

**SISTEMA PARA MEDIR CARGA DE AGUA Y ESTIMAR CAUDAL USANDO
VERTEDEROS DE CRESTA DELGADA**

**AZAEEL SÁNCHEZ VIDAL
CARLOS ALFREDO NARVÁEZ LEDESMA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director
VÍCTOR HUGO MOSQUERA
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE CONTROL
POPAYÁN
2005**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Popayán, 11 de Febrero de 2005

DEDICATORIA

De todo corazón agradezco al Todopoderoso, y dedico enteramente este logro a mi madre, a mi padre que hoy más que nunca pesa su ausencia, a mis hermanos y en especial a mi esposa y a ese angelito que la vida me regalo, gracias por haberme brindado su incondicional apoyo sin el cual hubiese sido imposible llegar hasta aquí.

Atentamente:

CARLOS ALFREDO NARVAEZ LEDESMA

Este peldaño lo debe amuchas personas que me tendieron su ayuda desinteresad y siempre fueron una voz de aliento.

A dios le debo todo Gracias a Dios nunca he decaido en mi metas

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos:

- A CARLOS FELIPE RENGIFO, Profesor del Departamento de Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica. A quien debemos en gran parte el norte que nuestra vida tomo, además de servir de apoyo y respaldo sin el cual hubiese sido mas difícil nuestro camino. Gracias por ser un ejemplo y por brindarnos su conocimiento, sabemos que Dios se lo recompensará.
- A VICTOR HUGO MOSQUERA Profesor del Departamento de Control de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Director del proyecto.
- A DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA, Facultad de Ingeniería Civil.
- A Todas las personas que de una u otra forma contribuyeron, para la cristalización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MEDICIÓN DE CAUDAL UTILIZANDO VERTEDEROS.....	16
1.1. TERMINOLOGÍA.....	16
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS.....	17
1.3. VERTEDEROS DE PARED O CRESTA DELGADA.	18
1.3.1. Definición.	18
1.3.2. Ecuación General de Caudal.	18
1.3.3. Vertedero Rectangular sin Contracciones.	20
1.3.4. Vertedero Rectangular con Contracciones.	21
1.3.5. Vertedero Triangular.	22
1.4. PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS DE CRESTA DELGADA.	23
1.4.1. Requisitos Generales de Instalación de Vertederos	24
1.4.2. Proceso de Medición y Patronamiento.	25
2. SENSOR DE CARGA DE AGUA CON ULTRASONIDO	28
2.1. ESQUEMA PARA MEDIR DISTANCIA CON ULTRASONIDO.	29
2.1.1. Transductores de Ultrasonido Piezoeléctricos	30
2.1.2. Acondicionamiento de Señales	36
2.1.3. Detector de Nivel.....	38
2.1.4. Lógica de Control	39
2.1.5. Esquemático del Sensor de Ultrasonido.	57
3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DESARROLLADA.....	58
3.1. ESQUEMA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO	60
3.2. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO.....	62
3.2.1. Modulo de Captura y Monitoreo de Sensores.....	63
3.2.2. Módulo Control de Actuador.	67
3.2.3. Módulo Proceso de Datos.....	68
3.2.4. Módulo Interfases de Usuario.	74
4. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFIA	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Parámetros en un vertedero.	17
Figura 2. Vertedero de pared delgada.	19
Figura 3. Vertedero Rectangular sin Contracciones.	21
Figura 4. Vertedero rectangular con contracciones.	21
Figura 5. Vertedero triangular.	22
Figura 6. Vertedero trapecial	23
Figura 7. Aparato para el estudio de vertederos.	24
Figura 8. Esquema para Medir Distancia con Ultrasonido.	30
Figura 9. Transductor Piezoeléctrico.	32
Figura 10. Diagrama de Bloques del Sistema Ultrasónico.	33
Figura 11. Forma del eco a la salida del receptor.	34
Figura 12. Señal de Emisión.	34
Figura 13. Circuito Transmisor.	36
Figura 14. Circuito Receptor.	37
Figura 15. Detector de Señal.	38
Figura 16. Detector de Nivel	38
Figura 17. Lógica de Control	40

Figura 18.	Esquema General	41
Figura.19.	Compensación por Temperatura	43
Figura 20	Esquema de Automatización	60
Figura 21	Arquitectura Software	63
Figura 22	Diagrama de Flujo Modulo de Captura y Monitoreo de Sensores	64
Figura 23	Diagrama de Flujo Proceso Actuador1	67
Figura 24	Diagrama de Flujo Módulo Proceso de Datos	74
Figura 25	Diagrama de Flujo Proceso de Actualización de Ventanas	75
Figura 26	Ventana Tanque Aquietador y Aforador	76
Figura 27	Ventana Sensores y Variables Físicas	77
Figura 28	Ventana Patronamiento de Vertederos	78
Figura 29	Ventana Configuración y Protocolos de Comunicación	79
Figura 30	Ventana Sistema del Aforo	80

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Ecuaciones para los vertederos más comunes.	24
Tabla 2.	Datos de la práctica.	26
Tabla 3.	Método de los mínimos cuadrados.	27
Tabla 4.	Parámetros de la Señal de Emisión.	36
Tabla 5	Lógica de Sensores	66
Tabla 6	Acciones Evento Inicio Proceso Patronamiento	70
Tabla 7	Condiciones Paso2 Proceso Patronamiento	70
Tabla 8	Descripción de los Pasos 3, 4, 5 y 6 Proceso de Patronamiento	71
Tabla 9	Condiciones Paso7 Proceso Patronamiento	71
Tabla 10	Descripción Pasos 8, 9, 10, 11 y 12 Proceso de Patronamiento	72
Tabla 11	Tipos de Errores Paso15 Proceso de Patronamiento	73
Tabla 12	Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Aforador	76
Tabla 13	Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Sensores.	77
Tabla 14	Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Patronamiento	78
Tabla 15	Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Comunicaciones	79

ANEXOS

ANEXO A. Programa ensamblador del PIC, Sensor de Ultrasonido.

ANEXO B. Código fuente programa de automatización.

ANEXO C. Manual de Usuario.

RESUMEN

El trabajo desarrollado surge del proyecto de investigación “Diseño y construcción de un sistema para la automatización del proceso de medición de carga de agua y caudal usando vertederos de cresta delgada” orientado al área de instrumentación, que entre sus objetivos trazados estaba el de diseñar un sensor para medir el nivel de agua en canales regulares abiertos, usando la tecnología del ultrasonido además de diseñar el software de monitoreo.

La información que se consigna en esta monografía detalla en forma secuencial el proceso seguido para desarrollar el sensor de ultrasonido y la solución software capaz de automatizar la práctica de vertederos, realizada en el laboratorio de Hidráulica de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca. También se hace referencia a teoría básica de vertederos.

El proceso que se lleva a cabo para el diseño del sensor de ultrasonido, se basa en la medición de la distancia que hay entre el transductor y el nivel de agua, para lo cual se determina el tiempo transcurrido entre la señal transmitida y el eco reflejado.

Este sistema está compuesto por: una primera etapa en la cual se tiene el par transmisor receptor de ultrasonido, la segunda y tercera etapa son las de acondicionamiento de señales y detector de nivel en la cuales se generan, amplifica y detecta la onda ultrasónica, para la cuarta y ultima etapa se tiene integrado la lógica de control, la compensación por temperatura y la comunicación con un computador. En esta parte un PIC 16F873A es la pieza principal, ya que es el encargado de generar las repeticiones de onda cuadrada capaces de excitar el transductor de ultrasonido y también de medir el tiempo que tarde en retornar la onda después de reflejarse con la columna de agua. Además este dispositivo sirve de puente de comunicación para enviar la información de tiempo y temperatura hacia el computador para que el software la procese. También manipula el estado de una válvula de desagüe atendiendo la solicitud del usuario o el programa de automatización y monitorea dos puntos de referencia de nivel de agua.

El software de automatización se basa en los pasos que se siguen en la práctica de laboratorio, logrando deducir las ecuaciones de caudal mediante los métodos aplicados para este fin.

Cabe destacar que aunque no era parte de los objetivos trazados inicialmente se adicionó: dos sensores de nivel para puntos de referencia y una válvula de desagüe con su hardware de control, todo esto para evitar al máximo la intervención humana en el proceso de aforamiento de caudales.

INTRODUCCIÓN

El objetivo fundamental del presente trabajo constituye en realizar la automatización de la práctica de vertederos de cresta delgada, que realizan los estudiantes de la asignatura de hidráulica de la facultad de Ingeniería Civil, se presenta a continuación la información detallada sobre el desarrollo del proyecto “Sistema para Medir Carga de Agua y Estimar Caudal Usando Vertederos de Cresta Delgada”.

Cabe destacar que el trabajo desarrollado toma como referencia el proyecto de investigación titulado “Diseño y Construcción de un Sistema para la Automatización del Proceso de Medición de Carga de Agua y Caudal Usando Vertederos de Cresta Delgada”. Estos trabajos propuestos por el Departamento de Electrónica Instrumentación y Control de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, forman parte del desarrollo en áreas de control e instrumentación.

En el trabajo de investigación se cumplieron con los objetivos de: construir un sensor de ultrasonido para medir la carga de agua y generar un software de monitoreo de caudales en canales abiertos, basándose en estudios previos de aforamiento entregados por el departamento de hidráulica de la facultad de

Ingeniería civil. Retomando este trabajo se perfeccionó el diseño del sensor de ultrasonido y se generó un software de automatización para la práctica de vertederos de cresta delgada realizada por los estudiantes en el laboratorio de hidráulica.

El desarrollo de este proyecto se dividió en tres fases consignadas en tres capítulos de este escrito y un cuarto capítulo en el que se mencionan algunas conclusiones, recomendaciones y alternativas para mejorar aún más el sistema.

Inicialmente se desarrolló un trabajo de investigación y capacitación en los temas relacionados con la medición de caudal utilizando vertederos de cresta delgada, además se indagó sobre la práctica desarrollada en laboratorio, para tomar de esta manera los requerimientos necesarios para desarrollar la solución hardware y software de automatización objeto de este proyecto. En el primer capítulo se detallan las diferentes formas de vertederos y la matemática que rige su funcionamiento, con la cual es posible inferir el cálculo de caudal en canales abiertos utilizando este tipo de dispositivos hidráulicos. Se describe también la forma como se lleva a cabo el aforamiento de caudal en el laboratorio, práctica esta que permite obtener los parámetros adecuados para las ecuaciones características de cada vertedero.

En el segundo capítulo se logró perfeccionar el funcionamiento del sensor de ultrasonido realizado en el trabajo de investigación antes mencionado. La idea era volverlo más robusto y calibrarlo para la labor requerida, obteniendo con esto una herramienta muy útil para medir carga de agua. Este dispositivo basado en un microcontrolador 16F873A el cual bajo un sistema tradicional de medición necesita

una primera etapa de transmisión y recepción compuesta por dos o más transductores. Se utilizaron los traductores de ultrasonido de la marca muRata referencia 40A5 que trabajan a un frecuencia de 40Khz. Se hizo un estudio de forma empírica en el laboratorio hasta obtener las características adecuadas de funcionamiento de estos transductores, en cuanto a: voltaje de alimentación, separación entre lóbulos para transmisor-receptor y el número de pulsos necesarios para lograr la mejor transformación de energía eléctrica en onda mecánica. Una segunda etapa se encarga del acondicionamiento de señales tanto para transmisión como para recepción, en recepción se amplifica y filtra la señal, en transmisión un circuito tiene la función de excitar el transductor para generar la onda. Una tercera etapa lleva acabo la detección de nivel, que no es más que un circuito comparador de voltaje y por último la etapa lógica de control y medición que se encarga de generar la señal de disparo y de procesar la información de tiempo de vuelo y temperatura. Esta última etapa contiene el microcontrolador 16F873A que es el encargado de la lógica de control y sirve de interfaz para enviar información al software desarrollado para la automatización de la práctica de vertederos.

El tercer capítulo desarrollado en este proyecto describe la solución planteada para la automatización de la práctica de laboratorio y el software necesario para este fin. Este software desarrollado con una herramienta de entorno visual de grandes prestaciones hacia los periféricos, ofrece la velocidad adecuada para interactuar con el sistema hardware de monitoreo, una interfaz amigable e intuitiva para un fácil manejo, incluye animaciones sobre el entorno de trabajo que permiten familiarizarse con la práctica en el laboratorio. Este entorno de desarrollo proporcionado por la National Instrumen llamado CVI esta creado para procesos de automatización razón

por la cual fue escogido en este proyecto, además el lenguaje de programación base es C.

El software se encarga de recibir la información desde el puerto RS232 que envía el sistema de monitoreo, la procesa y la convierte en niveles de carga de agua. El Software permite también mediante proceso llamado aforamiento y el método de mínimos cuadrados obtener los parámetros adecuados para la ecuación característica del tipo de vertedero en estudio. Todo el proceso de la práctica queda entonces automatizado y el objetivo de calcular caudal a partir de la medición de carga de agua utilizando vertederos de cresta delgada queda implementado con un mínimo de intervención humana. Este software ofrece también generación de reportes y un sistema de comprobación para inspeccionar el correcto funcionamiento del hardware que intervine en el proceso.

Con la presente monografía, se pretende dejar una síntesis del trabajo desarrollado y las experiencias adquiridas durante su ejecución. Con el objeto de que las personas en un futuro trabajo con proyectos relacionados con técnicas de ultrasonido cuente con una documentación relativamente amplia y de fácil comprensión.

1. MEDICIÓN DE CAUDAL UTILIZANDO VERTEDEROS

Es posible medir caudal $Q(m^3 / Seg)$ utilizando vertederos, entendiéndose, caudal o descarga, en una determinada sección, al volumen de líquido que atraviesa esta sección en la unidad de tiempo. Los vertederos son estructuras hidráulicas que obstruyen el fluido, ubicadas sobre el fondo de un canal. El método para determinar el caudal que pasa por un vertedero, implica conocer la geometría de la estructura y variables hidráulicas como la carga de agua y la velocidad de aproximación. Los vertederos son utilizados de forma intensiva en: control de nivel en embalses o canales, derivación de aguas y también, son estructuras que permiten el aforo de caudales. El patronamiento del vertedero lleva a determinar la ecuación característica o curva en la cual el caudal es función de una única variable h que es la altura del agua pasando por la estructura, también llamada carga hidráulica sobre la cresta.

1.1. TERMINOLOGÍA.

Es necesario establecer la terminología adecuada en el estudio de los vertederos. El borde horizontal se denomina cresta o umbral (Figura 1), los bordes verticales constituyen las caras del vertedero, la carga del vertedero h es la altura alcanzada por el agua, medida a partir de la cresta. Debido a la aceleración del flujo sobre el

vertedero, la carga h debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximada de $3h$.

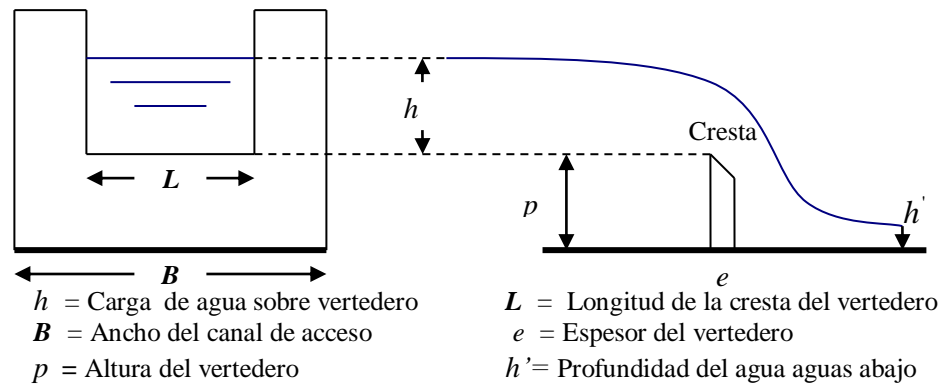


Figura 1. Parámetros en un vertedero.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS.

Existen las más variadas formas y disposiciones, además los vertederos presentan diversos comportamientos: Por estas razones son muchos los factores que sirven de base para su clasificación.

I. Forma:

- a) Simples: rectangulares, trapezoidales, triangulares, etc.
- b) Compuestos: sección combinada.

II. Altura relativa del umbral:

- a) Vertederos: completos o libres: ($p > h'$);
- b) Vertederos: incompletos o ahogados: ($p < h'$);

III. Espesor de la pared :

- a) Vertederos de pared delgada: placas biseladas.

b) Vertederos de pared gruesa: ($e > 0.66 h$).

IV. Longitud de la cresta:

a) Vertedero sin contracciones laterales ($L = B$).

b) Vertedero con contracciones laterales ($L < B$).

1.3. VERTEDEROS DE PARED O CRESTA DELGADA.

De las diferentes clasificaciones, es de particular interés estudiar los vertederos de cresta delgada. Estos tipos de vertederos son los más usados, especialmente como aforadores. Estas estructuras de construcción e instalación muy sencilla debidamente calibradas o patronadas son base de un buen método de estimación de caudal.

