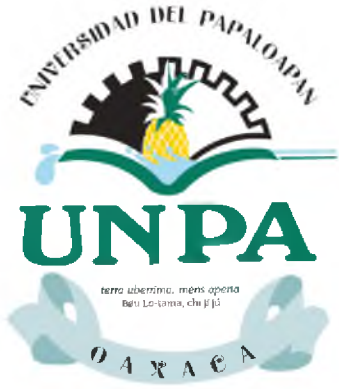




**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**  
**CAMPUS LOMA BONITA**

---

**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**CARACTERIZACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE  
VARIABLES HIDRÁULICAS EN UN SISTEMA DE  
TANQUES ACOPLADOS**

Tesis que para obtener el título de  
**INGENIERA EN MECATRÓNICA**

Presenta:

**C. BELEM SERNA CAMACHO**

Director de tesis:

**Dr. Álvaro Cabrera Amado**



## UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

Campus Loma Bonita

### INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

LA PRESENTE TESIS TITULADA “CARACTERIZACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE VARIABLES HIDRÁULICAS EN UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS”, PRESENTADA POR LA SUSTENTANTE DE LICENCIATURA C. BELEM SERNA CAMACHO BAJO LA DIRECCIÓN DEL DR. ÁLVARO CABRERA AMADO, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITÉ EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERA EN MECATRÓNICA.

  
M. en C. José Luis Nájera Sánchez  
Jefe de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

  
Dr. Álvaro Cabrera Amado  
Director de Tesis

  
Dr. Francisco Gutiérrez Zainos  
Presidente



  
M. en C. Esteban Chávez Conde  
Secretario

  
Dr. Álvaro Cabrera Amado  
Vocal



# Universidad del Papaloapan

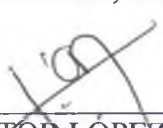
|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| FECHA:         | 02 de Agosto del 2019               |
| ÁREA:          | Vice-Rectoría Académica             |
| OFICIO NUMERO: | UNPA/VRA/195/2019                   |
| ASUNTO:        | Autorización de Impresión de tesis. |

**C. Belem Serna Camacho**  
**P R E S E N T E:**

En base al artículo 120 del reglamento de alumnos, por medio de la presente se aprueba la impresión de la tesis titulada **“Caracterización, Instrumentación y Control de Variables Hidráulicas en un Sistema de Tanques Acoplados”** así como la programación del examen profesional bajo la dirección del Dr. Álvaro Cabrera Amado.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente.  
terra ubérrima, mens aperta  
Bou Lo-tama, chi jí jú

  
MC. HÉCTOR LÓPEZ ARJONA  
Vice-Rector Académico.



C.c.p. M.C: José Luis Nájera Sánchez Jefe de Carrera de la Ing. en Mecatronica  
C.c.p. L.P. Yesenia Barrientos Arenal. Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
C.c.p. Dr. Álvaro Cabrera Amado. Director de Tesis.  
C.c.p. Archivo.

**OAXACA**

Campus Loma Bonita  
Av. Ferrocarril S/N. Col. Ciudad Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca C.P.68400  
Tel/Fax: 01 281 872 92 30

[www.unpa.edu.mx](http://www.unpa.edu.mx)

Campus Tuxtepec  
Circuito Central N° 200, Col. Parque Industrial C.P. 68301  
Tel/Fax: 01 287 875 9240



# Universidad del Papaloapan

*Tepe Nahuatl: Nahuatl*

## INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

Oficio No. JCIM/025/19

Loma Bonita, Oaxaca, a 30 de Julio de 2019

ASUNTO: JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL

**M.E. YESENIA BARRIENTOS ARENAL**  
**JEFA DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES**  
**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**  
**P R E S E N T E**

Mediante la presente, le informo que la Vice-Rectoría académica, ha designado a los siguientes profesores como sinodales del examen profesional del alumno **C. Belem Serna Camacho**, quien defenderá su trabajo de tesis titulado **“Caracterización, Instrumentación y Control de Variables Hidráulicas en un Sistema de Tanques Acoplados”**, para obtener el título de **Licenciado en Ingeniería en Mecatrónica**.

Como titulares:

*Dr. Francisco Gutiérrez Zainos .- Presidente*  
*M.C. Esteban Chávez Conde .- Secretario*  
*Dr. Alvaro Cabrera Amado.- Vocal*

Como suplentes:

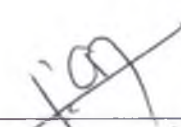
*M.C. José Luis Najera Sánchez.- Primer suplente*  
*Dr. Jesús Santiaguillo Salinas .- Segundo Suplente*

Sin más por el momento y agradeciendo el apoyo y tiempo que invertirá en el proceso, le envío saludos cordiales.

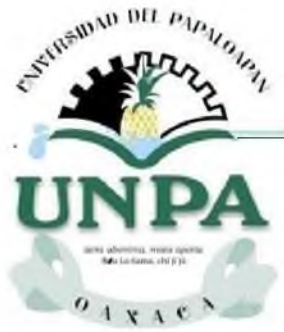
Atentamente,  
*Tena ulérrima, mens aperta*  
*Bou la tama, chi jí jú*

  
**M. C. José Luis Najera Sánchez**  
Jefe de la Carrera de Ingeniería en  
Mecatrónica



  
**Vo. Bo. M. C. Héctor López Arjona**  
Vice-Rector Académico

c.c.p. M. C. Héctor López Arjona.- Vice-Rector Académico.  
c.c.p. Archivo.



**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN  
CAMPUS LOMA BONITA  
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CARACTERIZACIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE VARIABLES  
HIDRÁULICAS EN UN SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS**

Tesis que presenta el

**C. Belem Serna Camacho**

Para obtener el grado de  
**INGENIERO**

En la especialidad de

**Ingeniería Mecatrónica**

Director de Tesis:  
**Dr. Álvaro Cabrera Amado**

Loma Bonita, Oaxaca

Agosto de 2019



# Dedicatoria

A mis madres:

María del Socorro Camacho Vázquez por formarme y hacer de mí quien soy, por nunca permitir que me rindiera y por siempre demostrarme con ejemplos la persona que algún día quiero ser, a quien le debo todo.

Agustina Camacho Vázquez quien me llevo por el camino del saber, por estar siempre en cada paso de mi vida.

Gracias por enseñarme que los sueños se pueden cumplir.

Las amo.

A mis hermosas princesas Angie y Leilani por llegar a iluminar mi vida.

# Agradecimientos

Al universo, por formar parte del orden humano.

A mi familia:

A mis hermanos que son lo más valioso que tengo

Benoni, por siempre ser un ejemplo a seguir y fomentar en mí las ganas de seguir adelante.

José David, mi enano por siempre.

A mis primos:

Que siempre me apoyaron José Domingo, Sol, Samuel, Saúl, Daniel y Lazaro, los quiero.

A mis amigos:

Por tantas aventuras y sueños existentes en nosotros.

A Itzamary, por estar conmigo, por todas y cada una de las noches que nos desvelamos, todo el cariño del mundo siempre. Uscanga y Lupe los extrañe al final.

A Heriberto, no hay nada que te pueda escribir para agradecerte todo, tus palabras, tus consejos.

A Liss, por siempre escucharme y cada anécdota juntas, siempre te recordare con una sonrisa.

A Filio, por su necedad y ganas de salir adelante, a Linaldi por que siempre peleabamos, estar con ustedes este tiempo fue enriquecedor.

A Iván, por sus consejos, a Pepe por cada palabra de aliento y Osama no creí que encontraría tan buenos amigos al final.

A Azarel, por ser quien siempre me escuchaba y con quien compartí mis miedos y esperanzas

*¡Gracias por ser los mejores amigos que puedo tener!*

A Adolfo, por su apoyo, por motivarme y por estar conmigo.

A mis profesores, por que de todos y cada uno de ustedes me llevo grandes enseñanzas.

A mi director:

Dr. Alvaro Cabrera Amado, por su paciencia en este proceso y por hacer que desde mi primer día de clases quisiera continuar aprendiendo.

*La vida es un sueño, y agradezco que formen parte de él.*



# Índice general

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                                                     | <b>1</b>  |
| 1.1. Preliminares de sistemas hidráulicos . . . . .                                        | 1         |
| 1.1.1. Propiedades de los fluidos . . . . .                                                | 2         |
| 1.1.2. Ecuaciones de los fluidos . . . . .                                                 | 6         |
| 1.2. Justificación . . . . .                                                               | 12        |
| 1.3. Planteamiento del problema . . . . .                                                  | 12        |
| 1.4. Objetivos . . . . .                                                                   | 13        |
| 1.4.1. General . . . . .                                                                   | 13        |
| 1.4.2. Específicos . . . . .                                                               | 13        |
| 1.5. Metodologías y Técnicas . . . . .                                                     | 13        |
| 1.6. Estado del arte . . . . .                                                             | 14        |
| <b>2. Descripción del modelado matemático</b>                                              | <b>19</b> |
| 2.1. Sistema Hidráulico de dos tanques acoplados . . . . .                                 | 19        |
| <b>3. Resultados numéricos</b>                                                             | <b>25</b> |
| 3.1. Algoritmo de control . . . . .                                                        | 25        |
| 3.2. Prueba en lazo abierto . . . . .                                                      | 28        |
| 3.2.1. Descarga de Tanques . . . . .                                                       | 29        |
| 3.2.2. Descarga de tanques a distintas alturas, con la válvula de salida cerrada . . . . . | 30        |
| 3.2.3. Descarga de tanques a distintas alturas, con ambas válvulas abiertas . . . . .      | 30        |
| 3.3. Resultados en lazo cerrado . . . . .                                                  | 31        |
| 3.3.1. Control de nivel del Tanque 1 . . . . .                                             | 31        |
| 3.3.2. Control de nivel del Tanque 2 . . . . .                                             | 34        |
| 3.3.3. Control de caudal . . . . .                                                         | 37        |
| <b>4. Descripción de la Plataforma Experimental</b>                                        | <b>41</b> |
| 4.1. Actuador . . . . .                                                                    | 42        |
| 4.2. Sensores . . . . .                                                                    | 42        |
| 4.3. Etapa de Potencia . . . . .                                                           | 46        |
| 4.4. Accesorios Hidráulicos . . . . .                                                      | 47        |
| 4.5. Adquisición de Datos . . . . .                                                        | 48        |

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Resultados experimentales</b>                                                         | <b>51</b> |
| 5.1. Respuestas en lazo abierto . . . . .                                                   | 52        |
| 5.1.1. Descarga de Tanques . . . . .                                                        | 52        |
| 5.1.2. Descarga de tanques a distintas alturas, con la válvula central<br>abierta . . . . . | 52        |
| 5.1.3. Descarga de tanques a distintas alturas, con ambas válvulas<br>abiertas . . . . .    | 53        |
| 5.2. Resultados experimentales en lazo cerrado . . . . .                                    | 54        |
| 5.2.1. Control de Nivel del Tanque 1 . . . . .                                              | 55        |
| 5.2.2. Control de nivel del Tanque 2 . . . . .                                              | 58        |
| 5.2.3. Control de Caudal . . . . .                                                          | 61        |
| <b>6. Estudio complementario</b>                                                            | <b>67</b> |
| 6.1. Identificación de Parámetros Hidráulicos . . . . .                                     | 67        |
| <b>7. Conclusiones</b>                                                                      | <b>73</b> |
| 7.1. Trabajos futuros . . . . .                                                             | 74        |
| <b>Bibliografía</b>                                                                         | <b>74</b> |
| <b>Apéndices</b>                                                                            | <b>77</b> |
| <b>A. Diagramas de bloques</b>                                                              | <b>77</b> |
| <b>B. Hojas de datos de dispositivos</b>                                                    | <b>79</b> |
| <b>C. Dibujos Técnicos</b>                                                                  | <b>91</b> |

# Resumen

En la industria de procesos el manejo de fluidos es usado para realizar mezclas y almacenamiento en taques o contenedores, es por ello que la medición y el control de las variables de nivel y flujo se hacen necesarias al requerir una producción continua, en la que se mantenga una presión hidráulica estable, en procesos que requieran la regulación y medición de volúmenes de líquidos. El manejo de fluidos se ve afectado por distintos factores: la velocidad del fluido, la corrosividad del fluido, presión y el nivel volumétrico con el que se trabaja.

Es por ello que en este tema de tesis se aborda el problema de control de nivel y flujo en un sistema de tanques acoplados en serie, donde el caudal de entrada se ingresa al primer tanque por medio de una bomba sumergible, la conexión entre tanques se realiza con tubería de bronce y una válvula de compuerta, a la salida del segundo tanque se encuentra una válvula de bola. Dicha plataforma esta integrada con sensores de caudal y nivel. Para modificar algunas características dinámicas del sistema de tanques se utiliza un esquema de control por modos deslizantes, para el estudio del modelo y aplicación del algoritmo de control se reestructuró una plataforma experimental, realizando instrumentación y caracterización de sensores, así como una etapa de potencia para la electroválvula y la interfaz de la plataforma con un sistema de adquisición de datos para procesar las señales medidas.

Por último se presentan los resultados numéricos y experimentales en el proceso de control de nivel y flujo. Primeramente se muestran distintas configuraciones en pruebas de lazo abierto y posteriormente en lazo cerrado.



# Abstract

In the process industry the handling of fluids is used for mixing and storage in tanks or containers, which is why the measurement and control of the level and flow variables are necessary by requiring continuous production, in which Maintain a stable hydraulic pressure, in processes that require the regulation and measurement of liquid volumes. The handling of fluids is affected by different factors: flow velocity, the corrosiveness, the pressure and the volumetric level with which work. That is because in this thesis topic the problem of level and flow control in a series-coupled tank system is addressed, where the control input flow is entered into the first tank by means of a submersible pump, the connection between tanks is made with bronze pipe and a gate valve, at the end of the second tank has a ball valve. This platform has flow and level sensors. To modify some dynamic characteristics of the tank system, a sliding mode control scheme is used, for the study of the model and application of the control algorithm an experimental platform was restructured, performing instrumentation and characterization of sensors, a power stage for the solenoid valve and the platform interface with a data acquisition system to process the measured signals.

Finally, the numerical and experimental results in the level and flow control process are presented. Different configurations are shown in open and closed loop tests.



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Preliminares de sistemas hidráulicos

Los líquidos y los gases pueden ser diferenciados por sus capacidades de compresión relativas y el hecho de que un líquido puede tener una superficie libre, en tanto que un gas se expande libremente hasta llenar el recipiente que lo contiene. Entendemos por presión como la fuerza por unidad de área, la presión manométrica se refiere a aquella presión que se mide con respecto a la atmósfera y la presión absoluta es la suma de las presiones manométrica y barométrica.

Los sistemas de fluido de potencia utilizan fluidos a presión para impulsar dispositivos lineales o rotatorios, empleados en equipo agrícola, sistemas hidráulicos para la aviación, sistemas de frenado de automóviles y muchos otros más. Los sistemas de fluido de potencia incluyen tanto sistemas de tipo aire, llamados neumáticos, como de tipo líquido, llamados sistemas hidráulicos, Mott [11]. Existen varios tipos de fluidos hidráulicos de uso común:

- Aceites derivados del petróleo.
- Fluidos de aguaglicol.
- Fluidos con base de agua elevada (HWBF).
- Fluidos de silicón.
- Aceites sintéticos.

En diversas máquinas, herramientas y en la industria de procesos se observan sistemas hidráulicos, ver Fig.(1.1), los cuales son capaces de producir muchas combinaciones diferentes de movimiento y fuerza. Dichos sistemas están conformados por cuatro principales componentes, un depósito para guardar el fluido hidráulico, una bomba o bombas para forzar el fluido a través del sistema, válvulas para controlar la presión del fluido y un actuador para convertir la energía hidráulica en energía mecánica. A esta combinación de elementos suele llamarse también circuito hidráulico.

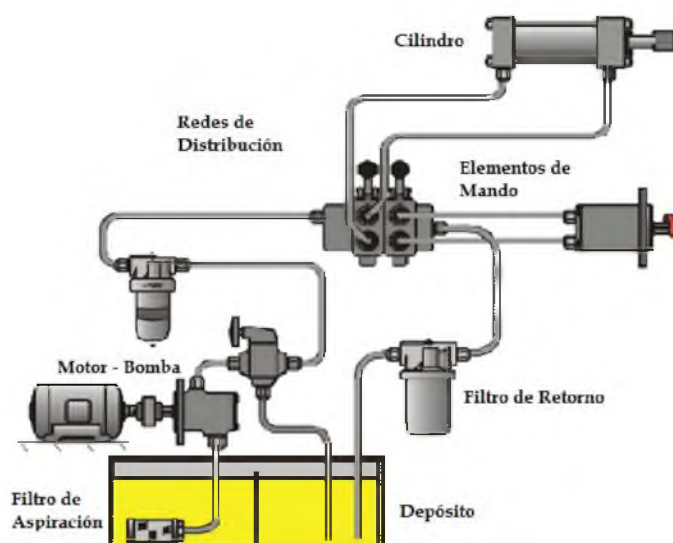


Figura 1.1: Circuito Hidráulico.

### 1.1.1. Propiedades de los fluidos

Las propiedades de los fluidos tienen un efecto importante en el funcionamiento de los sistemas hidráulicos. A continuación se presentan algunas características físicas de los fluidos hidráulicos, entre los cuales están la densidad de masa, volumen, peso, densidad específica, módulos de compresibilidad y dispersión y viscosidad.

La **densidad de masa**  $\rho$  de una sustancia es su masa por unidad de volumen. En la Tabla 1.1 se muestran algunas densidades de fluidos a presión atmosférica y temperatura estandar ( $20^\circ C$ ).

| Fluido                      | Densidad ( $\rho$ )                                                    |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Agua                        | $1000 \frac{kg}{m^3} = 62.43 \frac{lb}{ft^3} = 1.94 \frac{slug}{ft^3}$ |
| Aceites basados en petróleo | $820 \frac{kg}{m^3} = 51.2 \frac{lb}{ft^3} = 1.59 \frac{slug}{ft^3}$   |

Tabla 1.1: Densidad de algunos Fluidos.

El **volumen específico**  $v$  es el recíproco de la densidad  $\rho$ . Es el volumen ocupado por una unidad de masa del fluido, o bien;

$$v = \frac{1}{\rho}$$

El **peso específico**  $\gamma$  de una sustancia es su peso por unidad de volumen. En la Tabla 1.2 se muestran algunos pesos específicos de dos fluidos a presión atmosférica y temperatura estándar;

El peso específico esta relacionado con la densidad de masa  $\rho$  por  $\gamma = \rho g$  donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.



| Fluido                      | Peso específico $\gamma$                                 |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|
| Agua                        | $9.807 \times 10^3 \frac{N}{m^3} = 100 \frac{kg_f}{m^3}$ |
| Aceites basados en petróleo | $8.04 \times 10^3 \frac{N}{m^3} = 820 \frac{kg_f}{m^3}$  |

Tabla 1.2: Peso específico de fluidos.

La densidad  $\rho$  de un líquido puede expresarse en función de la presión  $p$  y temperatura  $T$ , se escribe:

$$\rho = \rho_o[1 + a(p - p_o) - b(T - T_o)]$$

Los valores de  $a$  (módulo de compresibilidad) y  $b$  (coeficiente de expansión cúbica) son positivos, así pues la densidad de masa se incrementa cuando la presión aumenta, y disminuye cuando la temperatura se incrementa. La **compresibilidad** de un líquido se expresa por medio de su módulo de dispersión. El módulo de dispersión de un líquido y el módulo de compresibilidad son recíprocamente inversos. Si la presión de un líquido de volumen  $V$  se incrementa por  $dp$ , esto causará un decrecimiento en el volumen  $dV$ .

El **módulo de dispersión**  $K$  se define por:

$$K = \frac{dp}{-\frac{dV}{V}}$$

La **viscosidad**, es una medida de la fracción interna o de la resistencia de un fluido, una viscosidad baja significa un incremento en las pérdidas por escurrimientos y alta viscosidad implica una operación lenta. La viscosidad de un líquido decrece con la temperatura. Esta se mide mediante la observación del tiempo requerido por cierto volumen de líquido para fluir, en ciertas condiciones como enfrentarse a un tubo corto de orificio pequeño. La resistencia causada por un fluido al movimiento relativo de sus partes se llama viscosidad dinámica o absoluta. Esta es la relación de su esfuerzo cortante a la razón de cambio en la deformación cortante de un fluido. El coeficiente de viscosidad dinámica o absoluta  $\mu$  es la resistencia causada por una lámina del fluido al movimiento paralelo a esa lámina u otra lámina del fluido a una distancia unitaria de ella, con una velocidad relativa unitaria. Las unidades del SI para la viscosidad dinámica son  $\frac{Ns}{m^2}$  y  $\frac{kg}{ms}$ .

La viscosidad cinemática  $\nu$  es la viscosidad dividida entre la densidad de masa o

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

La unidad en el SI de la viscosidad cinemática es  $\frac{m^2}{s}$ .

Las ecuaciones básicas que gobiernan el flujo de un fluido son: las ecuaciones de continuidad, la ecuación de Euler y la ecuación de Bernoulli [12].

**Número de Reynolds:** Las fuerzas que afectan el flujo de un fluido son debidas a la gravedad, la flotación, la inercia del fluido, la viscosidad, la tensión superficial y factores semejantes. En muchas situaciones el flujo, las fuerzas resultantes del flujo del fluido y la viscosidad son las más significativas. De echo el flujo de fluido, en

muchas ocasiones está dominado ya sea, por la inercia o por la viscosidad del fluido. La relación adimensional de la fuerza de inercia con respecto a la fuerza viscosa se llama número de Reynolds. Así un número de Reynolds grande indica el predominio de la fuerza de inercia y un número pequeño el predominio de la viscosidad.

El número de Reynolds  $R_e$  está dado por:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu},$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\mu$  la viscosidad,  $v$  la velocidad promedio del fluido y  $D$  una longitud característica. Para el flujo en tubos, la longitud característica es el diámetro interior del tubo. Puesto que la velocidad promedio  $v$  del flujo en un tubo es:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2},$$

donde  $Q$  es la razón del flujo volumétrico,  $A$  el área del tubo, y  $D$  el diámetro interior del tubo, el número de Reynolds para el flujo en tubos es dado por:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi \mu D},$$

El flujo dominado por la fuerza de viscosidad se llama flujo laminar. Esta caracterizado por un movimiento del flujo suave, según líneas paralelas. Cuando dominan las fuerzas de inercia, el fluido se llama flujo turbulento y está caracterizado por un movimiento del flujo irregular, como remolino. Para un número de Reynolds  $R_e < 2000$ , el flujo es siempre laminar; para un número de Reynolds  $R_e > 4000$ , el flujo es usualmente turbulento excepto en casos especiales.

En los tubos capilares el flujo es laminar. Si las velocidades se mantienen muy bajas y las viscosidades son muy altas, el flujo en tubos de diámetro relativamente grande puede resultar también un flujo laminar. En general, el flujo en un tubo es laminar si la sección transversal del conducto es relativamente pequeña y/o la longitud del tubo es relativamente grande. En el flujo laminar, el perfil de velocidad en un tubo se hace parabólico como en la imagen superior de la Fig.(1.2) , mientras que en la parte inferior se muestra un perfil de velocidad en un tubo con flujo turbulento.

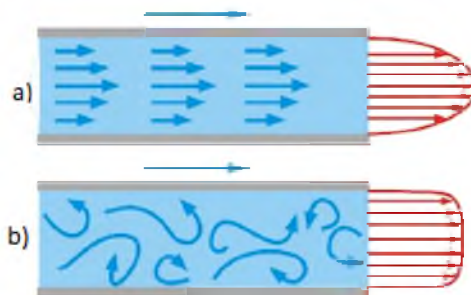


Figura 1.2: a) Flujo Laminar y b) Turbulento en un tubo.

Cuando la presión, la velocidad, la densidad, la temperatura y factores similares en cualquier punto del flujo no cambian con el tiempo, se dice que el flujo es estable. Esta es, en flujo estable cualquier punto se mantiene constante en el espacio.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \nu}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

Se dice que el flujo es inestable si la condición en cualquier punto cambia con el tiempo. El análisis del flujo inestable es mucho más complejo que el flujo estable.

**Volumen de control:** Un volumen de control se refiere a una región en el espacio. Aunque del todo arbitrario, el tamaño y la forma del volumen de control frecuentemente se escogen con el objeto de simplificar el análisis. El uso de un volumen de control es conveniente en el análisis de situaciones donde el flujo ocurre dentro y fuera del espacio.

Los procesos industriales a menudo incluyen sistemas que constan de tanques llenos de líquido conectados por tubos con orificios, válvulas y otros dispositivos que restringen el flujo. Las características dinámicas de tales sistemas se analizan mediante las leyes fundamentales que gobiernan el flujo de los líquidos.

Existen tres tipos de elementos básicos que intervienen en la dinámica de los sistemas hidráulicos: elementos resistivos, elementos capacitivos y elementos de inercia.

Al considerar un flujo a través de un tubo corto que conecta dos tanques, la resistencia  $R$  para el flujo del líquido se define como el cambio en la diferencia de nivel necesaria para producir un cambio de una unidad en la velocidad del flujo; es decir:

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel}}{\text{cambio en la velocidad de flujo}} = \frac{\Delta h}{\Delta q}.$$

La capacitancia  $A$  de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en el potencial de la altura e líquido, lo cual se ve reducido al área transversal [12].

$$A = \frac{\text{cambio en el líquido almacenado}}{\text{cambio en la altura}}.$$

La inercia en el flujo de líquidos en tubos y dispositivos semejantes, es el cambio potencial dado por la presión o la altura, y el cambio en la razón de flujo por segundo esta es la aceleración del flujo líquido volumétrico. La aplicación de la definición general es da por:

$$I = \frac{\text{cambio en presión}}{\text{cambio en la razón de flujo por segundo}},$$

o bien

$$I = \frac{\text{cambio en la altura}}{\text{cambio en la razón de flujo por segundo}}.$$

### 1.1.2. Ecuaciones de los fluidos

#### Ecuaciones de continuidad

Las ecuaciones de continuidad se obtienen aplicando el principio de conservación de la masa del flujo. Este principio establece que la masa dentro de un sistema permanece constante en el tiempo. Las ecuaciones de continuidad para un volumen de control establecen que la razón de incremento respecto al tiempo de la masa dentro de un volumen de control es igual a la razón de cambio neto de masa que fluye hacia el volumen de control. Considérese un flujo estable a través del tubo de corriente mostrado en la Fig.1.3. El volumen de control constituye las paredes del tubo de corriente y las secciones transversales  $dA_1$  y  $dA_2$  son normales al tubo de la corriente.

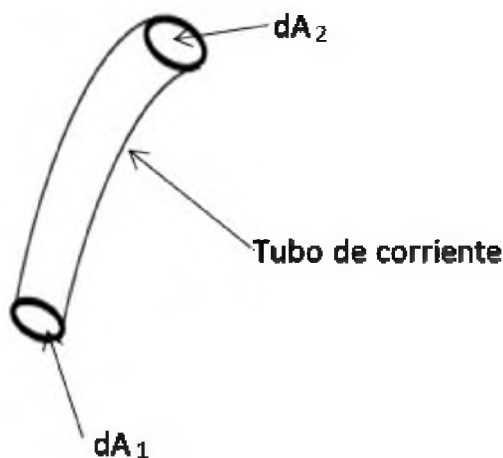


Figura 1.3: Tubo de Corriente.

Si definimos  $\rho_1$  y  $\rho_2$  como las densidades de masa en las secciones transversales  $dA_1$  y  $dA_2$ , respectivamente, entonces al aplicar el principio de conservación de masa, obtenemos

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2$$

Esta es la ecuación de continuidad aplicada a dos secciones transversales a lo largo de un tubo de corriente en flujo estable.

En la Fig.(1.4) se muestra una colección de tubos de corriente, en las que las densidades promedio son  $\rho_1$  y  $\rho_2$  sobre las secciones transversales  $A_1$  y  $A_2$  respectivamente, y las velocidades promedio son  $V_1$  y  $V_2$ , entonces,

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2,$$

donde

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{A_1} \int_{A_1} v dA_1; \\ V_2 &= \frac{1}{A_2} \int_{A_2} v dA_2. \end{aligned}$$

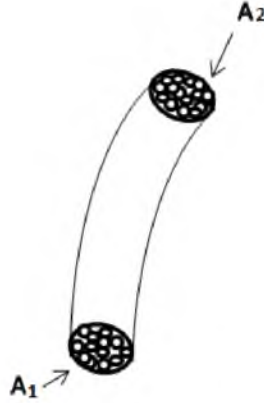


Figura 1.4: Conjunto de tubos de corriente.

Definiendo las descargas  $Q_1$  y  $Q_2$  como:

$$\begin{aligned} Q_1 &= A_1 V_1 \\ Q_2 &= A_2 V_2 \end{aligned}$$

podemos escribir la ecuación de continuidad como:

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2.$$

Para flujo estable incompresible, tenemos  $\rho_1 = \rho_2$ . Por lo tanto,

$$Q_1 = Q_2,$$

o bien

$$A_1 V_1 = A_2 V_2.$$

Esto significa que la razón de cambio de flujo de un líquido en un tubo es constante en cualquier sección transversal.

### Ecuación de movimiento de Euler

Para describir la ecuación nos basamos en el diagrama de un tubo de corriente de longitud infinitesimal  $ds$  como se muestra en la Fig.(1.5). Considérese también el volumen de control compuesto por la pared del tubo de corriente entre las secciones 1 y 2 más las áreas de las secciones 1 y 2 que son normales al tubo de corriente. Fijemos este volumen de control en el espacio y consideremos el flujo que lo atraviesa. Para simplificar el análisis, supongamos que la viscosidad es cero o que el fluido no tiene fricción.

La masa del fluido en el volumen de control es  $\rho dA ds$  y la aceleración de la masa es  $\frac{dv}{dt}$ . La fuerza de presión que actúa sobre la sección 1 en la dirección positiva de  $s$  es  $p dA$  y la que actúa en la sección 2 en la dirección negativa de  $s$  es  $p + \left(\frac{\partial p}{\partial s}\right) ds dA$ . La fuerza de gravedad es  $\rho g dA ds$ . Cualesquiera fuerzas sobre los lados del volumen

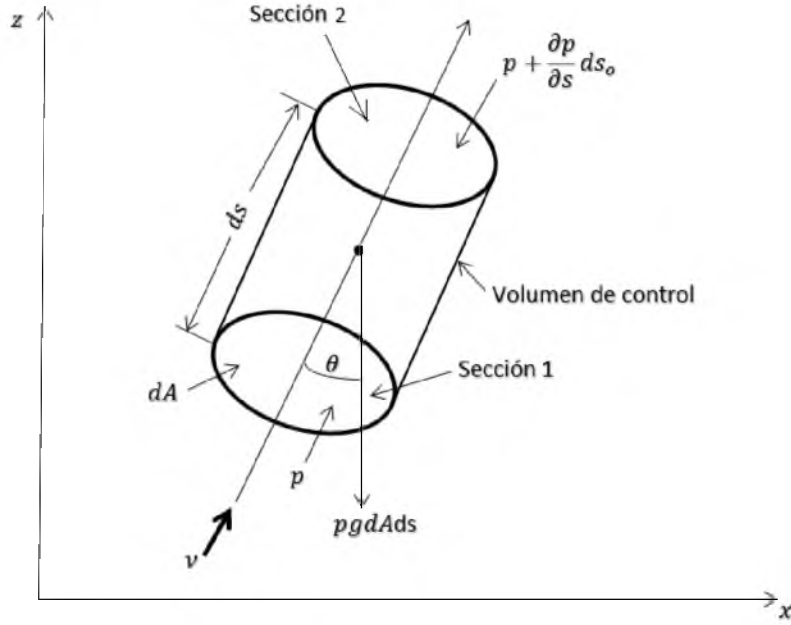


Figura 1.5: Tubo de corriente infinitesimal de longitud  $ds$ .

de control son normales a  $s$  y no participan en la ecuación. Aplicando la segunda ley de Newton, tenemos la ecuación de movimiento

$$m \frac{dv}{dt} = p dA - \left( p + \frac{\partial p}{\partial s} ds \right) dA - \rho g dA ds \cos \theta$$

donde  $m = \rho dA ds$ ,

$$\rho dA ds \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial s} ds dA - \rho g dA ds \cos \theta,$$

o bien

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta. \quad (1.1)$$

Su derivada respecto de  $t$  es:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial s} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t} = v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (1.2)$$

Al sustituir la Ec.(1.2) en la Ec.(1.1), encontramos

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \cos \theta.$$

Observando que  $\cos \theta = \frac{\partial z}{\partial s}$ , donde  $z$  es la altura.

La ecuación de movimiento de Euler es descrita por la Ec.(1.3).

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} = 0. \quad (1.3)$$

El flujo es estable cuando  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ , y la Ec.(1.3) se simplifica como:

$$v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} = 0. \quad (1.4)$$

El flujo es estable, puesto que  $v$ ,  $p$ ,  $z$  son funciones de  $s$ , la Ec.(1.4) puede reescribirse como:

$$v \frac{dv}{ds} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{ds} + g \frac{dz}{ds} = 0,$$

o bien

$$v dv + \frac{dp}{\rho} + g dz = 0, \quad (1.5)$$

la cual es la ecuación de Euler de movimiento en flujo estable.

