla 4.7 se presentan las muestras del porcentaje desplegado por el sistema, así como los valores teóricos de porcentaje obtenidos de la ecuación 4.7.

Altura teórica	Porcentaje		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	0	0	0,00
0,53	8	7	-6,87
1,06	15	14	-6,87
1,59	23	22	-2,44
2,12	30	29	-3,54
2,65	38	36	-4,21
3,16	45	44	-1,78
3,71	53	51	-3,07
4,22	60	58	-3,06
4,78	68	66	-2,44
5,31	75	73	-2,88
5,82	82	80	-2,89
6,37	90	88	-2,44
6,88	97	95	-2,48
7,22	102	100	-2,18

**Tabla 4.7** MUESTRAS DE PORCENTAJE DE NIVEL MÁXIMO

Como se nota en la tabla anterior, los valores medidos del porcentaje frente a los valores esperados no difieren en más allá de dos puntos porcentuales, el máximo error relativo se da en los valores más bajos, como por ejemplo en la segunda y tercera muestra. No obstante, estos errores relativos no representan una variación significativa para la aplicación específica.

El nivel o altura que alcanza la columna de líquido es proporcional al porcentaje de nivel, de acuerdo a la ecuación 4.3. Esto se grafica en la Figura 4.6.



**Figura 4.6** PORCENTAJE DE NIVEL MÁXIMO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA TEÓRICA

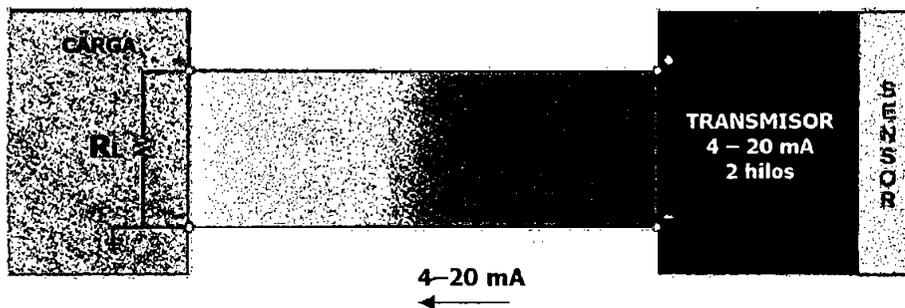
#### 4.1.3 PRUEBA DEL TRANSMISOR DE CORRIENTE

La tercera y quizás, más importante prueba, es la efectuada al transmisor de corriente en dos hilos, desarrollada para comprobar el funcionamiento de la etapa del transmisor que debe cumplir su función de llevar la señal de presión mediante corriente 4-20 mA hacia otros equipos.

Para la realización de esta prueba se contempla el hecho de que se desconoce la carga que se aplica en los terminales del transmisor, no obstante se debe considerar que la carga máxima aceptada tiene un valor fijo de  $500\Omega$ , valor obtenido de la ecuación proporcionada por el fabricante del CI-AD694 y descrita en el subcapítulo 2.4.6.

Así entonces, se han realizado cuatro pruebas para la etapa del transmisor con cuatro diferentes valores de carga y considerando que el funcionamiento correcto implica que para todos los casos el valor de corriente debe permanecer inalterable independientemente del valor de la carga conectada, además que al tener presión nula, el transmisor debe mantener los 4mA y al tener presión máxima de 15 psi el transmisor debe mantener 20 mA, en todo este rango la variación debe ser proporcional y debe seguir una función lineal.

Las pruebas fueron realizadas siguiendo el esquema de los transmisores de corriente industriales, mostrado en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** TRANSMISOR DE CORRIENTE INDUSTRIAL 4-20 mA DOS HILOS

Las cuatro pruebas realizadas, que en realidad son la misma pero con diferentes valores de carga, consisten en tomar valores de la corriente que genera el transmisor en sus terminales y compararlos con los valores teóricos obtenidos a partir de la ecuación 4.8.

$$I_{out} = 4 + \frac{16}{15} p \quad [mA] \quad \text{Ec. 4.8}$$

La ecuación 4.8 para el valor teórico esperado de la corriente de salida del transmisor es una función lineal del valor teórico de la presión, considerando que

cumple las dos condiciones límite y que la variación es proporcional en todo el rango.

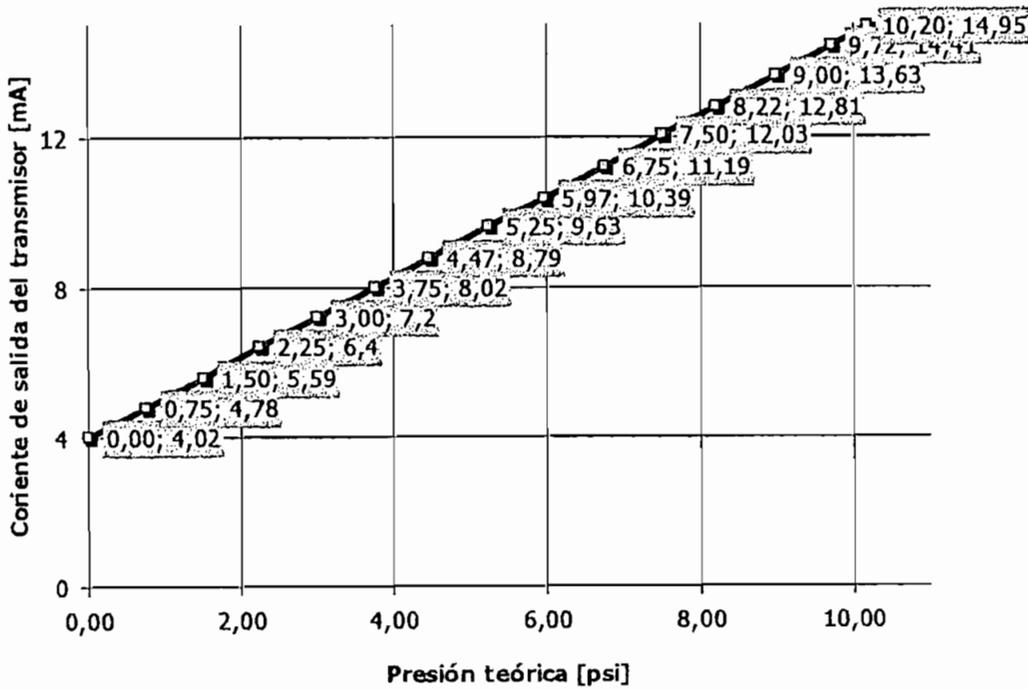
#### 4.1.3.1 Prueba con carga de $68\Omega$

La primera prueba hecha al transmisor fue realizada con los valores teóricos de presión recogidos para las pruebas anteriores. Los datos son mostrados en la Tabla 4.8.

Presión teórica	I <sub>out</sub> (mA) R <sub>L</sub> = 68Ω		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	4,00	4,02	2,00
0,75	4,80	4,78	-0,42
1,50	5,60	5,59	-0,18
2,25	6,40	6,4	0,00
3,00	7,20	7,2	0,00
3,75	8,00	8,02	0,25
4,47	8,77	8,79	0,25
5,25	9,60	9,63	0,31
5,97	10,37	10,39	0,21
6,75	11,20	11,19	-0,09
7,50	12,00	12,03	0,25
8,22	12,77	12,81	0,33
9,00	13,60	13,63	0,22
9,72	14,37	14,41	0,29
10,20	14,88	14,95	0,47

**Tabla 4.8** MUESTRAS DE I<sub>OUT</sub> PARA CARGA DE 68 Ω

En la Figura 4.8 se muestra la variación proporcional de la corriente de salida para los diferentes valores de presión.



**Figura 4.8**  $I_{OUT}$  DEL TRANSMISOR EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN TEÓRICA CON CARGA DE  $68\Omega$

#### 4.1.3.2 Prueba con carga de $119\Omega$

La segunda prueba realizada al transmisor se hizo conectando una carga de  $119\Omega$ , los valores esperados de corriente se obtienen de la ecuación 4.8, mientras que los valores medidos se obtuvieron midiendo la corriente que circula por la resistencia de carga.

Las muestras son realizadas a partir de los valores teóricos de presión. En la Tabla 4.9 se indican estos datos.

Presión teórica	I <sub>out</sub> (mA) R <sub>L</sub> =119Ω		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	4,00	4,02	2,00
0,75	4,80	4,78	-0,42
1,50	5,60	5,59	-0,18
2,25	6,40	6,4	0,00
3,00	7,20	7,2	0,00
3,75	8,00	8,02	0,25
4,47	8,77	8,79	0,25
5,25	9,60	9,63	0,31
5,97	10,37	10,39	0,21
6,75	11,20	11,19	-0,09
7,50	12,00	12,03	0,25
8,22	12,77	12,81	0,33
9,00	13,60	13,63	0,22
9,72	14,37	14,41	0,29
10,20	14,88	14,95	0,47

Tabla 4.9 MUESTRAS DE I<sub>OUT</sub> PARA CARGA DE 119 Ω

En la Figura 4.9 se grafica la variación proporcional de la corriente de salida para esta carga, en función de la presión teórica.

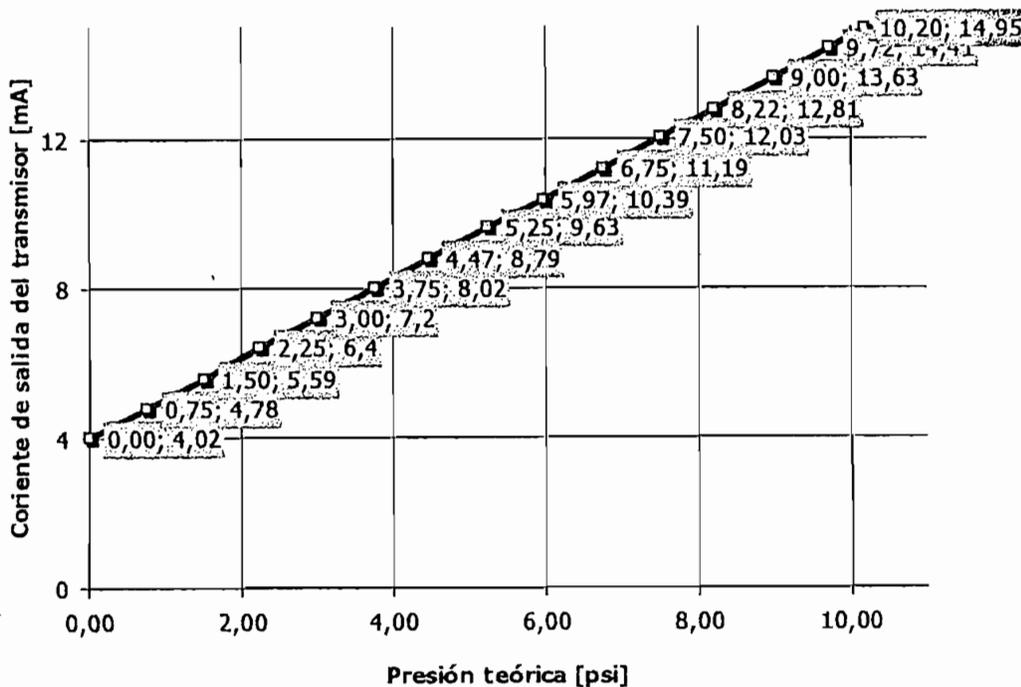


Figura 4.9 I<sub>OUT</sub> DEL TRANSMISOR EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN TEÓRICA CON CARGA DE 119Ω

