

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL PARA LA PREPARACIÓN DE LÍQUIDOS DIALIZANTES BASADO EN SEÑALES ULTRASÓNICAS

LUIS ALBERTO RESTREPO ÁLVAREZ  
JOHN DEJESÚS CARDONA SALAZAR



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PEREIRA  
2015

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL PARA LA PREPARACIÓN  
DE LÍQUIDOS DIALIZANTES BASADO EN SEÑALES ULTRASÓNICAS**

LUIS ALBERTO RESTREPO ÁLVAREZ

JOHN DE JESÚS CARDONA SALAZAR

Trabajo de grado para optar a título de tecnólogo en Mecatrónica

Director

Ph.D. Eduardo Giraldo Suarez

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE TECNOLOGÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PEREIRA  
2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Pereira, Febrero de 2015

## DEDICATORIA

*A Dios por regalarnos un poco de sabiduría, a nuestros padres por su apoyo, esmero y dedicación para poder salir adelante en esta esta etapa de nuestras vidas, a nuestras familias por estar ahí cuando más los necesitamos.*

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	2
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>4. GLOSARIO</b> .....	5
<b>5. PURIFICACIÓN DE AGUA PARA HEMODIALISIS</b> .....	7
5.1. LÍQUIDO DE DIÁLISIS.....	7
5.2. PREPARACIÓN DE LOS LÍQUIDOS DIALIZANTES.....	8
<b>6. CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ULTRASONICAS</b> .....	10
6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS. ....	11
6.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y LONGITUD DE ONDA.....	12
6.3. Propiedades de las señales ultrasónicas.....	14
6.4. Reflexión, refracción y la transmisión.....	14
6.5. Transmisor y receptor ultrasónico (transductor).....	15
6.6. El elemento activo.....	16
6.7. El apoyo (backing).....	16
6.8. Placa protectora.....	17
<b>7. SENSOR</b> .....	18
7.1. SENSOR DE ULTRASONIDO.....	18
7.2. FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR ULTRASÓNICO.....	19
<b>8. SELECCIÓN DEL SENSOR</b> .....	23
8.1 FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR ULTRASONICO SFR05.....	23
<b>9. TANQUE UTILIZADO PARA MEZCLAS DE LIQUIDOS DIALIZANTES</b> .....	26
<b>10. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA</b> .....	28
10.1. SISTEMA.....	28
10.2. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	28
10.3. Sistema de primer orden.....	29
10.4. Modelamiento del sistema dinámico.....	30
10.5. Sistema en lazo abierto.....	33
<b>11. CONTROLADORES PID</b> .....	34

11.1. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL.....	36
<b>12. CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>

## INDINCE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Umbral de audibilidad.....	10
Figura 2. Tipos de ondas.....	11
Figura 3. Transductor ultrasónico.....	16
Figura 4. Sensor ultrasónico.....	19
Figura 5. Funcionamiento sensor ultrasónico.....	20
Figura 6. Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido.....	21
Figura 7. Márgenes de detección de un sensor ultrasónico.....	22
Figura 8. Sensor ultrasónico SRF05.....	24
Figura 9. Diagrama de conexiones.....	25
Figura 10. Tanque.....	26
Figura 11. Motobomba utilizada para impulsar el fluido.....	27
Figura 12. Características de la motobomba.....	27
Figura 13. Sistema dinámico para controlar nivel.....	31
Figura 14. Esquema del sistema físico del llenado de un tanque.....	32
Figura 15. Sistema en lazo abierto.....	33
Figura 16. Respuesta de las acciones de control p, pi, pid a una entrada de escalón unitario.....	35
Figura 17. Respuesta de la planta en lazo abierto.....	37
Figura 18. Diagrama de bloques del sistema lazo abierto utilizando Simulin .....	38
Figura 19. Respuesta del sistema en lazo abierto utilizando Simulink.....	38
Figura 20. Diagrama de bloques del sistema en Lazo cerrado con control PID tune utilizando Simulink.....	39
Figura 21. Respuesta del sistema en lazo cerrado con control PID utilizando Simulink.....	39
Figura 22. Valores obtenidos del controlador PID en simulink.....	40
Figura 23. Respuesta del sistema simulado en Matlab.....	41
Figura 24. Circuito eléctrico del sistema.....	42

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de ondas.....	13
Tabla 2. Velocidad de las ondas ultrasónicas.....	14
Tabla 3. Efecto de las acciones de control $K_p$ $K_i$ $K_d$ , y sobre el tiempo de subida sobre el sobrepaso y sobre el error en estado estacionario.....	36



## RESUMEN

Este proyecto de grado fue realizado por John de Jesús Cardona Salazar y Luis Alberto Restrepo Álvarez.

Actualmente en Colombia algunas clínicas prestadoras de servicios de tratamientos para enfermedades renales continúan utilizando métodos desactualizados para el llenado de tanques donde se realizan las mezclas de líquidos para las hemodiálisis, estas mezclas deben ser exactas por lo que un error en las cantidades de los concentrados (ácido, bicarbonato) utilizados en estos procedimientos puede producir una descompensación del sistema renal del paciente. La propuesta de este diseño permite automatizar el llenado del tanque garantizando así la calidad de los líquidos dializantes y la optimización del servicio que se presta en la entidad.

Adicionalmente el diseño de este sistema puede ser implementado en diversos procesos industriales en los cuales se necesite el control de nivel de llenado de tanques.

Para asegurar alta confiabilidad al momento del llenado del tanque se optó por utilizar un sensor ultrasónico, se decidió por este tipo de dispositivos ya que los líquidos dializantes no pueden entrar en contacto con agentes externos al tanque, para evitar pirógenos y bacterias que podrían afectar a los pacientes.

Luego se procede a diseñar el control PID y simular la dinámica del sistema, se utilizó el software Matlab para definir los parámetros del sistema y la simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a que las pequeñas, medianas y grandes industrias requieren sistemas de producción más eficientes, surge la necesidad de implementar sistemas de control automáticos.

En estos tipos de sistemas, es de vital importancia que los dispositivos que actúan como elementos integradores del mismo, ofrezcan un nivel de seguridad que permita garantizar el desarrollo completo del proceso en ejecución en industrias tales como las alimenticias, refresqueras, manufactureras, comerciales, entre otras.

Esta es la razón por la cual se deben utilizar señales de un sensor ultrasónico en la medida de nivel de líquidos en los sistemas hidráulicos.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Modelar, diseñar y simular un sistema de control utilizando señales ultrasónicas, para el llenado automático de un tanque en la preparación de líquidos dializantes.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Modelar matemáticamente los elementos del sistema de llenado del tanque, y obtener la función de transferencia del sistema.

Diseño del controlador PID para la automatización del proceso de llenado del tanque.

Simular la dinámica del sistema de control de llenado del tanque utilizando Matlab.

### 3. ANTECEDENTES

Entre los trabajos realizados con señales ultrasónicas se destacan:

- **Construcción de un módulo didáctico para el control de nivel de Líquidos.**

El Módulo de Control de Nivel de Líquidos es un equipo que permite realizar acciones de control sobre la variable nivel de líquido de un tanque a través de un sistema de control cuyo elemento principal es un PLC que comanda la apertura de una válvula ubicada a la salida del tanque, y la activación de una bomba que suministra líquido a este tanque desde un tanque de almacenamiento.

- **Prototipo industrial de un medidor ultrasónico de nivel.**

Este artículo presenta el diseño e implementación de un prototipo de sistema de medición de nivel para fases aire-líquido o aire-sólido, configurable por el usuario y con especificaciones comparables a las de los equipos industriales disponibles comercialmente. El sistema se basa en la utilización de un transductor de ultrasonido, por medio del cual se envía un corto pulso de onda ultrasónica hacia un objetivo, el cual refleja la onda sonora hacia el sensor. El sistema entonces determina el tiempo de retorno del eco (tiempo de vuelo) y calcula la distancia del objetivo utilizando como referencia la velocidad del sonido en el medio. Se propone un método analógico de medición de tiempo de vuelo que permite obtener resoluciones menores a una longitud de onda de la señal transmitida, además de mejorar la respuesta del sistema ante cambios ambientales. El conjunto sensor-acondicionador-interfaz, constituyen un instrumento inteligente con capacidades de medición, validación, configuración, calibración y comunicaciones digitales.

## 4. GLOSARIO

**Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Es la distancia ocupada por una onda completa.

**Frecuencia (F):** Se define como el número de oscilaciones (vibraciones o ciclo) de una partícula por unidad de tiempo (segundo), su unidad es el Hertzio (Hz), un hertzio es una oscilación por segundo.

**Periodo (T):** Es el tiempo de una oscilación completa, es decir lo que tarda el sonido en recorrer una longitud de onda.

**Sinterización:** es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

**Vibración:** Se denomina vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre un medio continuo (o posición de equilibrio). Afecta a materiales sólidos, líquidos y gaseosos. La vibración es la causa de generación de todo tipo de ondas. Toda fuerza que se aplique sobre un objeto genera perturbación. En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la "oscilación" o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de "equilibrio" es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

**Impedancia acústica:** La impedancia acústica (Z) es una propiedad de estado intensiva. Es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este y por lo tanto el equivalente a la impedancia eléctrica, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio. Se define como la razón entre la presión sonora (p) y la velocidad de las partículas (v) de un medio material.

**Sensor:** Es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transductible que es función de la variable de medida. La ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos.

**Transmisor:** Un transmisor es un equipo que emite una señal, código o mensaje a través de un medio.

**Receptor:** receptor al dispositivo electrónico que facilita y permite la recuperación de las señales.

**Atenuación:** Es la pérdida de energía que sufre los ultrasonidos al atravesar un medio.

**Cristalografía:** es la ciencia que se dedica al estudio y resolución de estructuras cristalinas. La mayoría de los minerales adoptan formas cristalinas cuando se forman en condiciones favorables. La cristalografía es el estudio del crecimiento, la forma y la geometría de estos cristales.

**Interface:** Circuito o conector que hace posible el "entendimiento" entre dos elementos de hardware, es decir, permite su comunicación.

**Reflectividad:** mide la relación entre la amplitud del campo reflejado electromagnético respecto a la amplitud del campo incidente

## 5. PURIFICACIÓN DE AGUA PARA HEMODIALISIS

El tratamiento para purificar el agua es un proceso en el cual se deben de minimizar los errores ya que cualquier anomalía podría provocar un problema de salud pública. En la actualidad existen diferentes procesos de purificación de agua ya sea para consumo humano el cual lo hacen los acueductos municipales, y también en el sector salud se necesita este tipo de proceso en especial en las unidades de hemodiálisis las cuales necesitan un tipo de agua especial para poder hacer sus tratamientos de diálisis. En este tipo de plantas de tratamiento el monitoreo debe ser constante ya que si cambia una variable por ejemplo de conductividad, de dureza o cloro podría ser muy perjudicial para los pacientes, de igual modo en estas plantas se preparan los líquidos dializantes los que una máquina especial que es conectada al paciente los mezcla con el agua tratada o agua permeada.

Los líquidos dializantes llevan una conductividad la cual no debe variar mucho según su valor estándar debe ser  $\pm 3$  mili Siemens, para que la conductividad este entre el valor estándar se necesita un nivel de agua permeada exacto para mezclar con los concentrados y de allí se crean los líquidos dializantes.

El concentrado de bicarbonato con agua tiene una conductividad de  $68 \pm 3$  mili Siemens y el concentrado de ácido con agua tiene una conductividad de  $164 \pm 3$  mili Siemens.