1.3.1. Definición.

Un vertedero de cresta delgada es esencialmente una lámina plana colocada en un canal de tal manera que el fluido debe pasar sobre ella y caer aguas abajo de la placa vertedora, como se muestra en la Figura 2. La forma específica del área de flujo pasando sobre la placa vertedora se usa para determinar el tipo de vertedero. Las formas típicas de los vertederos incluyen secciones triangulares, trapezoidales, rectangulares, parabólicas, entre otros.

1.3.2. Ecuación General de Caudal.

Se considera un vertedero de pared delgada y sección geométrica, como se observa en la Figura 2 cuya cresta se encuentra a una altura p , medida desde la

base del canal de alimentación. La distancia h es la parte donde la superficie del agua no ha sufrido depresión y la velocidad uniforme de llegada del agua es V_0 de tal modo que:

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g} \quad (1.1)$$

Si p es muy grande, $V_0^2/2g$ es despreciable y $H = h$.

Según la Figura 2.b, se puede representar el perfil de las formas geométricas usuales de los vertederos de pared delgada por la ecuación general:

$$x = f(y) \quad (1.2)$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 0 y 1 de la Figura 2.a, que establece que "A lo largo de cualquier línea de corriente las altura cinéticas $V_0^2/2g$ y potenciales permanecen constantes", esto en líquidos perfectos, se tiene:

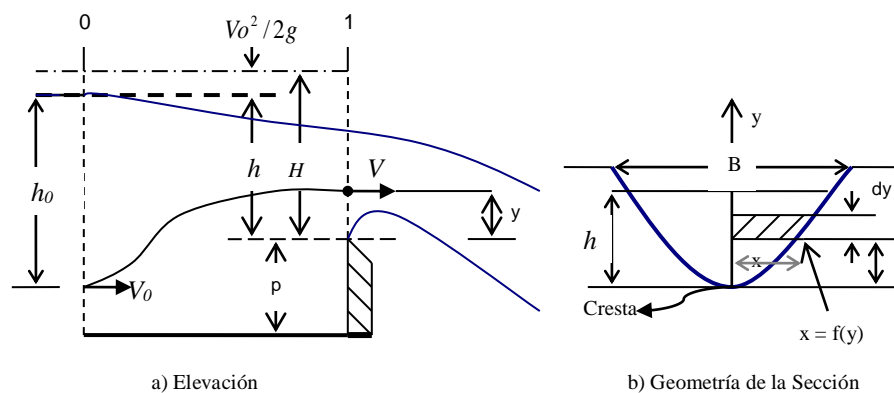


Figura 2. Vertedero de pared delgada.

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_0 - h + y + \frac{V^2}{2g}$$

O bien

$$H = h + \frac{V_0^2}{2g} = y + \frac{V^2}{2g} \quad (1.3a)$$

Si $V_0^2/2g$ es despreciable, la velocidad en cualquier punto de la sección 1 vale

$$V = \sqrt{2g(h-y)} \quad (1.3b)$$

El caudal a través del área elemental, de la Figura1-2b, es:

$$dQ = 2\sqrt{2g}C_d x \sqrt{h-y} dy$$

Donde C_d o coeficiente de descarga considera el efecto de contracción de la lámina vertiente, debe ser obtenido experimentalmente y es aproximado a 0.60 que corresponde a un orificio de pared delgada. El caudal total es:

$$Q = 2\sqrt{2g}C_d \int x(h-y)^{1/2} dy \quad (1.4)$$

Esta ecuación general de caudal para un vertedero de pared delgada, se puede integrar si se conoce la forma de la estructura.

Según análisis teórico y matemático, las expresiones generales de caudal toman formas particulares, de acuerdo al tipo de vertederos y condiciones de funcionamiento, las formas más utilizadas si $C_d = 1$ son:

1.3.3. Vertedero Rectangular sin Contracciones.

Para este tipo de vertedero la ecuación (1.2) es del tipo $x = L/2$ donde L es la longitud de la cresta Figura 3.

Luego la ecuación (1.4) queda así:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H^{3/2} \quad (1.5)$$

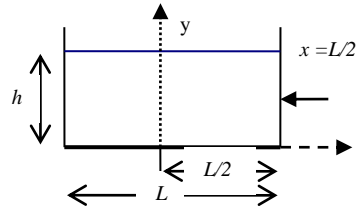


Figura 3. Vertedero Rectangular sin Contracciones.

Donde: (L) es la longitud de la cresta, (g) la aceleración de la gravedad y (C_d) el coeficiente de descarga.

1.3.4. Vertedero Rectangular con Contracciones.

Cuando la longitud de la cresta del vertedero, es menor que el ancho B del canal en el cual se instala, la lámina vertiente sufre una contracción.

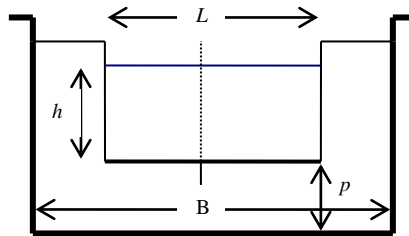


Figura 4. Vertedero rectangular con contracciones.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L' h^{3/2} \quad (1.6)$$

Siendo: (L') el ancho del chorro al pasar por la cresta del vertedero. Este ancho efectivo del chorro se puede calcular por la ecuación teórica siguiente:

$$L' = L - n(0.1H)$$

Donde (n) es el número de contracciones laterales.

Para el patronamiento de este tipo de vertederos, el efecto de las contracciones laterales se puede incluir en el coeficiente C_d y usar la misma ecuación (1.6) o sea:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d (1) L h^{3/2} + \frac{8}{15} C_d (2) \tan \frac{\theta}{2} h^{5/2} \quad (1.9)$$

A su vez:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L h^{3/2} \quad (1.10)$$

Donde: (C_d) es el coeficiente de descarga que se encuentre experimentalmente.

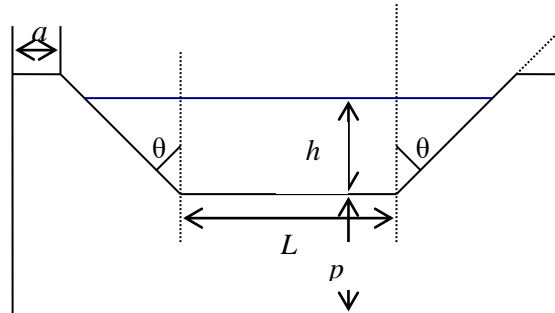


Figura 6. Vertedero trapecial

1.4. PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS DE CRESTA DELGADA.

El patronamiento determina la ecuación característica o curva en la cual el caudal es función de una única variable h , que es la carga hidráulica sobre la cresta. La forma general de expresar el caudal real que pasa por un vertedero cualquiera es la siguiente:

$$Q = Kh^m \quad (1.11)$$

Para la cual:

Q : Es el caudal de descarga a través del vertedero.

K : Constante característica del vertedero o de patronamiento.

h : La carga hidráulica sobre la cresta y (m) su exponente.

- El vertedero deberá ubicarse en canales de sección uniforme y alineamiento recto aguas arriba, en una longitud mayor de $20H$.
- El vertedero debe instalarse normalmente al flujo y la cresta debe estar perfectamente lisa y nivelada.
- La lectura de la carga h sobre la cresta se mide con un sensor, regla graduada o limnómetro ubicado por lo menos a una distancia 3.5 veces la carga máxima hacia aguas arriba.
- Para asegurar su funcionamiento con descarga libre, debe instalarse un dispositivo de ventilación que comunique la cara aguas abajo del vertedero con la atmósfera.
- Si la instalación del vertedero es permanente, debe dejarse un dispositivo de drenaje para evacuar los sedimentos depositados.
- Se recomienda que la cresta sea de material resistente a la corrosión como bronce, acero, plástico y con la arista viva.

1.4.2. Proceso de Medición y Patronamiento.

- Determinar las características geométricas del vertedero que se va a ensayar.
- Instalar convenientemente el vertedero de ensayo.
- Hacer circular un caudal lo más pequeño posible y observar el comportamiento del chorro.
- Una vez que se establezca el flujo, aforar el caudal y medir la carga h correspondiente. Aforar es establecer el caudal volumétricamente en el tanque aforador (Figura 7).
- Aumentar el caudal y repetir los pasos (d) y (e) para varios caudales caudales.
- Anotar los resultados en la Tabla 2.

Empleando la ecuación general (1.11) y el método de los mínimos cuadrados:

- A partir de los valores (Q, h) obtenidos, calcular las constantes K y m .
- Con los valores obtenidos para K y m defina la ecuación de patronamiento experimental.
- A partir del valor de K obtenido y su ecuación correspondiente para el tipo de vertedero usado, calcule el C_d .
- Anotar los resultados Tabla 3.
- Definir la ecuación de patronamiento.
- Luego de obtener la ecuación de patronamiento del vertedero de ensayo, el caudal es calculado remplazando en la ecuación el valor medido de h sobre el canal.

Tabla 2. Datos de la práctica.

N	CAUDAL REAL $Q(m^3 / Seg)$	CARGA DE AGUA h $(cm.)$	ESQUEMA Y DIMENSIONES DEL VERTEDERO ESTUDIADO

Tabla 3. Método de los mínimos cuadrados.²

²Método de los mínimos cuadrados: Método matemática de ajuste y aproximación para múltiples muestras.

2. SENSOR DE CARGA DE AGUA CON ULTRASONIDO

Uno de los objetivos de este proyecto es realizar un sensor que pueda lograr mediciones de distancia, que sirva para calcular la carga de agua en cualquier depósito o canal, debe ser confiable y tener la capacidad de enviar la información a un computador para ser procesada y almacenada. Debe además contar con la ventaja de ser: económico, versátil, de alta resolución y robusto. La alternativa presentada en este documento es la de utilizar el ultrasonido para lograr este fin.

El término ultrasonido hace referencia a una señal acústica cuya frecuencia es superior a la audible, esto quiere decir que no puede ser captada por el oído humano. Es útil para múltiples aplicaciones: en la medicina es ampliamente utilizado como una herramienta de diagnóstico; pero su uso fundamental es para medir distancias. Dependiendo de la aplicación su implementación puede ser de mayor o menor complejidad. La generación de ondas ultrasónicas se remite básicamente a los mismos principios de los materiales piezoeléctricos, convirtiendo la energía mecánica en eléctrica y viceversa. Además el ultrasonido obedece a las mismas leyes básicas del movimiento ondulatorio de las ondas sonoras.

La medición de distancia con ultrasonido se basa en calcular el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica entre el par transmisor-receptor y el objeto.

Al ser el ultrasonido una onda mecánica las condiciones del medio de propagación la afectada directamente. Cuando el medio por donde viaja la onda es el aire, el principal factor a tener en cuenta es la temperatura.

La velocidad de propagación de la onda en el aire a 0° centígrados es de 331.5 m/s y aumenta a razón de 0.6 m/s por grado de temperatura que se incremente. Es por eso que el cálculo de distancia recorrida por la onda de ultrasonido entre el par transmisor-receptor y el objeto obedece a la siguiente ecuación.

$$D = (331.5 \text{ m/s} + 0.6 \text{ m/s} * n) * t \quad (2-1)$$

Donde:

D = Distancia recorrida por la onda de ultrasonido.

n = Temperatura en °C del medio ambiente.

t = Tiempo de vuelo de la onda.

2.1. ESQUEMA PARA MEDIR DISTANCIA CON ULTRASONIDO.

El sistema tradicional de medición contiene: una primera etapa de transmisión y recepción compuesta por dos o más transductores; una segunda etapa se encarga del acondicionamiento de señales tanto para transmisión como para recepción, en recepción se amplifica y filtrar señal, en transmisión un circuito tiene la labor de excitar el transductor para generar la onda; una tercera etapa lleva acabo la detección de nivel, que no es más que un circuito comparador de voltaje; y por último la etapa lógica de control y medición que se encarga de generar la señal de disparo y de procesar la información de tiempo de vuelo y temperatura.

La alternativa presentada aquí, utiliza el método de detección por nivel. Adiciona además dos tapas: una de interfase hacia un computador utilizando el puerto serie RS232 y otra de compensación de velocidad del sonido por temperatura Figura 8.

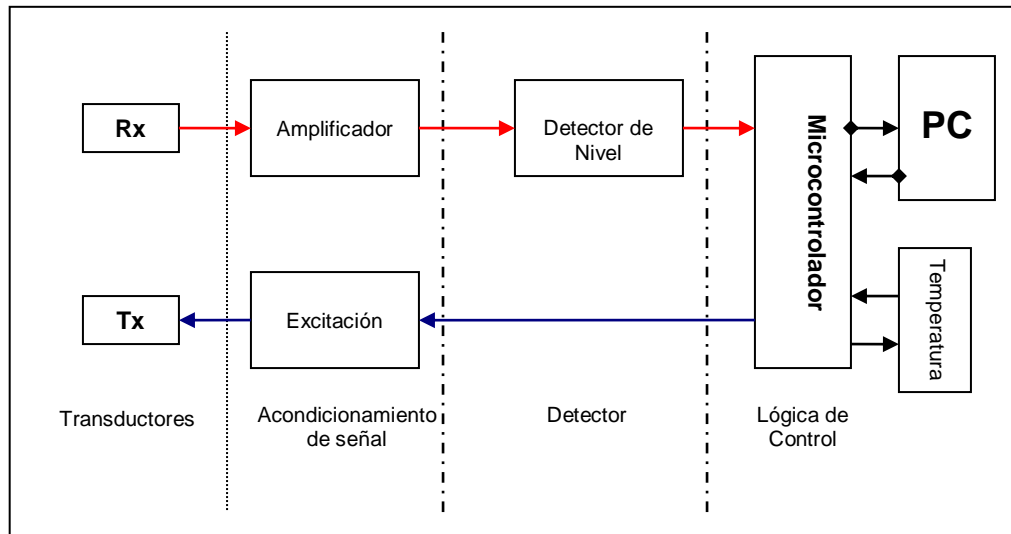


Figura 8. Esquema para Medir Distancia con Ultrasonido

Al utilizar un detector de nivel es difícil medir distancias relativamente grandes. Cuando se fija el umbral para detectar obstáculos a grandes distancias, el ruido presente puede conducir a falsas detecciones. En este proyecto las distancias a medir no son muy grandes, no superan los 30 cm. Es por eso que se adoptó este esquema de trabajo.

A continuación se analizan en detalle los principales bloques funcionales del sistema implementado, tomando como referencia la Figura 8

2.1.1. Transductores de Ultrasonido Piezoeléctricos

Durante mucho tiempo se han utilizado los transductores piezoeléctricos de ultrasonido para medir distancia, se trata de aprovechar al máximo sus

características de conversión electromecánicas. Existen sin embargo dificultades para trabajar con este tipo de dispositivos, surgen de las condiciones físicas de propagación del sonido en el aire. En este medio la señal de eco³ detectada se ve afectada por factores externos.

Algunos de los factores que influyen en una buena detección de las reflexiones ultrasónicas son: la atenuación debida a absorción de la señal al interaccionar la onda con diferentes medios, la dispersión o divergencia del haz puede llegar a confundirse con falsos rebotes espurios o que no se distinga la señal. Se habla también de una zona muerta del transductor⁴, que es el intervalo temporal durante el cual aparece una señal en el receptor debido a condiciones no deseadas, tales como el solapamiento de los lóbulos de emisión y recepción. La zona muerta se extiende desde el momento en que se produce la emisión hasta un instante establecido por los parámetros antes mencionados, los cuales también fijan el nivel sonoro de la misma. Si durante este período se recibe una señal de eco, la misma se mezcla con la señal de zona muerta y dependiendo de los niveles relativos de ambas es probable que no pueda detectarse el eco.

Cuando se utilizan los transductores de ultrasonido para medir distancia es muy importante la relación entre las señales de emisión y el eco. Los parámetros que más influyen en la determinación de dicha distancia son la zona muerta y la atenuación por absorción. La medición de distancias cortas es limitada por la zona muerta, mientras que la atenuación restringe el alcance máximo. Esto dos

³ Eco: hace referencia al viaje de ida y vuelta de la onda de ultrasonido al interponerse un objeto en su camino.

⁴ zona muerta del transductor: Al no estar los transductores de transmisión y recepción en un mismo punto, se presenta interacción entre los lóbulos laterales de transmisor y el receptor, produciendo falsas detecciones o no detección del eco. Entonces se hace necesario separarlos una distancia prudencial. Se llama zona muerta a la zona en la cual no es posible diferenciar o detectar el eco.

parámetros dependen de la cantidad de energía en forma de onda que se transfiere al medio.

Teniendo en cuenta lo expuesto, es necesario ajustar algunos parámetros para el mejor aprovechamiento de los dispositivos piezoeléctricos. Debemos mejorar la transferencia de energía al medio sin sobrepasar las limitaciones estructurales del transmisor y tener en cuenta las distorsiones que produce el medio.

En este desarrollo se eligieron los transductores de la serie MA de muRata, el 40A5 Figura 9, la frecuencia de trabajo es de 40Khz, que es la frecuencia adecuada para la transmisión del ultrasonido cuando el medio de propagación es el aire. Para lograr la máxima eficiencia en este dispositivo se hizo un estudio previo descrito a continuación.