#### 4.1.3.3 Prueba con carga de $332\Omega$

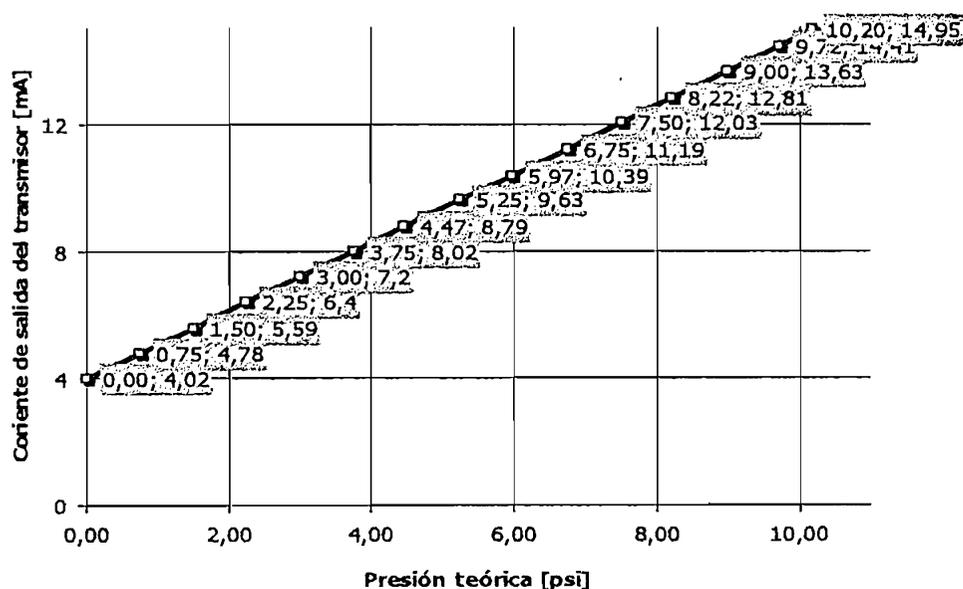
La prueba con carga de  $332\Omega$ , al igual que las demás pruebas realizadas al transmisor fueron hechas con valores de presión tomados desde la presión nula, es decir, cuando el tanque está vacío hasta el valor de presión máxima detectada, es decir, cuando el tanque se encuentra completamente lleno.

Los datos obtenidos para esta prueba se muestran en la Tabla 4.10

<b>I<sub>out</sub> (mA)</b> <b>R<sub>L</sub>=332Ω</b>			
<b>Presión teórica</b>	<b>Teórico</b>	<b>Medido</b>	<b>Error relativo %</b>
0,00	4,00	4,02	2,00
0,75	4,80	4,78	-0,42
1,50	5,60	5,59	-0,18
2,25	6,40	6,4	0,00
3,00	7,20	7,2	0,00
3,75	8,00	8,02	0,25
4,47	8,77	8,79	0,25
5,25	9,60	9,63	0,31
5,97	10,37	10,39	0,21
6,75	11,20	11,19	-0,09
7,50	12,00	12,03	0,25
8,22	12,77	12,81	0,33
9,00	13,60	13,63	0,22
9,72	14,37	14,41	0,29
10,20	14,88	14,95	0,47

**Tabla 4.10** MUESTRAS DE I<sub>OUT</sub> PARA CARGA DE  $332\Omega$

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores medidos de corriente de salida del transmisor difieren en  $70\mu\text{A}$  con respecto a su valor teórico, como el peor caso para la última muestra; lo cual no representa una variación significativa y evidencia el funcionamiento correcto de la etapa del transmisor para este valor de carga. En la Figura 4.10 se grafica la función lineal entre la presión teórica y los datos medidos de corriente del transmisor para carga de  $332\Omega$ .



**Figura 4.10**  $I_{OUT}$  DEL TRANSMISOR EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN TEÓRICA CON CARGA DE  $332\Omega$

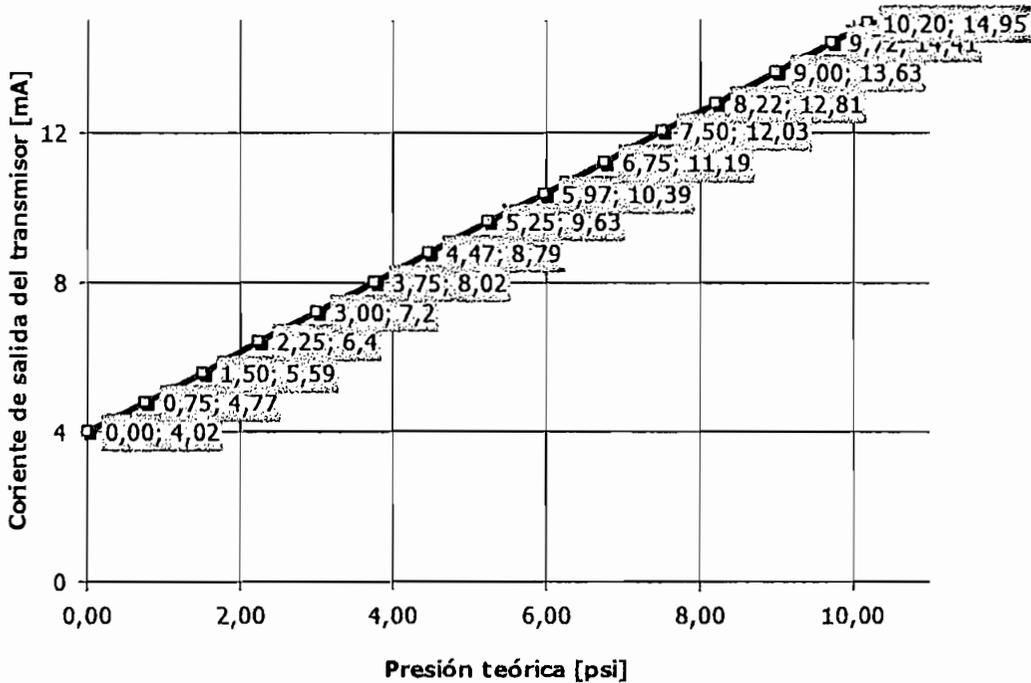
#### 4.1.3.4 Prueba con carga de $465\Omega$

La última prueba de carga realizada al transmisor se realizó conectando una carga de  $465\Omega$ , en la Tabla 4.11 se muestran los datos obtenidos.

Presión teórica	$I_{out}$ (mA) $R_L = 465\Omega$		Error relativo %
	Teórico	Medido	
0,00	4,00	4,02	2,00
0,75	4,80	4,77	-0,63
1,50	5,60	5,59	-0,18
2,25	6,40	6,4	0,00
3,00	7,20	7,2	0,00
3,75	8,00	8,02	0,25
4,47	8,77	8,79	0,25
5,25	9,60	9,63	0,31
5,97	10,37	10,39	0,21
6,75	11,20	11,19	-0,09
7,50	12,00	12,03	0,25
8,22	12,77	12,81	0,33
9,00	13,60	13,63	0,22
9,72	14,37	14,41	0,29
10,20	14,88	14,95	0,47

**Tabla 4.11** MUESTRAS DE  $I_{OUT}$  PARA CARGA DE  $465\Omega$

En la Figura 4.11 se grafica la función lineal entre la presión teórica y los datos medidos de corriente del transmisor para carga de  $465\Omega$ .



**Figura 4.11**  $I_{OUT}$  DEL TRANSMISOR EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN TEÓRICA CON CARGA DE  $465\Omega$

En las pruebas realizadas al transmisor con diferentes valores de carga, se observa que las variaciones entre los valores teóricos esperados y los valores medidos en ningún caso representan una diferencia significativa, además la corriente de salida del transmisor obedece a una función lineal de la presión y es proporcional en todo el rango.

Por medio de estas pruebas de carga, se evidencia también que la corriente de salida del transmisor permanece invariable independientemente de la carga a la que sea conectada, es decir, que el lazo de realimentación cumple su función de mantener el nivel de corriente de salida y que además adiciona los 4 mA de offset requeridos para el nivel mínimo de presión.

#### **4.1.4 PRUEBAS PARA CASOS DE FALLA**

La última prueba fue realizada para constatar el correcto comportamiento del sistema ante los eventuales casos de falla, esto es, si la conexión entre el sensor y el acondicionador es pobre o nula; y si se detecta un intento no autorizado de ingreso al menú de configuración, para ingresar parámetros de medición, lo cual desembocaría en una descalibración premeditada del sistema de medición.

Estas pruebas se han realizado emulando los casos de falla descritos, tratando en lo posible de imitar las posibles causas que los originan.

##### **4.1.4.1 Prueba de desconexión del sensor**

Esta prueba permite comprobar el funcionamiento correcto de la rutina de test del sensor y del circuito de detección de falla, para esto, se han recogido datos acerca del estado de varios parámetros en funcionamiento normal y en condición de falla. Estos parámetros indican el cambio de estado y la respuesta de las diferentes etapas involucradas en esta transición.

Para comprobar la rutina de test del sensor, se toma en cuenta los mensajes presentados en el LCD, el estado de los display, el estado del teclado, estado del led de falla y la salida PWM al transmisor que repercute en la salida de corriente del transmisor; mientras que para la comprobación del circuito detector se toma en cuenta el voltaje de entrada y el nivel lógico generado en este circuito.

La prueba se realizó partiendo de la operación normal del sistema, para posteriormente desconectar premeditadamente la señal de entrada del sensor.

El estado de los parámetros tomados en cuenta se muestra en la Tabla 4.12.

PARÁMETRO	ESTADO	
	Operación normal	Condición de falla
Mensaje en LCD	Indicación de variable	"Sin sensor"
Displays	Indicación de variable	Apagados
Teclado	Habilitado	Habilitado
Led de falla	Apagado	Encendido
VVALIDA PWM	Normal	0V
IOUT	Normal	0 mA
VIN circuito detector	VSENSOR	0V
Nivel lógico circuito detector	Uno lógico	Cero lógico

**Tabla 4.12** ESTADO DE PARÁMETROS PARA PRUEBA DE DESCONEXIÓN DE SENSOR

De acuerdo a los datos recogidos, para la condición de falla, se observa que los displays dejan de indicar la variable, lo cual alerta del estado de falla del sistema, el módulo LCD indica la causa de error presentando el mensaje de falla "Sin sensor" y el led de aviso de falla se enciende, se inhabilita la etapa de transmisión anulando el voltaje de salida PWM y por lo tanto la corriente de salida.

Mediante esta prueba se comprobó el correcto funcionamiento del circuito detector de falla que, discretiza el estado de la señal del sensor en dos niveles, uno lógico siempre que se detecte la presencia de un voltaje de entrada al acondicionador (operación normal) y cero lógico cuando se advierte de la ausencia de dicho voltaje de entrada (condición de falla), lo cual hace que el programa principal se bifurque a la subrutina de falla.