### Ecuación de Bernoulli

Un flujo estable, sin fricción e incompresible es descrito por la Ec.(1.5), al integrarla resulta

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante}. \quad (1.6)$$

La Ec.(1.6) es la ecuación de energía para el flujo estable a través de un volumen de control, es expresada por la Ec.(1.7). Al dividir ambos lados entre  $g$ , tenemos:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z = \text{constante}, \quad \gamma = \rho g \quad (1.7)$$

La Ec.(1.7) es la llamada ecuación de Bernoulli y cada uno de sus términos tiene la dimensión de longitud. La ecuación muestra que a lo largo de un tubo de corriente la suma de la velocidad  $\frac{v^2}{2g}$ , la presión  $\frac{p}{\gamma}$  y la altura potencial  $z$  es constante, una representación geométrica se muestra en la Fig.(1.6). Si la velocidad en alguna sección se incrementa, la presión de altura y la altura potencial disminuyen y sucede lo contrario si la velocidad decrece. Esto es la altura total en todas las secciones es constante.

El flujo inestable la Ec.(1.3) ordenando términos e integrando a lo largo del tubo de corriente resulta:

$$\int_0^s \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante}, \quad (1.8)$$

Evaluando la Ec.(1.8) en las secciones transversales  $s_1$  y  $s_2$ , obtenemos:

$$\int_0^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \int_0^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2$$

o bien

$$\left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 \right) - \left( \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \right) = \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds \quad (1.9)$$

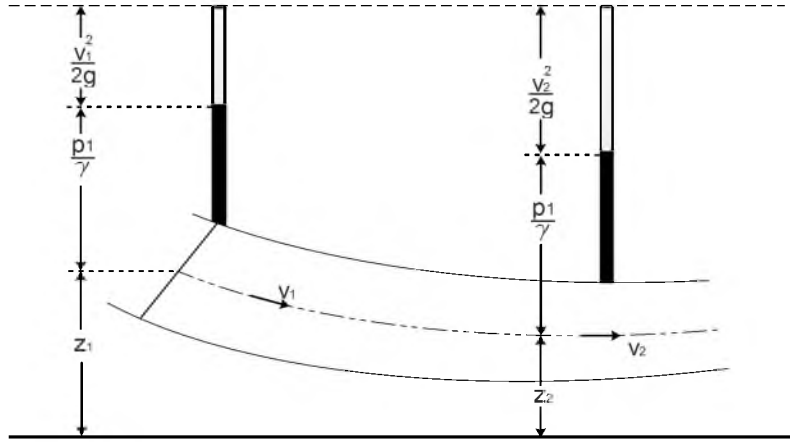


Figura 1.6: Diagrama representativo de la ecuación de Bernoulli.

La Ec.(1.9) se llama ecuación de energía para el flujo inestable a través de un volumen de control.

**Flujo a través de un orificio:** Existen dos régimen de flujo, una dominada por las fuerzas viscosas y otra por las fuerzas inerciales, véase las Figs.(1.7) y (1.8). A causa de la ley de continuidad, la velocidad del flujo a través de un orificio debe incrementarse por arriba de la velocidad corriente arriba Ogata [12].

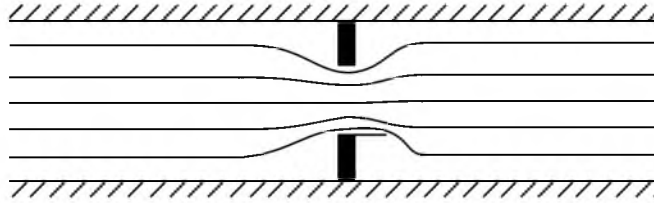


Figura 1.7: Flujo laminar o viscoso a través de un orificio cuando el número de Reynolds  $Re < 2000$ .

En la Fig.(1.7) la caída de presión se origina por las fuerzas cortantes internas que resultan de la viscosidad. Esta situación ocurre cuando el número de Reynolds es bajo. La Fig.(1.8) muestra el caso donde la caída de presión a través del orificio se origina por la aceleración del fluido de la velocidad corriente arriba a la velocidad del chorro más alta.

En relación con la Fig.(1.8), la velocidad del fluido se incrementa a velocidad de chorro en las secciones 1 y 2. El área del chorro emitido es menor que el área del orificio. El punto a lo largo del chorro en donde se hace mínima se llama vena contracta. La relación entre el área de la corriente  $A_2$  en la vena y el área del orificio  $A_o$  se llama coeficiente de contracción  $C_c$ :

$$A_2 = C_c A_o.$$

Puesto que el flujo entre las secciones 1 y 2 es de línea de corriente, se aplica la ecuación de Bernoulli. Resolviendo la Ec.(1.7) para las secciones 1 y 2, resulta:



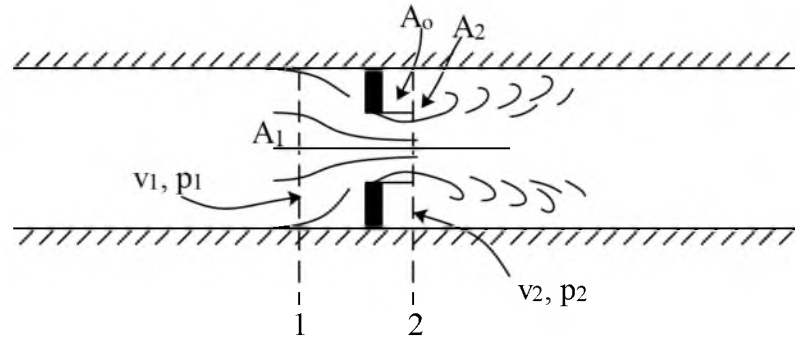


Figura 1.8: Flujo turbulento o inercial a través de un orificio cuando el número de Reynolds  $Re > 4000$ .

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2. \quad (1.10)$$

Si se supone que la altura al centroide de las secciones  $s_1$  y  $s_2$  son iguales  $z_1 = z_2$ , entonces la Ec.(1.10) se simplifica a la forma

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_2). \quad (1.11)$$

Se sabe que la ecuación de continuidad esta definida como

$$v_1 A_1 = v_2 A_2, \quad (1.12)$$

donde  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas de las corrientes en las secciones 1 y 2, respectivamente.

Resolviendo las Ecs.(1.11) y (1.12) para  $v_2$ , la razón de flujo volumétrico en la vena contracta:

$$v_2 A_2 = \frac{C_c A_o}{\sqrt{1 - (C_c^2 A_o^2 / A_1^2)}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_2)}. \quad (1.13)$$

La razón del flujo a través del orificio es una aproximación, porque no se incluye la fricción viscosa. Para ser considerada se introduce un factor empírico llamado coeficiente de velocidad  $C_v$  para dar la razón de flujo  $Q$ :

$$Q = C_v v_2 A_2,$$

o bien:

$$Q = \frac{C_v C_c A_o}{\sqrt{1 - (C_c^2 A_o^2 / A_1^2)}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_2)} = c A_o \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_2)}, \quad (1.14)$$

donde  $c$  es el coeficiente de descarga

$$c = \frac{C_v C_c}{\sqrt{1 - (C_c^2 A_o^2 / A_1^2)}}$$

El valor del coeficiente de descarga  $c$  casi siempre se obtiene en forma experimental. La Ec.(1.14) sirve para describir la presión y razón de flujo en las válvulas hidráulicas donde el área de estrangulamiento es regulada.

## 1.2. Justificación

En la industria de procesos, en los sectores de alimentos, bebidas, químicos, petrolero, farmacéutico, metalúrgico y de tratamiento de agua, es de uso común el manejo de fluidos, para almacenamiento, mezclas y regulación de variables como la presión, nivel y caudal. Los sistemas de tanques o contenedores son usados comúnmente para el manejo de agua, mezclas químicas, combustibles, líquidos para alimentos, entre otros. Los productos almacenados deben satisfacer la demanda en el proceso industrial.

El suministro continuo de líquido implica que siempre debe existir cierta cantidad almacenado en los tanques a un nivel de referencia preestablecido. La demanda del líquido también debe regular la velocidad volumétrica que se suministra en cada uno de los procesos y se debe garantizar la operatividad del sistema de flujo en los distintos puntos del proceso industrial.

El estudio de control de nivel y caudal en los sistemas hidráulicos es de gran importancia para la industria, su buen desempeño permite que los procesos industriales se lleven a cabo de manera continua y garanticen la eficiencia en los distintos puntos de trabajo. El trabajo presente cubre algunas líneas de investigación aplicada en mecatrónica, en materias como Modelado, Sistemas Mecatrónicos, Mecánica de Fluidos y lo más importante generar experiencia profesional para aplicaciones en el sector industrial.

## 1.3. Planteamiento del problema

En la industria de procesos la medición y el control de las variables de nivel y flujo se hacen necesarias al requerir una producción continua, al mantener una presión hidráulica, en procesos que requieran el control y medición de volúmenes de líquidos. La medición de estas variables al interior de un recipiente, pueden convertirse en un problema complejo, cuando el fluido es corrosivo, se mantiene a altas presiones o se encuentra en un recipiente completamente sellado, en el que no conviene tener partes móviles en su interior. El control de nivel entre dos puntos (en la entrada y la salida), es una de las aplicaciones indispensables en esta clase de sistema.

En este trabajo se estudia la respuesta de un sistema de tanques acoplados sometidos a distintas configuraciones de operación. También se aborda el problema de la instrumentación, caracterización de los sensores, una reestructuración general del sistema y un sistema de adquisición de datos del nivel y flujo.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. General

Controlar el nivel y caudal en una plataforma experimental de sistema de tanques acoplados mediante un esquema de control discontinuo.

### 1.4.2. Específicos

- Describir el modelo matemático no-lineal de un sistema de tanques acoplados.
- Reestructurar e integrar sensores de flujo en una plataforma experimental.
- Cambio de instalación hidráulica.
- Instalación de sensores de caudal.
- Calibración de dispositivos de nivel.
- Desarrollo de una etapa de potencia y programación de circuitos integrados.
- Aplicar un esquema de control discontinuo.
- Obtener resultados experimentales y validar el esquema de control.

## 1.5. Metodologías y Técnicas

La caracterización, instrumentación y control de variables hidráulicas en un sistema de tanques acoplados, esta conformado por las siguientes etapas:

#### 1. Revisión bibliográfica:

La primera etapa consiste en adquirir conocimiento previo sobre estos sistemas, las características propias del mismo así como su funcionamiento, por medio de la revisión de artículos científicos y documentos de tesis.

#### 2. Modelado matemático:

Se realizará un modelo matemático no-lineal que describa las dinámicas del sistema, con el cual se busca tener un mayor acercamiento a los efectos reales de la plataforma experimental de un sistema de nivel de líquidos en dos tanques conectados en serie, y se estudiará inicialmente de forma numérica mediante la programación del modelo en el software de Matlab Simulink®.

#### 3. Instrumentación y caracterización de accesorios hidráulicos sobre la plataforma:

Se llavera a cabo la etapa de potencia que habilite la alimentación eléctrica a la bomba y electroválvula, esta etapa eléctrica nos permitirá aplicar estrategias de control. De igual manera se realizará la caracterización de los sensores para la medición del caudal y del nivel de líquido en los tanques.

#### 4. Estrategias de control para regulación de nivel:

Por las características eléctricas de la electroválvula, esta puede estar totalmente abierta o totalmente cerrada, la cual se pretende controlar mediante un algoritmo que permita la manipulación del sistema, con estas propiedades un algoritmo apto para estas condiciones es el esquema de control On/Off.

#### 5. Obtención de resultados experimentales: Finalmente se aplicara el algoritmo de control sobre la plataforma para regular el nivel y caudal, para ello los sensores deberán medir el linea las variables del sistema. Una tarjeta de adquisición de datos en conjunto con el software de Matlab Simulink® permitirá aplicar el algoritmo y monitorear las variables controladas en tiempo real.

## 1.6. Estado del arte

En la gran mayoría de procesos industriales, dentro de la industria química, textil, metalúrgica y agrícola por menci,onar algunos casos, existe la necesidad de automatizar, optimizar y controlar procesos entre los cuales se encuentra el control de nivel de líquidos. A continuación se presentan algunos trabajos relacionados con este tipo de proceso.

Diego Santiago en 1994 [13], desarrolló una plataforma de tres tanques en serie los cuales pueden desacoplarse fácilmente, un sistema de adquisición de datos, sensores de presión diferencial en estado sólido (SCX01DNC) que miden el nivel de manera indirecta y un controlador PID que varía la velocidad de la bomba centrífuga accionada por un motor de CD WHIRLWIND.

En 2004 Benítez [4],realizó un trabajo de modelado de un sistema de nivel de líquido para un solo tanque, mediante un modelo dinámico no lineal. La plataforma usa una electroválvula donde se aplica el control y cuenta con otra a la salida del tanque. La interfaz inicialmente se realizó mediante Matlab® para posteriormente implementarla en LabView®. Para las pruebas en lazo cerrado utiliza un controlador PID. Este es un algoritmo basado en una función de error entre el valor deseado y el valor del nivel de sistema. Los parámetros del controlador se sintonizan usando los métodos de Ziegler-Nichols.

Otro trabajo consistió en la simulación y control de un sistema de tres tanques acoplados en dos plataformas computacionales: Simulink y Simple Control. Uno basado en una estrategia de control clásico y otro en una estrategia de control en el espacio de estados, y realizando una comparación en estas. Se inició con la toma de datos experimentales, en el vaciado y llenado de tanques para encontrar ciertos parámetros de la plataforma, se realizó un modelado y se incluyeron los parámetros experimentales, posteriormente se calcula las funciones de transferencia y la representación en variables de estados; Mantilla, 2005 [10].

En el 2010 Albarracín y Argüelles en 2010 [1], trabajaron con el diseño y construcción de una plataforma que cuenta con un tanque no lineal de  $\frac{1}{4}$  de esfera, un tanque de retardo (cilíndrico), un tanque cilíndrico y por ultimo un tanque de reserva (rectangular). Este sistema tiene distintos modos de operación y para efectos de control la plataforma; fue propuesta con 1 transmisor de potencia, 5 válvulas solenoides, 1 válvula de control, 1 válvula de disturbio, 1 medidor de caudal, 2 sensores

de nivel y 1 transmisor de potencia, el diseño y la simulación de esfuerzos mecánicos se realizó en el software SOLIDWORKS®.

La mayoría de los laboratorios trabajan con plataformas comerciales tal es el caso de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros y de Telecomunicación donde Pérez en el 2011 [14] , trabajó con la plataforma CE105 del fabricante TecQuipment de dos tanques conectados en serie mostrada en la Fig.(1.9), cuenta con una bomba de diafragma SHURHO (1), que ingresa agua al primer tanque y otra que aporta agua al segundo creando un sistema multivariable, sensores de nivel ultrasónico (3) y un caudalímetro (2). Existen además tres válvulas de paso variable: dos de ellas (de desagüe) conectadas en cada tanque con el depósito inferior y la otra permite el flujo entre los mismos. La adquisición de datos se realiza con una tarjeta compatible con la carcasa NI SCB -68 de National Instruments (4), que trabaja en el entorno de LabView®, realizaron un control inicialmente Proporcional para después mediante la estrategia de Ziegler-Nichols implementar un PID .

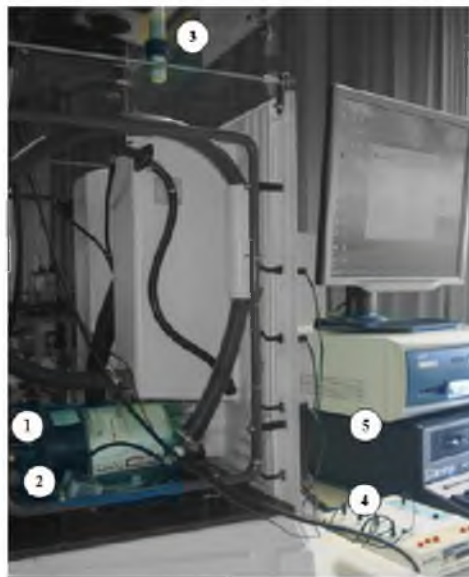


Figura 1.9: Plataforma CE105 de TecQuipment [14]

Otro trabajo aborda el problema del control de nivel de líquido en un tanque utilizando un esquema de control Fuzzy. En este trabajo se presenta el análisis del controlador usando el concepto de número de Fuzzy triangular, basado en una función de membresía incluida en el intervalo  $[0, 1]$ , consta de 3 números  $(a^a, a^n \text{ y } a^d)$  constantes definidas en la política del controlador. La función adopta un valor de cero en la línea de  $(-\infty, a^m]$ , incrementa linealmente en un valor de 1 en el segmento de  $(a^s, a^m)$ , es unitario en el punto de  $a^m$ , decrece linealmente hasta cero en  $(a^m, a^d)$  y adopta un valor de cero en el segmento de  $[a^d, +\infty)$ . En este trabajo el algoritmo de control Fuzzy es programado en Matlab® y presenta resultados numéricos para un sistema de nivel de un solo tanque Raduca, 2011 [17].

Por otra parte, en el 2011, Gil y Robayo [8] obtuvieron la dinámica de un sistema de dos tanques conectados aproximándola a un sistema de segundo orden y realizaron pruebas para la comprobación del modelo dinámico observando las respuestas del

sistema ante una perturbación tipo escalón unitario, tipo escalonada y sinusoidal creciente. En la Fig.(1.10) se observa la plataforma utilizada donde se aplica el control de nivel mediante el módulo SIPART DR20 de SIEMENS. Estos módulos envían el cual envía la señal del control PID a un PIC16F876 que controla una servoválvula de una pulgada y 2 vías esto realimentado con un sensor de presión diferencial MPX2010 .



Figura 1.10: Gil y Robayo, 2011 [8].

Dentro del estudio de este tipo de sistemas una de las características principales son los parámetros, Resistencia y Capacitancia Hidráulica, siendo el primero más complicado de encontrar debido a que al usar valores dados por los fabricantes estos no son los más confiables. En 2014 Peñaranda, Silva y Gómez [16] trabajaron en una plataforma de dos tanques conectados en cascada, donde utilizaron un controlador industrial Universal UDC1200 que les permite aplicar controles ON-OFF, PI, PD o PID. El control es aplicado a una electroválvula proporcional servo accionada de dos vías. Se obtienen las resistencias hidráulicas de su sistema variando el nivel 1.5 cm y midiendo tanto el volumen de fluido desalojado y el tiempo empleado en ello, lo cual genera una aproximación al flujo que circula en las válvulas. A partir de estos datos se construye una gráfica la cual proporciona una aproximación para la pendiente de la curva cerca del punto de equilibrio, indicando el valor próximo para las resistencias hidráulicas.

En el 2015 Fernández [7] realizó el modelado matemático no lineal de un tanque al cual se ingresa fluido y cuenta con una válvula de desagüe. Posterior a esto realiza una linealización por medio de las series de Taylor, utilizando únicamente el primer término ya que considera al sistema robusto, y aplicó un control Proporcional a la válvula de salida. A continuación se realiza el mismo análisis a un sistema con dos tanques acoplados en cascada, en el cual debido al modelado matemático propuesto se observa un comportamiento sub-amortiguado. Si se toma la salida del segundo tanque para retroalimentar el sistema.

Un enfoque para la industria medica fue el utilizado para la automatización del llenado de tanques para la preparación de líquidos dializantes. Aquí se utilizó un sensor ultrasónico, para asegurar que dichos líquidos no entren en contacto con agentes externos al tanque; Restrepo y Cardoba, 2015 [19]. El sensor utilizado es un ultrasónico SFR05 (DEVANTECH) capaz de detectar y calcular la distancia a la que se encuentra en un rango de 1.7 a 431 cm, dicho sensor puede ser activado 20 veces por segund. Se empleó una motobomba marca JCRM-PEDROLLO ( $80\text{ l/minutos}$ ,  $4.8\text{ m}^3/h$ ). Para la realización del modelo matemático del sistema de primer orden se utilizó una metodología experimental, obteniendo una función de transferencia. Esta función se ingresó a Simulink de Matlab aplicando el auto-tunning para encontrar los valores del controlador (PID) que permitiera una respuesta más rápida del sistema.

Pérez, Vargas, et al. (2018) [15] diseñaron un sistema de control multivariable de dos tanques conectados en serie por un válvula de compuerta. Inicialmente realizaron el modelado matemático y simulaciones en lazo abierto ante una entrada escalón. Se realizó un análisis de interacción para determinar las dimensiones necesarias y evaluar que estrategia de control utilizar, también utilizaron el Toolbox de Identificación de sistemas de Matlab. Realizaron pruebas experimentales en un sistema de dos tanques cilíndricos acrílicos, un recipiente metálico inferior, dos minibombas sumergibles lineales de CD, 2 sensores resistivos tipo galgas, el sistema de adquisición de datos se realizo en LabVIEW. Se hicieron pruebas con la válvula central abierta al 30, 90 y 100 % para establecer los valores adecuados del controlador PI. En la Fig.(1.11) se muestra el sistema de tanques construido.

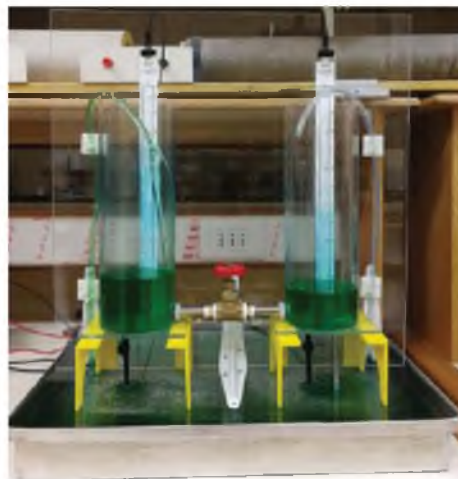


Figura 1.11: Pérez, Vargas et al. 2018 [15].

En 2014 Kumar et al. [9] realizaron un trabajo en un sistema de un tanque con una válvula de salida, se le ingresa líquido de un tanque de almacenamiento, donde se encuentra una bomba sumergible y el control es aplicado a una electroválvula, plantearon un modelo matemático lineal, calcularon el valor de la resistencia hidráulica de manera empírica, hicieron la comparación de los controles ON/OFF y PID para el nivel de líquido, esto con una tarjeta DAQ9234. La medición del nivel se realizo por medio de un sensor de presión diferencial.





## Capítulo 2

# Descripción del modelado matemático

Al estudiar un sistema se debe iniciar a partir de una predicción de su funcionamiento, antes de que el sistema pueda diseñarse, la cual se basa en la descripción matemática de las características dinámicas del sistema. Esto se conoce como modelado matemático. Para los sistemas físicos, la mayoría de los modelados matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales.

Al aplicar leyes físicas a un sistema específico, es posible desarrollar un modelado matemático que describa el sistema. Tal sistema puede incluir parámetros desconocidos, los cuales deben evaluarse mediante pruebas experimentales. Para determinar un modelo razonable simplificado, se necesita decidir cuáles de las variables y relaciones físicas no tienen efectos perceptibles y cuáles son cruciales en la exactitud del modelo. Otro factor importante al realizar modelado es la experiencia ya que esta permitirá la mayor comprensión del sistema, así como un mejor análisis, (Ogata [12]).

Al realizar un modelado matemático es necesario:

1. Dibujar un diagrama esquemático del sistema y definir las variables.
2. Utilizando leyes físicas, escribir ecuaciones para cada componente, combinándolos de acuerdo con el diagrama del sistema y obtener un modelo matemático.
3. Para verificar la validez del modelo, la predicción acerca del funcionamiento obtenida al resolver las ecuaciones del modelo, se comparará con resultados numéricos (simulaciones), y resultados experimentales.

### 2.1. Sistema Hidráulico de dos tanques acoplados

El sistema que se analiza consiste de dos tanques acoplados en serie presentado en la Fig.(2.1), el caudal de entrada  $q_o(t)$ , es suministrado al primer tanque. Una propiedad geométrica que caracteriza a los tanques es la capacitancia hidráulica denotado por  $A_1$  y  $A_2$ . El nivel de líquido en los tanques son denotados por las

variables  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$ . Las válvulas colocadas en el trayecto de flujo generan resistencia hidráulica y se describen por las constantes  $R_1$  para la válvula colocada entre tanques y  $R_2$  para la válvula de salida. El líquido que fluye del tanque al tanque 2 es medida por el caudal  $q_2(t)$ . Para estudiar el modelo se analizarán tres puntos específicos sobre el sistema 0,1,2 y 3.

La superficie de líquido del tanque 1 está expuesta a una presión atmosférica  $P_o$ , la presión hidráulica generada delante de la válvula 1 es denotado por  $P_1$ , la presión que existe en la superficie de líquido del tanque 2 es  $P_2$  y por ultimo la presión hidráulica en la válvula de salida 2 es  $P_3$ . La sección transversal equivalente de los elementos hidráulicos colocados en el trayecto de flujo del tanque 1 al 2 es denotado por  $A_{s1}$  y la sección equivalente a los elementos hidráulicos colocados en el flujo de salida es  $A_{s2}$ .

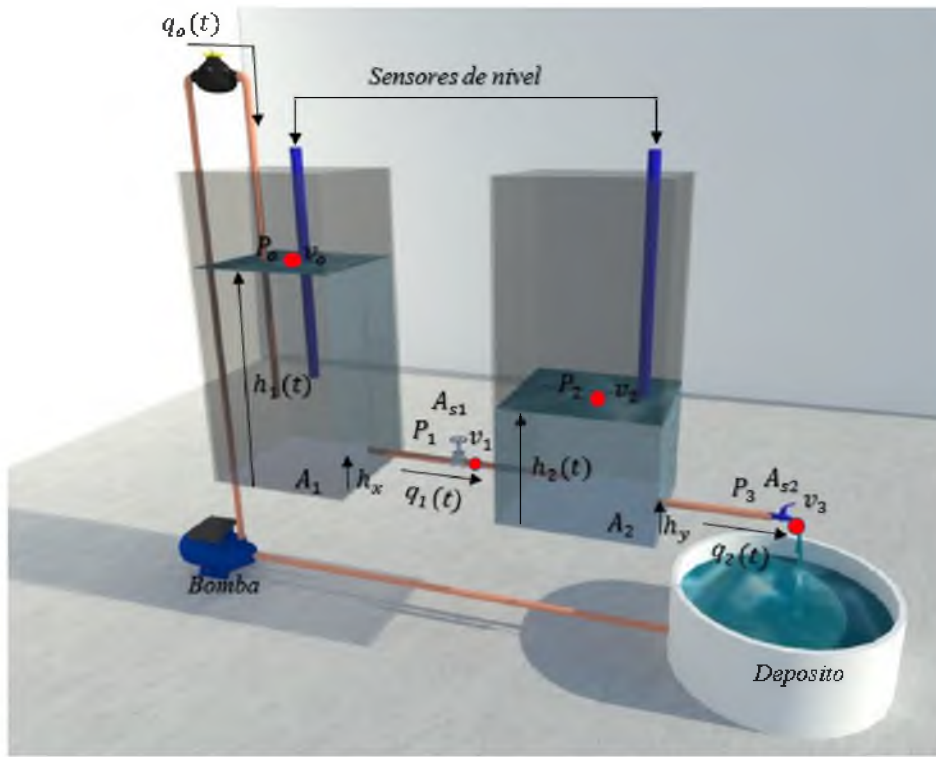


Figura 2.1: Sistema de Tanques conectados en serie.

Se inicia con el teorema de conservación de la energía mecánica. Este teorema establece que, en ausencia del aire u otras fuerzas disipativas, la suma de las energías potenciales y cinéticas es una constante, denominada como energía total del sistema Ec.(2.1),

$$W = E_C + E_p. \quad (2.1)$$

Cuando se aplica este principio se considera el inicio y final del proceso que estamos tratando, en este caso el primer tanque, del balance de trabajo debido a las fuerzas de presión se observa:

$$W = (P_o - P_1)\Delta V, \quad (2.2)$$

la energía cinética

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}\Delta m\nu_1^2 - \frac{1}{2}\Delta m\nu_o^2, \quad (2.3)$$

y la energía potencial

$$\Delta E_p = \Delta U = \Delta mgh_x - \Delta mgh_1. \quad (2.4)$$

De acuerdo al balance de energía mecánica del sistema y sustituyendo la Ec.(2.3) y (2.4) en (2.2) y dividiendo entre  $\Delta V$  :

$$\frac{(P_o - P_1)\Delta V}{\Delta V} = \frac{\Delta m\nu_1^2}{2\Delta V} - \frac{\Delta m\nu_o^2}{2\Delta V} + \frac{\Delta mgh_x}{\Delta V} - \frac{\Delta mgh_1}{\Delta V} \quad (2.5)$$

Las moléculas de un fluido no están fijas en una red, sino que se mueven libremente, la densidad, o la masa por unidad de volumen, no tiene significado preciso, de esta forma el número de moléculas en el interior de un volumen cualquiera cambia continuamente. Este efecto pierde importancia si la unidad de volumen es mucho mayor que el cubo del espaciado molecular, ya que el número de moléculas permanecerá prácticamente constante a pesar del considerable intercambio a través de su contorno. Existen volúmenes límites  $\delta V^*$  por debajo del cual las variaciones moleculares pueden ser importantes y por encima del cual las variaciones macroscópicas también lo pueden ser.

La densidad  $\rho$  de un fluido se define como  $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ , el volumen límite es alrededor de  $10^{-9}mm^3$  para todos los líquidos y gases a presión atmosférica. En el caso de estudio las dimensiones físicas son mucho mayores que este volumen límite, de modo que la densidad es esencialmente una función puntual y las propiedades del fluido pueden considerarse como variables continuas en el espacio, (Ogata [12]).

Por lo tanto la Ec.(2.5) se simplifica como:

$$(P_o - P_1) = \frac{1}{2}\rho\nu_1^2 - \frac{1}{2}\rho\nu_o^2 + \rho gh_x - \rho gh_1, \quad (2.6)$$

La velocidad en la superficie del fluido  $\nu_o$ , en el primer tanque debido al teorema de Torricelli (la velocidad en un área transversal mayor disminuye o se anula mientras que en una pequeña aumenta, se desprecia). Otra consideración se realiza tomando a  $h_x$  despreciable comparada al nivel del tanque  $h_1$ , por lo que la Ec. (2.6) se reduce a:

$$(P_o - P_1) = \frac{1}{2}\rho\nu_1^2 - \rho gh_1 \quad (2.7)$$

Mediante la relación de presión y profundidad, la ecuación de la hidrostática nos menciona que en una columna líquida; de la cual sabemos que la variación de la presión en un fluido aumenta de acuerdo a la altura,  $P_1$  se calcula al sumar  $\rho gh_2$  a la presión que ejerce la atmósfera a la columna de fluido

$$P_1 = P_o + \rho gh_2 \quad (2.8)$$

reemplazando la ec. (2.8) en (2.7) se obtiene:

$$P_O - P_O - \rho gh_2 = \frac{1}{2}\rho\nu_1^2 - \rho gh_1$$

reduciendo términos y despejando la velocidad  $\nu_1$  que existe entre los tanques

$$\nu_1 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.9)$$

La velocidad  $\nu_1$  está dada por una relación no-lineal que depende de la diferencia de niveles entre los tanques influenciada por la gravedad.

Conociendo la velocidad del flujo del tanque 1 al 2, calculamos el caudal que existe entre ellos, de la mecánica de fluido se sabe que el caudal esta dado por la variación de la velocidad el fluido a través un área transversal;  $q = A\nu$ , por lo tanto el caudal entre los tanques es dado por, la velocidad del fluido que pasa por el área  $A_{s1}$ ;

$$\begin{aligned} q_1 &= A_{s1}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \\ q_1 &= A_{s1}\sqrt{2g}\sqrt{(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

dado que  $A_{s1}$  es una sección constante y  $g$  es la constante gravitacional y para simplificar el análisis agrupamos  $k_1 = A_{s1}\sqrt{2g}$ , por lo que reescribimos la Ec. (2.10) como

$$q_1 = k_1\sqrt{(h_1 - h_2)} \quad (2.11)$$

Se realizó el mismo análisis para el segundo tanque partiendo de la ecuación conservación de energía mecánica:

$$W = E_C + E_p$$

Relacionamos las presiones de la superficie del fluido en el segundo tanque y la presión de salida del fluido, obteniendo:

$$(P_2 - P_3)\Delta V = \frac{1}{2}\Delta m\nu_3^2 - \frac{1}{2}\Delta m\nu_2^2 + \Delta mgh_y - \Delta mgh_2 \quad (2.12)$$

Dividiendo entre  $\Delta V$  la Ec.(2.12) se reescribe como

$$\frac{(P_2 - P_3)\Delta V}{\Delta V} = \frac{\Delta m\nu_3^2}{2\Delta V} - \frac{\Delta m\nu_2^2}{2\Delta V} + \frac{\Delta mgh_y}{\Delta V} - \frac{\Delta mgh_2}{\Delta V}, \quad (2.13)$$

recordando que  $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$  la Ec.(2.13) queda de la siguiente manera

$$(P_2 - P_3) = \frac{1}{2}\rho\nu_3^2 - \frac{1}{2}\rho\nu_2^2 + \rho gh_y - \rho gh_2$$

Considerando que  $h_x$  es muy pequeña, en consideración a la altura del segundo tanque, se desprecia y de acuerdo al Teorema de Torricel,  $\nu_2 = 0$ , (White [21]);

$$(P_2 - P_3) = \frac{1}{2}\rho\nu_3^2 - \rho gh_2 \quad (2.14)$$

Tomando en cuenta que  $P_2$  y  $P_3$  son presiones atmosféricas y que, por lo tanto, se anulan, la Ec.(2.14) se simplifica a:

$$\frac{1}{2}\rho\nu_3^2 - \rho gh_2 = 0 \quad (2.15)$$

Despejando la velocidad de salida del fluido en el segundo tanque,  $\nu_3$ , en la Ec.(2.15)

$$\nu_3 = \sqrt{2g\sqrt{h_2}}$$

debido que  $q = A\nu$ ;  $q_2 = A_{s2}\nu_3$ , por lo tanto

$$q_2 = A_{s2}\sqrt{2g\sqrt{h_2}}$$

Se denota por  $k_2 = A_{s2}\sqrt{2g}$  de esta forma  $q_2$  se puede representar como:

$$q_2 = k_2\sqrt{h_2} \quad (2.16)$$

El modelado anteriormente mostrado emula al sistema de dos tanques conectados en serie, acoplados únicamente por tubería. Sin embargo el prototipo físico con el que se está trabajó presenta un acoplamiento de tubería y válvulas mostrado en la Fig.(4.1). El flujo a través de una válvula o accesorio en una línea de tubería causa una reducción en altura estática, este se expresa en función de la razón de cambio de altura (Crane [5]).