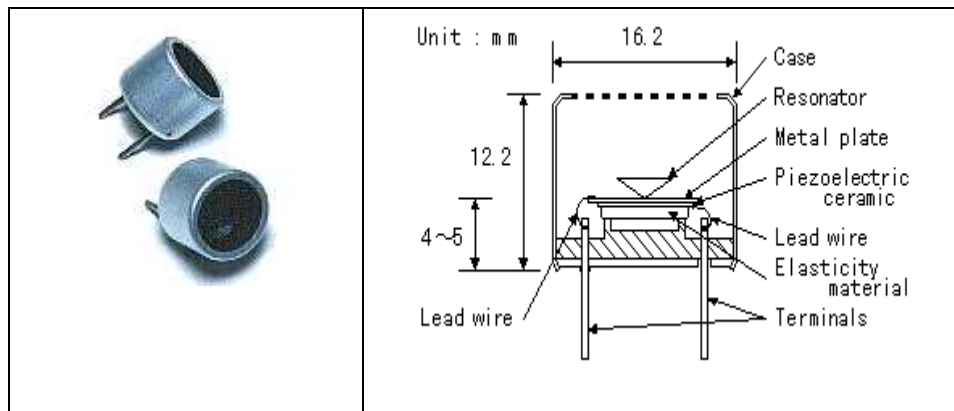


Figura 9. Transductor Piezoeléctrico

Inicialmente se describe como, la generación y acondicionamiento de señales afectan los transductores de ultrasonido, para luego definir los parámetros más adecuados en el diseño del sensor de carga de agua perfeccionado en este proyecto.

- **Descripción General.** El generador de señales suministra a través de la etapa de acondicionamiento, la señal de emisión al transmisor de ultrasonido, el sensor traduce esta excitación de carácter eléctrico en una onda mecánica, la cual se propaga a través del medio. En un rango de distancia de 10cm a 45cm, que corresponde al tanque aquietador del aparato para el estudio de vertederos Figura 7, tenemos la variación de nivel o carga de agua, esta superficie perpendicular a la onda de ultrasonido transmitida actúa como obstáculo provocando una reflexión del haz incidente, el cual invierte su sentido de propagación. De este modo se logra la incidencia sobre el receptor de ultrasonido fijado en paralelo el transmisor.

El receptor convierte la onda mecánica que incide sobre el, en una señal eléctrica denominada señal de eco. Dicha señal se acondiciona y se inyecta en un osciloscopio para su visualización y análisis Figura 10.

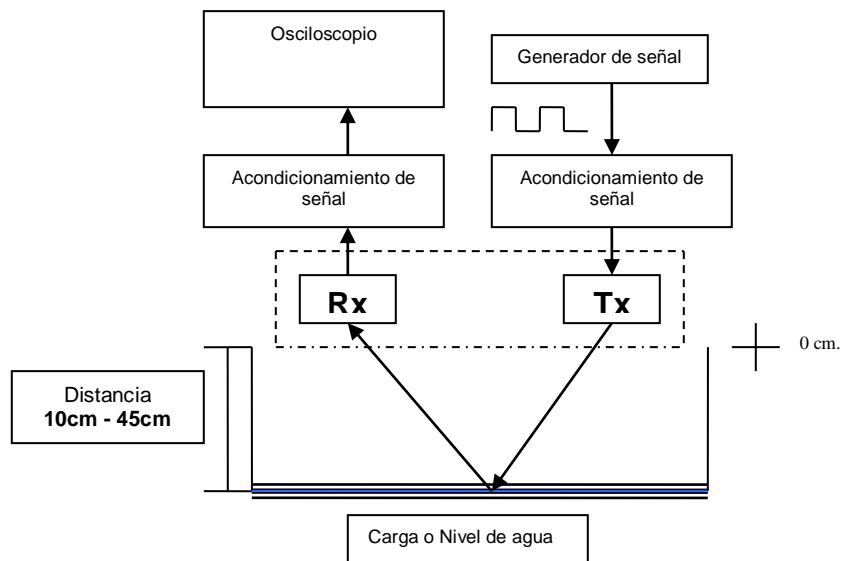


Figura 10. Diagrama de Bloques del Sistema Ultrasónico.

En la Figura 11 se representa la forma que posee la señal de eco visualizada en el osciloscopio debido a una emisión ultrasónica causada por el transmisor.

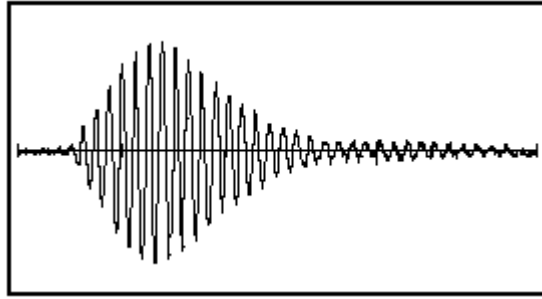


Figura 11. Forma del eco a la salida del receptor.

Teniendo en cuenta la transferencia de energía al medio en relación a la señal de emisión, se adopta como parámetro de control la amplitud máxima de la señal de eco.

- **Señal de Emisión.** La señal de emisión es un tren de pulsos rectangulares como el que se muestra en la figura 12

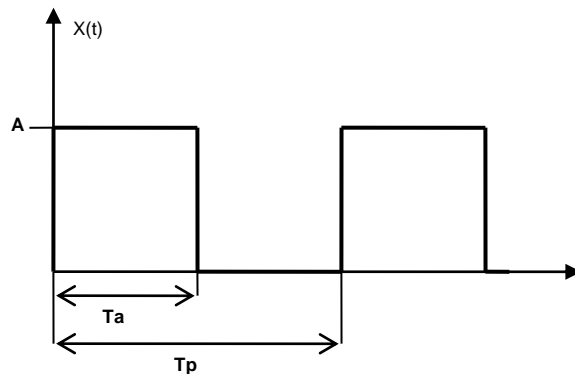


Figura 12. Señal de Emisión.

Siendo:

A : Amplitud de los pulsos.

Ta : Ancho de los pulsos.

Tp : Período de la señal.

P : Cantidad de pulsos.

- **Amplitud.** El aumento en amplitud de la señal de emisión produce un incremento lineal en la amplitud del eco, y debido a limitaciones constructivas del material, el fabricante del sensor limita la máxima amplitud de excitación a 18Vpp.

- **Ancho de Pulso.** El **Ta** o ancho de pulso que maximiza la amplitud del eco, para el modelo de transductor seleccionado es de 12.5μseg, por otro lado la amplitud de la zona muerta no se ve aumentada de forma exagerada con este valor. Esto nos dice que el semiperíodo de oscilación mecánica del transductor coincide con el ancho del pulso. Es decir que si se excita con un pulso y se mantiene hasta que la deformación mecánica del sistema piezoeléctrico llegue a su máximo, para soltarlo en ese instante, el aprovechamiento de la energía suministrada es máximo.

- **Periodo de la señal.** El valor de **Tp** o periodo de la señal adecuado para reforzar la oscilación mecánica de es de 25μseg. Con este periodo la amplitud del eco se ve notablemente incrementada, sin embargo la zona muerta aumenta también proporcionalmente.

- **Cantidad de Pulsos.** Para calcular este parámetro se debe tener en cuenta la distancia que se desea sensar. En el caso particular de este diseño, en el cual el rango de medición es de 10cm a 45cm, se han considerado 10 pulsos, valor que se obtuvo experimentalmente observando el comportamiento de los transductores para esta distancia.

En resumen se tiene:

	Símbolo	Valor
Amplitud de los pulsos	A	15 Voltios pp
Ancho de los pulsos	Ta	12.5 μ seg
Período de la señal	Tp	25 μ seg
Cantidad de pulsos	P	10

Tabla 4. Parámetros de la Señal de Emisión.

2.1.2. Acondicionamiento de Señales

La etapa de acondicionamiento de la señal se divide en dos partes con tareas específicas: una para transmisión y otra para recepción. El circuito de transmisión llamado de excitación, entrega una señal eléctrica adecuada para hacer resonar el transductor, quien la convierte en una onda mecánica que se propaga por el aire. El circuito de recepción amplifica y filtra la señal, haciendo posible su detección.

Una descripción más completa de cada uno de los circuitos y sus componentes es la siguiente:

- Circuito Transmisor

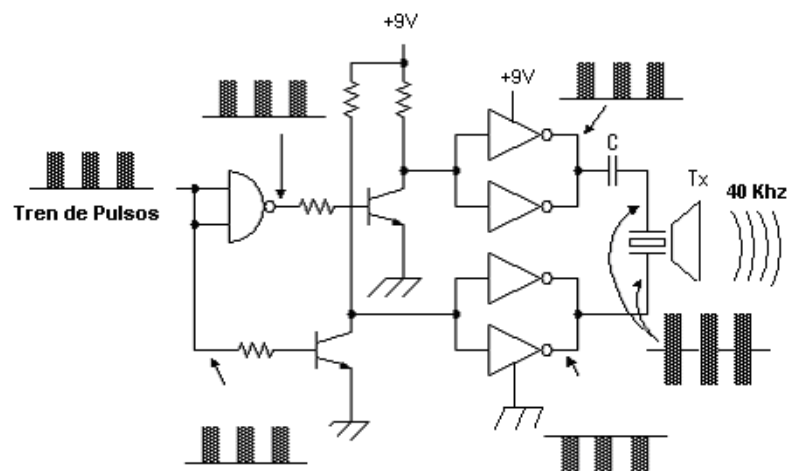


Figura 13. Circuito Transmisor

Los inversores son usados para el manejo del transductor ultrasónico. Las dos entradas inversoras son conectadas en paralelo debido al incremento de potencia necesaria en el trasmisor 18Vpp. La fase con la cual el voltaje es aplicado al terminal negativo y al terminal positivo ha sido invertida 180 grados. A causa de que la corriente continua es cortocircuitada por el capacitor, el voltaje del inversor de salida es aplicado aproximadamente dos veces al sensor.

El suministro de voltaje de este manejador es de 9V. Esta es la conversión de voltaje con la cual se hace control al voltaje con que opera el PIC (5V). Como son usados inversores C-MOS es posible hacer un ON/OFF relativamente a alta velocidad.

- Circuito Receptor

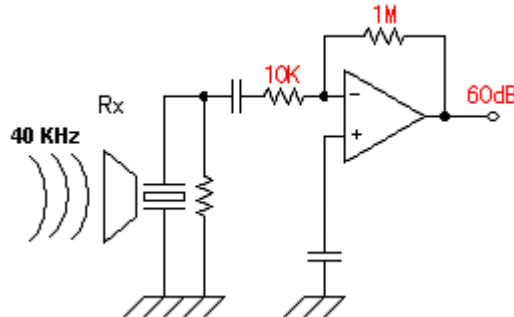


Figura 14. Circuito Receptor

El voltaje de la señal de ultrasonido captada por el transductor de recepción es amplificada 1000 veces (60dB) por medio del amplificador operacional. Cuando se usa el amplificador operacional con realimentación negativa, el voltaje del terminal de entrada positivo y el voltaje del terminal de entrada negativo llegan a ser aproximadamente iguales. Esto es llamado conexión virtual a tierra. De esta manera, la parte negativa y la parte positiva de la señal de corriente alterna puede ser amplificada por igual.

- Filtro de Señal.

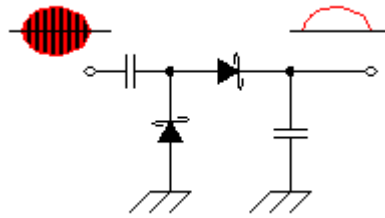


Figura 15. Detector de Señal

La detección es efectuada al recibir la señal de ultrasonido. Esta es rectificada por el circuito de media onda con los diodos Shottky de barrera. El voltaje DC según el nivel de detección de la señal es resultado de la salida del capacitor antes del diodo. El diodo Shottky de barrera es usado por sus buenas características al trabajar en altas frecuencias.

2.1.3. Detector de Nivel

La señal proveniente del receptor, una vez amplificada, ingresa al circuito de detección de nivel, quien la procesa, obteniendo a la salida una señal digital.

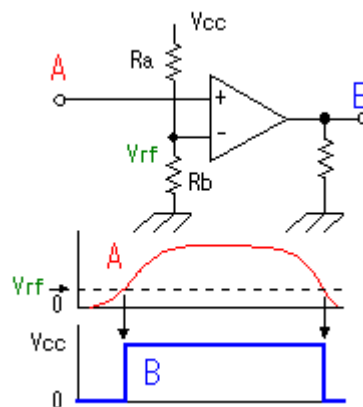


Figura 16. Detector de Nivel

Este es el circuito ubicado a la salida del Filtro, detecta el eco de la señal de ultrasonido cuando retorna desde el objeto a medir. En esta oportunidad el amplificador operacional de única señal de alimentación sin realimentación negativa se comporta como un comparador de voltaje. En el caso de los amplificadores

operacionales que no tienen realimentación negativa. Si el valor de voltaje aplicado al terminal positivo es mayor que el voltaje aplicado al terminal negativo se obtiene saturación positiva, en caso contrario se da la saturación negativa. Entonces cuando el valor de referencia V_{rf} , es mayor que la señal que proviene del Filtro, el amplificador operacional coloca en la salida un nivel alto, si es V_{rf} es menor coloca un nivel bajo.

El valor de referencia será entonces una constante, calculada de esta forma:

$$V_{rf} = \frac{(R_b * V_{cc})}{(R_a + R_b)}$$

Tomando V_{cc} como 9 voltios, la resistencia R_b igual a $47K\Omega$ y la resistencia R_a $1M\Omega$.

El voltaje V_{rf} es de 0.4 voltios.

De esta manera cuando la señal de eco supere los 0.4 voltios la salida del detector de señales pasa a un nivel alto, aproximadamente 9 voltios. Esta salida es disminuida con un arreglo resistencias, ajustando la señal a niveles TTL de 0 voltios a 5 voltios.

2.1.4. Lógica de Control

La figura 17, muestra la lógica de control, donde el componente principal es un PIC 16F873A con las siguientes funciones: genera los ciclos de repetición de onda cuadrada de 40KHz necesarios para excitar el transductor de transmisión; mediante una interrupción causada por la señal en el detector de nivel detiene el conteo de tiempo de vuelo de la señal de ultrasonido; toma la señal del sensor de temperatura la digitaliza y por último envía hacia un computador utilizando el puerto RS232 los registros de tiempo de vuelo y la conversión de temperatura. Además sirve de

puente para: activar o desactivar válvulas tipo ON/OFF y sensar presencia o ausencia de nivel en tanques. Todo esto como consecuencia de la propuesta o esquema de automatización sugerida e implementada en este documento. La figura 17 muestra el esquema básico.

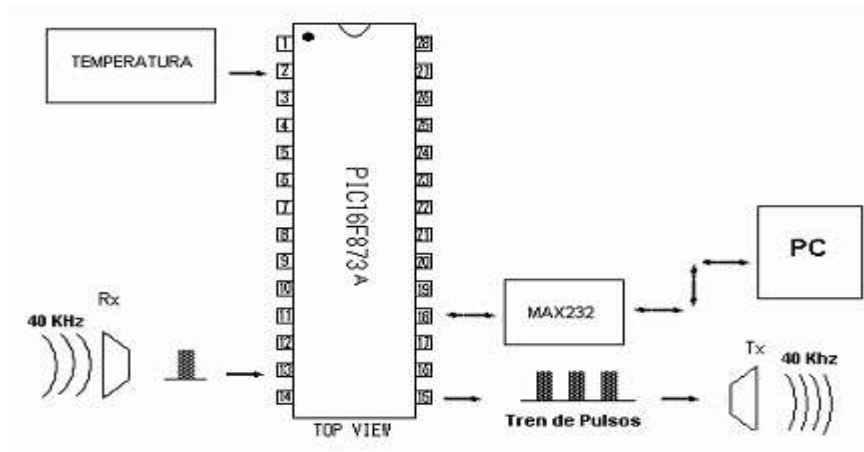


Figura 17. Lógica de Control

Se detallan a continuación los pasos que realiza la lógica de control para lograr una medición de distancia utilizando el PIC 16F873A y un computador personal.

• Esquema General

La operación descrita en el siguiente gráfico se hace de forma repetida y en paralelo con la transmisión hacia un computador de los siguientes registros: un byte de inicio de trama, dos bytes para tiempo de vuelo y dos bytes que representan la temperatura, además un byte que representa los niveles de referencia y el estado de la válvula. Es en el PC mediante un software es donde se calcula la distancia al objeto y se activa o desactiva la válvula dependiendo del nivel de referencia. El valor de distancia es compensado por el valor de temperatura ambiente. En nuestro caso el objeto a detectar es la superficie de la columna de agua.