### 5.1 LÍQUIDO DE DIÁLISIS

El líquido de diálisis consiste en una solución electrolítica de composición similar a la del plasma normal, en la que no existe ninguna de las sustancias que se acumulan en el organismo en la insuficiencia renal, tales como urea, creatinina, ácido úrico y fosfatos. En los primeros años los amortiguadores del organismo se reponían en forma de acetato, el cual es metabolizado a bicarbonato en el ciclo de Krebs. Actualmente, los monitores de diálisis permiten la diálisis con bicarbonato, lo que supone una gran ventaja para aquellos pacientes en los que el acetato no se metaboliza rápidamente, provocando hipotensión arterial intensa por vasodilatación arteriolar y disminución de la contractilidad del miocardio.

La alta concentración de glucosa se utiliza para alcanzar una osmolaridad alta, isotónica con la del plasma. El líquido de diálisis se obtiene mezclando agua previamente desionizada con un concentrado de electrolitos, preparado comercialmente, en una proporción ya establecida para que su composición sea la deseada. Al mismo tiempo es importante que el líquido esté a una temperatura adecuada, generalmente  $37^{\circ}\text{C}$ , para evitar así pérdidas o ganancias de calor en el paciente (salvo que éste sea el fin que persigamos).

## 5.2 PREPARACION DE LOS LIQUIDOS DIALIZANTES

### CONTENIDO O BASE TEÓRICA

Una de las metas perseguidas con la aplicación de los nuevos conceptos en cuanto a adecuación de diálisis es evitar en lo posible el deterioro del paciente y garantizar la tolerancia, biocompatibilidad, mejorar su estado nutricional, o en otras palabras, ofrecer rehabilitación y calidad de vida.

Para obtener una diálisis adecuada no basta establecer la dosis de diálisis apropiada y cumplirla, sino que es necesario contar con ciertas condiciones mínimas ideales entre las cuales cuenta: la solución para el dializado, en los actuales momentos, el más recomendado por los beneficios para el paciente, es a base de bicarbonato con una concentración de  $\text{Na}^+ \geq 142$  meq, sin pirógenos y con un flujo del líquido de diálisis de 500 ml/min.

Cuando se determina la adecuación de la hemodiálisis hay que tener en cuenta al individuo en forma global y a su vez, la individualización del tratamiento, en cuanto a aspectos como el uso de bicarbonato en el líquido de diálisis el cual corrige la acidosis, aunque también hay que evitar la alcalosis ya que favorecen la aparición de arritmias. El líquido de diálisis ha de ser ultra puro para evitar el paso de endotoxinas o contaminantes.

**Concentrado para hemodiálisis:** Para depurar la sangre mediante diálisis se requiere de una solución líquida compatible con el plasma sanguíneo, para ello se debe disponer de agua previamente tratada, o sea químicamente pura, y de electrolitos, los que se denominan “concentrado de diálisis”. Los líquidos de diálisis se dividen de acuerdo al tampón que empleen:

**Acetato:** El acetato se metaboliza en el hígado a bicarbonato, la capacidad metabólica máxima de un sujeto normal es de 3 mmol/kg/hora; lo que disminuye significativamente en personas de poca masa muscular y/o patologías asociadas, es un factor que puede originar efectos secundarios e insuficiente corrección de la acidosis. El acetato actúa alcalinizando la sangre. Al taponar los hidrogeniones.

**Bicarbonato:** El bicarbonato se genera por una reacción reversible de disociación de ácido carbónico. Para evitar la precipitación de las sales cálcicas, el concentrado de diálisis se suministra en dos contenedores, uno con el concentrado ácido (glucosa y electrolito y el otro, con el bicarbonato).

Para elaborar el “Baño de diálisis” el monitor mezcla concentrado y agua en una proporción de 1:34 partes, proceso que se realiza internamente a través de la bomba de proporción, lo cual se verificó observando y midiendo la conductividad.

La composición final del dializador es:

- Sodio: 135 – 145 meq/l
- Potasio: 0 – 2 meq/l



- Calcio: 2,5 – 1 meq/l
- Magnesio: 0,5 – 1 meq/l
- Cloro: 100 – 119 meq/l
- Acetato: 2 – 4 meq/l
- Glucosa: 200 mgrs%

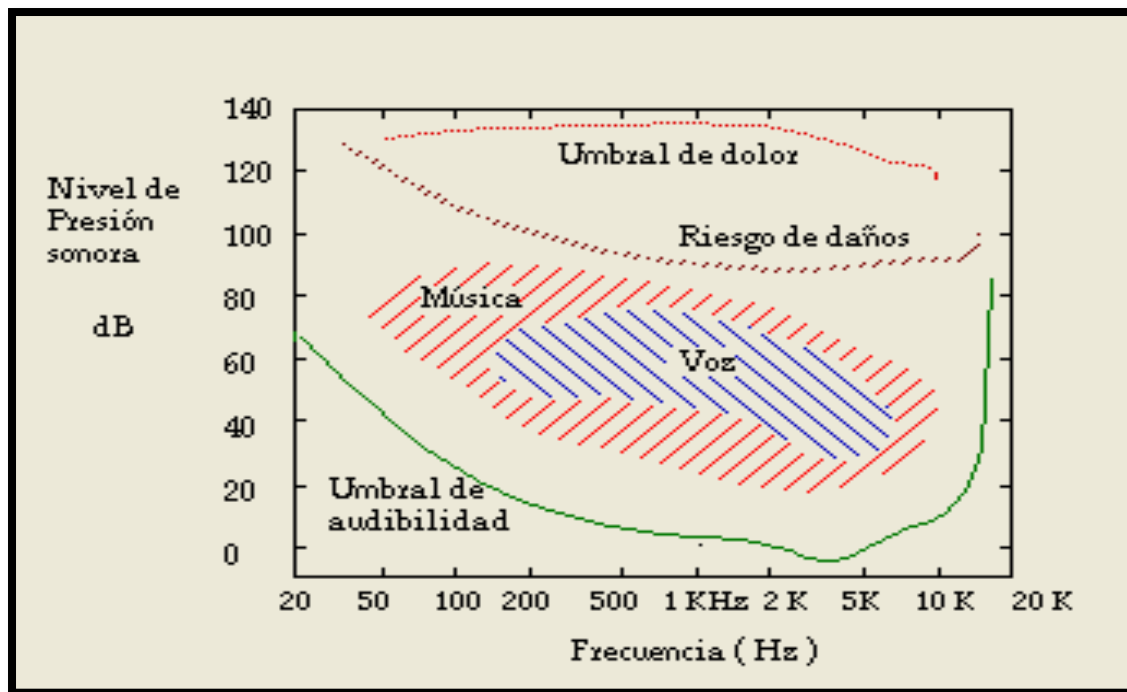
En caso de uso de concentrado con bicarbonato: 30 – 38 meq. [7]

## 6. CARACTERISTICAS DE LAS ONDAS ULTRASONICAS

Las ondas de ultra sonido son ondas electromagnéticas que pueden propagarse a través de diferentes medios como son, líquido, sólido o gaseoso. La velocidad con que se propagan y los efectos de ésta, dependen principalmente de la viscosidad, densidad y elasticidad del medio por el que viajan; es por esta razón que las ondas de ultra sonido son altamente utilizadas en aplicaciones industriales, militares y de medida. [4]

El rango de frecuencia audible para el ser humano se encuentra entre 16Hz y 20kHz. La frecuencia de la energía ultrasónica empieza desde el rango más alto de frecuencia audible (cerca de 20kHz) y la banda de ultra-alta frecuencia (UHF, por encima de 1GHz), que es usada para las telecomunicaciones.

Figura 1.Umbral de audibilidad



Fuente: Zwicker, E. y Fastl, H.: Psychoacoustics: Facts and Models, Springer, Berlín, 1990.

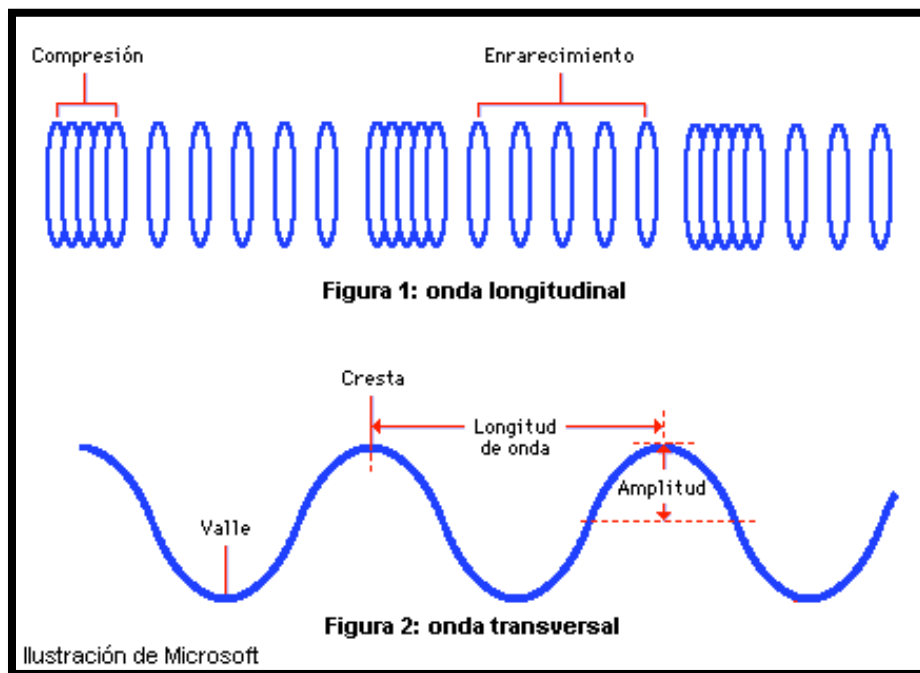
Las ondas ultrasónicas viajan prácticamente a la misma velocidad que las ondas de sonido. Los órdenes de magnitud para el aire son de varios centenares de metros por segundo, para los sólidos de varios miles de metros por segundo (En el Aluminio está comprendido alrededor de 5000 m/s.) y de 1500 m/s en el agua. [4] Sin embargo, una onda ultrasónica de 1 MHz se atenúa mucho más rápidamente que una onda de sonido común.

Generalmente para evitar la atenuación por reflexión de las ondas ultrasónicas se emplean líquidos o geles que evitan la introducción de aire entre el aplicador y la piel. [4]

## 6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS

- Ondas Longitudinales o de dilatación: Son aquellas que hacen variar el volumen del material a través del cual se propagan; las partículas vibran en la dirección de propagación de la onda, estas ondas se propagan en los tres medios (Gas, líquido y sólido).

Figura 2. Tipos de ondas



Fuente: Benson H., University Physics, United States, John Wiley & Sons, 1996.

- Ondas Transversales o de distorsión: Son aquellas que no provocan variación en el volumen aunque los límites del medio pueden ser modificados, las partículas vibran perpendicularmente en la dirección de propagación de la onda, estas ondas se propagan únicamente en los sólidos y muy poco en los líquidos.

- Ondas Superficiales: Es una combinación de las anteriores, y se trata de ondas que se desplazan una distancia muy pequeña de la superficie del medio, los movimientos de las partículas forman elipses en un plano. [1]

## 6.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN Y LONGITUD DE ONDA

Velocidad de propagación o velocidad acústica (V), es la velocidad de transmisión de la energía sonora a través de un medio, está determinada por la distancia recorrida por la onda dividida por el tiempo empleado para recorrer esa distancia. La velocidad de los ultrasonidos en un medio depende de la densidad y elasticidad del mismo, que a su vez varían con la temperatura; la relación es directa, a mayor densidad del medio mayor será la velocidad de propagación de los ultrasonidos. [1]

La relación entre la velocidad de propagación ultrasónica C, la longitud de onda y la frecuencia son expresadas en la siguiente ecuación 1:

$$C = \lambda * f \quad (1)$$

**Tabla 1. Tipos de ondas**

Tipo de onda	Medio de Propagación			Movimiento de la partícula	Aplicaciones
	Gas	Líquido	Sólido		
Longitudinal	Si	Si	Si	Compresión y relajación a lo largo del eje de propagación.	Pruebas, Mediciones
Transversal	No	Muy Poco	Si	Desplazamiento perpendicular al eje de propagación.	Pruebas, Soldaduras Resonancia
Superficie	No	No	Si	Elíptico con alta atenuación por debajo de la superficie.	Pruebas de superficie para partes de difícil acceso

Fuente: Benson H., University Physics, United States, John Wiley & Sons, 1996.