#### 4.1.4.2 Prueba de ingreso no autorizado

Esta prueba permite comprobar el funcionamiento de la subrutina de ingreso de clave, específicamente la sección desarrollada para evitar intentos no autorizados de ingreso de parámetros que ocasionen descalibraciones premeditadas; la condición de falla se provoca cuando en la subrutina se detecta tres intentos erróneos de ingreso de clave.

Para emular la condición de falla se accede al tercer menú de configuración y se ingresa en tres ocasiones una clave errónea cualquiera, se recoge entonces el estado de los parámetros que intervienen en esta prueba, indicación en LCD, indicación en displays, estado del teclado, estado del led de falla, salida de corriente del transmisor.

El estado de estos parámetros se indica en la Tabla 4.13.

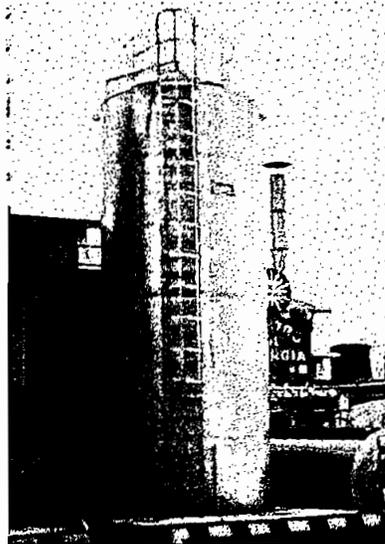
PARÁMETRO	ESTADO	
	Operación normal	Condición de falla
Mensaje en LCD	Tercer menú	"Número máximo de intentos"
Displays	Apagado	Apagado
Teclado	Habilitado	Inhabilitado
Led de falla	Apagado	Encendido
IOUT	Normal	Último valor

**Tabla 4.13** ESTADO DE PARÁMETROS PARA PRUEBA DE INGRESO NO AUTORIZADO

Al provocarse la condición de falla los display previamente apagados al ingresar al menú de configuración, permanecen inalterables sin indicar variable alguna; en el módulo LCD se muestra la descripción de error que es advertida por el encendido del led de aviso. El sistema queda inhabilitado, de tal modo que no se presenta ninguna indicación y no es posible acceder a ningún menú de configuración.

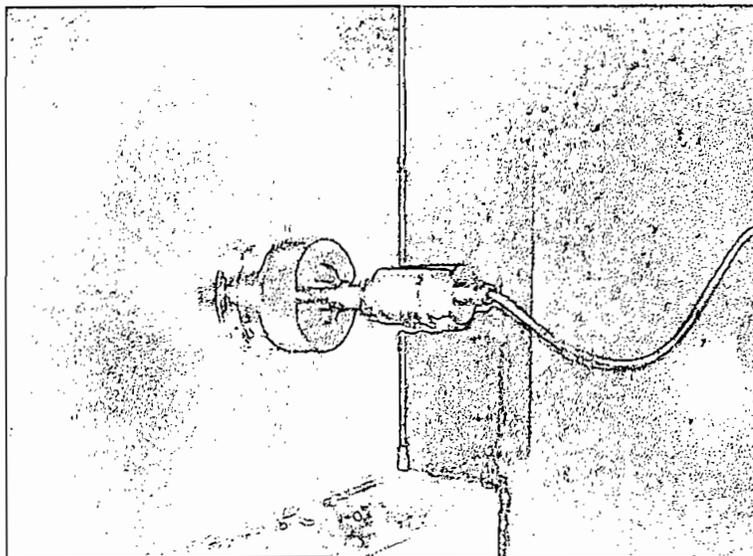
## 4.2 FOTOGRAFÍAS DEL SISTEMA

La Figura 4.12 es una fotografía que muestra el tanque-silo para almacenamiento de la leche cruda.



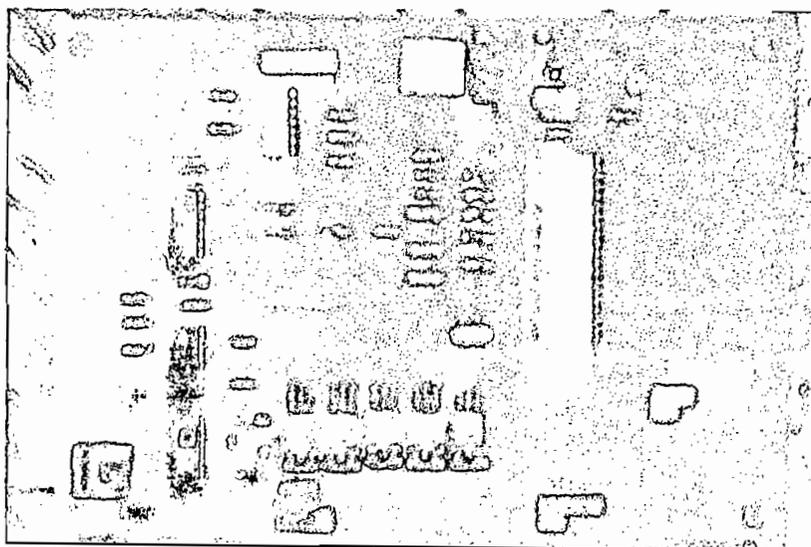
**Figura 4.12** TANQUE-SILO PARA ALMACENAMIENTO DE LECHE CRUDA

La Figura 4.13 muestra una fotografía del montaje del sensor de presión en la base del tanque-silo.



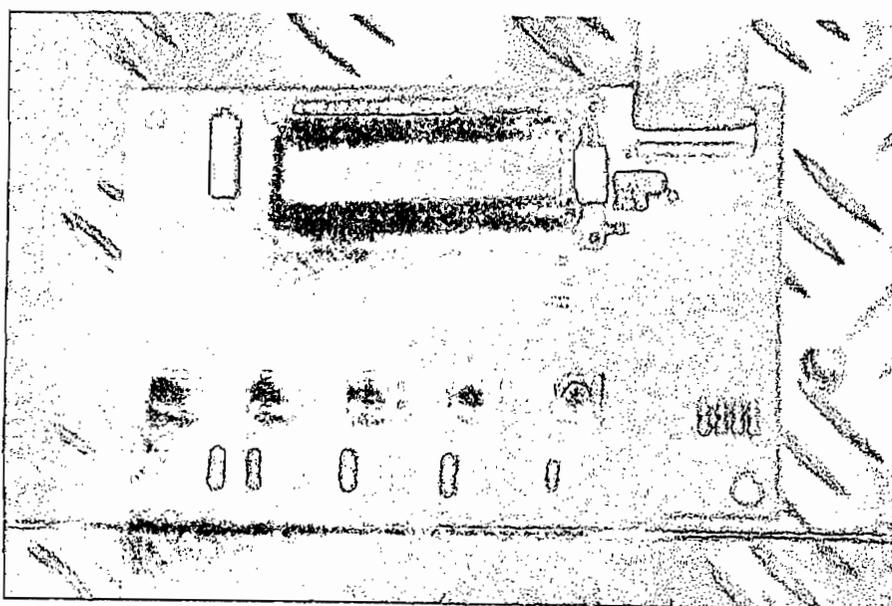
**Figura 4.13** SENSOR DE PRESIÓN MONTADO EN LA BASE DEL TANQUE-SILO

En la Figura 4.14 se muestra la fotografía de la tarjeta principal, en la que se incluye la etapa de adquisición, parte de la etapa del microcontrolador que incluye el PIC, el circuito de control de los displays y la etapa del transmisor.



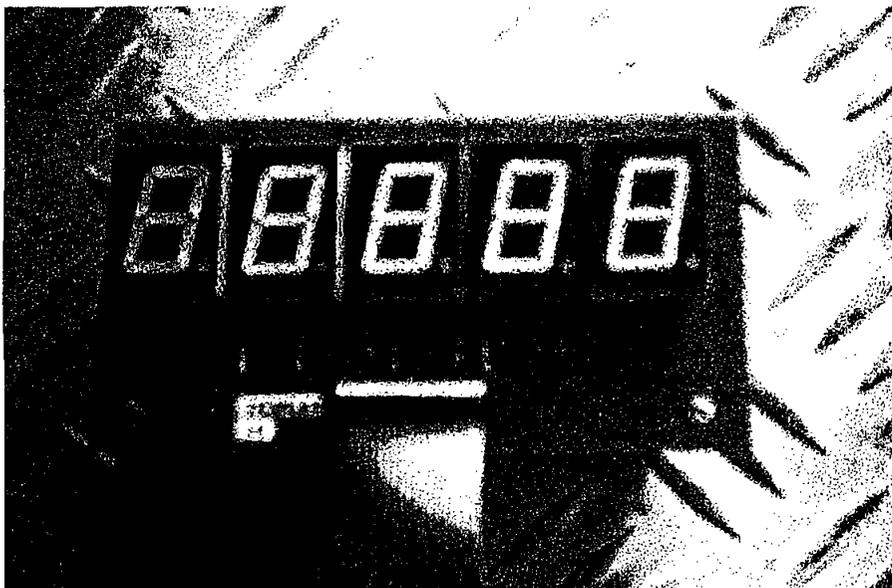
**Figura 4.14** TARJETA ELECTRÓNICA PRINCIPAL

En la Figura 4.15 se muestra la fotografía de la tarjeta frontal 1 que incluye el circuito de teclado y el módulo LCD.



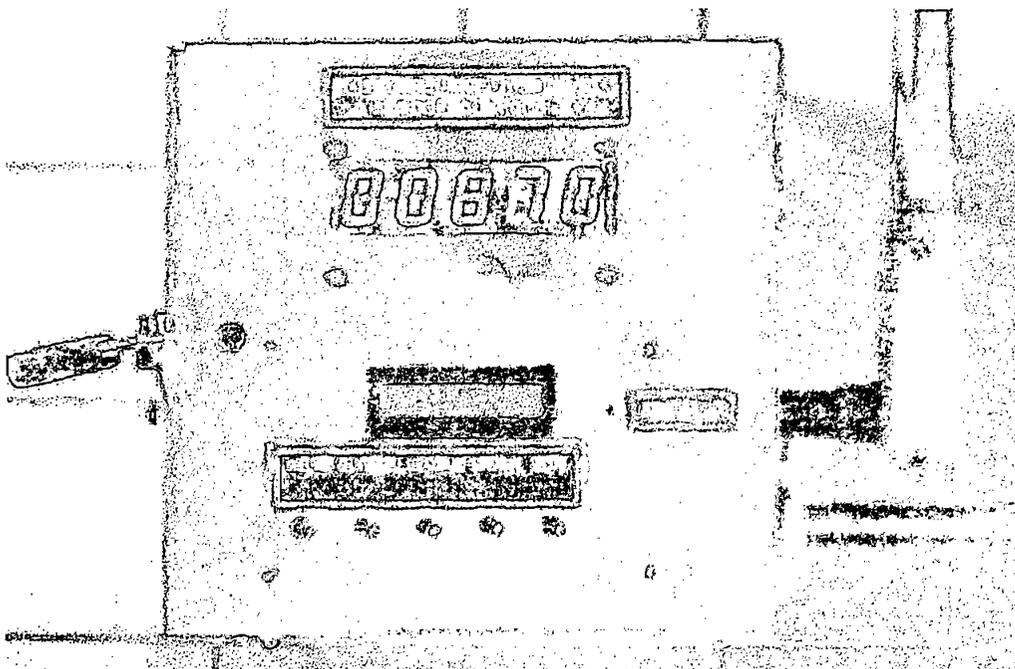
**Figura 4.15** TARJETA FRONTAL 1

En la Figura 4.16 se muestra la tarjeta frontal 2 que incluye los cinco displays de siete segmentos.