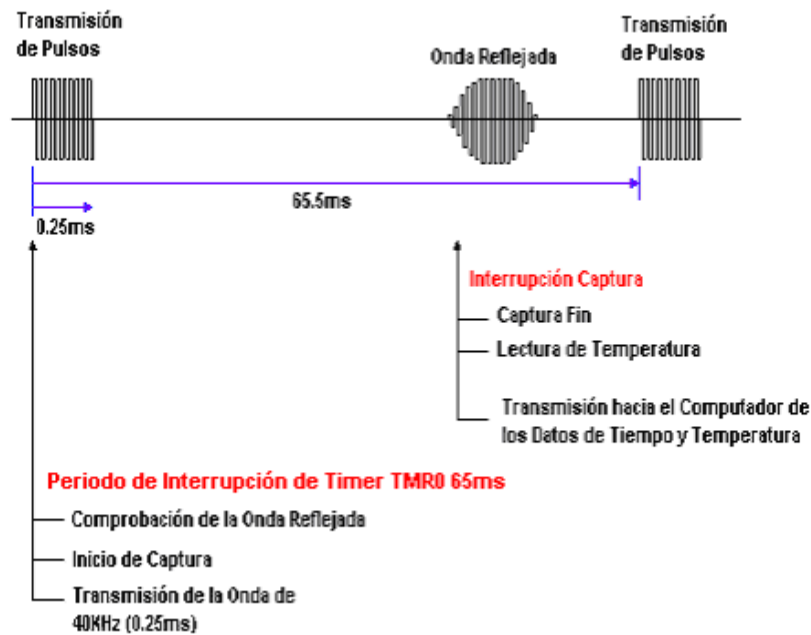


Figura 18. Esquema General

Los siguientes son los Procesos que se llevan a cabo dentro del microcontrolador:

• Inicialización de Variables, Etiquetas y Programa

```

;*****
;
;           Sensor de Ultrasonido para Medir Nivel de Agua
;
;
;           Dispositivo      : PIC16F873A
;           Autores         : Azael Sanchez Vidal
;                           Carlos Alfredo Narvaez
;*****
LIST           P=PIC16F873A
INCLUDE       P16F873A.INC
;***** Definición de Etiquetas *****
oblock h'20'
pulsosCon     ;Variable para el número de pulsos
templ        ;Variable para el Registro bajo de temperatura del Conversor A/D
tempH        ;Variable para el Registro alto de temperatura del Conversor A/D
g_time1      ;Variable para tiempo de guarda 1
g_time2      ;Variable para tiempo de guarda 2
endc
CCP1 equ     h'02'      ;Designacion CCP1(RC2)
RA5 equ     h'05'      ;Designacion RA5 desactiva la llegada de pulsos
RA3 equ     h'03'      ;Designacion RA3 activa o desactiva la valvula
;***** Inicio de Programa *****
org         0           ;Reset Vector
goto       init
org         4           ;Interrupcion Vector
goto       int

```

• Inicialización de Puertos

```

;***** Inicialización de Procesos *****
init

;*** Inicialización Puertos
    bsf    STATUS,RPO    ;BANCO1
    movlw  b'00000001'   ;EL PIN 2 RA0/ANO SE CONFIGURA COMO ENTRADA
    movwf  TRISA
    movlw  b'10000100'   ;PIN 18 RC7/RX/DT COMO ENTRADA
    movwf  TRISC        ;PIN 17 RC6/TX/CK COMO SALIDA
                                ;PIN 13 RC2/CCP1 COMO ENTRADA
                                ;SE FIJA EN REGISTRO TRISC

    bcf    STATUS,RPO    ;BANCO 0
    clrf   PORTB        ;CLAREA EL PUERTO B
    bsf    STATUS,RPO    ;BANCO1
    movlw  b'11110000'   ;(0:4)Entrada y (5:7)Entrada
    movwf  TRISB        ;SE FIJA EN REGISTRO TRISB

```

Los microcontroladores 16F873A encapsulados de 28 pines, disponen de tres puertos (A, B, C). Todas las líneas de estos puertos son multifuncionales dependiendo de su programación. Sin embargo, todas ellas tienen la capacidad de trabajar como líneas de entrada y salida digital.

Se configuró entonces el puerto A que dispone de 6 líneas RA0-RA5, de la siguiente forma:

- La línea RA0/AN0 PIN 2 como entrada, permitiendo que desde el registro ADN0 se defina esta línea como canal 0 del conversor análogo a digital. Es esta la línea de entrada del valor de voltaje equivalente a la temperatura ambiente. Posteriormente es digitalizado, almacenado y por último transmitido para que el software en el computador lo procese. Figura 19.

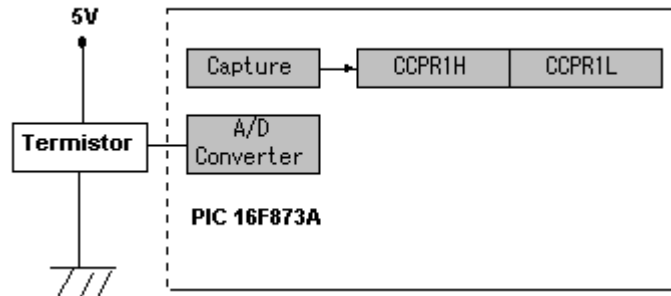


Figura.19. Compensación por Temperatura

La puerto C que dispone de 8 líneas bidireccionales cuyo sentido se configura mediante el registro TRISC, se inicializó así:

- La línea RC7/RX/DT PIN18 como entrada. Esta línea tiene la función de recepción para las señales enviadas por el computador.
- La línea RC6/TX/CK PIN17 como salida. Esta línea tiene la función de transmitir los registros de inicio de trama, temperatura y tiempo de vuelo al computador.
- La línea RC2/CCP1 PIN 13 como entrada de donde se activarán los eventos de captura.

El puerto B que dispone de 8 líneas bidireccionales cuyo sentido se configura mediante el registro TRISB, se inicializó así:

- Las líneas RB0-RB3 como entradas digitales. Es por estas líneas por donde se detecta el nivel de referencia.
- Las líneas RB4-RB7 como salidas digitales. Utilizadas para activar o desactivar la válvula.

• Inicialización Timer 0 Periodo de Transmisión de la Onda de Ultrasonido

```

;*** Inicialización TIMERO (PERIODO ULTRASONIDO)
movlw  b'11010111'    ;TOCS=0,PSA=0,PS=1:256
movwf  OPTION_REG     ;SE FIJA EN EL REGISTRO OPTION_REG
bcf    STATUS,RPO     ;SE CAMBIA AL BANCO0
clrf   TMR0           ;SE CLAREA EL TMR0

```

Se dispuso de uno de los potentes temporizadores que tiene el microcontrolador 16F873A, el TMR0. El TMR0 maneja eficientemente las operaciones que involucran al tiempo y al conteo. El periodo con el cuál se transmite la onda de ultrasonido es controlado con este temporizador.

El TMR0 es un Contador/Temporizador de 8 bits, leíble y escribible, con reloj interno o externo, selección de flanco en el reloj externo, predivisor de la frecuencia de reloj programable y puede generar interrupción opcional por desbordamiento.

El TMR0 se configuró entonces de esta forma: Como temporizador, pulso de reloj interno y predivisor 1:256.

Como el TMR0 es de 8 bits, el valor máximo de conteo es de 256. Sin embargo al fijar el predivisor 1 por cada 256 logramos un conteo de de 65535.

En este diseño se utiliza un reloj de 4Mhz como oscilador externo, se tiene

entonces $\left(\frac{1}{4 \times 10^6}\right) \times 4 = 10^{-6}$ segundos luego 1 conteo equivale a 1 microsegundo.

Así el tiempo de desbordamiento del TMR0 es de 65 milisegundos aproximadamente.

• Inicialización de Modo de Captura CCP1

```

;*** Inicialización del Modulo de Captura CCP1 TIMER1
    movlw  b'00000001'    ;Pre=1:1 TMR1=Int TMR1=ON
    movwf  T1CON          ;FIJA REGISTRO T1CON
    clrf   CCP1CON        ;CCP1 off

```

Se utilizo el CCP1 que es uno de los dos módulos de captura, comparación y modulación de ancho de pulso que tiene el microcontrolador 16F873A.

En este proceso se fija CCP1 en OFF para evitar un mal funcionamiento, este modulo es activado y configurado mas adelante en el proceso captura. Se inicializa el Timer1 TMR1 que es el encargado del conteo de captura.

• Inicialización Conversor Análogo a Digital

```

;*** Inicialización del Conversor A/D
    movlw  b'01000001'    ;ADCS=01 CHS=ANO ADON=ON
    movwf  ADCON0         ;FIJA REGISTRO ADCON0
    bsf    STATUS,RPO     ;CAMBIA AL BANCO1
    movlw  b'10001110'    ;ADFM=0 PCFG=1110
    movwf  ADCON1         ;FIJA REGISTRO ADCON1
    bcf    STATUS,RPO     ;CAMBIA AL BANCO0

```

El conversor que posee este microcontrolador es 10 bits de resolución. Como el valor de referencia positivo es 5 voltios DC y el valor de referencia negativo es tierra. La resolución es de 4.8 mV/bit. De acuerdo a la formula:

$$\text{Resolución} = \left(\frac{V_{ref}^+ - V_{ref}^-}{1024} \right) = \frac{V_{ref}}{1024}$$

Este conversor es inicializado, el PIN 2 RA0/AN0 canal 0 de los 5 canales de entrada que posee el microcontrolador es fijado como entrada de conversión, la frecuencia de reloj de conversión es $F_{osc}/8$ ya que el reloj externo es de 4Mhz.

Como el conversor análogo a digital es de 10 bits, la conversión se debe almacenar en dos registros de 8 bits ADRESL y ADRESH, quedando sin utilizar 6 bits de los 16.

Se configuró entonces el microcontrolador para que los 6 bits más significativos del registro ADRESH sean leídos como cero y los 10 bits resultado de la conversión se almacenen en ADRESH (1:0) y ADRESL (1:7), esta operación es llamada justificación a la derecha.

• Inicialización USART Transmisor Receptor Serie

```

;****Inicialización Modulo USART TX/RX RS232
    bsf      RCSTA,SPEN      ;SE ACTVA EL USART
    movlw   b'00100100'     ;SE ELIGE EL MODO ASINCRONO SYNC=0,
                                ;DATO DE 8 BITS Y ALTA VELOCIDAD (BRGH = 1)

    bsf      STATUS,RPO     ;CAMBIA AL BANCO1
    movwf   TXSTA           ;FIJA REGISTRO TXSTA
    movlw   .12             ;SE CARGA 12 EN W
    movwf   SPBRG          ;SE CARGA 12 EN EL REGISTRO SPBRG
                                ;SE TRABAJA ENTONCES A 19200 BAUDIOS

    bsf      PIE1,RCIE      ;HABILITA INTERRUPCION EN RX
    bcf      STATUS,RPO     ;CAMBIO AL BANCO 0
    movlw   b'10010000'     ;CONFIGURA EL USART PARA RECEPCIÓN CONTINUA
    movwf   RCSTA           ;PUESTA EN ON
    bsf      TXSTA,TXEN     ;SE ACTIVA LA TX

```

El microcontrolador 16F873A dispone de un modulo USART capaz de soportar la comunicación serie sincronía y asíncrona.

El USART, llamado SCI (Serial Communication Interface), puede funcionar como un sistema de comunicación full duplex o bidireccional asíncrono, adaptándose a múltiples periféricos entre ellos un PC. Esta forma de comunicación serie usa la norma RS-232-C, donde cada palabra de información o dato se envía independientemente de los demás.

En este proceso se activa el USART, se escoge el modo asíncrono, dato de 8 bits y alta velocidad. También es cargado el registro SPBRG con el valor de 12 con el cual se logra una transmisión de 19200 baudios, esto obedece a la formula;

$$\text{Frecuencia en Baudios} = \frac{F_{osc}}{(K * (X + 1))}$$

X es el valor cargado en el registro SPBRG, si es 0 es baja velocidad y $K = 64$, para 1 es alta velocidad y $K = 16$.

Se habilita la interrupción por recepción para atender el llamado desde el PC para desactivar o activar la válvula. Finalmente se activa la transmisión, completando la inicialización de este proceso.

• Inicialización de interrupciones

```

;*** Inicialización de Interrupciones
    bcf    STATUS, RPO      ;CAMBIA A BANCO 0
    movlw b'11100000'      ;GIE=ON, PEIE=ON, TOIE=ON
    movwf  INTCON          ;FIJA REGISTRO INTCON

wait
    goto  $                ;INTERRUPCION wait

```

Se habilitan: interrupciones por el modulo timer0, interrupciones de dispositivos periféricos y interrupciones globales posibles.

La interrupción de captura no ocurre cuando los dispositivos periféricos efectúan posibles interrupciones.

Cuando termina la inicialización de procesos, las interrupciones entran en espera. Este proceso se ejecuta de forma repetitiva.

• Proceso Interrupciones

```

;***** Proceso Interrupciones *****
int

    movfw    PIR1           ;LEE EL REGISTRO PIR1
    btfsc   PIR1,CCPIF     ;CAPTURA OCURRIO?
    goto    Capture       ;SI. "Capture"
    btfsc   PIR1,RCIF      ;INTERRUPCION POR RX
    goto    PCENVIA        ;Yes, "PCENVIA"
    movfw   INTCON         ;LEE REGISTRO INTCON
    btfsc   INTCON,TOIF    ;TMRO time out ?
    goto    enviar        ;SI. "Enviar Pulso"

;***** FIN Proceso Interrupciones *****
int_end
    retfie

```

Las interrupciones de captura, PCENVIA y de Timer0 son continuamente chequeadas. La primera interrupción es evaluada al leer el registro PIR1, cuyos bits actúan de señalizadores del momento en el que se origina la causa que provoca la interrupción, esta en concordancia con el registro PIE1 que permite o prohíbe las interrupciones provocadas por los periféricos internos del microcontrolador: Mediante este registro se habilita la interrupción para el módulo CCP1 cuando se produce una captura. La interrupción por recepción en el PIC se interpreta como una solicitud para activar o desactivar la válvula, enviada esta por el software en el PC. La tercera y última interrupción, la de timer0 es juzgada al leer el registro de control de interrupciones INTCON, esta interrupción indica el desbordamiento en el conteo del timer0. La comprobación y autenticación de cada una de las interrupciones antes mencionadas provoca un salto a su respectivo proceso de interrupción.

• Proceso Envío de Onda de Ultrasonido y Conversión A/D

Se inicia al comprobar el desbordamiento del timer0 mediante la lectura del registro del bit T0IF INTCON. Este proceso lleva acabo los siguientes subprocesos:

- Clarea el Timer0

```

;***** Proceso Envio de Pulso *****
;*** clarear el Timer0
enviar
    bcf    INTCOM,TOIF    ;CLAREA EL flag TIMERO
    clrf   TMRO          ;CLAREA EL TIMERO

```

La bandera de interrupción del timer0 es clareada, esto es necesario para una segura operación del sistema. Si esta bandera no es clareada la interrupción por timer0 es generada inmediatamente después de finalizar los procesos de interrupción sin esperar el tiempo regular de desbordamiento de temporizador. Se procede luego a clarear el conteo del Timer0.

- Chequeo de Pulso recibido

```

;*** Chequeo detección de Pulso
    movfw  PORTC          ;LEE EL PUERTO PORTC
    btfsc  PORTC,CCP1    ;DETECTADO?
    goto   detector_fin  ;SI. DETECTADO SALTE A detector_fin

```

Se lee el puerto C para detectar si ha llegado la onda de ultrasonido, la primera vez que se ejecuta este proceso el modulo CCP1 esta desactivado, este es configurado mas adelante para detectar la llegada de un pulso por flanco de subida. Al ser afirmativa la presencia de un flanco de subida se salta a la etiqueta detector_fin.

- Inicio de la operación de captura

```

;*** Pulso Recibido
detector_fin
;*** Inicia Captura
    clrf    TMR1H    ;CLAREA REGISTRO TMR1H
    clrf    TMR1L    ;CLAREA REGISTRO TMR1L
    clrf    CCPR1H   ;CLAREA REGISTRO CCPR1H
    clrf    CCPR1L   ;CLAREA REGISTRO CCPR1L
    movlw   b'00000101' ;CCP1M=0101(Capture)
    movwf   CCP1CON  ;FIJA REGISTRO CCP1CON
    bsf     STATUS,RPO ;CAMBIA BANCO1
    bsf     PIE1,CCP1IE ;CCP1 INTERRUPCION ACTIVADA
    bcf     STATUS,RPO ;CAMBIA AL BANCO0
    bcf     PIR1,CCP1IF ;CLAREA INT FALG CCP1

```

Es aquí donde se configura el modulo CCP1 y se inicia la operación de captura.

El modulo CCP1 utiliza un registro de trabajo de 16 bit que esta formado por la concatenación de los registros CCP1H:CCP1L. En modo de captura el valor de 16 bit que contiene el timer1 cuando sucede un evento en el PIN RC2/CCP1 es trasladado a esto dos registros.

Para garantizar un buen funcionamiento se clarea la parte baja y alta del los registros que conforma el timer1 TMR1H:TMR1L, posteriormente se hace lo mismo con el registro de trabajo del módulo CCP1 o sea CCP1H:CCP1L. Se procede después a configurar el módulo CCP1 en modo captura por flanco ascendente, se activa la interrupción mediante el registro PIE1 bit CCP1IE y por último se clarea la bandera de interrupción de CCP1.

