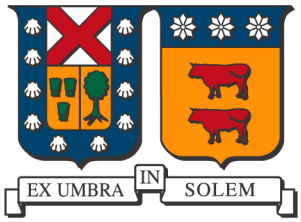
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

"DISEÑO DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA SU USO EN DOCENCIA"

JUAN SEBASTIÁN BUSTAMANTE MUÑOZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO

PROFESOR GUÍA:	FRANCISCO VARGAS
PROFESOR CORREFERENTE:	DANIEL ERRAZ
PROFESOR CORREFERENTE:	JUAN YUZ

OCTUBRE - 2021

Agradecimientos

Por medio de estas líneas, expreso mi sincero agradecimiento a quienes han colaborado con este proyecto y mis estudios.

Quisiera agradecer a mi profesor guía Dr. Francisco Vargas, quien siempre me ha mostrado su apoyo, ha tenido disponibilidad para aclarar dudas en cada una de las etapas de este trabajo y realizar recomendaciones para mejorar. Además, formó parte importante en mi carrera universitaria con sus aportes profesionales que lo caracterizan.

También quisiera agradecer a mis profesores correferentes Msc. Daniel Erraz y Dr. Juan Yuz, quienes se han preocupado e interesado en el proyecto aportando con mejoras para ayudar y facilitar mi trabajo.

A mis amigos y compañeros de carrera, los cuales siempre estuvieron dándome apoyo, orientación y motivación en todos estos años de universidad. Gracias por hacer mi etapa en la universidad tan amena y estar siempre allí.

Un particular reconocimiento a ANID, a través del Proyecto Basal FB0008, Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica AC3E de la Universidad Técnica Federico Santa María, por facilitar herramientas para lograr realizar el proyecto.

Finalmente, quiero agradecer profundamente a mi familia, amigos y Constanza, quienes a lo largo de mi etapa universitaria siempre estuvieron presentes en aquellos momentos en que más los necesité y me dieron ánimo para continuar. Gracias por todos los consejos, amor y palabras de aliento.

Muchas gracias a todos.

Resumen

El presente proyecto de título es sobre el diseño, implementación y control de un sistema de estanques acoplados, el cual presenta características innovadoras con respecto a plantas similares, en especial, el sistema de estanques acoplados para uso pedagógico del Laboratorio Laplace utilizado en la asignatura "Laboratorio de Control Automático" (ELO-271), impartida por el Departamento de Electrónica. Las innovaciones de este proyecto van dirigidas a la digitalización del sistema, posibilidad de variar la dinámica de los estanques, un diseño físicamente más compacto, fácil de interactuar y replicar. De esta forma, este sistema modernizado puede reemplazar la planta que ya se tiene en el laboratorio y conseguir una experiencia pedagógica mejorada.

Cabe destacar la modularidad del sistema, pues se tiene la opción de reemplazar los estanques e igualmente funcionar con el sistema electrónico diseñado, o también cambiar las bombas de agua y/o sensores, mientras trabajen con las características eléctricas correspondientes. Estas variaciones pueden tener distintos propósitos, como por ejemplo, el estudio de nuevas estrategias de medición, nuevas dinámicas en una planta de estanques, o en el caso de las bombas, simplemente optar por unas menos ruidosas y hacer un ambiente más ameno en las experiencias de laboratorio.

El proyecto tiene como objetivo principal diseñar y construir un prototipo funcional, conformado por una "caja de comando" que posee el controlador local, interfaz y actuadores de bombas manejados por un microcontrolador; y también por una plataforma en la que se encuentren los dos estanques acoplados y un reservorio de agua. El control debe ser capaz de operar en ciertos modos de operación: manual, remoto e interno; los cuales se detallarán en los siguientes capítulos.

Es en el modo de operación interno donde está la principal innovación del nuevo sistema de estanques acoplados, además del diseño físico más compacto. En éste, el usuario es capaz de configurar los parámetros de un controlador PID programado en el micro-

controlador a través de una interfaz compuesta por una pantalla y un teclado, con la posibilidad de elegir el nivel de agua (referencias) de cada estanque. Este programa explota los módulos que posee el microcontrolador para realizar un control de lazo cerrado, utilizando conversores análogos digitales, temporizadores y producción de señales PWM.

Este trabajo pretende ser una herramienta valiosa para los estudiantes de Ingeniería Civil Electrónica y que participan del Laboratorio de Control Automático. Es de esperar que a través de esta plataforma experimental, los alumnos adquieran los conceptos básicos de control de una forma agradable.

Glosario

- Sistema SISO: Sistemas (también llamados plantas) de una única entrada y una única salida, *Single Input*, *Single Output*. Son el tipo de plantas más básico.
- Sistema MIMO: Sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas, *Multiple* Inputs, *Multiple Outputs*.
- Ecuación diferencial: es un modelo dinámico en tiempo continuo que describe una relación fundamental sobre ciertas combinaciones de la entrada, salida, y algunas derivadas de ambas señales.
- Ecuación recursiva: es un modelo dinámico en tiempo discreto que describe una restricción fundamental sobre ciertas combinaciones de la entrada, salida, y algunas versiones retrasadas de ambas señales.
- Función de transferencia: corresponde a la transformada de Laplace o Zeta de la respuesta a impulso (o Kronecker) con condiciones iniciales cero de un sistema en tiempo continuo o discreto respectivamente.
- Control descentralizado: se refiere a la aplicación de controladores de la forma $C(s) = diag\{C_1(s), C_2(s), ..., C_n(s)\}$ (o $C(z)$) sobre una planta MIMO.
- Estado estacionario: es aquel estado de un proceso o de un sistema en estudio en donde los parámetros a estudiar no varían a través del tiempo, es decir, no presentan cambios a medida que pasa el tiempo.
- Error cuadrático medio: es el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la cantidad de error al cuadrado que hay entre dos conjuntos de datos. Se define como:

$$E = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}(y_{exacto} - y_{observado})^2 \tag{1}$$

- Balance de masa: principio básico de la física que se desprende de la ley de conservación de la materia cuya clásica máxima "la materia no se crea ni se destruye" es

validada. Así, el caudal (ya sea másico o volumétrico) que entra a un sistema menos el caudal que entra es la razón de cambio del contenido del sistema

$$\frac{dm(t)}{dt} = q_{in}(t) - q_{out} \tag{2}$$

- Ley de Torriceli: es la aplicación del principio de Bernoulli que propone un acercamiento matemático a la velocidad, v, que posee un líquido al salir por un orificio de algún recipiente dado,

$$v = \sqrt{2g\left(h + \frac{v_0^2}{2g}\right)} \tag{3}$$

Donde g es la aceleración de gravedad, v_0 una velocidad inicial del líquido (para esta aplicación es nula) y h la altura de la columna de líquido. Esta ecuación propone también una expresión para el caudal que sale por el orificio entre dos estanques acoplados:

$$Q = \kappa\sqrt{h_1 - h_2} \tag{4}$$

Con κ una constante de proporcionalidad que resume varios efectos a tener en cuenta, como dimensión del orificio y roce de las paredes de éste; h_1 y h_2 alturas de la columna de líquido de cada estanque.

- Notación:
  - Derivada de primer orden: $\dot{f}(x) = \frac{df(x)}{dx}$
  - Función en tiempo discreto: $f[k]$
  - Transformada de Laplace: $\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s)$, donde por supuesto:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt \tag{5}$$

  - Transformada Zeta: $\mathcal{Z}\{f[k]\} = F(z)$, donde por supuesto:

$$\mathcal{Z}\{f[k]\} = \sum_{k=0}^{\infty} f[k] z^{-k} \tag{6}$$

Índice

1. Capítulo 1: Introducción **14**

1.1. Motivación 14

1.2. Estado del arte 14

1.3. Alcance del proyecto 16

1.3.1. Objetivos 17

1.4. Estructura del documento 17

2. Capítulo 2: Antecedentes generales **18**

2.1. Microcontroladores 18

2.2. Entorno de programación 19

2.2.1. MPLAB X IDE 19

2.2.2. MPLAB X IPE 20

2.3. Programa de diseño EAGLE 21

2.4. Algoritmo de mínimos cuadrados 22

2.5. Control PID 23

2.6. Circuitos acondicionadores 25

2.6.1. Divisor de tensión con amplificador operacional 25

2.6.2. Filtro RC pasa bajo 26

2.7. Sistema de estanques actual 27

3. Capítulo 3: Diseño físico del sistema **30**

3.1. Descripción de la planta de estanques acoplados 30

3.1.1. Estanques y reservorio 31

3.1.2. Bombas de agua 32

3.1.3. Sensores de nivel 33

3.1.4. Planta estanques acoplados 34

3.2. Descripción del controlador local 36

3.2.1. Microcontrolador 36

3.2.2. Interfaz y conmutador 37

3.2.3. Actuadores 38
3.2.4. Fuente de poder 39
3.2.5. Caja de comando 40
3.3. Características eléctricas 42

4. Capítulo 4: Diseño e implementación del sistema 43
4.1. Modos de operación 43
4.1.1. Modo manual 43
4.1.2. Modo remoto 45
4.1.3. Modo interno PID 48
4.2. Implementación del circuito 57
4.2.1. Alimentación 57
4.2.2. Microcontrolador 58
4.2.3. Interfaz y conmutador 59
4.2.4. Sensores 61
4.2.5. Actuadores de bombas 62
4.3. Esquemático EAGLE 63

5. Capítulo 5: Resultados experimentales 66
5.1. Caracterizaciones 66
5.1.1. Sensores de nivel 66
5.1.2. Bombas de agua 68
5.2. Experimento igualación de nivel 69
5.3. Controlador PID interno 73
5.3.1. Experimento cambio de referencia 76
5.3.2. Experimento respuesta a perturbación 80
5.4. Pruebas de estrés 81
5.4.1. Funcionamiento por largos períodos de tiempo 81
5.4.2. Cambios entre modos de operación 82

6. Capítulo 6: Conclusiones 83

6.1. Comparación de sistemas 84
6.2. Trabajo futuro 85

Índice de figuras

1. MPLAB X IDE. 20
2. MPLAB X IPE. 21
3. PICkit 3 conectado. 21
4. Lazo de control de un grado de libertad. 24
5. Divisor de tensión. 25
6. Filtro RC. 26
7. Planta estanques acoplados actual. 27
8. Planta estanques acoplados actual al reverso. 27
9. Acoplamiento de los estanques. 27
10. Esquema de la planta actual. 27
11. Bombas de agua planta actual. 28
12. Sensores de nivel planta actual. 28
13. Caja de comando sistema actual. 29
14. Caja de comando sistema actual al reverso. 29
15. Esquema del sistema completo actual. 29
16. Esquema del sistema completo. 30
17. Válvulas. 31
18. Conector de manguera para estanques. 31
19. Reservorio de agua. 32
20. Estanques acoplados. 32
21. Bomba de agua. 32
22. Sensor de presión. 33
23. Planta estanques acoplados. 34
24. Planta estanques al reverso. 34
25. Esquema de la planta de estanques y sus variables. 35
26. Microcontrolador PIC16F877A. 37
27. Pantalla LCD 20x4. 38
28. Teclado matricial 4x4. 38

29. Módulo relés de 6 canales. 38
30. Potenciómetros utilizados. 38
31. Actuador PWM de bombas. 39
32. Fuente de poder. 40
33. Caja de comando. 41
34. Alimentación y conexión remota. 41
35. Interruptor encendido y conector planta. 41
36. Menú de inicio. 43
37. Conexión de las perillas. 44
38. Menú modo manual. 44
39. Diagrama de flujo modo manual. 45
40. Tarjeta PCI- 6221. 46
41. Caja con bornes. 46
42. Terminales puerto de red. 46
43. Menú modo remoto. 47
44. Diagrama de flujo modo remoto. 47
45. Divisor de tensión. 48
46. Filtro RC. 49
47. Voltaje de salida filtro RC. 49
48. Señal de error en el tiempo. 50
49. Algoritmo de control PID. 53
50. Configuración valor K_P. 55
51. Configuración valor K_I. 55
52. Configuración valor K_D. 55
53. Configuración de referencias. 55
54. Menú de control. 56
55. Error referencia 2 mayor a referencia 1. 56
56. Error límite referencia. 56
57. Diagrama de conexiones de la fuente de poder. 57
58. Diagrama de conexiones del microcontrolador. 58

59. Diagrama de terminales PIC16F877A. 59
60. Diagrama de conexiones de la pantalla LCD 20x4. 59
61. Diagrama de conexiones del teclado matricial 4x4. 60
62. Diagrama de conexiones del módulo relé de 6 canales. 61
63. Diagrama de conexiones de los sensores de nivel. 61
64. Diagrama de conexiones de los divisores de tensión. 62
65. Diagrama de conexiones de los actuadores. 62
66. Diagrama de conexiones de los filtros RC. 63
67. Diagrama de conexiones de los potenciómetros. 63
68. Esquemático del circuito en EAGLE. 64
69. Esquemático del circuito listo para manufactura. 64
70. Placa del circuito. 65
71. Componentes del controlador local. 65
72. Caracterización sensor de presión 1. 67
73. Caracterización sensor de presión 2. 67
74. Caracterización bomba de agua 1. 68
75. Caracterización bomba de agua 2. 69
76. Experimento igualación de nivel. 70
77. Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas. 71
78. Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas. 72
79. Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas. 73
80. Controlador PI: cambio de referencia en volts. 76
81. Controlador PID: cambio de referencia en volts. 77
82. Controlador PI: cambio de referencia en milímetros. 77
83. Controlador PID: cambio de referencia en milímetros. 78
84. Controlador PI: respuesta a perturbación de ambos estanques. 80
85. Controlador PID: respuesta a perturbación de ambos estanques. 81

Índice de cuadros

1. Características eléctricas de los componentes. 42
2. Controlador PI: error cuadrático medio. 79
3. Controlador PID: error cuadrático medio. 79
4. Prueba de funcionamiento continuo por largos períodos. 82
5. Prueba de cambios entre modos de operación. 82
6. Comparación de sistemas. 84

1. Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se introduce la motivación y el contexto del proyecto, presentando el estado de arte y también el alcance que se pretende junto con los objetivos.

1.1. Motivación

Los sistemas de estanques acoplados tienen la gran característica de ser plantas muy didácticas, en el contexto de automatización y control. Mucho de lo aprendido en las asignaturas de control básico puede ser ilustrado en el comportamiento de estanques, como por ejemplo: análisis de sistemas o la evolución de diferentes controladores, mostrando a alumnos el control ON-OFF, pasando a P, luego a PI y finalmente PID, a medida que se repasa como cada uno presenta una mejora sobre el anterior, e incluso desventajas; donde se puede observar el efecto del fenómeno de enrollamiento; conceptos básicos como la misma concepción de entradas y salidas del sistema, etc. Esto sirve de motivación para desarrollar un proyecto de título con la proyección de que a futuro, con más memoristas, se reemplace la planta de estanques acoplados del laboratorio Laplace, por un sistema que posea aún más propiedades pedagógicas de las que ya tiene, sea más compacto, fácil de interactuar, con posibilidad de variar la dinámica y moderno (digital). Adicionalmente, existe la facultad de aplicar otros conocimientos de control y llevarlos al dominio operacional de un controlador discreto, a través de la programación de un microcontrolador; lo que se lleva a cabo en el presente proyecto.

1.2. Estado del arte

El desarrollo de la docencia ha ido evolucionando día a día de manera activa, demandando diversas metodologías y herramientas de enseñanza que cubran los desafíos principales de la educación en ingeniería, sobre todo en compatibilizar la teoría con la práctica. Este proceso se logra a través del aprendizaje clásico en el aula y experiencias en sistemas reales de laboratorio, permitiendo abordar distintas materias dándole un enfoque más práctico y con ello, la formación de profesionales con mayores competencias en el área.

Una de las áreas de la ingeniería electrónica es el control automático, donde un sistema de enseñanza didáctico es fundamental a la hora de impartir los conceptos, debido a que una enseñanza clásica no es suficiente para entender o aterrizar todos los conocimientos y aplicaciones. Las herramientas didácticas permiten a los estudiantes complementar la teoría de control con mucha eficacia; tan así que muchas casas de estudios han optado por implementar laboratorios con plantas a escala para aplicar la materia.

Actualmente, con los avances tecnológicos presentes y la mejora continua de la industrialización, el aumento de los desafíos para los estudiantes de control es mayor, es por ello, que deben poseer las herramientas necesarias para enfrentarlos. Bajo esta circunstancia el uso de nuevas tecnologías y laboratorios con plataformas modernas ayudan al estudiante desarrollar nuevas competencias para su futuro profesional [1].

El Laboratorio de Control Automático, cumple el rol fundamental en la enseñanza del estudiante de la escuela de Ingeniería Electrónica de la USM, el cual permite poner en práctica los conocimientos teóricos importantes adquiridos en el aula, como por ejemplo, el control PID. Este entendimiento es posible por medio de diversos equipos, entre ellos, la planta de estanques acoplados en el que se pueden desarrollar actividades que permiten a los estudiantes identificar, analizar y diseñar sistemas de control.

Este laboratorio posee un conjunto de plantas didácticas enfocados en el aprendizaje de conceptos de control, donde los alumnos por medio de prácticas experimentales complementan los aprendizajes obtenidos en el aula. Una de esas plantas es el sistema de estanques acoplados que está compuesta por dos estanques de acrílico de base cuadrada que comparten una pared en común. Existen orificios en la parte inferior de la pared común que permiten el flujo de agua entre los estanques. A un estanque se le suministra agua por su parte superior a través de una bomba conectada a un reservorio en el fondo. Al otro estanque se le extrae agua por la parte inferior por medio de una segunda bomba, también conectada al reservorio. El objetivo es controlar el nivel de agua en cada estanque, lo que se logra implementando y diseñando un controlador en el programa Simulink

de Matlab. Este sistema ha funcionado por bastantes años, es robusta y no requiere mucha mantención. Sin embargo, esta planta está desactualizada en la parte electrónica y presenta complicaciones físicas de interacción y diseño, como la manera de vaciar/llenar el reservorio de agua (muy pesado e incómodo), lo poco manipulable en el traspaso de agua entre estanques y el gran tamaño de las bombas. También cabe destacar lo pesado y grande que es el sistema eléctrico de control, el cual fue diseñado y armado hace ya mucho tiempo; presentando incomodidad y bombas muy estruendosas.

1.3. Alcance del proyecto

Como contribución se pretende diseñar y construir una nueva plataforma experimental para su uso en docencia, es decir, una planta de estanques acoplados y una caja de comando que posea un controlador local, con el fin de realizar una experiencia mejorada. Uno de los objetivos es modificar la estructura física de este a uno más compacto y moderno, con mayor facilidad de variar la dinámica y mejorar el contacto con la fuente de agua o reservorio. También actualizar la parte electrónica, instalando un microcontrolador que dirija los modos de operación, referencias, parámetros y las actuaciones sobre la planta a través de una interfaz de usuario. Finalmente, se desea que esta plataforma experimental sea fácil de replicar, para que así cada grupo en la experiencia pueda trabajar con una propia.

Los modos de operación en que el controlador local debe operar son los siguientes:

- Manual: se opera el caudal de las bombas directamente con perillas.
- Remoto: se opera la planta con señales y controladores desde un computador con Simulink.
- Interno (PID): se opera la planta con un controlador PID configurable. Este se realiza a través del mismo microcontrolador que dirige la interfaz.