**Figura 4.16** TARJETA FRONTAL 2

La Figura 4.17 es una fotografía del módulo en funcionamiento.



**Figura 4.17** MÓDULO EN FUNCIONAMIENTO

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Al término del presente proyecto se han obtenido algunos resultados en torno al estudio, diseño e implementación de todas y cada una de las partes del trabajo. Estos resultados principalmente han dejado experiencias que se constituyen a manera de conclusiones y/o recomendaciones en una referencia para trabajos similares. De lo expuesto, la consecución de los resultados permite llegar a las siguientes conclusiones:

- El proyecto desarrollado cumple con todos los objetivos planteados en un inicio, se ha diseñado y construido un transmisor de presión para la medición de nivel de leche cruda en tanques-silos de almacenamiento, que además permite la determinación indirecta de otras variables mediante un PIC, su indicación y la calibración de parámetros de medida; proporcionando así, a la industria láctea un equipo confiable, versátil y de fácil operabilidad para la medición de nivel de líquido.
- El sistema puede ser utilizado con otros líquidos de parámetros similares a los de la leche cruda, para ello se deben realizar las calibraciones necesarias de las características del líquido, temperatura y densidad, se debe tomar en cuenta también que la temperatura del líquido no exceda los 70°C.
- El diseño del sistema se establece como una solución sencilla, eficiente y de bajo costo ante la necesidad, en este tipo de industria, de contar con medidores de volumen.

- El medir la presión en el fondo del recipiente para almacenamiento de leche, permitió determinar indirectamente otras variables, tales como: el volumen, la altura de la columna de líquido y el porcentaje de nivel máximo, gracias a la inclusión de ecuaciones desarrolladas en el microcontrolador.
- El sistema implementado ofrece funciones adicionales, tales como: cambio de variable y de unidades, calibración, funciones de seguridad, que lo hacen más versátil frente a otros equipos disponibles en el mercado.
- El software de manejo del sistema fue desarrollado para el PIC16F877, sin embargo, este software puede ser utilizado con otro tipo de PIC que tenga características físicas y eléctricas similares aunque tenga distinta capacidad de memoria.
- El sistema de medición desarrollado se constituye como el punto de partida para un sistema de control que puede ser implementado en el microcontrolador o en un controlador adicional, de lo que se concluye que este proyecto marca el punto de inicio para futuros proyectos a desarrollarse en la planta.
- La utilización del circuito integrado para transmitir la variable resultó una buena elección por las bondades que presenta este chip en cuanto a calibración, linealidad, rango de salida y costo reducido.
- Todas las funciones implementadas en el sistema trabajaron adecuadamente, tal como se observó en los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas. Se concluye por lo tanto que la utilización de microcontroladores y de tecnología que emplea electrónica digital permite indicar y transmitir variables de manera eficiente como una de las tareas más importantes en la instrumentación industrial.
- El diseño y construcción del hardware para el presente proyecto permitió que el sistema sea capaz de responder adecuadamente a todas las

pruebas efectuadas; esto permite concluir que el diseño electrónico, la planificación, construcción e implementación de todos los componentes responden correctamente ante todos los cambios de carga.

## 5.2 RECOMENDACIONES

El desarrollo del proyecto y la consecución de los resultados permiten extraer las siguientes recomendaciones:

- Es importante tener en cuenta las características y limitaciones del sistema para hacer uso de todas las funciones del mismo y para el uso correcto en cuanto al alcance y la capacidad de medida, de manera que no se sobrepasen los límites máximos de presión y temperatura.
- Cabe anotar que el proyecto ha sido desarrollado para un tanque de almacenamiento, no obstante, en el diseño se ha contemplado que realizando algunas modificaciones en el software se puede emplear simultáneamente el sistema para un segundo tanque-silo.
- Se recomienda evitar la exposición del microcontrolador a temperaturas extremas, dispositivos con alto voltaje o con interferencia que puedan borrar o modificar la memoria, inutilizando así el software descargado en el PIC.
- Debido a que este sistema de medición de nivel puede ser considerado como punto de partida para un sistema de control de nivel, se recomienda que en caso de ser implementado este último, la inclusión de bombas y/o actuadores esté acompañada con la protección del sensor de presión mediante redes snubber.
- En caso de interconectar el transmisor con otros equipos a través de la etapa de transmisión de corriente 4-20mA, se recomienda no exceder los

niveles de carga especificados para el correcto funcionamiento y mantenimiento del sistema.

- El sistema de medición de nivel puede ser empleado para uso general, sin embargo, se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones en cuanto a las características del líquido, especialmente para no exceder los límites de densidad y temperatura del líquido cuyo nivel se desea medir.
- Por último, se recomienda seguir trabajando en el tema para alcanzar un equipo comercialmente más competitivo y que cuente con las mismas o mejores funciones, sin mermar el costo-beneficio que esto representa; se recomienda investigación sobre la aplicación de los otros métodos de medición de nivel para proyectos afines.

## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

- ANGULO, J., *Microcontroladores PIC: Diseño práctico de aplicaciones*, 2ª edición, Mc-Graw Hill, España, 1999.
- COOPER, W., *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*, 3ª edición, Prentice Hall, México, 1991.
- COUGHLIN, R., *Circuitos integrados lineales y amplificadores operacionales*, 5ª edición, Prentice-Hall, México, 1999.
- CREUS, A., *Instrumentación Industrial*, 6ª edición, Marcombo, México, 1999.
- JOHNSON, C., *Process control instrumentation technology*, 6a edición, EE. UU, 2000.
- KING, H., *Hidráulica*, 5ª edición, Ed. Trillas, México, 1982.
- MORRIS, A., *Principios de mediciones e instrumentación*, 1ª edición, Prentice Hall, México, 2002.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR, *National analog and interface; products data book*, 2001.
- PALLAS, R., *Sensores y acondicionadores de señal*, 3ª edición, Marcombo, España, 2001.

### Web

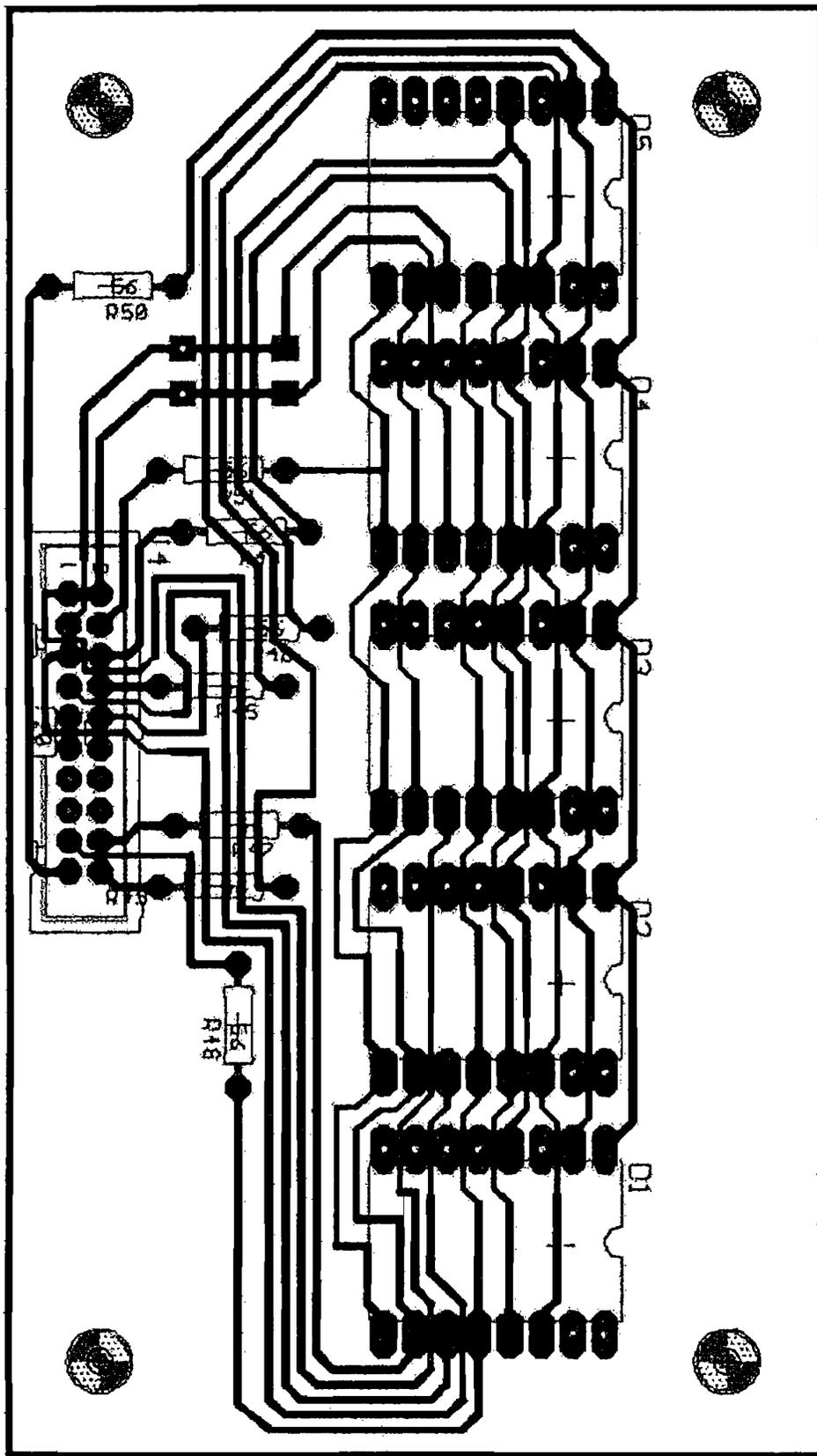
- GENTILE, Agustina: Lácteos, [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
- NUÑEZ, Marco; Presión, [www.monografias.com](http://www.monografias.com)
- RODRÍGUEZ, Mónica; Tecnología de la leche; [www.uam.es](http://www.uam.es)
- [www.alpura.com](http://www.alpura.com)
- [www.analog.com](http://www.analog.com)
- [www.fairchild.com](http://www.fairchild.com)

- [www.miarroba.com](http://www.miarroba.com)
- [www.microchip.com](http://www.microchip.com)
- [www.national.com](http://www.national.com)
- [www.normas.com](http://www.normas.com)
- [www.omega.com](http://www.omega.com)
- [www.st.com](http://www.st.com)
- [www.tetrapak.com](http://www.tetrapak.com)