- Envió de pulso de 40Khz

```

;*** Envia Pulso de 40KHZ ( 0.25 MILISEGUNDOS )
    movlw    d'10'
    movwf    pulsosCon        ;FIJA EL CONTEO
s_loop
    call     pulso            ;LLAMA A SUBRRUTINA pulso
    decfsz   pulsosCon,f      ;FIN ?
    goto     s_loop          ;NO. CONTINUE

```

Las rutinas anteriores permiten llamar 10 veces a la subrutina pulso quien genera un periodo completo de onda cuadrada de 25 microsegundos con un ciclo de trabajo aproximado de 50%.

El pulso de 40KHz se logra fijando un estado alto durante 12.5 microsegundos y un el estado bajo durante otros 12.5 microsegundos, esto es un ciclo completo.

Como el reloj utilizado es de 4Mhz, cada instrucción se ejecuta cada 1 microsegundo con lo cual, no es posible lograr tiempos de 12.5 microsegundos ajustando cambios por pasos de instrucción de máquina. Tenemos entonces la posibilidad de 12 microsegundos y 13 microsegundos. Logrando así completar de forma exacta un ciclo completo de 25 microsegundos con 12 instrucciones para 41.7KHz en estado bajo y 13 instrucciones para 38.5KHz en estado alto. Esto ajusta el pulso a una frecuencia de 40Khz aproximadamente sin salirse del rango de excitación de los transductores de ultrasonido.

El número de pulso enviado es de 10, para un total 0.25 milisegundo de generación de onda de ultrasonido.

Todo lo anterior es posible gracias a las subrutinas pulso y t12us. Estas subrutinas son descritas a continuación:

- Pulso y t12us

```

;*** Proceso Pulso
pulso
    movlw    b'00010000'    ;RC4=0N
    movwf    PORTC          ;FIJA REGISTRO PORTC
    call     t12us          ;LLAMA A 12useC
    clrf     PORTC          ;RC4=OFF
    goto     $+1
    goto     $+1
    return

;*** 12 Microsegundos
t12us
    goto     $+1
    goto     $+1
    goto     $+1
    nop
    return

```

Las dos primeras instrucciones del bloque anterior ponen a uno el PIN RC4, posteriormente se llama la subrutina t12us que produce un periodo de 12 microsegundos y finalmente se pone a cero el PIN RC4 y se ejecuta tres instrucciones que requieren 5 ciclos completando un periodo de 25 microsegundos.

- Inicio de Conversión Análogo a Digital

```

;*** Inicia Conversión A/D
    bsf     ADCON0,G0        ;INICIAIA CONVERSION A/D
ad_CheCk
    btfsc   ADCON0,G0        ;FINALIZO CONVERSION A/D?
    goto    ad_CheCk         ;No. DENUEVO
    movfw   ADRESH           ;LEE REGISTRO ADRESH
    movwf   tempH            ;SALVA LA CONVERSION
    bsf     STATUS,RPO       ;CAMBIA AL BANCO1
    movfw   ADRESL           ;LEE REGISTRO ADRESL
    bcf     STATUS,RPO       ;CAMBIA AL BANCO0
    movwf   tempL            ;SALVA LA CONVERSION

```

Se inicia la conversión A/D fijando a 1 el bit GO/DONE del registro ADCON0, luego es chequeado el registro para mirar si pasa a cero el bit GO/DONE, acción que confirma el fin de la conversión y la puesta del resultado en la pareja de registros ADRESH:ADRESL.

Se procede luego a salvar el contenido de los registros ADRESH:ADRESL, en las variables dedicadas para esta labor tempH y tempL.

• Proceso Captura

```

;*** Proceso Capture
Capture
    bcf    PIR1,CCP1IF    ;CLAREA CCP1 int flag
    clrf  CCP1CON        ;CCP1 off
    goto  TX_INICIO

```

Se origina en el proceso de interrupciones cuando es chequeado el bit CCP1IF de registro PIR1, si se confirma que ha pasado a 1, esto indica que ha ocurrido un evento en el PIN 13 RC2/CCP1, en este caso la confirmación de la llegada de un flanco se subida que representa el retorno de la onda de ultrasonido después de interactuar con el objeto a medir.

Cuando entra en este proceso lo primero que se hace es clarear la bandera del registro PIR1 o sea el bit CCP1IF. Logrando con esto detener el conteo del timer1 quien solo se vuelve a activar cuando un nuevo pulso de 40KHz es enviado. Luego se clarea el registro de control del módulo CCP1, saltando por último a la etiqueta para la transmisión.

Al generarse la interrupción en el módulo CCP1 se leen los registros CCPR1H y CCPR1L que en conjunto almacenaran los 16 bits de la cuenta de los registros

TMR1H:TMR1L esta cuenta en el caso de un reloj de 4 MHz, es la cantidad de microsegundos que han pasado desde que se envió el pulso de 40khz.

- **Etiqueta PCENVIA Activar o Desactivar Válvula**

```

;*****PCENVIA*****
PCENVIA    bcf    PIR1,RCIF        ;REPONE FLAG
           movf   RCREG,W          ;LECTURA DEL DATO enviado por PC
           bcf    STATUS,RPO       ;BANCO 0
           bcf    STATUS,RP1
           movwf  PORTE            ;Activa o Desactiva Válvula
           goto   int_end

```

Atendiendo la interrupción por recepción, se captura el dato en el RCREG o registro de recepción del modulo USART del PIC para luego desplazarlo al registro de trabajo y después fijarlo en el puerto B logrando con esto activar o desactivar la válvula.

- **Transmisión de Registros Hacia el Puerto Serial**

Una vez el **Proceso de Captura** desactive el módulo CCP1 se pasa a las rutinas de transmisión. Como ya fueron almacenados: el resultado del tiempo que tardo la onda en regresar, registros TMR1H:TMR1L **Proceso Captura** y la conversión A/D que representa la temperatura del medio de propagación proceso **Inicio de Conversión Análoga Digital**, registros tempH:temL. Se procede a enviar estos registros hacia el puerto serial de un PC para que sean procesados.

Los procesos de transmisión se inician cargando el valor a transmitir en el registro de trabajo del microcontrolador. Luego se mueven al registro TXREG quien a continuación lo traspasa al registro de desplazamiento TSR, quien va sacando los bits secuencialmente por la línea RC6/TX/CK PIN 17 a la frecuencia establecida. Además antes del bit de dato de información incluye un bit de INICIO y después de

sacar todos los bits añade un bit de PARADA. Se hace una confirmación leyendo el bit TMRT del registro TXSTA, que sirve para indicar el estado del registro TSR y que vale 1 cuando esta vacío, indicando esto que ya se transmitieron todos los bits. Permittiéndose entonces cargar de nuevo el registro TXREG para una nueva transmisión.

Lo primero que se transmite es un inicio de trama, proceso que ayuda al software en el computador a detectar la llegada de los registros a procesar. Es simplemente la transmisión de 8 bits 11111111 o 256.

```

;*** Inicio

;*** Inicio de Trama del Envio de Registros a Procesar en el PC
TX_INICIO   bcf     PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
            movlw  b'11111111'    ;CADENA EN CERO
            movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
            bsf    STATUS,RPO      ;CAMBIA BANCO 1
TX_INICIO_W btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
            goto   TX_INICIO_W    ;NO, ESPERAR
            bcf    STATUS,RP1     ;VUELVE BANCO0

```

Luego se envían las variable tempL:tempL que contiene los 10 bits de la conversión A/D.

```

;*** Temperatura

;*** TX tempL parte baja de la conversion A/D
TX_TEMPL    bcf     PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
            movf   tempL,W        ;CADENA tempL
            movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
            bsf    STATUS,RPO      ;CAMBIA BANCO 1
TX_TEMPL_W  btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
            goto   TX_TEMPL_W    ;NO, ESPERAR
            bcf    STATUS,RP1     ;VUELVE BANCO0

;*** TX tempH parte alta de la conversion A/D
TX_TEMP_H   bcf     PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
            movf   tempH,W        ;CADENA tempH
            movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
            bsf    STATUS,RPO      ;CAMBIA BANCO 1
TX_TEMP_H_W btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
            goto   TX_TEMP_H_W   ;NO, ESPERAR
            bcf    STATUS,RP1     ;VUELVE BANCO0

```

Luego se envían los registros del timer 1 CCPR1L:CCPR1H que representan el tiempo de vuelo de la onda.

```

;*** TX Tiempo (TIMER1)

;*** TX CCPR1L parte baja del timer 1
TX_TIME_L   bcf     PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
             movf   CCP1RL,W       ;CADENA EN CERO
             movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
             bsf    STATUS,RPO     ;CAMBIA BANCO 1
TX_TIME_L_W btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
             goto   TX_TIME_L_W   ;NO, ESPERAR
             bcf    STATUS,RP1     ;VUELVE BANCO0
             goto   TX_TIME_H

;*** TX CCPR1H parte alta del timer 1
TX_TIME_H   bcf     PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
             movf   CCP1RH,W       ;CADENA EN CERO
             movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
             bsf    STATUS,RPO     ;CAMBIA BANCO 1
TX_TIME_H_W btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
             goto   TX_TIME_H_W   ;NO, ESPERAR
             bcf    STATUS,RP1     ;VUELVE BANCO0

```

Por ultimo se envía el estado de la puerta B que representa en sus primeras cuatro líneas el nivel de referencia. La última sentencia retorna al vector de interrupciones.

```

;*****NIVEL DE REFERENCIA*****
TX_REF      movf   PORTE,W
|           bcf    PIR1,TXIF      ;RESTAURA FLAG DE TX
           movwf  TXREG          ;MUEVE EL BYTE A TX
           bcf    STATUS,RP1
           bsf    STATUS,RPO     ;CAMBIA BANCO 1
TX_REF_W    btfs   TXSTA,TRMT     ;BYTE TX?
           goto   TX_REF_W       ;NO, ESPERAR
           bcf    STATUS, RPO     ;VUELVE BANCO0
           bcf    STATUS, RP1     ;VUELVE BANCO0
           goto   int_end

;*****
; Fin Sensor de Ultrasonido para Medir Nivel de Agua
;*****

end

```

El código completo en lenguaje ensamblador para el microcontrolador empleado para este proyecto se encuentra en el Anexo A de este documento.

2.1.5. Esquemático del Sensor de Ultrasonido.

3. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN DESARROLLADA

En este capítulo se describe la solución software al problema planteado. Logrando con esto alcanzar el objetivo general de automatizar la práctica de laboratorio de medición de carga de agua y estimación de caudal utilizando vertederos de cresta delgada. Esta práctica es realizada en el laboratorio de Hidráulica facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca.

Las diferentes decisiones de diseño y desarrollo tomadas en este proyecto involucran: selección de la arquitectura, modelos descriptivos, y tecnologías empleadas.

Para describir la solución desarrollada en este proyecto, iniciamos detallando el funcionamiento del sistema ideado para automatizar el proceso, posteriormente se explica la interacción de los periféricos con el software desarrollado para este fin.

La solución software basada en los requerimientos del sistema, se encarga del monitoreo, la captación, el despliegue y el procesamiento de los datos. También los almacena y genera reportes.

El sensor de ultrasonido utilizado para este trabajo de grado fue desarrollado en el proyecto de investigación antes mencionado y perfeccionado para esta nueva aplicación. El funcionamiento de este dispositivo fue descrito en el capítulo 2 de este escrito. Se utilizó además una válvula electrónica ON/OFF en el desagüe para el tanque aforador, controlada por un circuito adicional y dos sensores de nivel tipo ON/OFF que sirven de puntos de referencia.

La solución planteada y ejecutada en este proyecto integra conocimiento tanto en la parte software como hardware, además de implementar la teoría de medición de caudal utilizando vertederos de cresta delgada.

Este proceso de automatización concebido inicialmente para ser aplicado en la práctica de laboratorio de vertederos, puede ser utilizado también para dar solución a sistemas reales, en los cuales se desee medir caudal en encanales regulares.

3.1. ESQUEMA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO

El siguiente gráfico expone la solución generada en este proyecto para la automatización del proceso de aforamiento de caudales utilizando vertederos de cresta delga. Figura 20.

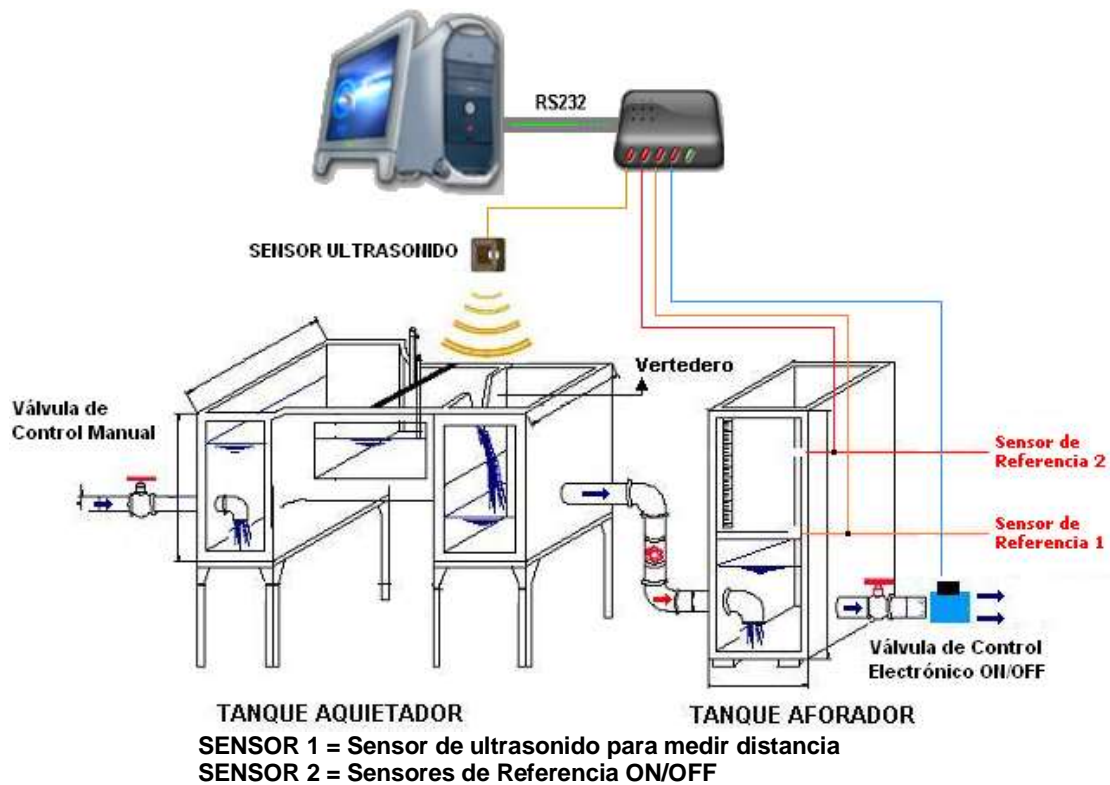


Figura 20. Esquema de Automatización.

Los requerimientos del sistema derivan del esquema desarrollado para automatizar el proceso y de los pasos descritos en la práctica de laboratorio de vertederos, que fueron comentados en el capítulo 1 de éste documento.

La solución para la automatización ideada en este proyecto comprende:

- a) Instalar convenientemente el vertedero de ensayo.
- b) Activar el sistema de monitoreo de los sensores.

- c) Hacer circular un caudal por medio de la **Válvula de Control Manual**.
- d) Una vez se establezca el nivel de agua sobre el vertedero en el **TANQUE AQUIETADOR**. Capturar la información enviada por el **SENSOR 1** utilizando el puerto serial RS232 del PC, procesarla y almacenarla. Este valor representa la carga de agua h .
- e) Cerrar la **Válvula de Control Electrónico ON/OFF** activando el circuito de control. Esto eleva el nivel en el tanque aforador.
- f) Cuando el nivel de agua se eleve hasta **Punto de Referencia 1** en el **TANQUE AFORADOR**, se debe activar un temporizador en el sistema. Este temporizador se detiene cuando el nivel alcanza el **Punto de Referencia 2**. Es aquí donde se calcula volumétricamente el caudal Q , ya que se dispone de las medidas del tanque y el tiempo que tardo en pasar del **Punto de Referencia 1** al **Punto de Referencia 2**. Quien detecta el paso del nivel de agua por los puntos de referencia es el **SENSOR2**. Los puntos de referencia son configurados en el sistema.
- g) El valor de carga de agua h y su correspondiente caudal Q son almacenados en una tabla en el software.
- h) El proceso del literal d al literal f debe ser repetido mínimo 10 veces aumentando un poco el caudal con **Válvula de Control Manual** cada vez.

Después de obtener cada muestra se utiliza la ecuación general $Q = Kh^m$ y el método de los mínimos cuadrados ambas implementadas en el software para:

- a) A partir de los valores (Q, h) obtenidos, calcular las constantes K y m

- b) Con los valores obtenidos para K y m definir la ecuación de patronamiento experimental. Con el valor de K obtenido y su ecuación correspondiente para el tipo de vertedero usado, calcular el C_d o constante de descarga.
- c) Almacenar los datos en una tabla en el software.