C = velocidad de la onda en m/s

f = frecuencia en Hertz (Hz)

$\lambda$  = longitud de onda en metros (m).

También se puede expresar como:

$$C = \lambda f \quad \text{donde} \quad f = 1/T \quad (2)$$

T = período de la onda.

La propagación de la velocidad de la onda ultrasónica en los medios se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2. Velocidad de las ondas ultrasónicas**

MEDIO	VELOCIDAD DE ONDA LONGITUDINAL * 10 <sup>5</sup>	DENSIDAD ρg/cm <sup>3</sup>	IMPEDANCIA ACUSTICA ρc*10 <sup>5</sup>
ALUMINIO	6,22	2,65	1,7
ACERO	5,81	7,8	4,76
NIKEL	5,6	8,9	4,98
MAGNESIO	4,33	1,74	0,926
COBRE	4,62	8,93	4,11
BRONCE	4,43	8,5	3,65
PLOMO	2,13	11,4	2,73
MERCURIO	1,46	13,6	1,93
CRISTAL	4,9 -5,9	2,5-5,9	1,81
POLIVINILO	2,67	1,1	0,924
MICARTA	2,59	1,4	0,363
AGUA	1,43	1,00	0,143
ACEITE	1,39	0,92	0,128
AIRE	0,331	0,0012	0,000042

Fuente: Benson H., University Physics, United States, John Wiley & Sons, 1996.

### 6.3. Propiedades de las señales ultrasónicas

Reflexión, refracción, difracción y dispersión son fenómenos que afectan todas las ondas y definen su comportamiento. Estos fenómenos suceden cuando las ondas inciden sobre superficies de diferentes densidades. [4]

### 6.4. Reflexión, refracción y la transmisión

Cuando una onda ultrasónica se propaga a través de una interface entre dos medios, una parte de la energía transmitida será refleja por la interfaz y el resto puede ser transmitido a través de la interfaz. La impedancia acústica  $Z$  del medio determina la intensidad de la onda de reflexión o de transmisión. La impedancia acústica  $Z$  se define como el producto de la densidad del medio  $\rho$  y la velocidad

del sonido C en el medio. Si la onda ultrasónica se transmite a la interfaz entre los diferentes medios de comunicación, la reflectividad  $\gamma$  puede ser determinada por la siguiente ecuación. [4]

$$\gamma = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad 15.1 \quad (3)$$

La transmisividad T de la onda ultrasónica está dada por:

$$T = 1 - \gamma^2 = 1 - \left[ \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \right]^2 = \frac{(4Z_1Z_2)}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad 15.2 \quad (4)$$

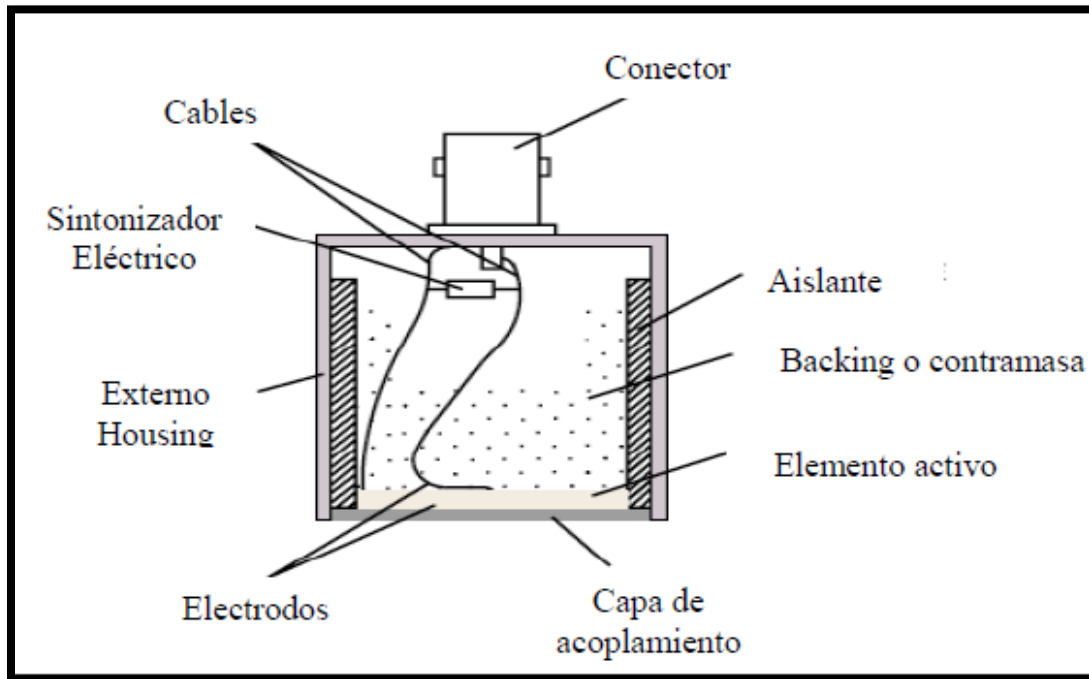
## 6.5. Transmisor y receptor ultrasónico (transductor)

### Transductores

El transductor de ultrasonido que genera la onda de presión está formado por un material piezoeléctrico, éste transmite ondas de presión generadas cuando un potencial eléctrico es aplicado a través del material. Como su efecto es reversible, el mismo transductor puede ser usado como receptor. Los polímeros cristalinos o semi-cristalinos como el fluoruro de polivinilideno, cuarzo-Titanato de bario, Circonato de Titanio (PZT) son los más usados.

Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra. Un transductor ultrasónico convierte energía eléctrica en energía mecánica, en forma de sonido y viceversa. Los componentes principales son el elemento activo, el apoyo (*backing*) y una placa protectora (*wear plate*). [2]

**Figura 3. Transductor ultrasónico**



Fuente: Cuzco Silva, Edgar Giovanni; "CONTROL Y MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS MEDIANTE INTOUCH"; Mayo 2001

### **6.6. El elemento activo**

El elemento activo, es un material piezo o ferro-eléctrico, que convierte la energía eléctrica de un pulso de excitación en energía ultrasónica. Los materiales usados comúnmente son cerámicas polarizadas que son cortadas en numerosas maneras para producir diferentes formas de onda. Actualmente se están utilizando nuevos materiales como piezo-polímeros y compuestos. [2]

### **6.7. El apoyo (*backing*)**

El apoyo es usualmente un fuerte atenuador, un material de alta densidad usado para controlar las vibraciones del transductor absorbiendo la energía radiada por la cara trasera del elemento activo. Cuando la impedancia acústica del apoyo se iguala con la impedancia acústica del elemento activo, el resultado será un transductor fuertemente amortiguado, con un buen rango de resolución pero con una baja amplitud de señal. Si existe diferencia entre la impedancia acústica del elemento activo y el apoyo, mayor energía de sonido será emitida hacia el material en prueba. Este último resultado será un transductor con menor resolución debido



a la mayor duración de la onda, pero con una mayor amplitud de señal o sensibilidad. [2]

### **6.8. Placa protectora**

El propósito básico de la placa protectora es proteger el elemento transductor del entorno. En el caso de transductores de contacto, la placa protectora debe ser duradera y resistente a la corrosión. Para algunos transductores, como los de inmersión, los de emisión angular (*angle beam*) y los de línea de demora (*delay line*), la placa protectora tiene el propósito adicional de servir de transformador acústico entre la alta impedancia acústica del elemento activo y el agua, la cuña (*wedge*) o la línea de demora (*delay line*).

Esto se consigue seleccionando una capa de un espesor de  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda emitida ( $\lambda/4$ ) y de la deseada impedancia acústica (el elemento activo es nominalmente de  $\frac{1}{2}$  de longitud de onda). La elección de la superficie de la placa estará basada en la idea de la superposición, que permite que las ondas generadas por el elemento activo estén en fase con la onda reverberando en la capa de unión. Cuando las señales están en fase, sus amplitudes se suman, dando una onda de mayor amplitud que penetra en la pieza a prueba. Si un transductor no está firmemente controlado o diseñado con cuidado y los materiales no son apropiados y las ondas de sonido no están en fase, causará una ruptura en el frente de las ondas sonoras. [2]

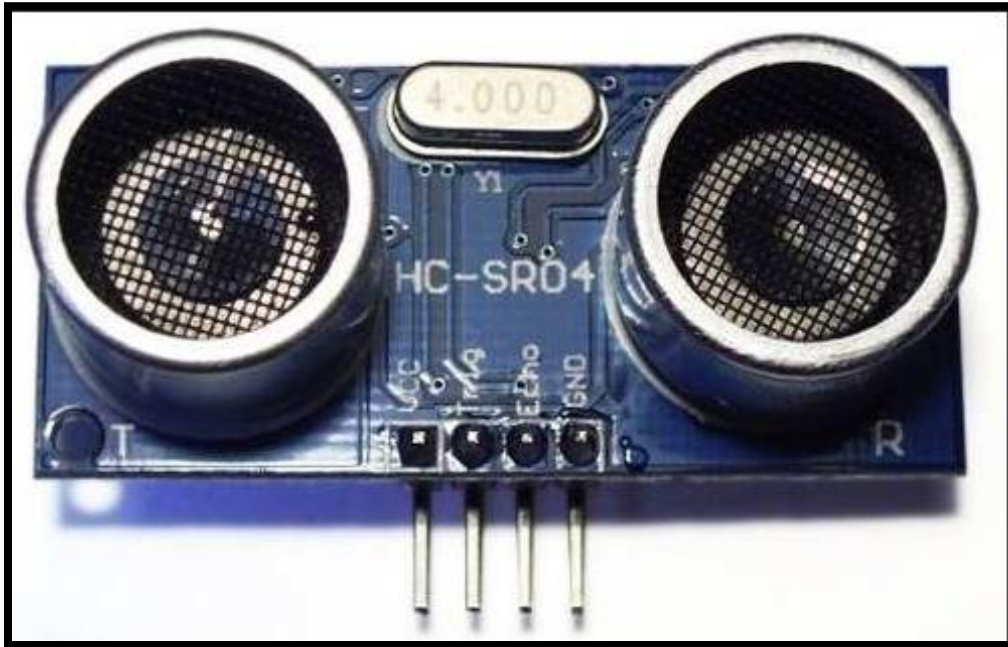
## **7. SENSOR**

Es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. Para el caso de magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica, una capacidad eléctrica, una tensión eléctrica, una corriente eléctrica, etc.

### **7.1. SENSOR DE ULTRASONIDO**

En la figura 4 se muestra un sensor ultrasónico. Los ultrasonidos son una radiación mecánica de frecuencia superior a los audibles (20Khz). Toda radiación al incidir sobre un objeto, en parte se refleja, en parte se transmite y en parte es absorbida. Si además hay un movimiento relativo entre la fuente de radiación y el reflector, se produce un cambio de frecuencia de la radiación (Efecto Doppler). Todas estas propiedades de la interacción de una radiación con un objeto han sido aplicadas en mayor o menor grado a la medida de diversas magnitudes físicas. El poder de penetración de la radiación permite que muchas de estas aplicaciones sean totalmente no invasivas, es decir, que no acceda al interior del recinto donde se producen los cambios que se desean detectar [1]. En función del tiempo que tarda el sonido en rebotar y volver, se calcula la distancia a la que se encuentra dicho objeto.