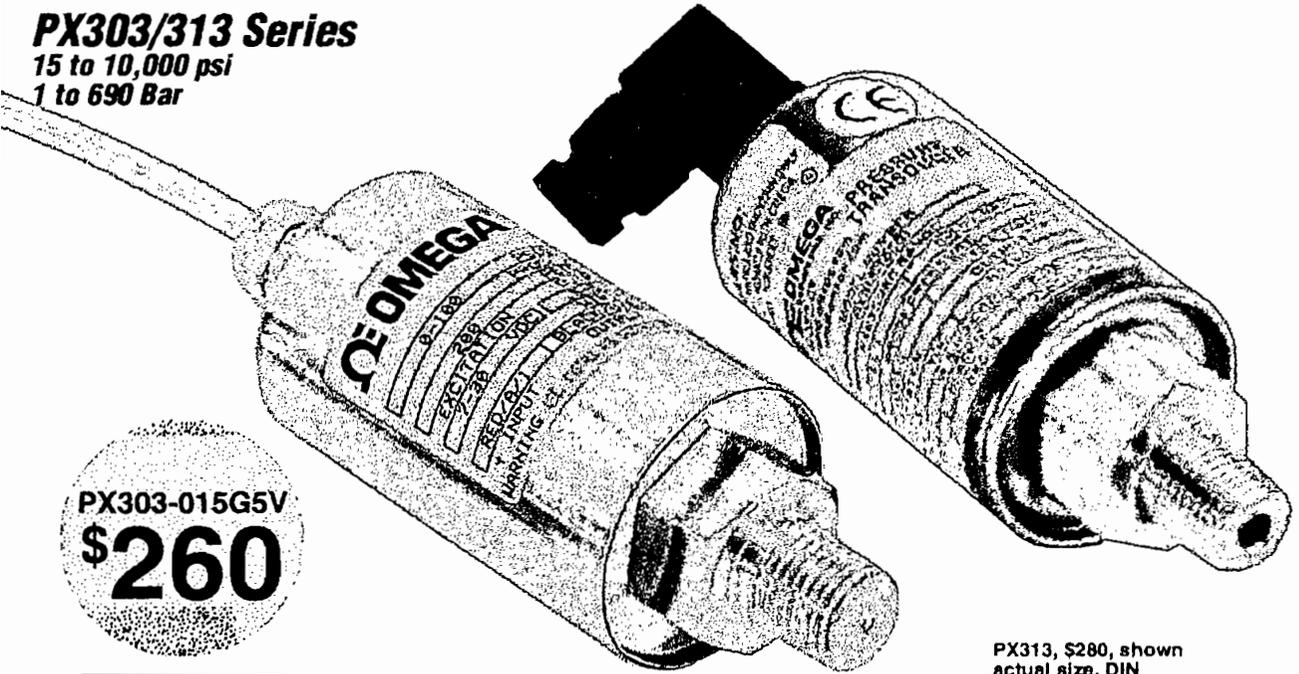
CIRCUITO DE TARJETA FRONTAL. 2  
DISPLAY



# GENERAL PURPOSE 5 OR 10 VOLT OUTPUT PRESSURE SENSORS

## PX303/313 Series

15 to 10,000 psi  
1 to 690 Bar



PX303-015G5V  
**\$260**



PX303, \$280,  
shown actual size.

PX313, \$280, shown  
actual size. DIN  
connector included



- ✓ Welded Stainless Steel Construction
- ✓ NEMA 4 Enclosure
- ✓ Reverse Polarity Protected
- ✓ Integral Strain Relief Cable or DIN Connector
- ✓ 0.25% Full Scale Accuracy

### SPECIFICATIONS

5V Output (10V Output)

Excitation: 9 to 30 Vdc  
(10 to 30 Vdc) unregulated

Output: 0.5 to 5.5 (1 to 11) Vdc

Accuracy: 0.25% FS (linearity, hysteresis, repeatability)

Zero Balance:  $\pm 0.4\%$  FS ( $\pm 0.2\%$ )

Span Tolerance:  $\pm 0.8\%$  FS ( $\pm 0.4\%$ )

Long Term Stability:  $\pm 0.5\%$  FS

Typical Life: 100 million cycles

Operating Temperature:

-18 to 71°C (0 to 160°F)

Compensated Temperature:

-1 to 54°C (30 to 130°F)

Total Thermal Effects: 1% FS max  
Proof Pressure: 200%, 13000 psi max  
Quiescent Exc.: 15 mA maximum  
Min Load Resistance: 2000 $\Omega$

Response Time: 1 msec

Gage Type: Stainless steel diaphragm,  
silicone oil filled semiconductor sensor

Shock: 50 g @ 11msec

Vibration: 15 g 10 to 2000 Hz

Wetted Parts: 17 to 4 PH and 300  
series stainless steel

Pressure Port:  $\frac{1}{4}$ " NPT male

Press. Cavity: 0.075 cubic inches

Electrical Conn.:

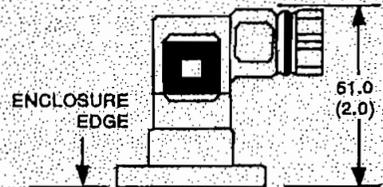
PX303: 1 m (3') 4 conductor cable

PX313: Miniature DIN connector  
(included)

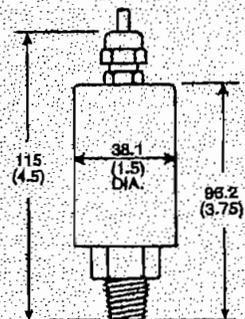
Weight: 221 g (7.8 oz) to 1000 psi

281 g (9.9 oz) from 1000 psi

Dimensions: mm (in)



SUBMINIATURE  
DIN CONNECTOR  
(H4)



Connections  
2 BLACK Com.  
1 RED EX+  
3 WHITE SIG+  
4 BARE DRAIN



# PIC16F87XA

## 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input  
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin  
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during Sleep via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™  
(Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with  
external  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$  and  $\overline{CS}$  controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital  
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference  
(VREF) module
  - Programmable input multiplexing from device  
inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

### Special Microcontroller Features:

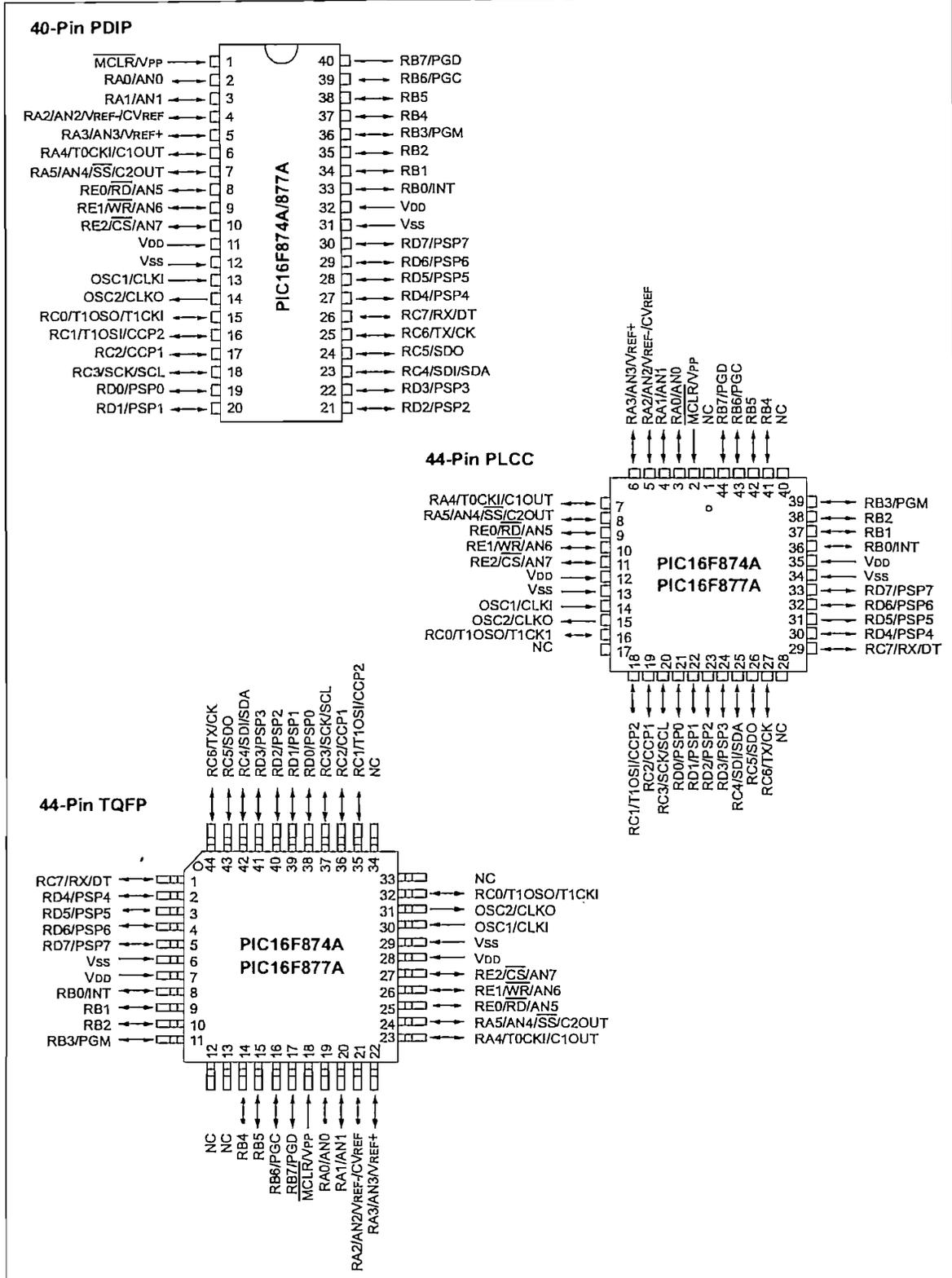
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash  
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM  
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)  
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM  
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