1.3.1. Objetivos

- Diseñar la estructura física de la planta, incluyendo estanques, fuente de agua, válvulas, bombas, sensores mangueras y/o tubos. También el controlador local.
- Diseñar la interfaz para manejar los distintos modos de operación de la plataforma. Un modo manual para configurar el caudal de las bombas directamente, un modo interno automático para configurar los parámetros de un controlador PID (referencias también) y un modo remoto para controlar la planta desde un computador con Simulink.
- Diseñar el sistema completo con el fin que sea lo suficientemente compacto, estable al contacto y que no presente filtraciones ni complicaciones al vaciar/llenar el reservorio.
- Validar el diseño propuesto al hacer funcionar correctamente todos los modos y que efectivamente sea fácil de replicar.

1.4. Estructura del documento

En el segundo capítulo se encuentran los antecedentes generales, dándose a conocer ciertos temas preliminares, como algunas funcionalidades de ciertos circuitos dentro del sistema, entornos de programación y teoría de control. El tercer capítulo describe la mayoría de los componentes físicos del sistema, tanto de la planta de estanques como de los dispositivos electrónicos utilizados en el controlador local. Para cada uno de ellos se tiene una imagen real, para que el lector esté más familiarizado con cada elemento de la plataforma. Ya en el cuarto capítulo se detalla el diseño e implementación del controlador local, explicando el planteamiento de cada modo de operación y el funcionamiento. También se muestran los menús disponibles en la interfaz y todas las conexiones de los dispositivos, a modo de manual para el usuario. En el quinto capítulo se realizan pruebas de estrés, como también de los controladores implementados, con tal de obtener gráficos y datos que comprueben el correcto desempeño de estos. Además, se realiza un experimento de igualación de nivel para la obtención de un parámetro que forma parte de la dinámica de la planta. Las conclusiones, posibles mejoras y discusiones se plantean en el capítulo seis.

2. Capítulo 2: Antecedentes generales

El presente capítulo habla acerca de ciertos temas preliminares, que si bien no son el tema principal, ayudan a la comprensión del diseño y trabajo realizado, como los microcontroladores, el entorno de programación que se utiliza en el proyecto, algoritmo de mínimos cuadrados para estimación de parámetros, teoría de control PID, circuitos eléctricos acondicionadores de señales y el sistema de estanques actual que se tiene en el Laboratorio de Control Automático.

2.1. Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados digitales que pueden ser usados para diversos propósitos, ya que son programables. Están compuestos por una unidad central de procesamiento (CPU), memorias (ROM y RAM) y puertos de entrada y salida (periféricos).

Las aplicaciones de los microcontroladores son vastas, ya que pueden usarse para manejo de sensores, controladores, juegos, calculadoras, agendas, avisos lumínicos, secuenciador de luces, cerrojos electrónicos, control de motores, relojes, alarmas, robots, entre otros diseño de circuitos electrónicos. Siendo el límite la creatividad del programador.

Como el hardware ya viene integrado en un solo chip, para usar un microcontrolador se debe especificar su funcionamiento por software a través de programas que indiquen las instrucciones que el microcontrolador debe realizar. En una memoria se guardan los programas y la CPU se encarga de procesar paso por paso las instrucciones del programa. Los lenguajes de programación típicos que se usan para este fin son ensamblador y C, pero antes de grabar un programa al microcontrolador hay que compilarlo a hexadecimal que es el formato con el que funciona.

Los elementos básicos de un microcontrolador y sus respectivas funciones son:

- CPU: es la unidad central de proceso, encargada de ejecutar programas.

- Memoria ROM: memoria donde se almacena el programa implementado.
- Memoria RAM: memoria para las variables y datos del programa.
- Periféricos: permiten la interacción con dispositivos exteriores. Su función es habilitar o deshabilitar las salidas digitales, leer sensores analógicos, comunicación con terminales digitales, etc.

En este proyecto se elige trabajar con un microcontrolador PIC16F877A de la marca Microchip, debido a su alta disponibilidad en el mercado y al bajo costo, además de la extensa información relativa a estos microcontroladores por parte del fabricante y usuarios, facilitando la programación del dispositivo.

2.2. Entorno de programación

Existen aplicaciones que proporcionan una interfaz para programadores de microcontroladores, que permiten programar, cargar, compilar, depurar y verificar códigos fácilmente, evitando complejidades. Para los microcontroladores de la marca Microchip se tiene un entorno de programación gratis y destinado exclusivamente para estos, llamado MPLAB.

2.2.1. MPLAB X IDE

MPLAB X Integrated Development Environment (IDE) es un programa ampliable y altamente configurable que incorpora herramientas poderosas para ayudar a descubrir, configurar, desarrollar, depurar y calificar diseños integrados para la mayoría de microcontroladores Microchip y controladores de señales digitales. MPLAB X IDE funciona en sintonía con el ecosistema de desarrollo de software y herramientas MPLAB.

A través de este software es posible programar en lenguaje C el microcontrolador que se utiliza en este proyecto, dando facilidades para compilar códigos, visualizar errores, capacidad de memoria y configurar los registros.

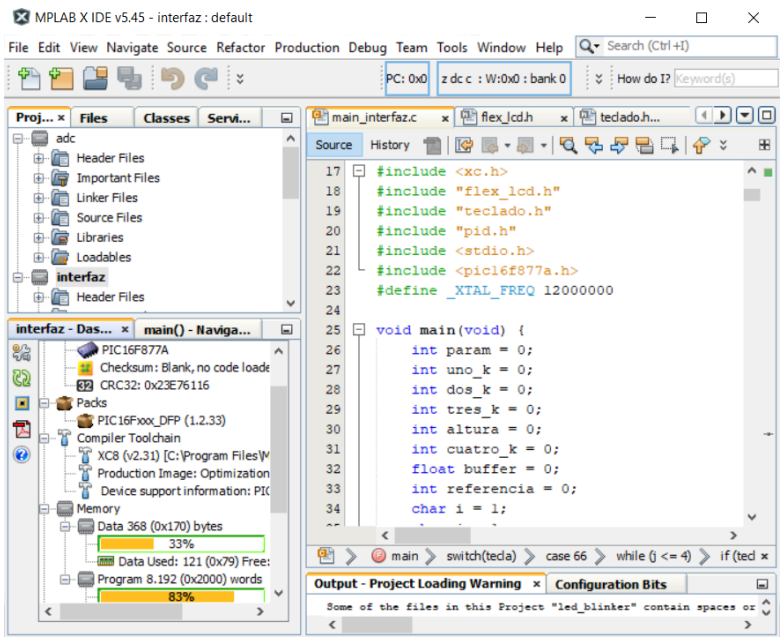


Figura 1: MPLAB X IDE.

2.2.2. MPLAB X IPE

MPLAB X Integrated Programming Environment (IPE) es una interfaz simple que proporciona acceso rápido a funciones clave de programación de microcontroladores. Posee capacidades de carga de programas para todos los microcontroladores y productos de Microchip compatibles con MPLAB X Integrated Development Environment (IDE).

Para cargar un programa en el microcontrolador, también se necesita de una herramienta que permita la depuración y programación de estos. Una herramienta muy sencilla, de menor coste y más utilizada para esta marca de microcontroladores es el PICkit 3 (figura 3), el cual está totalmente soportado por MPLAB X IDE, y tiene una sencilla conexión USB de gran velocidad con el computador.

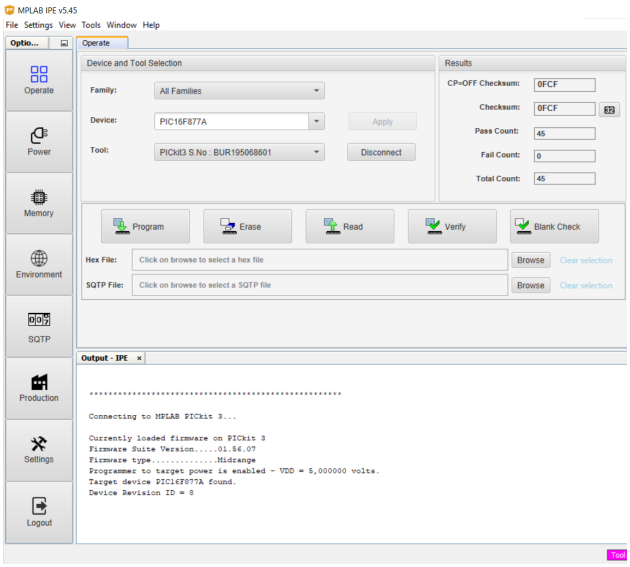


Figura 2: MPLAB X IPE.

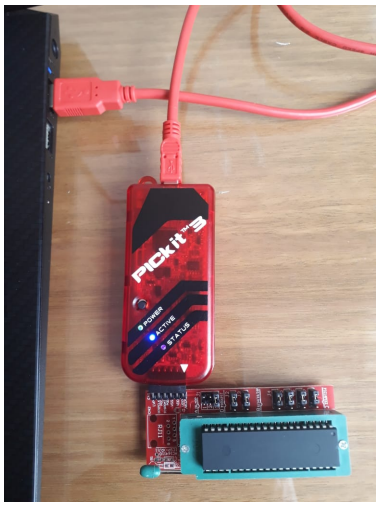


Figura 3: PICkit 3 conectado.

2.3. Programa de diseño EAGLE

EAGLE es un software de automatización de diseño electrónico que permite a los diseñadores de placas de circuito impreso (PCB) conectar sin problemas diagramas esquemáticos, ubicación de componentes, encaminamiento de PCB y contenido exhaustivo del catálogo de componentes.

En este programa es posible realizar el diseño de una placa para el circuito encargado del control local en la planta de estanques acoplados. Esto sirve para su construcción física, pues se pretende armar una caja que lo contenga, como también la fuente de poder y todos los periféricos que se necesitan para cada modo de operación.

Es importante mencionar y dejar constancia del uso de este software para este proyecto, ya que en el capítulo posterior de diseño se muestra la placa de circuito impreso montada en EAGLE.

2.4. Algoritmo de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados es un procedimiento de análisis numérico en la que, dados un conjunto de datos (pares ordenados), se intenta determinar la función continua que mejor se aproxima a los datos, proporcionando una demostración visual de la relación entre los puntos de los mismos. En su forma más simple, busca minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas entre los puntos generados por la función y los correspondientes datos.

Este método se utiliza comúnmente para analizar una serie de datos que se obtengan de algún estudio o experimento, con el fin de expresar su comportamiento de manera lineal y así minimizar los errores de la data tomada. Sin embargo, este método también puede estimar curvas de orden superior en caso de que una función lineal no sea la más acorde.

En el presente proyecto se deben realizar ciertas pruebas para caracterizar el comportamiento de las bombas de agua y sensores; tomando datos de voltaje y nivel de agua en el caso de los sensores, y datos de caudal y voltaje aplicado en las bombas. Debido a esto, es importante obtener alguna función que relacione estos pares ordenados para la comunicación con el microcontrolador, siendo el algoritmo de mínimos cuadrados un método muy útil para conseguirla.

Para describir el método de forma simple, se considera un problema donde una función lineal de la forma $y(x) = ax + b$ se adecúa mejor a los datos experimentales. Por lo tanto, se desea estimar los parámetros "a" y "b" de la recta.

Entonces, se define el conjunto de datos como las matrices:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \quad \hat{\theta} = \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \tag{7}$$

Si los datos experimentales describieran una recta exacta, existiría un vector $\hat{\theta}$ tal que $Y = \Phi\hat{\theta}$, pero esto no sucede en general pues existe una diferencia entre los datos reales y la recta propuesta.

Finalmente, el algoritmo de mínimos cuadrados dice que los parámetros pueden ser aproximados como:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T Y \tag{8}$$

Si se desease estimar parámetros de una función de orden superior, como por ejemplo, una de orden 2 tal que $y(x) = ax^2 + bx + c$, la matriz Φ y $\hat{\theta}$ serían de la forma:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 \end{bmatrix}, \quad \hat{\theta} = \begin{bmatrix} c \\ b \\ a \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.5. Control PID

El controlador PID es una de las herramientas más importantes y utilizadas en las arquitecturas basadas en controladores programables, ya que permite llevar a cabo el control de procesos o plantas, programando y configurando una serie de variables que permitirán la estabilidad continua del mismo. Debido a sus características, puede ser implementado de forma análoga (algún circuito con función de transferencia igual a la estructura) o digital, siendo esta última la más utilizada. En la actualidad es bastante usado y es capaz de establecer un lazo cerrado para la mayoría de las plantas industriales, es por esto que para este proyecto se desea realizar uno y es un tema relevante. De esta forma, los alumnos del laboratorio tendrán contacto directo con este tipo de controlador y podrán ver sus efectos en el sistema de estanques acoplados a diseñar.

Este tipo de controlador presenta importante características, tales como seguimiento perfecto para referencias constantes y además es capaz de "anticipar" el futuro usando una

acción derivativa. El control PID continuo es tal que la señal de control tiene la forma:

$$u(t) = Pe(t) + I \int_0^t e(\tau)d\tau + D\frac{de(t)}{dt} \tag{10}$$

Siendo $u(t)$ la actuación, $e(t)$ el error, P constante proporcional, I constante integral y D constante derivativa.

Aplicando la Transformada de Laplace, se tiene que La función de transferencia del controlador es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = C(s) = P + \frac{I}{s} + sD \tag{11}$$

Cabe notar que en general C(s) es una función impropia, y por lo tanto no puede implementarse físicamente. Para lidiar con dicho problema, se suele agregar un polo rápido (de dinámica despreciable debido a su rápida convergencia) de tal forma que el término derivativo sea una función propia. Así, la componente derivativa toma la forma $sD \to D\frac{s}{\tau s + 1}$, donde τ es un valor muy pequeño para que no afecte en la dinámica.

En la figura 4 se muestra un control de lazo cerrado de un grado de libertad donde $G_0(s)$ es la planta, un diagrama bastante típico y que se utiliza en el diseño de este proyecto.

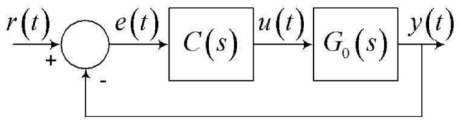


Figura 4: Lazo de control de un grado de libertad.

Otra mención importante es el enrollamiento, ya que en la práctica los actuadores están sujetos a restricciones. Una vez que la salida del controlador alcanza el límite permisible por los actuadores, un control como el PID descrito en la sección anterior no tiene la capacidad de entender que la actuación no está alcanzando el nivel deseado, ya que el actuador está saturado. De esta forma, la salida del controlador puede llegar a ser muy

alta con respecto al valor de la actuación real en la planta. Esto significa que el desempeño del controlador no es lo esperado y muchas veces es no aceptable. La forma de eliminarlo es usando un mecanismo de anti-enrollamiento que básicamente es una forma de informar al controlador que la actuación está por o ha alcanzado el nivel de saturación. Existen diferentes maneras de implementar esquemas de anti-enrollamiento, en este proyecto se da interés especial en el método realizado en código, pues sirve para el modo de operación interno en el que el microcontrolador calcula la actuación hacia las bombas de agua.

2.6. Circuitos acondicionadores

Es muy usual que las características eléctricas entre dispositivos no coincidan, como por ejemplo, entre un sensor de cualquier tipo que entregue hasta 12 [V] y el procesador al que se le entrega la información que sólo trabaja en rangos de 0 a 5 [V]. Debido a esto, es común utilizar circuitos análogos para acondicionar las señales y en este proyecto no es la excepción.

2.6.1. Divisor de tensión con amplificador operacional

Un divisor de tensión es un circuito que permite dividir el voltaje de entrada entre dos resistencias conectadas en serie. Mediante este circuito es posible bajar el voltaje de señales que pueden dañar el microcontrolador, sin perder la información entregada. También es muy conveniente agregar un seguidor de tensión, que corresponde a un amplificador operacional realimentado, para así evitar sobre corrientes en el chip. En la figura 5 se observa el diagrama eléctrico.

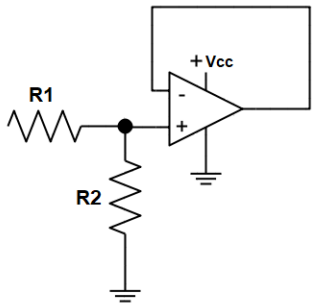


Figura 5: Divisor de tensión.

La ecuación que define el voltaje de salida del circuito es el siguiente:

$$V_{out} = V_{in}\frac{R2}{R1 + R2} \tag{12}$$

2.6.2. Filtro RC pasa bajo

Un filtro RC pasa bajo permita solamente el paso de frecuencias por debajo de una frecuencia en particular, llamada frecuencia de corte, y elimina las frecuencias por encima de esta. Es decir, atenúa la amplitud de las armónicas por encima de la frecuencia de corte, siendo una herramienta ideal para transmitir voltajes continuos desde un microcontrolador que no posea un convertidor digital a análogo, a través de señales PWM.

Se sabe que el valor promedio de una señal PWM depende directamente de su ciclo de trabajo, y que además es posible crearla digitalmente con módulos que poseen los microcontroladores. De esta forma, esta señal seguida de un filtro RC pasa bajo, se convierte en un voltaje continuo entre 0 y Vcc [V] (voltaje de alimentación del microcontrolador) igual al valor promedio de la PWM. En la figura 6 se muestra su diagrama.

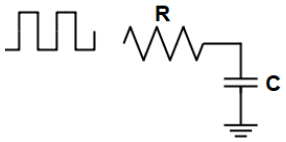


Figura 6: Filtro RC.

La frecuencia de corte de este circuito corresponde a $\frac{1}{RC}$ y su función de transferencia es:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \tag{13}$$

2.7. Sistema de estanques actual

El Laboratorio de Control Automático, posee actualmente un sistema de estanques acoplados, compuesta por dos estanques de acrílico de base cuadrada que comparten una pared en común, la cual posee orificios que permiten el flujo de agua entre ellos. A un estanque, se le suministra agua por su parte superior a través de una bomba conectada a un reservorio en el fondo. Al otro estanque, se le extrae agua por la parte inferior por medio de una segunda bomba, que esta conectada al reservorio en la base. En las figuras 7 y 8 se muestran imágenes de la plataforma. También se exponen los orificios que acoplan los estanques (figura 9) y un esquema donde se presentan las variables de interés en la figura 10, asociadas a los niveles de estanque y caudales involucrados.

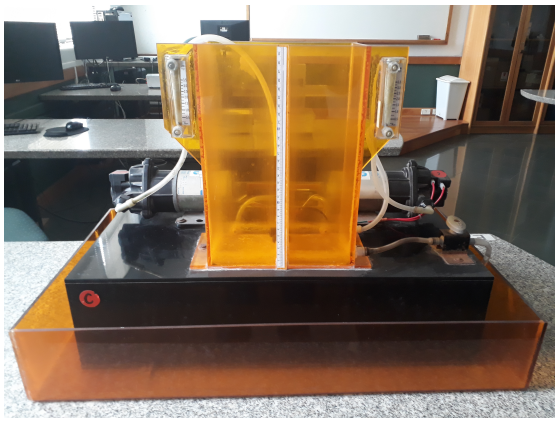


Figura 7: Planta estanques acoplados actual.



Figura 8: Planta estanques acoplados actual al reverso.



Figura 9: Acoplamiento de los estanques.

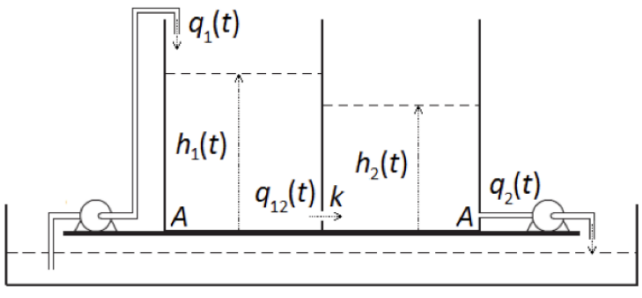


Figura 10: Esquema de la planta actual.