3.2. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO

El entorno de desarrollo Labwindows/CVI que pertenece a la National Instruments, fue el IDE en el cual se construyó el sistema de monitoreo y automatización. Este producto en su versión de prueba 7.00, proporciona las herramientas necesarias para interactuar con el sistema ideado para la automatización de la práctica de laboratorio objeto de éste.

Labwindows/CVI es un entorno de trabajo visual bajo lenguaje C. Especialmente diseñado para generar soluciones de automatización, esto permite una fácil interacción con diferentes periféricos a una gran velocidad. El software desarrollado con esta herramienta proporciona una interfase intuitiva y sencilla.

La Figura 21 describe de forma general la arquitectura software, módulos y los procesos desarrollados dentro de la aplicación para dar solución al problema planteado. Se debe tener en cuenta que el sistema esta interactuando con el hardware de monitoreo anteriormente descrito.

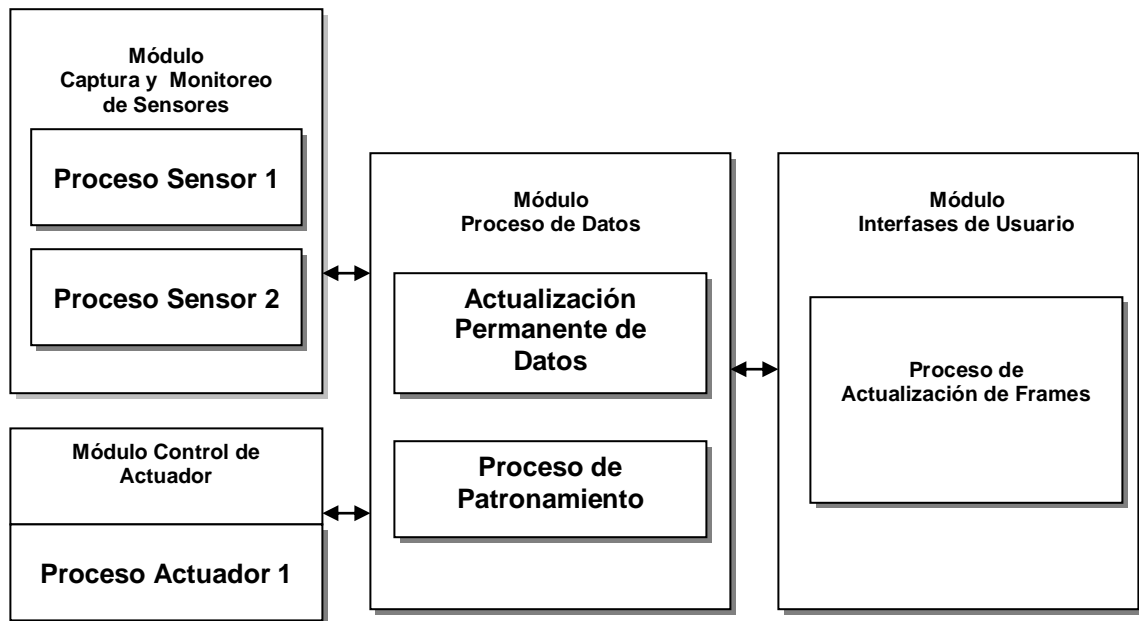


Figura 21. Arquitectura Software

La descripción en detalle de cada uno de los módulos y procesos es la siguiente:

3.2.1. Módulo de Captura y Monitoreo de Sensores

Este módulo está constituido por dos procesos que dependen de acciones o estímulos externos al sistema software. Estos procesos se encargan de interactuar con los dos sensores:

- **Proceso Sensor 1**

En este proceso se extraen los datos contenidos en cada segmento de trama, establecidos según el protocolo de comunicación entre el PIC y el computador, mediante una comunicación RS232. En los segmentos de trama del protocolo se tiene: Inicio de trama, resultado del conversor voltaje, tiempo vuelo y los estados de los sensores de nivel de referencia. La extracción de datos se explica en la Figura 22.

- **Proceso Sensor 2.**

Se hace referencia al segmento de trama del protocolo que indica el estado actual de los sensores ubicados en el tanque aforador, esta información se extrae del sexto segmento de trama. La extracción de los datos se explica en la Figura 22

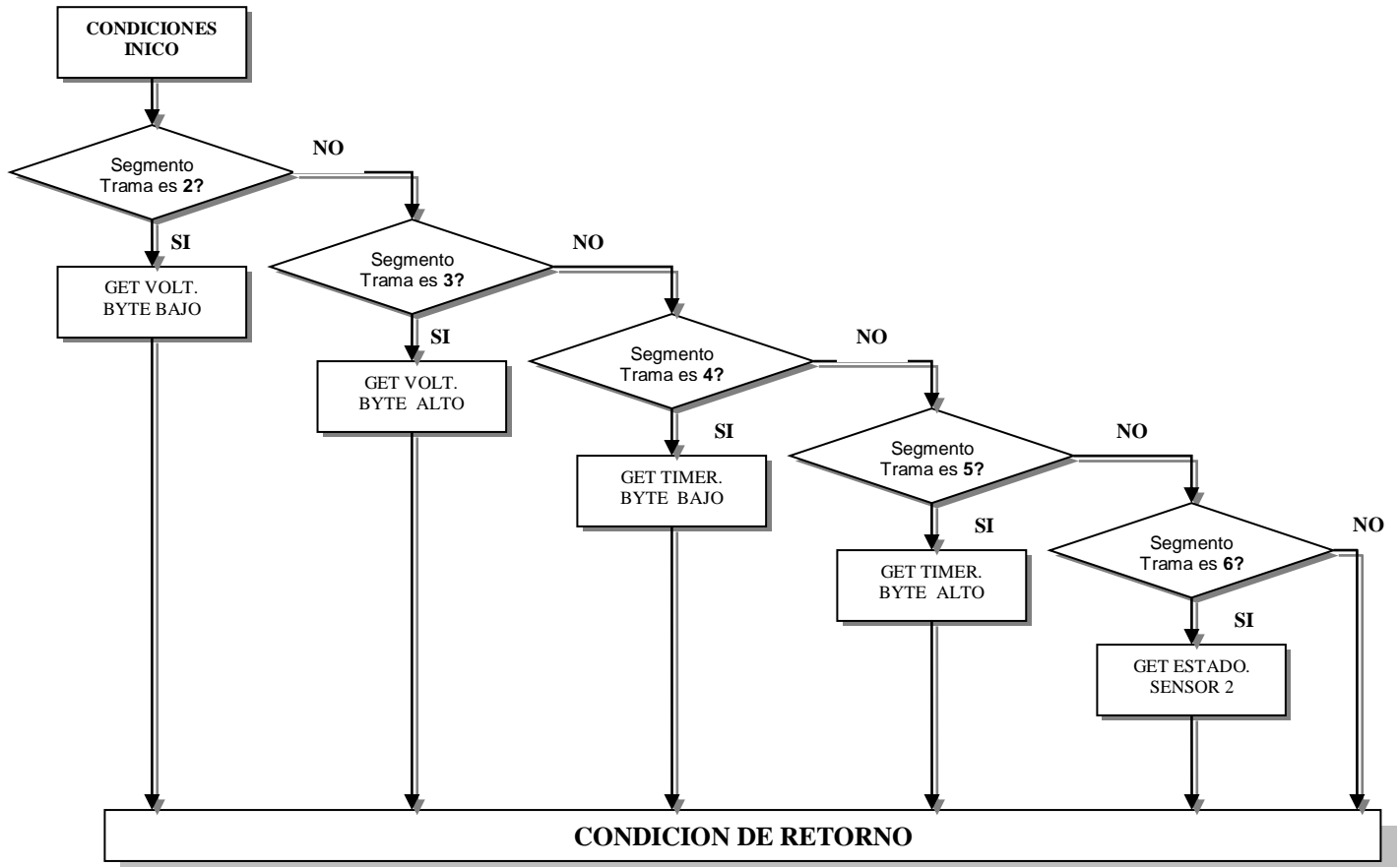


Figura 22. Diagrama de Flujo Módulo de Captura y Monitoreo de Sensores

La siguiente es la descripción del diagrama de flujo de la Figura 22.

CONDICIONES DE INICIO:

Debe verificar las siguientes condiciones para dar inicio o continuidad al proceso: la comunicación serial con el PIC debe estar establecida, debe haber datos en el buffer de comunicación y detectar el indicador de inicio de trama cada seis

segmentos, conformados cada uno de estos por 8 bits e iniciar el contador para el número de segmentos con un valor máximo de seis.

Las siguientes dos etiquetas hacen referencia al valor enviado desde el PIC usando su comunicación RS232 hacia el PC. Representando esto el resultado de la conversión análogo a digital que corresponde a la variación de voltaje en el termistor, que posteriormente se interpretará como el valor de temperatura ambiente. Este valor esta compuesto por dos tramas de 8 bits ya que el conversor es de 10 bits de resolución. Este valor se divide en la parte alta y baja del registro del conversor.

Get Volt Byte Bajo:

Obtiene el valor del byte bajo correspondiente al resultado del conversor análogo a digital del PIC.

Get Volt Byte Alto

Obtiene el valor del byte alto correspondiente al resultado del converso análogo a digital del PIC, y concatena el byte bajo con el byte alto para formar un palabra digital de 16bits, que corresponde al valor de temperatura ambiente en voltios.

Para las dos siguientes etiquetas se debe tener en cuenta que se esta manipulando el resultado del conteo del timer 2 del microcontrolador, que esta compuesto por dos registros de 8 bits, los cuales se dividen en parte alta y parte baja del registro de trabajo del timer 2.

Get Timer Byte Bajo:

Obtiene el valor del byte bajo correspondiente al resultado del contador en el PIC. Este contador hace referencia al conteo del timer2 del microcontrolador que es interpretado como el tiempo de vuelo de la onda de ultrasonido.

Get Timer Byte Alto:

Obtiene el valor del byte alto correspondiente al resultado del contador del PIC y concatena el byte bajo con el byte alto para formar una palabra digital de 16bits, que completa el valor de la variable tiempo de vuelo ya mencionada.

Get Estado Sensor2:

Indica el estado actual de los sensores ubicados en el tanque aforador, ya que estos sensores digitales son normalmente abiertos el PIC envía un alto cuando el sensor está activo y un cero para el caso opuesto, el cuadro siguiente establece la lógica de estado de los sensores.

Tabla 5. Lógica de Sensores

Enviado por el PIC		Sensores Aforador	
Segmento de Trama		Sensor 2	Sensor 1
Decimal	Binario		
0	0000	OFF	OFF
1	0001	OFF	ON
2	0010	ON	OFF
3	0011	ON	ON

CONDICIONE DE RETORNO:

Si se cumple cualquiera de los procesos anteriores la secuencia regresa al proceso

CONDICIONES DE INICIO. Si el proceso anterior fue el sexto segmento de trama debe restablecer el contador para el número de segmentos de trama.

3.2.2. Módulo Control de Actuador.

Este módulo contiene un solo proceso, esto se debe a que el sistema maneja un solo actuador. El tipo de actuador es una válvula ON/OFF que sirve para el desagüe en el tanque aforador.

- **Proceso Actuador 1**

Es el proceso mediante el cual se realiza un control de apertura o cierre sobre la válvula de desagüe del tanque aforador, para lo cual se emplea un puerto digital de salida del microcontrolador el cual se opera mediante comunicación serial desde el computador, enviando el número uno para abrir la válvula o cero para cerrarla. La Figura 23 explica su funcionamiento.

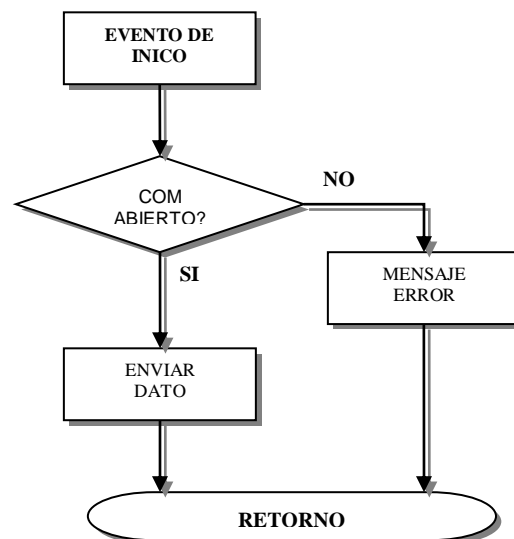


Figura 23. Diagrama de Flujo Proceso Actuador1

La siguiente es la descripción del diagrama de flujo de la Figura 23.

Evento de Inicio:

Proceso que se presenta cuando se envía la orden de apertura o cierre. Puede ocurrir desde la interfaz de usuario o desde el proceso de patronamiento, más adelante se detallará sobre estos procesos.

COM Abierto:

Verifica si la comunicación serial entre el microcontrolador y el computador esta establecida.

Enviar Dato:

Este proceso toma la orden de apertura o cierre, asigna un número equivalente según sea la orden y lo envía en el bus de datos de la comunicación serial. Para realizar la apertura de la válvula de desagüe del aforador envía 1 y para cierre 0.

Mensaje de Error:

Si no se ha establecido o si ha fallado la comunicación entre el microcontrolador y el computador se envía un mensaje de error notificando tal suceso.

Retorno:

Luego de haber cumplido alguno de los procesos anteriores, el sistema retorna al proceso **Evento de Inicio**.

3.2.3. Módulo Proceso de Datos

Este módulo dentro del sistema es considerado como la lógica de funcionamiento, en la cual se interpreta, transforma y manipula los diferente datos capturados en el

módulo **Captura y Monitoreo de Sensores**. Constituido por dos procesos bien definidos y con funciones establecida de la siguiente forma:

- **Actualización Permanente de Datos:**

Este proceso toma los datos que resultan del **Módulo Captura y Monitoreo de Sensores** (resultado del conversor de voltaje, tiempo del contador y estado de los sensores del tanque aforador) y realiza los cálculos necesarios para convertir estos datos en variables de ingeniería como temperatura (resultado del conversor de voltaje), distancia (resultado del contador), nivel del tanque aquietador y estado de los sensores de referencia del tanque aforador. El resultado de este proceso de **Actualización Permanente de Datos** se envía al módulo interfase de Usuario.

- **Proceso de Patronamiento:**

Este proceso es el responsable de realizar los cálculos necesario para obtener la ecuación de patronamiento del vertedero, para lograr tal fin es necesario verificar condiciones de inicio, estado de sensores ubicados en el tanque aforador, nivel de agua en el tanque aquietador, carga de agua en el vertedero y estado de la válvula de desagüe del tanque aforador. Cumpliéndose las anteriores condiciones se podrá realizar el cálculo matemático de mínimos cuadrados para obtener la ecuación de caudal sobre el vertedero. La Figura 24 ofrece una explicación mas detallada del proceso de patronamiento.

Primero pasamos a definir las etiquetas y los llamados pasos de esta figura, que no son más que una serie de estaciones lógicas y funcionales con el objetivo de lograr obtener las muestras necesarias para calcular la ecuación de patronamiento de

vertedero en prueba. Con cada paso o etiqueta referirse al diagrama de flujo de la Figura 24

Evento de Inicio:

Este evento o paso1 se ejecuta cuando en la interfaz gráfica de usuario se acciona sobre el botón iniciar patronamiento. Se lleva acabo la confirmación de que el nivel de agua en el tanque aforador esta por debajo del **Sensor1** y se realiza el cierre de la válvula de desagüe. La tabla a continuación describe las acciones.

Tabla 6. Acciones Evento Inicio Proceso Patronamiento

Acción	Descripción
I	Activa proceso de Patronamiento
II	Confirma Nivel de agua por debajo del sensor 1
III	Cerrar válvula de desagüe

Se cumple el Paso 2?:

Este proceso verifica que el nivel de agua aumenta en el tanque aforador y que sea mayor o igual a la posición del sensor de referencia 1. Además confirma que el nivel de carga de agua sobre el vertedero sea mayor a cero. Es preciso que desde este momento la válvula de desagüe este cerrada. El cuadro describe las condiciones que verifica el proceso.

Tabla 7. Condiciones Paso2 Proceso Patronamiento

Condiciones	Descripción
I	Confirmar Nivel de agua mayor a la posición del Sensor 1.
II	Carga de Agua h mayor que cero.
III	Válvula de desagüe cerrada.

Iniciar Pasos 3, 4, 5 y 6:

Aquí se obtienen los datos necesarios para el procedimiento matemático: volumen del tanque aforador, carga de agua sobre el vertedero y también se activa el

temporizador que permite determinar el tiempo de llenado. Este tiempo se refiere al número de segundos que tarda el nivel de agua en el tanque aforador en llegar al sensor de referencia 2. Con este valor de tiempo se calcula el caudal instantáneo como se explica más adelante. La Tabla siguiente describe las funciones que ejecuta cada paso.