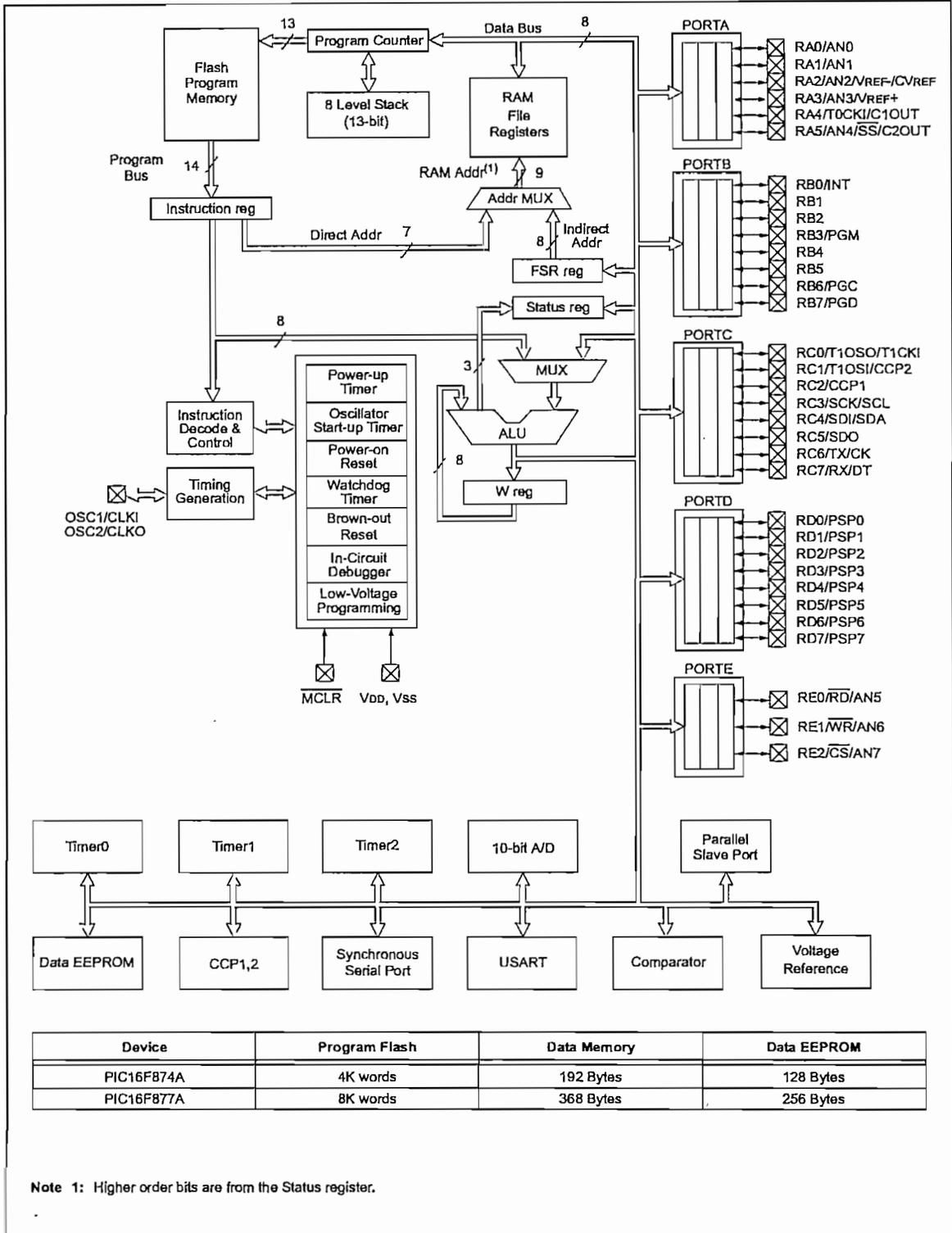
Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

## Pin Diagrams (Continued)



# PIC16F87XA

FIGURE 1-2: PIC16F874A/877A BLOCK DIAGRAM



# PIC16F87XA

## 2.0 MEMORY ORGANIZATION

There are three memory blocks in each of the PIC16F87XA devices. The program memory and data memory have separate buses so that concurrent access can occur and is detailed in this section. The EEPROM data memory block is detailed in Section 3.0 "Data EEPROM and Flash Program Memory".

Additional information on device memory may be found in the PICmicro® Mid-Range MCU Family Reference Manual (DS33023).

## 2.1 Program Memory Organization

The PIC16F87XA devices have a 13-bit program counter capable of addressing an 8K word x 14 bit program memory space. The PIC16F876A/877A devices have 8K words x 14 bits of Flash program memory, while PIC16F873A/874A devices have 4K words x 14 bits. Accessing a location above the physically implemented address will cause a wraparound.

The Reset vector is at 0000h and the interrupt vector is at 0004h.

FIGURE 2-1: PIC16F876A/877A PROGRAM MEMORY MAP AND STACK

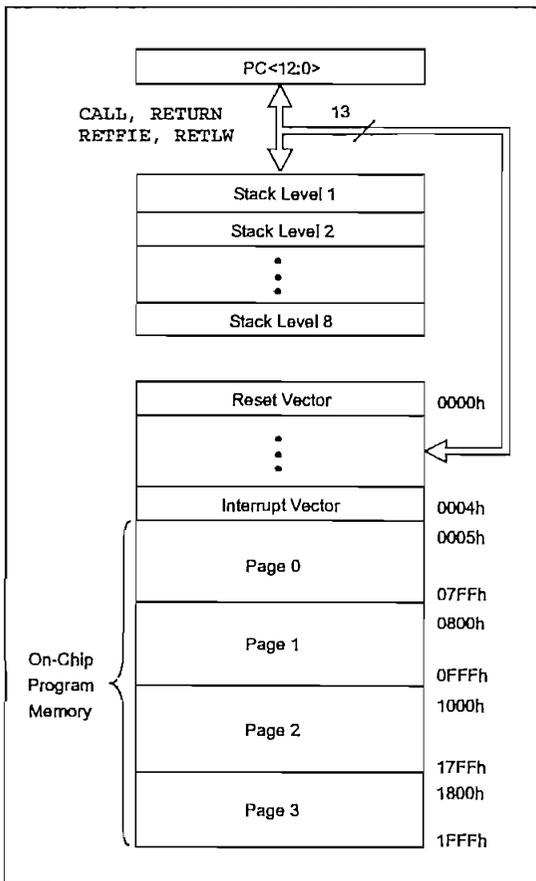
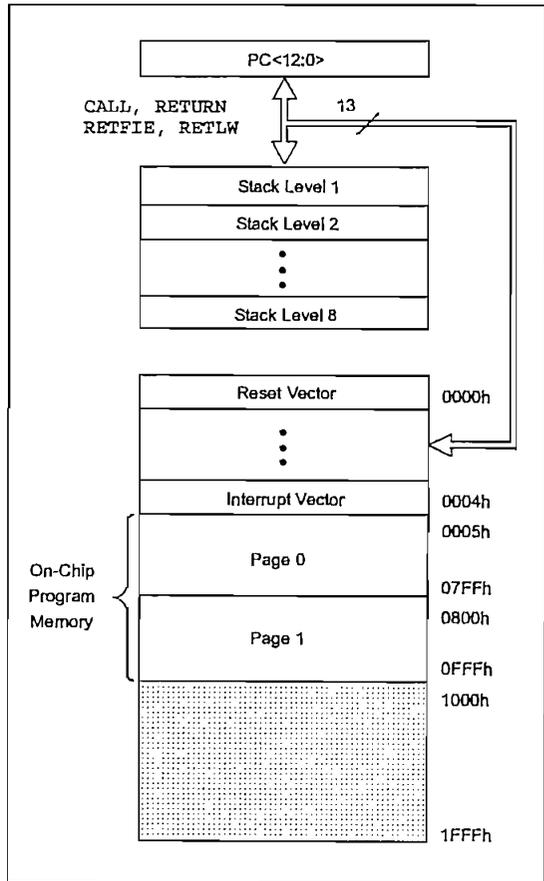


FIGURE 2-2: PIC16F873A/874A PROGRAM MEMORY MAP AND STACK



# PIC16F87XA

FIGURE 2-3: PIC16F876A/877A REGISTER FILE MAP

File Address		File Address		File Address		File Address	
Indirect addr. <sup>(*)</sup>	00h	Indirect addr. <sup>(*)</sup>	80h	Indirect addr. <sup>(*)</sup>	100h	Indirect addr. <sup>(*)</sup>	180h
TMR0	01h	OPTION_REG	81h	TMR0	101h	OPTION_REG	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
PORTC	07h	TRISC	87h		107h		187h
PORTD <sup>(1)</sup>	08h	TRISD <sup>(1)</sup>	88h		108h		188h
PORTE <sup>(1)</sup>	09h	TRISE <sup>(1)</sup>	89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch	EEDATA	10Ch	EECON1	18Ch
PIR2	0Dh	PIE2	8Dh	EEADR	10Dh	EECON2	18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh	EEDATH	10Eh	Reserved <sup>(2)</sup>	18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh	EEADRH	10Fh	Reserved <sup>(2)</sup>	18Fh
T1CON	10h		90h	General Purpose Register 16 Bytes	110h	General Purpose Register 16 Bytes	190h
TMR2	11h	SSPCON2	91h		111h		191h
T2CON	12h	PR2	92h		112h		192h
SSPBUF	13h	SSPADD	93h		113h		193h
SSPCON	14h	SSPSTAT	94h		114h		194h
CCPR1L	15h		95h		115h		195h
CCPR1H	16h		96h		116h		196h
CCP1CON	17h		97h		117h		197h
RCSTA	18h	TXSTA	98h		118h		198h
TXREG	19h	SPBRG	99h		119h		199h
RCREG	1Ah		9Ah	11Ah	19Ah		
CCPR2L	1Bh		9Bh	11Bh	19Bh		
CCPR2H	1Ch	CMCON	9Ch	11Ch	19Ch		
CCP2CON	1Dh	CVRCON	9Dh	11Dh	19Dh		
ADRESH	1Eh	ADRESL	9Eh	11Eh	19Eh		
ADCON0	1Fh	ADCON1	9Fh	11Fh	19Fh		
General Purpose Register 96 Bytes	20h	General Purpose Register 80 Bytes	A0h	General Purpose Register 80 Bytes	120h	General Purpose Register 80 Bytes	1A0h
			EFh		16Fh		1EFh
			F0h		170h		1F0h
	7Fh		FFh		17Fh		1FFh
Bank 0		Bank 1		Bank 2		Bank 3	

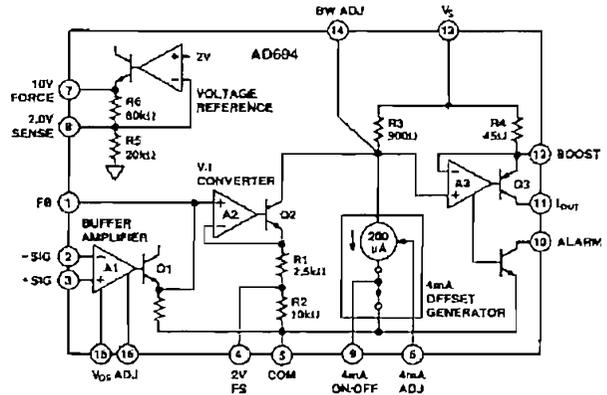
 Unimplemented data memory locations, read as '0'.  
 \* Not a physical register.

**Note 1:** These registers are not implemented on the PIC16F876A.  
**Note 2:** These registers are reserved; maintain these registers clear.

### FEATURES

- 4–20 mA, 0–20 mA Output Ranges
- Precalibrated Input Ranges:  
0 V to 2 V, 0 V to 10 V
- Precision Voltage Reference  
Programmable to 2.000 V or 10.000 V
- Single or Dual Supply Operation
- Wide Power Supply Range: 4.5 V to 36 V
- Wide Output Compliance
- Input Buffer Amplifier
- Open-Loop Alarm
- Optional External Pass Transistor to Reduce  
Self-Heating Errors
- 0.002% Typ Nonlinearity

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD694 is a monolithic current transmitter that accepts high level signal inputs to drive a standard 4–20 mA current loop for the control of valves, actuators, and other devices commonly used in process control. The input signal is buffered by an input amplifier that can be used to scale the input signal or buffer the output from a current mode DAC. Precalibrated input spans of 0 V to 2 V and 0 V to 10 V are selected by simple pin strapping; other spans may be programmed with external resistors.

The output stage compliance extends to within 2 V of  $V_S$  and its special design allows the output voltage to extend below common in dual supply operation. An alarm warns of an open 4–20 mA loop or noncompliance of the output stage.