**Figura 4. Sensor ultrasónico**



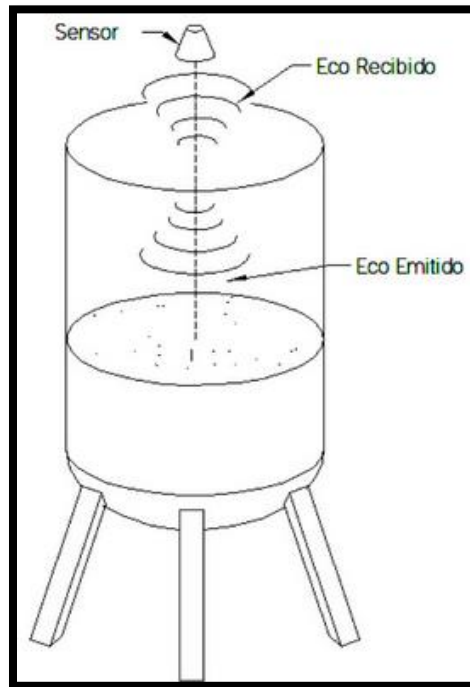
Fuente: Figura. Disponible en <http://www.cgtay.com/arduino/using-the-hc-sr04-ultrasonic-distance-sensor-with-arduino-uno/.jpg>

## **7.2. FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR ULTRASÓNICO**

El ultrasonido es sonido exactamente igual al que escucha el ser humano normalmente, pero con una frecuencia mayor a la máxima audible por el oído humano. Ésta comienza desde unos 16 Hz y tiene un límite superior de aproximadamente 20 KHz, mientras que se va a utilizar sonido con una frecuencia de 40 KHz. A este tipo de sonidos es a lo que se denomina Ultrasonidos.

El funcionamiento básico de los sensores ultrasónicos como medidores de distancia se muestra en la figura 11, donde se tiene un receptor que emite un pulso de ultrasonido, el cual rebota sobre un determinado objeto y la reflexión de ese pulso es detectada por un receptor de ultrasonidos. [1]

**Figura 5. Funcionamiento sensor ultrasónico**



La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la ecuación: [1]

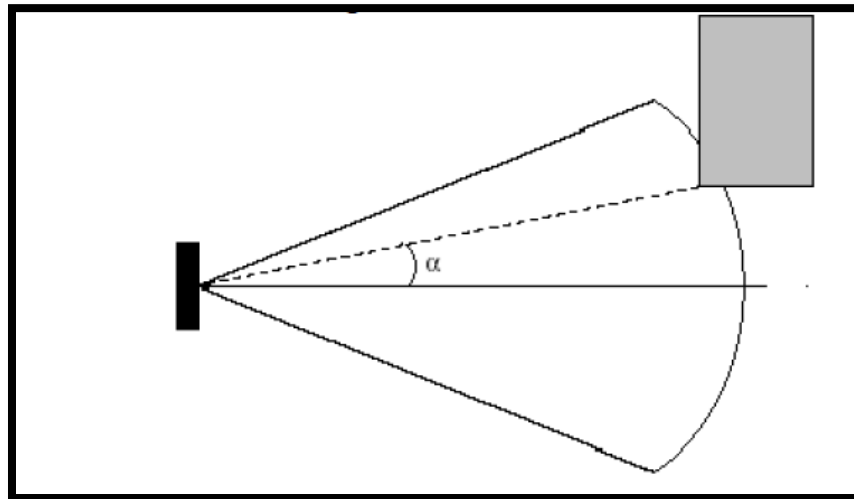
$$d = \frac{1}{2} V \cdot t \quad (5)$$

Donde V es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

A pesar de que su funcionamiento parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Por tanto, es necesario un conocimiento de las diversas fuentes de incertidumbre que afectan a las medidas para poder tratarlas de forma adecuada, minimizando su efecto en el conocimiento del entorno que se desea adquirir. Entre los diversos factores que alteran las lecturas que se realizan con los sensores de ultrasonido cabe destacar: [3]

El campo de actuación del pulso que se emite desde un transductor de ultrasonido tiene forma cónica. El eco que se recibe como respuesta a la reflexión del sonido indica la presencia del objeto más cercano que se encuentra dentro del cono acústico y no especifica en ningún momento la localización angular del mismo, como se muestra en la figura 6. Aunque la opción de que el objeto detectado esté sobre el eje central del cono acústico, la posibilidad que el eco se haya producido por un objeto presente en la periferia del eje central no es en absoluto despreciable y ha de ser tenida en cuenta y tratada convenientemente.

**Figura 6. Incertidumbre angular en la medida de un ultrasonido**

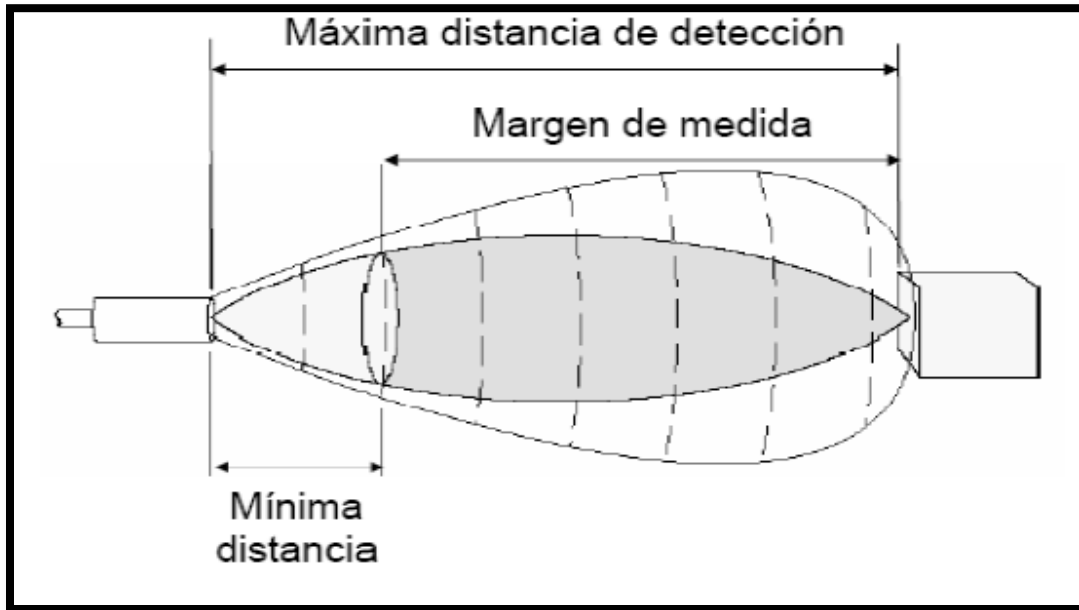


Fuente: Cuzco Silva, Edgar Giovanni; "CONTROL Y MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS MEDIANTE INTOUCH"; Mayo 2001

La cantidad de energía acústica reflejada por el obstáculo depende en gran medida de la estructura de su superficie. Para obtener una reflexión altamente difusa del obstáculo, el tamaño de las irregularidades sobre la superficie reflectora debe ser comparable a la longitud de onda de la onda de ultrasonido incidente.

En los sensores de ultrasónicos de bajo coste se utiliza el mismo transductor como emisor y receptor. Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. Esto implica que existe una distancia mínima  $d$  (proporcional al tiempo de relajación del transductor) a partir de la cual el sensor mide con precisión. Por lo general, todos los objetos que se encuentren por debajo de esta distancia,  $d$ , serán interpretados por el sistema como que están a una distancia igual a la distancia mínima, como se muestra en la figura 7. [3]

**Figura 7. Márgenes de detección de un sensor ultrasónico**



Fuente: Cuzco Silva, Edgar Giovanni; "CONTROL Y MEDICION DE NIVEL DE LIQUIDOS MEDIANTE INTOUCH"; Mayo 2001

Los factores ambientales tienen una gran repercusión sobre las medidas ya que las ondas de ultrasonido se mueven por un medio material que es el aire. La densidad del aire depende de la temperatura, influyendo este factor sobre la velocidad de propagación de la onda según la expresión:

$$V_s = V_{so} \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (6)$$

Siendo  $V_{so}$  la velocidad de propagación de la onda sonora a  $0^\circ\text{C}$ , y  $T$  la temperatura absoluta (grados Kelvin).

## 8. SELECCIÓN DEL SENSOR

Los sensores de ultrasonido son los más económicos, fáciles de manipular y pueden detectar objetos en el orden de los metros sin necesidad de algún filtro o adaptación especial.

Después de investigar en los mercados diferentes tipos de sensores existentes, se optó por elegir el sensor de ultrasonido SFR05 este está diseñado para aumentar la flexibilidad, el rango de medida y reducir costes, el rango de medida se aumenta de 3m a 4m.

El SFR05 dispone de un nuevo modo de operación que se selecciona simplemente conectando el pin "Modo" a GND. Dicho modo permite al SFR05 emplear un único pin de E/S que sirve tanto para ordenes de inicio o disparo, como para obtener la medida realizada (ECO).

Cuando el pin "Modo" no se emplea y se deja sin conectar, el SFR05 trabaja de la misma manera que el SFR04. Esto es, la señal de disparo y la salida de ECO se realizan por pines diferentes.

### 8.1. FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR ULTRASONICO SFR05

El SRF05, es un sensor de distancias por ultrasonidos desarrollado por la firma DEVANTECH Ltda. Capaz de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentra en un rango de 1,7 a 431 cm. [5]

El sensor funciona por ultrasonidos y contiene toda la electrónica encargada de hacer la medición. Su uso es tan sencillo como enviar el pulso de arranque y medir la anchura del pulso de retorno. De muy pequeño tamaño, el sensor se destaca por su bajo consumo, gran precisión y bajo precio.

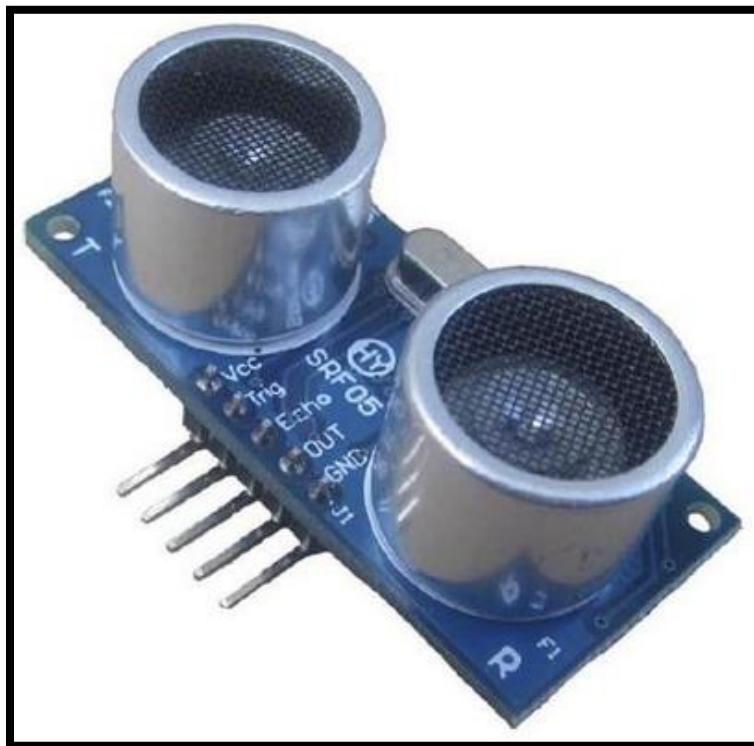
El sensor SRF05 funciona emitiendo impulsos de ultrasonidos inaudibles para el oído humano. Los impulsos emitidos viajan a la velocidad del sonido hasta alcanzar un objeto, entonces el sonido es reflejado y captado de nuevo por el receptor de ultrasonidos. Lo que hace el controlador incorporado es emitir una ráfaga de impulsos y a continuación empieza a contar el tiempo que tarda en llegar el eco. Este tiempo se traduce en un pulso de eco de anchura proporcional a la distancia a la que se encuentra el objeto. Registrando la duración del pulso es posible calcular la distancia en pulgadas, centímetros o en cualquier otra unidad de medida. Si no se detecta nada, entonces el SRF05 baja el nivel lógico de su línea de eco después de 30mS. [5]

El SRF05 proporciona un pulso de eco proporcional a la distancia. Si el ancho del pulso se mide en  $\mu\text{S}$ , el resultado se debe dividir entre 58 para saber el equivalente en centímetros, y entre 148 para saber el equivalente en pulgadas.