Las bombas de agua utilizadas en esta planta son las de la figura 11, las cuales son bombas de diafragma de la marca Shurflo. Éstas obedecen a un voltaje continuo de hasta 12 [V] y consumen una corriente eléctrica de hasta 3 [A] y, por lo tanto, una potencia de 36 [W].

Los sensores de nivel que se ocupan son bastante similares a los de este proyecto, diferenciándose solamente en el modelo. Estos sensores trabajan midiendo la presión estática de una columna de agua, suministrándose de 12 [V] continuos. En la figura 12 se muestra una fotografía.



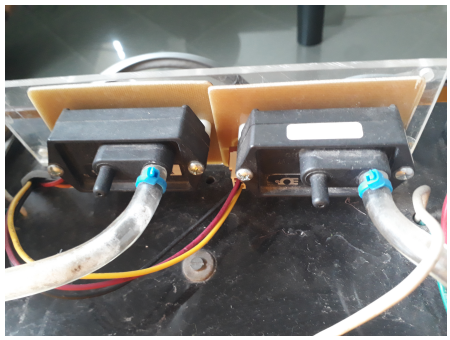


Figura 11: Bombas de agua planta actual. Figura 12: Sensores de nivel planta actual.

La planta de estanques acoplados se conecta directamente a una caja de comando, que es simplemente un circuito análogo; ésta tiene interruptores en cada bomba para intercambiar entre modos de operación, en específico, un modo en el que se accionan las bombas a través de perillas y otro en el que se controlan las bombas mediante un computador con Simulink, este último se debe conectar a una caja de bornes mediante un cable ethernet. En las figuras 13 y 14 se exhibe la caja de comando mencionada.





Figura 13: Caja de comando sistema actual. Figura 14: Caja de comando sistema actual al reverso.

Para evidenciar el funcionamiento de este sistema, en la figura 15 se observa un esquema de las interacciones y componentes que posee.

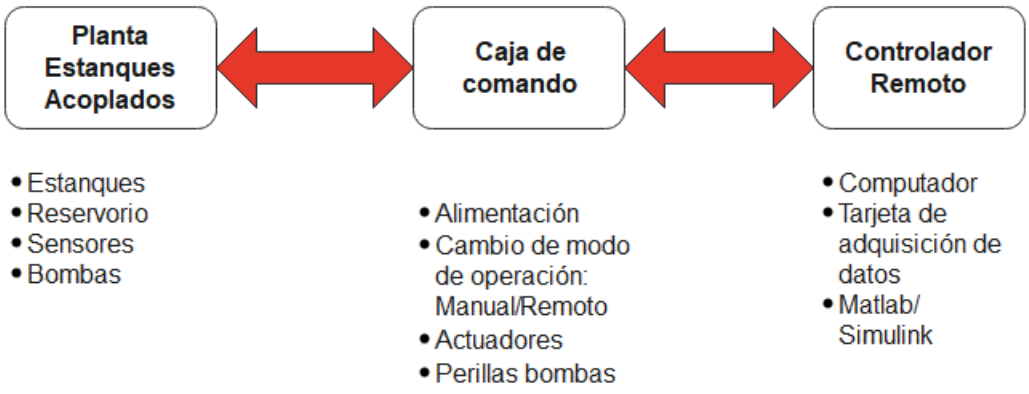


Figura 15: Esquema del sistema completo actual.

Cabe destacar que el tamaño y peso del sistema (tanto la planta de estanques como la caja de comando) es bastante significativo, por lo que es bastante común que se presente incomodidad al manipularlo. Esto se debe en parte a las bombas y al reservorio que se tiene en la base. Además, por la gran dimensión del reservorio, es muy difícil vaciar y, no menos importante, reutilizar el agua una vez terminada la experiencia de laboratorio.

3. Capítulo 3: Diseño físico del sistema

En este capítulo se detallan los diferentes elementos que componen el controlador local asociado a los estanques acoplados nuevos (que se proponen en este trabajo), como también las características de la nueva planta, dispositivos y los materiales utilizados.

En la figura 16 se muestra el esquema del sistema completo que se desea diseñar para la plataforma experimental, detallando componentes y funciones.

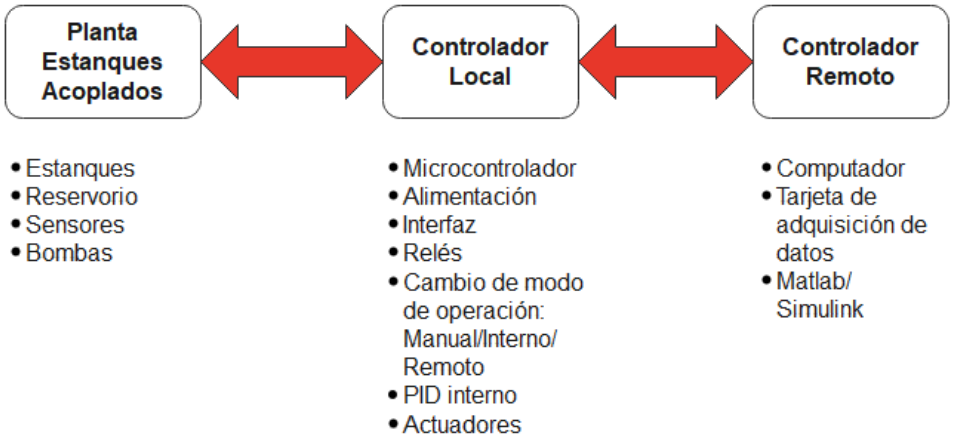


Figura 16: Esquema del sistema completo.

3.1. Descripción de la planta de estanques acoplados

Se realiza una descripción de cada elemento que compone la planta de estanques acoplados, en el contexto de almacenamiento, flujo y medición de nivel de agua. En primera instancia se presentan los estanques y el reservorio, haciendo hincapié en las características física, material y como se hizo la conexión con las mangueras que propician el flujo de agua. Luego, se exponen las bombas de agua a utilizar, explicando las características eléctricas de esta. Finalmente, se exponen los sensores que tienen el trabajo de medir el nivel de agua en cada estanque, viendo sus características eléctricas y el mecanismo que poseen para realizar estas medidas.

3.1.1. Estanques y reservorio

El sistema diseñado para este proyecto consiste en dos estanques de plástico conectados entre sí, este acoplamiento se realiza a través de dos válvulas: una tipo llave, bastante fácil de manipular y otra de tipo empuje; tal como se aprecian en la figura 17. Los estanques poseen orificios, que gracias a los conectores que se observan en la figura 18, es posible unir las mangueras hacia las bombas de agua; igualmente con el reservorio, que se muestra en la figura 19. Cada estanque tiene un área basal de aproximadamente 81 $[cm^2]$ y una altura de 27 [cm], pudiendo contener 2.2 litros de agua.

Los conectores utilizados son de la marca Barrow y son de la dimensión G 1/4", permitiendo mangueras con un diámetro interior de 9.5 [mm]. Cabe destacar que se opta por mangueras, ya que son más maleables y menos propensas a desconectarse, que por ejemplo, tubos rígidos.



Figura 17: Válvulas.



Figura 18: Conector de manguera para estanques.



Figura 19: Reservorio de agua.



Figura 20: Estanques acoplados.

3.1.2. Bombas de agua

Las bombas de agua que se utilizan en el sistema de estanques acoplados son el modelo 0142YA-12-60 de la marca Propumps (figura 21); éstas son bombas de diafragma, siendo muy versátiles porque pueden funcionar bien, incluso cuando están bombeando contra mucha presión, y además evitan que el líquido fluya hacia atrás en la bomba. Obedecen a una excitación eléctrica continua de 0 a 12 [V] regulables, consumiendo una corriente de máximo 5 [A] y por tanto, una potencia de 60 [W]. Se tienen dos de estas bombas funcionando de manera correcta; una para suministrar agua y otra para extraer.



Figura 21: Bomba de agua.

En la práctica, las bombas comienzan a funcionar a partir de aproximadamente un poco más de 1 [V] hasta 11 [V], donde su comportamiento caudal vs. voltaje de entrada se modela como cuadrático y es de la forma $y = ax^2 + bx + c$.

Debe aclararse que el comportamiento flujo vs. voltaje de las bombas de agua depende, en manera importante, de la disposición de las mangueras que guían el flujo entre bombas y estanques. Debido a esto, puede que se vean cambios en el caudal si se varía la posición del reservorio.

3.1.3. Sensores de nivel

Para medir altura en los estanques se utilizan los sensores de presión marca Omega, modelo PX-164, el que se muestra en la figura 22. Este sensor trabaja de forma diferencial y mide con una precisión del 1 % la presión estática de una columna de agua, alimentándose de 12 [V] continuos. El rango de operación de los PX-164 mide una presión que va desde 0 a 10 pulgadas de columna de agua.

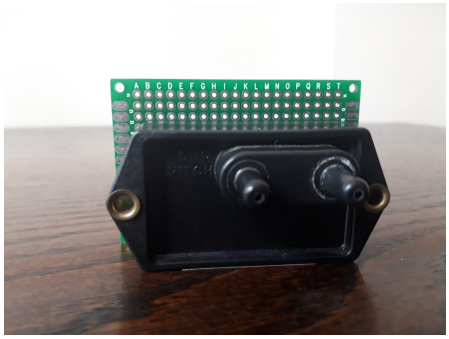


Figura 22: Sensor de presión.

La lectura de este dispositivo se conecta al microcontrolador para el modo PID interno, en los pines correspondientes al módulo del convertidor análogo digital. De esta forma, es posible procesar los datos de medición de cada sensor y realizar un control de lazo cerrado, teniendo sumo cuidado con no sobrepasar las características eléctricas del PIC.

Según el fabricante, su comportamiento altura vs. voltaje se modela como una función lineal, de la forma $y = ax + b$.

3.1.4. Planta estanques acoplados

La planta completa se muestra en la figura 23 y 24, donde se observa un cable de 10 conductores con un conector de aviación GX16 de 10 pines que une de forma sencilla la caja de comando con la planta, pudiendo recibir y entregar las señales eléctricas para el control de nivel que se implemente.

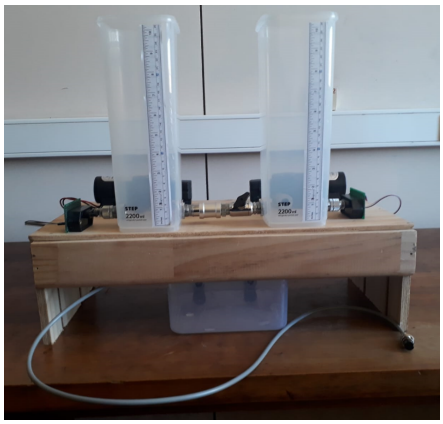


Figura 23: Planta estanques acoplados.



Figura 24: Planta estanques al reverso.

Este nuevo diseño es mucho más compacto y liviano que el anterior, permitiendo además una mejor interacción con el reservorio de agua. Para vaciar o llenar éste, simplemente se cierran las válvulas, se desconectan las mangueras de las bombas y es posible separar el reservorio del resto de la planta. También cabe notar la variabilidad dinámica mejorada y de fácil manipulación, al poseer dos válvulas en el acoplamiento de ambos estanques.

Es importante tener en cuenta el modelo matemático de la planta de estanques acoplados, pues sirve para tener consideraciones al momento del diseño del controlador local. Dicho esto, se repasa el modelo matemático de ésta tomando un enfoque físico y relacionando variables de interés, como la tasa de cambio de volumen, caudales y alturas.

La ecuación que expresa la tasa de cambio del volumen de agua en cada estanque es igual a la velocidad con que ingresa volumen de agua al estanque o caudal de entrada, menos la velocidad con que sale volumen de agua al estanque o caudal de salida. Como el

área de los dos estanques es constante, el volumen está dado por $A \cdot h(t)$ (área multiplicado por la altura).

En la figura 25 se muestran las variables correspondientes al modelo hidráulico de los estanques, el cual se basa en la planta que se diseña en este proyecto. Las variables $q(t)$ representan el caudal (con dirección de acuerdo al dibujo), $h(t)$ el nivel de agua en cada estanque, A el área basal de cada estanque (81 $[cm^2]$) y κ el coeficiente de traspaso entre estanques.

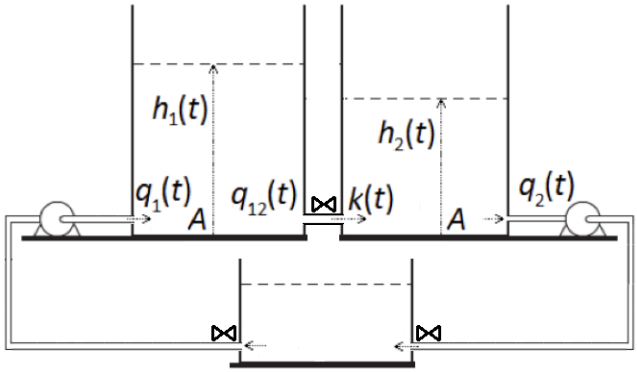


Figura 25: Esquema de la planta de estanques y sus variables.

El sistema de ecuaciones que representa el sistema proviene del balance de masa de agua en los estanques y relaciona las variables de interés presentes en el esquema de la figura 25, sin embargo, falta considerar el caudal de traspaso entre el estanque 1 y el estanque 2, que se representa como $q_{12}(t)$. Esta última variable se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli para una línea de flujo, quedando el modelo final representado en el sistema de ecuaciones 14.

$$\begin{aligned} A\frac{dh_1(t)}{dt} &= q_1(t) - q_{12}(t) \\ A\frac{dh_2(t)}{dt} &= q_{12}(t) - q_2(t) \\ q_{12}(t) &= \kappa\sqrt{h_1(t) - h_2(t)}\ ,\ h_1(t) \geq h_2(t) \end{aligned} \tag{14}$$

El modelo lineal es el mismo que se utiliza en la guía del Laboratorio de Control Automático [2], el cual tiene la forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta H_1(s) \\ \Delta H_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{2As(s\tau_p + 1)} \begin{bmatrix} \tau s + 1 & -1 \\ 1 & -(\tau s + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1(s) \\ \Delta Q_2(s) \end{bmatrix} \tag{15}$$

Donde $\gamma = \frac{\kappa}{2\sqrt{h_{1,Q} - h_{2,Q}}}$, $\tau_p = \frac{A}{2\gamma}$ y $\tau = \frac{A}{\gamma}$. Cabe señalar que $h_{1,Q}$ y $h_{2,Q}$ corresponden al punto de equilibrio de los niveles de agua.

3.2. Descripción del controlador local

En esta sección se presenta cada dispositivo de interés del controlador local (caja de comando) de la planta de estanques acoplados. Este sistema se encarga de procesar las señales de medición y de enviar señales eléctricas apropiadas a las bombas de agua, que vendrían siendo las entradas de la planta; estas acciones se realizan de distinta forma dependiendo del modo en que se trabaje, los cuales son tres: modo manual, remoto e interno. Estos modos se describen detalladamente en otro capítulo, como también la conexión entre elementos y diseño de una placa de circuito impreso.

La idea es instalar todos estos dispositivos dentro de una carcasa (caja de comando), la cual posea los terminales y cables adecuados para la conexión con la planta de estanques y en el caso del modo de operación remoto, con un computador. Además, la disposición para que la interacción con la interfaz sea sencilla.

3.2.1. Microcontrolador

El cerebro y centro del controlador local es el microcontrolador PIC16F877A de Microchip (figura 26). Este es un dispositivo programable que se compone de una computadora digital, una unidad de memoria de datos, una unidad de memoria de programa y puertos de entrada/salida en un circuito integrado, funciona como un controlador de periféricos en un sistema mínimo y de bajo costo. El microcontrolador depende de una alimentación

de al menos 5 [V] y 0 [V] (tierra) en sus entradas de Vdd y Vss respectivamente para su operación; requiere de una señal de reloj que le indique la frecuencia de trabajo, la cual se introduce a través de un oscilador de cristal de cuarzo; y una alimentación al pin MCLR, que es un pin de reset que activa al microcontrolador. El funcionamiento está determinado por un programa almacenado en su memoria Flash ROM y puede programarse más de una vez para cambiar su estado y su comportamiento, lo que lo convierte en una pieza esencial en el rápido desarrollo para aplicaciones electrónicas de este tipo.

El PIC16F877A se encarga de la interfaz que posee el controlador local y de activar/desactivar ciertas conexiones, dependiendo del modo en que se esté trabajando. También, asume el trabajo completo del modo interno PID, es decir, de procesar las mediciones análogas de los sensores de nivel, de los parámetros del controlador y del cálculo de las actuaciones hacia las bombas de agua.



Figura 26: Microcontrolador PIC16F877A.

3.2.2. Interfaz y conmutador

Para seleccionar los distintos modos, configurar los parámetros y referencias del control PID interno, se tiene una interfaz compuesta por una pantalla alfanumérica 20x4 (figura 27), un teclado matricial 4x4 (figura 28) y potenciómetros para accionar las bombas en el modo manual (figura 30). Además de esto, se tiene un módulo de relés de 6 canales (figura 29) para la conmutación de conexiones en los distintos modos de operación.



Figura 27: Pantalla LCD 20x4.

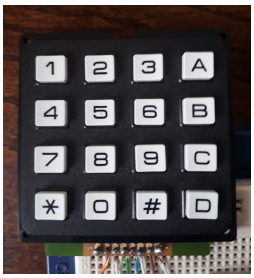


Figura 28: Teclado matricial 4x4.

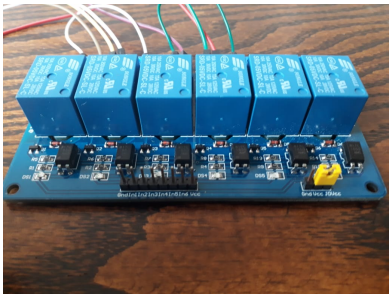


Figura 29: Módulo relés de 6 canales.

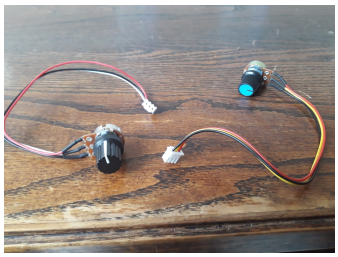


Figura 30: Potenciómetros utilizados.

A través del teclado es posible configurar los modos en que opera el sistema, los parámetros K_P, K_I y K_D del controlador interno, y las referencias de altura, tanto en milímetros como en milivoltios, sujetado a la preferencia del usuario. Estos cambios mencionados en el modo de operación, se hacen gracias al módulo de relés de 6 canales, los cuales intercambian las conexiones hacia los actuadores de las bombas y también de los sensores, dependiendo en cuál se esté trabajando. Todos los menús e indicaciones se presentan en la pantalla LCD, siendo muy útil para la interacción con el estudiante y dar facilidades en el uso de la plataforma. Tanto el módulo de relés y la pantalla LCD se alimentan de un voltaje de 5 [V].

3.2.3. Actuadores

El circuito de potencia que actúa sobre las bombas de agua y eleva la potencia de las señales de control para su correcto accionamiento, puede observarse en la figura 31. Se trata de un circuito regulador de velocidad de motores continuos, un circuito ampliamente comercializado en variadas especificaciones. La señal eléctrica de entrada al circuito, es

una señal continua que habita en el intervalo [0,5] [V] y permite regular la velocidad de giro utilizando modulación de ancho de pulso, es decir, su salida es una señal PWM que varía su ciclo de trabajo dependiendo del valor del voltaje de entrada.