Tabla 8. Descripción de los Pasos 3, 4, 5 y 6 Proceso de Patronamiento

Paso	Descripción
3	Obtener Carga de Agua " h "
4	Calcular Volumen del Tanque Aforador
5	Actualizar " h " en la interfaz
6	Activar Temporizador

Se cumple el Paso 7?:

Confirma que los sensores de referencia 1 y 2 en el tanque aforador estén cerrados y además que la válvula de desagüe este cerrada. Los condicionamientos anteriores indican que el nivel de agua en el tanque aforador ha superado el sensor 2, por consiguiente se podrán realizar los cálculos de patronamiento como se explica en el los pasos siguientes. La Tabla a continuación describe las condiciones que verifica este paso

Tabla 9. Condiciones Paso7 Proceso Patronamiento.

Condiciones	Descripción
I	Sensor de Referencia 1 debe estar cerrado
II	Sensor de Referencia 2 debe estar cerrado
III	Válvula de desagüe cerrada.

Iniciar Pasos 8, 9, 10, 11 y 12:

Con estos pasos se obtienen las variables necesarias para realizar los cálculos matemáticos como: tiempo de llenado del tanque aforador y caudal instantáneo.

También se activa la válvula de desagüe para vaciar el tanque aforador. La Tabla siguiente describe cada paso.

Tabla 10. Descripción Pasos 8, 9, 10, 11 y 12 Proceso de Patronamiento.

Paso	Descripción
8	Detener Temporizador
9	Calcular Caudal " Q " en el Aforador
10	Actualizar " Q " en la interfaz de usuario
11	Abrir válvula de desagüe
12	Calcular variables "a, k, m, r" y la ecuación de patronamiento para Q .

Se cumple el Paso 13:

Se realiza una espera para verificar que se cumpla el desagüe del tanque aforador, para lo cual chequea que el sensor de referencia 1 el cual debe estar abierto, indicado esto que el nivel de agua esta por debajo del sensor 1, que es una de las condiciones iniciales para poder tomar la siguiente muestra para el patronamiento.

Iniciar Secuencia Paso 14:

Al llevar acabo con éxito toda la secuencia de patronamiento descritas, se retorna el proceso **Evento de Inicio**, lo que indica que se puede llevar acabo una nueva muestra, para lo cual es preciso aumentar el caudal de entrada en el tanque aquietador con la válvula manual. El proceso debe generar un mensaje al usuario indicando que el sistema puede continuar con la toma de muestras.

Los pasos que se explican a continuación son excepciones al funcionamiento normal dentro del proceso o llamados de usuario. Se consideraron los siguientes pasos para este fin.

Iniciar Paso 15:

Aquí se manejan los tipos de errores que se puedan presentar en la secuencia de patronamiento. Se determina la falla y genera un mensaje indicando el tipo de error.

La tabla a continuación describe los posibles tipos de errores.

Tabla 11. Tipos de Errores Paso15 Proceso de Patronamiento

Tipo de Error	Estado Correcto	Estado Real
Sensor 1 Abierto	Cerrado	Abierto
Sensor 1 Cerrado	Abierto	Cerrado
Sensor 2 Abierto	Cerrado	Abierto
Sensor 2 Cerrado	Abierto	Cerrado
Válvula Abierta	Cerrado	Abierto
Válvula Cerrada	Abierto	Cerrado
Carga $h < 0$	$h > 0$	$h < 0$

Se cumple el Paso 16?:

Confirma que la falla detectada por el proceso anterior fue solucionada, en caso contrario retorna al proceso **Iniciar Paso 15** (manejador de errores). Si la falla se solucionó activa el proceso **Iniciar Secuencia Paso 14**.

Se cumple el Paso 17?:

Este proceso trabaja en paralelo a los demás procesos, su función es atender la orden del usuario para detener la secuencia de patronamiento de la muestra actual. Lo que se considera como una parada de emergencia en el sistema.

Iniciar Paso 18.

Debido ha que en el paso 17 se dio una orden de parada de emergencia el sistema en este paso activa la válvula de desagüe y realiza una espera para verificar que se cumpla el vaciado del tanque aforador, para lo cual chequea que el sensor de

referencia 1 se encuentre abierto, lo que indica que el nivel de agua esta por debajo del sensor 1 y así poder tomar la siguiente medida.

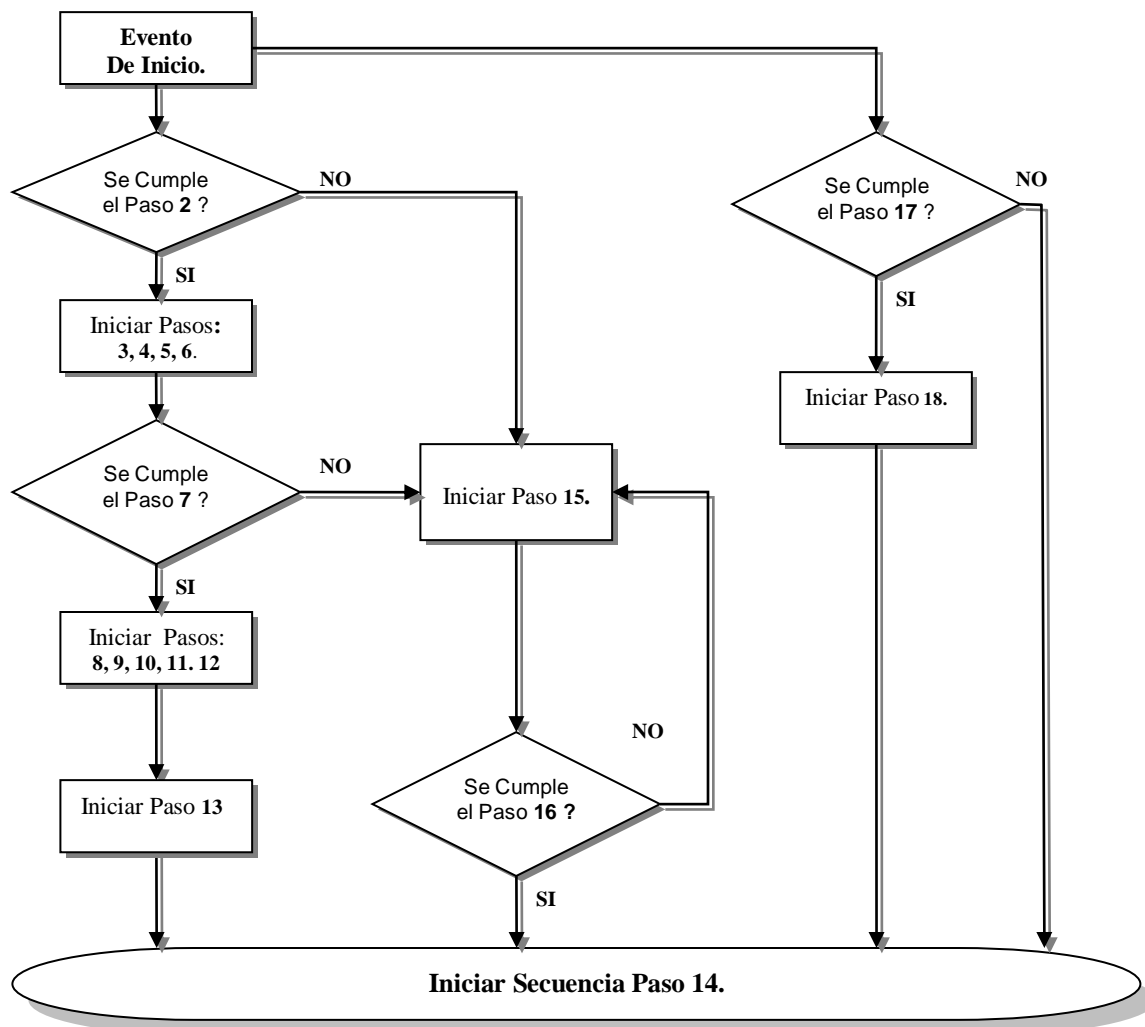


Figura 24. Diagrama de Flujo Módulo Proceso de Datos

3.2.4. Módulo Interfases de Usuario.

Este módulo es el encargado de desplegar las interfases adecuadas al usuario. Se estableció un proceso para cumplir este objetivo.

- **Proceso de Actualización de Ventanas:**

Este proceso es el encargado de actualizar permanente la interés de usuario GUI, siendo este el mecanismo con el cual el usuario interacción con el sistema software y hardware.

La gráfica a continuación detalla las diferentes ventanas: de información, configuración y control.

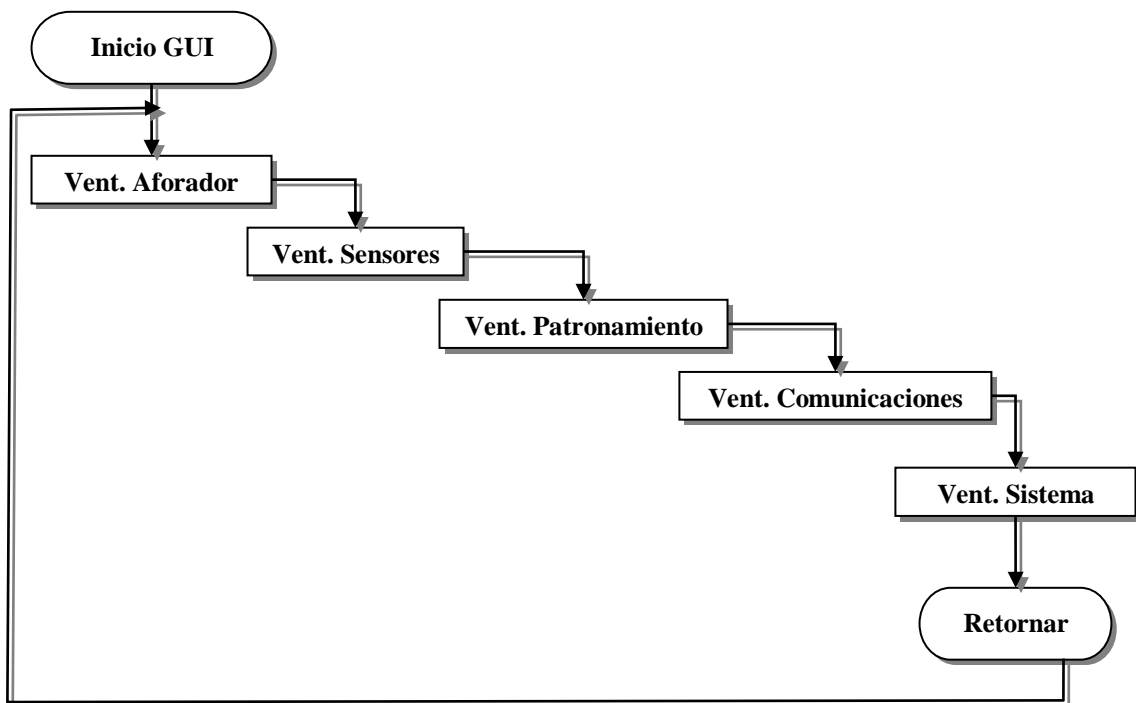


Figura 25. Diagrama de Flujo Proceso de Actualización de Ventanas

La siguiente es la descripción del diagrama de flujo de la Figura 25.

Inicio GUI:

Este proceso se activa cuando se ejecuta el software de patronamiento.

Ventana Aforador:

Actualización permanente de los objetos gráficos de la ventana. La Tabla a continuación describe las funciones para cada caso. La gráfica 26 muestra la ventana.

Tabla 12. Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Aforador.

Objeto Grafico	Función
Animación imagen1	Visualiza la evolución del nivel de agua en el tanque aquietador.
Animación imagen2	Estado sensores de referencia tanque aforador
Animación imagen3	Estado Válvula de desagüe.
Indicador Numérico1	Temporizador de tiempo de llenado.
Indicador Numérico2	Nivel tanque aquietador.
Indicador Numérico3	Carga de agua sobre el Vertedero.
Indicador Numérico4	Volumen del tanque Aforador
Indicador Numérico5	Caudal instantáneo de la muestra efectuada.
Toggle Button1	Inicia la secuencia de patronamiento.

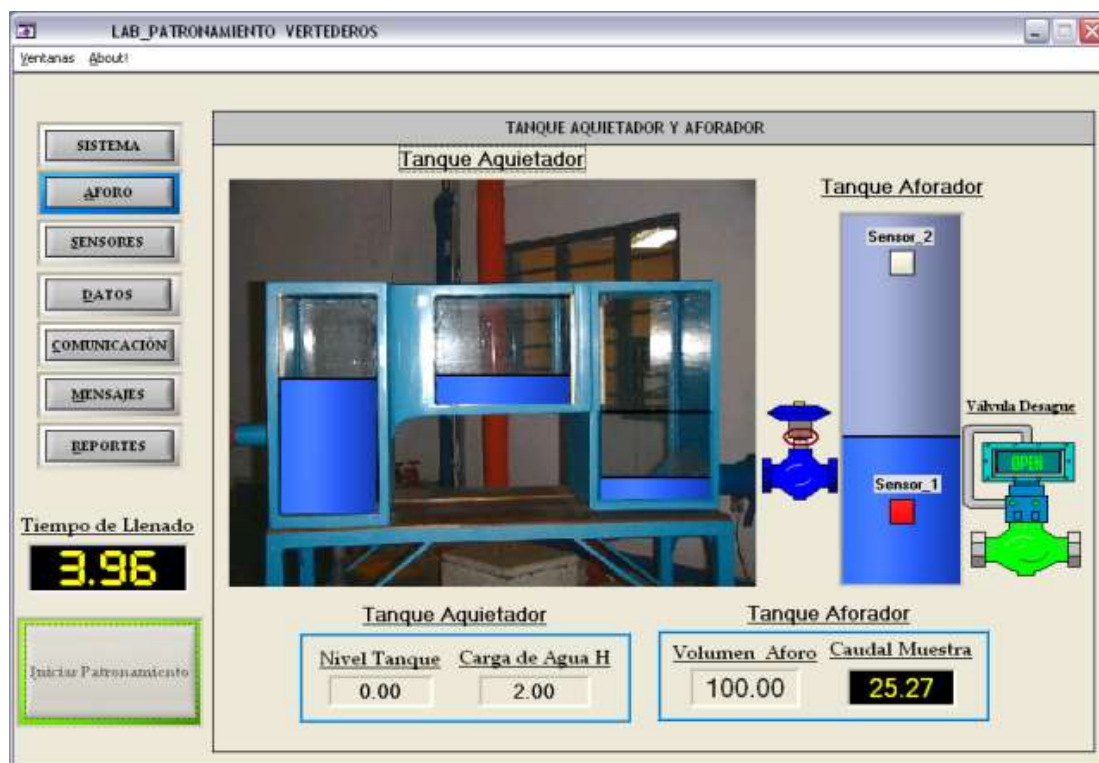


Figura 26. Ventana Tanque Aquietador y Aforador

Ventana Sensores:

Actualización permanente de los objetos gráficos de la ventana. La Tabla a continuación describe las funciones para cada caso y la gráfica 27 muestra la ventana.

Tabla 13. Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Sensores.

Objeto Grafico	Función
Indicador Numérico6	Velocidad del Sonido.
Indicador Numérico7	Temperatura ambiente.
Indicador Numérico8	Nivel tanque aquietador.
Indicador Numérico9	Tiempo de Vuelo de onda de ultrasonido.
Indicador Numérico10	Distancia
Animación imagen4	Estado válvula de desagüe.
Animación imagen5	Estado sensores de referencia tanque aforador
Toggle Button2	Activar manualmente la válvula de desagüe.

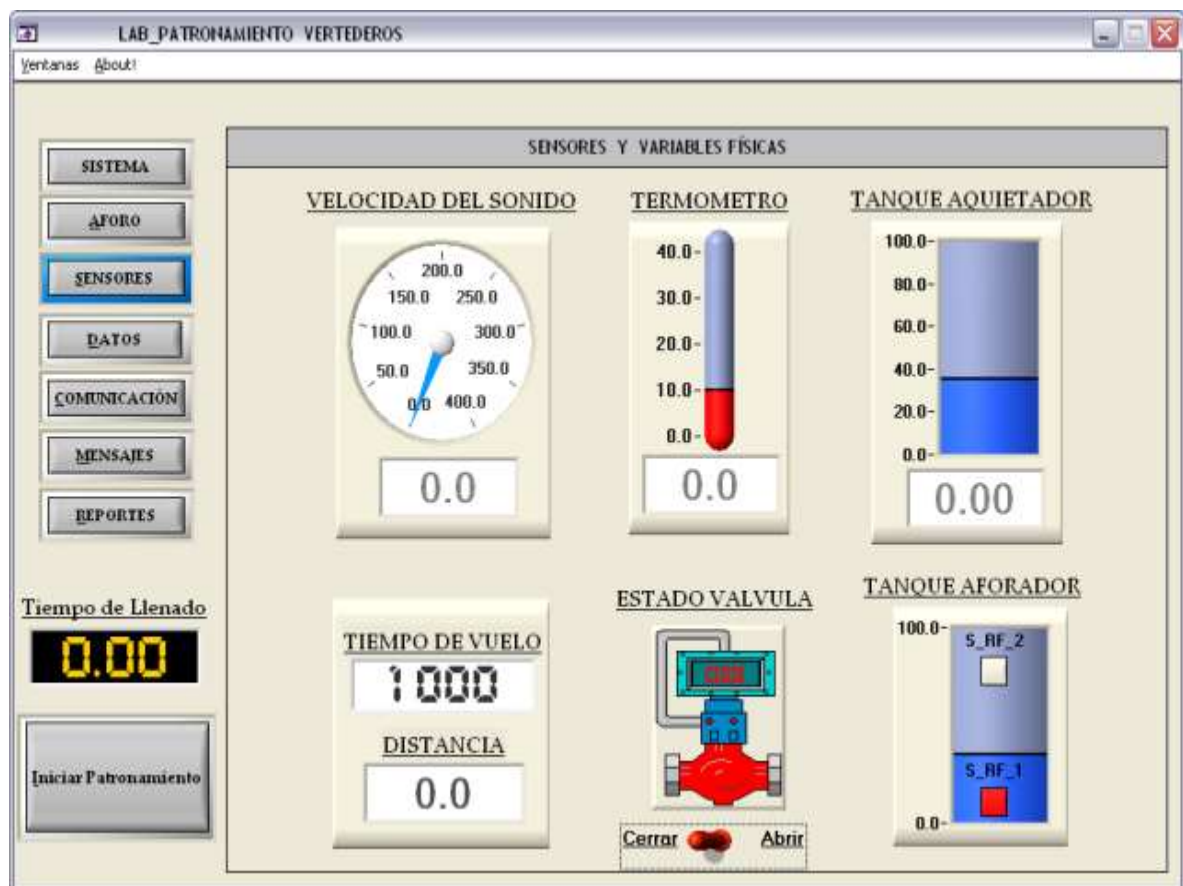


Figura 27. Ventana Sensores y Variables Físicas

Ventana Patronamiento:

Actualización permanente de los objetos gráficos de la ventana. La Tabla siguiente describe las funciones para cada caso. La gráfica 28 muestra la ventana.