$\mu\text{S}/58=\text{cm}$  o  $\mu\text{S}/148=\text{pulgadas}$ . El SRF05 puede activarse cada 50mS, o 20 veces por segundo. Debería esperar 50ms antes de la siguiente activación, incluso si el SRF05 detecta un objeto cerca y el pulso del eco es más corto. De esta manera se

asegura que el "bip" ultrasónico ha desaparecido completamente y no provocará un falso eco en la siguiente medición de distancia. [5]

**Figura 8. Sensor ultrasónico SRF05**

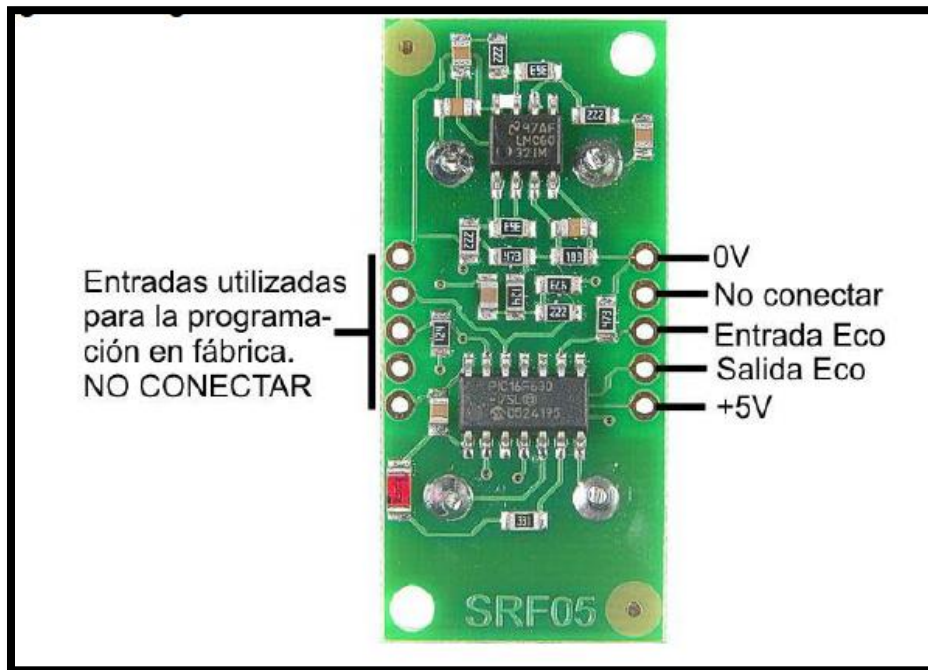


Fuente: Figura. Disponible en <http://www.hobbyist.co.nz/?q=ultrasonic-distance-sensor>

El diagrama de conexiones se puede observar en la figura 9.



Figura 9. Diagrama de conexiones



Fuente: Imagen. Disponible en <http://www.superrobotica.com/Imagenes/s320111bbig.jpg>

Desde un punto de vista práctico, lo que hay que hacer es mandar una señal de arranque en el pin 3 del SRF05 y después leer el ancho del impulso que proporciona en el pin 2. Externamente se aplica, por parte del usuario, un pulso de disparo o trigger de 10  $\mu$ S de duración mínima. Se inicia la secuencia. El módulo transmite un tren de pulsos o "burst" de 8 ciclos a 40KHz. En ese momento la señal de salida ECO pasa a nivel "1". Cuando la cápsula receptora recibe la señal transmitida como consecuencia de haber rebotado en un objeto (eco), esta salida pasa de nuevo a nivel "0". El usuario debe medir la duración del pulso de esta señal, es decir, el tiempo en que la señal eco se mantiene a "1". Con objeto de que el módulo se estabilice, se debe dejar un lapsus de tiempo de unos 20ms mínimo entre el momento en que la señal de eco pasa a "0" y un nuevo pulso de disparo que inicie el siguiente ciclo o medida. Esto permite realizar medidas cada 50ms o lo que es igual a 20 medidas por segundo. La duración del pulso eco de salida varía entre 100 $\mu$ s y 25ms, en función de la distancia entre las cápsulas del módulo y el objeto. La velocidad del sonido es de 29,15  $\mu$ s/cm que, como realiza un recorrido de ida y vuelta, queda establecida en 58,30 $\mu$ s/cm. Así pues el rango mínimo que se puede medir es de 1,7 cm (100 $\mu$ s/58) y el máximo de 431 cm (25ms/58). En la figura 13-23 se muestra el diagrama de tiempos y en la Tabla 2 se puede observar las características técnicas del sensor SRF05. [5]

## 9. TANQUE UTILIZADO PARA MEZCLAS DE LIQUIDOS DIALIZANTES

Figura 10. Tanque



Fuente: Imagen. Disponible en <http://www.colempaques.com/>

Para realizar la mezcla de los líquidos es necesario utilizar un tanque de 500 litros de capacidad (132.1 galones). Las medidas del tanque son 108 cm de altura y 86 cm de ancho, el tanque es de forma cilíndrica.

**Figura 11. Motobomba utilizada para impulsar el fluido**



Fuente: Imagen. Disponible en <http://www.codesolar.com/Energia-Solar/Energias-Renovables/Bombas-Agua/Pedrollo-Bomba-JCR-JCRM-1A.html>

Para impulsar el fluido hasta el tanque se utiliza una motobomba marca JCRM 10M\* - PEDROLLO autocebante, con un caudal garantizado de 80 l/min (4.8 m<sup>3</sup>/h).

**Figura 12. Características de la motobomba**

Modelo: JCRm 10M\*

Marca: Pedrollo

H.P. 1.0

Amperes: 11.5

Succión: 1-1/4"

Descarga: 1"

Carga Máxima: 44 Mts @ 5 LPM.

Carga Mínima: 18 Mts @ 80 LPM

\* Bomba 127/230v. Por seguridad de fábrica sale conectada a 230 V.

Fuente: Imagen. Disponible en <http://www.codesolar.com/Energia-Solar/Energias-Renovables/Bombas-Agua/Pedrollo-Bomba-JCR-JCRM-1A.html>

## 10. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

### 10.1. SISTEMA

Para poder emplear correctamente los sistemas de control es preciso conocer el comportamiento de los distintos parámetros que lo componen.

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Hay que tener en cuenta que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

Los problemas relacionados con los sistemas de control, son resueltos utilizando ecuaciones diferenciales e integrales con el tiempo como variable primaria e independiente. Los cálculos con este método son relativamente largos y complejos. Al emplear su representación en función de transferencia se simplifica y se facilita su simulación utilizando la programación en Matlab.

### 10.2. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo.

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de comprender la naturaleza del sistema.

Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema a diferencia de su descripción física.

Considérese el sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial 2:

## Ecuación 2. Ecuación diferencial

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} y' + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} x' + b_m y \quad (n \geq m) \quad (7)$$

Donde **y** es la salida del sistema y **X** es la entrada. La función de transferencia de este sistema es el coeficiente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada cuando todas las condiciones son cero.  
Función de transferencia:

## Ecuación 3. Función de transferencia

$$G(s) = \left\langle \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} \middle| \text{condiciones iniciales cero} \right\rangle \quad (8)$$

$$G(s) = \frac{b_0 s^{(m)} + b_1 s^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} s' + b_m}{a_0 s^{(n)} + a_1 s^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} s' + a_n} \quad (9)$$

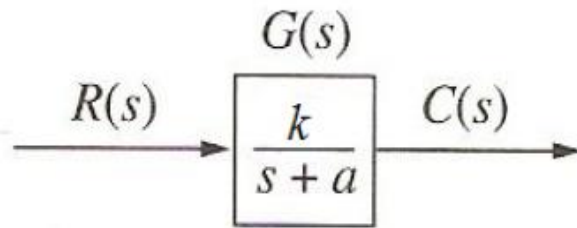
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (10)$$

A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar el sistema mediante ecuaciones algebraicas en s. si la potencia más alta de s es el denominador de la función de transferencia es igual a n, el sistema se denomina sistema de orden n-ésimo.

Generalmente los sistemas dinámicos se describen a continuación.

### 10.3. Sistema de primer orden

Un sistema de primer orden sin ceros puede ser descrito por la función de transferencia que se muestra a continuación, si la entrada es un escalón unitario, donde  $R(s) = 1/s$ , la transformada de Laplace de la respuesta de escalón unitaria es  $C(s)$ , donde:



$$C(s) = R(s) * G(s) = \frac{k}{s(s+a)} \quad (11)$$

$$G(s) = \frac{k}{(s+a)} = \frac{k/a}{\left(\frac{s}{a}+1\right)} = \frac{k/a}{\tau s+1} \quad (12)$$

Dónde:

$\tau = \frac{1}{a}$  Donde  $\tau$  es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63% del valor final

El termino  $1/a$  se llama constante de tiempo de la respuesta, donde la constante de tiempo es el tiempo que toma la respuesta de escalón unitario en alcanzar el 63% de su valor final.

#### 10.4. Modelamiento del sistema dinámico

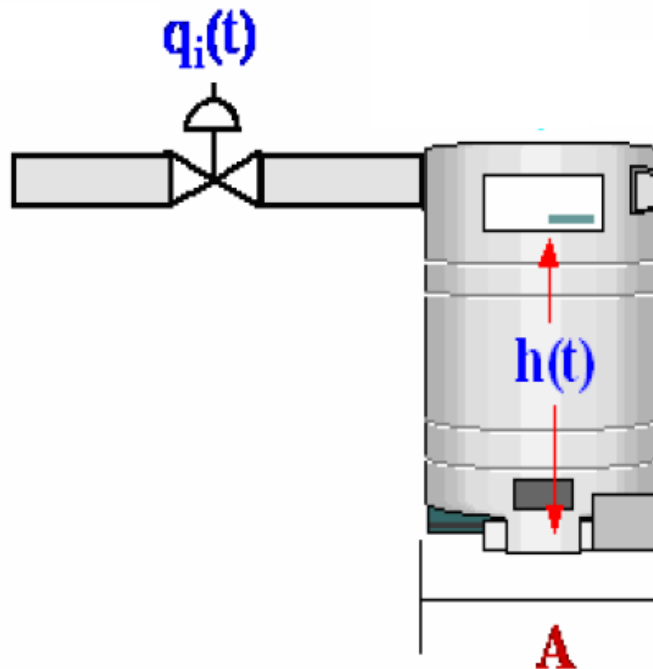
Para obtener una ecuación diferencial podemos utilizar:

- Leyes físicas: de acuerdo a la naturaleza del sistema, rigen la relación causal entre las variables de interés.
- Pruebas experimentales (análisis de la respuesta transitoria del sistema).