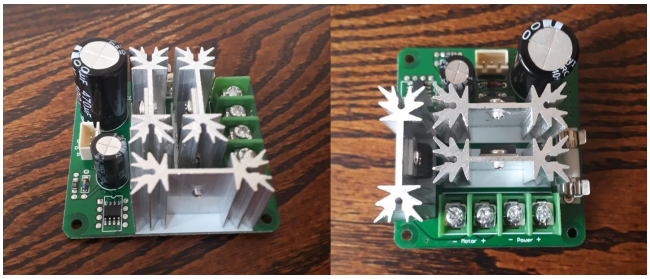


Figura 31: Actuador PWM de bombas.

Este dispositivo posee 7 terminales:

1. Power+: alimentación positiva del circuito de potencia, debe ser de 12 [V].
2. Power-: alimentación negativa del circuito de potencia, debe ir a tierra (0 [V]).
3. Motor+: alimentación positiva de la bomba de agua.
4. Motor-: alimentación positiva de la bomba de agua.
5. GND: tierra de la entrada del circuito (0 [V]).
6. 0-5V: señal entre 0 y 5 [V] que define el ciclo de trabajo de la salida.
7. 5V: terminal de 5 [V] que posee el circuito. Se puede utilizar cuando se regula la señal de entrada con un potenciómetro; ideal para el modo manual.

3.2.4. Fuente de poder

Para proveer de energía a toda la caja de comando, se utiliza una fuente de corriente continua de tipo switching como la que se muestra en la figura 32, que es capaz de suministrar 12 [V], y hasta 240 [W] de potencia. Esta cantidad es importante puesto que se tiene en cuenta cuanto consume cada componente del sistema, por ejemplo: cada bomba de agua (máximo 60 [W]), interfaz, microcontrolador, circuito acondicionador y en menor medida

los sensores. Esta fuente posee 3 salidas de 12 [V]; 2 de éstas alimentan los circuitos de potencia (actuadores) ya mencionados y la última suministra energía al resto del sistema: microcontrolador, interfaz, sensores, relés, etc. Cabe destacar que para proveer los 5 [V] que requieren ciertos dispositivos, se utiliza un regulador de voltaje L7805CV.



Figura 32: Fuente de poder.

La colocación de la fuente se realiza netamente con cables adicionales no incluidos en la compra de las mismas, alambre de cobre de 1.5 $[mm^2]$ de sección transversal están correctamente dimensionados a la potencia del sistema. La utilización de las 3 salidas continuas por separado es ideal para esta aplicación, ya que los actuadores PWM tienden a ocasionar mucho ruido eléctrico, pudiendo interferir de mala manera en las mediciones de los sensores.

3.2.5. Caja de comando

Todos los dispositivos descritos que componen el controlador local se instalan dentro una caja de comando, la cual facilita la conexión con la planta de estanques y con un computador para el modo de operación remoto. También se dispone de la interfaz del sistema (pantalla y teclado) junto con las perillas que accionan las bombas en el modo de operación manual.

Otra función de la caja de comando es poseer un controlador local portátil y compacto, pues es imprescindible para las experiencias de laboratorio o demostraciones en el aula.

Esta caja de comando está fabricada de material termoplástico libre de halógenos, a prueba de golpes y autoextinguible. Cuenta con un grado de protección IP56, siendo ideal para proyectos de electrónica, ya que evita la entrada de polvo y agua.

En las figuras 33, 34 y 35 se muestra la caja de comando armada. Presentando su cable de alimentación, cable de red para conexión remota, interruptor de encendido, conector GX16 para la conexión con la planta, pantalla, teclado y perillas.



Figura 33: Caja de comando.

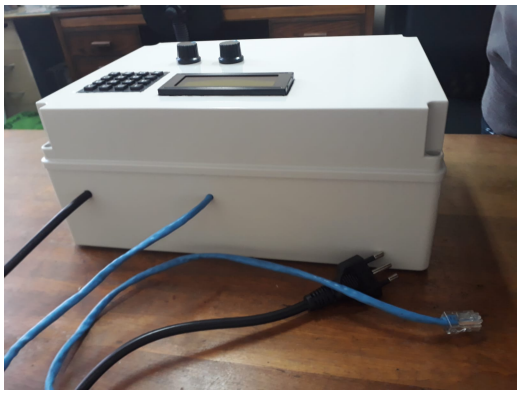


Figura 34: Alimentación y conexión remota.

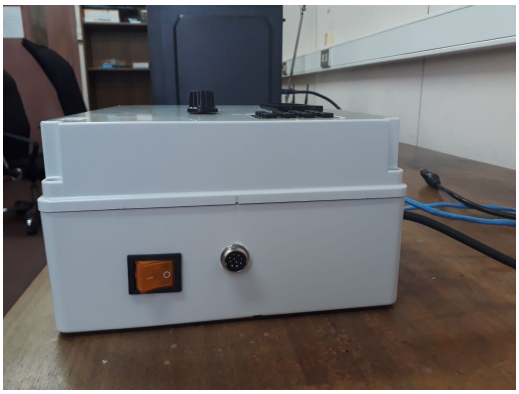


Figura 35: Interruptor encendido y conector planta.

3.3. Características eléctricas

Haciendo una síntesis de los componentes utilizados para el diseño de la plataforma experimental, se recopilan las principales características eléctricas de cada uno. En la tabla 1, se muestran los voltajes y corrientes tanto de alimentación y salida de los dispositivos electrónicos.

	Voltaje alimentación	Corriente máxima alimentación	Voltaje salida	Corriente máxima salida
Bombas	12 [V] DC.	5 [A] DC.	-	-
Sensores	12 [V] DC.	20 [mA] DC.	[0-12] [V] DC.	20 [mA] DC.
Regulador PWM	12 [V] DC.	10 [mA] DC.	12 [V] PWM.	15 [A] PWM.
Fuente de poder	220 [V] AC, 50 [Hz]	4.5 [A] AC.	12 [V] DC.	20 [A] DC.
Módulo relés	5 [V] DC.	20 [mA] DC.	-	-
Microcontrolador PIC16F877A	5 [V] DC.	250 [mA] DC.	5 [V] DC.	25 [mA] DC.
Pantalla LCD	5 [V] DC.	10 [mA] DC.	-	-

Cuadro 1: Características eléctricas de los componentes.

4. Capítulo 4: Diseño e implementación del sistema

En el presente capítulo, se explica de forma más detallada el diseño e implementación del controlador local de la plataforma experimental, dando a conocer el funcionamiento tanto de los modos de operación como la interfaz. También se observan todos los menús disponibles, se explica como configurar parámetros y el diagrama de conexiones del sistema entero junto con el esquema del circuito hecho en el software EAGLE.

4.1. Modos de operación

En esta sección se detalla el diseño y el funcionamiento de cada modo de operación, describiendo cada configuración y menús de la interfaz, explicando el correcto uso del controlador local. Al iniciar, el programa da la facultad de elegir entre los tres modos disponibles, tal como se muestra en la figura 36.



Figura 36: Menú de inicio.

4.1.1. Modo manual

Este modo de operación es el más simple, pues solamente consiste en un par de potenciómetros conectados a los actuadores. Los tres pines de cada potenciómetro se conectan de la forma que aparece en la figura 37; hacia tierra, 5 [V] proveniente del terminal del actuador y a un canal del relé. Cuando este modo es seleccionado a través de la interfaz, la señal de entrada de los actuadores se conectan al pin intermedio de cada potenciómetro (a través del relé), proporcionando entre 0 y 5 [V] dependiendo de la posición de la perilla. Es así como se regula el caudal de cada bomba de agua.

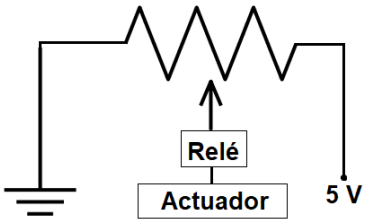


Figura 37: Conexión de las perillas.

Para seleccionar este modo se debe apretar la tecla A en el menú de inicio, a lo que aparece el menú principal del modo manual (figura 38), posibilitando el uso de las perillas. En lo que está activado el modo manual, el microcontrolador se encuentra en modo suspensión (sleep), pues es importante trabajar el bajo consumo del PIC. Apretando cualquier tecla se vuelve al inicio, despertando al microcontrolador por interrupción externa.



Figura 38: Menú modo manual.

Para un mejor entendimiento del algoritmo en este modo de operación, se muestra un diagrama de flujo en la figura 39, donde quedan claros los procesos y salidas del microcontrolador.

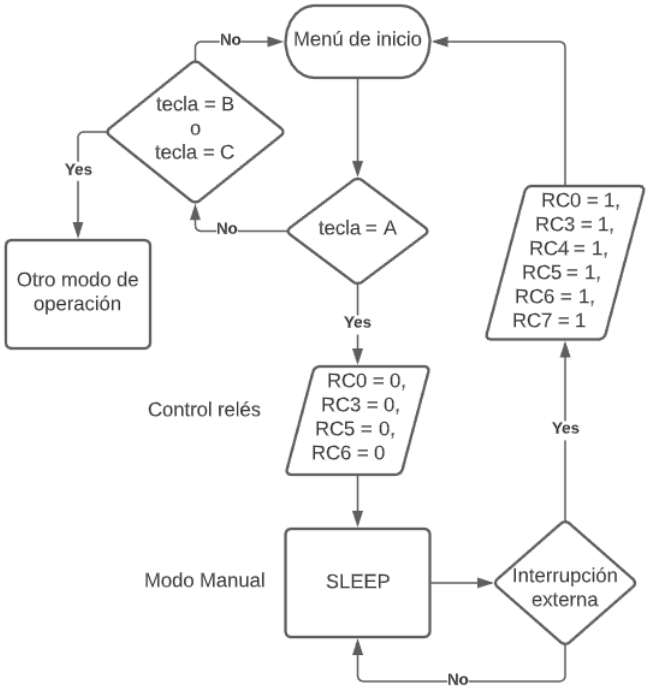


Figura 39: Diagrama de flujo modo manual.

4.1.2. Modo remoto

Este modo de operación es muy importante, pues coincide con lo que se desarrolla actualmente en la experiencia de la asignatura Laboratorio de Control Automático. Esta experiencia consiste en diseñar un controlador de nivel de agua para la planta de estanques acoplados, implementándolo en tiempo real con Simulink, del software Matlab.

Para realizar una conexión entre el computador y el sistema, se requiere de una tarjeta adquisidora de datos, dispositivo encargado de la conversión análogo digital y viceversa. En el laboratorio se cuenta con la tarjeta National Instrument PCI-6221 (figura 40) que se encuentra inserta dentro del computador y se comunica al exterior a través de un puerto paralelo. También se necesita un equipo que facilite la conexión entre el sistema real y el puerto paralelo de la tarjeta, por ello se tiene una caja que posee bornes para las señales análogas que se desean enviar al computador, y también para las señales análogas provenientes del computador (son señales análogas luego del proceso de conversión D/A).

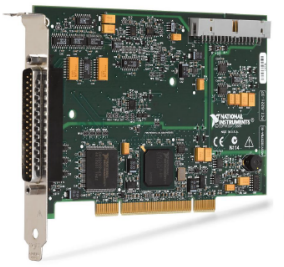


Figura 40: Tarjeta PCI- 6221.



Figura 41: Caja con bornes.

Cabe destacar que en la caja de bornes existe un puerto de red para el envío y recepción de dichas señales, haciendo mucho más simple y ordenada la conexión. Este puerto posee 8 pines, los cuales están conectados a las tierras de las entradas, tierras de salidas, entrada 0, entrada 1, entrada 2, entrada 3, salida 0 y salida 1 de la caja de bornes; en el orden numérico respectivo que se muestra en la figura 42. De esta forma, con un cable ethernet, se conecta la tierra del controlador local hacia las tierras de entrada y salida, la señal de salida 0 y 1, y la señal de entrada 0 y 1 a distintos canales del módulo de relés; ya que al activar el modo remoto, los relés conectan directamente estas últimas señales hacia los actuadores y sensores respectivamente.

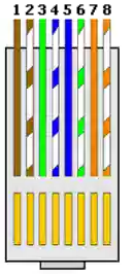


Figura 42: Terminales puerto de red.

Se selecciona este modo al apretar la tecla C en el menú de inicio, apareciendo el menú principal del modo remoto (figura 43). Es importante tener la conexión entre el sistema y

la caja de bornes antes de entrar a este modo, ya que es posible tener un pequeño voltaje en la entrada del actuador cuando este terminal está al "aire" (aislado). Al igual que en el modo manual, el microcontrolador entra en modo suspensión (sleep) para ahorrar energía, pues en este caso el computador es el que trabaja controlando la planta.



Figura 43: Menú modo remoto.

Para un mejor entendimiento del algoritmo en este modo de operación, al igual que en el modo manual, se muestra un diagrama de flujo en la figura 44, donde quedan claros los procesos y salidas del microcontrolador.

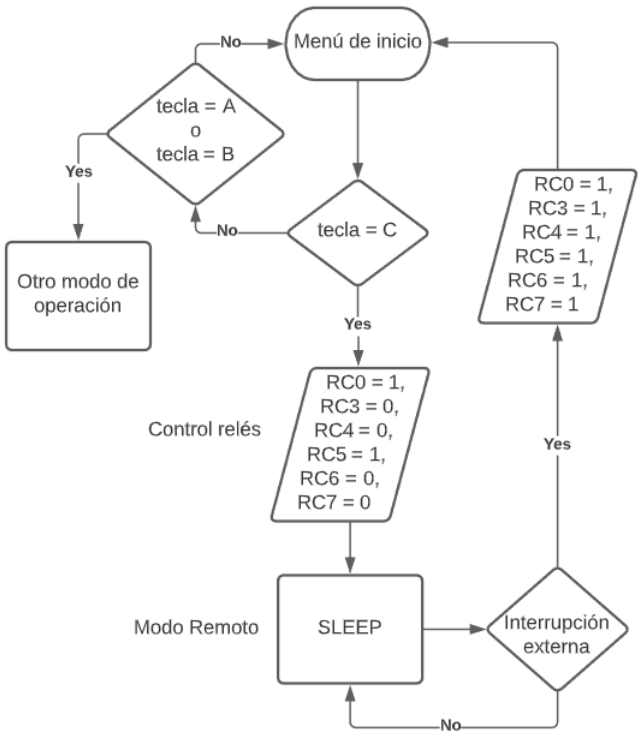


Figura 44: Diagrama de flujo modo remoto.

4.1.3. Modo interno PID

El modo interno utiliza el microcontrolador PIC para realizar un control PID en el nivel de agua de los estanques acoplados, con posibilidad de cambiar los parámetros del controlador y las referencias a través del teclado matricial y la pantalla LCD.

El proceso de medición se realiza a través del módulo ADC que contiene el microcontrolador, con este es capaz de convertir una señal análoga entre 0 y 5 [V] a una señal digital de 10 bits. Por ejemplo, la conversión de 5 [V] sería 1023, el máximo valor que se puede lograr con 10 bits; otro ejemplo es la conversión de 2.5 [V], la cual sería 512 aproximadamente (la mitad del máximo valor que se logra con 10 bits).

No obstante, los sensores de nivel pueden entregar hasta un poco menos de 12 [V], por lo que es necesario implementar un circuito acondicionador, que baje el voltaje y así no dañar el microcontrolador. Debido a esto, se utiliza un divisor de tensión seguido de un amplificador operacional, cuyo funcionamiento se explica en el capítulo 1. Su diseño es el que se muestra en la figura 45, con una resistencia de 21 [kΩ] y 15 [kΩ].

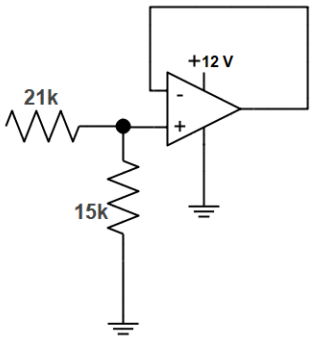


Figura 45: Divisor de tensión.

De esta forma, la ecuación 16 es el voltaje que en realidad entra al microcontrolador, siendo el máximo 5 [V], ya que el máximo de V_{in} es 12 [V].

$$V_{out} = V_{in}\frac{5}{12} \tag{16}$$

Para actuar sobre las bombas, el controlador de velocidad de motores requiere de un voltaje de entrada continuo entre 0 y 5 [V], lo que el microcontrolador PIC16F877A no es capaz de hacer. Sin embargo, éste posee un módulo PWM, el que a través de dos terminales del PIC puede entregar dos señales PWM (de 5 [V] de amplitud) distintas, pudiendo modificar el ciclo de trabajo en cualquier momento. Es así como estas señales seguidas por un filtro RC, el cual se explica en el capítulo 1, logran un voltaje continuo apto para los actuadores de cada bomba de agua.

La señal PWM programada posee una frecuencia de aproximadamente 11719 [Hz], el filtro tiene una resistencia de 330 [Ω] y un condensador de 10 [μF]. De este modo, la frecuencia de corte del filtro queda en 303 [rad/s] o 48 [Hz], suficientemente baja en comparación a la PWM. También cabe notar que la constante de tiempo de este filtro es de 3.3 [ms], parámetro muy importante cuando se explique el algoritmo de control PID.

Para comprobar el correcto funcionamiento, se simula el filtro RC (figura 46) en el software PLECS con las mismas características mencionadas, teniendo de entrada una señal PWM de 5 [V] de amplitud, 11719 [Hz] y 50 % de ciclo de trabajo. Luego, medio segundo después, se cambia el ciclo de trabajo a un 75 %. El voltaje de salida obtenido se muestra en la figura 47, el cual corresponde a lo esperado, ya que se tiene un 50 % y un 75 % de 5 [V] continuos, con un tiempo de respuesta de 16 [ms]. Cabe notar que el ripple es despreciable, siendo de aproximadamente 0.032 [V].

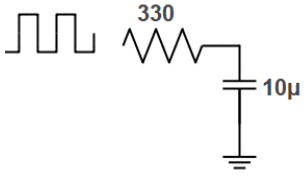


Figura 46: Filtro RC.

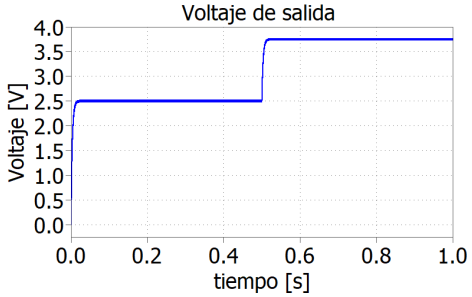


Figura 47: Voltaje de salida filtro RC.

Ya explicada la realimentación y la actuación del lazo de control, es necesario describir el algoritmo de control. Es importante reconocer que el microcontrolador no es capaz de realizar un control en tiempo continuo, ya que trabaja digitalmente y en intervalos de tiempo; es por esto que se requiere de una aproximación lo suficientemente buena y que se pueda implementar en código, especialmente para el término integral y derivativo, ya que poseen operaciones continuas.

Es por esto que se utiliza una aproximación rectangular del PID, la cual es muy sencilla y se basa en la transformación del controlador continuo a discreto mediante una aproximación de Euler. Para explicar de mejor manera esta aproximación, se ilustra en la figura 48 un error discreto que aumenta con un tiempo de muestreo T. A partir del dibujo se extrae que el área del gráfico es $T \sum_i e_i$ (sumatoria de todos los errores multiplicado por el tiempo de muestreo), siendo una operación simple de implementar en el programa para la parte integral del controlador.