Tabla 14. Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana Patronamiento.

Objeto Grafico	Función
Tabla1	Contiene Q, h (Carga de Agua) y el resultado matemático de los mínimos cuadrados.
Tabla2	Contiene el valor de k, r, m y a
Indicador Numérico11	Ecuación de patronamiento.

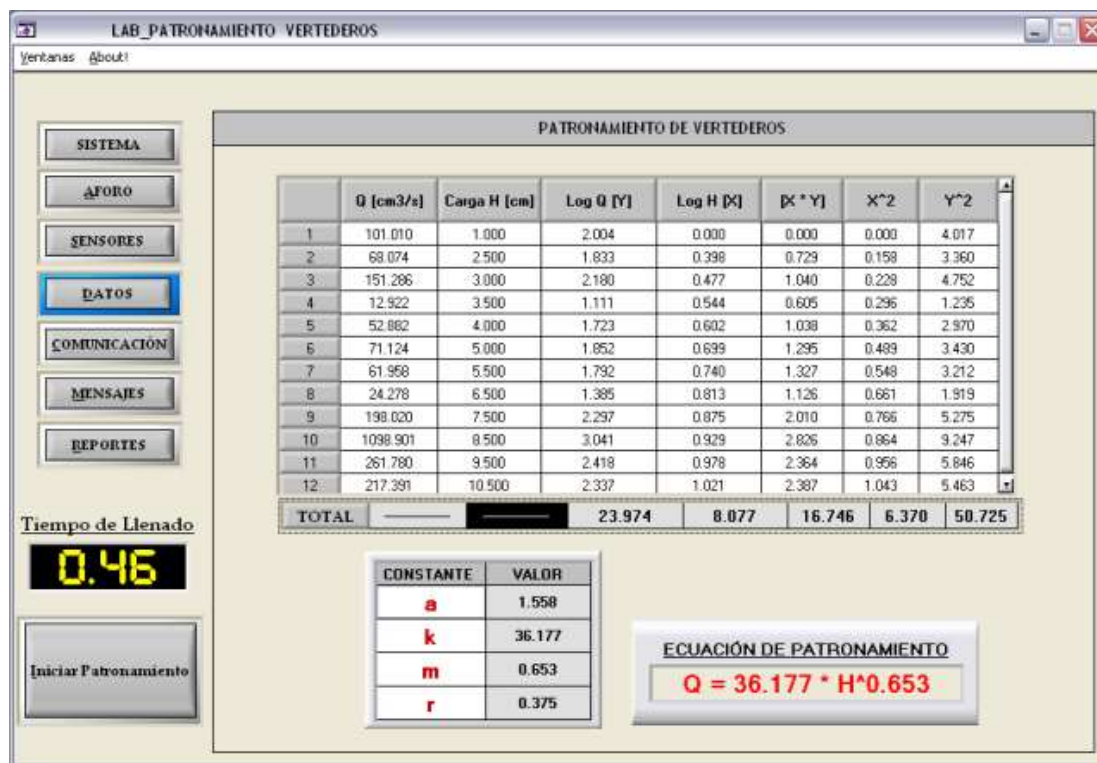


Figura 28. Ventana Patronamiento de Vertederos

Ventana Comunicaciones:

Actualización permanente de los objetos gráficos de la ventana. La Tabla siguiente describe las funciones para cada caso. La gráfica 29 muestra la ventana.

Tabla 15. Funciones Objetos Gráficos Proceso Actualización Ventana

Comunicaciones.

Objeto Grafico	Función
Menú Desplegable1.	Seleccionar el puerto serial
G. Indicadores Numéricos1	Configuración del puerto: data bits, parity, baud rate y stop bits.
G. Indicadores Numéricos2	Resultado del análisis del protocolo de comunicación con el PIC, donde se extrae el Byte alto, byte bajo y se concatena en una palabra de 16 bits que correspondiente al resultado del conversor análogo digital.
G. Indicadores Numéricos3	Resultado del análisis del protocolo de comunicación con el PIC, donde se extrae el Byte alto, byte bajo y se concatena en una palabra de 16 bits que correspondiente al Tiempo de Vuelo de onda de ultrasonido.
Indicador Numérico12	Resultado del conversor análogo digital.
Indicador Numérico13	Tiempo de Vuelo de onda de ultrasonido.
Indicador Numérico14	Estado actual de los sensores de referencia extraído del protocolo de comunicación.

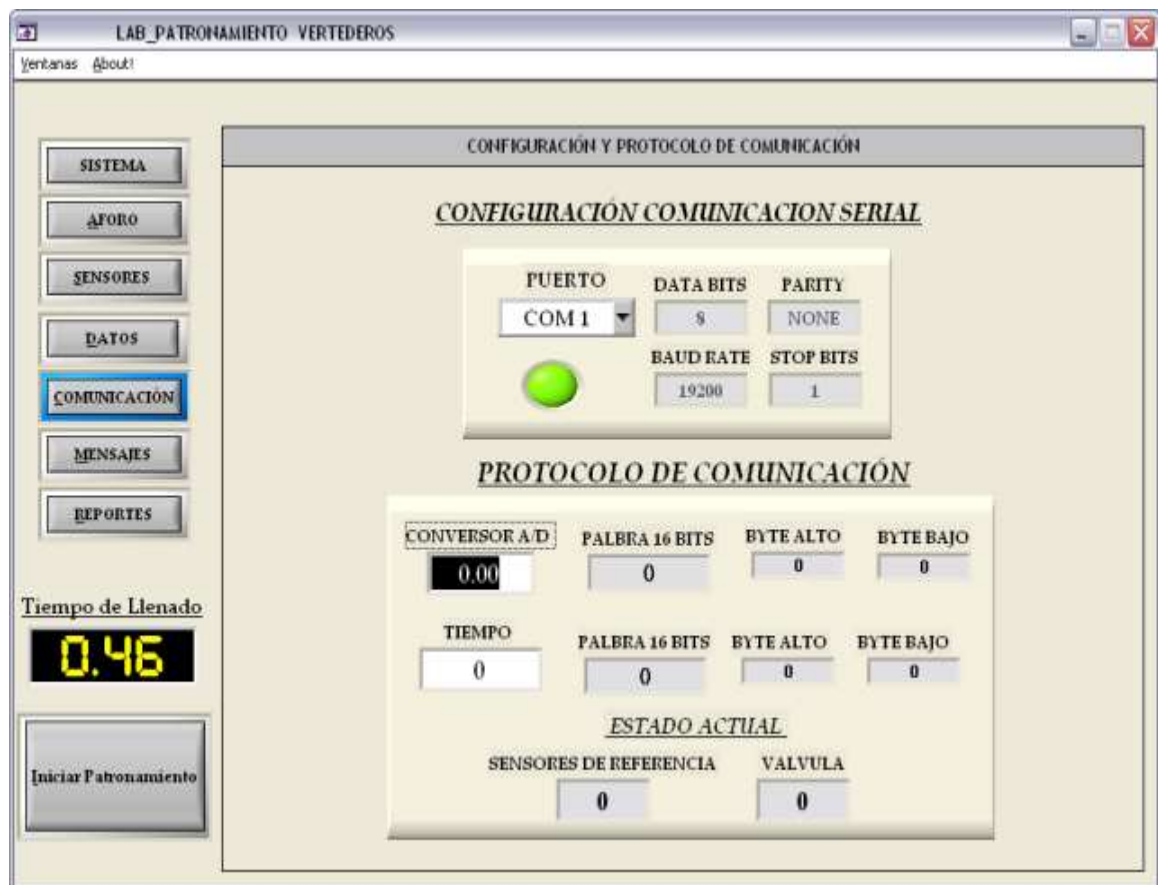


Figura 29. Ventana Configuración y Protocolos de Comunicación

Ventana Sistema:

Esta ventana visualiza la arquitectura del sistema implementado, donde se detalla la ubicación de los sensores de ultrasonido, sensores de nivel de referencia, válvula de desagüe, puntos de monitoreo, funcionamiento del tanque aforador y quietador. La Figura 29 muestra la ventana.

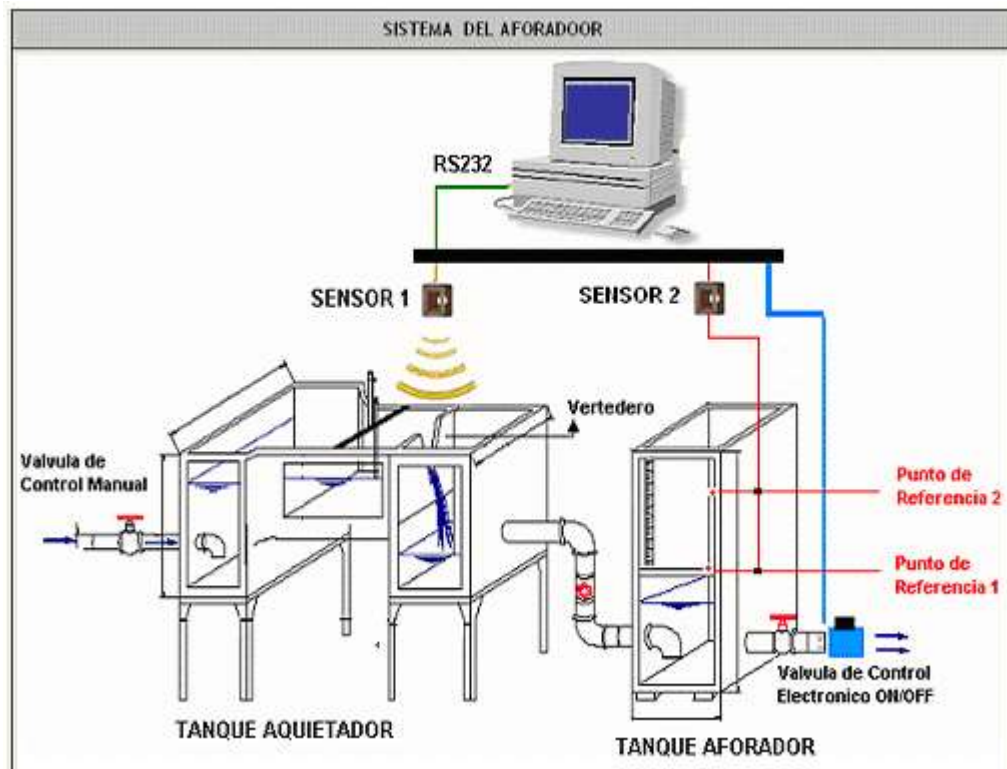


Figura 30. Ventana Sistema del Aforo.

En conjunto los módulos ya descritos dan la solución software al problema planteado. Unida esta solución al hardware de monitoreo, completa el objetivo de este trabajo. El código completo del sistema software desarrollado para este proyecto se encuentra en el Anexo B de este escrito.

4. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Se realiza a continuación una descripción de algunos parámetros que son fundamentales y que se deben tener en cuenta para cualquier desarrollo, en particular en el campo del ultrasonido.

Una observación que debe ser siempre tenida en cuenta es la adecuada posición de los transductores de ultrasonido. Comenzando por el espaciamiento entre transmisor y receptor, ya que los parámetros de radiación de cada uno de estos dispositivos pueden afectar la adecuada detección o aumentar la ya mencionada zona muerta. Se recomienda que sea aproximadamente 1.5cm dependiendo esto del tipo de transductor a usar. Otro punto importante es la ubicación que se debe tener respecto al obstáculo a medir, como ya se mencionó la superficie plana de los transductores debe estar paralelamente enfrentada con la superficie del obstáculo.

Si se cambia la referencia de transductores para realizar el diseño del sensor sugerido en este proyecto, se recomienda realizar un estudio previo de estos dispositivos, siguiendo las pautas descritas en el literal Acondicionamiento de Señal que se encuentra en este escrito en el capítulo 2.

Es de vital importancia realizar una calibración al sensor cuando se desea medir con una alta precisión y en un rango muy cercano a los transductores de ultrasonido. Considerando también que uno de los factores que más afecta la señal de ultrasonido es la temperatura, se debe compensar la medida de distancia por este factor.

Para lograr obtener las ecuaciones de caudal mas adecuadas en el proceso de automatización de la práctica de vertederos de cresta delgada, se concluyó que se debía hacer una calibración en un rango de 1 metro con intervalos de 5mm y utilizar la técnica de los mínimos cuadrados para lograr este objetivo. También se observó que era necesario disminuir al mínimo la intervención humana en el proceso, para lo cual se adecuo una válvula de cierre y apertura en el tanque aforador. Todos los cálculos y compensaciones de carácter físico y matemático son realizados por el software desarrollado para este proyecto.

En razón a un continuo y rápido desarrollo de nuevas tecnologías, quedamos sometidos a utilizar en nuestro medio productos ya desarrollados y relegar a segundo plano el desarrollo de nuevos productos. Entendiendo que esto es una pauta que no tiene discusión; este proyecto se constituye en un ejemplo de lo que se puede lograr al proponerse desarrollar productos con el objetivo de aprovechar los recursos que se tienen y el potencial humano disponible.

El hecho de haber trabajado en un proyecto basado en una tecnología con muy pocos antecedentes en la Facultad se constituyo en un reto con gran probabilidad de no obtener éxito, sin embargo, el objetivo propuesto se ha logrado pese a las

dificultades encontradas, y queda la satisfacción que se deja la infraestructura necesaria tanto teórica como práctica para futuros desarrollos en este campo.

Después de la experiencia lograda se tiene como conclusión importante, la necesidad de dar mayor apoyo e importancia a proyectos que involucren desarrollo de nuevos productos en cualquier campo de la electrónica; logrando un mayor campo de acción a nivel de trabajo de pregrado en aspectos relacionados con instrumentación y control.

BIBLIOGRAFIA

Azevedo N., J. M. y Acosta A., G. Manual de Hidráulica. Sexta edición. Harla, S. A. de C.V. México, 1976.

Sotelo A., G., Hidráulica general. Volumen I, Editorial LIMUSA S.A. Sexta edición, México, 1982.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA, DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA. ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS I, ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE VERTEDEROS II, 1998.

Sergio Gwirc, Fernando Ferdeghini, Agata Comastri, Daniel Lupi. **SENSORES ULTRASÓNICOS: RESPUESTA A DISTINTAS FORMAS DE ONDA DE EMISIÓN.** San Martín, Buenos Aires, Argentina, 2003.

Fernando Ferdeghini, Diego Brengi, Daniel Lupi. **SISTEMA DE DETECCIÓN COMBINADO PARA SENSORES ULTRASÓNICOS.** San Martín, Buenos Aires, Argentina, 2003.

Daniel O. Lupi, Diego J. Brengi y Andrés Trapanotto. **Sensor de Temperatura Ambiental por Ultrasonido.** San Martín, Buenos Aires, Argentina, 2003.

Bernardo Hernández Lozano Bernardo, Juan Carlos Frias Rodríguez, Oscar Roberto Ortiz Flores, Luis Enrique Frias Rosales. **SISTEMA MODULAR ULTRASÓNIDO.** Madrid, España, 2003.

Microchip Technology Inc. **PIC16F87X Data Sheet** 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers. USA, 2001.

MICROCONTROLADORES PIC. Diseño práctico de aplicaciones. **SENGUNDA PARTE: PIC16F87X.** José Maria Angulo Usategui, Susana Romero Yesa, Ignacio Angulo Martines. McGRAW HIL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA.S.A.U. Segunda Edición en español. España, 2000.

Ultrasonic Range Meter. http://www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_pic6_6.htm.