- Por analogías de comportamientos entre sistemas que guardan un comportamiento similar, a pesar de ser de naturaleza diferente.
- Aplicación de algoritmos y recursos computacionales para procesar los datos obtenidos de pruebas experimentales.

Una de las maneras para hallar la función de transferencia de un sistema es a través de las leyes físicas, a continuación se mostrara la ecuación fundamental de la función de transferencia a través de los parámetros físicos, cabe decir que para nuestro caso se utilizó una metodología experimenta

**Figura 13. Sistema dinámico para controlar nivel**



Dónde:

$q_i(t)$  = Caudal de entrada

$h(t)$  = Altura del tanque

$A$  = Área del tanque

Figura 14. Esquema del sistema físico del llenado de un tanque



*Acumulación = Caudal de entrada*  
 $Q_i = \frac{A \cdot dh}{dt} = \text{masa almacenada}$

Entonces

$$Q_i = \frac{A \cdot dh}{dt} \quad (13)$$

Realizando la transformada de Laplace queda la siguiente expresión:

$$Q_{i(s)} = Ahs(s) \quad (14)$$

$$\frac{h(s)}{Q_{i(s)}} = \frac{1}{A \cdot s} \quad \text{Función de transferencia} \quad (15)$$

La función de transferencia que se obtuvo anteriormente, hace referencia a la dinámica del sistema hidráulico.

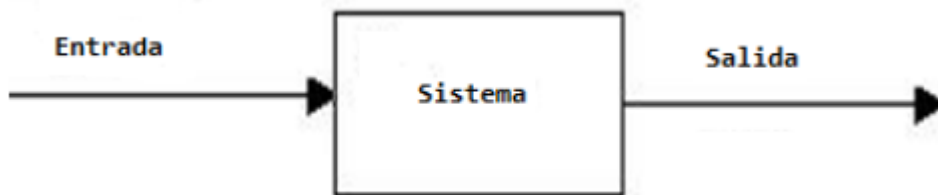


## 10.5. Sistema en lazo abierto

Son los sistemas en los cuales la salida no afecta a la entrada. En un sistema en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se utiliza si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado.

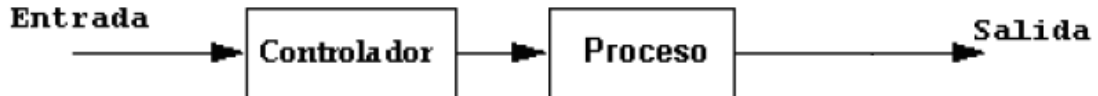
Sistema: Es la planta dónde se va a controlar la variable del proceso.

**Figura 15. Sistema en lazo abierto**



## 11. CONTROLADORES PID

En este segmento de documento se mostrarán las características de los controladores proporcional (P), e integral (I), y cómo utilizarlos para obtener una respuesta deseada. Consideremos el siguiente sistema de realimentación unitaria:



**Proceso:** sistema a controlar

**Controlador:** Provee la excitación de la planta; Se diseña para controlar el comportamiento de todo el sistema.

Términos de la función de control PID

La función de transferencia del controlador PID es:

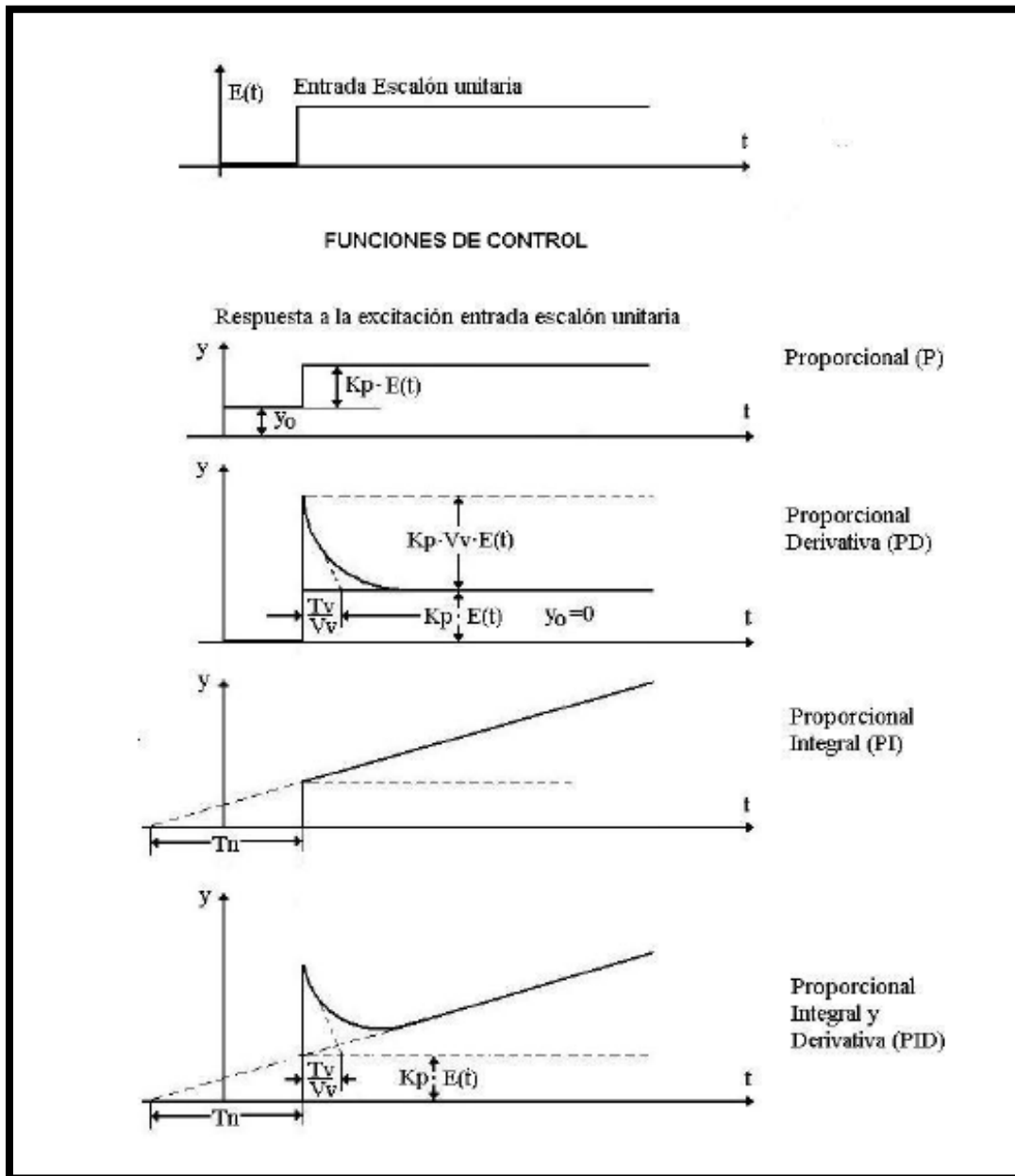
$$K_P + \frac{K_I}{S} + K_d S = \frac{K_d S^2 + K_p S + K_I}{S} \quad (16)$$

K<sub>p</sub> = Ganancia Proporcional

K<sub>I</sub> = Ganancia Integral

K<sub>d</sub> = Ganancia Derivativa

Figura 16. Respuesta de las acciones de control p, pi, pid a una entrada de escalón unitario



Fuente: Grafica. Disponible en <http://www.oocities.org/es/jeesusmeeerino/procesos/teoriapid/teoriapid.html>

$y_0$  =Potencia de salida inicial.

$T_v$  =Tiempo de acción derivativa.

$V_v$  =ganancia de acción derivativa.

$T_n$  =tiempo de acción integral, en un valor de  $T_n$  es igual en magnitud a la entrada del error.

### 11.1. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL

La función de transferencia de este controlador

$$G_c(S) = K_p + \frac{K_I}{S} = \frac{K_p S + K_I}{S} \quad (17)$$

En la figura 16 (respuesta a un error escalón unitario de las funciones de control) se puede apreciar la respuesta del controlador PI. El efecto de combinar las acciones de control proporcional e integral es obtener un cambio en la salida del proceso donde el error en estado estacionario sea nulo, el tiempo de subida  $T_r$  decremente, el sobrepaso y el tiempo de establecimiento  $T_s$  incrementen.

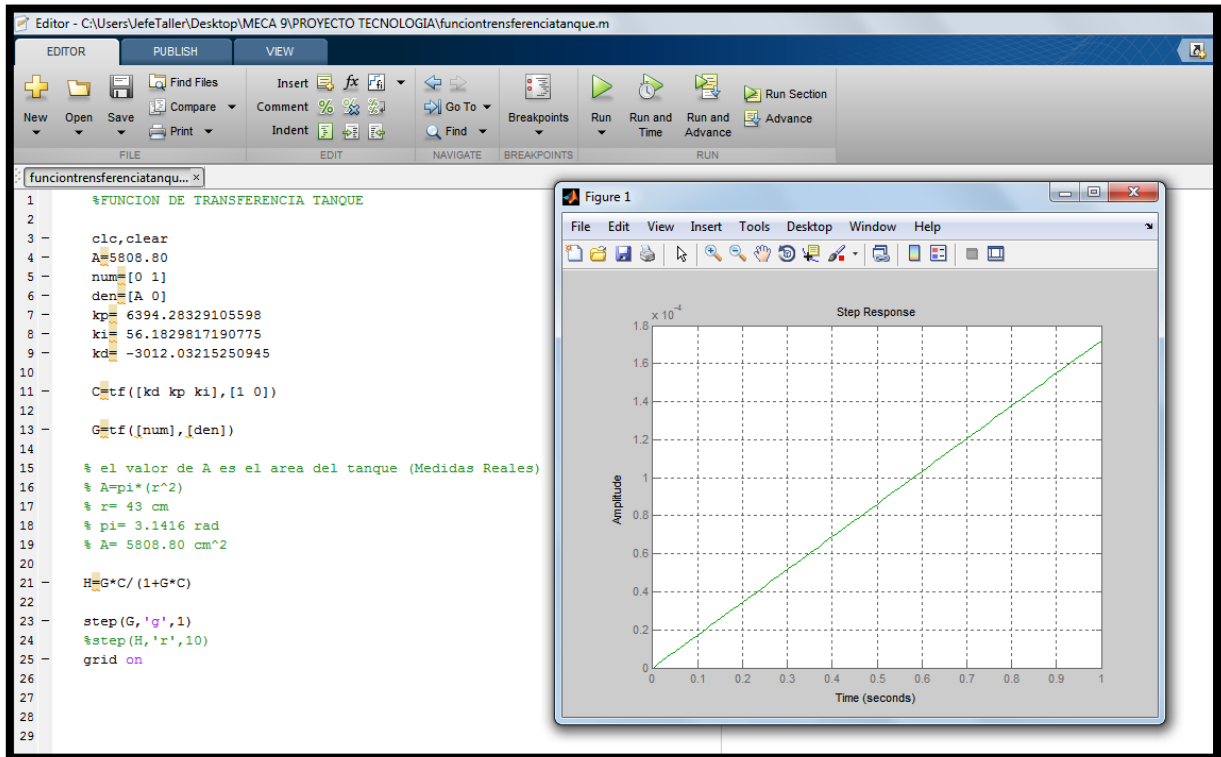
**Tabla 3. Efecto de las acciones de control  $K_p$   $K_i$   $K_d$ , y sobre el tiempo de subida sobre el sobrepaso y sobre el error en estado estacionario**

Respuesta en lazo cerrado	Tiempo de subida	sobrepaso	Tiempo de establecimiento	Error en estado estacionario
$K_p$	decrece	incrementa	Pequeños cambios	Decrece
$K_i$	Decrece	Incrementa	Incrementa	Elimina
$K_d$	Pequeños cambios	Decrece	Decrece	Pequeños cambios

Fuente: Grafica. Disponible en <http://abcscontrol2.blogspot.com/>

El siguiente programa en Matlab® muestra el comportamiento del sistema en lazo abierto.