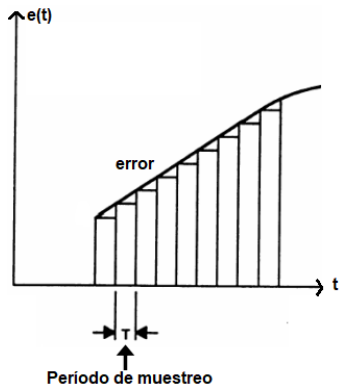


Figura 48: Señal de error en el tiempo.

Ahora, el término derivativo se obtiene de la aproximación de Euler, un método numérico que obtiene una solución aproximada de ecuaciones diferenciales.

Dada un señal $y(t)$, su derivada con respecto al tiempo se define:

$$\dot{y}(t) = \lim_{\Delta \to 0} \frac{y(t+\Delta) - y(t)}{\Delta} \tag{17}$$

Si se relaja el requerimiento $\Delta \to 0$, se obtiene una aproximación de $\dot{y}(t)$ para un tiempo determinado. Esta idea es explotada en la aproximación de Euler, que tiene la forma:

$$\dot{y}(t)|_{t=n\Delta} \approx \frac{y(n\Delta + \Delta) - y(n\Delta)}{\Delta} \tag{18}$$

Donde $n = 0, 1, 2, ...,$ y Δ es un intervalo de tiempo pequeño, como por ejemplo, un tiempo de muestreo T. Sin embargo, esta aproximación de la derivada resulta ser no causal, por lo que se utiliza una aproximación de Euler hacia atrás. Quedando la aproximación de la forma:

$$\dot{y}(t)|_{t=n\Delta} \approx \frac{y(n\Delta) - y(n\Delta - \Delta)}{\Delta} \tag{19}$$

De esta manera, considerando $\Delta = T$, una buena aproximación del término derivativo a implementar es la resta del error presente y del error previo, dividido por el tiempo de muestreo $\left(\frac{e[k] - e[k-1]}{T}\right)$.

En consecuencia, el controlador utilizado en el modo de operación interno PID corresponde a la aproximación de un controlador de tiempo continuo de la forma $C(s) = P + \frac{I}{s} + sD$. Esta aproximación es en tiempo discreto, y su ecuación recursiva se muestra a continuación, en la que $u[k]$ es la actuación y $e[k]$ el error.

$$\begin{aligned} u[k] &= P\ e[k] + I \cdot T \sum_{i=0}^{k} e[i] + D\left(\frac{e[k] - e[k-1]}{T}\right) \\ &= K_P\ e[k] + K_I \sum_{i=0}^{k} e[i] + K_D(e[k] - e[k-1]) \end{aligned} \tag{20}$$

Donde $K_P = P$, $K_I = I \cdot T$ y $K_D = \dfrac{D}{T}$. Aplicando la Transformada Zeta, se tiene la función de transferencia del controlador:

$$\begin{aligned} U(z) &= K_P\ E(z) + K_I \frac{1}{1 - z^{-1}} E(z) + K_D(1 - z^{-1})E(z) \\ \implies \frac{U(z)}{E(z)} &= C(z) = K_P + K_I \frac{1}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}) \end{aligned} \tag{21}$$

Nota: También es posible llegar a la función de transferencia del controlador reemplazando $s \to \dfrac{1 - z^{-1}}{T}$ [6].

De esta manera el término derivativo no requiere de un polo rápido como sucede con un controlador PID continuo, ya que la función de transferencia del controlador no es impropia debido a la aproximación de Euler hacia atrás, es decir, sin considerar valores futuros.

Entonces, resumiendo lo explicado anteriormente, la actuación se divide en la suma de tres variables tipo int (16 bits): proporcional, integral y derivativo; los cuales se calculan de la siguiente manera.

- Proporcional: se multiplica la constante K_P con el error presente.
- Integral: se multiplica la constante K_I con el error acumulado, es decir, con la suma de todos los errores pasados y el presente.
- Derivativo: se multiplica la constante K_D con la diferencia entre el error presente y el error previo.

Nota: Los parámetros del controlador PID interno que se configuran a través de la interfaz, son K_P, K_I y K_D, es decir, no son los mismos parámetros de un controlador PID en tiempo continuo (excepto K_P). Por lo tanto, el tiempo de muestreo es fijo y está incluido en estas dos últimas constantes; la principal razón de por qué el tiempo de muestreo

es fijo es por el tiempo de respuesta que poseen los circuitos RC, pues no hay que olvidar que en realidad lo que se controla es el ciclo de trabajo de las señales PWM. Además, cabe destacar que el programa solamente permite valores enteros y positivos para los parámetros del PID, ya que la actuación (ciclo de trabajo) es un registro de 10 bits.

En la figura 49 se muestra el código en C, el que posee como actuación la variable "ciclo", de la cual sólo se ocupan 10 bits, pues el registro que determina el ciclo de trabajo de la señal PWM posee esta dimensión. Entonces, el ciclo de trabajo es de un 100 % si la variable tiene un valor de 1023 y un 50 % si tiene un valor de 512, por dar algunos ejemplos.

```
int pid1(int medicion){
    int ciclo;
    int error;
    int proporcional;
    int integral;
    int derivativo;
    error = r1 - medicion;
    error1_acumulado = error1_acumulado + error;
    proporcional = kp*error;
    integral = ti*error1_acumulado;
    derivativo = td*(error - error1_previo);
    error1_previo = error;
    ciclo = proporcional + integral + derivativo;
    if (ciclo > 1023){ // anti wind-up
        ciclo = 1023;
        error1_acumulado = 0;
    }
    else if (ciclo < 0){
        ciclo = 0;
        error1_acumulado = 0;
    }
    return ciclo;
}
```

Figura 49: Algoritmo de control PID.

El sistema de estanques acoplados es un sistema MIMO 2x2, es decir, de dos entradas y dos salidas. Una de las principales dificultades asociada al control de este tipo de sistemas es que pueden existir interacciones entre todas las entradas y todas las salidas. Así, el control apropiado de una salida puede causar estragos en el control de otra salida. Afortunadamente, en el caso particular del sistema de estanques acoplados se puede adoptar una estrategia sencilla en la cual el diseño de control se reduce al diseño de dos sistemas SISO (de una entrada y una salida). Este método se conoce como control descentralizado,

el que se describe en el siguiente párrafo.

Al linealizar el modelo de la planta de estanques acoplados (ecuación 14) y aplicando la Transformada de Laplace, se obtiene una relación entre los niveles de agua $H(s)$ (salidas) y los caudales $Q(s)$ (entradas) ilustrado en la ecuación 22. Entonces, la estrategia de control se trata de considerar $G_{12}(s)Q_2(s)$ y $G_{22}(s)Q_2(s)$ como perturbaciones, utilizando a $Q_1(s)$ para controlar $H_1(s)$ y $Q_2(s)$ para controlar $H_2(s)$.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} H_1(s) \\ H_2(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \\ \implies H_1(s) &= G_{11}(s)Q_1(s) + G_{12}(s)Q_2(s) \\ \implies H_2(s) &= G_{12}(s)Q_1(s) + G_{22}(s)Q_2(s) \end{aligned} \tag{22}$$

En el programa implementado[7] existen dos controladores PID para controlar simultáneamente el nivel de agua de los estanques, utilizando una estrategia de control descentralizado. En resumen, cada bomba se encarga de actuar en sólo un estanque, considerando como perturbación los otros efectos.

Cabe destacar también el mecanismo de anti-enrollamiento usado, en el que si se detecta que la actuación está saturada, el término integral es reiniciado, y por ende, no considerado en la actuación presente. De esta forma se evita la sobrecarga de la acción integradora del controlador, si es que la hubiese.[8]

El control en lazo cerrado debe ser capaz de funcionar al mismo tiempo que la interfaz, ya que el microcontrolador debe verificar si se seleccionó alguna acción, como detener las bombas o cambios en las referencias. Para esto, se utiliza la interrupción por temporizador (Timer 0) que poseen la mayoría de los PIC. Entonces, cada cierto intervalo de tiempo ocurre una interrupción, en la que se comprueban las mediciones de los sensores de nivel, se calcula la actuación y finalmente se entrega la señal PWM con el ciclo de trabajo ade-

cuado; posibilitando que la interfaz siga funcionando. Este intervalo de tiempo resulta ser el tiempo de muestreo del controlador.

Es importante en el diseño que estas interrupciones no afecten la señal de actuación. Debido a esto, se configuran para que ocurran cada aproximadamente 21.7 [ms], tiempo suficiente para que el voltaje de salida del circuito RC llegue al valor que corresponde, ya que demora 16 [ms] como se menciona en el párrafo anterior.

Por último, este modo de operación se selecciona con la letra B en el menú de inicio, apareciendo primeramente el menú de configuración del parámetro K_P (figura 50), luego de K_I (figura 51) y después de K_D (figura 52). Una vez configuradas estas variables, se tiene el menú donde se les da valores a las referencias de altura, teniendo la posibilidad cambiar las unidades de medida entre milivoltios y milímetros (figura 53).



Figura 50: Configuración valor K_P.



Figura 51: Configuración valor K_I.



Figura 52: Configuración valor K_D.



Figura 53: Configuración de referencias.

Cuando el control de nivel ya está funcionando, se pueden cambiar las referencias sin pararlo, o bien, detener el control para cambiarlas. También, al parar las actuaciones es factible continuar sin necesidad de cambiar las alturas. Lo que no es posible, es variar los parámetros del controlador sin hacer toda la configuración inicial desde el menú de inicio.



Figura 54: Menú de control.

Algo importante a destacar, es que el modelo matemático de la planta supone que la altura del primer estanque es siempre mayor o igual a la altura del segundo. Por lo tanto, en este modo de operación no es posible establecer una referencia de altura del segundo estanque mayor que la referencia de altura del primero (figura 55). Además, tampoco es posible establecer referencia que sobrepasen el límite de voltaje que soporta el microcontrolador (figura 56).



Figura 55: Error referencia 2 mayor a referencia 1.



Figura 56: Error límite referencia.

Otros errores relacionados con la mala interacción de la interfaz también están resguardados por el programa, como por ejemplo el pulsar varias teclas a la vez o ajustar parámetros inexistentes (poner alguna letra, # o * en sus valores).

4.2. Implementación del circuito

Ya descrito los componentes del controlador local y la explicación de su diseño, en esta sección se abordan las conexiones eléctricas correspondientes. A cada terminal se le asocia un nombre para identificar donde está conectado y con qué componente se relaciona.

4.2.1. Alimentación

En la figura 57 se muestra la conexión de la fuente de poder, encargada de suministrar toda la energía hacia el controlador local. Como ya se mencionó en el capítulo 2, esta fuente posee tres salidas de 12 [V], utilizando dos de ellas para los actuadores PWM y una para los sensores, microcontrolador, relés y pantalla.

Para obtener los 5 [V] que requieren algunos dispositivos, como el microcontrolador, pantalla LCD y módulo de relés, se utiliza un regulador de voltaje L7805CV que convierte los 12 [V] de la fuente a los 5 [V] necesitados. Su configuración se muestra en la misma figura 57, la cual es la recomendada por el fabricante[9]. Cabe destacar que es recomendable instalar un disipador al regulador de voltaje, ya que suele aumentar su temperatura.

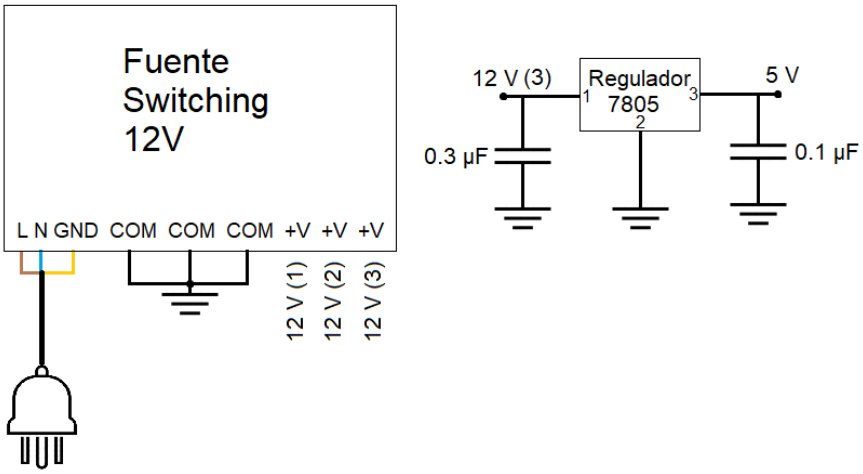


Figura 57: Diagrama de conexiones de la fuente de poder.

4.2.2. Microcontrolador

En la figura 58 se tienen las conexiones que debe tener el microcontrolador PIC16F877A para su correcto funcionamiento. En el diagrama se especifican los terminales usados para cada periférico y también para los módulos (PWM y ADC). Los nombres de cada pin y el valor de los condensadores no son al azar, pues corresponden a los que aparecen en el manual del fabricante.

El cristal de cuarzo utilizado en este proyecto es de 12 [MHz], componente fundamental para el sistema, pues provee la señal de reloj para el microcontrolador.

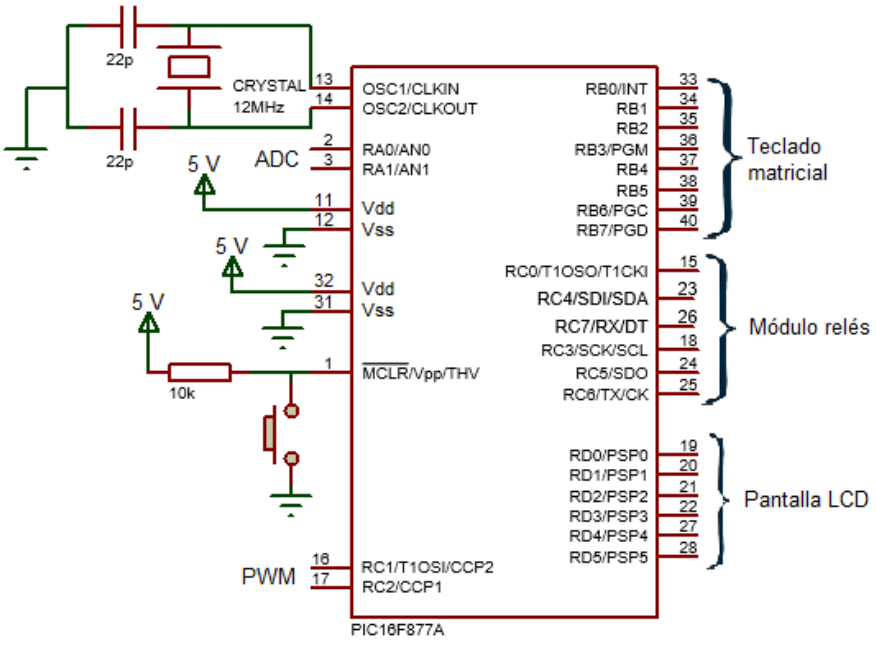


Figura 58: Diagrama de conexiones del microcontrolador.

Cabe notar que cada pin posee un número, el cual está relacionado al orden físico que realmente posee el chip, por lo que en la figura anterior la disposición de cada terminal se hizo solamente por comodidad.

El real orden físico de los puertos del microcontrolador se observan en la figura 59, donde también se ven los pines no utilizados.

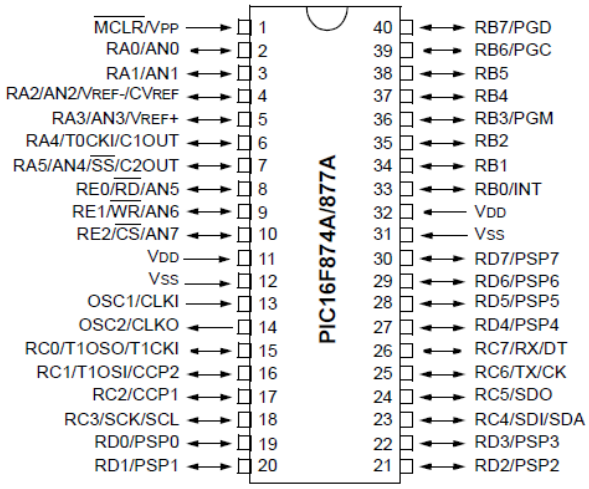


Figura 59: Diagrama de terminales PIC16F877A.

4.2.3. Interfaz y conmutador

En las siguiente imágenes se detallan las conexiones de los periféricos empleados para la comunicación con el usuario, la configuración de parámetros y la conmutación entre modos de operación.

En la figura 60 se indica el diagrama de la pantalla LCD 20x4, mostrando su alimentación y las conexiones con el microcontrolador.

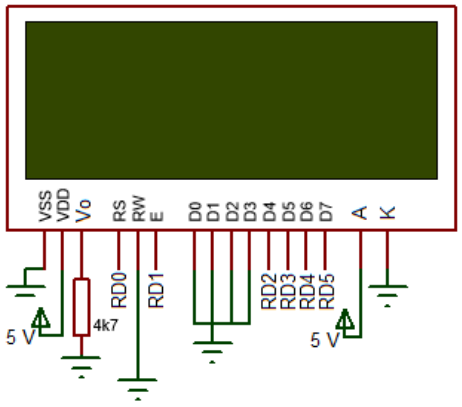


Figura 60: Diagrama de conexiones de la pantalla LCD 20x4.

Luego, en la figura 61 se tienen los pines del PIC a los que va conectado el teclado matricial, pues cabe recordar que este periférico funciona como pulsador.

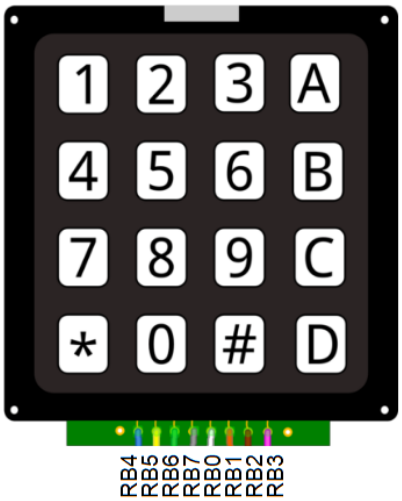


Figura 61: Diagrama de conexiones del teclado matricial 4x4.

El dispositivo encargado de modificar las conexiones para cambiar de modo de operación, es el módulo relé de 6 canales; intercambiando los enlaces entre puerto de red, potenciómetros (perillas), microcontrolador y actuadores/sensores. Este periférico se dirige a través de seis entradas, las que responden a 0 [V] (bajo) y 5 [V] (alto); dependiendo de su estado el contacto común (terminal del medio) se conecta a uno de los otros dos terminales. Su configuración se observa en la figura 62, indicando conexiones con el microcontrolador, caja de bornes, actuadores y otros circuitos.

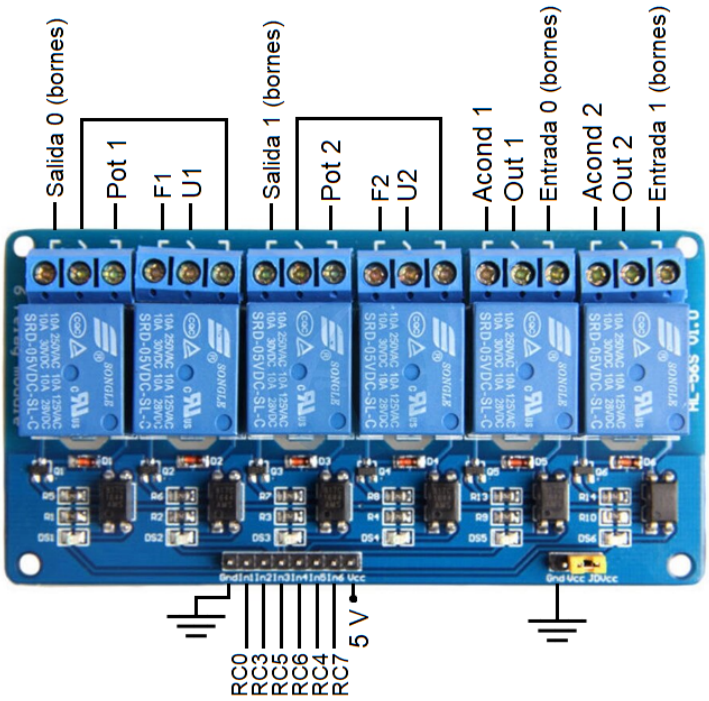


Figura 62: Diagrama de conexiones del módulo relé de 6 canales.