Active laser trimming of the AD694's thin film resistors results in high levels of accuracy without the need for additional adjustments and calibration. An external pass transistor may be used with the AD694 to off-load power dissipation, extending the temperature range of operation.

The AD694 is the ideal building block for systems requiring noise immune 4–20 mA signal transmission to operate valves, actuators, and other control devices, as well as for the transmission of process parameters such as pressure, temperature, or flow. It is recommended as a replacement for discrete designs in a variety of applications in industrial process control, factory automation, and system monitoring.

The AD694 is available in hermetically sealed, 16-pin CERDIP and plastic SOIC, specified over the  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$  industrial temperature range, and in a 16-pin plastic DIP, specified over the  $0^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$  temperature range.

\*Protected by U.S. Patents: 30,586; 4,250,445; 4,857,862.

### REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD694 is a complete voltage in to 4–20 mA out current transmitter.
2. Pin programmable input ranges are precalibrated at 0 V to 2 V and 0 V to 10 V.
3. The input amplifier may be configured to buffer and scale the input voltage, or to serve as an output amplifier for current output DACs.
4. The output voltage compliance extends to within 2 V of the positive supply and below common. When operated with a 5 V supply, the output voltage compliance extends 30 V below common.
5. The AD694 interfaces directly to 8-, 10-, and 12-bit single supply CMOS and bipolar DACs.
6. The 4 mA zero current may be switched on and off with a TTL control pin, allowing 0–20 mA operation.
7. An open collector alarm warns of loop failure due to open wires or noncompliance of the output stage.
8. A monitored output is provided to drive an external pass transistor. The feature off-loads power dissipation to extend the temperature range of operation and minimize self-heating error.

# D694—SPECIFICATIONS

(@ +25°C,  $R_L = 250 \Omega$ , and  $V_S = +24 \text{ V}$ , unless otherwise noted.)

Model	AD694JN/AQ/AR			AD694BQ/BR			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>INPUT CHARACTERISTICS</b>							
Input Voltage Range	-0.2	$V_S - 2.0 \text{ V}$	$V_S - 2.5 \text{ V}$	-0.2	$V_S - 2.0 \text{ V}$	$V_S - 2.5 \text{ V}$	V
Input Bias Current							
Either Input, $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		1.5	5		1.5	5	nA
Offset Current, $T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		$\pm 0.1$	$\pm 1$		$\pm 0.1$	$\pm 1$	nA
Offset Current Drift		$\pm 1.0$	$\pm 5.0$		$\pm 1.0$	$\pm 5.0$	pA/°C
Input Impedance	5			5			M $\Omega$
<b>OUTPUT CHARACTERISTICS</b>							
Operating Current Range	0		23	0		23	mA
Specified Performance	4		20	4		20	mA
Output Voltage Compliance	$V_S - 36 \text{ V}$		$V_S - 2 \text{ V}$	$V_S - 36 \text{ V}$		$V_S - 2 \text{ V}$	V
Output Impedance, 4–20 mA	40.0	50.0		40.0	50.0		M $\Omega$
Current Limit (@ $2 \times \text{FS}$ Overdrive)	24		44	24		44	mA
Slew Rate		1.3			1.3		mA/ $\mu\text{s}$
<b>SPAN AND ZERO ACCURACY<sup>1</sup></b>							
4 mA Offset Error @ 0 V Input <sup>2</sup>							
Error from 4.000 mA, 4 mA On	0	$\pm 10$	$\pm 20$	0	$\pm 5$	$\pm 10$	$\mu\text{A}$
Error from 0.000 mA, 4 mA Off		+10	+20		+5	+10	$\mu\text{A}$
$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		$\pm 10$	$\pm 40$		$\pm 5$	$\pm 20$	$\mu\text{A}$
vs. Supply (2 V Span/10 V Span)		0.3/0.05	0.8/0.4		0.3/0.05	0.8/0.4	$\mu\text{A}/\text{V}$
Trim Range, 4 mA Zero	2.0		4.8	2.0		4.8	mA
Span							
Nominal Transfer Function							
Input FS = 2 V		8.0			8.0		mA/V
Input FS = 10 V		1.6			1.6		mA/V
Transfer Function Error from Nom,							
Input FS = 2 V, 10 V		$\pm 0.1$	$\pm 0.3$		$\pm 0.05$	$\pm 0.15$	% of Span
$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$		$\pm 0.002$	$\pm 0.005$		$\pm 0.001$	$\pm 0.0025$	% of Span/°C
vs. Supply		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$	% of Span/V
Nonlinearity <sup>3</sup>		$\pm 0.005$	$\pm 0.015$		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$	% of Span
4 mA On: Max Pin 9 Voltage			0.8			0.8	V
4 mA Off: Min Pin 9 Voltage	3.0	2.5		3.0	2.5		V
<b>VOLTAGE REFERENCE</b>							
Output Voltage: 10 V Reference	9.960	10.000	10.040	9.980	10.000	10.020	V
Output Voltage: 2 V Reference	1.992	2.000	2.008	1.996	2.000	2.004	V
$T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$ <sup>4</sup>		30	50		20	30	ppm/°C
vs. Load, $V_{\text{REF}} = 2 \text{ V}$ , 10 V		0.15	0.50		0.15	0.50	mV/mA
vs. Supply, $V_{\text{REF}} = 2 \text{ V}$ , 10 V		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$	%/V
Output Current							
Source	5			5			mA
Sink		0.2			0.2		mA
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>							
$V_{\text{CE(SAT)}} @ 2.5 \text{ mA}$		0.35			0.35		V
Leakage Current			$\pm 1$			$\pm 1$	$\mu\text{A}$
Alarm Pin Current (Pin 10)		20			20		mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>							
Specified Performance		24			24		V
Operating Range							
2 V FS, $V_{\text{REF}} = 2 \text{ V}$	4.5		36	4.5		36	V
2 V, 10 V FS, $V_{\text{REF}} = 2 \text{ V}$ , 10 V	12.5		36	12.5		36	V
Quiescent Current, 4 mA Off		1.5	2.0		1.5	2.0	mA
<b>TEMPERATURE RANGE</b>							
Specified Performance <sup>5</sup>	AD694AQ/BQ/AR/BR	-40	+85	-40	+85		°C
	AD694JN	0	+70	0	+70		°C
Operating	AD694AQ/BQ/AR/BR	-55	+125	-55	+125		°C
	AD694JN	-40	+85	-40	+85		°C

Model	AD694JN/AQ/AR			AD694BQ/BR			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>BUFFER AMPLIFIER<sup>6</sup></b>							
Input Offset Voltage							
Initial Offset		±150	±500		±50	±500	μV
T <sub>MIN</sub> to T <sub>MAX</sub>		±2	±3		±2	±3	μV/°C
vs. Supply	80	90		80	90		dB
vs. Common Mode	80	90		80	90		dB
Trim Range	±2.5	±4.0		±2.5	±4.0		mV
Frequency Response							
Unity Gain, Small Signal		300			300		kHz
Input Voltage Noise (0.1 Hz to 10 Hz)		2			2		μV p-p
Open-Loop Gain							
V <sub>O</sub> = +10 V, R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ		50			50		V/mV
Output Voltage @ Pin 1, FB <sup>1</sup>							
Minimum Output Voltage		1.0	10		1.0	10	mV
Maximum Output Voltage	V <sub>S</sub> -2.5 V	V <sub>S</sub> -2 V		V <sub>S</sub> -2.5 V	V <sub>S</sub> -2 V		V

## NOTES

<sup>1</sup>The single supply op amps of the AD694, lacking pull down current, may not reach 0.000 V at their outputs. For this reason, span, offset, and nonlinearity are specified with the input amplifiers operating in their linear range. The input voltage used for the tests is 5 mV to 2 V and 5 mV to 10 V for the two precalibrated input ranges. Span and zero accuracy are tested with the buffer amplifier configured as a follower.

<sup>2</sup>Offset at 4 mA out and 0 mA out are extrapolated to 0.000 V input from measurements made at 5 mV and at full scale. See Note 1.

<sup>3</sup>Nonlinearity is specified as the maximum deviation of the output, as a % of span, from a straight line drawn through the endpoints of the transfer function.

<sup>4</sup>Voltage reference drift guaranteed by the Box Method. The voltage reference output over temperature will fall inside of a box whose length is determined by the temperature range and whose height is determined by the maximum temperature coefficient multiplied by the temperature span in degrees C.

<sup>5</sup>Devices tested at these temperatures with a pass transistor. Allowable temperature range of operation is dependent upon internal power dissipation. Absolute maximum junction and case temperature should not be exceeded. See section: "Power Dissipation Considerations."

<sup>6</sup>Buffer amplifier specs for reference. Buffer amplifier offset and drift already included in Span and Zero accuracy specs above.

Specifications subject to change without notice.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units.

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	36 V
V <sub>S</sub> to I <sub>OUT</sub>	36 V
Input Voltage, (Either Input Pin 2 or 3)	-0.3 V to +36 V
Reference Short Circuit to Common	Indefinite
Alarm Voltage, Pin 10	36 V
4 mA Adj, Pin 6	1 V
4 mA On/Off, Pin 9	0 V to 36 V
Storage Temperature Range	
AD694Q	-65°C to +150°C
AD694N, R	-65°C to +125°C
Lead Temperature, 10 sec Soldering	300°C
Maximum Junction Temperature	150°C
Maximum Case Temperature	
Plastic Package (N, R)	125°C
Cerdip Package (Q)	125°C

Transistor Count: . . . . . 75 Active Devices  
Substrate Connection: . . . . . to Com, Pin 5

## Thermal Characteristics:

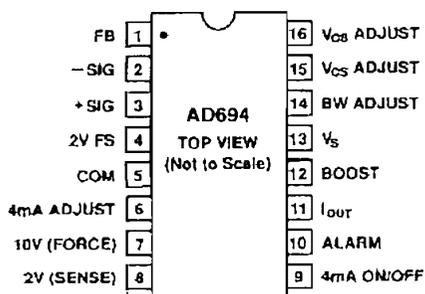
Plastic (N) Package:	θ <sub>JC</sub> = 50°C/Watt
	θ <sub>CA</sub> (Still Air) = 85°C/Watt
Cerdip (Q) Package:	θ <sub>JC</sub> = 30°C/Watt
	θ <sub>CA</sub> (Still Air) = 70°C/Watt
Plastic (R) Package:	θ <sub>JC</sub> = 27°C/Watt
	θ <sub>CA</sub> (Still Air) = 73°C/Watt

## ESD Susceptibility

All pins are rated for a minimum of 4000 V protection, except for Pins 2, 3 and 9 which are rated to survive a minimum of 1500 V. ESD testing conforms to Human Body Model. Always practice ESD prevention.

No pin, other than I<sub>OUT</sub> (11) and ±Sig (2), (3) as noted, may be permitted to become more negative than Com (5). No pin may be permitted to become more positive than V<sub>S</sub> (13).