Debido a que los flujos  $q_1$  y  $q_2$  se les agrega una constante de perdida, denotada por el termino  $c_n$ . Por lo tanto las Ecs. (2.11) y (2.16) son reescrita por,

$$q_1 = K_1\sqrt{(h_1 - h_2)}, k_1 = c_1k_1 \quad (2.17)$$

$$q_2 = K_2\sqrt{h_2}, K_2 = c_2k_2 \quad (2.18)$$

Con base en un diagrama eléctrico análogo al sistema de tanques y por medio de las leyes de Kirchhoff, (Sadiku [2]) (ver Fig.(2.2)).

Del nodo 1 donde,  $q_o$  entra y  $q_{o1}$  y  $q_1$  salen se representa con la Ec.(2.19)

$$q_o = q_1 + q_{o1} \quad (2.19)$$

Se sabe que  $q = A\nu$  o  $q = A\frac{dh}{dt}$ , por lo tanto:

$$q_{o1} = A_1\frac{dh_1}{dt}$$

La Ec.(2.19) se puede expresar como:

$$q_o = A_1\frac{dh_1}{dt} + K_1\sqrt{(h_1 - h_2)} \quad (2.20)$$

Despejando la variación del nivel en el tiempo, de la Ec.(2.20)

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_o}{A_1} - \frac{K_1\sqrt{(h_1 - h_2)}}{A_1} \quad (2.21)$$

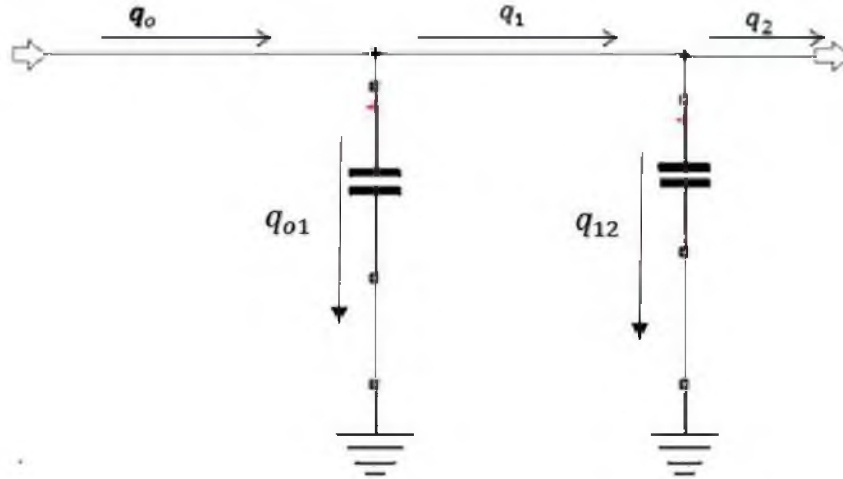


Figura 2.2: Representación eléctrica

De acuerdo a la literatura, la inversa de la constante  $K_1$  se renombra con el coeficiente de resistencia la flujo  $R_1$  (Crane [5]):

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_o}{A_1} - \frac{\sqrt{(h_1 - h_2)}}{R_1 A_1} \quad (2.22)$$

La variación del primer tanque se ve afectada por el caudal de entrada  $q_o$ , menos la raíz de la resta de los niveles todo entre la sección transversal del primer tanque.

Ahora para el nodo 2 se tiene:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{12} + q_2, \\ q_{12} &= A_2 \frac{dh_2}{dt}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Por lo tanto, la Ec.(2.23) tiene la forma

$$K_1 \sqrt{(h_1 - h_2)} = A_2 \frac{dh_2}{dt} + K_2 \sqrt{h_2} \quad (2.24)$$

Despejando  $\frac{dh_2}{dt}$  de la Ec.(2.24) y reescribiéndola de la siguiente manera,

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{K_1 \sqrt{(h_1 - h_2)}}{A_2} - \frac{K_2 \sqrt{h_2}}{A_2} \quad (2.25)$$

De igual manera que para  $\frac{dh_1}{dt}$  se expresa el termino  $K_2$  por su coeficiente de resistencia la flujo  $R_2$ ;

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{\sqrt{(h_1 - h_2)}}{R_1 A_2} - \frac{\sqrt{h_2}}{R_2 A_2} \quad (2.26)$$

Podemos observar que la variación de nivel del segundo tanque se ve afectada por la raíz de la diferencia de las alturas respecto a la capacitancia hidráulica o la sección transversal del segundo tanque.

# Capítulo 3

## Resultados numéricos

Este capítulo aborda el problema de control de nivel  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$ , así como el control de caudal  $q_2(t)$  presente a la salida del segundo tanque, se describe el algoritmo de control implementado así como las principales características del mismo, se utiliza el software Matlab Simlink® para realizar el análisis numérico del modelado no lineal propuesto.

### 3.1. Algoritmo de control

La técnica de control por regímenes deslizantes es una estrategia de control discontinuo, aplicable tanto a sistemas lineales como no lineales, cuyas ventajas principales son la simplicidad del algoritmo, fácil de implementar en forma experimental y por sus buenas propiedades de robustez con respecto a cierta incertidumbre en los parámetros del sistema, presencia de dinámicas no modeladas y perturbaciones dinámicas. Este tipo de controlador se ha aplicado con mucho éxito en numerosos problemas de ingeniería como motores eléctricos, procesos químicos, manejo de flujos, sistemas mecánicos como robots, entre otros. La complejidad en la síntesis del control por modos deslizantes depende directamente del orden y las propiedades intrínsecas del sistema a controlar (ver, e.g., Utkin [20] y DeCarlo et al. [18]).

Considere un sistema no lineal con una entrada y una salida, de orden  $n$ , de la forma:

$$y^{(n)} = f(x) + g(x)u, \quad x \in R^n, u \in R \quad (3.1)$$

donde  $x$ ,  $u$ ,  $y$  denotan el vector de estado, la entrada de control (e.g., fuerza) y la salida a controlar (e.g., posición), respectivamente;  $f$  y  $g$  son funciones al menos de clase  $C_1$  (i.e., continuamente diferenciables) con  $g(x) \neq 0$ , al menos en una vecindad que contiene al origen. La expresión  $y^{(n)}$  representa la  $n$ -ésima derivada de la salida respecto al tiempo. El vector de estado está descrito por la salida  $y$  y derivadas sucesivas hasta de orden  $(n - 1)$ , o sea que

$$x = \begin{bmatrix} y & \dot{y} & \ddot{y} & \dots & y^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

En este caso, se supone cierto grado de incertidumbre en el sistema, reflejada en las funciones  $f$  y  $g$ . En un sistema hidráulico, estas funciones pueden ser debidas al conocimiento inexacto de las constantes de resistencia al flujo  $R$  y capacitancia

del recipiente  $C$ . Claramente se está suponiendo, por simplicidad, que el sistema es completamente controlable, diferencialmente plano o de grado relativo  $n$ , de manera que sea posible diseñar una ley de control que permita estabilizarlo, o seguir asintóticamente una trayectoria de referencia, en forma robusta.

El problema de estabilización o seguimiento asintótico de la salida del sistema, se resuelve diseñando una ley de control que garantice el comportamiento deseado de la dinámica del error de seguimiento del sistema, alrededor y sobre la llamada superficie de conmutación o deslizamiento  $\sigma(e)$ . El problema de control por modos deslizantes convencional se muestra en los siguientes procedimientos (ver, e.g., Utkin [20] y DeCarlo et al. [18], y Sira et al. [6]):

- Definición de la superficie de conmutación  $\sigma(e)$ .

La superficie de conmutación, también conocida como superficie deslizante  $\sigma(e)$  se define de la forma:

$$\sigma(e) = e^{(n-1)} + \beta_{n-2}e^{(n-2)} + \dots + \beta_2\ddot{e} + \beta_1\dot{e} + \beta_0e \quad (3.3)$$

donde  $\beta_i$ ,  $i = 0, \dots, (n-2)$ , son constantes positivas reales y  $e$  denota el error de seguimiento  $e = y_d - y$ , con  $y_d$  siendo una trayectoria de referencia deseada.

- Dinámica del error restringida a la superficie de conmutación  $\sigma(e) \equiv 0$ .

Para que la dinámica de error de seguimiento del sistema se logre mantener en la superficie de conmutación  $\sigma(e) \equiv 0$  y sobre la misma el error de seguimiento se vaya asintóticamente al origen, se necesita cumplir que

$$\dot{\sigma}(e) = e^{(n)} + \beta_{n-2}e^{(n-1)} + \dots + \beta_1\ddot{e} + \beta_0\dot{e} \equiv 0 \quad (3.4)$$

Reemplazando  $y^n$  de la Ec.(3.1) en la función  $\dot{\sigma}$ , se obtiene

$$\dot{\sigma}(e) = \left[ y_d^{(n)} - \left( \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}_{eq} \right) \right] + \beta_{n-2}e^{(n-1)} + \dots + \beta_1\ddot{e} + \beta_0\dot{e} \equiv 0$$

donde  $u_{eq}$  denota al llamado control equivalente (ver Utkin [20]), el cual se despeja como

$$u_{eq} = g^{-1}(x) \left[ -f(x) + y_d^{(n)} + \left( \beta_{n-2}e^{(n-1)} + \dots + \beta_1\ddot{e} + \beta_0\dot{e} \right) \right] \quad (3.5)$$

Las propiedades de estabilidad de la dinámica de deslizamiento  $\sigma$  quedan especificadas en términos de la estabilidad del polinomio característico

$$s^{(n-1)} + \beta_{n-2}s^{n-2} + \dots + \beta_1s + \beta_0 = 0$$

dependientes de los valores de los coeficientes  $\beta_i$ , ( $i = 0, \dots, n-2$ ).

Por lo tanto, con una selección apropiada de las constantes  $\beta_i$  se puede garantizar la estabilidad asintótica de la dinámica del error, es decir, que  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ .

- La dinámica del error cuando  $\sigma(e) \neq 0$  (fuera de la superficie  $\sigma(e) \equiv 0$ ) y que debe converger hacia la superficie de conmutación  $\sigma(e) \equiv 0$ .



La ley de control por modos deslizantes completa se describe como:

$$u = u_{eq} + u_{md}$$

donde  $u_{md}$  es el *control discontinuo* que funciona cuando  $\sigma(e) \neq 0$  y que es la única acción de control que físicamente se aplica al sistema real. Se acostumbra a utilizar el control discontinuo de la siguiente forma (ver Utkin [20])

$$u_{md} = \frac{W}{g(x)} \text{sign}(\sigma(e)) \quad (3.6)$$

donde  $W$  es una constante positiva de diseño y  $\text{sign}(\sigma)$  denota la función *signum*. Para lograr que el sistema opere sobre la superficie de conmutación, se alterna los valores de  $u_{md}$  entre dos valores posibles, según sea el signo de  $\sigma(e)$ ,

$$u_{md} = \begin{cases} u_{md}^+ & \text{si } \sigma(e) > 0 \\ u_{md}^- & \text{si } \sigma(e) < 0 \end{cases}$$

donde los dos niveles de  $u_{md}$ , son funciones suaves de los estados que no se cruzan. De manera general, el control discontinuo se basa en la conmutación a alta frecuencia de la señal de control  $u$  para lograr que el sistema converja a la superficie deseada en el espacio de estados, y mantener así las trayectorias del sistema dentro de la misma superficie en el tiempo subsecuente.

El control discontinuo también a menudo es llamado como *Control On/Off* debido a las conmutaciones que realiza la acción de  $u(t)$ , esto conlleva a solo tener 2 estados de control  $u(t) \in \{-|u|, +|u|\}$ . Esto sucede cuando la superficie de conmutación difiere de cero  $\sigma(e) \neq 0$  y en la práctica solo opera la acción discontinua que estabiliza el sistema alrededor de la referencia Utkin [20].

Este documento está enfocado a la regulación de nivel y caudal del líquido de 2 tanques conectados en serie. La acción de control se realiza a través de un dispositivo electromecánico (electroválvula) encargado de aplicar la acción del control  $u(t)$  que presenta características eléctricas con dos condiciones de operación *abierto ó cerrado*, es decir deja pasar un flujo constante  $|q_0|$  o cierra 0 y por lo tanto los dos estados de control son  $u(t) \in \{0, |q_0|\}$ . Una bomba hidráulica suministra un flujo constante de  $|q_0| \approx 122.35 \text{ GPH}$  al tanque 1, está se mantiene siempre activa para el llenado.

Para el sistema de tanques, descrito en la sección [4], si la variable de salida es el nivel del segundo tanque  $h_2(t)$ , la función de transferencia de la salida respecto de la entrada es un sistema de segundo orden. Por lo tanto se define la función de conmutación  $\sigma$ , basada en el error entre la variable de salida  $h_2(t)$  y la referencia  $h_{2d}$ , como

$$\sigma = \alpha_1 e(t) + \alpha_2 \dot{e}(t), \quad \alpha_1, \alpha_2 \in R, \quad (3.7)$$

$$e(t) = h_{2d}(t) - h_2(t). \quad (3.8)$$

Desde un punto de vista geométrico, la función  $\sigma$  define una superficie deslizante (cuando esta se encuentra alrededor de  $\sigma \equiv 0$ ) en el que los estados controlados del sistema tienden a la superficie. En la Fig. (3.1) se muestra una interpretación gráfica de la evolución de los estados.

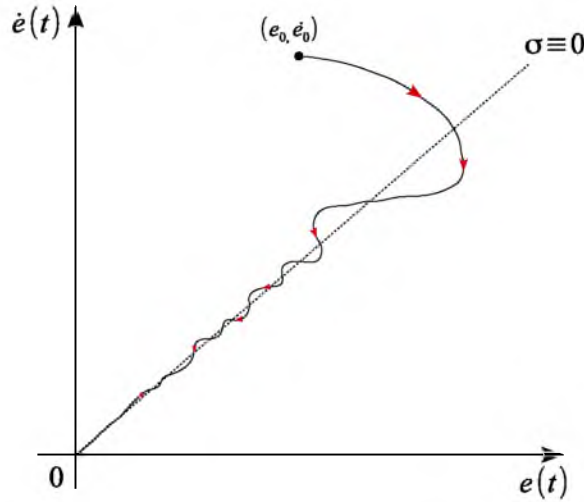


Figura 3.1: Evolución de los estados.

La acción de control actúa mediante la entrada de caudal  $q_0(t)$ , la cual suministrada en el tanque 1 y es descrito por la Ec.(3.9),

$$q_0(t) = |q_0| \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{sign}(\sigma) \right) \quad (3.9)$$

donde

$$\text{sign}(\sigma) = \begin{cases} 1 & \sigma > 0 \\ -1 & \sigma < 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

En la prueba experimental la bomba se mantiene siempre encendida suministrando un caudal constante  $|q_0|$ . La electroválvula es el elemento que activa o desactiva el flujo (ver detalles en el capítulo 4); al energizarse con una entrada de 12V, y es dirigida por la función  $E = 12 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{sign}(\sigma) \right)$ .

$$\mathbf{E} = \begin{cases} 12V & \sigma > 0 \\ 0 & \sigma < 0 \end{cases}$$

## 3.2. Prueba en lazo abierto

A continuación se presentan los resultados del modelado matemático del sistema de dos tanques conectados en serie (ver Fig.(2.1)). Los resultados numéricos se obtienen en la programación de Matlab Simulink, con el tipo de integrador Runge Kutta y un periodo de muestreo de 10 ms.

Para realizar las pruebas numéricas en lazo abierto se considera el modelo matemático del sistema de tanques acoplados mostrado en las Ecs. (2.22) y (2.26). En la prueba inicial los tanques se llenan a distintas altura y el caudal de entrada se considera nulo  $q_o = 0$ .

Las constantes hidráulicas del modelo matemático, resistencia al flujo  $R$  y capacitancia hidráulica  $A$  se muestran en la Tabla.(3.1).

| Características | Unidad                                 |
|-----------------|----------------------------------------|
| $A_1$           | $0.0372 \text{ m}^2$                   |
| $A_2$           | $0.0372 \text{ m}^2$                   |
| $g$             | $9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$      |
| $R_1$           | $2300 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$ |
| $R_2$           | $3600 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$ |

Tabla 3.1: Parámetros del sistema.

### 3.2.1. Descarga de Tanques

En esta prueba inicial se considera que los tanques están parcialmente llenos a una altura de 30 cm de nivel de líquidos,  $h_1(0) = h_2(0) = 0.30 \text{ m}$ , se consideran que la válvula entre tanques completamente abierta  $R_1 = 2300 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$  y la válvula de salida del segundo tanque también  $R_2 = 3600 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$ .

En la Fig.(3.2) se muestra la descarga simultanea de ambos tanques  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  bajo las condiciones descritas con anterioridad. Se observa que el tiempo de descarga en ambos tanques es de 300 s y el comportamiento no lineal corresponde a las características del modelo matemático propuesto. Algo importante que se observa es que la pendiente de la curva de descarga del tanque 2 es mayor a la del tanque 1 en los primeros 100 s de descarga.

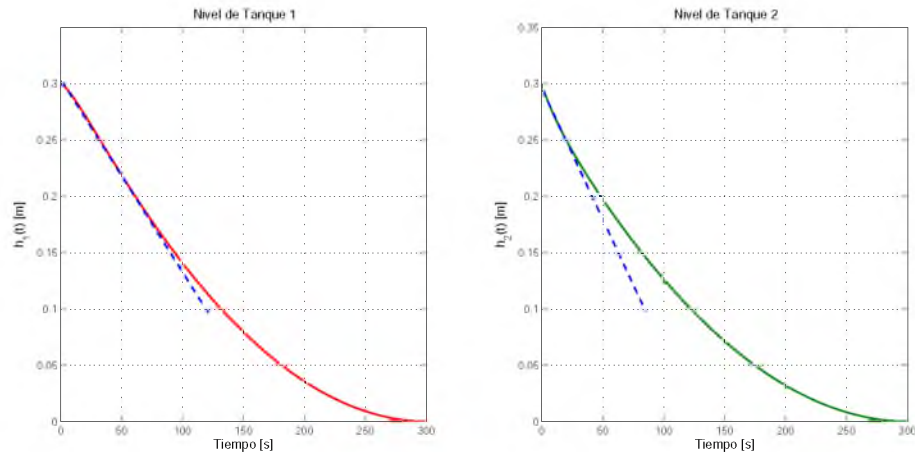


Figura 3.2: Prueba 1 con condiciones  $h_1(0) = h_2(0) = 0.30 \text{ m}$  y válvulas completamente abiertas.

### 3.2.2. Descarga de tanques a distintas alturas, con la válvula de salida cerrada

La segunda prueba en lazo abierto consistió en cerrar completamente la válvula de salida. Se considera que la constante  $R_2$  tiene un valor muy grande ( $R_2 \gg 3600 \frac{s}{m^{2.5}}$ ) y se mantiene abierta la válvula entre tanques ( $R_1 = 2300 \frac{s}{m^{2.5}}$ ). En esta prueba se asume que el nivel de líquido en el tanque 1 es  $h_1(0) = 0.30 \text{ m}$  y el nivel de líquido en el segundo tanque  $h_2(0) = 0.15 \text{ m}$ . Existe una diferencia de presión hidrostática en los tanques, debido a la diferencia de altura de líquido inicial; por lo tanto el líquido del tanque 1 se descarga en el tanque 2 hasta que se logra mantener una igualdad en el nivel de líquido en ambos tanques. Este proceso de descarga se lleva a cabo en un periodo de 30 s ( $h_1(30)=h_2(30)$ ), hasta alcanzar una igualdad en nivel de  $0.225 \text{ m}$  y se mantiene así indefinidamente, tal como se muestra en la Fig.(3.3).

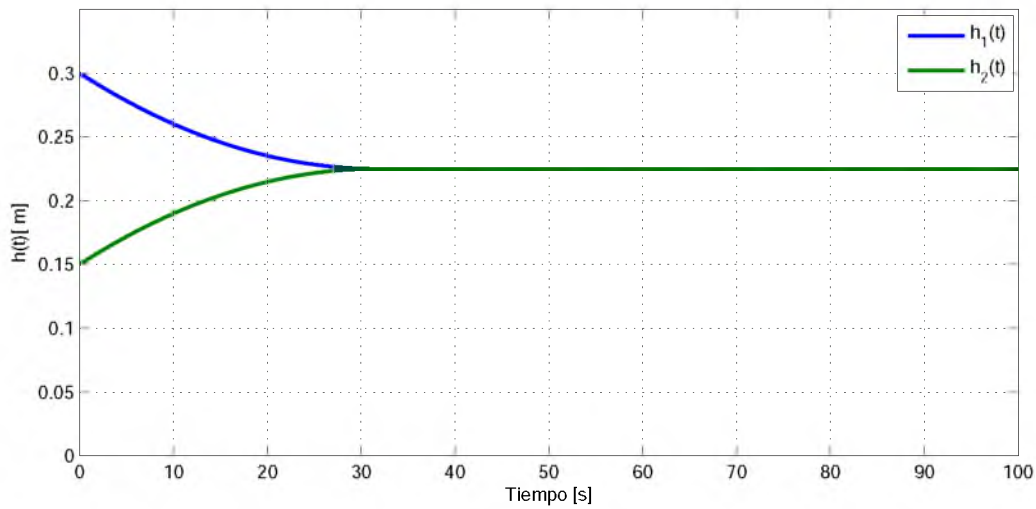


Figura 3.3: Prueba 2 con condiciones  $h_1(0) = 0.30 \text{ m}$  y  $h_2(0) = 0.15 \text{ m}$ , válvula 1 abierta y válvula 2 cerrada.

### 3.2.3. Descarga de tanques a distintas alturas, con ambas válvulas abiertas

La tercer prueba se realizó considerando el tanque 1  $h_1(0) = 0.3 \text{ m}$  y el tanque 2  $h_2(0) = 0.15 \text{ m}$ , ambas válvulas abiertas ( $R_1 = 2300 \frac{s}{m^{2.5}}$  y  $R_2 = 3600 \frac{s}{m^{2.5}}$ ). De la misma forma debido a la diferencia de presión hidrostática ambos tanques tratan de igualarse en nivel durante los primeros 20 s, lo que conlleva a una elevación parcial de nivel de líquido en el tanque 2 en este lapso de tiempo. (ver Fig.(3.4)). Una vez que los tanques se han igualado en nivel de líquido se descargan de forma exponencial en aproximadamente 4 minutos.

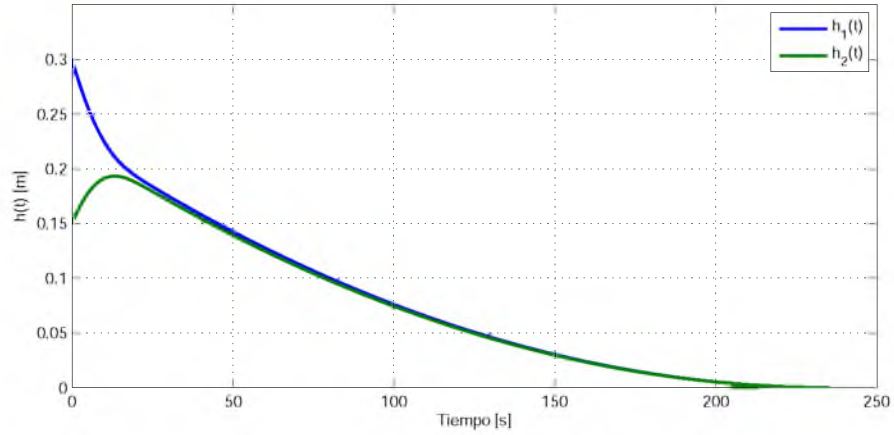


Figura 3.4: Prueba 3 con condiciones  $h_1(0) = 0.3 \text{ m}$  y  $h_2(0) = 0.15 \text{ m}$  y válvulas abiertas.

### 3.3. Resultados en lazo cerrado

#### 3.3.1. Control de nivel del Tanque 1

El control de nivel en ambos tanques se realiza aplicando el algoritmo descrito en la Ec.(3.9) y una función de conmutación  $\sigma$  con ganancias  $\alpha_1 = 10$ ,  $\alpha_2 = 7$ .

##### Regulación de nivel de $h_1(t)$

Para el control de nivel del tanque 1 se aplica el mismo algoritmo, con una referencia  $h_{1d} = 0.2 \text{ m}$ . Inicialmente los tanques están completamente vacíos  $h_1(0) = h_2(0) = 0 \text{ m}$  y ambas válvulas completamente abiertas.

Para que el tanque 1 alcance su valor de referencia  $h_{1d}$ , el algoritmo activa el flujo constante  $|q_0| = 12.86 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , tal como se muestra en la Fig.(3.5).

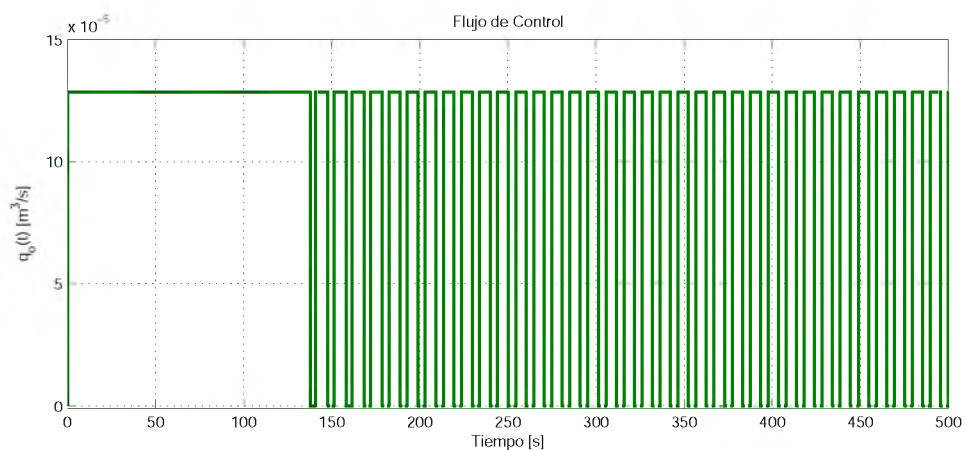
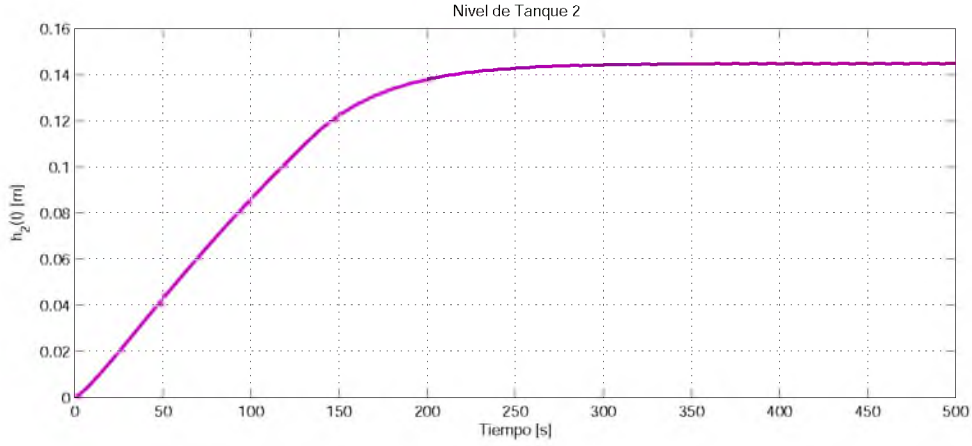


Figura 3.5: Esfuerzo de Control.

Figura 3.6: Respuesta de  $h_2(t)$ .

El control se mantiene saturado en su máximo valor  $|q_0|$  durante 135 s, posteriormente se activa y desactiva el flujo para mantener el nivel del líquido  $h_1(t)$  alrededor de la referencia  $h_{1d}$ , como se puede observar en la Fig.(3.7). El nivel del tanque 2  $h_2(t)$  se estabiliza en 0.145 m, cuando el nivel de tanque 1 alcanza su referencia como se observa en la Fig.(3.6).

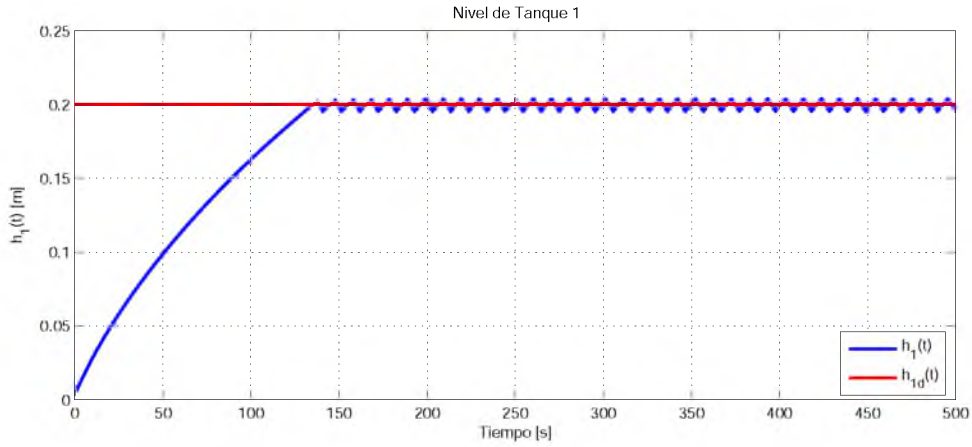


Figura 3.7: Control de Nivel en Tanque 1.

### Seguimiento de nivel del Tanque 1

La siguiente prueba propone la planificación de nivel en el tanque 1, basado en un polinomio de Bezier de décimo orden, la cual se describe en la Ec.(3.11).

$$h_{1d} = h_{10} + (h_{1f} - h_{10}) \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^5 \left[ \sum_{i=0}^{i=5} (-1)^i \gamma_i \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^i \right] \quad (3.11)$$

donde  $h_{1d}$  es el nivel planificado,  $h_{10}$  el nivel inicial,  $h_{1f}$  el nivel final,  $t_0$  el tiempo de inicio y  $t_f$  el tiempo final de planificación. Los coeficientes constantes del polinomio son:  $h_{10} = 0.02$  m,  $h_{1f} = 0.20$  m,  $t_0 = 0$  s,  $t_f = 650$  s,  $\gamma_0 = 552$ ,  $\gamma_1 = 1050$ ,

$$\gamma_2 = 1800, \gamma_3 = 1575, \gamma_4 = 700, \gamma_5 = 126.$$

En la prueba se aplica el mismo algoritmo discontinuo, Ec.(3.9), para el seguimiento de nivel  $h_{1d}$ . La Fig.(3.8) muestra la respuesta  $h_1(t)$ , donde se observa la convergencia, de la salida, a la referencia después de 800 s de simulación. El control  $q_o(t)$  actúa directamente en el tanque 1 y los efectos del algoritmo activar o desactivar el flujo se reflejan en oscilaciones de baja amplitud. Este efecto es conocido como chattering (ver Fig.(3.8)).

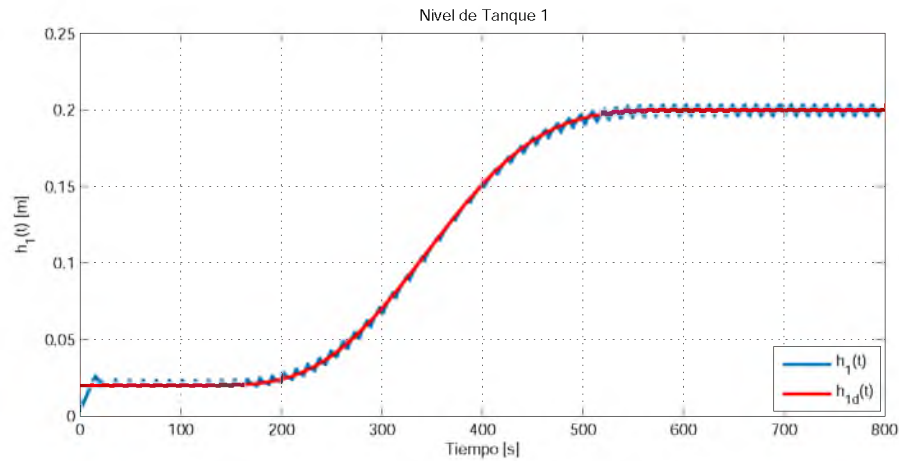


Figura 3.8: Seguimiento de nivel  $h_1(t)$  con trayectoria tipo Bezier.

El algoritmo de control mantiene una conmutación del flujo, indicando la activación o desactivación del caudal de entrada. Entonces, la convergencia de la salida a la referencia se garantiza con una conmutación de la entrada  $q_o(t)$  inferior a 0.1 Hz, como se observa en la Fig.(3.9).