Figura 17. Respuesta de la planta en lazo abierto



%FUNCION DE TRANSFERENCIA TANQUE

```
clc,clear
A=5808.80
num=[0 1]
den=[A 0]
```

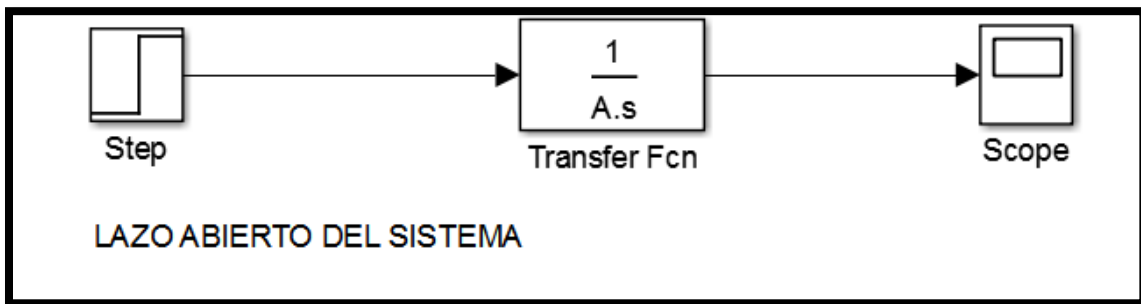
```
G=tf([num],[den])
```

```
step(G,'g',1)
grid on
```

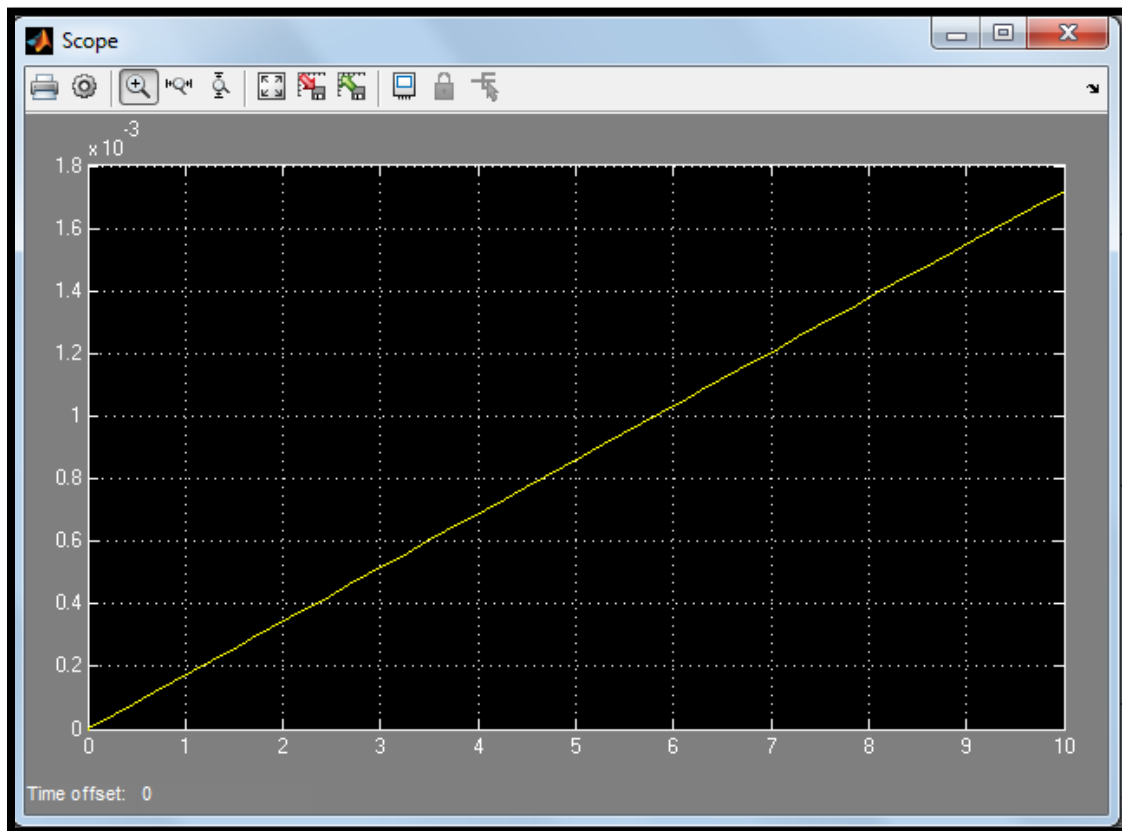
**G = 1**      Función de transferencia en lazo abierto sin controlador  
 -----  
**5809 s**

Después de realizar simulación utilizando Simulink de Matlab®, se hizo el montaje con diagrama de bloques y se realizó auto-tuning para encontrar los valores del controlador que permitan una respuesta más rápida del sistema.

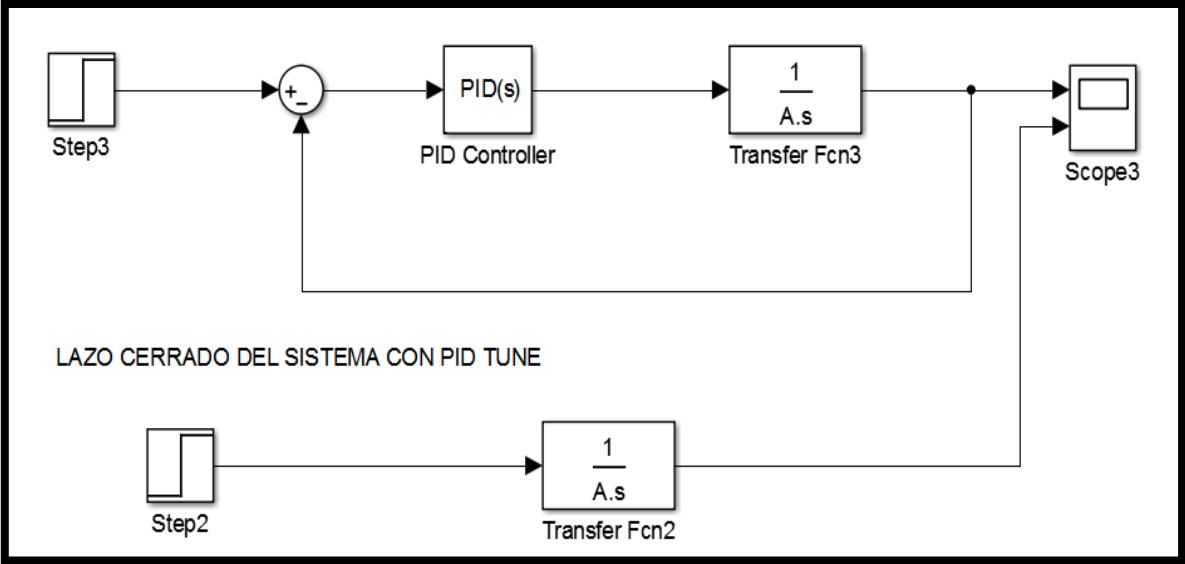
**Figura 18. Diagrama de bloques del sistema lazo abierto utilizando Simulink**



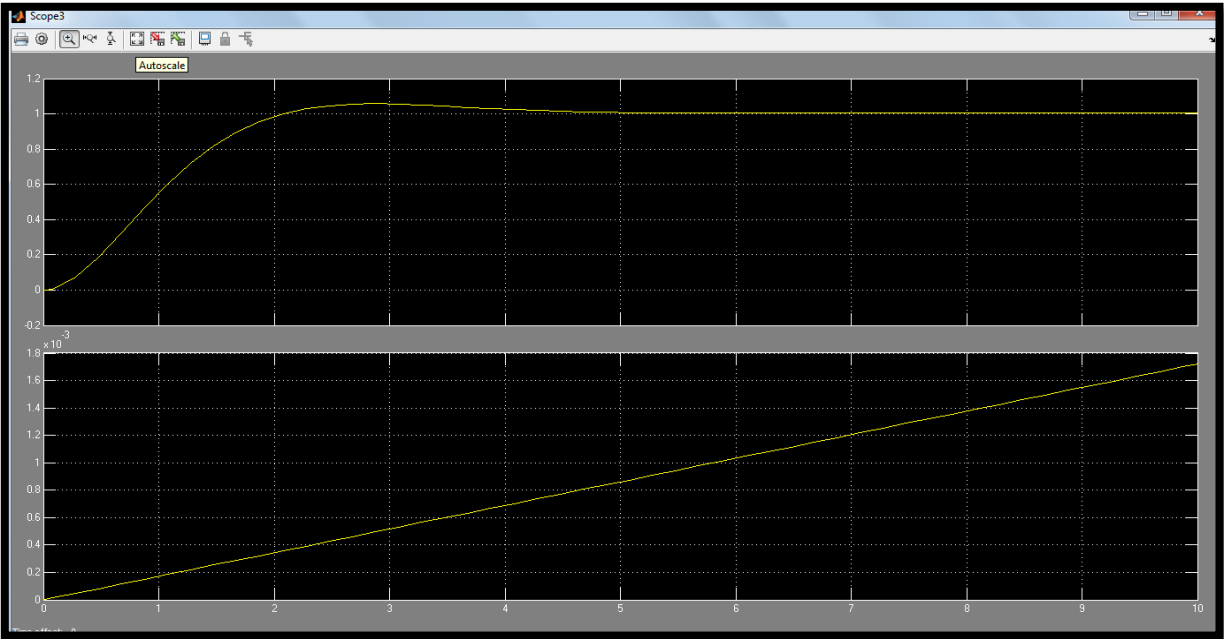
**Figura 19. Respuesta del sistema en lazo abierto utilizando Simulink**



**Figura 20. Diagrama de bloques del sistema en Lazo cerrado con control PID tune utilizando Simulink**

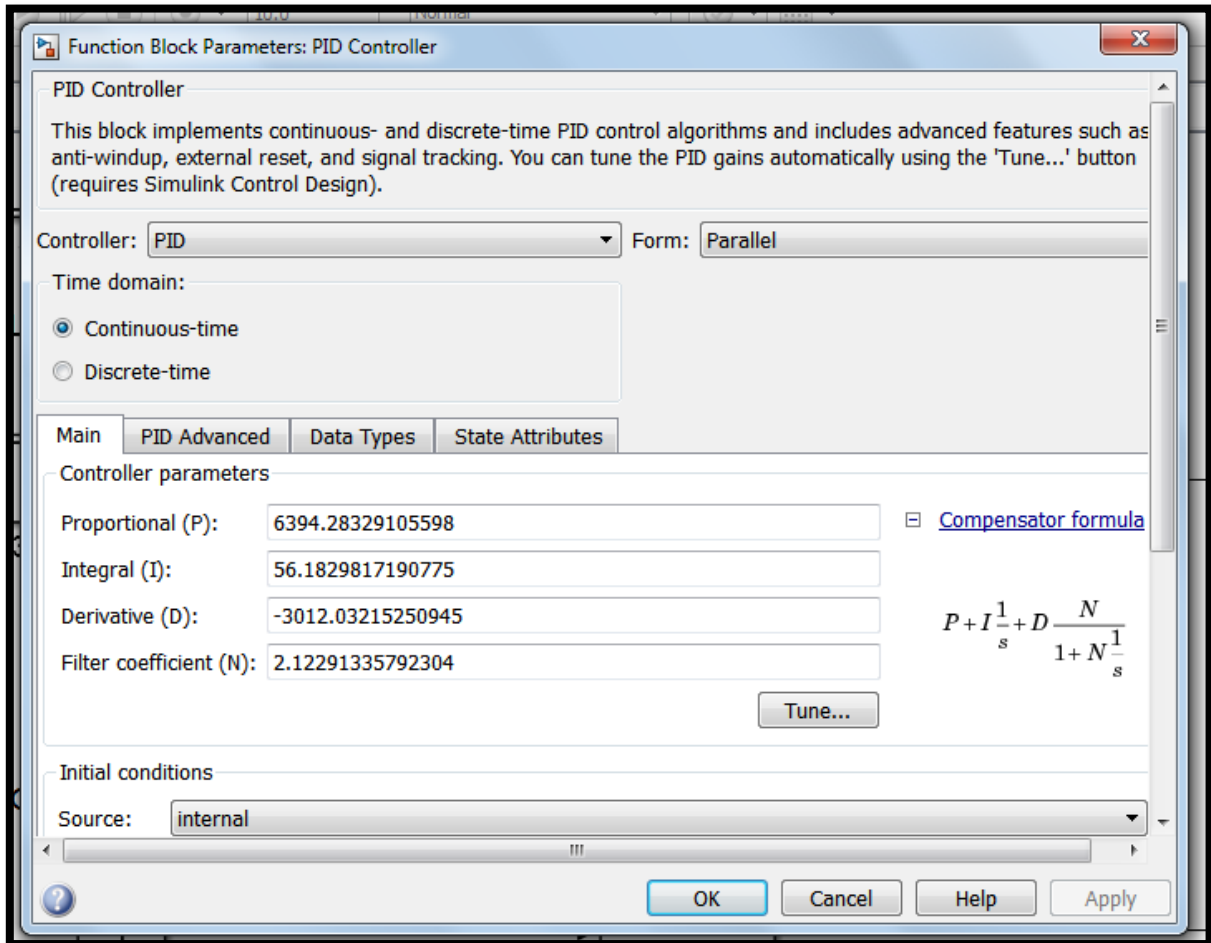


**Figura 21. Respuesta del sistema en lazo cerrado con control PID utilizando Simulink**



Después de obtener los valores del controlador por medio de Simulink, se procede a realizar la simulación en Matlab.

**Figura 22. Valores obtenidos del controlador PID en simulink**



Función de transferencia en lazo cerrado con control PID.

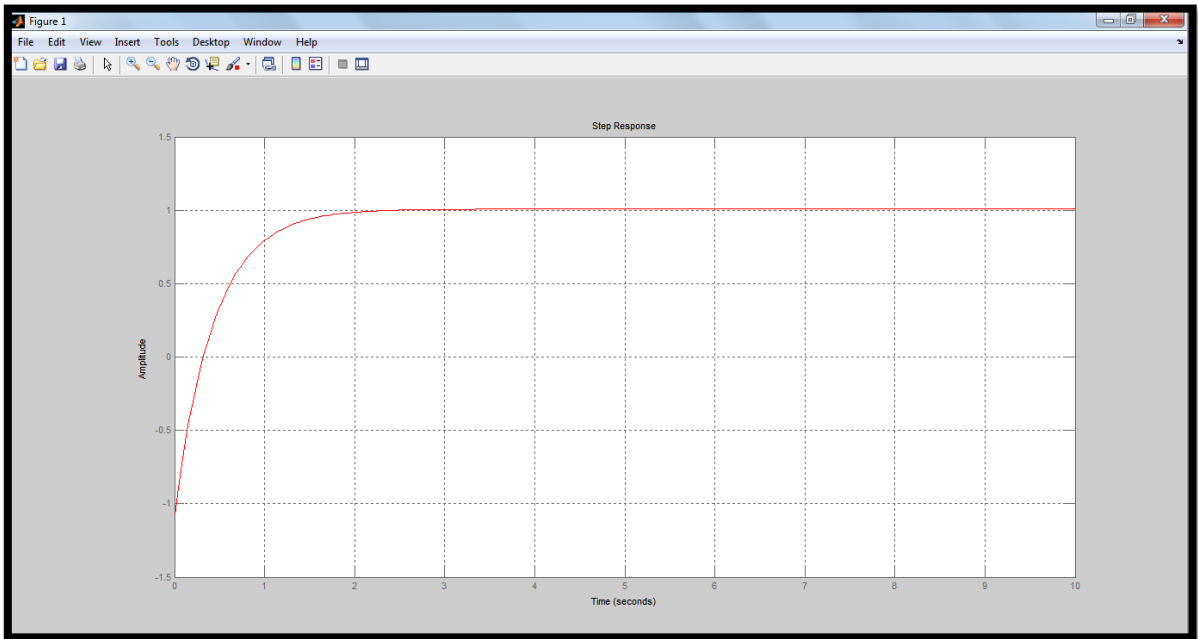
$$H = G * C / (1 + G * C)$$

$$H(s) = \frac{-1.75e07 s^4 + 3.714e07 s^3 + 3.264e05 s^2}{1.625e07 s^4 + 3.714e07 s^3 + 3.264e05 s^2} \quad (18)$$



En la figura 23 muestra el sistema en lazo cerrado, donde se puede apreciar el mejoramiento de la respuesta dinámica del sistema simulado.

**Figura 23. Respuesta del sistema simulado en Matlab**



```
clc,clear
A=5808.80
num=[0 1]
den=[A 0]
kp= 6394.283
ki= 56.183
kd= -3012.032
C=tf([kd kp ki],[1 0])
G=tf([num],[den])
```

% el valor de A es el área del tanque (Medidas Reales)

%  $A = \pi \cdot (r^2)$

%  $r = 43 \text{ cm}$

%  $\pi = 3.1416 \text{ rad}$

%  $A = 5808.80 \text{ cm}^2$

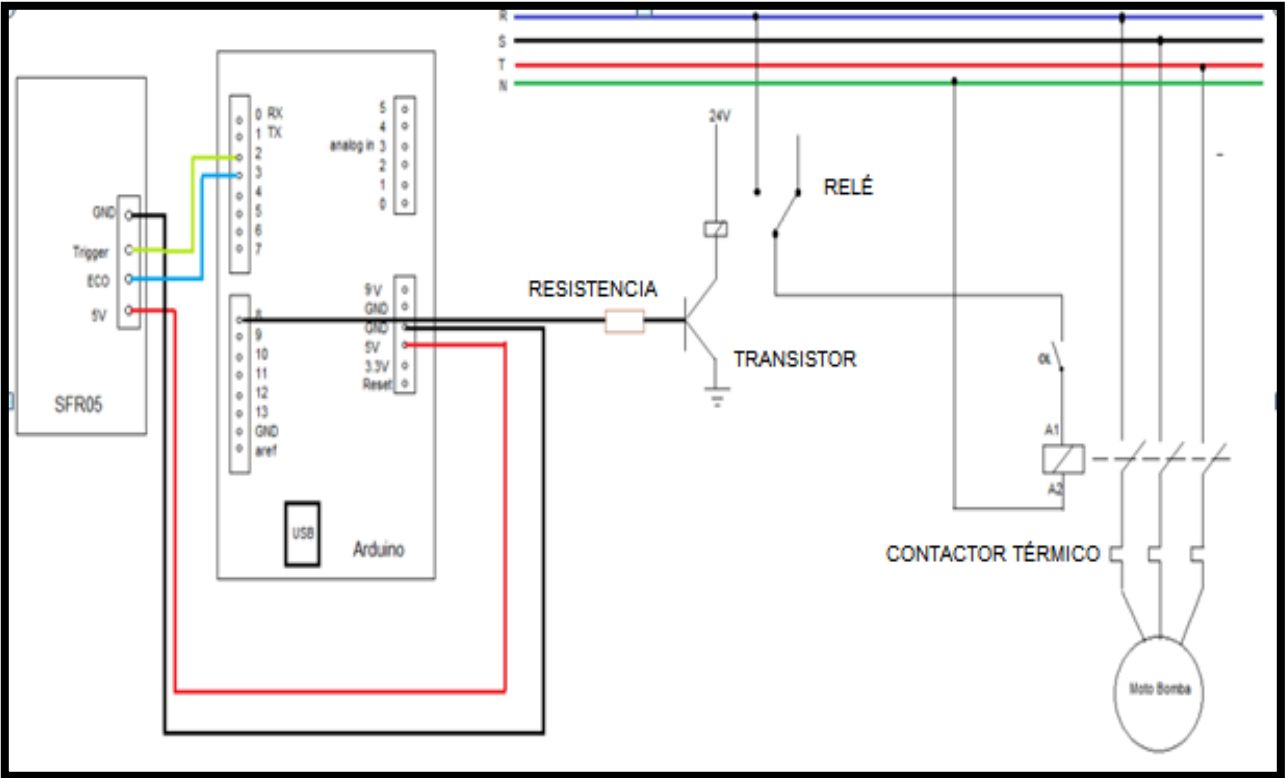
$H = G \cdot C / (1 + G \cdot C)$

```
%step(G,'g',1)
```

```
step(H,'r',10)
```

```
grid on
```

Figura 24. Circuito eléctrico del sistema



## 12. CONCLUSIONES

Al realizar el modelado matemático del sistema en Lazo abierto y lazo cerrado, se obtuvo por medio de operaciones algebraicas las funciones de transferencia que identifican el sistema bajo estas dos condiciones, con el fin de buscar la mejor respuesta de la planta.

Se diseñó un controlador PID que asegure confiabilidad en términos de error y garantizar mediciones confiables en el llenado del tanque, obteniendo resultados satisfactorios.

Con los resultados obtenidos de las operaciones matemáticas y utilizando el software Matlab2013, se realiza simulación de sistema en Lazo abierto y Lazo cerrado con los datos obtenidos en Simulink para el controlador PID, con un resultado positivo para el funcionamiento del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] RINCÓN RUIZ, Juan Elías. Diseño y construcción de un dispositivo electrónico para la detección de obstáculos, como ayuda a personas con discapacidad visual. Bogotá, 2008. Propuesta de proyecto de grado para optar al título de Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica. Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería de diseño & automatización electrónica. Disponible en:< <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/10185/16456/1/T44.08%20R471d.pdf>>
- [2] RUBIO, Carlos. MARRERO, Obdulio. Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías. Querétaro, México. Proyecto de fabricación de sensores por parte de la empresa NDTnet. Disponible en:< [http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11\\_Marrero.pdf](http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11_Marrero.pdf)>
- [3] BAUTISTA SOLÓRZANO, Milton Javier. Medición y control del nivel de líquido un sistema Scada. [En línea]. <http://www.monografias.com/trabajos99/medicion-y-control-del-nivel-liquido-sistema-scada/medicion-y-control-del-nivel-liquido-sistema-scada.shtml>. [Citado el 28 de Julio de 2014]
- [4]FISICANET. Sonido: Movimiento ondulatorio. Ecuación. Naturaleza del sonido. Principio de Huygens. Reflexión y refracción. Interferencias y pulsaciones. Difracción. Efecto Doppler. [En línea]. [http://www.fisicanet.com.ar/fisica/sonido/ap02\\_ondas\\_sonoras.php](http://www.fisicanet.com.ar/fisica/sonido/ap02_ondas_sonoras.php). [Citado el 2 de Agosto de 2014]
- [5]SUPERROBOTICA. srf05 sensor distancias ultrasonidos simple s320111. [En línea]. <http://www.superrobotica.com/s320111.htm>. [Citado el 8 de Agosto de 2014]
- [6]OGATA,Katsuhiko. Ingeniería de control Moderna. Tercera edición. Mexico. Editorial Prentice hall Hispanoamericana S.A.1998.
- [7]Bioelectrónica S.A.S. Proceso control de hidratación. Ficha técnica, Pereira 20 de septiembre del 2011