## PIN CONFIGURATION (N, R, Q PACKAGE)



## ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Package Option*
AD694JN	0°C to 70°C	N-16
AD694AQ	-40°C to +85°C	Q-16
AD694AR	-40°C to +85°C	R-16
AD694BQ	-40°C to +85°C	Q-16
AD694BR	-40°C to +85°C	R-16

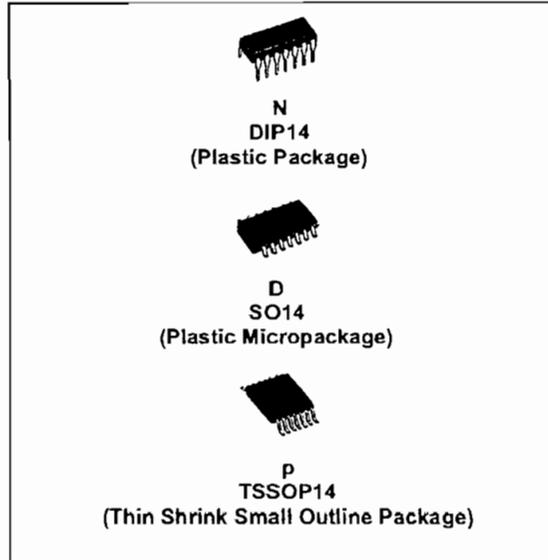
\*N = Plastic DIP; Q = CERDIP, R = SOIC



# TL084 TL084A - TL084B

## GENERAL PURPOSE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $16V/\mu s$  (typ)

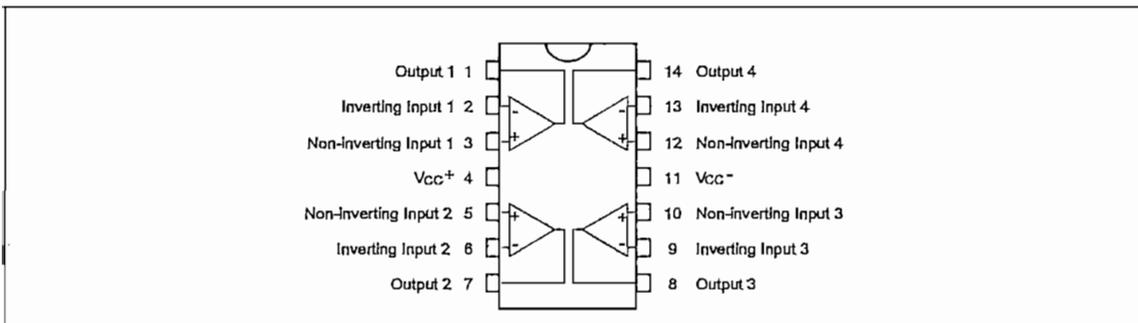


### DESCRIPTION

The TL084, TL084A and TL084B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

### PIN CONNECTIONS (top view)



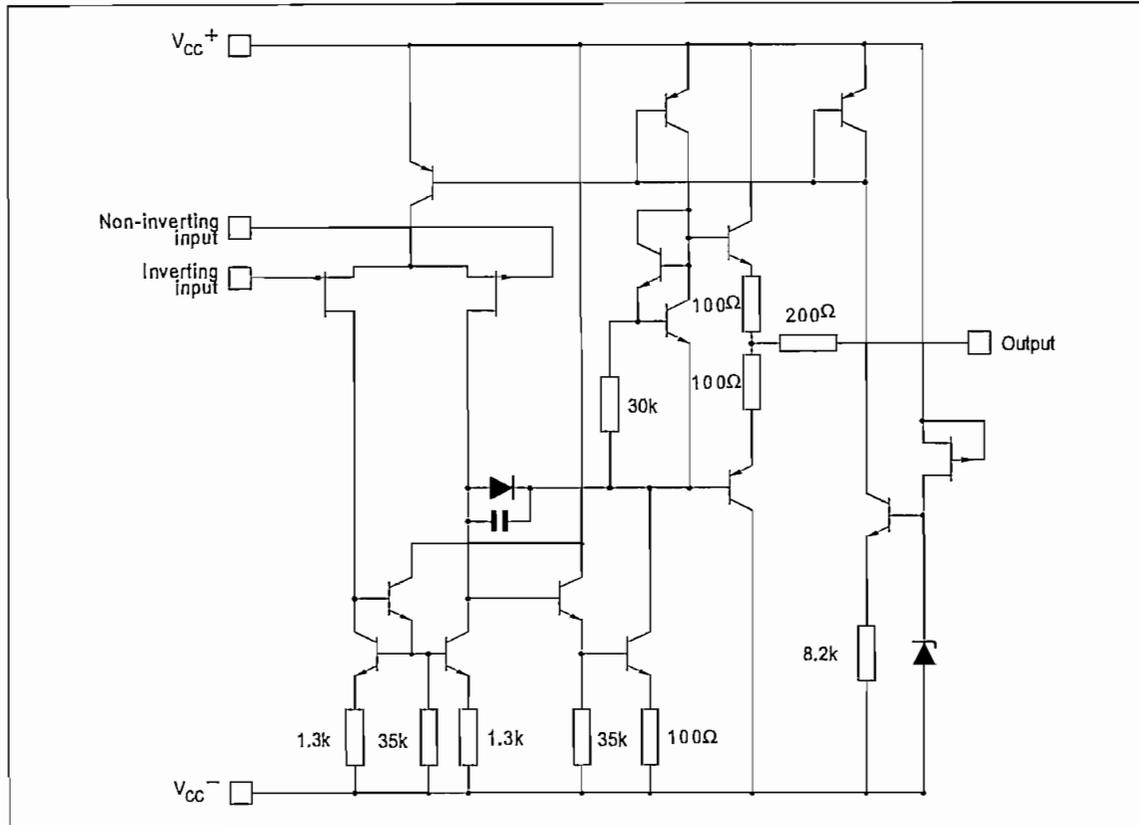
### ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
TL084M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•	•
TL084I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•	•
TL084C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•	•
<b>Example</b> : TL084CN, TL084CD				

N = Dual In Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)  
P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)

# TL084 - TL084A - TL084B

## SCHEMATIC DIAGRAM (each amplifier)



## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	TL084M, AM, BM	TL084I, AI, BI	TL084C, AC, BC	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage - note 1)	$\pm 18$			V
$V_i$	Input Voltage - note 2)	$\pm 15$			V
$V_{id}$	Differential Input Voltage - note 3)	$\pm 30$			V
$P_{tot}$	Power Dissipation	680			mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)	Infinite			
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to +150			$^{\circ}C$

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC}^+$  and  $V_{CC}^-$ .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-Inverting Input terminal with respect to the Inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

V<sub>CC</sub> = ±15V, T<sub>amb</sub> = +25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL084I,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL084C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V <sub>io</sub>	Input Offset Voltage (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		3 3 1	10 6 3 13 7 5		3	10 13	mV
DV <sub>io</sub>	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I <sub>io</sub>	Input Offset Current - note 1) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		5	100 4		5	100 4	ρA nA
I <sub>ib</sub>	Input Bias Current -note 1 T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		20	200 20		20	400 20	ρA nA
A <sub>vd</sub>	Large Signal Voltage Gain (R <sub>L</sub> = 2kΩ, V <sub>o</sub> = ±10V) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>	50 25	200		25 15	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>	80 80	86		70 70	86		dB
I <sub>CC</sub>	Supply Current, no load, per amplifier T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		1.4	2.5 2.5		1.4	2.5 2.5	mA
V <sub>icm</sub>	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 50Ω) T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>	80 80	86		70 70	86		dB
I <sub>os</sub>	Output Short-circuit Current T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>	10 10	40	60 60	10 10	40	60 60	mA
±V <sub>opp</sub>	Output Voltage Swing T <sub>amb</sub> = +25°C T <sub>min</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max</sub>		10 12 10 12	12 13.5		10 12 10 12	12 13.5	V
SR	Slew Rate (T <sub>amb</sub> = +25°C) V <sub>in</sub> = 10V, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, unity gain	8	16		8	16		V/μs
t <sub>r</sub>	Rise Time (T <sub>amb</sub> = +25°C) V <sub>in</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, unity gain		0.1			0.1		μs
K <sub>ov</sub>	Overshoot (T <sub>amb</sub> = +25°C) V <sub>in</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, unity gain		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (T <sub>amb</sub> = +25°C) V <sub>in</sub> = 10mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, f = 100kHz	2.5	4		2.5	4		MHz
R <sub>i</sub>	Input Resistance		10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>		Ω

## TL084 - TL084A - TL084B

Symbol	Parameter	TL084I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL084C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion ( $T_{amb} = +25^{\circ}\text{C}$ ), $f = 1\text{kHz}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$ , $C_L = 100\text{pF}$ , $A_v = 20\text{dB}$ , $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega$ , $f = 1\text{KHz}$		15			15		$\frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
$\phi_m$	Phase Margin		45			45		degrees
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel Separation $A_v = 100$		120			120		dB

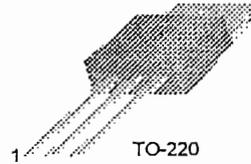
1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every  $10^{\circ}\text{C}$  increase in the junction temperature.

## TIP110/111/112

TIP110/111/112

### Monolithic Construction With Built In Base-Emitter Shunt Resistors

- Complementary to TIP115/116/117
- High DC Current Gain :  $h_{FE}=1000$  @  $V_{CE}=4V, I_C=1A$ (Min.)
- Low Collector-Emitter Saturation Voltage
- Industrial Use



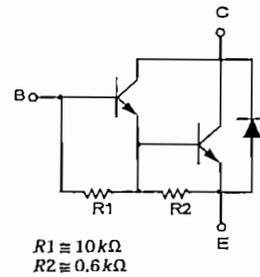
1.Base 2.Collector 3.Emitter

### NPN Epitaxial Silicon Darlington Transistor

#### Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage : TIP110	60	V
	: TIP111	80	V
	: TIP112	100	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage : TIP110	60	V
	: TIP111	80	V
	: TIP112	100	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	5	V
$I_C$	Collector Current (DC)	2	A
$I_{CP}$	Collector Current (Pulse)	4	A
$I_B$	Base Current (DC)	50	mA
$P_C$	Collector Dissipation ( $T_a=25^\circ C$ )	2	W
	Collector Dissipation ( $T_C=25^\circ C$ )	50	W
$T_J$	Junction Temperature	150	$^\circ C$
$T_{STG}$	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ C$

Equivalent Circuit



#### Electrical Characteristics $T_C=25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage	$I_C = 30mA, I_B = 0$	60		V
	: TIP110				
	: TIP111				
$I_{CEO}$	Collector Cut-off Current	$V_{CE} = 30V, I_B = 0$ $V_{CE} = 40V, I_B = 0$ $V_{CE} = 50V, I_B = 0$		2	mA
	: TIP110				
	: TIP111				
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 60V, I_E = 0$ $V_{CB} = 80V, I_E = 0$ $V_{CB} = 100V, I_E = 0$		1	mA
	: TIP110				
	: TIP111				
$I_{EBO}$	Emitter Cut-off Current	$V_{BE} = 5V, I_C = 0$		2	mA
$h_{FE}$	DC Current Gain	$V_{CE} = 4V, I_C = 1A$ $V_{CE} = 4V, I_C = 2A$	1000		
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 2A, I_B = 8mA$		2.5	V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = 4V, I_C = 2A$		2.8	V
$C_{ob}$	Output Capacitance	$V_{CB} = 10V, I_E = 0, f = 0.1MHz$		100	pF