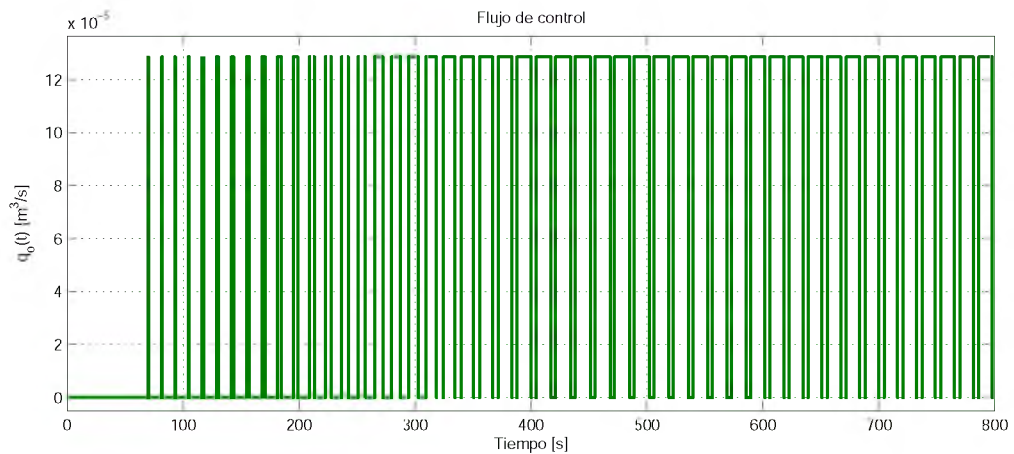


Figura 3.9: Esfuerzo de Control y Altura  $h_2$ .

La respuesta del control aumenta su frecuencia de conmutación cuando la trayectoria es casi constante, mientras esta disminuye para lograr mantener el nivel

deseado  $h_{1d}$ , como se observa en la Fig.(3.9). El nivel del Tanque 2,  $h_2(t)$ , se eleva de forma similar a una trayectoria tipo Bezier, Fig.(3.10).

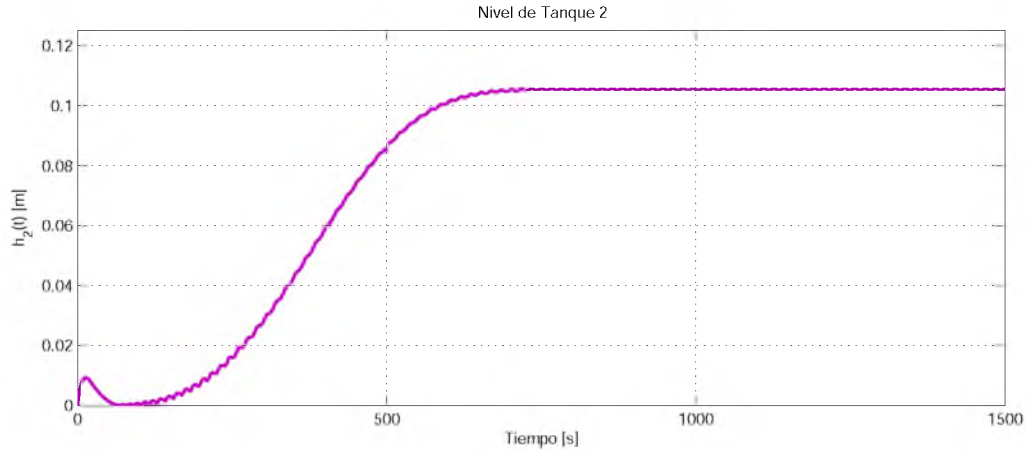


Figura 3.10: Esfuerzo de Control y Altura  $h_2$ .

### 3.3.2. Control de nivel del Tanque 2

En este apartado se utiliza el control descrito en la Ec.(3.9) y la función de conmutación  $\sigma$  usa las mismas ganancias de la prueba anterior.

#### Regulación de nivel $h_2(t)$

En esta prueba se considera una referencia en el tanque 2  $h_{2d} = 0.2 \text{ m}$ , inicialmente ambos tanques se encuentran completamente descargados. En la Fig.3.11 se observa que el nivel  $h_2(t)$  alcanza la referencia en un tiempo aproximado de 180 s, posteriormente oscila alrededor del valor.

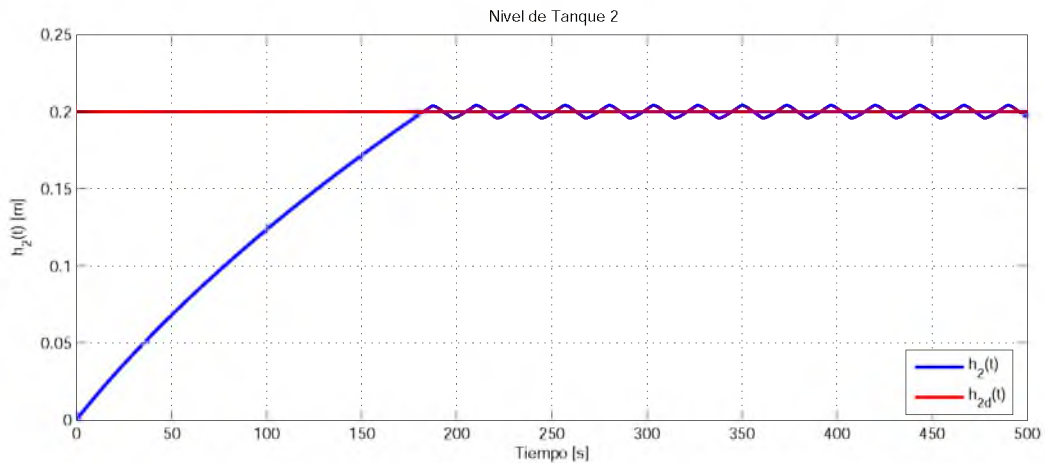


Figura 3.11: Control de Nivel en Tanque 2.

Cuando la salida  $h_2(t)$  converge a la referencia  $h_{2d}$ , el control activa y desactiva el flujo en una frecuencia de conmutación constante para mantener el nivel de líquido



alrededor de la referencia. El caudal de entrada  $q_o(t)$  se muestra en Fig.(3.12)a. Cuando se controla el nivel 2,  $h_2(t)$  se trata de un sistema subactuado ya que el control o caudal de entrada es aplicado en el tanque 1 y el nivel  $h_1(t)$  se muestra en la Fig.(3.12)b.

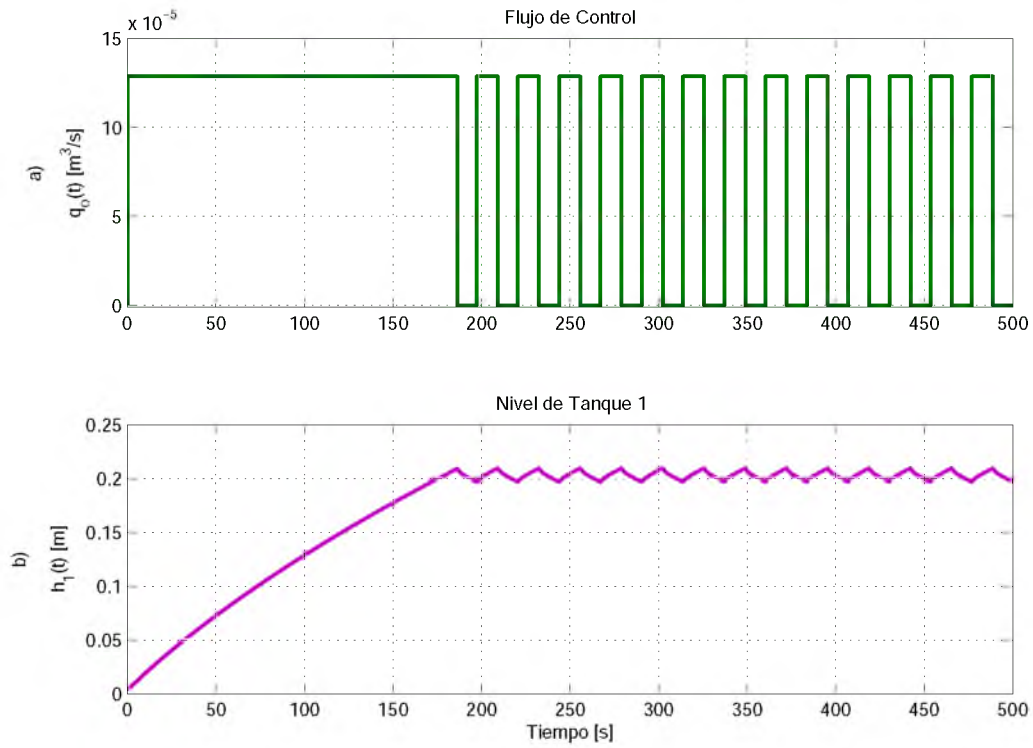


Figura 3.12: Esfuerzo de Control y  $h_2(t)$ .

### Seguimiento de nivel del Tanque 2

Para el seguimiento de nivel del tanque 2,  $h_2(t)$  se plantea un perfil tipo Bezier.

$$h_{2d} = h_{20} + (h_{2f} - h_{20}) \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^5 \left[ \sum_{i=0}^{i=5} (-1)^i \gamma_i \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^i \right] \quad (3.12)$$

donde  $h_{2d}$  es el nivel planificado,  $h_{20}$  el nivel inicial,  $h_{2f}$  el nivel final,  $t_0$  el tiempo de inicio y  $t_f$  el tiempo final de planificación. Los coeficientes constantes del polinomio son:  $h_{20} = 0,02 \text{ m}$ ,  $h_{2f} = 0,20 \text{ m}$ ,  $t_0 = 0 \text{ s}$ ,  $t_f = 650 \text{ s}$ ,  $\gamma_0 = 552$ ,  $\gamma_1 = 1050$ ,  $\gamma_2 = 1800$ ,  $\gamma_3 = 1575$ ,  $\gamma_4 = 700$ ,  $\gamma_5 = 126$ .

En la Fig.(3.13), se observa el seguimiento de trayectoria de  $h_2(t)$ . En estado transitorio, sigue el perfil de la trayectoria propuesta y mantiene oscilaciones de baja amplitud alrededor de la referencia.

Durante el estado transitorio se realiza la conmutación de alta frecuencia debido a que la referencia  $q_{2d}$  es variante en el tiempo y exige un esfuerzo de control  $q_o$

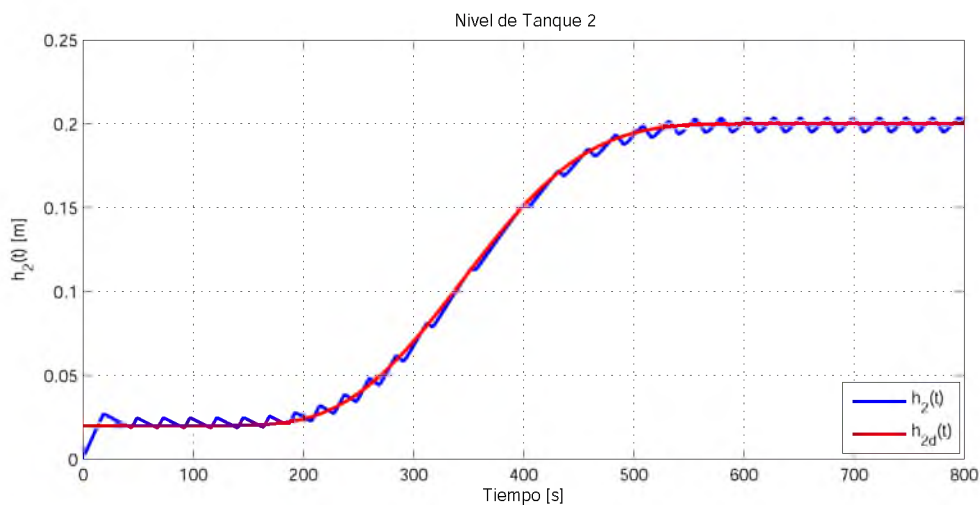


Figura 3.13: Control de Nivel en Tanque 2 con seguimiento de trayectoria tipo Bezier.

con mayor frecuencia de conmutación. Una vez que el nivel alcanza su referencia la frecuencia de conmutación de apertura y cierre de válvula se mantienen constantes, tal como se puede observar en la Fig.3.14a.

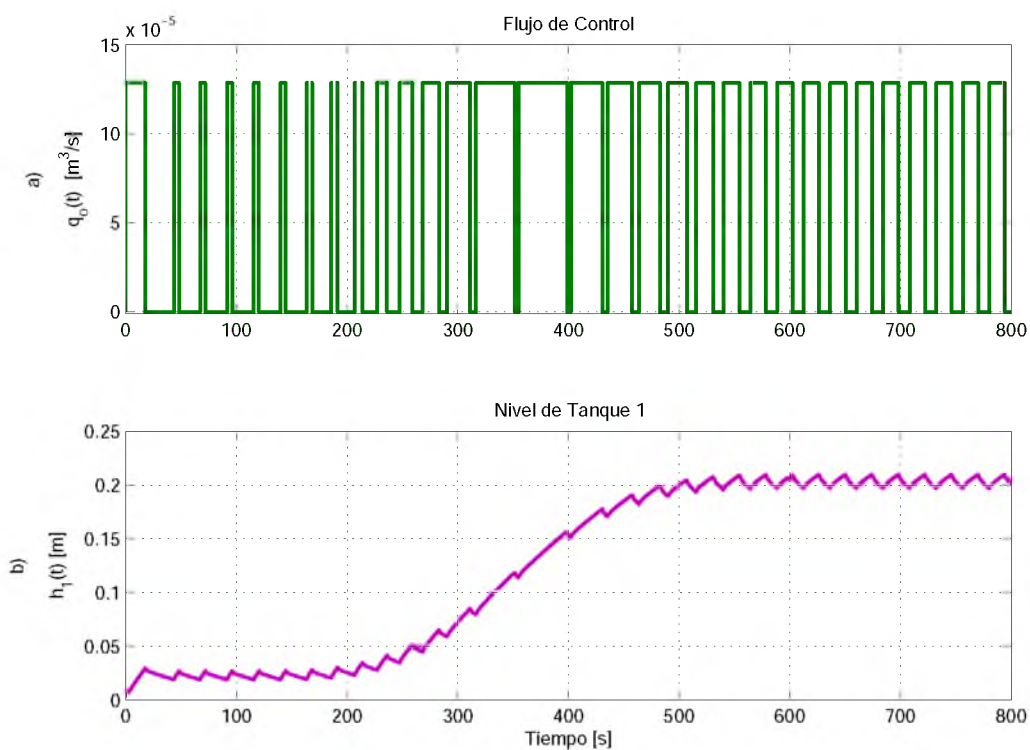


Figura 3.14: Esfuerzo de Control y Altura  $h_1$ .

La apertura y cierre de válvula genera un efecto chattering, es decir, una oscilación, que podemos ver reflejado en la Fig.(3.14)b donde se muestra  $h_1(t)$ .

### 3.3.3. Control de caudal

#### Regulación de caudal $q_2(t)$

En la siguiente prueba se regula el caudal de salida del segundo tanque  $q_2(t)$ . Inicialmente ambos tanques están descargados  $h_1(0) = h_2(0) = 0 \text{ m}$  y las válvulas completamente abiertas, sin oponer una resistencia hidráulica mayor que la propia de su geometría.

El caudal de salida  $q_2(t)$  converge a la referencia  $q_{2d}(t) = 5 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  en un tiempo aproximado de 110 s y mantiene oscilaciones de baja amplitud alrededor de la referencia Fig.(3.15)a. Las oscilaciones son de baja frecuencia y este efecto se puede observar en las conmutaciones del control que oscilan en un rango de 0 a  $12.86 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ , ver Fig.(3.15)b.

Este efecto también muestran las oscilaciones que presentan el nivel de líquido de ambos tanques, como se puede observar en la Fig.(3.19).

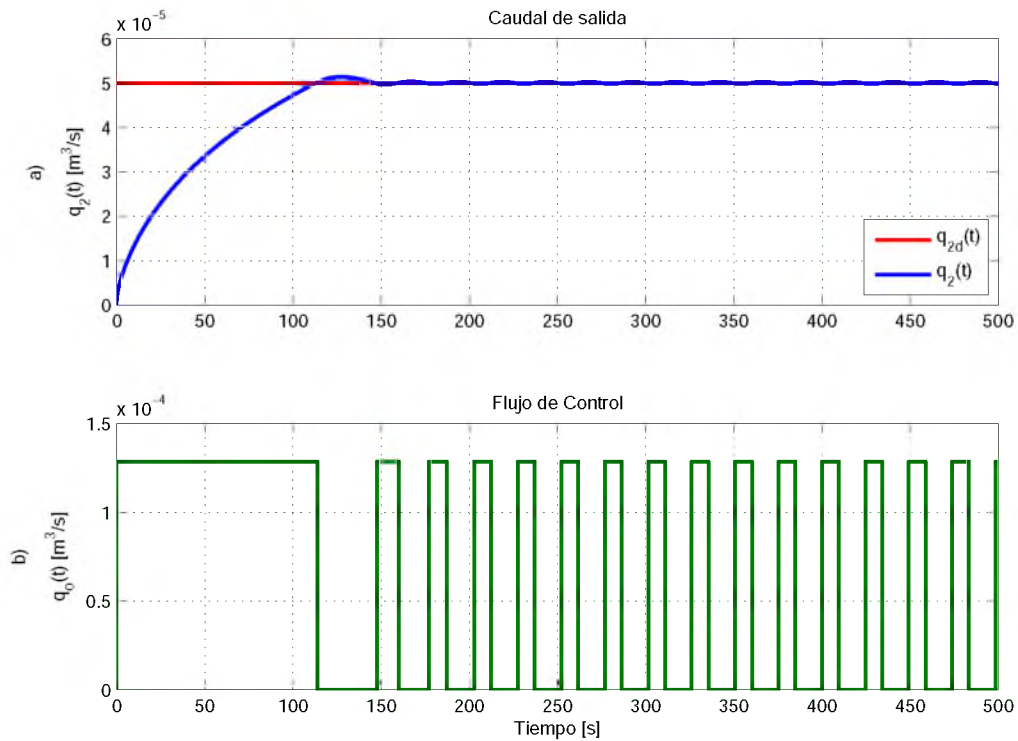


Figura 3.15: Caudal  $q_2(t)$ .

En la Fig.(3.16) se observa el aumento de nivel en ambos tanques,  $h_1(t)$  aumenta hasta 0.175 m y  $h_2(t)$  alcanza un valor de 0.12 m los cuales son los necesarios para alcanzar el caudal deseado.

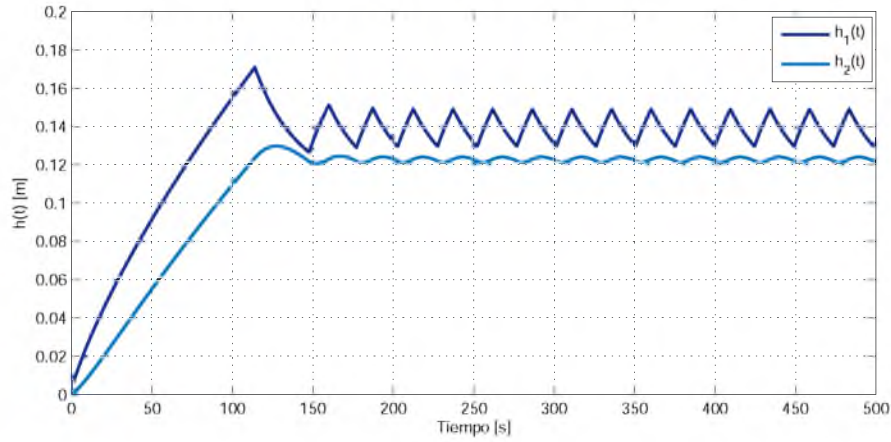


Figura 3.16: Alturas de Tanques.

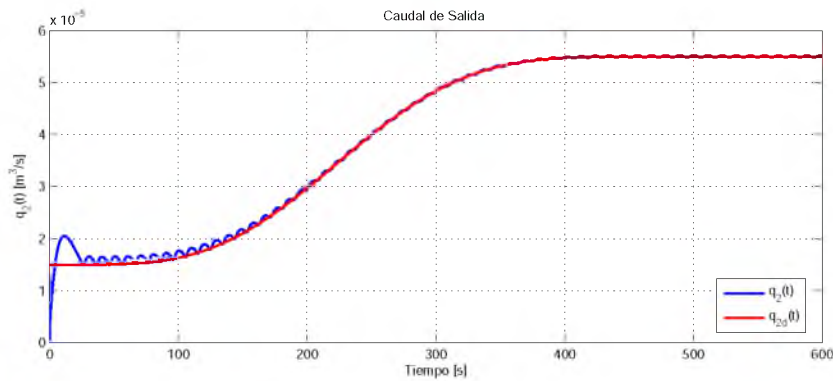
### Seguimiento de caudal $q_2(t)$

A continuación se presenta el control de caudal  $q_2(t)$  con seguimiento de trayectoria, la cual se realizó por medio del polinomio de Bezier de décimo orden, bajo la Ec.(3.13):

$$q_{2d} = q_{20} + (q_{2f} - q_{20}) \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^5 \left[ \sum_{i=0}^{i=5} (-1)^i \gamma_i \left( \frac{t - t_0}{t_f - t_0} \right)^i \right], \quad (3.13)$$

donde  $q_{2d}$  es la trayectoria del caudal planificado,  $q_{20}$  es el caudal inicial,  $q_{2f}$  es el caudal final,  $t_0$  es el tiempo de inicio,  $t_f$  es el tiempo final en que se alcanza el caudal final. Los coeficientes del polinomio son:  $q_{20} = 1.5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ ,  $q_{1f} = 5.5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ ,  $t_0 = 0s$ ,  $t_f = 500s$ ,  $\gamma_0 = 552$ ,  $\gamma_1 = 1050$ ,  $\gamma_2 = 1800$ ,  $\gamma_3 = 1575$ ,  $\gamma_4 = 700$ ,  $\gamma_5 = 126$ .

En la Fig.(3.17) se presenta la respuesta del sistema, inicialmente como el control acciona la electroválvula, se genera un impulso en el caudal de salida, la conmutación correspondiente a la trayectoria propuesta, en el estado estable la frecuencia de conmutación es constante debido a que la pendiente es nula como se puede observar en la Fig.(3.18).

Figura 3.17: Control de caudal  $q_2$  con trayectoria planificada.

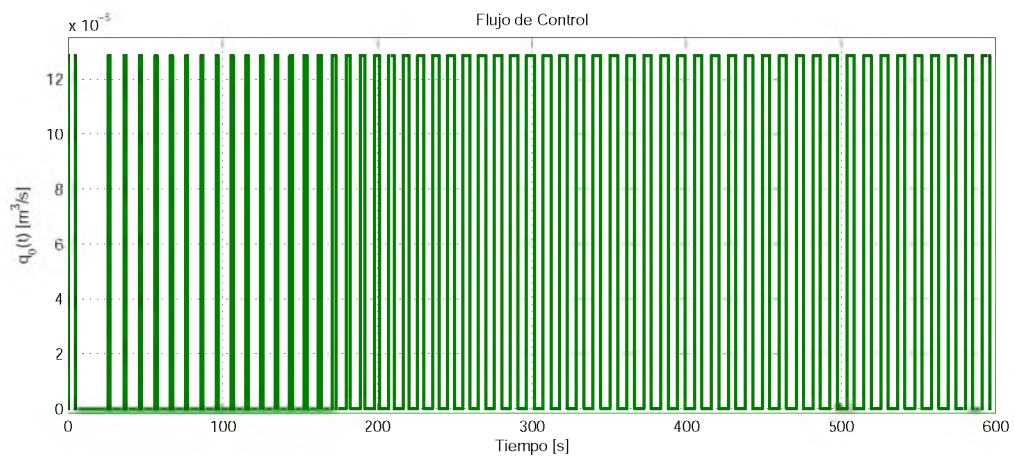


Figura 3.18: Control de caudal  $q_2$  con trayectoria planificada.

El efecto de la apertura y cierre de válvula se ve reflejado en la respuesta de nivel de los tanques, tal como se muestra en la Fig.(3.19). El nivel en los tanques tienen un comportamiento similar a una trayectoria tipo Bezier, esto por el caudal suministrado,  $h_1$  alcanza una altura de 6 cm y  $h_2$  de 4 cm.

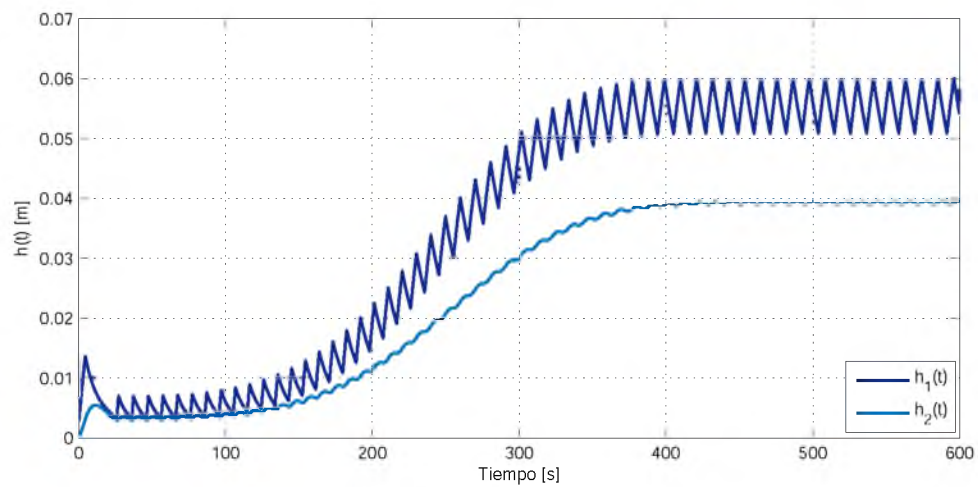


Figura 3.19: Comportamiento de la altura de los tanques  $h_1$  y  $h_2$ , cuando se controla el flujo de salida  $q_2(t)$ .



## Capítulo 4

# Descripción de la Plataforma Experimental

La plataforma experimental desarrollada en esta tesis, está compuesta de un sistema de tanques para el control de nivel y flujo de líquido. Esta consiste en dos tanques acoplados en serie, cuenta con dos válvulas y una electroválvula para la aplicación del algoritmo de control. Los parámetros del sistema como el nivel de líquido es monitoreado mediante un arreglo de sensores infrarrojos y para medir el caudal en las tuberías se usan sensores de caudal. La plataforma cuenta con un depósito y una bomba hidráulica que suministra el líquido a los tanques. Todo el sistema de control se realiza mediante el uso de una tarjeta adquisición de datos y la interfaz con el software Matlab Simulink®.

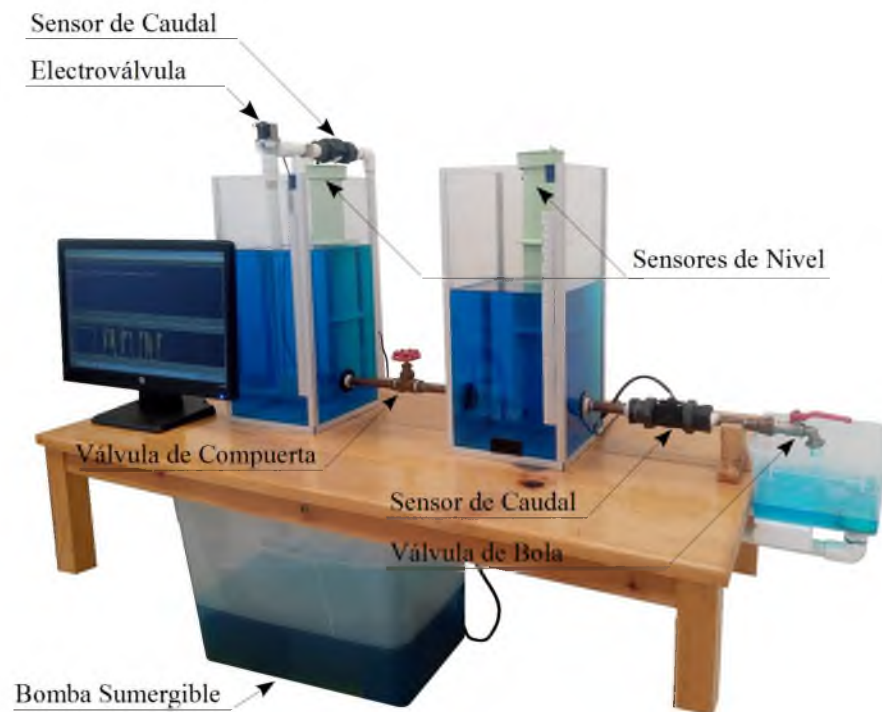


Figura 4.1: Plataforma experimental de tanques acoplados.

A continuación se describen a detalle los componentes de la plataforma.

## 4.1. Actuador

### Bomba Hidráulica

La bomba que suministra el líquido al tanque es una ActiveAQUA. Tiene un peso de 1 kg, con unas dimensiones de 6.3 x 4.72 x 3.94 pulgadas. La bomba proporciona 800 GPH que se ve disminuida gradualmente dependiendo de la altura a la cual tenga que bombear el fluido. Su alimentación es de 120 V y 58 watts, incluye filtros de espuma desmontables, impulsores, patas de montaje de goma para reducir la vibración y un cable de alimentación de alta resistencia de 3.4 m, ver Fig.(4.2).



Figura 4.2: Bomba sumergible Active AQUA 800 GPH.

### Electroválvula

La electroválvula es un dispositivo electromecánico encargado de habilitar o deshabilitar el flujo de control al tanque 1. Está compuesto de un electroimán y una válvula convencional de compuerta que al ser energizado desplaza un embolo y un diafragma permitiendo la circulación del líquido. La válvula se mantiene abierta mientras el solenoide sea energizado y cuando de se desenergiza un resorte restituye el movimiento del embolo a la posición de la válvula cerrada. El cuerpo de la válvula está fabricado en plástico con roscados machos a ambos lados de 1/2 pulgada para conexión estándar NPS, Fig.(4.3).

## 4.2. Sensores

### Dispositivo para medición de nivel

Para medir el nivel de líquidos en los tanques se diseñó y construyó un dispositivo basado en un sensor infrarrojo GP2Y0A21YK0F. El dispositivo consta de un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro y longitud de 45 cm y una tapa de PVC de diámetro de 3 pulgadas, en la parte superior se coloca el sensor infrarrojo, como se puede apreciar en la Fig.(4.4).





Figura 4.3: Electroválvula de 1/2 pulgada normalmente cerrada.

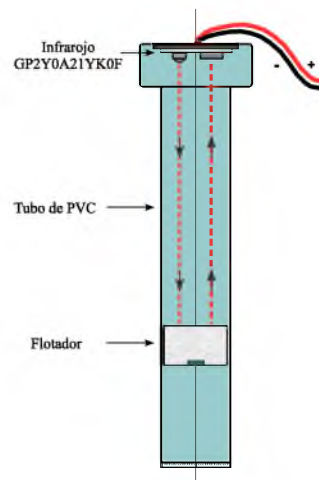


Figura 4.4: Propuesta de un sensor de nivel de líquido.

La columna de líquido se mide enviando una señal infrarroja que rebota en un flotador de unicel, ubicado dentro del tubo, y la terminal receptora del sensor genera un diferencial de potencial que se traduce en una unidad de distancia.

El sensor infrarrojo GP2Y0A21YK0F es una unidad de medición de distancia, compuesta por una combinación integrada de PSD (detector sensible a la posición), IRED (diodo emisor de infrarrojos) y un circuito de procesamiento de señal (ver Fig.(4.5)). Este dispositivo emite el voltaje correspondiente a la distancia de detección.



Figura 4.5: Sensor Infrarrojo GP2Y0A21YK0F.

En la Tabla.(4.1) se muestran las características de operación del sensor infrarrojo.

| Características         | Valor                 |
|-------------------------|-----------------------|
| Voltaje de alimentación | 4.5 – 5.5 V           |
| Consumo de corriente    | 30 mA                 |
| Tipo de salida          | Analógica             |
| Tiempo de respuesta     | 30 ms                 |
| Tipo de respuesta       | 0-5 V                 |
| Tamaño                  | 29.5 x 13.0 x 13.5 mm |

Tabla 4.1: Características del sensor.

La Fig.(4.6) muestra la propuesta final del dispositivo de medición de nivel de líquido. Este es colocado en cada uno de los tanques.

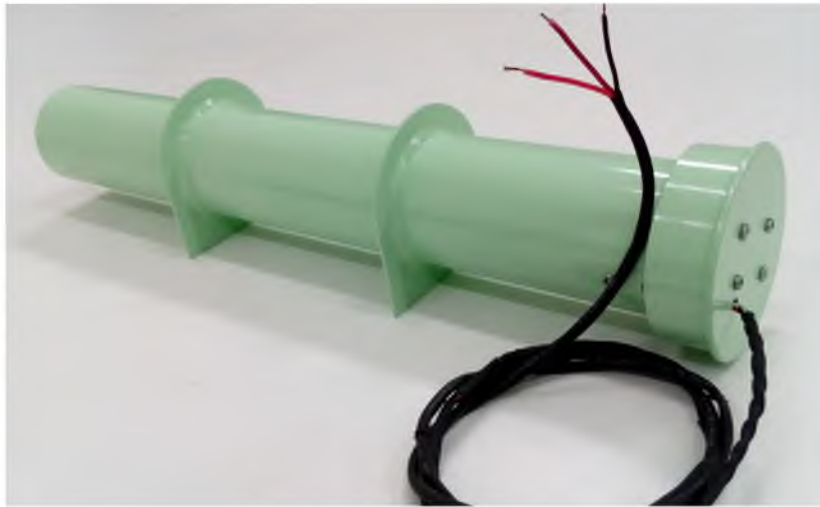


Figura 4.6: Sensor de Nivel Experimental.

Estos sensores poseen una señal de salida analógica de 0–5 V. El voltaje de salida varía según el nivel de líquido. Para representar este fenómeno se hace una representación matemática que expresa la relación voltaje-altura, la ecuación se obtiene siguiendo el siguiente procedimiento:

La salida de voltaje de los sensores de cada tanque se adquieren en dos canales analógicos de la tarjeta Sensoray 626 y se toman muestras cada 0.5 cm en un rango de 0 a 0.3 m. A través del software Matlab Simulink® se procesan los datos obtenidos y mediante la paquetería Cftool se determina la ecuación característica que expresa la relación voltaje- altura. Se realiza este procedimiento de calibración para ambos tanques debido a que cada dispositivo de nivel presenta características diferentes.

Las ecuaciones características de nivel contra voltaje se describen en las ecuaciones siguientes.

$$h_1(v_1) = 2.5v_1^3 - 23v_1^2 + 72v_1 - 46.6 \quad (4.1)$$

$$h_2(v_2) = 7.77v_2^3 - 58v_2^2 + 148.8v_2 - 100.5 \quad (4.2)$$

donde  $h_1$  es el nivel en el primer tanque,  $h_2$  el nivel en el segundo tanque,  $v_1$  es el voltaje de salida del primer sensor,  $v_2$  el voltaje de salida del segundo sensor y una gráfica comparativa de la muestra de datos con la ecuación característica se muestra en las Figs.(4.7) y (4.8).

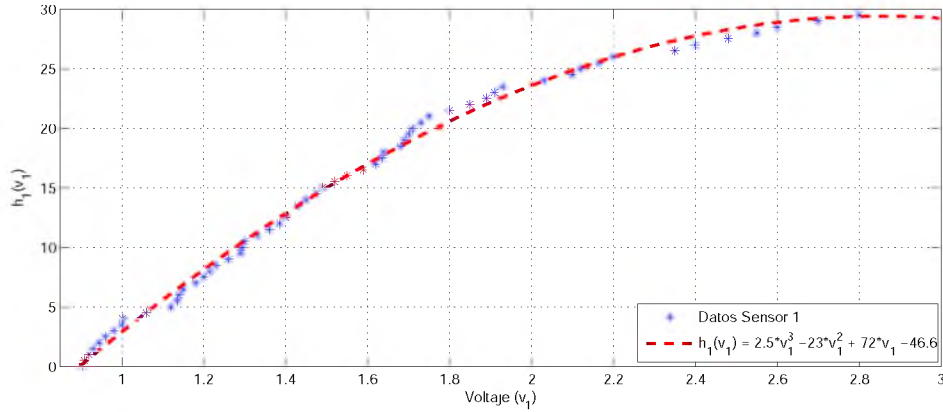


Figura 4.7: Ecuación característica del sensor 1

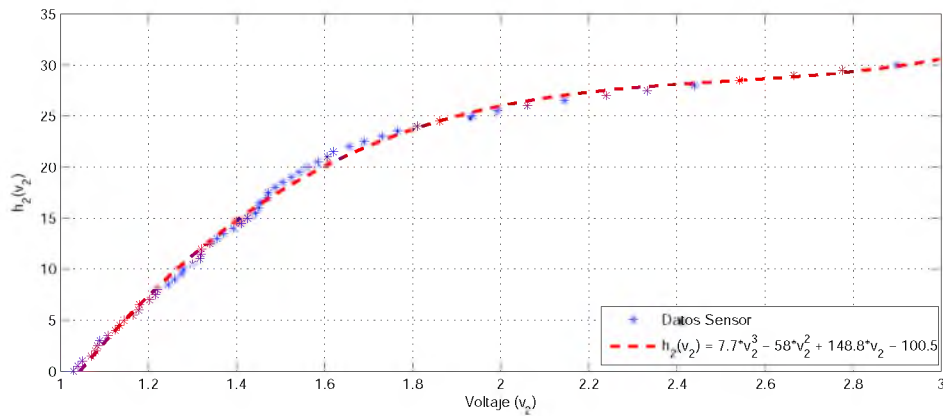


Figura 4.8: Ecuación característica del sensor 2

Con esta conversión de voltaje a nivel  $h(t)$  se pueden realizar las mediciones correspondientes a cada prueba requerida.

### Sensor de Caudal

Se utilizan dos sensores de caudal para medir el flujo de entrada al tanque 1 y el flujo de salida del tanque 2 FS400A, Fig.(4.9). Estos detectan un flujo en un rango de 1 a  $100 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ . Internamente tiene un sensor de efecto Hall de campo magnético que detecta el movimiento de las aspas que se genera con el paso del líquido.

Entrega a la salida una señal de pulsos cuadrados cuya frecuencia corresponde al caudal del líquido, la función que rige dicho comportamiento es:

$$F = 4.8Q$$

donde  $F$  es la frecuencia de la señal modulada y  $Q$  es el caudal que mide el sensor en  $l/min$ . Cuenta con una precisión de  $2.5 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$  (0.15 l/min). Posee un diseño mecánico robusto y encapsulado resistente al medio ambiente.



Figura 4.9: Sensor de Flujo FS400A.

Para realizar la conversión de los datos obtenidos se envía la señal de cada sensor a un PIC16F86A donde se realiza la lectura de la frecuencia de la señal. El código realizado se encuentra en el Apéndice B, el PIC regresa la frecuencia correspondiente de cada sensor en 8 bits (0 a 256) una vez obtenido este dato y en conjunto con una tarjeta de adquisición de datos Sensoray 626 se realiza el procesamiento de las señales. Cada bit se multiplica por su valor correspondiente ( $2^n$ , donde  $n$  es igual al número de bits que son 8 por sensor) para obtener la frecuencia.

### 4.3. Etapa de Potencia

#### Driver de Potencia L298N

La acción del algoritmo de control se ejecuta a través del driver de potencia L298N, este suministra el voltaje necesario para energizar una electroválvula que le permitirá habilitar o deshabilitar el flujo de líquido  $q_o(t)$ . La ejecución la realiza haciendo un mapeo continuo del error, entre la referencia y el valor real del nivel o caudal a controlar. El driver de potencia posee dos canales de Puente H, que se pueden utilizar para controlar dos motores DC o un motor a pasos, una electroválvula o dispositivo semejante. Internamente esta conformado por un driver L298N, diodos de protección y un regulador de voltaje de 5V (ver Fig.(4.10)).

El modulo se alimenta de dos valores de voltaje. La primera de 5 V para energizar el propio circuito integrado del modulo de potencia y la segunda maneja un rango de 5-24 V usado para alimentar un dispositivo externo.



Figura 4.10: Driver de potencia L298N.

### Microcontrolador PIC16F877A

El microcontrolador PIC16F877A es utilizado para realizar el cálculo de la frecuencia de la señal adquirida de los sensores de caudal, las señales ingresan en los pines 0 y 1 del Puerto C, internamente el PIC ya está programado para realizar dicho cálculo, ver Fig.(4.11) la cual es entregada en binario en 16 bits, del pin 0 al 7 del puerto B para un sensor de caudal y del pin 0-7 del puerto D para el segundo sensor de caudal.



Figura 4.11: Micro controlador PIC16F877A.

## 4.4. Accesorios Hidráulicos

### Tanques

La plataforma experimental cuenta con dos tanques de acrílico transparente de 3 mm de espesor. Los tanques tienen una sección transversal de  $A_1 = A_2 = 0.0372 \text{ m}^2$ , una altura de  $L = 43 \text{ cm}$  y su volumen es de  $0.015996 \text{ m}^3$ . Para construirlos se cortaron 4 tramos de solera de aluminio de 1/2 pulgada de 43.5 cm y 4 tramos

de 20 *cm*, los cuales fueron unidos con sellador de silicón. Para acoplar los tanques mediante una tubería de bronce se le realizó una perforación de 1/2 pulgada en la parte inferior de dos de las caras de cada tanque, Fig.(4.12).

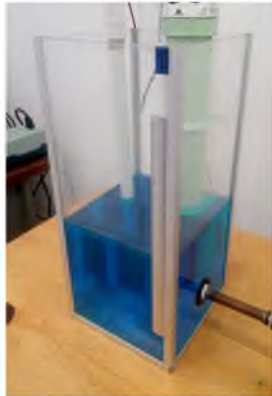


Figura 4.12: Tanque de acrílico de sección de  $0.0372 \text{ m}^2$  y altura de  $0.43 \text{ m}$

### Válvulas

La plataforma experimental cuenta con dos válvulas, la primera en la unión de los tanques la cual es una válvula de compuerta Fig.(4.13), tiene una constante hidraulica de  $2560 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$ , Crane [5].



Figura 4.13: Válvula de Compuerta de 1/2 pulgada.

La segunda se encuentra a la salida del segundo tanque en la Fig.(4.14), la cual es una válvula de bola, con una constante de hidráulica de  $3850 \frac{\text{s}}{\text{m}^{2.5}}$ , Crane [5].

## 4.5. Adquisición de Datos

### Tarjeta Sensoray 626

Para monitorear las señales eléctricas de nivel, caudal y la aplicación del algoritmo de control se usa una tarjeta de adquisición de datos Sensoray 626. Es una tarjeta versátil que permite la interfaz con la plataforma experimental, lectura de señales analógicas y digitales cuenta con puertos para leer encoders y salidas PWM. Este



Figura 4.14: Válvula de Bola de 1/2 pulgada.

modelo es una tarjeta PCI que cuenta con seis contadores versátiles de 24 bits que soportan codificadores incrementales así como fuentes de un solo reloj, 48 Entrada/Salidas digitales bidireccionales, 16 entradas analógicas diferenciales, 4 salidas analógicas y un temporizador de vigilancia. La tarjeta opera bajo el ambiente de Matlab Simulink®(ver Fig.(4.15)).



Figura 4.15: Tarjeta de adquisición de datos.





## Capítulo 5

# Resultados experimentales

En el siguiente capítulo se muestran los resultados experimentales de un sistema de tanques acoplados en serie. La plataforma cuenta con instrumentación para medir las variables del sistema, el nivel y el caudal. El nivel de líquido  $h_i(t)$  ( $i = 1, 2$ ), que se puede controlar experimentalmente es entre  $0-0.3\text{ m}$  y el flujo de salida se puede regular en un rango de  $0-8 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ . Cada una de las variables del sistema es adquirida mediante una tarjeta Sensoray 626 y el uso del software de Matlab-Simulink (ver detalles de la plataforma en el Cap.(4)).

En las distintas pruebas experimentales realizadas en el sistema de tanques acoplados, el nivel de líquido se mide considerando su origen justo en la parte media de la tubería que une los tanques, (ver Fig.(5.1)).

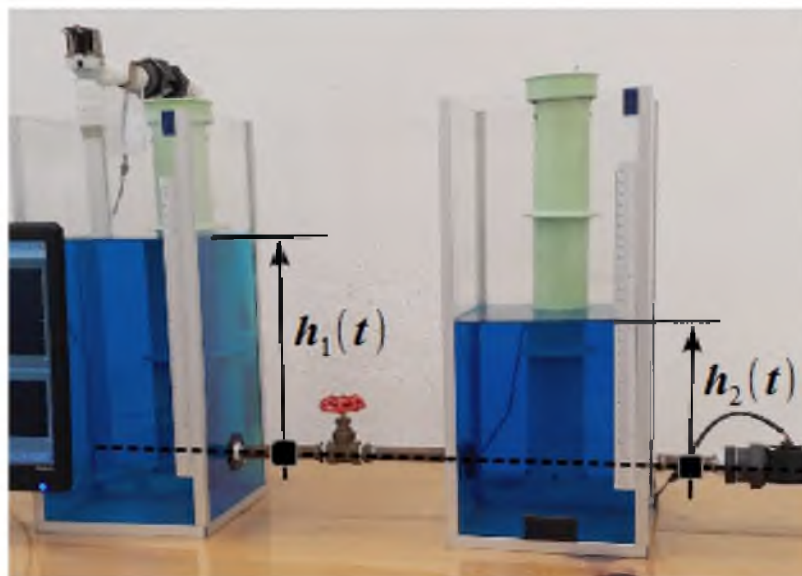


Figura 5.1: Origen de medición de los sensores de nivel.

## 5.1. Respuestas en lazo abierto

A continuación se describen las pruebas experimentales en lazo abierto. Para ello se consideran distintas condiciones de apertura de las válvulas, así como distintas configuraciones de nivel.

### 5.1.1. Descarga de Tanques

En esta primer prueba los tanques están casi llenos, el primero a una altura de  $h_1(0) = 0.28 \text{ m}$ , el segundo a  $h_2(0) = 0.27 \text{ m}$ , la válvula de compuerta y de bola están completamente abiertas, y la bomba así como la electroválvula se encuentran desactivadas.

En la Fig.(5.2) se muestra la descarga de los tanques bajo estas condiciones. Ambos niveles  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  presentan un comportamiento no lineal. Se observa que la pendiente de descarga del segundo tanque es mayor durante los primeros 50 s y ambos tanques se descargan completamente en un tiempo aproximado de 300 s.

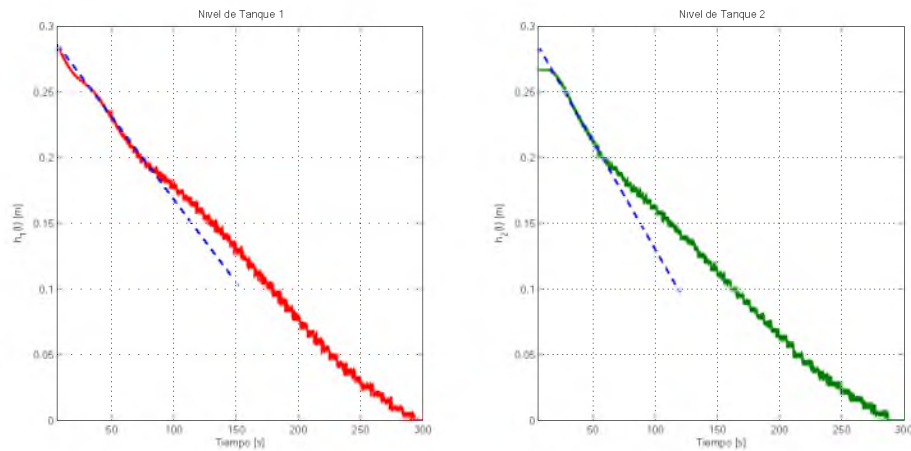


Figura 5.2: Descarga experimental de los tanques.

### 5.1.2. Descarga de tanques a distintas alturas, con la válvula central abierta

La segunda prueba se realiza con el primer tanque lleno  $h_1(0) = 0.29 \text{ m}$ . La válvula de compuerta ( $R_1$ ) completamente abierta, el tanque dos se llena a una altura de  $h_2(0) = 0.16 \text{ m}$ , la válvula de bola es cerrada completamente ( $R_2$ ), impidiendo la salida del fluido y considerando la bomba apagada  $q_o(t) = 0$ . El primer tanque inicia la descarga hacia el segundo mientras que este aumenta de nivel debido a la diferencia de presión hidrostática. Ambos tanques alcanzan el mismo nivel ( $22.5 \text{ cm}$ ) en un tiempo aproximado de 267.5 s, ver Fig.(5.3).

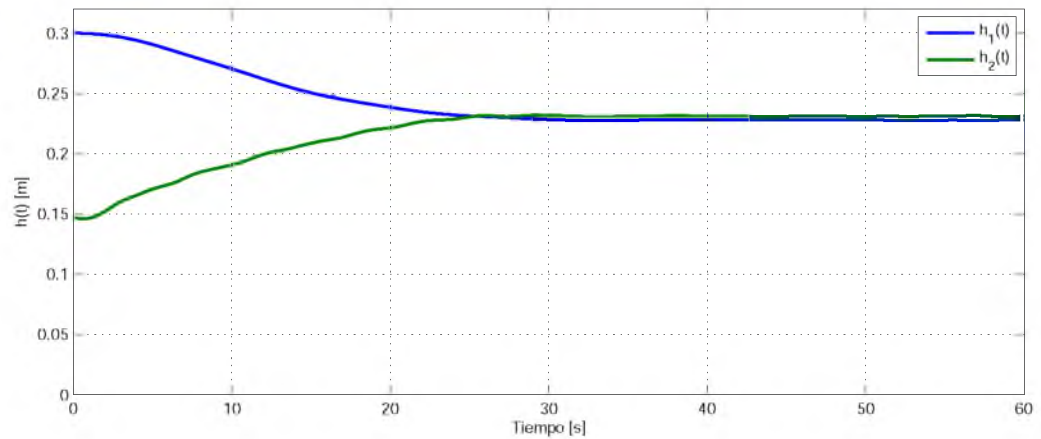


Figura 5.3: Segunda prueba experimental en lazo abierto.

### 5.1.3. Descarga de tanques a distintas alturas, con ambas válvulas abiertas

Para la última prueba en lazo abierto se tomaron las mismas condiciones de la prueba anterior, a excepción de que la válvula de bola  $R_2$  se abre totalmente permitiendo la salida del fluido. En la Fig.(5.4) se observa que en los primeros 40s el tanque 1 disminuye su nivel, mientras que el segundo tanque aumenta en un 16 % respecto de su altura inicial. Los tanques alcanzan el mismo nivel  $h_1(t) = h_2(t)$  por primera vez en  $t = 40$  s, y posteriormnente ambos tienen la misma pendiente de descarga hasta quedar completamente vacíos.

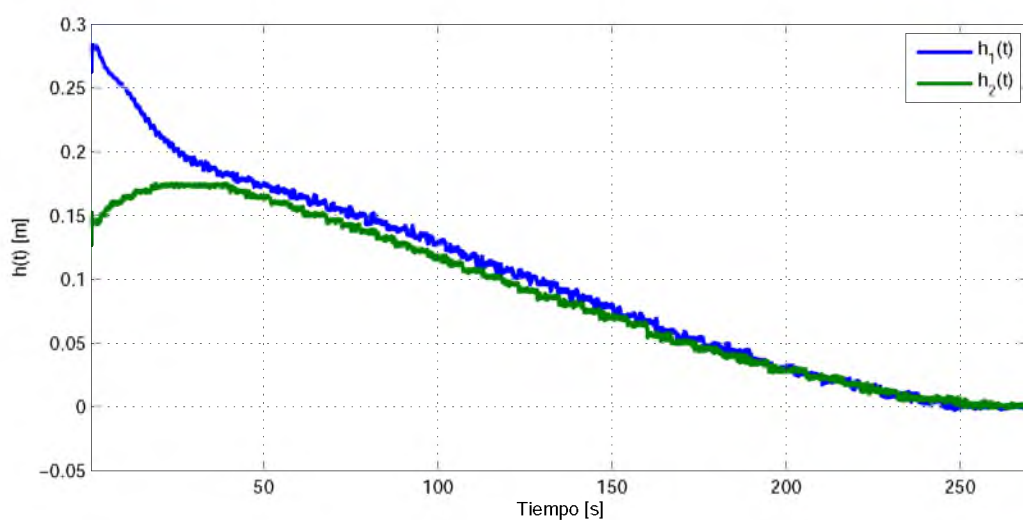


Figura 5.4: Tercer prueba experimental en lazo abierto.

## 5.2. Resultados experimentales en lazo cerrado

En esta sección se muestran los resultados experimentales del sistema en lazo cerrado para el control de nivel  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  y de caudal  $q_2(t)$ , el algoritmo utilizado es un esquema discontinuo descrito en la Ec.(3.9) de la Sección (3.1).

Las etapas del sistema de control experimental de tanques acoplados, se resume en el diagrama de la Fig.(5.5).

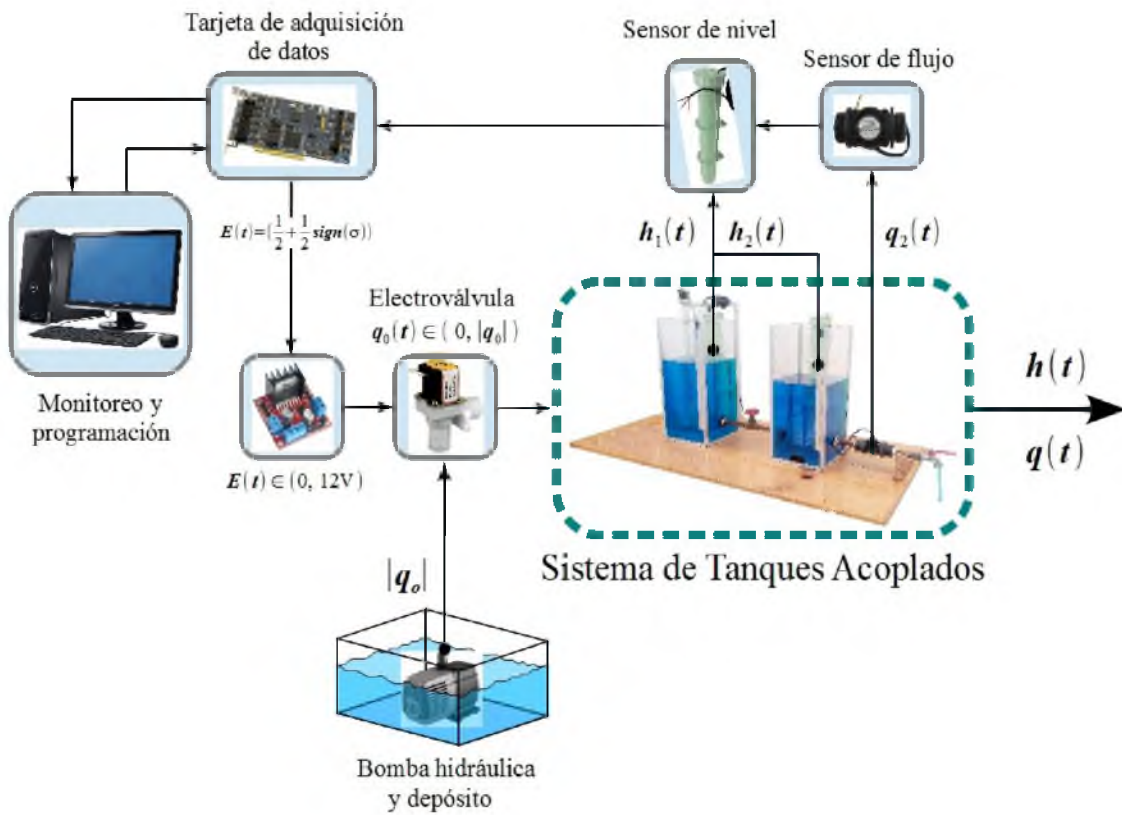


Figura 5.5: Diagrama de control

El sistema en lazo cerrado se implementa de la siguiente manera:

1.- Dos dispositivos accionados con sensores infrarrojos miden la altura del líquido en cada tanque  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  y dos sensores de flujo miden el caudal de entrada  $q_o(t)$  y de salida  $q_2(t)$ .

2.-La lectura de los sensores, previo a una etapa de potencia, se adquieren por una tarjeta de adquisición de datos Sensoray 626.

3.-Las señales adquiridas son procesadas mediante el software de Matlab-Simulink y en esta etapa se realiza la conversión de señales analógica y digitales a señales de unidades medibles, para el nivel en metros  $m$  y caudal  $(\frac{m^3}{s})$ .

4.- En el software se construye el algoritmo de control discontinuo para regular el nivel o caudal del sistema. Por ello se propone una función de conmutación basada en el error entre la referencia y la variable de salida a controlar.

5.- El algoritmo de control es enviado a la etapa de potencia (hardware) mediante la tarjeta Sensoray 626 en una señal de dimensión digital.

6.- El driver de potencia L298 traduce la señal digital de control en una señal de voltaje para polarizar la electroválvula.

7.- Una bomba sumergible en un deposito de agua suministra un flujo constante  $|q_o|$  al tanque a través de una electroválvula. La electroválvula habilita y deshabilita el flujo al tanque 1 basado en la política de control discontinuo que se dicta desde la tarjeta de adquisición de datos.

8.- El flujo  $q_o(t)$  se suministra al tanque 1 y se consigue regular la salida ya sea el nivel o el caudal del sistema.

Se realizan las pruebas en lazo cerrado para cada uno de los tanques, el controlador utilizado es el especificado en la Sección (3.1), de la Ec.(3.9). A continuación se explican cada una de las pruebas realizadas.

### 5.2.1. Control de Nivel del Tanque 1

#### Regulación de nivel del Tanque 1

En la primer prueba experimental en lazo cerrado se regula el nivel en el tanque 1,  $h_{1d}(t) = 0.2 \text{ m}$ . Inicialmente los tanques están completamente descargados  $h_1(0) = h_2(0) = 0 \text{ m}$  y la válvula de compuerta ( $R_1$ ) y de bola ( $R_2$ ) se abren en su totalidad.

En la Fig.(5.6) se observa la evolución del nivel de líquido en el tanque 1  $h_1(t)$  y alcanza el valor de referencia  $0.2 \text{ m}$  por primera vez en  $138 \text{ s}$ . Posteriormente el algoritmo de control mantiene la conmutación de la electroválvula para garantizar la convergencia de la salida alrededor de la referencia.

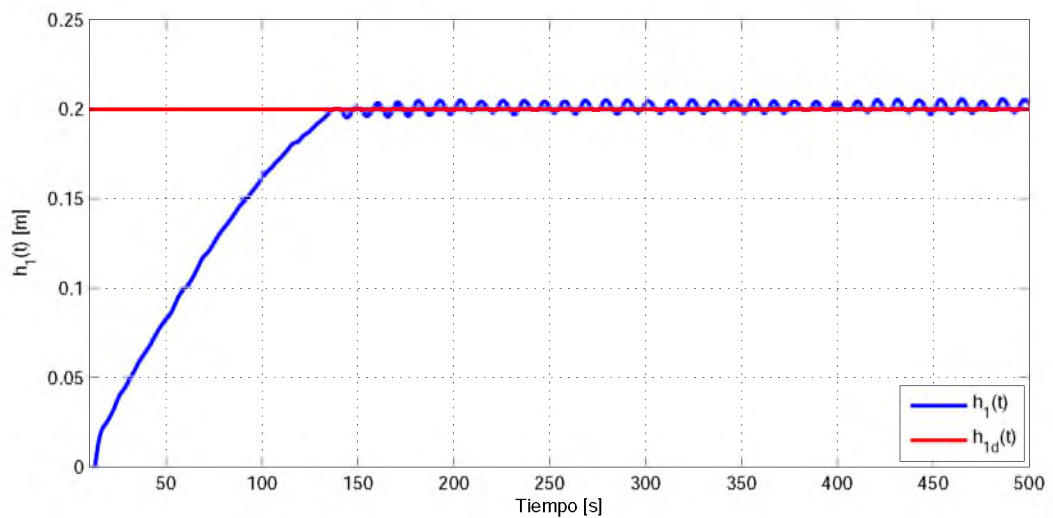


Figura 5.6: Control de Nivel Tanque 1

La entrada de flujo discontinuo  $q_o(t)$  suministrada en el tanque 1 alcanza un valor

máximo de  $12.86 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ , tal como se muestra en la Fig.(5.7)a. Cuando el nivel tanque 1 evoluciona para alcanzar la referencia, el nivel del tanque 2 aumenta y se estabiliza a una altura de  $0.18 \text{ m}$  segundos después que  $h_1(t)$  converge a  $0.20 \text{ m}$ . Es importante aclarar que el tanque 2 tiene un drenaje por la válvula de bola  $R_2$  por esta razón el nivel  $h_2(t)$  no se estabiliza en el mismo instante en que  $h_1(t)$  alcanza su referencia.

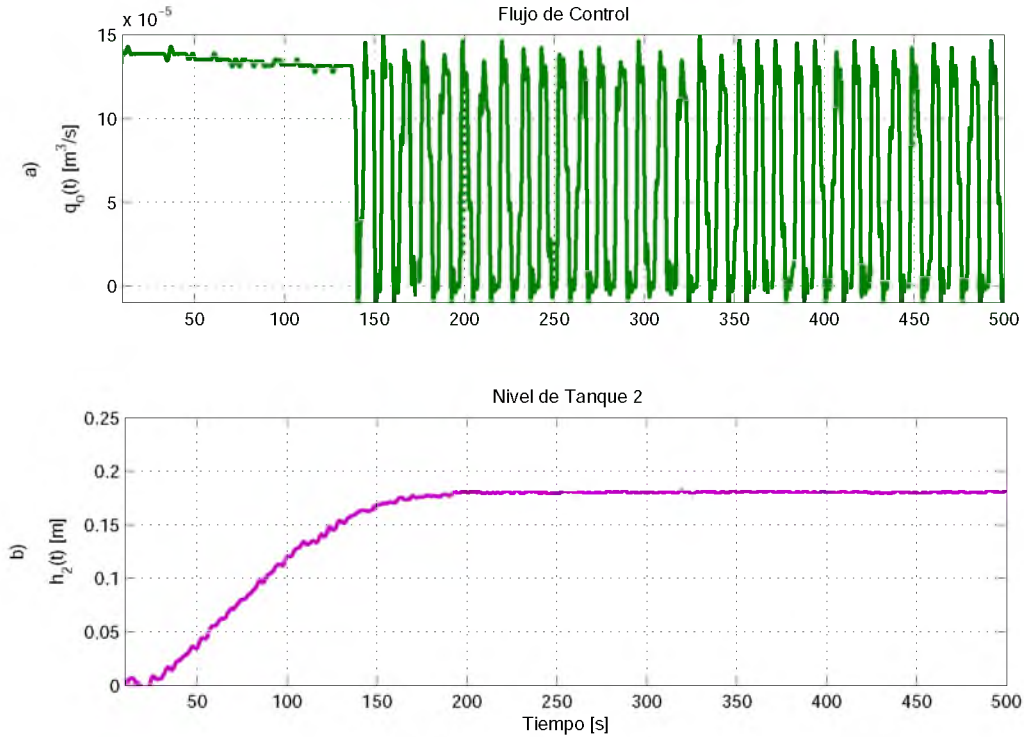


Figura 5.7: Respuesta del sistema al Control de Tanque 1.

### Seguimiento de nivel del Tanque 1

En esta prueba de lazo cerrado se plantea el llenado del tanque 1 siguiendo un perfil tipo Bezier, cuyos parámetros y función de tiempo son descritas en la Ec.(3.11). Antes de iniciar la prueba aseguramos que los tanques están completamente descargados  $h_1(0) = h_2(0) = 0 \text{ m}$  y ambas válvulas se abren completamente ( $R_1, R_2$ ), emulando un proceso que exige una demanda continua de fluido.

Al iniciar la prueba se activa la electroválvula, dejando pasar el fluido y así elevar el nivel  $h_1(t)$  para que converja a la referencia. La entrada súbita de fluido genera un sobre impulso en el nivel  $h_1(t)$ , tan solo por unos instantes, e inmediatamente converge a la referencia y se mantiene oscilando alrededor con muy baja amplitud (Ver Fig.(5.8)).



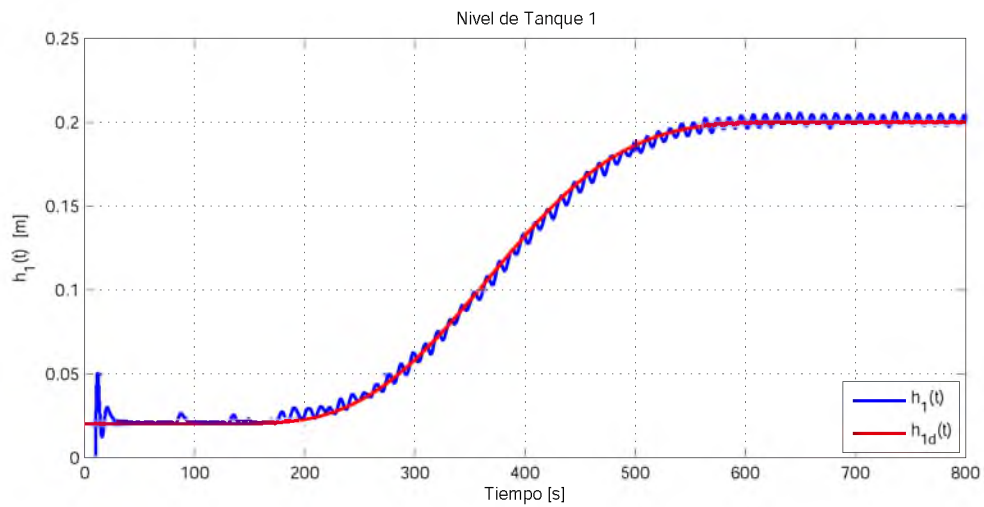


Figura 5.8: Seguimiento de Trayectoria planificada nivel de tanque 1.

La evolución de la entrada del flujo  $q_o(t)$  al tanque 1, regida por el control discontinuo, es medida por un sensor de caudal y se muestra en la Fig.(5.9)a. El tanque 2 se llena de manera suave similar al tanque 1. Durante el proceso de llenado el nivel de tanque 2 se mantiene a un nivel inferior al tanque 1 como se muestra en la Fig.(5.9)b. Cuando el tanque 1 alcanza su altura final el tanque 2 se estabiliza en 0.19 m.

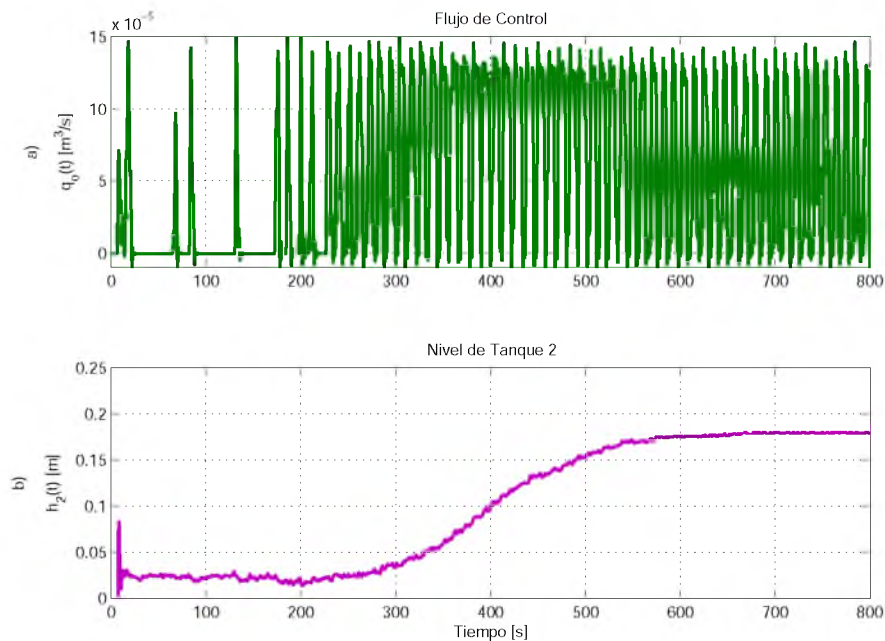


Figura 5.9: Respuesta de el sistema ante el seguimiento de trayectoria en  $h_1(t)$

### 5.2.2. Control de nivel del Tanque 2

#### Regulación nivel del Tanque 2

Las condiciones iniciales de operación son iguales a las pruebas anteriores. En la prueba de regulación del tanque 2 se propone una referencia  $h_{2d}(t) = 0.2 \text{ m}$ . En la Fig.(5.10) se muestra la evolución del nivel y converge a la referencia en un tiempo de 180 s y después se mantiene oscilando alrededor del valor deseado.

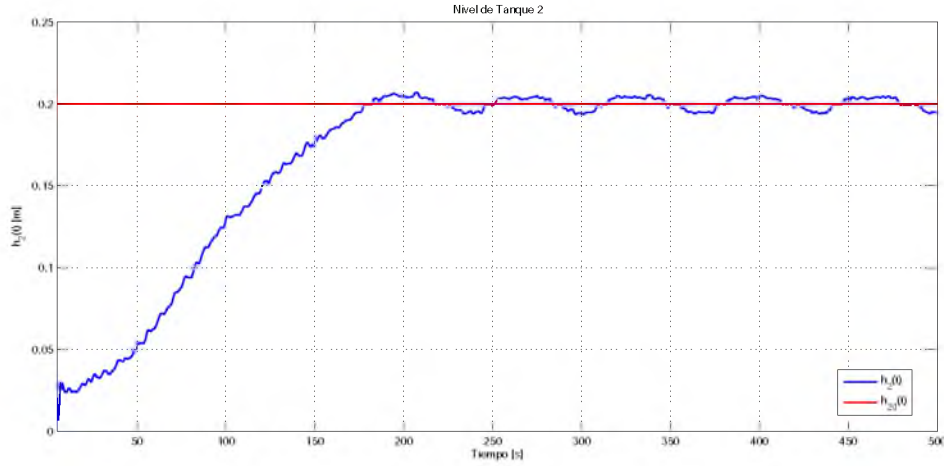


Figura 5.10: Control de Nivel de Tanque 2

El caudal de control  $q_o(t)$  se mantiene constante en un máximo de  $12.86 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  durante 180 s e inicia una conmutación intermitente de baja frecuencia cuando el nivel  $h_2(t)$  converge a su referencia, tal como se muestra en la Fig.(5.11). El nivel del tanque 1 es ligeramente mayor al nivel del tanque 2 y se incrementa de forma proporcional durante los primeros 180 s a medida que lo hace  $h_2(t)$ , ver Fig.(5.12).

El nivel presenta oscilaciones de baja amplitud alrededor de una altura de 0.225 m con una frecuencia de oscilación igual a la de conmutación del caudal del control.

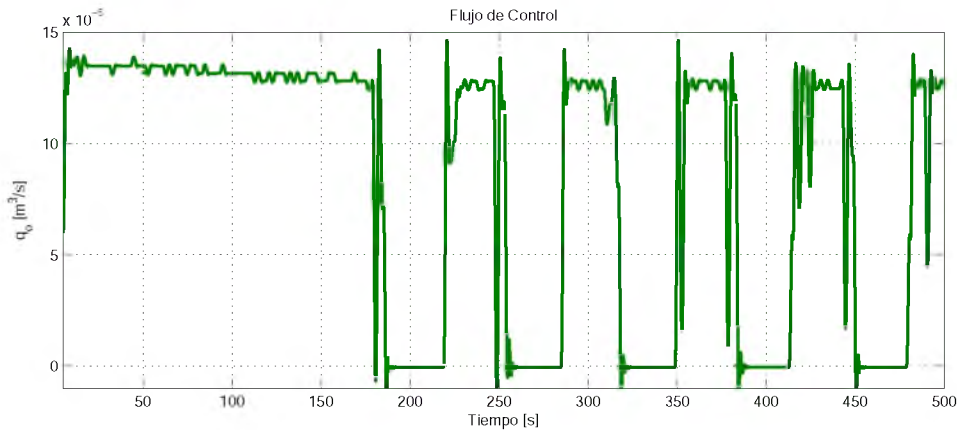


Figura 5.11: Respuesta del control



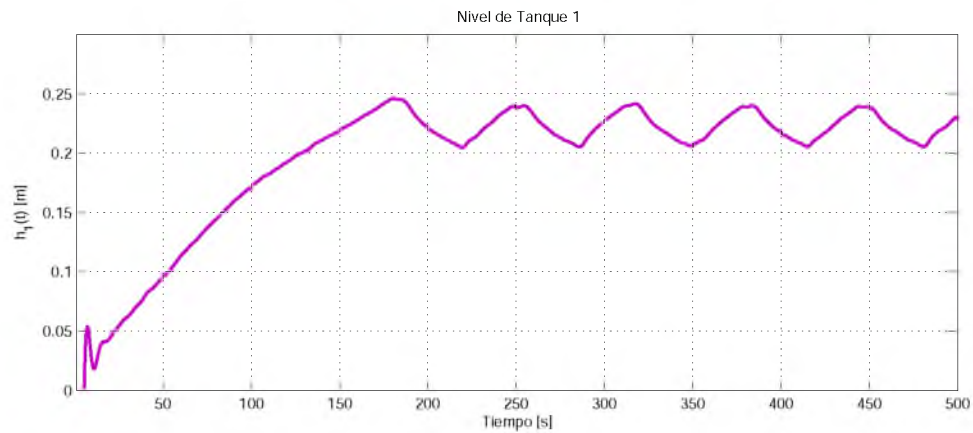


Figura 5.12: Respuesta del control

### Seguimiento de nivel del Tanque 2

A continuación se muestran los resultados experimentales del control de nivel en el tanque 2. El llenado se realiza de manera gradual siguiendo un perfil de nivel  $h_2(t)$  basado en el polinomio de Bezier que se describe en la Ec.(3.12).

En la prueba experimental, la plataforma se configura bajo las mismas condiciones de operaciones anteriores, la válvula de salida  $R_2$  es completamente abierta. La respuesta en lazo cerrado, para el nivel  $h_2(t)$ , se muestra en la Fig.(5.13). La salida converge al perfil de referencia  $h_{2d}(t)$  en los primeros 10 s sin sobre impulso y el algoritmo de control discontinuo a través de la conmutación de la electroválvula mantiene la convergencia en todo momento hasta finalizar el proceso. El tiempo de respuesta o frecuencia del sistema es importante, ya que determina su capacidad para poder producir los cambios de nivel que exige un perfil planificado. El tiempo de llenado planificado del tanque 2 desde una columna de líquido de 0.020 m hasta 0.2 m tarda 650 s y el sistema responde muy bien sin generar grandes oscilaciones, y presenta un error reducido.

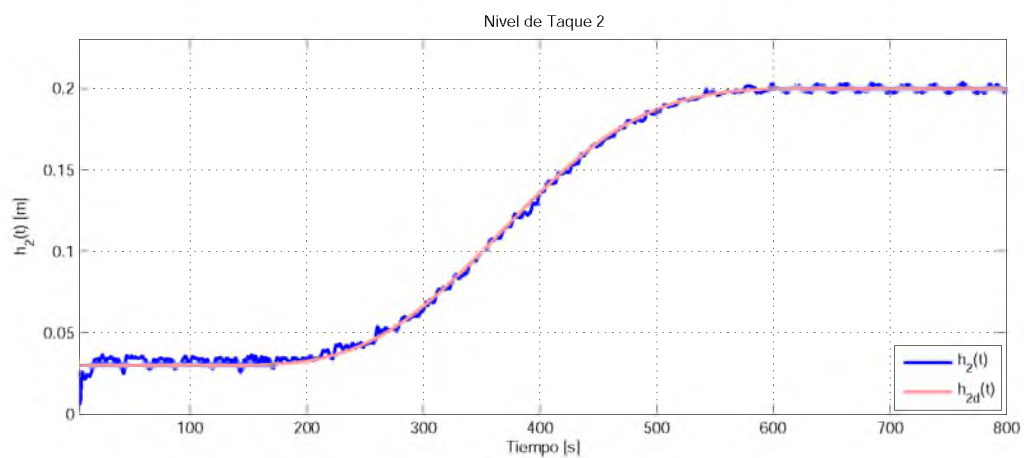


Figura 5.13: Seguimiento de Trayectoria planificada Nivel de Tanque 2

El siguiente análisis, para determinar la frecuencia del trabajo del sistema, define el tiempo de respuesta natural de la salida  $h_2(t)$ . Este se basa en las Ecs.(2.22) y (2.26) y su forma linealizada alrededor de un punto de equilibrio son descritos por las Ecs.(5.1) y (5.2), basada en (Ogata,[13]):

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{q_o}{A_1} - \frac{h_1 - h_2}{R_1 A_1} \quad (5.1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1 - h_2}{R_1 A_2} - \frac{h_2}{R_2 A_2} \quad (5.2)$$

se aplica la Transformada de Laplace de las Ecs.(5.1) y (5.2) y resolviendo para el nivel de tanque 2 se obtiene la ecuación diferencial descrita en la Ec.(5.3).

$$\ddot{h}_2(t) + \left( \frac{A_1 + A_2}{R_1 A_1 A_2} + \frac{A_1}{R_2 A_1 A_2} \right) \dot{h}_2(t) + \frac{1}{R_1 R_2 A_1 A_2} h_2(t) = \frac{R_2}{A_1 A_2} q_o(t) \quad (5.3)$$

De forma análoga con la siguiente ecuación se determina la frecuencia natural de trabajo del sistema  $\omega_d$ .

$$\ddot{h}_2(t) + 2\zeta\omega_n\dot{h}_2(t) + \omega_n^2 h_2(t) = bq_o(t) \quad (5.4)$$

La frecuencia natural de trabajo  $\omega_d$ , es la rapidez con la que puede responder el sistema ante cambios en la entrada  $q_o(t)$ , este parámetro es definido como:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}, \quad \zeta > 1$$

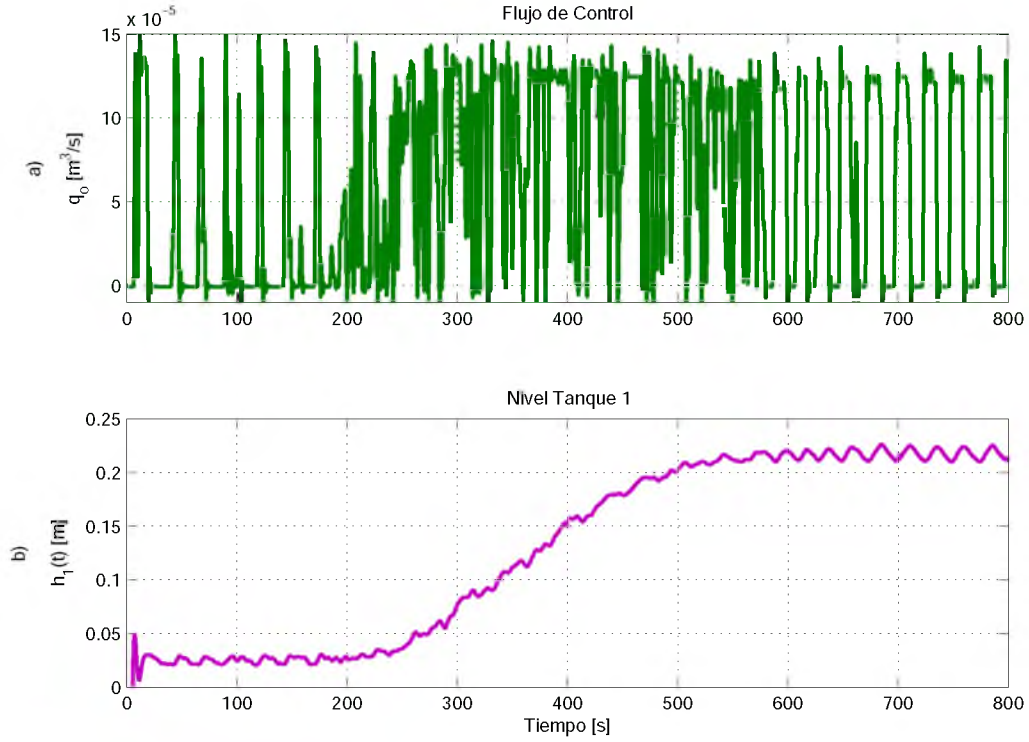
$$\omega_d = \frac{\sqrt{(A_1 R_1 + A_1 R_2 + A_2 R_2)^2 - 4A_1 A_2 R_1 R_2}}{2R_1 R_2 A_1 A_2}$$

$$T_n = \frac{4\pi R_1 R_2 A_1 A_2}{\sqrt{(A_1 R_1 + A_1 R_2 + A_2 R_2)^2 - 4A_1 A_2 R_1 R_2}}$$

El tiempo de respuesta natural del sistema respecto de la entrada está definido como  $T_n = \frac{2\pi}{\omega_d}$ . Si el tiempo de llenado planificado es  $t_f > T_n$  el sistema presentará un buen seguimiento de la trayectoria  $h_2(t)$  ( $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ) y si  $t_f < T_n$  difícilmente convergerá a la planificación del nivel. El tiempo de llenado del tanque 2 es de  $t_f = 650$  s y el tiempo de respuesta natural del sistema  $T_n$ <sup>1</sup> es de 512 s, por lo que se tendrá buena convergencia de la salida con la referencia, como se muestra en la Fig.(5.13).

El flujo de control  $q_o(t)$ , direccionado por la electroválvula, se muestra en la Fig.5.14a. Una mayor frecuencia de conmutación se presenta en el rango de los 200 a 580 s para elevar el nivel de  $h_2(t)$  y se mantiene con frecuencia uniforme posterior a este tiempo. Cuando el sistema a alcanzado un nivel de referencia constante. Al realizar esta prueba  $h_1(t)$  se estabiliza hasta alrededor 0.21 m con oscilaciones sostenidas esto debido a que  $q_o(t)$  actúa directamente en este nivel como se observa

<sup>1</sup>Los valores para realizar el cálculo de T fueron tomados de la Tabla (3.1).

Figura 5.14: Esfuerzo de control y  $h_1(t)$ .

### 5.2.3. Control de Caudal

#### Regulación de Caudal $q_2(t)$

A continuación se presenta el control del caudal de salida del tanque 2  $q_2(t)$ . Al realizar estas pruebas ambos tanques se encuentran completamente vacíos y las válvulas están abiertas en su totalidad oponiendo únicamente la resistencia generada por su geometría.

En la Fig.(5.15) se muestra los resultados experimentales de la regulación del caudal  $q_2(t)$  para una referencia constante  $q_{2d}(t) = 5 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ . El caudal  $q_2(t)$  converge a la referencia de forma exponencial en un tiempo de 130 s y se mantiene oscilando alrededor de este valor con un error de  $\pm 0.2 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ .

El flujo de control experimental  $q_o(t)$  se entrega desde el tanque 1 para regular la salida  $q_2(t)$  es mostrado en la Fig.(5.16).

El flujo de entrada se mantiene en su valor máximo en los primeros 110 s y después inician los cambios de flujo en el rango de  $(0, |q_o|)$  a muy baja frecuencia. Las conmutaciones se mantienen de forma intermitente cuando la salida  $q_2(t)$  alcanza su referencia  $q_{2d}(t)$ .

En la Fig.(5.17) se muestra el cambio de nivel de cada tanque  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  que garantizan la convergencia del flujo de salida. Los niveles evolucionan de forma lineal en los primeros 100 s y se estabilizan cuando  $q_2(t)$  converge a su referencia.

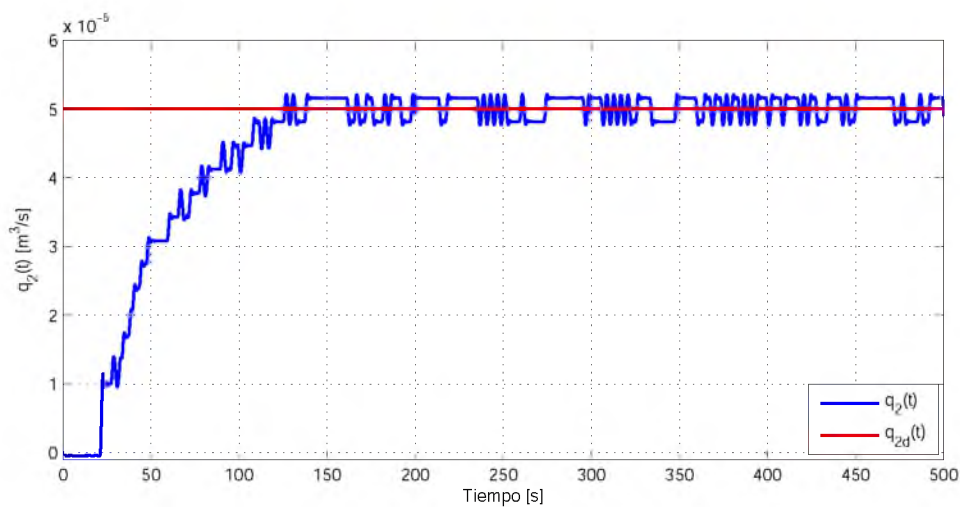
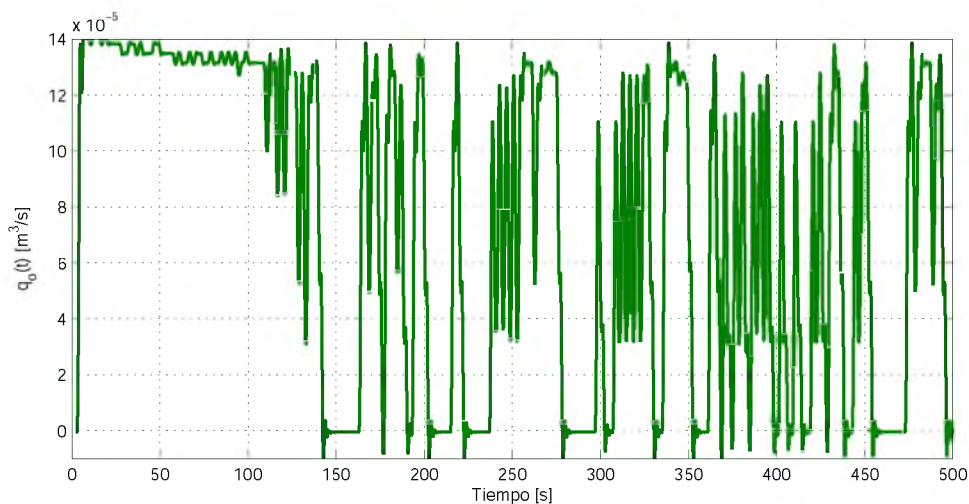


Figura 5.15: Control de caudal constante.

Figura 5.16: Esfuerzo de Control  $q_o(t)$ .

En el estado estacionario el nivel  $h_1(t)$  se mantiene oscilando alrededor de  $0.18 \text{ m}$  y el nivel  $h_2(t)$  oscila con baja amplitud alrededor de  $0.16 \text{ m}$ .

El caudal de salida  $q_2(t)$  técnicamente se puede regular en un rango de  $[0, |q_0|]$  tal como se describe en la función de transferencia de la salida  $q_2(s)$  obtenida de las Ecs. (2.18), (2.22) y (2.26).

$$q_2 = q_o - A_1 \frac{dh_1}{dt} - A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (5.5)$$

El flujo de salida queda restringido por la sección transversal de los tanques ( $A_1, A_2$ ) y la razón de cambio de los niveles  $\frac{dh_i(t)}{dt}$ . Ambos tanques se construyeron con las mismas dimensiones en sección y altura; por lo tanto la evolución de los tanques de niveles  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$  queda restringida en el nivel de llenado. El modelo

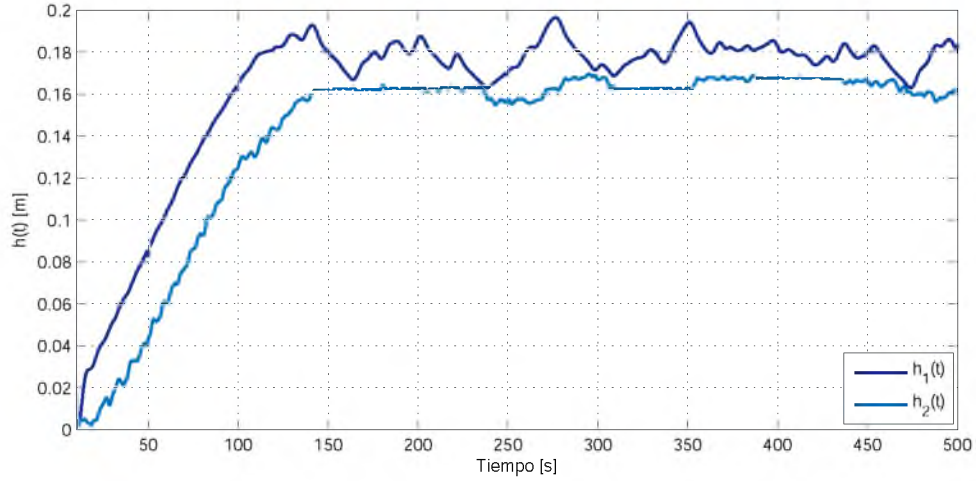


Figura 5.17: Comportamiento de  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  ante el control de caudal a una referencia constante.

de la Ec.(5.5) es reescrito como,

$$q_2 = q_o(t) - A \frac{d}{dt}(h_1 + h_2), \quad A = A_1 = A_2$$

$$0 \leq h_1(t) \leq 0.25m$$

$$0 \leq h_2(t) \leq 0.25m$$

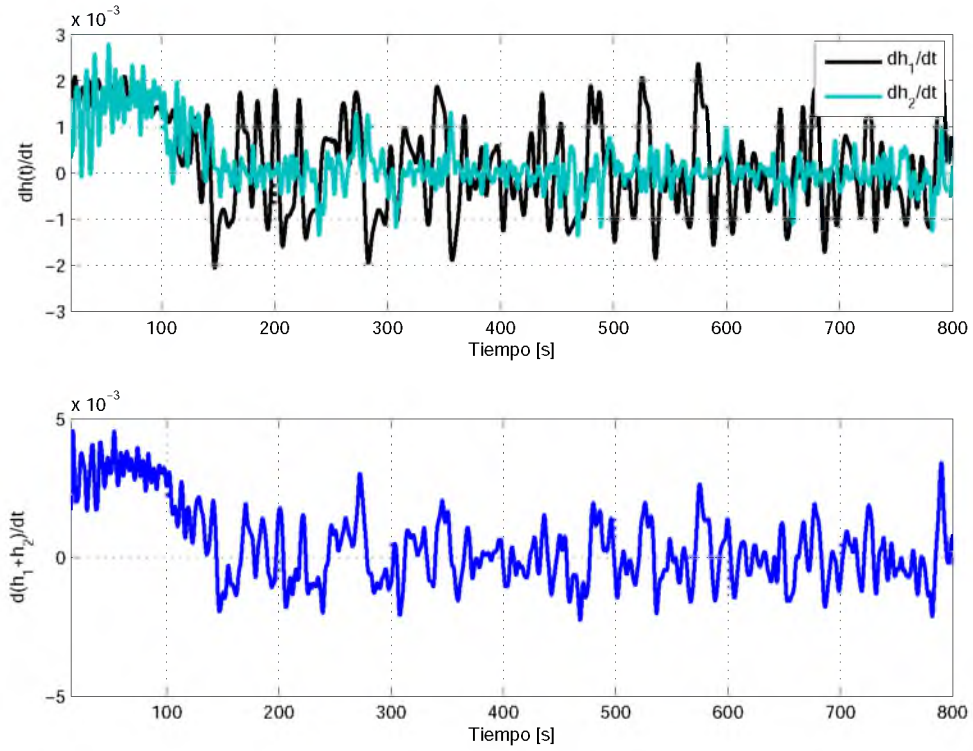
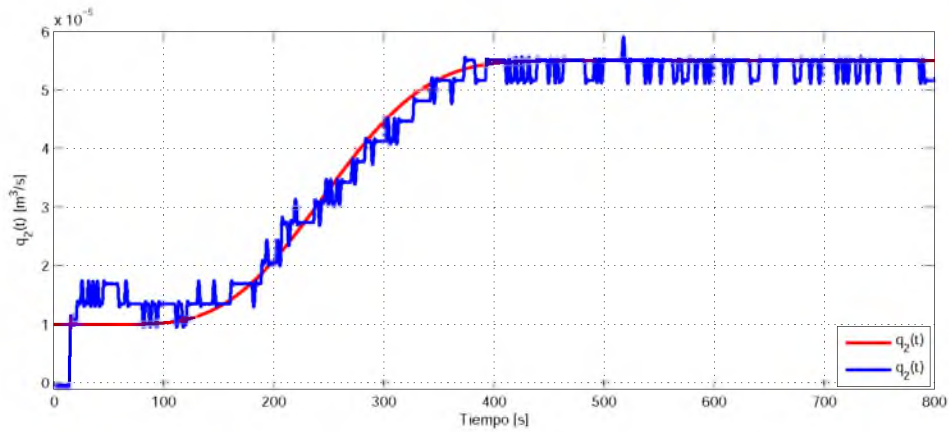
Es importante notar que si los tanques tienen sección transversal  $A$  reducida el nivel aumenta muy rápido ( $\frac{dh}{dt}$ ) y al contrario si  $A$  es grande la razón de cambio de nivel disminuye. La razón de cambio de nivel se muestra en la Fig.(5.18).

### Seguimiento del caudal de salida $q_2(t)$

Para la prueba inicialmente los tanques están completamente vacíos, válvulas abiertas y el caudal de salida es cero  $q_2(0) = 0 \frac{m^3}{s}$ .

El caudal  $q_2(t)$  aumenta conforme a un perfil planificado basado en el polinomio de Bezier descrito en la Ec.(3.13). En la Fig.(5.19) se muestra la respuesta experimental de  $q_2(t)$ , esta converge a la referencia  $q_{2d}(t)$  en aproximadamente 150 s y posteriormente mantiene una variación de flujo pequeño alrededor de la planificación.

El flujo de control experimental  $q_o(t)$  necesario para lograr el seguimiento del caudal de salida se presenta en la Fig.(5.20). En los primeros 150 s la apertura de la electroválvula es de alta frecuencia respecto a la de trabajo del sistema  $\omega_d$  y el flujo de entrada al primer tanque oscila de 0 a  $9 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$ .

Figura 5.18:  $Dh_1$  y  $Dh_2$ .Figura 5.19: Control  $q_2(t)$  con seguimiento de trayectoria tipo Bezier

En el periodo de 210 a 380 s el flujo de entrada se mantiene en su máximo valor  $|q_o(t)| = 12.86 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$  con pequeñas variaciones para lograr un crecimiento proporcional del caudal  $q_2(t)$  en este mismo rango de tiempo. Posterior a los 380 s la entrada mantienen una conmutación  $q_o(t) \in (0, |q_o|)$  y con ello garantiza la convergencia de la salida.

Cuando se logra la convergencia de la salida, el nivel en los tanques  $h_1(t)$  y  $h_2(t)$  evolucionan como se muestra en la Fig.(5.21). El nivel del primer tanque es



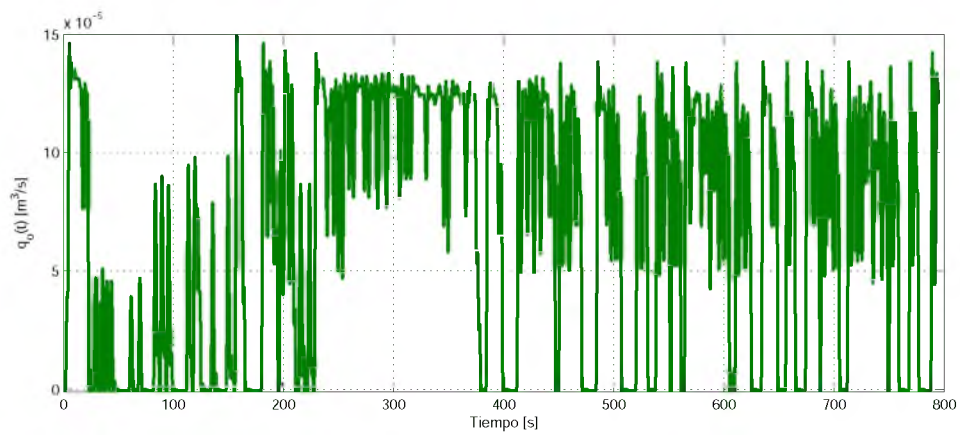


Figura 5.20: Esfuerzo de control  $q_o(t)$

ligeramente superior al segundo y ambos se estabilizan en aproximadamente 400 s. El tanque 1 aumenta de nivel hasta 0.2 m y el nivel del tanque 2 hasta 0.18 m, ambos oscilan alrededor de estos valores.

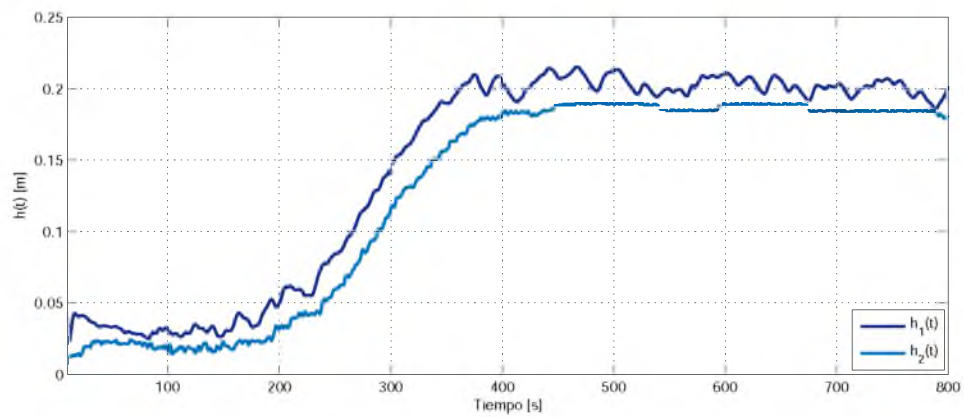


Figura 5.21: Altura de los tanques.





# Capítulo 6

## Estudio complementario

### 6.1. Identificación de Parámetros Hidráulicos

La identificación de parámetros se realizó basado en Beltrán [3], a partir de un método algebraico de sintonización en línea. Para este método únicamente se necesita conocer la entrada  $q_o(t)$  y la salida del sistema  $h_2(t)$ . La técnica de Identificación se aplica al sistema de tanques acoplados mostrados en las Ecs. (5.1) y (5.2).

El objetivo del algoritmo es identificar los parámetros de pérdida de carga o resistencia al flujo ( $R_1, R_2$ ), estos son los más importantes en el sistema que dependen de las características experimentales.

Se linealiza el modelo de la Ec.(2.22) y se obtiene la Transformada de Laplace:

$$sH_1(s) - h_1(0) = \frac{Q_o(s)}{A_1} - \frac{H_1 - H_2}{R_1 A_1} \quad (6.1)$$

$$(sA_1 R_1 + 1)H_1(s) = R_1 Q_o(s) + H_2(s) + A_1 R_1 h_1(0) \quad (6.2)$$

Ahora se obtiene la linealización de la Ec.(2.26) y su Transformada de Laplace es,

$$sH_2(s) - h_2(0) = \frac{H_1(s)}{R_1 A_2} - \frac{H_2(s)}{R_1 A_2} - \frac{H_2(s)}{R_2 A_2} \quad (6.3)$$

$$H_1(s) = \frac{(R_1 + R_2 + sA_2 R_1 R_2)}{R_2} H_2(s) - \frac{A_2 R_1}{R_2} h_2(0) \quad (6.4)$$

Se resuelve la Ec.(6.2) y (6.4) para  $H_2(s)$ :

$$(sA_1 R_1 + 1) \left( \frac{(R_1 + R_2 + sA_2 R_1 R_2)}{R_2} H_2(s) - \frac{A_2 R_1}{R_2} h_2(0) \right) = \dots$$
$$R_1 Q_o(s) + H_2(s) + A_1 R_1 h_1(0)$$

$$\alpha s^2 H_2(s) + \beta s H_2(s) + \gamma H_2(s) - \frac{s\alpha\gamma}{R_2} h_2(0) - A_2 \gamma h_2(0) = Q_o(s) + A_1 h_1(0) \quad (6.5)$$

donde los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  se agrupan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \alpha &= A_1 A_2 R_1 \\ \beta &= \frac{A_1 R_1 + A_1 R_2 + A_2 R_2}{R_2} \\ \gamma &= \frac{1}{R_2} \end{aligned}$$

Derivamos la Ec.(6.5) respecto de  $s$ , con lo que queda:

$$\begin{aligned} \alpha \left( s^2 \frac{dH_2(s)}{ds} + 2s H_2(s) \right) + \beta \left( s \frac{dH_2(s)}{ds} + H_2(s) \right) + \gamma \frac{dH_2(s)}{ds} - \\ \alpha h_2(0) = \frac{dQ_o(s)}{ds} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Derivamos nuevamente la Ec. (6.6) respecto de  $s$ :

$$\begin{aligned} \alpha \left( s^2 \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} + 4s \frac{dH_2(s)}{ds} + 2H_2(s) \right) + \beta \left( s \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} + 2 \frac{dH_2(s)}{ds} \right) + \\ \gamma \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} = \frac{d^2 Q_o(s)}{ds^2} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Multiplicamos la Ec.(6.7) por  $s^{-2}$  para obtener:

$$\begin{aligned} \alpha \left( \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} + 4s^{-1} \frac{dH_2(s)}{ds} + 2s^{-2} H_2(s) \right) + \beta \left( s^{-1} \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} + 2s^{-2} \frac{dH_2(s)}{ds} \right) + \\ \gamma s^{-2} \frac{d^2 H_2(s)}{ds^2} = s^{-2} \frac{d^2 Q_o(s)}{ds^2} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Obtenemos la transformada inversa de Laplace de la Ec.(6.8) para regresar al dominio del tiempo y las integrales con los límites se evalúan de  $t_o$  a  $t$ :

$$\begin{aligned} \alpha \left( t^2 h_2(t) dt - 4 \int_{t_o}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int_{t_o}^t h_2(t) dt \right) + \beta \left( \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt - 2 \int \int_{t_o}^t t h_2(t) dt \right) + \\ \gamma \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt = \int \int_{t_o}^t t^2 q_o(t) dt \end{aligned} \quad (6.9)$$

Se obtiene una vez más la integral de la Ec.(6.9) evaluándolo en el intervalo de  $t_o$  a  $t$ :

$$\begin{aligned} \alpha \left( \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt - 4 \int \int_{t_o}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int \int_{t_o}^t h_2(t) dt \right) + \beta \left( \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt - \right. \\ \left. 2 \int \int \int_{t_o}^t t h_2(t) dt \right) + \gamma \int \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt = \int \int \int_{t_o}^t t^2 q_o(t) dt \end{aligned} \quad (6.10)$$

Finalmente obtenemos una integral de la Ec.(6.10) y evaluando de  $t_o$  a  $t$ :

$$\begin{aligned} \alpha \left( \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt - 4 \int \int \int_{t_o}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int \int \int_{t_o}^t h_2(t) dt \right) + \\ \beta \left( \int \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt - 2 \int \int \int \int_{t_o}^t t h_2(t) dt \right) + \\ \gamma \int \int \int \int_{t_o}^t t^2 h_2(t) dt = \int \int \int \int_{t_o}^t t^2 q_o(t) dt \end{aligned} \quad (6.11)$$

Las Ecs.(6.9),(6.10) y (6.11) se reescriben de la siguiente forma:

$$a_{11}\alpha + a_{12}\beta + a_{13}\gamma = b_{11} \quad (6.12)$$

$$a_{21}\alpha + a_{22}\beta + a_{23}\gamma = b_{21} \quad (6.13)$$

$$a_{31}\alpha + a_{32}\beta + a_{33}\gamma = b_{31} \quad (6.14)$$

De lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones lineales (6.12), (6.13) y (6.14) con tres incógnitas  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , reescribiendo de forma matricial:

$$F(t)\theta = h(t)$$

Donde:

$$F(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}, h(t) = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

así como:

$$\begin{aligned}
a_{11} &= t^2 h_2(t) - 4 \int_{t_0}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int_{t_0}^t h_2(t) dt \\
a_{21} &= \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt - 4 \int \int_{t_0}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int \int_{t_0}^t h_2(t) dt \\
a_{31} &= \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt - 4 \int \int \int_{t_0}^t t h_2(t) dt + 2 \int \int \int \int_{t_0}^t h_2(t) dt \\
a_{12} &= \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt - 2 \int \int_{t_0}^t t h_2(t) dt \\
a_{22} &= \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt - 2 \int \int \int_{t_0}^t t h_2(t) dt \\
a_{32} &= \int \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt - 2 \int \int \int \int_{t_0}^t t h_2(t) dt \\
a_{13} &= \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt \\
a_{23} &= \int \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt \\
a_{33} &= \int \int \int \int_{t_0}^t t^2 h_2(t) dt
\end{aligned}$$

Y:

$$\begin{aligned}
b_1 &= \int \int_{t_0}^t t^2 q_o(t) dt \\
b_2 &= \int \int \int_{t_0}^t t^2 q_o(t) dt \\
b_3 &= \int \int \int \int_{t_0}^t t^2 q_o(t) dt
\end{aligned}$$

El vector de parámetros  $\theta$  es identificable por lo cual,

$$\begin{aligned}
F(t)\theta &= h(t) \\
\theta &= F(t)^{-1}h(t)
\end{aligned}$$

De tal manera que:

$$\left[ \begin{array}{c} A_1 A_2 R_1 \\ \left[ \frac{A_2 R_1 R_2 + A_2 R_1 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \right] \\ \frac{1}{R_2} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{array} \right]^{-1} \left[ \begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{array} \right]$$

Resolviendo queda:

$$\left[ \begin{array}{c} A_1 A_2 R_1 \\ \frac{A_2 R_1 R_2 + A_2 R_1 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2} \\ \frac{1}{R_2} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \frac{b_3(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) - b_2(a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + b_1(a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})}{a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31}} \\ \frac{b_2(a_{11}a_{33} - a_{13}a_{31}) - b_3(a_{11}a_{23} - a_{21}a_{13}) - b_1(a_{21}a_{33} - a_{31}a_{23})}{a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31}} \\ \frac{b_3(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) - b_2(a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31}) + b_1(a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})}{a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31}} \end{array} \right]$$

De esta manera se obtienen las resistencias hidráulicas ( $R_1$  y  $R_2$ ) ya que las capacitancias hidráulicas ( $A_1$  y  $A_2$ ) son conocidas.

Por lo tanto:

$$R_1 = \frac{b_3 (a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) - b_2 (a_{12}a_{33} - a_{13}a_{32}) + b_1 (a_{22}a_{33} - a_{23}a_{32})}{A_1 A_2 (a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31})}$$

$$R_2 = \frac{a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} + a_{12}a_{31}a_{23} + a_{21}a_{13}a_{32} - a_{13}a_{22}a_{31}}{b_3 (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) - b_2 (a_{11}a_{32} - a_{12}a_{31}) + b_1 (a_{21}a_{32} - a_{22}a_{31})}$$

Se realizó la simulación del sistema lineal en el software Matlab Simulink con un periodo de muestreo de 10 ms. El sistema se propone con condiciones iniciales  $h_1(0) = h_2(0) = 0$  m, un flujo de entrada constante  $q_o(t) = 12.86 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$  y ambas válvulas completamente abiertas.

Los parámetros usados en la prueba numérica son dados en la Tabla.(3.1). La Fig.( 6.1) muestra la estimación de los parámetros de resistencia al flujo  $R_1$  y  $R_2$ .

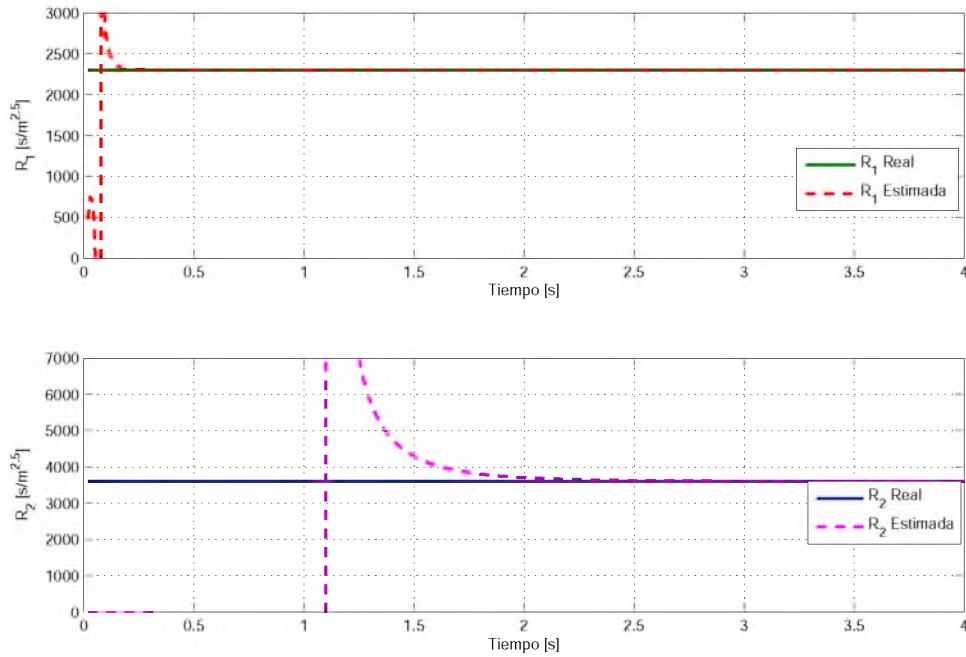


Figura 6.1: Identificación de parámetros.



# Capítulo 7

## Conclusiones

El control de nivel y caudal de líquidos en la industria es de gran importancia, debido a que permite mantener una demanda continua sin afectar el proceso es por ello que en este trabajo se abordó el problema del estudio de un esquema de control y el análisis de un modelo matemático de un sistema de tanques acoplados.

El modelo presentado en este documento describe claramente la velocidad del flujo, la dinámica presente en el llenado y la interacción hidráulica entre tanques. Para su estudio se desarrolló y reestructuró una plataforma experimental, adicionalmente se desarrollo de un dispositivo de medición de nivel, el procesamiento de la señal de los sensores de caudal y su caracterización, la fabricación de los tanques, la inclusión de válvulas y electroválvula, esos son los elementos principales que conforman la plataforma experimental.

Una vez concluida la plataforma se realizaron distintas configuraciones de llenado y flujo en pruebas de lazo abierto y cerrado para verificar las dinámicas del sistema. El algoritmo de control discontinuo empleado nos permitió lograr este objetivo debido a la simplicidad del esquema. El algoritmo, esto por las buenas propiedades de robustez respecto a las variables desconocidas del sistema.

La plataforma también tiene otros propósitos como: estudio de algoritmos de control, estudio de esquemas de identificación de parámetros y académicas en las asignaturas de Modelado, Sistemas Mecatrónicos, Mecánica de Fluidos y otras a fines a la carrera de Mecatrónica.

Los resultados obtenidos numérica y experimentalmente tienen una gran concordancia presentando un comportamiento no lineal en el llenado y vaciado de los tanques, las pruebas en lazo abierto en simulación nos permitieron determinar las características propias de la bomba, electroválvula y los sensores requeridos para realizar la experimentación. Las respuestas experimentales obtenidas en lazo cerrado validaron el esquema de modos deslizantes propuesto logrando regular las variables del sistema.

El estudio de un esquema de control y el análisis del modelo fue la clave para entender y resolver algunos de los problemas presentes en el manejo de fluidos en los procesos industriales.

## 7.1. Trabajos futuros

En relación al conocimiento adquirido al realizar este proyecto de tesis se plantean los siguientes objetivos a realizar:

- Realizar una Identificación de parámetros hidráulicos de manera experimental.
- Implementar distintos esquemas de control, ya sea con una servo-válvula, válvulas de control lineal donde aplicarían esquemas de control tipo P, PD, PI y PID en sistemas continuo. De igual manera se podría realizar esto con un variador de frecuencia para regular la velocidad de la bomba.
- Se propone el cambio de sección transversal y altura de los tanques si se requiere controlar el caudal a un valor mayor al de las pruebas realizadas.
- Modificación del dispositivo de sensado, para tener un mayor rango de medición.
- Realizar una GUI en el software de Matlab para facilitar la interfaz.



# Bibliografía

- [1] Albarracín, J., & Argüelles, A. (2010) *Ingeniería detallada, modelado y simulación de un sistema de taques interactuantes no lineales* (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- [2] Alexander, K., & Sadiku, O. *Fundamentos de circuitos eléctricos*. D. F., México: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] Beltrán, F., Silva, G., Sira, H., y Blanco, A. (2008). Active Vibration Control Using On-line Algebraic Identification and Sliding Modes. *Computación y sistemas*, 100(3), 313-330.
- [4] Benítez, D. (1994). *Diseño y construcción de un Sistema de control*. (Tesis de Licenciatura). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [5] División de Ingeniería de Crane. (1976) *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill.
- [6] F. Beltrán-Carbajal, G. Silva-Navarro, H Sira-Ramírez. "Active Vibration Absorbers using Generalized PI and Sliding-Mode Control Techniques". *Proc. of the American Control Conference*, Denver, 2003.
- [7] Fernández, F. (2015) Modelado y Simulación de Sistemas de Control de Llenado de Estanques mediante Simulink.
- [8] Gil, Oscar., & Robayo David. (2011) *Diseño, Construcción y control de un sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- [9] Kumar P., Pathan S. S. y Mashilkar B. (2014) Liquid Level Control using PID Controller Based on Labview Matlab Software. *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, 3(12), 111-114.
- [10] Mantilla, L. (2005) Control de Nivel para un sistema de tres tanques, diseño y evaluación de estrategias. (Tesis de Licenciatura) Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bucaramanga, Colombia.
- [11] Mott R. L. (2004). *Mecánica de Fluidos*. Edo. de México, México, PEARSON Educación.
- [12] Ogata, K. Dinámica de Sistemas. (1987). Edo. de México, México. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.

- [13] Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. (2010). Madrid, España. PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- [14] Pérez, Sara. (2011) Control de Tanques Acoplados (Tesis de Licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Comunicación. Pamplona, España.
- [15] Perez, K., Vargas, Hector., Castro, L.C., Chacón, J. (2018). Coupled tanks laboratory for teaching multivariable control concepts. En C. Duran (Presidencia). IEE International Conference on Automation. Congress of the Chilean Association of Automatic Control. Conferencia llevada a cabo en el XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control, Concepción, Chile.
- [16] Peñaranda, C., Silva, W., Arias, E., (2014). Springer-Verlag, Berlin, 1992. *Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS* (Tesis de Licenciatura). Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Bucaramanga, Colombia.
- [17] Raduca, Mihaela. (2001). Fuzzy Controller for adjustment of liquid level in the tank. Mathematics and Computer Science Series, 38(4), 33-43.
- [18] R.A. DeCarlo, S.H. Zak and G.P. Matthews. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial, *Proceedings of IEEE*, Vol. 76, No.3, pp. 212-232, 1988.
- [19] Restrepo, L., & Cardona, J. (2015). *Diseño de un sistema de control de nivel para la preparación de líquidos dializantes basado en señales ultrasónicas*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- [20] V.I. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [21] White M. F. (2004). *Mecánica de Fluidos*. Madrid, España, McGraw-Hill Interamericana de España, S. A.U.
- [22] [www.valvulasymedidores.com](http://www.valvulasymedidores.com)

# Apéndice A

## Diagramas de bloques

=====VALORES SISTEMA DE TANQUES ACOPLADOS=====

```
A1=0.0372; % m^2
A2=0.0372; % m^2
R1=2300;    % Válvula de compuerta
R2=3600;    % Válvula de bola
```

Figura A.1: Valores del Sistema.

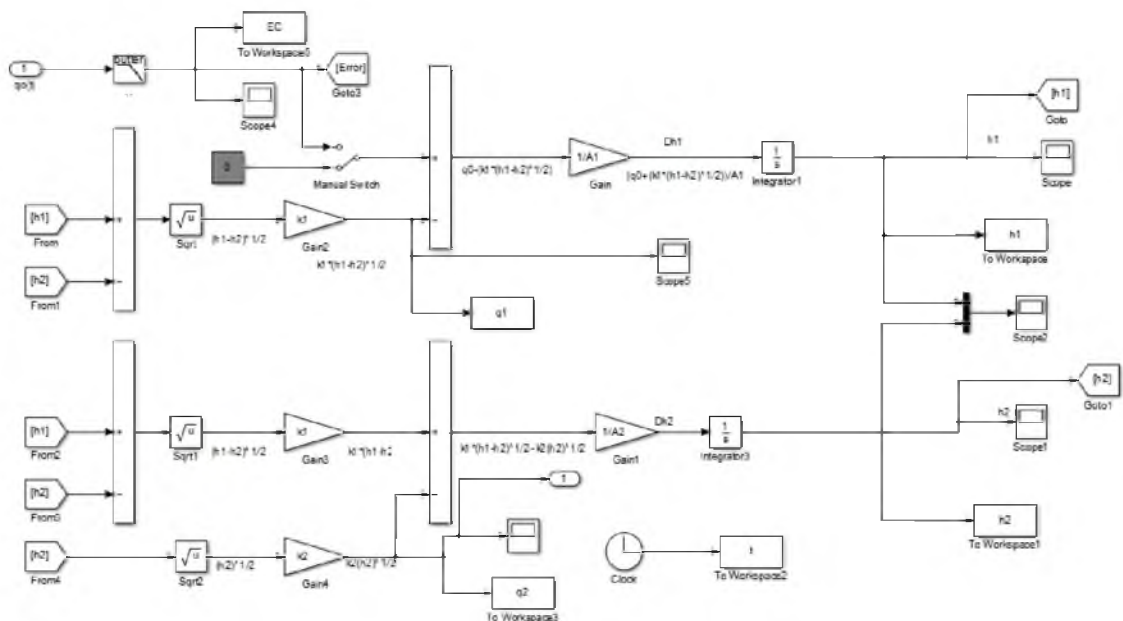


Figura A.2: Planta.

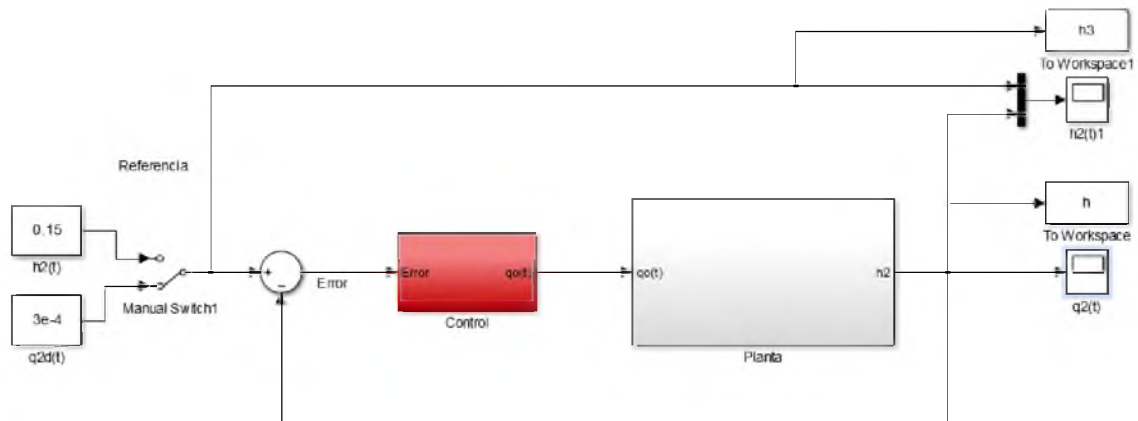


Figura A.3: Diagrama de Bloques de control de caudal y nivel en simulación.

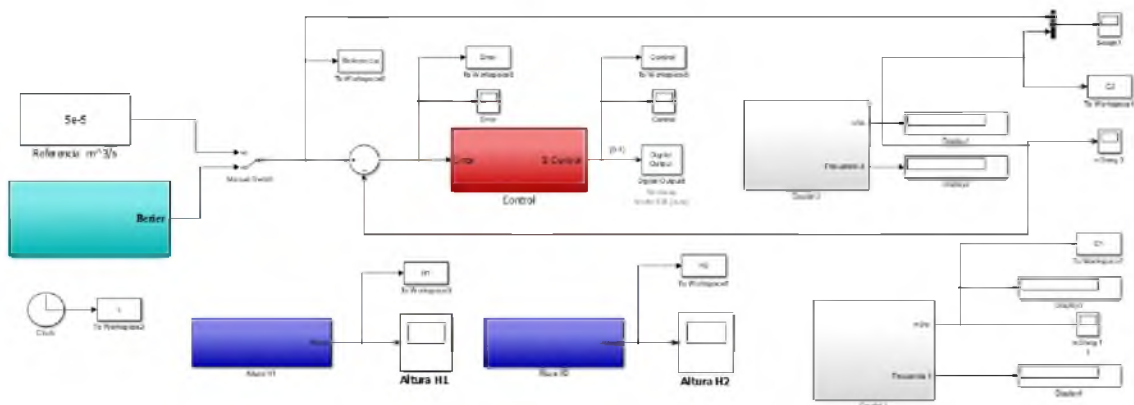


Figura A.4: Diagrama de Bloques de control de caudal y nivel experimental.



Figura A.5: Identificación de parámetros.

# Apéndice B

## Hojas de datos de dispositivos



### TROUBLESHOOTING GUIDE

| SYMPTOM                                                                                     | CAUSE                                                                                              | SOLUTION                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| The pump does not run                                                                       | <div>Power is not turned on</div> <div>Incorrectly plugged in</div> <div>Bound impeller</div>      | <div>Turn on the power</div> <div>Plug in correctly</div> <div>Remove foreign matter from impeller</div>                                                                |
| The motor repeats ON/OFF without running pump. It stops and does not restart                | <div>Wrong voltage</div> <div>The water intake or outlet pipe is clogged with foreign matter</div> | <div>Correct voltage</div> <div>Clean out the intake and outlet</div>                                                                                                   |
| The pump runs with reduced or no performance                                                | <div>Wrong frequency</div> <div>Impeller worn out</div> <div>Low water level</div>                 | <div>Correct frequency</div> <div>Replace impeller</div> <div>Ensure the pump is fully submerged</div>                                                                  |
| The pump runs normally at the beginning but the water flows sluggishly or there is no water | <div>Hose is too long or dogged</div> <div>Air in the impeller chamber</div>                       | <div>Shorten hose and/or clean out</div> <div>To get rid of air, put pump into the water. Turn the switch to "ON" and "OFF" intermittently to clear air from pump</div> |

### LIMITED WARRANTY

Your Active Aqua Pump is guaranteed to work for one year from the date of retail purchase. Replaceable filter material not included. Save your retail receipt/invoice, a copy is required for all warranty work.

Any alterations to a pump or cord will void warranty. Contact the place of purchase for repair or replacement. Active Aqua Pumps are sold and serviced only through dealers.



# INSTRUCTION MANUAL

## ActiveAQUA™ ACTIVE AQUA SUBMERSIBLE PUMP

FOR MODELS: AAPW40, AAPW160, AAPW250,  
AAPW400, AAPW550, AAPW800, AAPW1000

**Active Aqua Pumps** from Hydrofarm are carefully inspected and tested to ensure both safety and operating performance. However, failure to follow the instructions and warnings in this manual may result in pump damage and/or serious injury. Be sure to read and save this manual for future reference.



**HYDROFARM**

## WARNING

- This pump is supplied with a grounding conductor and a grounding type attachment plug. To reduce risk of electric shock, connect only to a properly grounded outlet.
- Do not remove the grounding pin from the plug.
- Do not connect to any voltage other than that shown on the pump.
- Do not pump flammable liquids.
- The national electric code requires that a grounded fault circuit interrupter (GFCI) be used in the branch circuit supplying fountain pumps and other pond equipment. See your electrical supplies dealer for this device.
- Do not use with water above 86°F (30°C).
- Do not allow the pump to freeze in winter, remove pump from fountains and ponds and store in a frost-free area.

## CAUTION:

**Always disconnect from electrical outlet before handling the pump.**

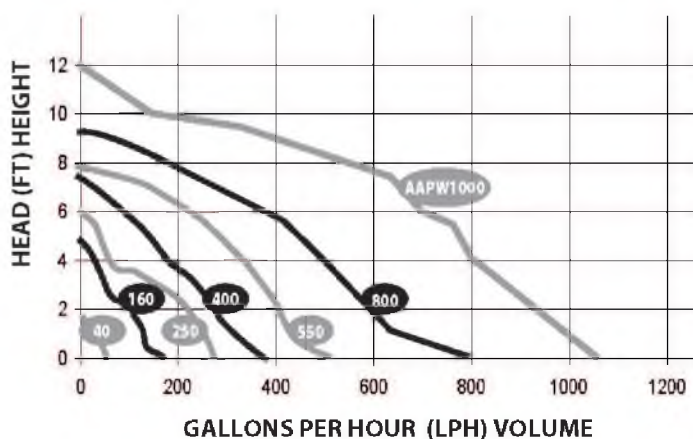
- Do not let the pump run dry.
- Do not lift the pump by the power cord.
- Do not pump heated liquids.
- Do not operate in salt water.

## PERFORMANCE

- A clogged or dirty intake screen will greatly reduce performance. If the pump is used on a dirty surface, raise it slightly to reduce the amount of debris contacting the intake. If less flow is desired, adjust the flow control knob on the front of the pump or restrict the discharge flow.
- This pump can be used submersed or in-line. Note that when used in-line it should be placed below the water level since it is not self priming. Never run this pump dry. If initially the pump does not work, it may be "air locked". To clear the air lock, unplug the pump and rotate 180 degrees under water, repeat if necessary.

The included gray fitting should be attached to the inlet side of the pump only when operated in-line. The barbed gray and black fittings use a different sized thread and rubber O-rings. The gray in-line fitting attaches to the front of the pump and uses the larger sized O-ring. The black fittings attach to the top of the pump and use the smaller sized O-ring. Please use only as intended (see chart for reference).

## ACTIVE AQUA SUBMERSIBLE PUMP COMPARISON CHART



| Product Item Code | Rated GPH (LPH) | Recommended Size (gallons (litres, litros)) |        | Watts | Fitting Sizes Included (inches (millimeters)) |                      |
|-------------------|-----------------|---------------------------------------------|--------|-------|-----------------------------------------------|----------------------|
| AAPW40            | 43 (163)        | 5                                           | (19)   | 3     | 5/16"                                         | (8mm)                |
| AAPW160           | 172 (650)       | 15                                          | (57)   | 9.5   | 1/2"                                          | (12.7mm)             |
| AAPW250           | 291 (1,100)     | 25                                          | (95)   | 16    | 1/2", 3/4"                                    | (12.7mm, 19mm)       |
| AAPW400           | 370 (1,400)     | 40                                          | (151)  | 24    | 1/2", 3/4"                                    | (12.7mm, 19mm)       |
| AAPW550           | 529 (2,000)     | 55                                          | (208)  | 33    | 1/2", 3/4"                                    | (12.7mm, 19mm)       |
| AAPW800           | 793 (3,000)     | 80                                          | (303)  | 58    | 1/2", 3/4", 1"                                | (12.7mm, 19mm, 25mm) |
| AAPW1000          | 1110 (4,200)    | 100+                                        | (378+) | 92    | 1/2", 3/4", 1"                                | (12.7mm, 19mm, 25mm) |

*Intake fittings are not represented in this chart.  
Each aeration kit contains an extra fitting.*



**SHARP****GP2Y0A21YK0F**

# GP2Y0A21YK0F

**Distance Measuring Sensor Unit**  
**Measuring distance: 10 to 80 cm**  
**Analog output type**



## ■Description

**GP2Y0A21YK0F** is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IRED (infrared emitting diode) and signal processing circuit.

The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method.

This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

## ■Features

1. Distance measuring range : 10 to 80 cm
2. Analog output type
3. Package size : 29.5×13×13.5 mm
4. Consumption current : Typ. 30 mA
5. Supply voltage : 4.5 to 5.5 V

## ■Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2011/65/EU)

## ■Applications

1. Touch-less switch  
(Sanitary equipment, Control of illumination, etc. )
2. Robot cleaner
3. Sensor for energy saving  
(ATM, Copier, Vending machine)
4. Amusement equipment  
(Robot, Arcade game machine)

Notice The content of data sheet is subject to change without prior notice.

In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.

**SHARP****GP2Y0A21YK0F****■Absolute Maximum Ratings** ( $T_a=25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{CC}=5\text{V}$ )

| Parameter               | Symbol    | Rating               | Unit               |
|-------------------------|-----------|----------------------|--------------------|
| Supply voltage          | $V_{CC}$  | -0.3 to +7           | V                  |
| Output terminal voltage | $V_O$     | -0.3 to $V_{CC}+0.3$ | V                  |
| Operating temperature   | $T_{opr}$ | -10 to +60           | $^{\circ}\text{C}$ |
| Storage temperature     | $T_{stg}$ | -40 to +70           | $^{\circ}\text{C}$ |

**■Electro-optical Characteristics** ( $T_a=25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{CC}=5\text{V}$ )

| Parameter                   | Symbol       | Conditions                                                                     | MIN. | TYP. | MAX. | Unit |
|-----------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Average supply current      | $I_{CC}$     | $L=80\text{cm}$ (Note 1)                                                       | —    | 30   | 40   | mA   |
| Distance measuring          | $\Delta L$   | (Note 1)                                                                       | 10   | —    | 80   | cm   |
| Output voltage              | $V_O$        | $L=80\text{cm}$ (Note 1)                                                       | 0.25 | 0.4  | 0.55 | V    |
| Output voltage differential | $\Delta V_O$ | Output voltage difference between $L=10\text{cm}$ and $L=80\text{cm}$ (Note 1) | 1.65 | 1.9  | 2.15 | V    |

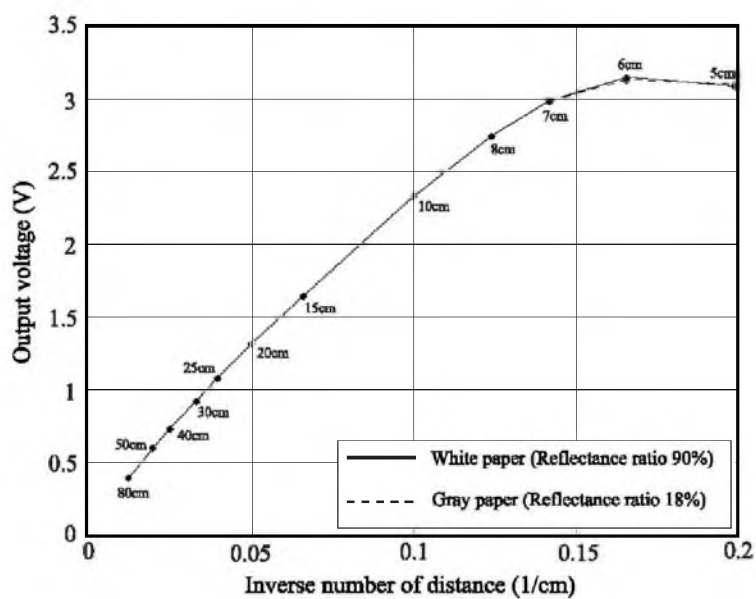
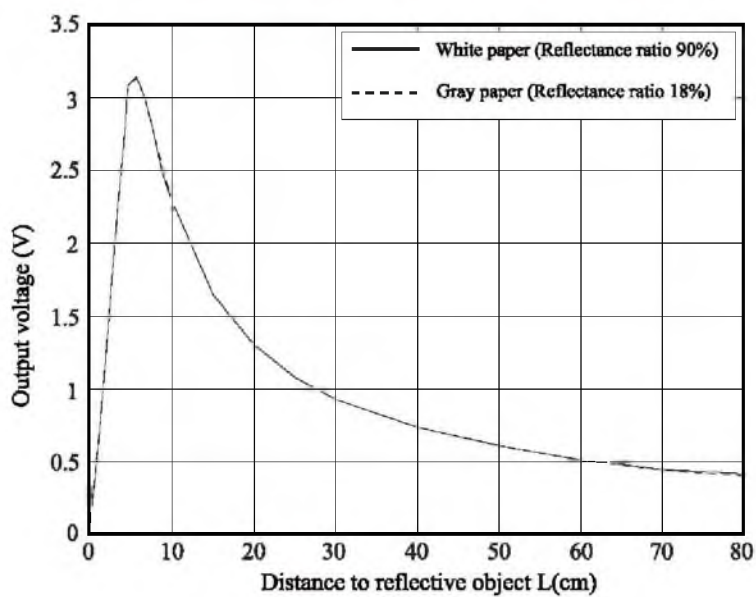
\* L : Distance to reflective object

Note 1 : Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27・white face, reflectance; 90%)

**■Recommended operating conditions**

| Parameter      | Symbol   | Rating     | Unit |
|----------------|----------|------------|------|
| Supply voltage | $V_{CC}$ | 4.5 to 5.5 | V    |

Fig. 2 Example of distance measuring characteristics(output)





## Sensor de flujo de agua 1" FS400A

Modelo SEN-FLOW-100

El sensor de flujo permite medir el caudal de agua en una tubería y así poder conocer el consumo.

 Imprimir

### DESCRIPCIÓN

#### INFO

Un sensor de flujo o caudalímetro es un instrumento para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido. El caudal es la cantidad de líquido o fluido (volumen) que circula a través de una tubería por unidad de tiempo, por lo general se expresa en litros por minutos (l/m), litros por hora (l/h), metros cúbicos por hora (m³/h), etc.). Los caudalímetros suelen colocarse directamente en la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores/sensores de caudal, medidores de flujo o flujómetros.

El sensor de flujo de agua de 1" FS400A sirve para medir caudal de agua en tuberías de 1" de diámetro. También puede ser empleado con otros líquidos de baja viscosidad, como bebidas gaseificadas, bebidas alcohólicas, combustible, etc. Es un caudalímetro electrónico de tipo turbina. Compatible con sistemas digitales como Arduino, PIC, Raspberry Pi, PLCs. El sensor posee tres cables: rojo (VCC: 5VDC), negro (tierra) y amarillo (salida de pulsos del sensor de efecto Hall). Con la ayuda de este sensor podrás ingresar al mundo de la Domótica, monitoreando el consumo de agua en tu hogar, o puedes hacer un dispensador de volumen automatizado con la ayuda de una válvula adicional.

El funcionamiento del sensor es de la siguiente forma: el caudal de agua ingresa al sensor y hace girar una turbina, la turbina está unida a un imán que activa un sensor de efecto Hall, que a su vez emite un pulso eléctrico que puede ser leído por la entrada digital de un Arduino o PLC. El sensor de efecto Hall está aislado del agua, de manera que siempre se mantiene seco y seguro. Como el volumen de agua por cada pulso es fijo y de un valor conocido (promedio) podemos contar la cantidad de pulsos por unidad de tiempo (segundo o minuto). Luego multiplicar el valor de volumen/pulso por la cantidad de pulsos y así determinar el caudal o flujo de agua. Se recomienda utilizar interrupciones por hardware en el Arduino para detectar o contar los pulsos del sensor. Tenga en cuenta que este no es un sensor de precisión por lo que la orientación, presión del agua y otras condiciones pueden afectar la medición. Se recomienda calibrar el sensor realizando mediciones con volúmenes conocidos. Calibrado puede llegar a tener una precisión de hasta 10%.

**FÓRMULA:** Flujo del agua en L/min = Pulsaciones del sensor (Hz) / 4.8

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Modelo: FS400A
- Voltaje de operación: 5V - 24V DC
- Consumo de corriente: 15mA (5V)
- Capacidad de carga: 10mA (5VDC)
- Salida: Onda cuadrada pulsante
- Rango de Flujo: 1-6CL/min
- Volumen promedio por pulso: 3.4/mL
- Pulsos por litro: 280
- Factor de conversión: 4.8
- Rosca externa: 1" NPS
- Presión de trabajo máx.: 1.2MPa (12 bar)
- Temperatura de funcionamiento: -25°C a 60°C
- Material: Plástico color negro



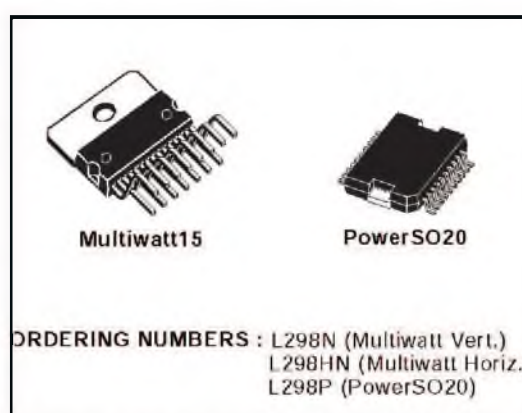
**L298**

## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

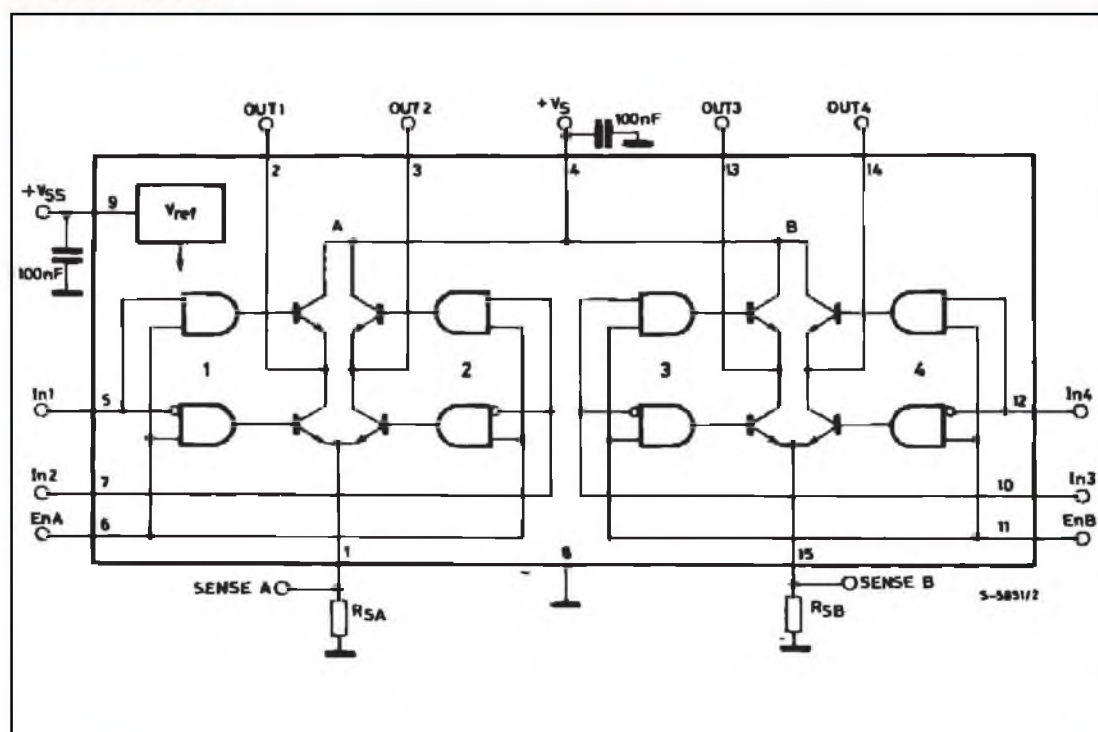
### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



section of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

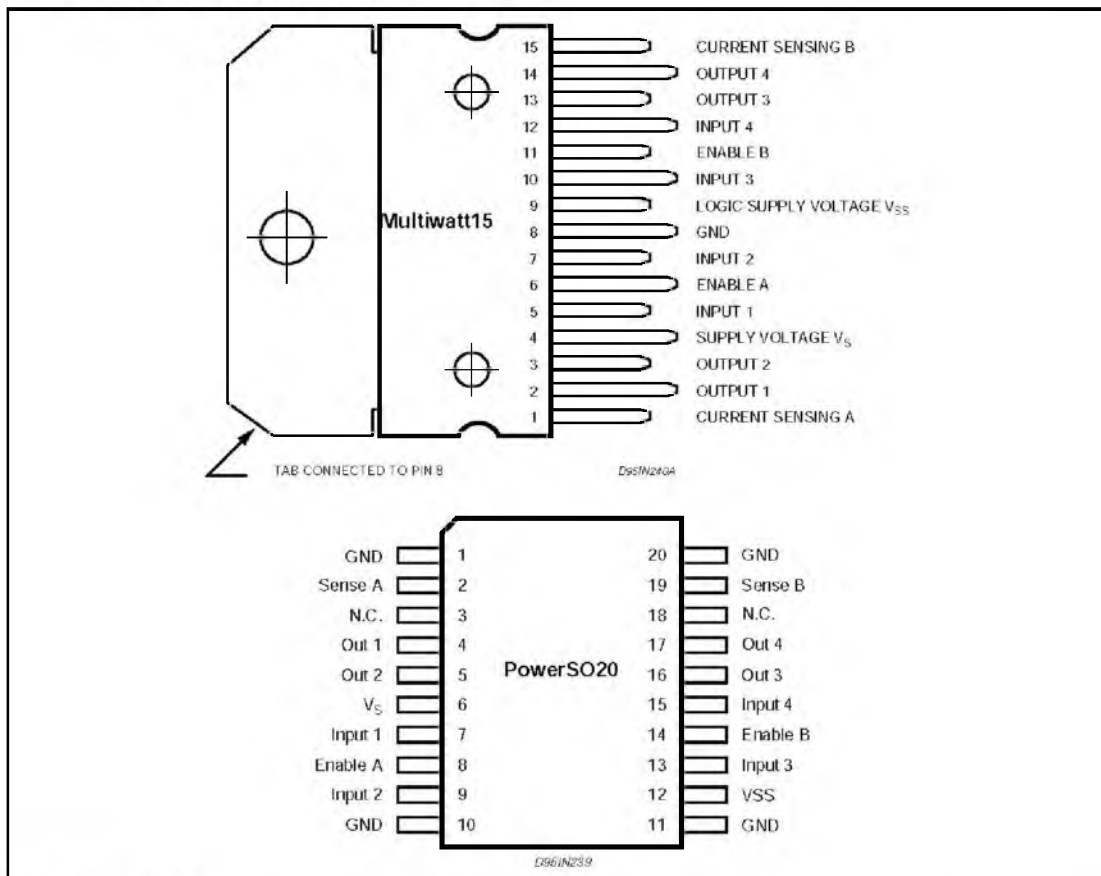
### BLOCK DIAGRAM





**L298****ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

| Symbol         | Parameter                                           | Value      | Unit       |
|----------------|-----------------------------------------------------|------------|------------|
| $V_S$          | Power Supply                                        | 50         | V          |
| $V_{SS}$       | Logic Supply Voltage                                | 7          | V          |
| $V_I, V_{en}$  | Input and Enable Voltage                            | -0.3 to 7  | V          |
| $I_O$          | Peak Output Current (each Channel)                  |            |            |
|                | - Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )                 | 3          | A          |
|                | - Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ )    | 2.5        | A          |
|                | - DC Operation                                      | 2          | A          |
| $V_{sens}$     | Sensing Voltage                                     | -1 to 2.3  | V          |
| $P_{tot}$      | Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ ) | 25         | W          |
| $T_{op}$       | Junction Operating Temperature                      | -25 to 130 | $^\circ C$ |
| $T_{stg}, T_J$ | Storage and Junction Temperature                    | -40 to 150 | $^\circ C$ |

**PIN CONNECTIONS (top view)****THERMAL DATA**

| Symbol           | Parameter                           | PowerSO20 | Multiwatt15 | Unit         |
|------------------|-------------------------------------|-----------|-------------|--------------|
| $R_{th(j-case)}$ | Thermal Resistance Junction-case    | Max.      | 3           | $^\circ C/W$ |
| $R_{th(j-amb)}$  | Thermal Resistance Junction-ambient | Max.      | 35          | $^\circ C/W$ |

(\*) Mounted on aluminum substrate



# PIC16F87XA

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

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

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

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during Sleep via external  
crystal/clock
- Timer2: 8 bit timer/counter with 8 bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™  
(Master mode) and I²C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with  
external  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$  and  $\overline{CS}$  controls (40/44 pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

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

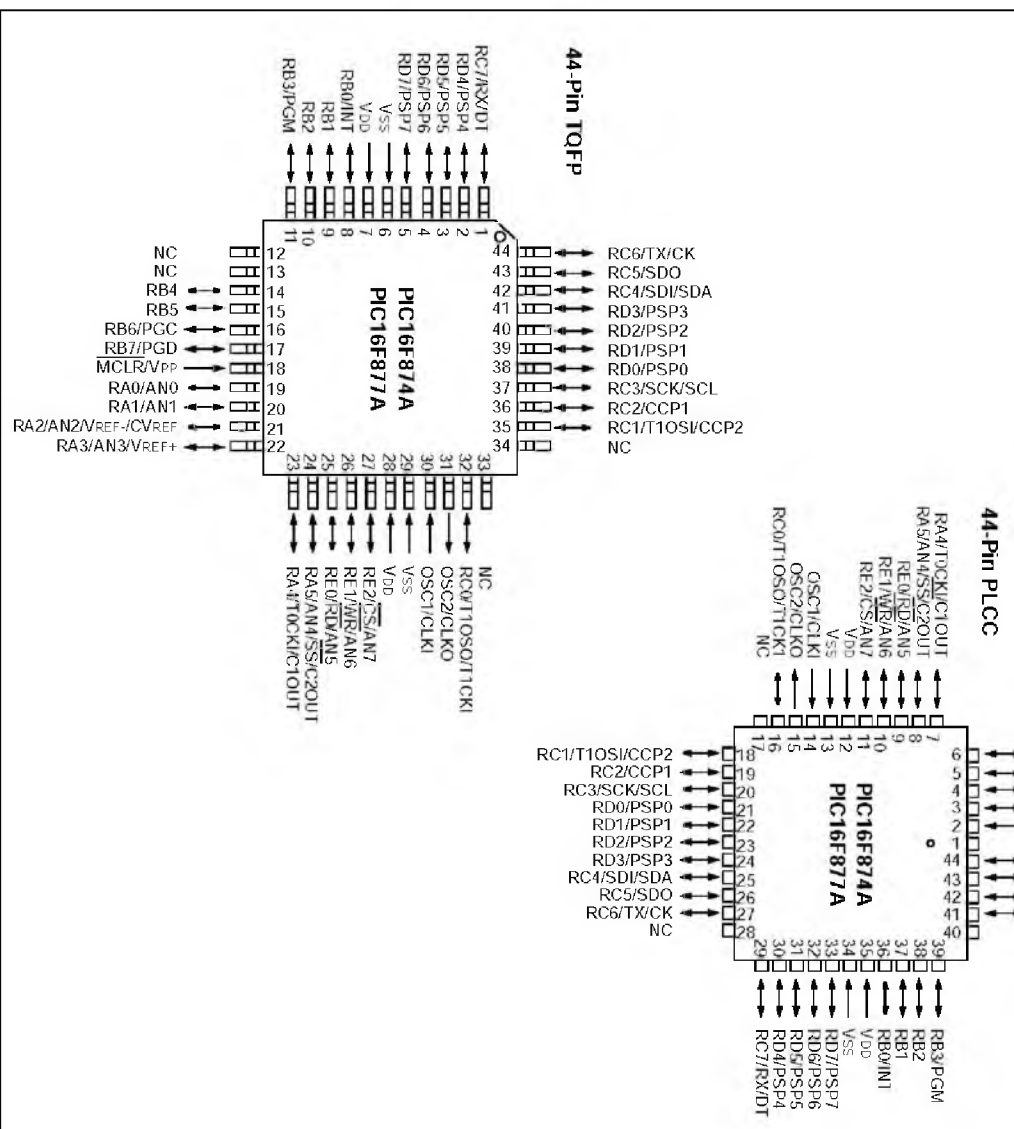
### Special Microcontroller Features:

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

### CMOS Technology:

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

| Device     | Program Memory |                               | Data<br>SRAM<br>(Bytes) | EEPROM<br>(Bytes) | I/O | 10-bit<br>A/D (ch) | CCP<br>(PWM) | MSSP |               | USART | Timers<br>8/16-bit | Comparators |
|------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-----|--------------------|--------------|------|---------------|-------|--------------------|-------------|
|            | Bytes          | # Single Word<br>Instructions |                         |                   |     |                    |              | SPI  | Master<br>I²C |       |                    |             |
| PIC16F873A | 7.2K           | 4096                          | 192                     | 128               | 22  | 5                  | 2            | Yes  | Yes           | Yes   | 2/1                | 2           |
| PIC16F874A | 7.2K           | 4096                          | 192                     | 128               | 33  | 8                  | 2            | Yes  | Yes           | Yes   | 2/1                | 2           |
| PIC16F876A | 14.3K          | 8192                          | 368                     | 256               | 22  | 5                  | 2            | Yes  | Yes           | Yes   | 2/1                | 2           |
| PIC16F877A | 14.3K          | 8192                          | 368                     | 256               | 33  | 8                  | 2            | Yes  | Yes           | Yes   | 2/1                | 2           |

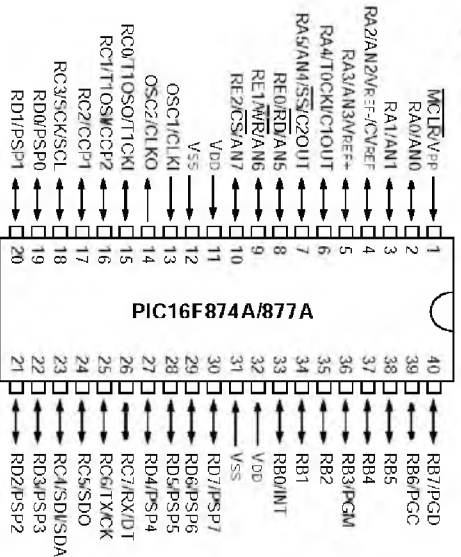




## Pin Diagrams (Continued)

## PIC16F87XA

## 40-Pin PDIP



RA3/AN3/VREF+  
 RA2/AN2/VREF-/CVREF  
 RA1/AN1  
 RA0/AN0  
 MCLR/VPP  
 NC  
 RB7/PGD  
 RB6/PGC  
 RB5  
 RB4  
 NC

# PIC16F87XA

## 1.0 DEVICE OVERVIEW

This document contains device specific information about the following devices:

- PIC16F873A
- PIC16F874A
- PIC16F876A
- PIC16F877A

PIC16F873A/876A devices are available only in 28-pin packages, while PIC16F874A/877A devices are available in 40-pin and 44-pin packages. All devices in the PIC16F87XA family share common architecture with the following differences:

- The PIC16F873A and PIC16F874A have one-half of the total on-chip memory of the PIC16F876A and PIC16F877A
- The 28-pin devices have three I/O ports, while the 40/44-pin devices have five
- The 28-pin devices have fourteen interrupts, while the 40/44-pin devices have fifteen
- The 28-pin devices have five A/D input channels, while the 40/44-pin devices have eight
- The Parallel Slave Port is implemented only on the 40/44-pin devices

The available features are summarized in Table 1-1. Block diagrams of the PIC16F873A/876A and PIC16F874A/877A devices are provided in Figure 1-1 and Figure 1-2, respectively. The pinouts for these device families are listed in Table 1-2 and Table 1-3.

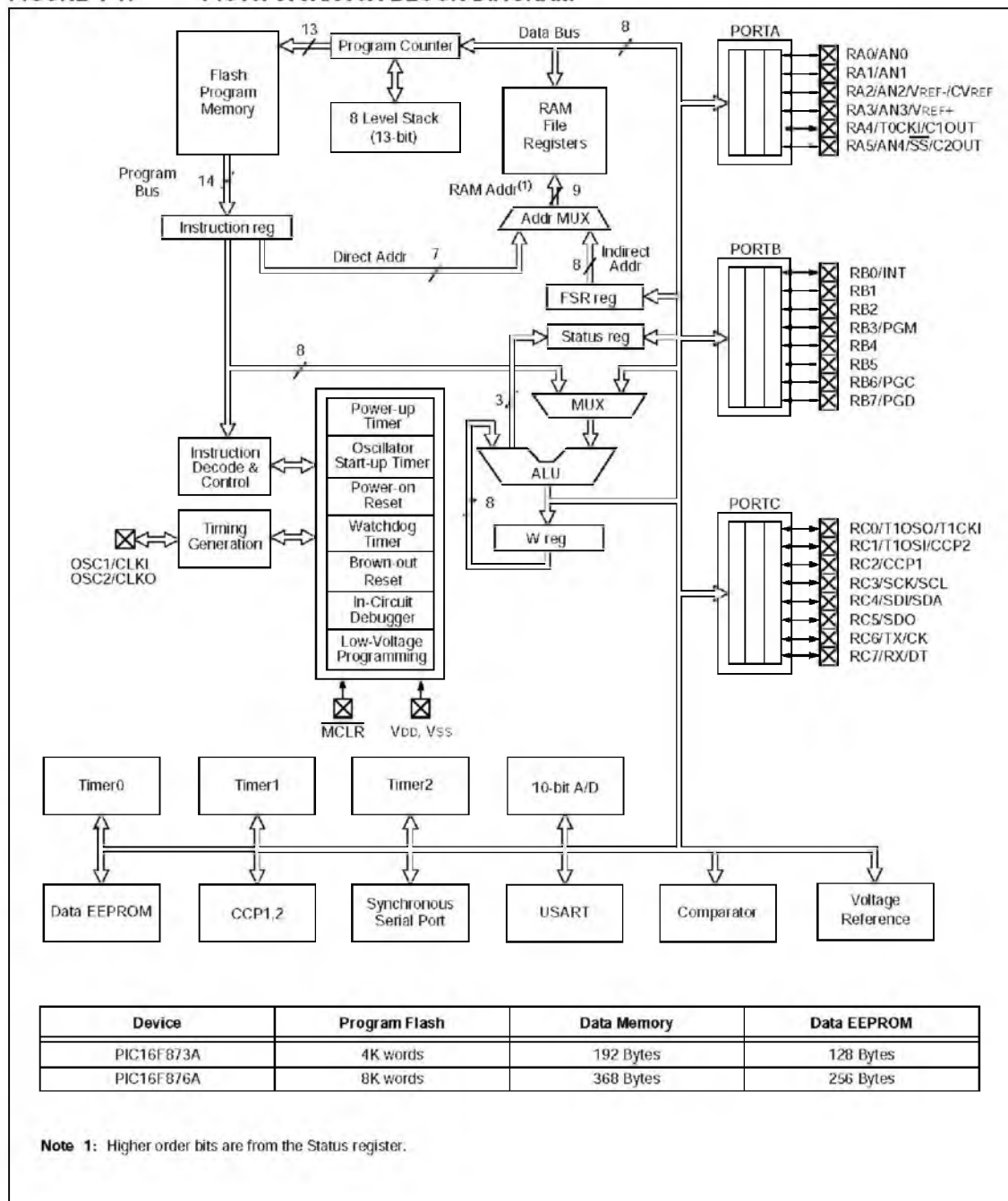
Additional information may be found in the PICmicro® Mid-Range Reference Manual (DS33023), which may be obtained from your local Microchip Sales Representative or downloaded from the Microchip web site. The Reference Manual should be considered a complementary document to this data sheet and is highly recommended reading for a better understanding of the device architecture and operation of the peripheral modules.

**TABLE 1-1: PIC16F87XA DEVICE FEATURES**

| Key Features                        | PIC16F873A                                              | PIC16F874A                                              | PIC16F876A                                              | PIC16F877A                                              |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Operating Frequency                 | DC – 20 MHz                                             | DC – 20 MHz                                             | DC – 20 MHz                                             | DC – 20 MHz                                             |
| Resets (and Delays)                 | POR, BOR (PWRT, OST)                                    | POR, BOR (PWRT, OST)                                    | POR, BOR (PWRT, OST)                                    | POR, BOR (PWRT, OST)                                    |
| Flash Program Memory (14-bit words) | 4K                                                      | 4K                                                      | 8K                                                      | 8K                                                      |
| Data Memory (bytes)                 | 192                                                     | 192                                                     | 368                                                     | 368                                                     |
| EEPROM Data Memory (bytes)          | 128                                                     | 128                                                     | 256                                                     | 256                                                     |
| Interrupts                          | 14                                                      | 15                                                      | 14                                                      | 15                                                      |
| I/O Ports                           | Ports A, B, C                                           | Ports A, B, C, D, E                                     | Ports A, B, C                                           | Ports A, B, C, D, E                                     |
| Timers                              | 3                                                       | 3                                                       | 3                                                       | 3                                                       |
| Capture/Compare/PWM modules         | 2                                                       | 2                                                       | 2                                                       | 2                                                       |
| Serial Communications               | MSSP, USART                                             | MSSP, USART                                             | MSSP, USART                                             | MSSP, USART                                             |
| Parallel Communications             | —                                                       | PSP                                                     | —                                                       | PSP                                                     |
| 10-bit Analog-to-Digital Module     | 5 input channels                                        | 8 input channels                                        | 5 input channels                                        | 8 input channels                                        |
| Analog Comparators                  | 2                                                       | 2                                                       | 2                                                       | 2                                                       |
| Instruction Set                     | 35 Instructions                                         | 35 Instructions                                         | 35 Instructions                                         | 35 Instructions                                         |
| Packages                            | 28-pin PDIP<br>28-pin SOIC<br>28-pin SSOP<br>28-pin QFN | 40-pin PDIP<br>44-pin PLCC<br>44-pin TQFP<br>44-pin QFN | 28-pin PDIP<br>28-pin SOIC<br>28-pin SSOP<br>28-pin QFN | 40-pin PDIP<br>44-pin PLCC<br>44-pin TQFP<br>44-pin QFN |

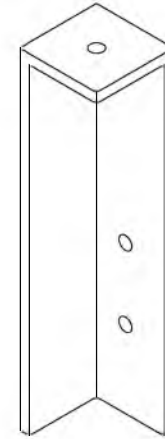
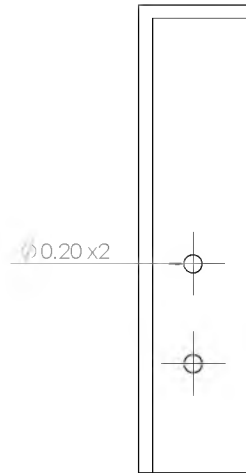
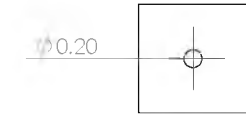
## PIC16F87XA

FIGURE 1-1: PIC16F873A/876A BLOCK DIAGRAM

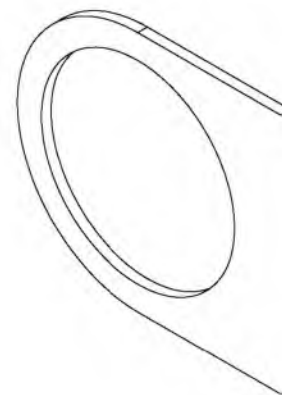
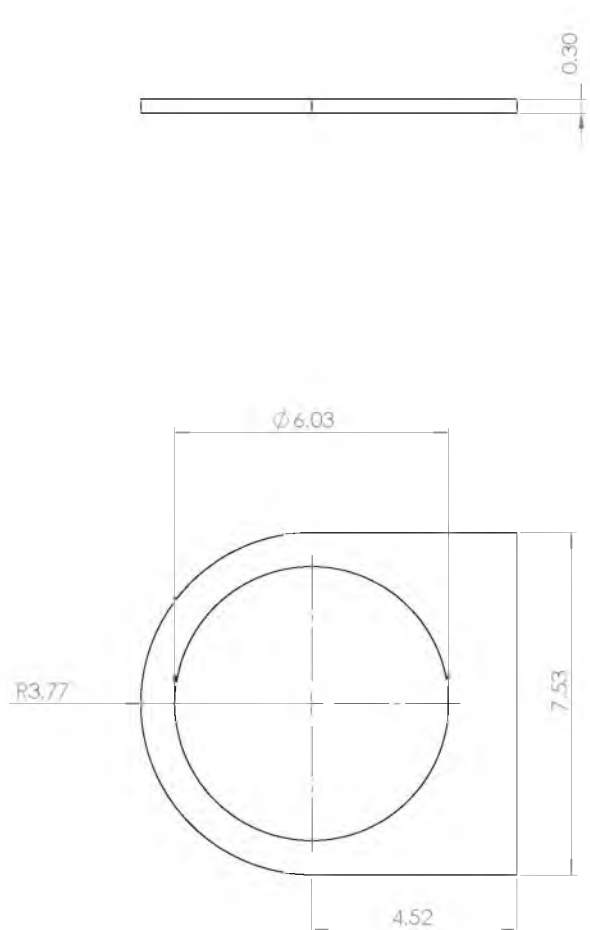


## Apéndice C

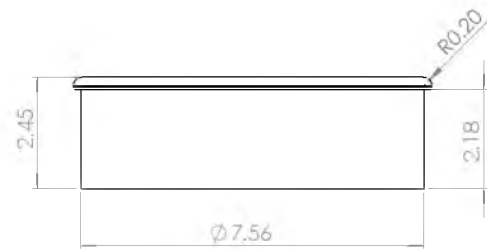
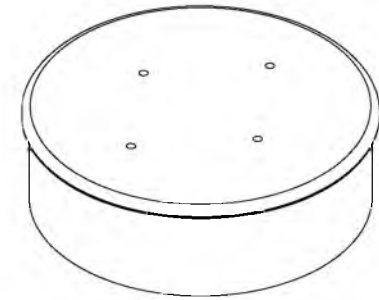
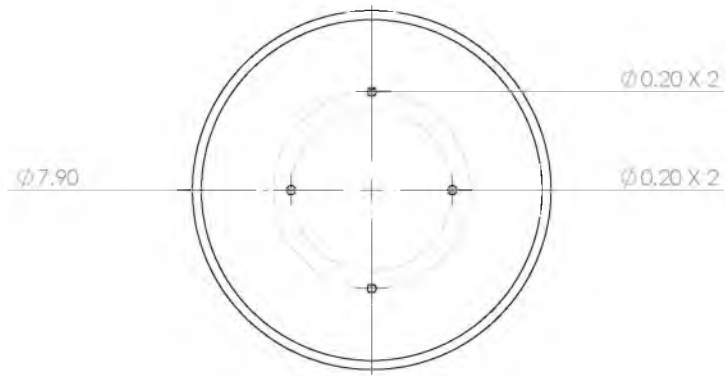
### Dibujos Técnicos



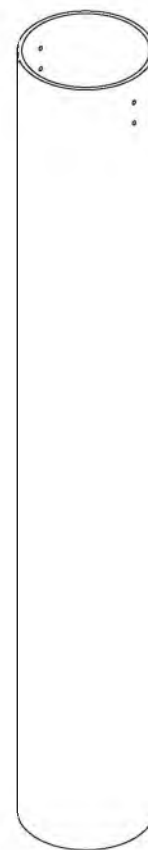
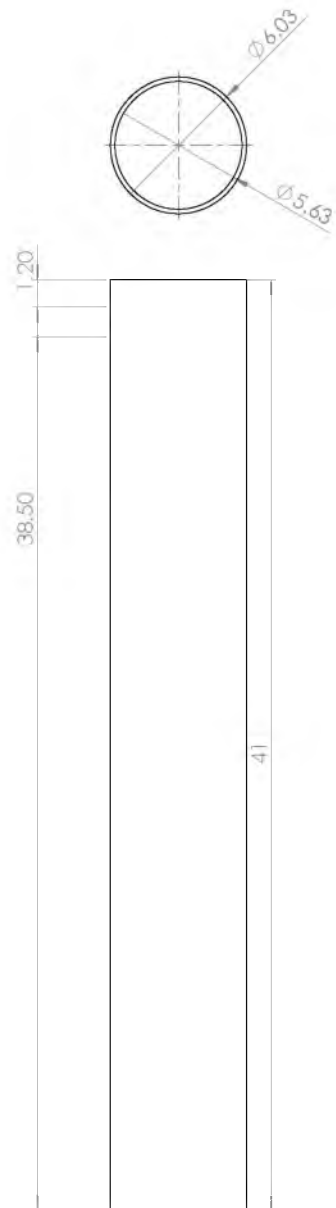
|                      |                                          |                |                 |
|----------------------|------------------------------------------|----------------|-----------------|
| ELEMENTOS DE DIBUJO: | <b>Bases Sensor</b>                      |                |                 |
| TIPO DE DIBUJO:      | <b>Técnico</b>                           | ESCALA:<br>2:1 | UNIDADES:<br>cm |
| MATERIAL:            | Angulo de Aluminio de 1/2" x 1/2" x 1/4" |                |                 |
| AUTOR:               | BELEM SERNA CAMACHO                      | FECHA:         | 20/01/2019      |
|                      | <b>SISTEMA DE TANQUES</b>                | <b>Vo.Bo.</b>  |                 |
|                      | <b>INGENIERIA EN MECATRÓNICA</b>         |                |                 |
|                      | <b>UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN</b>        |                |                 |



|                      |                                   |                |                 |
|----------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|
| ELEMENTOS DE DIBUJO: | <b>Anclas</b>                     |                |                 |
| TIPO DE DIBUJO:      | <b>Técnico</b>                    | ESCALA:<br>1:1 | UNIDADES:<br>cm |
| MATERIAL:            | Acrílico Transparente             |                |                 |
| AUTOR:               | BELEM SERNA CAMACHO               | FECHA:         | 20/01/2019      |
|                      | <b>SISTEMA DE TANQUES</b>         | <b>Vo.Bo.</b>  |                 |
|                      | <b>INGENIERIA EN MECATRONICA</b>  |                |                 |
|                      | <b>UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN</b> |                |                 |



|                            |                    |                |                 |
|----------------------------|--------------------|----------------|-----------------|
| ELEMENTOS DE DIBUJO:       | <b>Tapa Sensor</b> |                |                 |
| TIPO DE DIBUJO:            | <b>Técnico</b>     | ESCALA:<br>1:1 | UNIDADES:<br>cm |
| PVC                        |                    |                |                 |
| AUTOR: BELEM SERNA CAMACHO | FECHA: 20/01/2019  |                |                 |
| SISTEMA DE TANQUES         | Vo.Bo.             |                |                 |
| INGENIERIA EN MECATRONICA  |                    |                |                 |
| UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN |                    |                |                 |



|                            |  |             |                 |
|----------------------------|--|-------------|-----------------|
| ELEMENTOS DE DIBUJO:       |  | Tubo Sensor |                 |
| TIPO DE DIBUJO:            |  | Técnico     | ESCALA:<br>1:2  |
|                            |  |             | UNIDADES:<br>cm |
| PVC                        |  |             |                 |
| AUTOR: BELEM SERNA CAMACHO |  | FECHA:      | 20/01/2019      |
| SISTEMA DE TANQUES         |  | Vo.Bo.      |                 |
| INGENIERIA EN MECATRÓNICA  |  |             |                 |
| UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN |  |             |                 |