4.2.4. Sensores

La conexión de los sensores es bastante simple, pues estos sólo poseen tres terminales: dos de alimentación y la señal de salida. Su diagrama se encuentra en la figura 63.

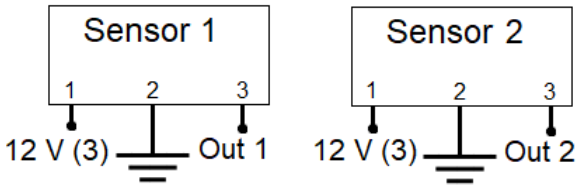


Figura 63: Diagrama de conexiones de los sensores de nivel.

Como ya se menciona en la sección de diseño del controlador local, para el modo de operación PID interno es necesario de un circuito acondicionador, ya que el microcontrolador solamente soporta hasta 5 [V]. En la figura 64 se indican las conexiones eléctricas de estos circuitos.

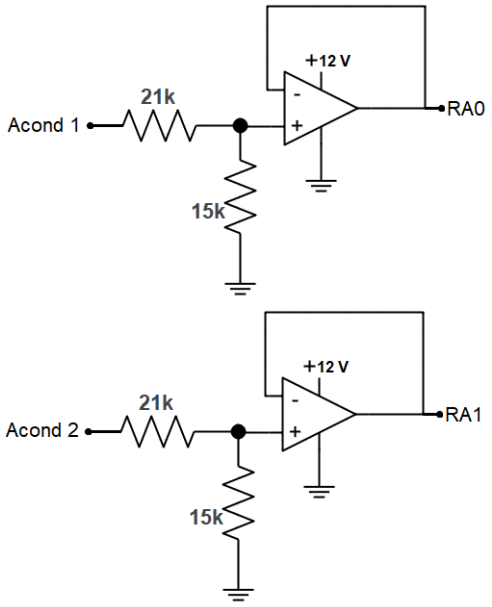


Figura 64: Diagrama de conexiones de los divisores de tensión.

4.2.5. Actuadores de bombas

En la figura 65 se indican las conexiones de los actuadores PWM, mostrando que se alimentan de fuentes distintas, recordando que la fuente de poder posee más de una salida. Cabe destacar que este dispositivo posee un terminal de 5 [V], el cual es útil cuando se utiliza un potenciómetro para regular la velocidad de las bombas de agua.

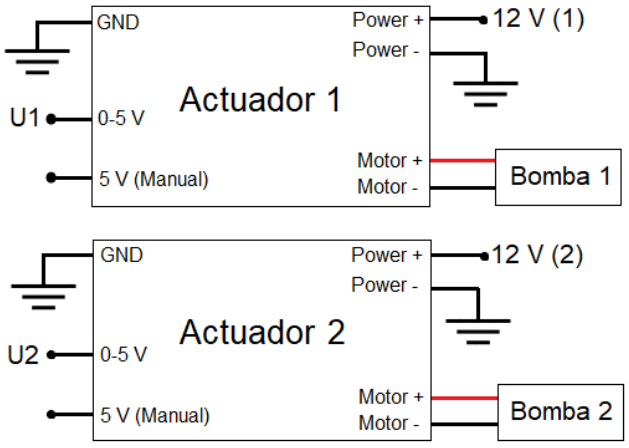


Figura 65: Diagrama de conexiones de los actuadores.

Como ya se menciona en la sección de diseño del controlador local, para el modo de operación PID interno es necesario de un filtro RC, ya que el microcontrolador no soporta salidas análogas. En la figura 66 se indican las conexiones eléctricas de estos circuitos.

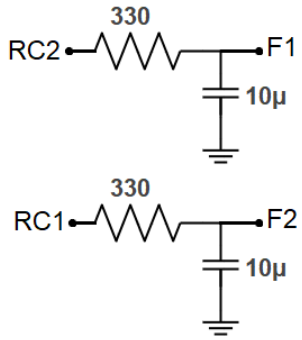


Figura 66: Diagrama de conexiones de los filtros RC.

Finalmente, se tiene el diagrama de los potenciómetros encargados del modo de operación manual (figura 67). Los 5 [V] no necesariamente tienen que ser los que proveen los actuadores PWM, pero es recomendable.

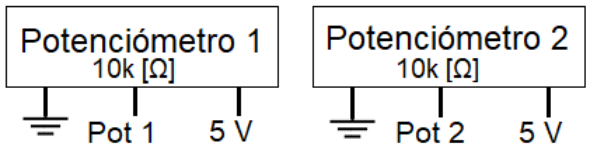


Figura 67: Diagrama de conexiones de los potenciómetros.

4.3. Esquemático EAGLE

En la figura 68 y 69 se muestra el diagrama del circuito impreso diseñado en el software EAGLE, con el fin de llevar a cabo físicamente la placa y conseguir que la parte eléctrica y electrónica de la plataforma esté compacta en una caja. De esta forma, se da mayor facilidad de interacción entre el usuario y el sistema de control. En este esquemático no se toman en cuenta los periféricos como los relés, pantalla LCD o teclado, dejando pines sueltos para su posterior conexión.

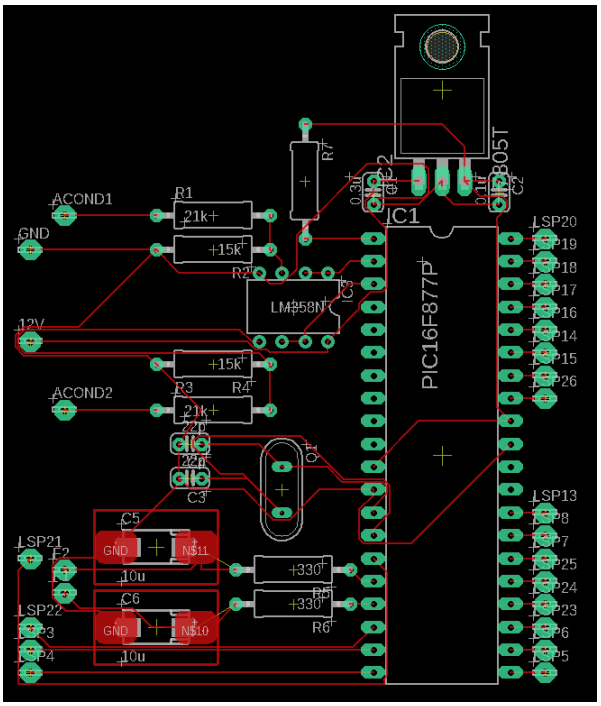


Figura 68: Esquemático del circuito en EAGLE.

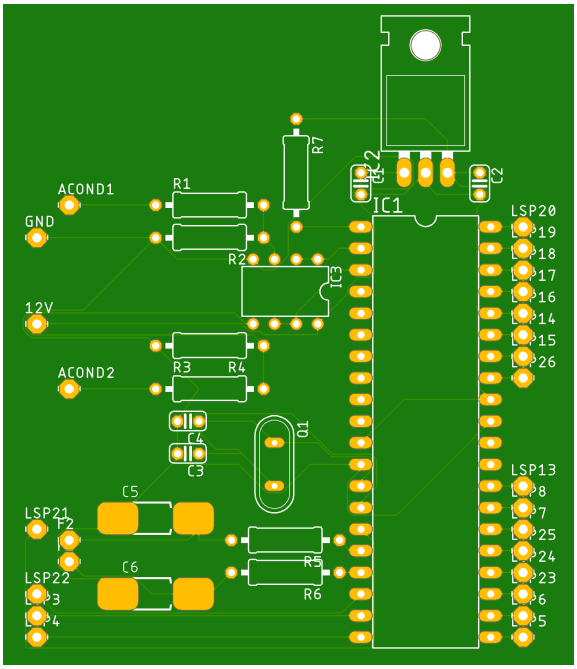


Figura 69: Esquemático del circuito listo para manufactura.

Con estos esquemas es posible mandar a fabricar las placas necesarias para la realización de la caja de comando. En la figura 70 se muestra un prototipo funcional del circuito

hecho con una placa perforada. Se diferencia del esquemático anterior solamente en la adición de más pines a tierra.

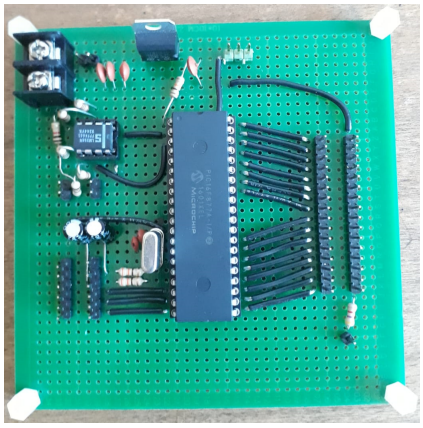


Figura 70: Placa del circuito.

Al considerar los demás elementos del controlador local, la conexión entre ellos y la placa de circuito impreso queda tal como se muestra en la figura 71. Esta foto corresponde al interior de la caja que contiene al controlador local (caja de comando).

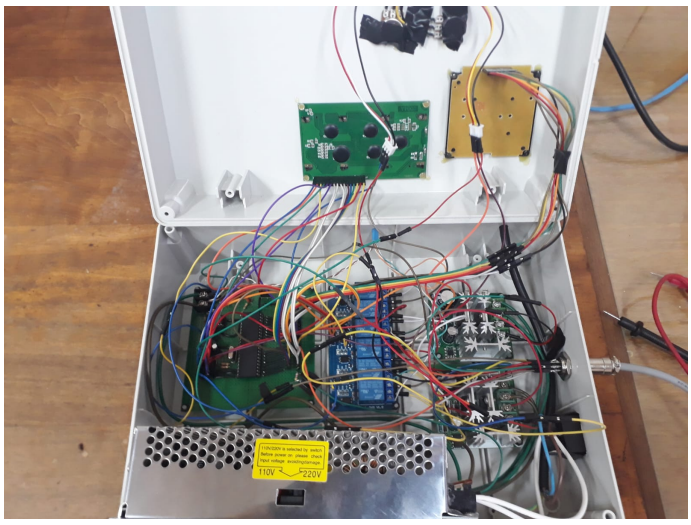


Figura 71: Componentes del controlador local.

5. Capítulo 5: Resultados experimentales

En este capítulo se realizan distintas pruebas, con la finalidad de obtener datos del comportamiento y el funcionamiento de la plataforma experimental diseñada, y también la caracterización de dispositivos relevantes tales como sensores y bombas.

Con la utilización de la tarjeta de adquisición de datos NI 6221 es posible leer las señales que entregan los sensores de nivel. De esta forma, se realizan distintos experimentos para observar el comportamiento de los controladores implementados y su desempeño.

Antes de comprobar la correcta marcha de los controladores, se realiza un experimento de igualación de nivel, el que tiene como finalidad obtener un parámetro que relacione el traspaso de caudal entre un estanque y otro, de acuerdo al modelo matemático de la planta.

5.1. Caracterizaciones

En esta sección se recolectan datos de las bombas de agua y sensores, los cuales son encargados de las actuaciones y mediciones (realimentación) respectivamente. La idea es caracterizar estos dispositivos, obteniendo una relación entre voltaje y altura medida en el caso de los sensores, y de voltaje y caudal en el caso de las bombas.

5.1.1. Sensores de nivel

El experimento a realizar para caracterizar es directo, se deja un estanque a cierta altura de columna de agua y se mide el voltaje en respuesta, realizando entonces una recolección de pares voltaje-altura para su posterior regresión lineal mediante mínimos cuadrados. Recuérdese, si bien el sensor es de presión, ésta es directamente proporcional a la altura de la columna de agua asociada por la clásica fórmula de presión estática en fluidos: $p = \rho g h$, con p la presión, ρ densidad del líquido y h la altura.

- Sensor de presión 1

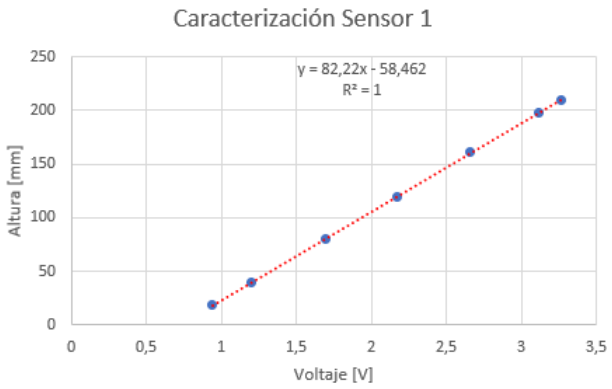


Figura 72: Caracterización sensor de presión 1.

$$h(V) = 82,22V - 58,462 \quad [mm] \tag{23}$$

- Sensor de presión 2

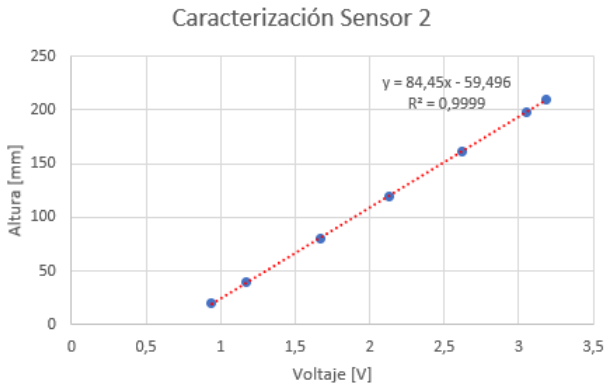


Figura 73: Caracterización sensor de presión 2.

$$h(V) = 84,45V - 59,496 \quad [mm] \tag{24}$$

Estas relaciones lineales son las que se utilizan en el modo de operación interno PID para una referencia medida en milímetros. Igualmente, se recomienda al usuario hacer esta prueba antes de implementar un control de nivel, ya que ciertas condiciones ambientales y el agua pueden producir cambios en los datos.

5.1.2. Bombas de agua

Para realizar la caracterización se hace una prueba suministrándole un voltaje de entrada directamente a las bombas, tomando nota de la altura inicial y luego final en un tiempo determinado en un sólo estanque, es decir, con la válvula de acople cerrada. Al tener conocimiento del área de cada estanque (81 $[cm^2]$), se calcula el caudal de agua para cierto voltaje de entrada, ya que este es igual a $Q = \dfrac{A \cdot \Delta h}{\Delta t}$ $[cm^3/s]$.

La mejor aproximación de los datos obtenidos se puede ajustar en una ecuación de curva cuadrática, por lo que a través de mínimos cuadrados se estiman los parámetros de la función.

- Bomba de agua 1

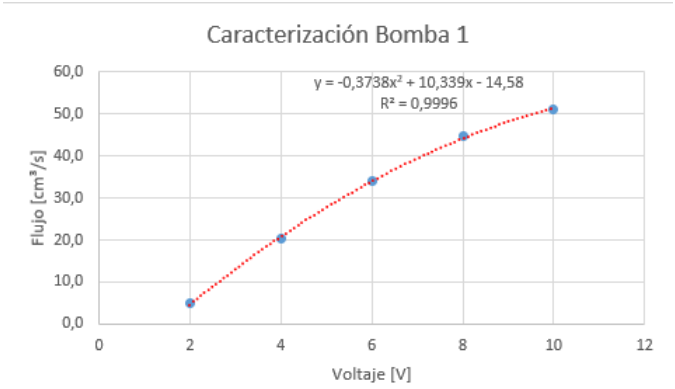


Figura 74: Caracterización bomba de agua 1.

$$Q(V) = -0,3738V^2 + 10,339V - 14,58 \quad \left[\frac{cm^3}{s}\right] \tag{25}$$

- Bomba de agua 2

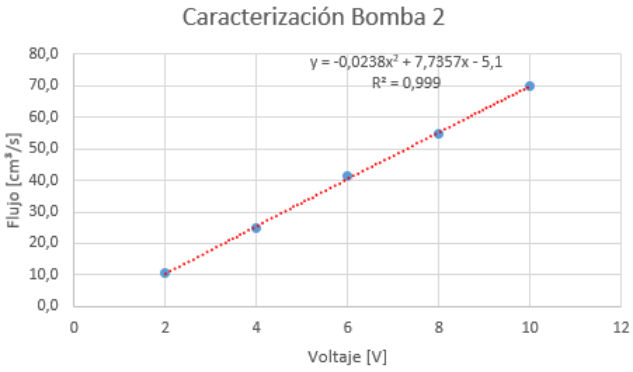


Figura 75: Caracterización bomba de agua 2.

$$Q(V) = -0,0238V^2 + 7,7357V - 5,1 \quad \left[\frac{cm^3}{s}\right] \tag{26}$$

Cabe destacar nuevamente, que este comportamiento puede variar considerablemente dependiendo de la disposición que se tenga de las mangueras, reservorio y estanques.

5.2. Experimento igualación de nivel

Para realizar las pruebas de los controladores, es necesario primero determinar el coeficiente de traspaso de la planta de estanques acoplados, pues la dinámica del sistema depende de este parámetro y es importante conocerlo para saber el real rendimiento del lazo de control.

Este experimento consiste en mantener el estanque 1 a cierto nivel, y el estanque 2 en un nivel más bajo, con ambas bombas apagadas, es decir, los caudales son nulos; luego se permite el traspaso de agua entre estanques y se colectan los datos de altura de cada uno. La válvula de empuje se deja totalmente abierta y la válvula tipo llave se deja en poco más de un 50 % de su capacidad.

En este caso las ecuaciones diferenciales que representan el experimento (ecuaciones 14) se simplifican, ya que los caudales 1 (q_1) y 2 (q_2) son cero. De esta forma, restando las

ecuaciones diferenciales, reemplazando en $q_{12}(t)$ y definiendo $z(t) = h_1(t) - h_2(t)$ se tiene que:

$$A\frac{dz(t)}{dt} = -2\kappa\sqrt{z(t)} \tag{27}$$

La cual se puede resolver vía integración:

$$\int_{z(0)}^{z(t)} \frac{1}{\sqrt{z(t)}} dz(t) = -\frac{2\kappa}{A}\int_0^t dt \Longrightarrow \sqrt{z(t)} = \sqrt{z(0)} - \frac{\kappa}{A}t \tag{28}$$

Con esta relación lineal, entre $\sqrt{z(t)}$ y el tiempo t, se utiliza el algoritmo de mínimos cuadrados para estimar la pendiente de la recta y como el área "A" de los estanques es conocida (81 $[cm^2]$), el coeficiente de traspaso "κ" se puede estimar.

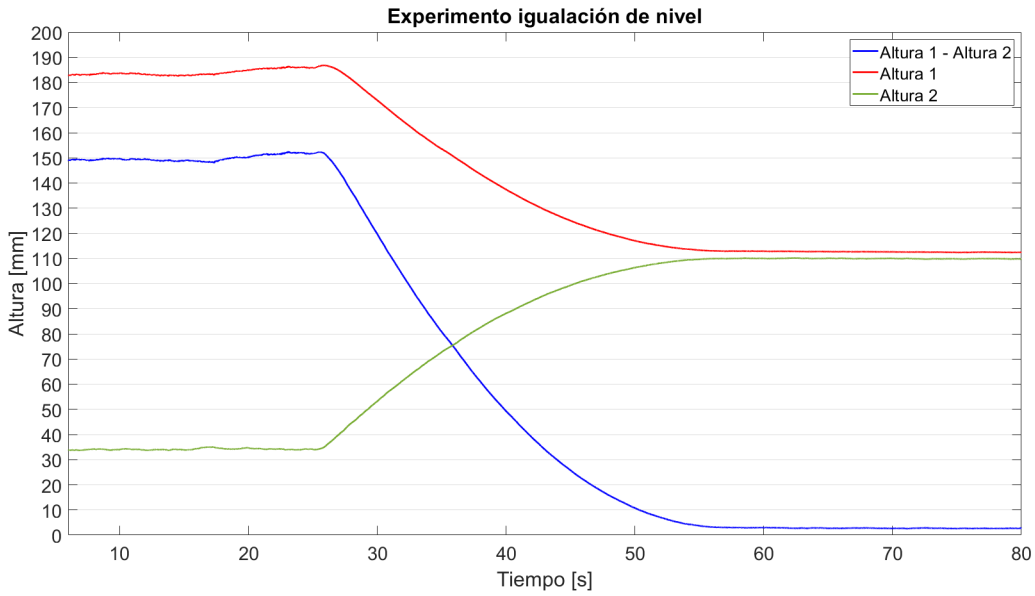


Figura 76: Experimento igualación de nivel.

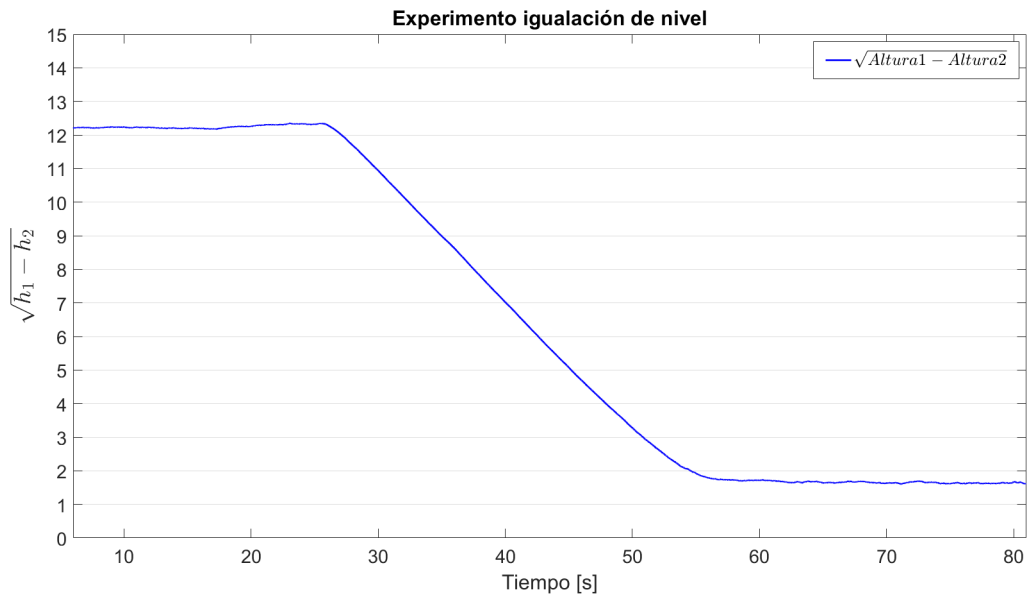


Figura 77: Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas.

En la figura 77 se puede observar la relación lineal entre la raíz de la diferencia de las alturas y el tiempo. Aplicando el algoritmo de mínimos cuadrados se estima que la pendiente de esta recta es -0.3876. Por lo tanto:

$$\begin{aligned} -\frac{\kappa}{A} &= -0{,}3876 \left[\frac{mm^{\frac{1}{2}}}{s}\right] \\ \kappa &\approx 3139 \left[\frac{mm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \hat{=} 9{,}926 \left[\frac{cm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \end{aligned} \tag{29}$$

Las próximas pruebas de los controladores implementados se realizan con este mismo coeficiente de traspaso, dejando la dinámica de la planta igual en cada experimento.

Nota: el algoritmo de mínimos cuadrados se lleva a cabo con los datos que forman una relación lineal, por lo tanto, se desechan los valores iniciales y finales.

Además de determinar el coeficiente de traspaso para la realización de las pruebas en los controladores, se hacen experimentos de igualación de nivel para distintas posiciones de la válvula, con el fin de exponer la variabilidad dinámica de la planta de estanques acoplados.

Entonces, se efectúa el mismo experimento con la válvula casi cerrada completamente y luego abierta en su totalidad, teniendo los gráficos de $\sqrt{z(t)}$ en las figuras 78 y 79.

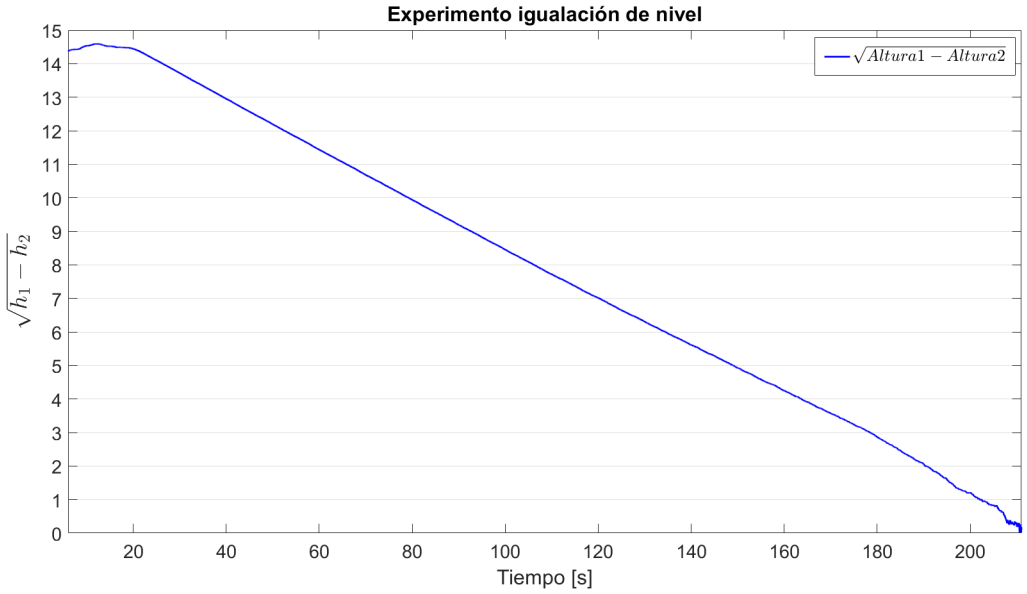


Figura 78: Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas.

Empleando el algoritmo de mínimos cuadrados se tiene que:

$$\begin{aligned} -\frac{\kappa}{A} &= -0{,}0719 \left[\frac{mm^{\frac{1}{2}}}{s}\right] \\ \kappa &\approx 582 \left[\frac{mm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \hat{=} 1{,}84 \left[\frac{cm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \end{aligned} \tag{30}$$

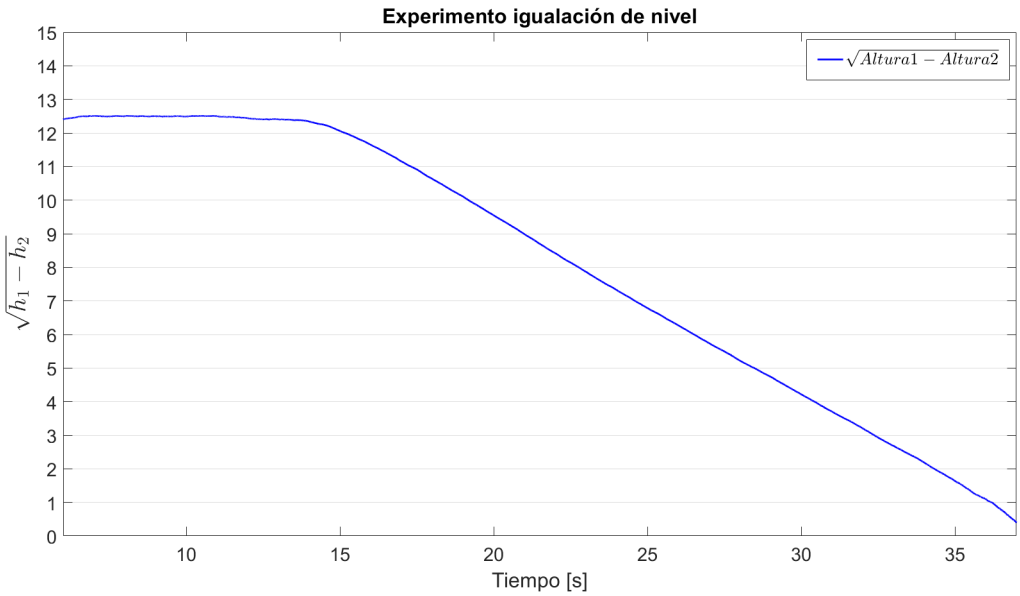


Figura 79: Gráfico de la raíz de la diferencia de ambas alturas.

Aplicando el algoritmo de mínimos cuadrados se tiene que:

$$\begin{aligned} -\frac{\kappa}{A} &= -0{,}5265 \left[\frac{mm^{\frac{1}{2}}}{s}\right] \\ \kappa &\approx 4265 \left[\frac{mm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \hat{=} 13{,}487 \left[\frac{cm^{\frac{5}{2}}}{s}\right] \end{aligned} \tag{31}$$

5.3. Controlador PID interno

Con tal de probar el desempeño del controlador implementado en el PIC16F877A (modo interno PID), se realizan dos experimentos:

1. Ambos estanques se encuentran a referencias de altura dadas. Luego, al alcanzar un comportamiento estacionario, se efectúa un cambio en estas referencias. Así, es posible evaluar si el controlador consigue seguir de buena forma las alturas que se le indican.

2. Ambos estanques se encuentran a referencias de altura dadas. Cuando se alcanza un comportamiento estacionario, se le aplica a cada estanque una perturbación, que consiste en agregar un volumen de agua extra por la parte de arriba. Por supuesto, para realizar una evaluación congruente del comportamiento del controlador ante perturbaciones, cada una de éstas se aplica por separado, primero en el estanque 1 y una vez superada, al estanque 2.

Se hicieron muchas pruebas con distintas combinaciones de los parámetros del controlador, obteniendo buenos resultados en general. Pero para los siguientes experimentos se utilizaron dos controladores en específico, un PI y un PID, los cuales poseen los siguientes parámetros (enteros, debido al registro encargado del ciclo de trabajo):

- PI: $K_P = 1$, $K_P = 1$, $K_D = 0$
- PID: $K_P = 1$, $K_P = 1$, $K_D = 1$

Es necesario determinar si con estos controladores se obtiene un sistema de lazo cerrado estable. Para esto, se toma en cuenta el modelo lineal y continuo de la planta (ecuación 15), incorporando las relaciones entre los voltajes de actuación y medición, y los caudales y niveles reales. Estas relaciones son las mismas que se obtienen en las caracterizaciones anteriores de sensores y bombas.

Al linealizar las caracterizaciones se tienen las ecuaciones 32 y 33, donde V_1 y V_2 son los voltajes de medición, y U_1 y U_2 son los voltajes de actuación. También se tiene que $a_1 = \dfrac{1}{8{,}222}$, $a_2 = \dfrac{1}{8{,}445}$, $\bar{c_1} = 10{,}339 + 2(-0{,}3738)u_Q$ y $\bar{c_2} = 7{,}7357 + 2(-0{,}0238)u_Q$.

$$\Delta V_1(s) = a_1 \Delta H_1(s) \qquad \Delta V_2(s) = a_2 \Delta H_2(s) \tag{32}$$

$$\Delta Q_1(s) = \bar{c_1} \Delta U_1(s) \qquad \Delta Q_2(s) = \bar{c_2} \Delta U_2(s) \tag{33}$$

Sustituyendo se tiene que el modelo lineal de la planta es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1(s) \\ \Delta V_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{2As(s\tau_p + 1)} \begin{bmatrix} a_1\bar{c_1}(\tau s + 1) & -a_1\bar{c_2} \\ a_2\bar{c_1} & -a_2\bar{c_2}(\tau s + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1(s) \\ \Delta U_2(s) \end{bmatrix} \tag{34}$$

Nota: en el modelo de la planta, la caracterización de los sensores considera la altura en centímetros para ser consecuente con las unidades de medida.

Al utilizar una estrategia de control descentralizado, sólo se debe tener en cuenta la relación entre $\Delta V_1(s)$ y $\Delta U_1(s)$, y entre $\Delta V_2(s)$ y $\Delta U_2(s)$. Esto debido a que las relaciones cruzadas son consideradas perturbaciones.

Cuando se utiliza la aproximación de Euler hacia atrás, un sistema continuo estable siempre da un sistema discreto estable [6]. Con esta afirmación es posible obtener los polos de lazo cerrado considerando controladores continuos, por ende, los controladores PI y PID equivalentes en tiempo continuo son $C(s) = 1 + \dfrac{1}{Ts}$ y $C(s) = 1 + \dfrac{1}{Ts} + \dfrac{Ts}{0{,}001s + 1}$ respectivamente, con $T = 0{,}0217$ (tiempo de muestreo). Para este último controlador es necesario añadir un polo rápido $(0{,}001s+1)$, ya que se analiza el sistema en tiempo continuo.

Teniendo el modelo de la planta y de los controladores, es posible calcular los polos de lazo cerrado. La función de transferencia que se debe analizar es la que relaciona las referencias de altura y los voltajes de medición, es decir, $\dfrac{\Delta V(s)}{\Delta R(s)} = \dfrac{G_0(s)C(s)}{1 + G_0(s)C(s)}$. Siendo $G_0(s) = \dfrac{\Delta V(s)}{\Delta U(s)}$ (función de transferencia de la planta).

Entonces considerando los puntos de equilibrio $h_{1,Q} - h_{2,Q} = 2$ y $u_Q = 2{,}5$, se tiene que con el controlador PI los polos de lazo cerrado del sistema $\dfrac{\Delta V_1(s)}{\Delta R_1(s)}$ son $s = -0{,}0435$ y $s = -0{,}028 \pm 0{,}766j$; y los del sistema $\dfrac{\Delta V_2(s)}{\Delta R_2(s)}$ son $s = -0{,}0433$ y $s = -0{,}0272 \pm 0{,}715j$.

Para el controlador PID, se tiene que los polos de lazo cerrado del sistema $\dfrac{\Delta V_1(s)}{\Delta R_1(s)}$ son $s = -0{,}0433$, $s = -0{,}028 \pm 0{,}766j$ y el polo rápido $s = -1000$; y los del sistema $\dfrac{\Delta V_2(s)}{\Delta R_2(s)}$ son $s = -0{,}0433$, $s = -0{,}0271 \pm 0{,}715j$ y el polo rápido $s = -1000$.

Por lo tanto, debido a que todos los polos de lazo cerrado se encuentran en el semiplano izquierdo (parte real negativa), ambos sistemas de lazo cerrado son estables con los dos controladores implementados, tanto en tiempo continuo como en tiempo discreto.

5.3.1. Experimento cambio de referencia

En primera instancia, se aplica una referencia de 2000 [mV] al estanque 1 y 1300 [mV] al estanque 2, dando una referencia de altura al microcontrolador directamente en unidad de milivoltios. Luego, se aplica un cambio en las referencias a 2600 [mV] para el estanque 1 y a 2000 [mV] para el estanque 2. Los resultados obtenidos para ambos controladores se muestran en la figura 80 y 81.

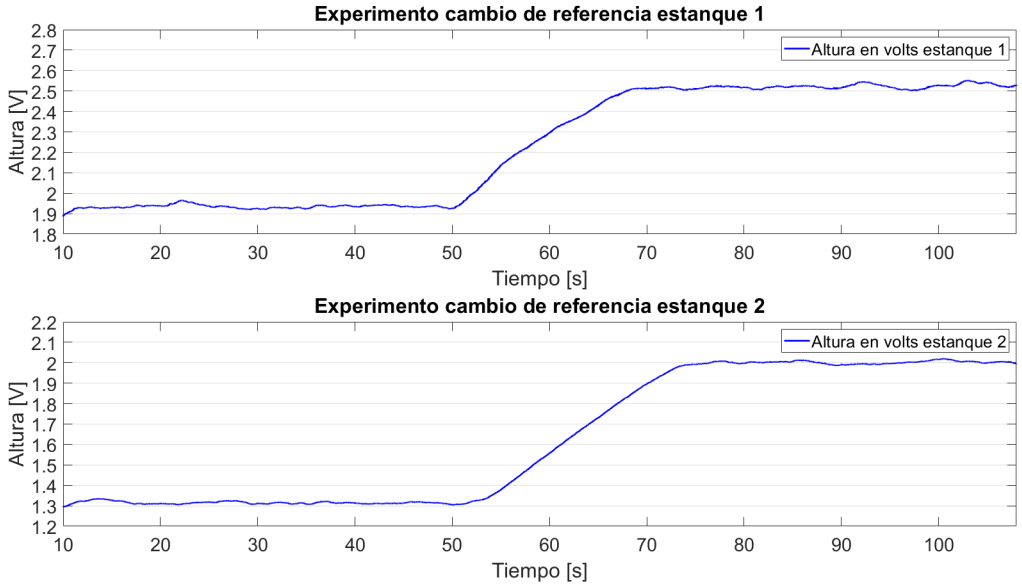


Figura 80: Controlador PI: cambio de referencia en volts.

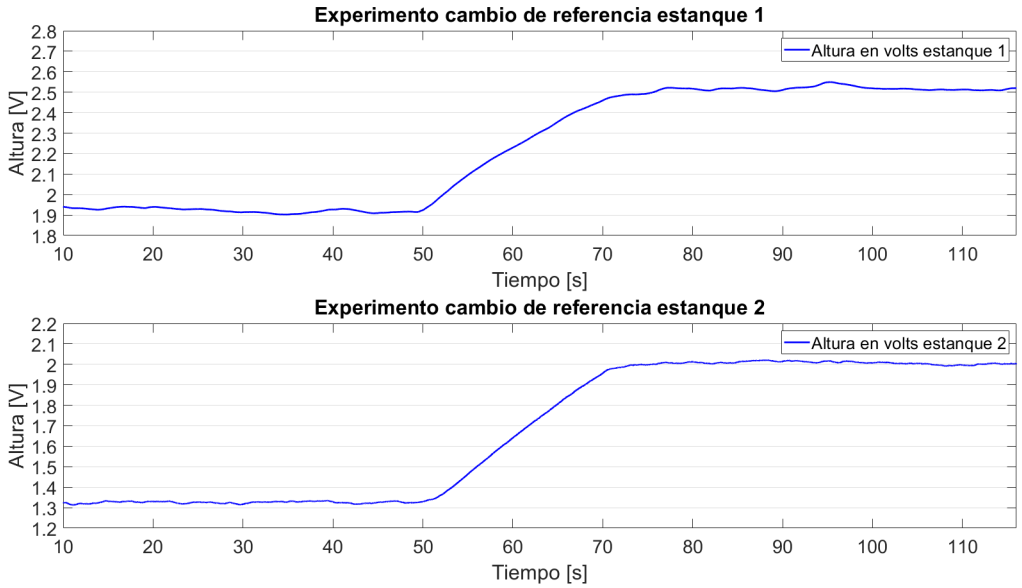


Figura 81: Controlador PID: cambio de referencia en volts.

Se repite el mismo experimento pero ahora utilizando referencias en milímetros, aplicando al estanque 1 una altura de 60 [mm] y al estanque 2 de 40 [mm]. Luego, se hace un cambio en las referencias a 100 [mm] para el estanque 1 y a 80 [mm] para el estanque 2. Los gráficos con los datos se observan en la figura 82 y 83.

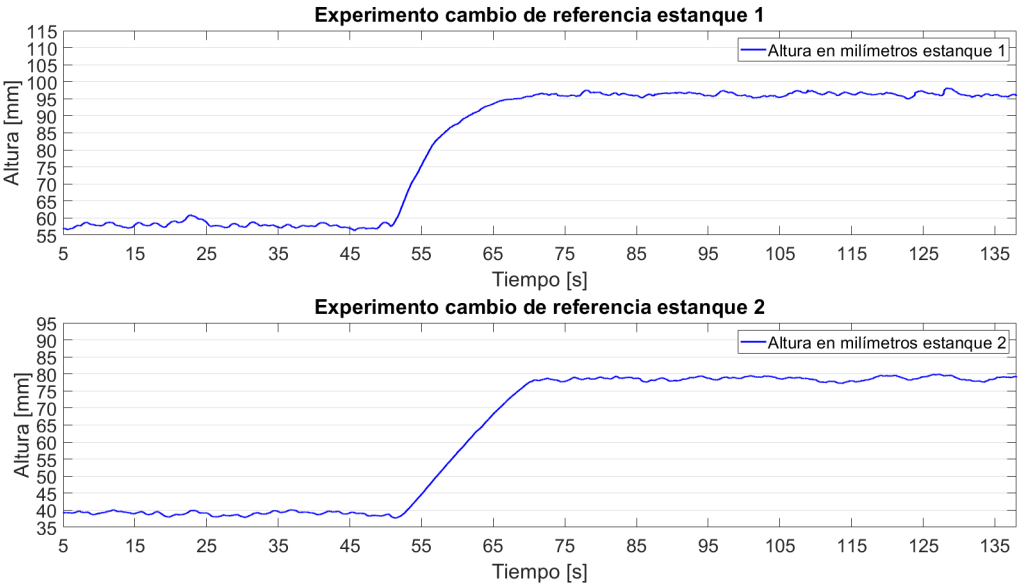


Figura 82: Controlador PI: cambio de referencia en milímetros.

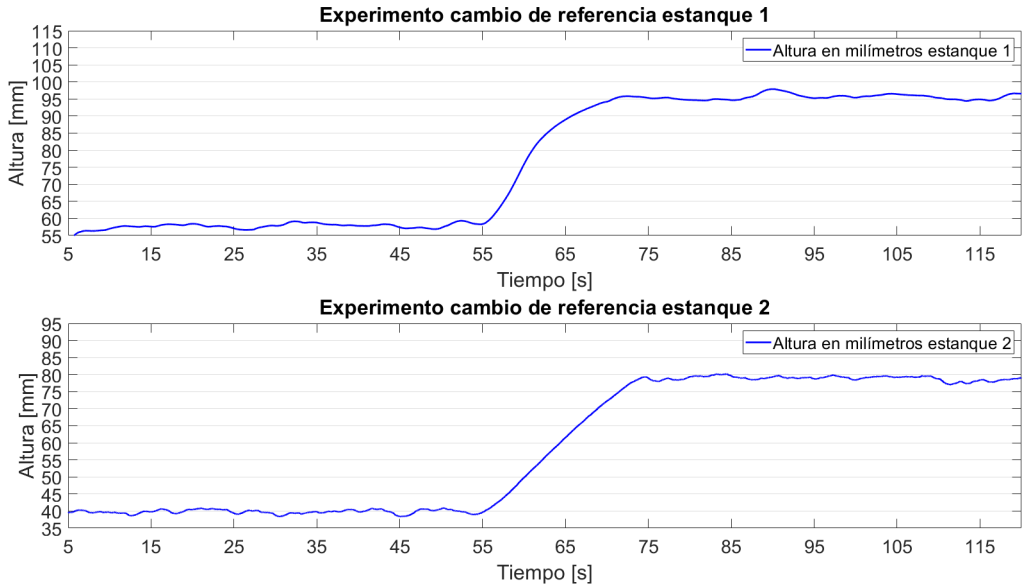


Figura 83: Controlador PID: cambio de referencia en milímetros.

Al analizar los gráficos anteriores se puede ver un correcto seguimiento a las referencias con errores pequeños, tanto para el controlador PI como el PID. El tiempo de asentamiento de menos de 20 [s] es bastante aceptable para plantas de este tipo, pero puede mejorarse implementando otros parámetros del controlador para así obtener polos de lazo cerrado más rápidos.

En las siguientes tablas se muestran los errores cuadráticos medios para cada controlador y referencia dada en el experimento anterior, con el fin de cuantificar el rendimiento y observar si poseen un seguimiento aceptable. Para las referencias en milímetros se calcula también el error en voltios, pasando los datos a esta unidad mediante la caracterización inversa; esto se hace para obtener errores comparables y además por el hecho de que el microcontrolador en realidad controla voltaje directamente. Cabe notar también que debido a la relación entre voltaje y altura, el error en milímetros puede verse magnificado.

Control PI			
Estanque 1		Estanque 2	
Referencia	Error	Referencia	Error
2 [V]	0.0042 $[V^2]$	1.3 [V]	0.00021716 $[V^2]$
2.6 [V]	0.0061 $[V^2]$	2 [V]	0.00005711 $[V^2]$
60 [mm]	4.3003 $[mm^2]$ 0.000636 $[V^2]$	40 [mm]	1.3195 $[mm^2]$ 0.000185 $[V^2]$
100 [mm]	13.6582 $[mm^2]$ 0.002 $[V^2]$	80 [mm]	2.6968 $[mm^2]$ 0.000378 $[V^2]$

Cuadro 2: Controlador PI: error cuadrático medio.

Control PID			
Estanque 1		Estanque 2	
Referencia	Error	Referencia	Error
2 [V]	0.0061 $[V^2]$	1.3 [V]	0.00070555 $[V^2]$
2.6 [V]	0.0067 $[V^2]$	2 [V]	0.00012354 $[V^2]$
60 [mm]	4.4532 $[mm^2]$ 0.000659 $[V^2]$	40 [mm]	0.3355 $[mm^2]$ 0.00004698 $[V^2]$
100 [mm]	18.0937 $[mm^2]$ 0.0027 $[V^2]$	80 [mm]	1.575 $[mm^2]$ 0.00022058 $[V^2]$

Cuadro 3: Controlador PID: error cuadrático medio.

Al observar los gráficos anteriores era de esperarse que los errores fuesen cuantitativamente pequeños, por lo que el controlador interno no presenta anomalías y funciona de la manera que se espera.

Cabe notar que los errores en unidad de milímetros son mucho mayores que los de voltaje, siendo responsable los errores al caracterizar los sensores. Ya que el microcontrolador trabaja sólo con señales de voltaje, esto no influye en el rendimiento del controlador.

5.3.2. Experimento respuesta a perturbación

Se aplica una referencia de 2000 [mV] al estanque 1 y 1300 [mV] al estanque 2. Alrededor del segundo 35 y 75 se agrega más agua al estanque 1 y al estanque 2 respectivamente, considerando un tiempo entre estas perturbaciones para que el sistema esté en estado estacionario. Los resultados del experimento en cada controlador se observan en la figura 84 y 85.

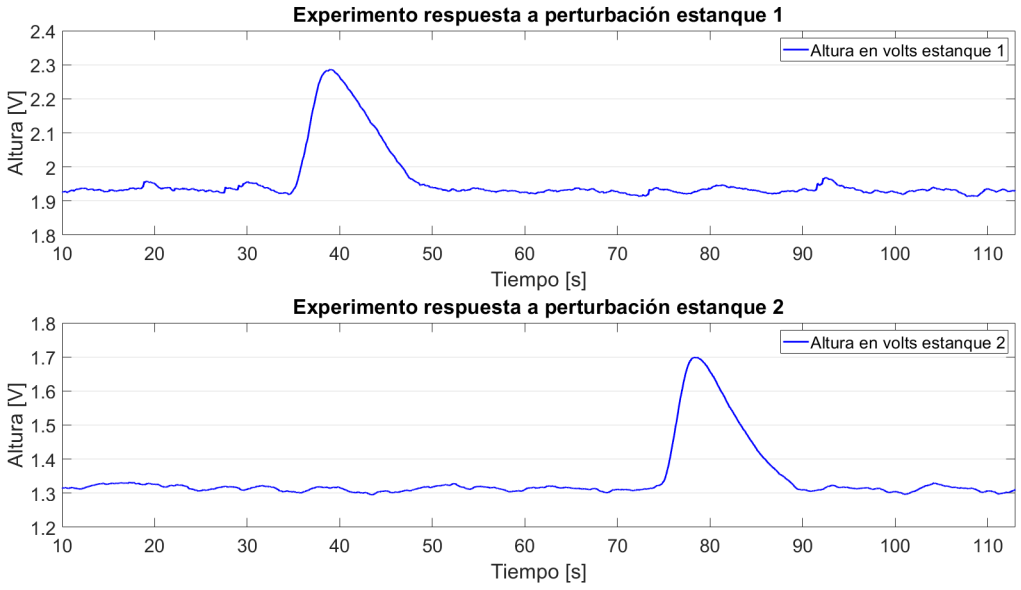


Figura 84: Controlador PI: respuesta a perturbación de ambos estanques.

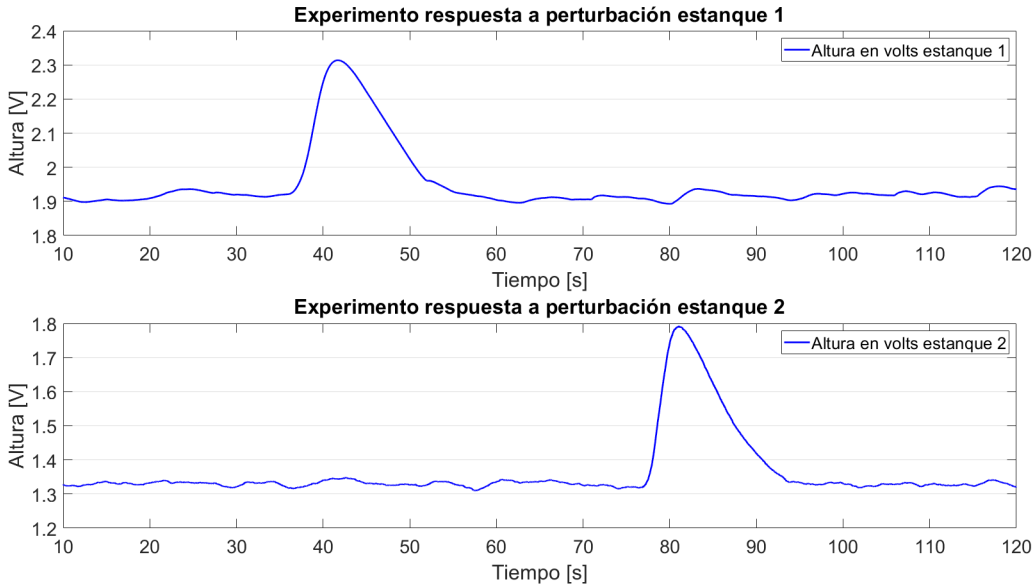


Figura 85: Controlador PID: respuesta a perturbación de ambos estanques.

Se observa que ambos controladores responden de buena manera a las perturbaciones, siguiendo las referencias luego de aplicar el volumen extra de agua.

5.4. Pruebas de estrés

Con el fin de evidenciar el funcionamiento en general del controlador local (caja de comando), se realizan dos pruebas sumamente importantes en el ambiente práctico de la plataforma. Una de ellas consiste en dejar funcionando continuamente el controlador interno por largos períodos, observando si existe algún desperfecto o diferencia entre lapsos de tiempo. La otra prueba consta de cambiar entre modos de operación, viendo que la conmutación de los relés se realice de forma correcta y las conexiones no tengan problemas.

5.4.1. Funcionamiento por largos períodos de tiempo

Como ya se menciona anteriormente, esta prueba es bastante sencilla, dejando en funcionamiento continuo el sistema en modo interno PID y observando si es que ocurre algún desperfecto eléctrico o un problema en el seguimiento de las referencias. Los datos tomados se encuentran en la tabla 4, con un total de 5 horas de funcionamiento.

Horas de func.	Funcionamiento
1 [hr]	Correcto
2 [hr]	Correcto
3 [hr]	Correcto
4 [hr]	Correcto
5 [hr]	Correcto

Cuadro 4: Prueba de funcionamiento continuo por largos períodos.

Como se puede observar, el sistema funciona de manera correcta en 5 horas de funcionamiento continuo, suficiente para que una experiencia de laboratorio no ocurran inconvenientes.

5.4.2. Cambios entre modos de operación

En esta prueba se cambia de modo de operación entre todas las posibilidades, utilizando un multímetro para comprobar continuidad de las conexiones que posee cada modo y ejecutando cada uno. Entonces, cuando se esté en modo manual los actuadores deben estar conectados a los potenciómetros (perillas); en modo remoto los sensores y actuadores conectados al cable de red en el orden establecido; y en modo interno los sensores y actuadores conectados al microcontrolador. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Cambio de modo	Conexiones
Manual - Remoto	Correctas
Manual - Interno	Correctas
Remoto - Manual	Correctas
Remoto - Interno	Correctas
Interno - Manual	Correctas
Interno - Remoto	Correctas

Cuadro 5: Prueba de cambios entre modos de operación.

6. Capítulo 6: Conclusiones

En este proyecto de título se logra implementar una nueva planta de estanques acoplados junto con un controlador local, el cual trabaja en distintos modos de operación: manual, remoto e interno. Siendo posible realizar un control de nivel en tiempo real a través de Simulink y dando continuidad a las experiencias del Laboratorio de Control Automático. Además, se consiguió una nueva forma de implementar un control de lazo cerrado configurable, mediante un control PID en el modo de operación interno, en el que un microcontrolador PIC se encarga de recibir, calcular y entregar las señales de control.

Esta nueva planta tiene la ventaja de tener una dinámica variable por el usuario, debido a las válvulas existentes en el enlace entre estanques. Dando nuevas posibilidades para los experimentos y tomas de datos que ya se realizan en las experiencias del laboratorio, como también posibilidades para realizar demostraciones en un aula, debido a que el sistema es portátil y no necesariamente se requiere de un computador. Además, ésta posee una mejor interacción para el llenado y vaciado del reservorio, pues este último es bastante manipulable, posee válvulas para evitar filtraciones e incluye la posibilidad de reutilizar el agua.

En el modo de operación interno, se utiliza un método de control descentralizado observando su comportamiento a cambios de referencia y perturbaciones; para un controlador PI y PID. A partir de los gráficos tomados y los errores calculados, se puede concluir que el seguimiento a referencia es bastante aceptable, con errores bastantes bajos en términos de voltaje, pues es esta unidad de medida es con la que realmente trabaja el microcontrolador. Cabe destacar que según la caracterización de los sensores, 1 [V] es aproximadamente 25 [mm], por lo que es razonable tener más error al calcularlo en milímetros.

En el caso de las perturbaciones, se puede observar que tanto el controlador PI y PID implementado en el microcontrolador (modo interno) responden de muy buena manera, llevando el nivel de agua en los estanques a la referencia dada a pesar del exceso de agua suministrado.

En general se cumplieron los objetivos del proyecto, innovando el sistema de estanques acoplados que ya se tiene en el Laboratorio Laplace por uno más moderno, compacto, con menos complicaciones al vaciar/llenar el reservorio y fácil de replicar. Sin embargo, cabe destacar que debido a la falta de memoria en el microcontrolador PIC16F877A se dejaron de lado ciertas configuraciones y menús que podrían haber mejorado el controlador local, por lo que en un futuro se podría optar por uno con más memoria y velocidad.

6.1. Comparación de sistemas

Es importante realizar una comparación entre el sistema de estanques que ya se tiene en el Laboratorio de Control Automático y el que se diseña en este proyecto, poniendo énfasis en los componentes de cada uno. A continuación se detallan las diferencias y las innovaciones realizadas en la tabla 6.

	Sistema actual	Sistema diseñado
Reservorio	De gran tamaño y peso, difícil de manipular.	Tamaño compacto, fácil de manipular y separar de la plataforma.
Acoplamiento	3 orificios. Difíciles de cerrar o abrir cuando los estanques tienen agua.	2 válvulas fuera de los estanques.
Bombas	De gran tamaño y peso. Estruendosas. 12 [V], 36 [W].	Menor tamaño y peso. Estruendosas, pero no peor. 12 [V], 60 [W].
Sensores	Sensores de presión, 12 [V]	Sensores de presión 12 [V]. Sólo modelo distinto (PX-164).
Caja de comando	Modo manual y remoto, a través de perillas e interruptores.	Modo manual, remoto e interno PID, con una interfaz digital hecha con un microcontrolador.

Cuadro 6: Comparación de sistemas.

6.2. Trabajo futuro

Al finalizar este proyecto quedan varias mejoras a la plataforma experimental por realizar, entre ellas destacan:

- Cambiar el microcontrolador actual por uno con más memoria como los de la familia PIC18FXX2 [10], los cuales son compatibles en código y en posición de pines con el PIC16F877A. De esta forma, es posible realizar menús extras y nuevas formas de configuración, como por ejemplo, que los parámetros de caracterización de los sensores fueran configurables.

- Investigar e implementar otros métodos de anti-enrollamiento para mejorar el control de nivel.

- Proteger los sensores de nivel con algún tipo de carcasa, para evitar manipulaciones inadecuadas y posibles desperfectos producto del contacto con el agua.

- Agregar sensores de otro tipo y de distinto funcionamiento en la planta de estanques acoplados, para tener otros métodos de medición y realizar mejoras en la realimentación del lazo de control.

- Continuar buscando nuevos materiales para el sistema, ya sea para los estanques, la plataforma o la caja que contiene el circuito de control. Si bien el sistema presentado es funcional y práctico en varios aspectos, puede seguir mejorando.

Referencias

[1] Quanser, Case Studies Educational Applications, https://www.quanser.com/quanser-community/case-studies/?fwp_case_study_categories=educational-applications

[2] Francisco Vargas, Daniel Erraz, Juan Agüero, Guía experiencia 5: Implementación de Controladores.

[3] Microchip Technology, PIC16F87XA Data sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers, https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf.

[4] Microchip Technology, PICmicro Mid-Range MCU Family Reference Manual, https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/33023a.pdf.

[5] Microchip Technology, MPLAB XC8 C Compiler User's Guide, http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/50002053g.pdf.

[6] B. Wittenmark, K.J. Astrom and K.E. Arzen, Computer Control: An Overview, https://lucris.lub.lu.se/ws/files/6377599/8627775.pdf.

[7] Juan Bustamante Muñoz, Programa microcontrolador para plataforma experimental, https://github.com/bustaseba1011/Proyecto-de-titulo.

[8] Chris Valenti Microchip Technology, Implementing a PID Controller Using a PIC18 MCU, http://www.t-es-t.hu/download/microchip/an937a.pdf.

[9] STMicroelectronics, L78 Datasheet, https://www.mouser.cl/datasheet/2/389/cd00000444-1795274.pdf

[10] Microchip Technology, PIC18FXX2 Data sheet High-Performance Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D, https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf.