

**CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA  
EMPLEANDO UN PLC SIEMENS S7-1200**

**SILVIA JOHANNA ACELAS SUÁREZ**

**ANA MILENA MENDOZA DÍAZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2016**

**CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA  
EMPLEANDO UN PLC SIEMENS S7-1200**

**SILVIA JOHANNA ACELAS SUÁREZ**

**ANA MILENA MENDOZA DÍAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
ingeniero electrónico**

**Director**

**RICARDO ALZATE CASTAÑO**

**Ingeniero Electrónico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIAS

A Dios por ser mi soporte y darme las fuerzas para superar cada uno de los obstáculos que se presentaron durante mi formación universitaria.

A mi familia por el apoyo, en especial a mi madre por no dejarme desfallecer, por estar apoyándome en todo momento y creer en mí siempre.

A mi compañera de proyecto por su ánimo y entrega durante la ejecución de nuestro proyecto.

A cada una de las personas que hicieron parte de esta etapa de mi vida, que me apoyaron cuando más lo necesitaba.

Ana Milena Mendoza Díaz

A mi madre por darme todo sin pedir nada cambio, por ser mi fuerza en los momentos más críticos de mi vida y ser el apoyo constante que siempre necesite para no perder el rumbo.

Me ha transmitido su sabiduría, valores y su coraje para nunca rendirme, me ha enseñado que todo reto se puede superar si se tiene fe, amor y confianza en sí mismo.

Silvia Johanna Acelas Suarez

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecemos a Dios por guiarnos y ser nuestra inspiración durante el desarrollo de este trabajo, a nuestras familias por su confianza y apoyo incondicional.

A nuestros compañeros y amigos por ser fichas claves para aliviar los niveles de estrés, a nuestro director Ricardo Álzate por su orientación, esfuerzo y dedicación durante este proceso. Agradecemos especialmente a nuestros profesores por brindarnos sus conocimientos y todas aquellas personas que hicieron posible este trabajo.

## CONTENIDO

Pág.

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS:</b> .....	<b>20</b>
2.1 Objetivo general.....	20
2.1.1. Objetivos específicos .....	20
<b>3. DISEÑO DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA</b> .....	<b>21</b>
3.1. SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO .....	21
3.1.1. Dispositivo de sensado .....	23
3.1.2. Dispositivo de actuación. ....	24
3.1.3. Dispositivo de control.....	24
3.1.4. Elementos para almacenamiento de líquido.. ....	25
3.1.5. Elemento para impulsión del fluido. ....	27
3.1.6. Elementos para interrupción del flujo de agua.....	28
3.2. CONFIGURACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL.....	31
3.2.1. Protocolo de arranque del sistema. ....	31
3.2.2. Calibración de rango de sensado. ....	33
3.2.3. Calibración de rango de actuación.....	34
3.3. RESPUESTA EXPERIMENTAL DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO .....	36
<b>4. ANÁLISIS DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL</b> .....	<b>38</b>
4.1. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	38
4.1.1. Modelo de dos tanques.....	40
4.1.2. Determinación de parámetros del modelo. ....	42
4.1.3. Validación de la respuesta escalón.....	44
4.2. ANÁLISIS DE GANANCIA DEL LAZO DE CONTROL .....	45
4.2.1. Simulación para acción de control proporcional.....	46
4.2.2. Verificación experimental para control proporcional. ....	48
<b>5. CONTROL PID DEL SISTEMA DE TANQUES</b> .....	<b>51</b>
5.1. CONTROL PID .....	51

5.1.1. Cálculo de constantes del controlador. ....	52
5.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA CONTROLADO PID .....	55
5.2.1. Simulación para acción de control PID. ....	55
5.2.2. Verificación experimental para control PID.. ..	57
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>8. TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>66</b>
<b>CITAS .....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>

## LISTAS DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Sistema de recirculación de agua propuesto .....	22
<b>Figura 2.</b> Sensor de nivel ultrasónico .....	23
<b>Figura 3.</b> Electroválvula proporcional .....	25
<b>Figura 4.</b> Controlador lógico programable para tareas de control .....	26
<b>Figura 5.</b> Tanque de almacenamiento principal .....	26
<b>Figura 6.</b> Tanques de almacenamiento secundarios.....	27
<b>Figura 7.</b> Electrobomba empleada para impulsión de agua .....	28
<b>Figura 8.</b> Válvula manual .....	29
<b>Figura 9.</b> Electroválvula de dos posiciones .....	30
<b>Figura 10.</b> Sistema final constituido en laboratorio.....	30
<b>Figura 11.</b> Flujograma que describe el protocolo de inicialización del sistema .....	33
<b>Figura 12.</b> Calibración de rangos del sensor .....	34
<b>Figura 13.</b> Comportamiento del sistema ante diferentes entradas de corriente ...	35
<b>Figura 14.</b> Conexión de electroválvula a PLC .....	36
<b>Figura 15.</b> Cambio de tipo escalón de corriente a la entrada de la electroválvula	37
<b>Figura 16.</b> Respuesta escalón del sistema en lazo abierto perturbado.....	37
<b>Figura 17.</b> Modelo dinámico de tanque .....	40
<b>Figura 18.</b> Modelo dinámico de dos tanques.....	40
<b>Figura 19.</b> Validación del modelo del sistema .....	44
<b>Figura 20.</b> Sistema realimentado para análisis de la acción proporcional.....	46
<b>Figura 21.</b> Simulación respuesta ante acción proporcional .....	47
<b>Figura 22.</b> Simulación de la corriente que entrega el controlador proporcional ....	47
<b>Figura 23.</b> Rutina de programa para control proporcional en PLC .....	48
<b>Figura 24.</b> Respuesta experimental ante acción proporcional .....	49
<b>Figura 25.</b> Acción de control proporcional experimental .....	50
<b>Figura 26.</b> Aproximación para curva de reacción .....	53
<b>Figura 27.</b> Simulación respuesta ante acción PID.....	56

**Figura 28.** Simulación de la corriente que entrega el controlador PID .....57  
**Figura 29.** Rutina de programa para control PID en PLC.....58  
**Figura 30.** Respuesta experimental ante acción PID .....59  
**Figura 31.** Acción de control PID experimental .....60

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Porcentajes de apertura nominal para válvulas del sistema.....	32
<b>Tabla 2.</b> Calculo del error del cambio de altura .....	45
<b>Tabla 3.</b> Parámetros controlador PID para método Ziegler & Nichols .....	55

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>ANEXO A.</b> Programación del controlador lógico programable .....	72
<b>ANEXO B.</b> Cálculo de parámetro $R_a$ .....	86
<b>ANEXO C.</b> Presupuesto .....	91

## RESUMEN

Título: CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES EN CASCADA EMPLEANDO UN PLC S7 -1200 SIEMENS\*.

Autores: SILVIA JOHANNA ACELAS SUÁREZ, ANA MILENA MENDOZA DÍAZ\*\*.

### Palabras Clave:

Control de nivel, Controlador lógico programable, PID experimental, Prototipo de laboratorio.

### Descripción:

El presente proyecto de grado aborda la implementación de un control PID para regular el nivel de un sistema de tanques, empleando un PLC S7-1200. Se realiza la configuración de elementos de actuación (válvula proporcional marca Danfoss EV260B), sensado (sensor ultrasónico SIEMENS The probe) y control (PLC SIEMENS S7-1200), para constituir en laboratorio un lazo de recirculación de agua y se define un protocolo de inicialización para la operación del sistema. Se verifica la sensibilidad del sistema realimentado ante cambios en la ganancia de lazo, como preámbulo y base fundamental para cualquier acción de control. Posteriormente se diseña un controlador PID utilizando el primer método de Ziegler & Nichols con el cual fue posible conocer los parámetros ganancia de lazo, tiempo de integración y tiempo derivativo, se implementa en el sistema al realizar una configuración en el software Step 7 v13 de Siemens del bloque PID Compact, que permite verificar el desempeño del sistema ante perturbaciones en la resistencia hidráulica de acople entre los tanques secundarios. El prototipo de laboratorio construido es un modelo a escala similar a los que se utilizan en la industria actualmente y las pruebas desarrolladas permiten ilustrar en la práctica, procedimientos teóricos fundamentales en procesos de enseñanza-aprendizaje del área de sistemas de control e instrumentación, de esta forma los estudiantes desarrollarán destrezas cognitivas al asociar las prácticas con las situaciones a las que se pueden enfrentar en un ambiente industrial.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Ph.D.

## ABSTRACT

Title: LEVEL CONTROL OF A COUPLED TANK SYSTEM USING THE PLC SIEMENS S7-1200\*.

Authors: SILVIA JOHANNA ACELAS SUÁREZ, ANA MILENA MENDOZA DÍAZ\*\*

### Key words:

Tank level control, Programmable logic controller, Experimental PID, Control laboratory prototype.

### Description:

In this work the water level of a coupled tank system is regulated by a PID implemented in the PLC SIEMENS S7-1200. First of all, elements for actuation (proportional valve Danfoss EV260B), sensing (ultrasonic transducer SIEMENS The probe) and control (PLC SIEMENS S7 - 1200) are configured to allow the continuous recirculation of water in a closed path, with further definition for a corresponding operational protocol. In order to perform control tasks, it was first performed a verification of the sensitivity of the feedback loop to gain changes and capabilities for damping the effects of disturbances applied in the hydraulic resistance, representing the coupling between secondary tanks of the system. After of this, a PID was calculated with the first method of Ziegler and Nichols' with this was possible know the parameters the loop gain, integration time and derivation time, and implemented in the PLC using to SIEMENS' software Step7 V13, employing the PID Compact block showing appropriate performance to keep the desired level despite restrictions experienced in the flow provided by the input valve. The prototype of the laboratory is a scale model similar to used in the industries. Results and procedures presented are contributions for practical illustration of theoretical concepts regarding the control systems and instrumentation fields, it's a form in that students are going to develop cognitive skills to associate the practices with real situations.

---

\* Degree work.

\*\* Physico-Mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Advisor: Ricardo Alzate Castaño, Ph.D

## INTRODUCCIÓN

El siglo XXI es indiscutiblemente la era de la innovación. Múltiples adelantos tecnológicos permiten al ser humano hacer más viable su existencia en el planeta, impactando campos como las comunicaciones, el transporte, la agricultura, la vivienda, la salud y el medioambiente. Todo esto crea una necesidad para las entidades dedicadas a la formación de nuevos profesionales en áreas de aplicación y generación de tecnología, por mantener un contacto permanente con soluciones de vanguardia. En particular, el campo de la automatización y el control ha crecido vertiginosamente en la última década, incorporando herramientas como las comunicaciones inalámbricas, el internet o los sistemas embebidos, para llevar a cabo su fin en entornos de aplicación cada vez más complejos, en tópicos de alto interés y con multiplicidad de aplicaciones como son las redes inteligentes (Smart grid), las ciudades inteligentes (Smart cities) o los sistemas autónomos de transporte.

En este contexto, existen compañías como: Siemens AG, Rockwell Automation, Honeywell, ABB y Schneider Electric, entre otras, reconocidas por el desarrollo de tecnologías aplicables en entornos industriales. Sin embargo, el costo para estos equipos es consistente con el sector productivo sobre el cual se emplean, como puede ser la industria de alimentos, Oil & Gas, minería, metalmecánica, etc., haciendo que a pesar de contarse con programas que otorgan descuentos especiales para universidades, sea en general considerablemente alto el gasto que debe asumir una entidad educativa para acceder a dichas tecnologías, bien sea por adquisición o actualización de equipos, efecto que se magnifica en latitudes latinoamericanas y otras regiones del denominado “tercer mundo”. Como consecuencia de ello, se han desarrollado algunas iniciativas que buscan la

creación de laboratorios de bajo costo para universidades. En particular, es conveniente hacer referencia al trabajo del profesor Kevin Passino en la Universidad Estatal de Ohio - Estados Unidos, a través de su programa weLAB: Low-Cost Engineering Laboratory Project (<https://welab.engineering.osu.edu/>).

Al respecto, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander dispone de un espacio (aula 209 – edificio 27: Laboratorio de Alta Tensión) destinado para la realización de actividades prácticas en las asignaturas afines al Control y a la Instrumentación Electrónica. Actualmente el laboratorio cuenta con tres plantas, que se han adecuado con los recursos disponibles, para realizar tareas de análisis y control en: un sistema de péndulo invertido traslacional [1], un sistema de tanques en cascada [2] y un motor de corriente alterna [3]. Otros trabajos desarrollados en afinidad con el laboratorio incluyen “Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T” [4], “Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación electrónica de la E3T” [5] y “Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (totally integrated automation) y adaptación de un proceso industrial para desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control” [6].

De otro lado, los sistemas de nivel de líquido representan un ejemplo concreto de sistema de control con amplia difusión en medios industriales. Todo proceso que necesite almacenar sustancias en cualquiera de sus estados necesita realizar un registro sobre el nivel de depósito de las mismas. Algunos de los sectores en los que es de gran importancia mantener el nivel de líquido entre parámetros previamente establecidos son, entre otros: la industria petroquímica [7], la producción de papel [8], el tratamiento de aguas [9] y los procesos químicos [10],

en los que por el grado de riesgo por contacto humano se requieren procedimientos automatizados.

Respecto a soluciones didácticas para sistemas de nivel de líquido, se destaca el sistema de laboratorio virtual desarrollado en la Universidad de Murcia en España en el cual se propone un sistema de tres tanques acoplados con acceso remoto vía internet [11]. También en [12] se implementa el diseño y la instrumentación de un sistema de tanques acoplados para prácticas de laboratorio universitario. En [13] se aplica un control predictivo para mantener el nivel de líquido en un prototipo de proceso industrial. En Colombia se destacan algunos trabajos, entre ellos [14] de la UPB-Medellín donde se plantea una solución para la industria de tintorerías local a partir de un control de nivel y [15] de UNAL-Manizales donde se diseña un sistema automatizado de control de nivel para la industria de lácteos en el eje cafetero. En la Universidad Industrial de Santander se han desarrollado varios proyectos de grado relacionados con el control y la automatización de sistemas de nivel de líquido, entre ellos se destacan: [16, 17, 18, 2]. Particularmente, en [2] se realizó la configuración inicial de un prototipo de laboratorio, sobre el cual se propondrá en el presente proyecto un trabajo complementario que buscará obtener resultados similares para el control de nivel en los tanques empleando un PLC [19] de tecnología SIEMENS [20].

## 1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La adecuación de una infraestructura para la realización de prácticas de laboratorio en el área de control y automatización representa costos elevados, si se piensa en desarrollos con equipos de envergadura industrial. Como alternativa, es posible proponer la construcción de bancos de laboratorio individuales que permitan ejemplificar, a escala, problemas encontrados en la industria, con un costo inferior y que posteriormente puedan ser replicados, constituyendo a su vez una manera didáctica de enfrentar al estudiante con problemáticas del mundo real. En este caso específico, a través de la implementación de un prototipo de laboratorio se busca responder a inquietudes como: ¿Es posible emplear un PLC para controlar la dinámica de dos tanques en cascada? ¿Cómo se deben configurar los elementos de sensado, actuación y control en el sistema? ¿Cómo se calcula e implementa un sistema de recirculación de flujos? ¿Cómo implementar un PID en un PLC?

El presente proyecto de grado busca realizar aportes hacia la formación de recurso humano en uso de tecnologías industriales, incrementando la capacidad potencial de la E3T y el grupo de investigación CEMOS en el área de supervisión experta, automatización y control, con base en los objetivos propuestos a continuación.

## **2. OBJETIVOS:**

### **2.1 Objetivo general**

Controlar el nivel de líquido de un sistema de tanques en cascada empleando un PLC SIEMENS s7-1200.

#### **2.1.1. Objetivos específicos**

- Diseñar el bucle para recirculación de agua en el sistema de tanques del laboratorio de instrumentación de la E3T-UIS
- Configurar la instrumentación requerida para la instalación y puesta en marcha de un lazo de control de nivel basado en el PLC SIEMENS s7-1200
- Ilustrar el procedimiento para realizar un control PID en el PLC SIEMENS s7-1200 utilizando como ejemplo el sistema de tanques del laboratorio de instrumentación de la E3T-UIS
- Sintonizar las constantes del controlador PID del nivel de agua del tanque
- Validar el desempeño del sistema controlado a partir de pruebas de laboratorio.

### **3. DISEÑO DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA**

Con el objetivo de realizar la distribución del fluido (agua) manteniendo condiciones de nivel en el reservorio de salida, se aborda en el presente Capítulo el diseño y la configuración en laboratorio (instrumentación y sensado) para un prototipo de sistema de control de nivel. Inicialmente, se justifica la configuración seleccionada para el sistema a partir de problemas de aplicación similares. Posteriormente se describe el equipamiento empleado para manipular las variables del proceso y los protocolos de operación, como preámbulo para las tareas de control presentadas en Capítulos posteriores.

#### **3.1. SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO**

A nivel industrial, existen múltiples aplicaciones fundamentadas en la manipulación de fluidos (de naturaleza líquida o gaseosa) a partir del comportamiento de variables como presión, flujo, temperatura, nivel, concentración, etc. [21].

En particular, los sistemas para el tratamiento de aguas se constituyen en un pilar fundamental en el contexto de sociedades modernas con creciente demanda de recursos.

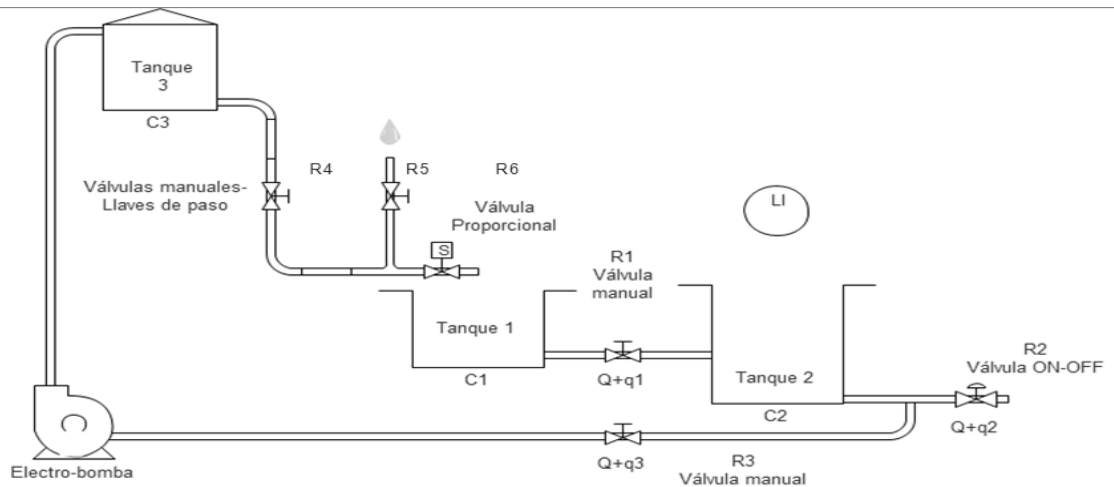
A pesar que el 71% de la superficie del planeta está cubierta de agua (es decir más de sus tres cuartas partes), sólo un 3% de esta es apta para el consumo humano. Por tanto, se hace indispensable un buen uso y reutilización para el agua potable. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales están destinados a este propósito, empleando tecnologías que permiten remover material contaminante a través de procesos físico-químicos y/o biológicos [22].

Posteriormente el agua apta para el consumo humano es distribuida a través de circuitos de circulación de agua, para abastecer poblaciones con garantía de

suministro permanente a pesar de variaciones en la demanda [23]. Para ello, se deben regular las condiciones de nivel de los tanques de almacenamiento y presión del fluido en las tuberías.

De esta manera, pueden dimensionarse estaciones de bombeo para satisfacer la demanda de pequeños asentamientos. Tomando este caso como contexto, se propone la estructura para un sistema de abastecimiento de agua simple mostrada en la Fig. 1, constituida por un tanque de abastecimiento principal (tanque 3) que alimenta dos tanques secundarios (tanque 1 y tanque 2), con recirculación impulsada a través de una electro-bomba. El objetivo de control está en mantener invariante el nivel del tanque 2 a pesar de los cambios presentados en las resistencias hidráulicas del sistema (representadas por R1 y R3 en el diagrama) asemejando cambios de demanda de consumo en el sistema de distribución de agua. Como dispositivo de actuación se dispone una válvula proporcional y en este diagrama el sensor está representado por LI (Indicador de nivel).

**Figura 1.** Sistema de recirculación de agua propuesto



A continuación se describe la selección de elementos para constituir en laboratorio el sistema propuesto.

**3.1.1. Dispositivo de sensado.** Para sensar el nivel del tanque de salida (tanque 2) se empleó un sensor ultrasónico SIEMENS *The Probe* de referencia 7ML12011EF00, según mostrado en la Fig. 2. Se escogió este sensor ya que la válvula proporcional instalada en el prototipo original opera en un rango de 4 a 20 mA y dicho sensor permite obtener una medida de nivel de rango ajustable entre 0.30 y 5 m entregada en corriente de 4-20 mA.

**Figura 2.** Sensor de nivel ultrasónico



Fuente: SIEMENS. Instrumentos para medida de nivel SITRANS L. Medición continua - Transmisores de nivel: The Probe<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> SIEMENS. Instrumentos para medida de nivel SITRANS L. Medición continua - Transmisores de nivel: The Probe. [en línea] Siemens: Catálogo Siemens FI 01 · 2006. [consultado: 3 marzo 2016] Disponible en: [http://soltechltda.com/pdf/Siemens\\_Transmisores\\_de\\_Nivel\\_Catalogo.pdf](http://soltechltda.com/pdf/Siemens_Transmisores_de_Nivel_Catalogo.pdf)

**3.1.2. Dispositivo de actuación.** Como dispositivo de actuación en el sistema de tanques se cuenta con una electroválvula proporcional DANFOSS de referencia EV206B. Esta válvula hizo parte del trabajo de grado anterior [2], según mostrado en la Fig. 3. Este dispositivo permite obtener una apertura de válvula linealmente proporcional a la corriente aplicada en sus terminales en el rango 4-20 mA.

**3.1.3. Dispositivo de control.** Para realizar las tareas de control en el sistema se empleó un PLC SIEMENS *SIMATIC S7 1200*, según mostrado en la Fig. 4. Este dispositivo se seleccionó porque cumplía con las necesidades del sistema. La configuración práctica del dispositivo implicó adicionar a la CPU (1214C), que sólo posee entradas analógicas para lectura del sensor, un módulo de entradas y salidas analógicas (SM1234) para enviar señales de salida (analógica) al actuador. Asimismo se empleó una interfaz HMI monocromática (KTP 400) para interactuar con el dispositivo en campo y un módulo Ethernet (CSM 1277) para interconectar la CPU con dicha interfaz y a su vez poder programar ambos desde un PC. La configuración de los dispositivos (CPU, Interfaz HMI) se realizó empleando programación en escalera a través de la herramienta *SIMATIC STEP7* versión 13, según ilustrado en el Anexo A. La ventaja de la pantalla HMI no solo es la practicidad para operar, sino que también incluye la captura de datos a través de un puerto USB.

**Figura 3.** Electroválvula proporcional



Fuente: DANFOSS. Válvulas solenoides proporcionales servo-accionadas de 2 vías. Tipo EV260B<sup>2</sup>.

**3.1.4. Elementos para almacenamiento de líquido.** Para almacenar el líquido (agua) a recircular, se empleó un tanque principal de abastecimiento (tanque 3 en Fig. 1) de marca Eternit y capacidad de 250 L similar al mostrado en la Fig. 5. Asimismo, como tanques secundarios (tanques 1 y 2 en Fig. 1, estos hicieron parte del proyecto anterior [2]) se emplearon reservorios cilíndricos construidos en acrílico de sección de área transversal de 1244 cm<sup>2</sup> y alturas respectivas dadas por 91 cm (equivalente a 113.2 L de capacidad en tanque 1) y 133.5 cm (equivalente a 166 L para capacidad en tanque 2), según mostrado en la Fig. 6.

---

<sup>2</sup> DANFOSS. Válvulas solenoides proporcionales servo-accionadas de 2 Vías. Tipo EV260B. [en línea] Danfoss: Folleto técnico Danfoss A/S (RC-MDP / RJA) 10 - 2014. [consultado: 3 marzo 2016] Disponible en: <http://www.industriasociadas.com/wp-content/uploads/2016/01/EV-260B.pdf>

**Figura 4.** Controlador lógico programable para tareas de control



Fuente: SIEMENS. Simatic S7 Controlador programable S7-1200: Manual de sistema<sup>3</sup>.

**Figura 5.** Tanque de almacenamiento principal



Fuente: ETERNIT. Tanques plásticos Ecoplast <sup>4</sup>.

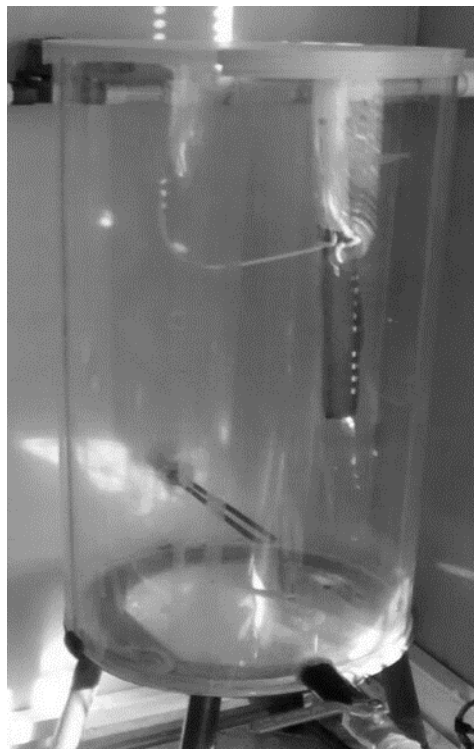
---

<sup>3</sup> SIEMENS. Simatic S7 Controlador programable S7-1200. [en línea] Siemens: Catálogo Siemens AG 10 – 2009 [consultado: 4 marzo 2016] Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>

<sup>4</sup> ETERNIT. Tanques plásticos Ecoplast. [en línea] Eternit: Folleto técnico. [consultado: 5 marzo 2016] Disponible en: <http://contactocenit.com/wp-content/uploads/2013/12/18.2.Ficha-T%C3%A9cnica-Tanque-Pl%C3%A1stico-ETERNIT.pdf>

**3.1.5. Elemento para impulsión del fluido.** Se empleó una electrobomba PEDROLLO monofásica de 0.5 HP, de referencia PKM60 según se muestra en la Fig. 7. Este elemento permitió proporcionar el empuje suficiente para el agua al interior del circuito de recirculación, de manera que fuera posible garantizar un llenado permanente del tanque de abastecimiento principal a pesar del efecto de la gravedad.

**Figura 6.** Tanques de almacenamiento secundarios



**Figura 7.** Electrobomba empleada para impulsión de agua



Fuente: PEDROLLO. Electrobomba con rodete periférico. Catálogo general 60 Hz, PKM60 <sup>5</sup>.

**3.1.6. Elementos para interrupción del flujo de agua.** Adicional a la electroválvula presentada en la Sección 2.1.2, se emplearon válvulas complementarias para realizar interrupción del fluido en el lazo de recirculación. En particular, se utilizaron válvulas manuales como la mostrada en la Fig. 8 para: interrumpir el paso de agua desde la red de acueducto (R5 en Fig. 1) y desde el tanque de almacenamiento (R4 en Fig. 1), modificar las resistencias hidráulicas entre los tanques (R1 en Fig. 1) y a la salida del tanque 2 (R3 en Fig. 1). También se empleó una electroválvula de dos posiciones como la presentada en la Fig. 9, para desconectar la salida del circuito del drenaje (R2 en Fig. 1). Es importante mencionar que las tuberías del circuito de recirculación fueron constituidas en PVC de 1”.

---

<sup>5</sup> PEDROLLO. Electrobombas con rodete periférico. [en línea] Pedrollo: Catálogo general 60 Hz. [consultado: 5 marzo 2016] Disponible en: [http://www.pedrollo.com/public/allegati/PK\\_ES\\_60Hz.pdf](http://www.pedrollo.com/public/allegati/PK_ES_60Hz.pdf)

**Figura 8.** Válvula manual



Fuente: HELBERT. Válvula Red White Toyo<sup>6</sup>.

El sistema final construido en laboratorio (LAT 209, E3T UIS) se presenta en la Fig. 10, empleando notaciones equivalentes a las utilizadas en el diagrama general de la Fig. 1. De esta manera, se constituye el bucle para recirculación de agua en el sistema de tanques que posibilita posteriores tareas de control de nivel de líquido. El tanque de abastecimiento principal no aparece mostrado en la figura debido a que, por motivos de espacio, se posicionó por fuera (en el techo) del recinto.

---

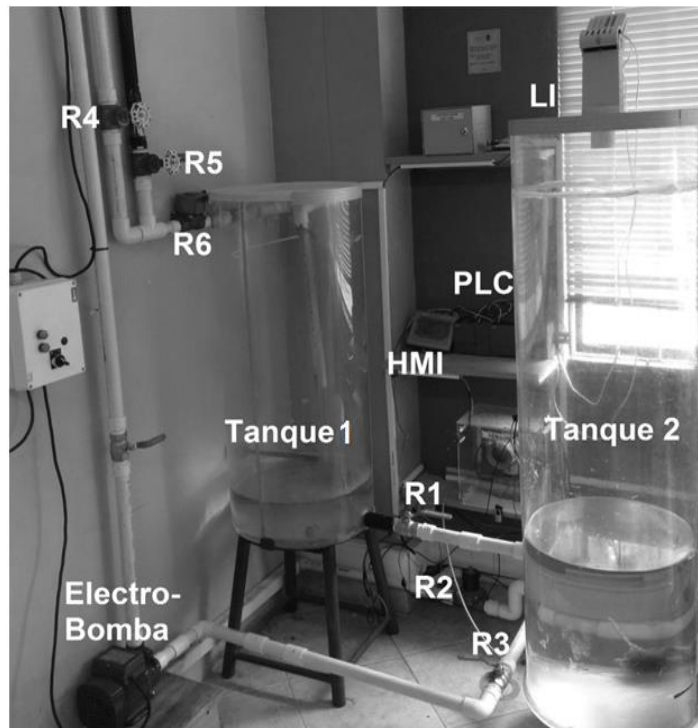
<sup>6</sup> HELBERT. Válvula Red White Toyo. 07 – 2015 [consultado: 5 marzo 2016] Disponible en: [http://www.helbertycia.com/site/images/stories/listas\\_de\\_precios/Listas%20de%20precios%202015/Importados/2015/Lista\\_precios\\_Red\\_white\\_2015.pdf](http://www.helbertycia.com/site/images/stories/listas_de_precios/Listas%20de%20precios%202015/Importados/2015/Lista_precios_Red_white_2015.pdf)

**Figura 9.** Electroválvula de dos posiciones



Fuente: VALVECO. Válvula solenoide UNI-D Modelo UW<sup>7</sup>.

**Figura 10.** Sistema final constituido en laboratorio



---

<sup>7</sup> VALVECO. Válvula solenoide UNI-D Modelo UW. [consultado: 5 marzo 2016] Disponible en: [http://www.valveco.com.co/p/valvula-solenoide-uni-d-uso-general\\_4388027/valvula-solenoide-uni-d-modelo-uw\\_4396852](http://www.valveco.com.co/p/valvula-solenoide-uni-d-uso-general_4388027/valvula-solenoide-uni-d-modelo-uw_4396852)

## 3.2. CONFIGURACIÓN DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL

Una vez seleccionados y acoplados en laboratorio, los elementos del sistema de recirculación de líquido deben ser configurados de manera apropiada para permitir ajustar las condiciones de operación del sistema a valores deseados.

**3.2.1. Protocolo de arranque del sistema.** Inicialmente, se define un protocolo de inicio (arranque) del sistema para determinar las características de operación nominales. Dicho protocolo de inicio será requisito indispensable para realizar cualquier procedimiento experimental.

Por tanto, partiendo de un sistema con ausencia de líquido almacenado, el primer paso en la operación del sistema consiste en realizar la captura de agua que será empleada en el sistema de recirculación. Para ello, se cierran las válvulas R2, R3 y R4 en la Fig. 1, manteniendo en máxima apertura R1, R5 y R6, para aislar el bucle de recirculación y permitir un llenado de los tanques 1 y 2. Este proceso se mantiene hasta que el tanque 2 adquiere una altura de 88 *cm*, garantizando un volumen de líquido almacenado de 193 *L* como valor inferior a la capacidad máxima del tanque de almacenamiento principal, para evitar el rebose. En ese instante, se cierra la válvula R5.

A partir de ese momento, puede ejecutarse el segundo paso correspondiente con la habilitación del bucle de recirculación, abriendo R3, R4 (manteniendo cerrada R2) y accionando posteriormente la electro-bomba para succionar líquido en dirección al tanque de almacenamiento principal. Es importante resaltar que el accionamiento de la electro-bomba debe realizarse sólo hasta cuando exista líquido en las tuberías de recirculación, pues por las características propias de diseño del dispositivo no se debe operar en condiciones diferentes. Una vez llenado el tanque de almacenamiento y tomando en cuenta que R6 permanece en máxima apertura se

procede abrir R4 en su totalidad, se espera que el fluido circulante comience a transferir (por gravedad desde el techo del recinto) cambios de nivel en la cascada de los tanques 1 y 2.

Como tercer y último paso del protocolo de inicialización, se posicionan las válvulas R1, R3 y R6 en valores consistentes con las características deseadas de nivel. Estas corresponderán con las condiciones de operación nominal. En el caso particular considerado, se seleccionaron los porcentajes de apertura incluidos en la Tabla 1 a partir de ensayo y error, permitiendo obtener para la cantidad de líquido recirculante niveles en estado permanente para los tanques 1 y 2 dados respectivamente por 50 *cm* y 70 *cm*. Las aperturas de las válvulas manuales se miden con respecto al ángulo de su recorrido mecánico, mientras que para el caso de la electro-válvula representa un valor de corriente dado por 16.1 *mA*.

**Tabla 1.** Porcentajes de apertura nominal para válvulas del sistema

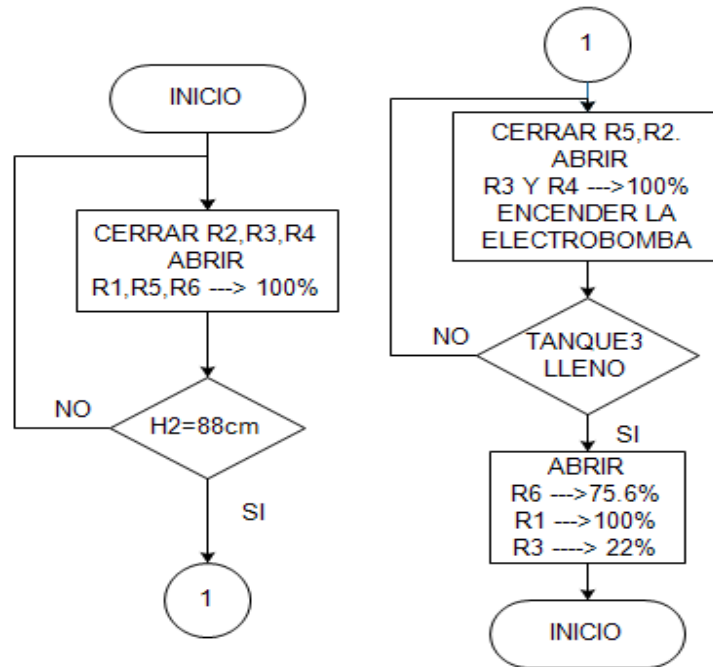
Válvula	Apertura $\approx$ [%]
R1	100
R3	22
R6	75

Los valores obtenidos pueden ser modificados para generar diferentes combinaciones de apertura y nivel. Dichas combinaciones corresponden con valores aleatorios, tomando en cuenta que en el presente proyecto no se realizó un estudio cuantitativo de los valores de flujo del sistema.

La Fig. 11 muestra a través de un diagrama de flujos el protocolo de operación (arranque) del bucle de recirculación de agua en el sistema de tanques del laboratorio.

Ahora bien, el sistema de fluido recirculante deberá ser actuado y sentido de manera apropiada para facilitar la ejecución de posteriores acciones de control.

**Figura 11.** Flujoograma que describe el protocolo de inicialización del sistema

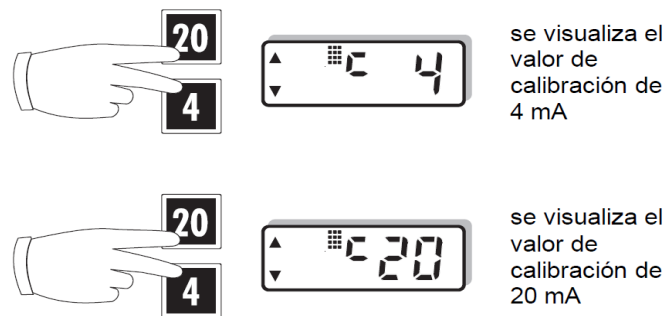


**3.2.2. Calibración de rango de sensado.** El sensor ultrasónico empleado (SIEMENS *The Probe*) permite configurar un rango de medida con alta precisión, ajustable con salida de corriente entre 4 y 20 mA. En el sistema de tanques el sensor se posiciona en la parte superior del tanque 2, asumiendo un rango de medida en distancia dado por [30, 130] cm. La configuración se realiza en modo tal que la distancia máxima (mínimo nivel) corresponde con 20 mA y la distancia mínima (máximo nivel) corresponde con una lectura de 4 mA. Se realizó de esta forma debido a que el llenado de tanque es inversamente proporcional a la medición que realiza el sensor.

Para configurar el rango del sensor se presionan simultáneamente las teclas “4” y “20” hasta visualizar “c 4” o “c 20” en el panel del sensor (ver Fig. 12).

Posteriormente, se ajusta el valor de calibración pulsando la tecla “20” (para aumentar el valor de la altura) o la tecla “4” (para disminuir el valor de la altura) hasta asignar los límites deseados, en este caso los valores son de 30 y 130 *cm* a los valores de corriente de 4 y 20 *mA*, respectivamente.

**Figura 12.** Calibración de rangos del sensor



Fuente: SIEMENS. Ultrasonic Transmitters. The Probe<sup>8</sup>.

Las conexiones entre el instrumento y la unidad de control son realizadas de manera analógica simple de dos hilos, en medida de señal por corriente.

### 3.2.3. Calibración de rango de actuación

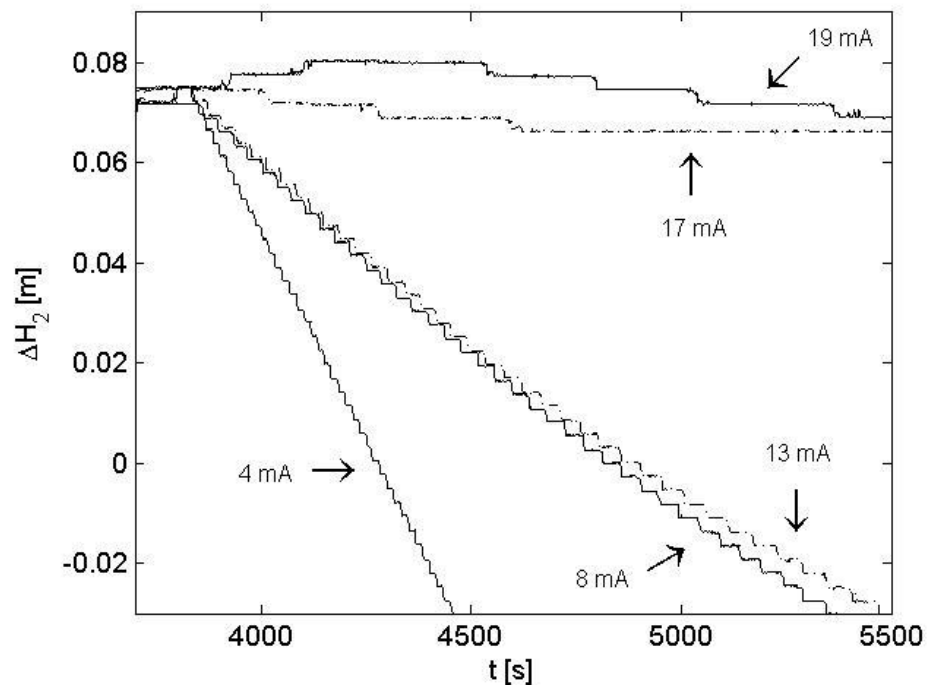
A pesar que la electroválvula empleada (DANFOSS *EV206B*) es un dispositivo de altas prestaciones, el sistema de flujo por gravedad implementado limita el caudal que circula por la misma. Por tanto, para determinar el rango real de actuación en R6 fue necesario realizar pruebas experimentales consistentes en la variación del valor nominal de corriente aplicado como salida del PLC a la electroválvula (en el

---

<sup>8</sup> SIEMENS. Ultrasonic Transmitters: The Probe. [en línea] Siemens: Catálogo Siemens 03 · 2010. [consultado: 3 marzo 2016] Disponible en: <http://www.lesman.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-Milltronics-The-Probe/Siemens-The-Probe-man-7ML19985GD62-2010-03.pdf>

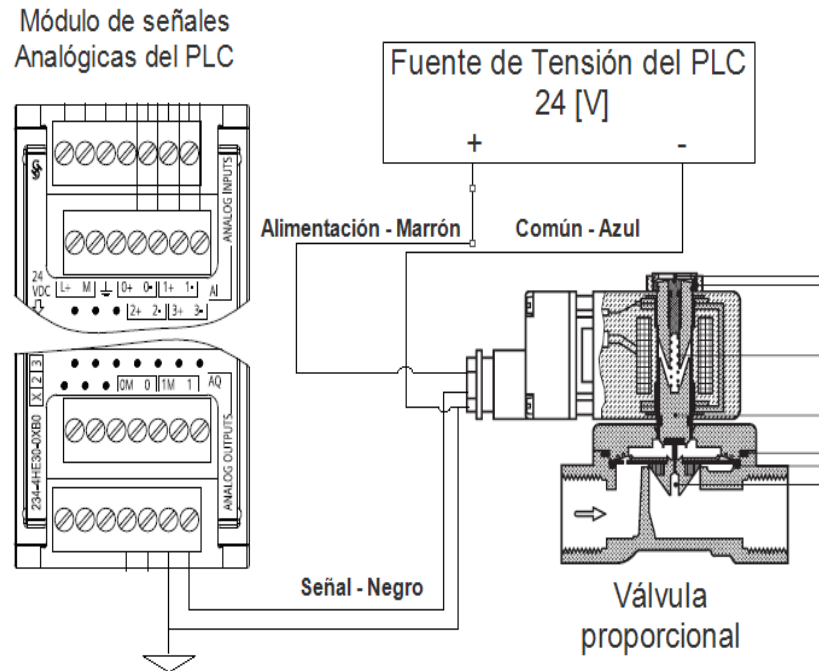
rango 4-20 mA), y observando variaciones en los niveles de altura correspondientes. Dicho procedimiento se realizó iniciando con una altura del tanque 2 en 70 cm y en el eje de la ordenada en la gráfica de ilustración un delta de altura que representa el cambio desde el punto en que inicia la prueba hasta la altura que finaliza esta (con resultados ilustrados en la Fig. 13) permitió verificar una zona muerta comprendida entre 4 y 14 mA, reduciendo el rango real de actuación del dispositivo a [14, 20] mA.

**Figura 13.** Comportamiento del sistema ante diferentes entradas de corriente



Las conexiones entre el instrumento y la unidad de control se ilustran en la Fig. 14. Como se puede observar la alimentación de este elemento de control se realiza con la fuente de 24 [V] del PLC, en el caso de la señal de 4 a 20 mA y el neutro van conectados a la bornera de salida con el número 1 y 1M del módulo de entradas y salidas analógicas, respectivamente.

**Figura 14.** Conexión de electroválvula a PLC



### 3.3. RESPUESTA EXPERIMENTAL DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO

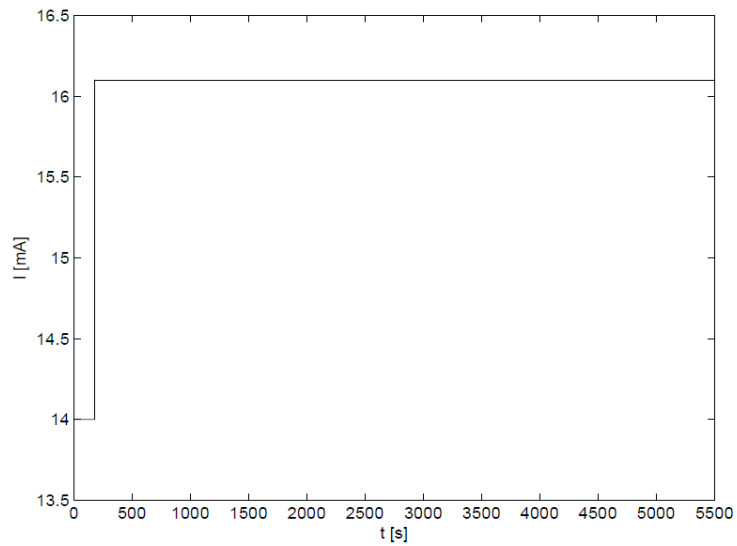
Con los instrumentos calibrados, se procede a realizar captura de los datos de respuesta para el sistema en lazo abierto ante un estímulo de tipo escalón, empleando almacenamiento de datos según ilustrado en la Sección A.1.4.

Para ello, partiendo de condiciones de estado estacionario en el lazo de recirculación de líquido, se realiza un cambio instantáneo en la corriente de la válvula entre 14 y 16.1  $mA$  (ver Fig. 15) que permite obtener una respuesta dinámica en el nivel del tanque 2 de tipo sobreamortiguado, que varía 2.0  $cm$  en aproximadamente 4000 s, tal y como se observa en la Fig. 16.

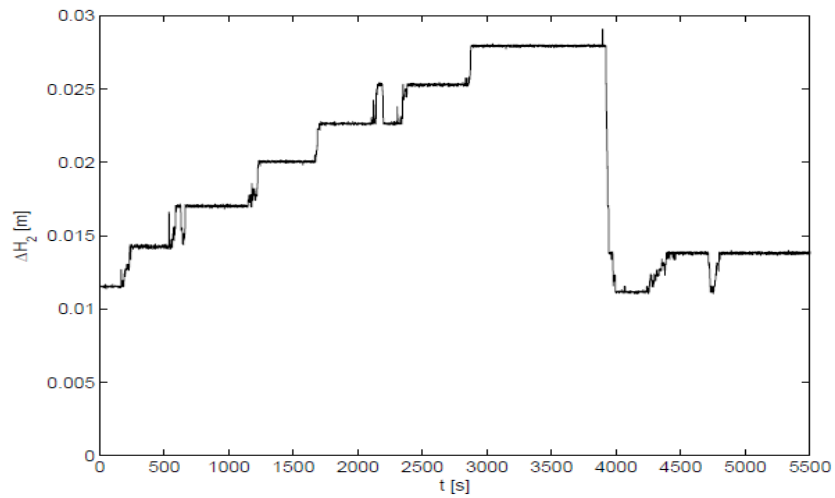
Una vez el sistema se posiciona en la nueva posición de equilibrio, se aplica una perturbación correspondiente con cambios de porcentaje de apertura en R1, pasando de 100% a 80% en  $t = 3800$  s. Este cambio permite visualizar una pérdida

del nivel como consecuencia de la incapacidad del sistema de lazo abierto para autorregularse, justificando la incorporación de una acción de control realimentado para compensar el efecto de la perturbación (como será desarrollado en Capítulos posteriores).

**Figura 15.** Cambio de tipo escalón de corriente a la entrada de la electroválvula



**Figura 16.** Respuesta escalón del sistema en lazo abierto perturbado.



## 4. ANÁLISIS DEL LAZO DE CONTROL DE NIVEL

El sistema instrumentado y configurado para condiciones nominales de operación previamente identificadas, es caracterizado en el presente Capítulo a partir de un modelo matemático que verifica los parámetros de su respuesta ante un estímulo escalón. Esta información es posteriormente empleada para analizar el comportamiento del lazo realimentado perturbado ante cambios de ganancia (acción proporcional), contrastando resultados experimentales con simulaciones del modelo. Verificar la capacidad de reacción del sistema ante una acción proporcional simple es tarea fundamental previa a la implementación de un control PID.

### 4.1. MODELADO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Para modelar el sistema de tanques se parte del principio de conservación de la masa (o balance de masa), el cual expresa que el volumen almacenado  $V_T$  es igual al volumen de entrada  $V_i$  menos el volumen de salida  $V_o$ :

$$V_T = V_i - V_o \quad (1)$$

A su vez, la expresión que define el volumen almacenado en un tanque se puede expresar como [24]:

$$V_T(t) = Ah(t) \quad (2)$$

donde  $A$  es el área de sección transversal y  $h(t)$  la altura del líquido. Por tanto, para analizar el comportamiento del sistema en el tiempo (dinámica) se requiere definir la manera en la que el volumen contenido cambia, es decir:

$$\frac{d}{dt} V_T(t) = A \frac{d}{dt} h(t) \quad (3)$$

tras considerar un área de sección transversal constante (es decir, misma área para cualquier altura).

Combinando (1), (2), (3) y teniendo en cuenta que el caudal se define a través del cambio de volumen en el tiempo ( $q(t) = \frac{d}{dt}V$ ), es posible escribir:

$$A \frac{d}{dt} h(t) = q_i(t) - q_o(t) \quad (4)$$

Ahora bien, recordando que la capacitancia hidráulica de un tanque se define como la relación de cambio entre el líquido almacenado y la altura [24]:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{\frac{d}{dt}V(t)}{\frac{d}{dt}h(t)}$$

que para geometrías constantes corresponde con el área sección transversal del tanque, y también, que la resistencia hidráulica a través de un camino se define como la relación de cambio entre el nivel en sus extremos y el flujo circulante [24]:

$$R = \frac{\Delta h}{q(t)}$$

que para flujos laminares se puede considerar constante, es posible reescribir (4) en el modo siguiente:

$$C \frac{d}{dt} h(t) = q_i(t) - \frac{\Delta h}{R} \quad (5)$$

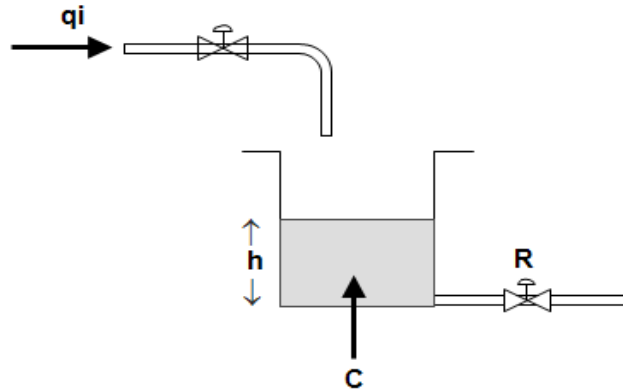
o equivalentemente:

$$C \frac{d}{dt} h(t) = q_i(t) - \frac{h(t)}{R} \quad (6)$$

tras considerar altura nula en uno de los extremos de  $R$  (desconexión hidráulica). Esta última ecuación permite modelar el comportamiento temporal (dinámica) del nivel  $h(t)$  del tanque mostrado en la Fig. 17 como respuesta al caudal de entrada  $q_i(t)$  en términos de los parámetros  $C$  y  $R$ . En el dominio de Laplace y para condiciones iniciales cero, es posible formular la siguiente función de transferencia equivalente para el modelo:

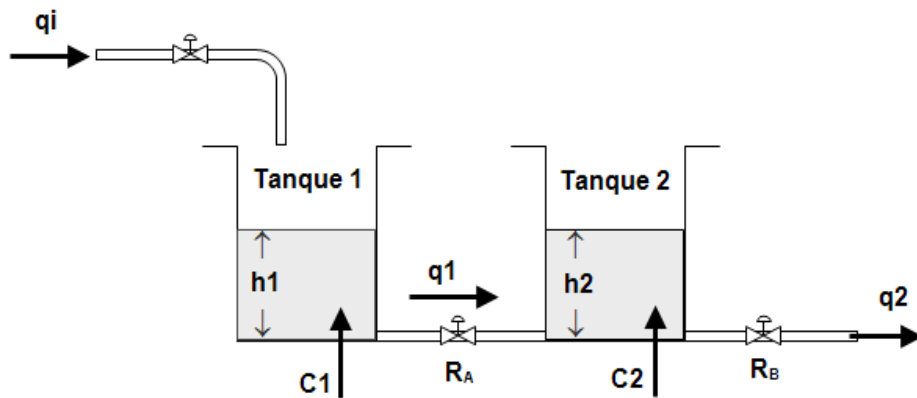
$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R}{RCs + 1}$$

**Figura 17.** Modelo dinámico de tanque



**4.1.1. Modelo de dos tanques.** Los resultados anteriores pueden ser generalizados para obtener el modelo de dos tanques conectados en serie donde la salida del primero es la entrada del segundo, tal y como se presenta en la Fig. 18.

**Figura 18.** Modelo dinámico de dos tanques



Por tanto, a partir de (5) se tiene  $\Delta h = h_1(t) - h_2(t)$  y (6) puede reescribirse como:

$$C_1 \frac{d}{dt} h_1(t) = q_i(t) - \frac{(h_1(t) - h_2(t))}{R_A} \quad (7)$$

A su vez es posible formular para el tanque 2 la siguiente ecuación dinámica:

$$C_2 \frac{d}{dt} h_2(t) = \frac{(h_1(t) - h_2(t))}{R_A} - \frac{h_2(t)}{R_B} \quad (8)$$

La expresión (7) se puede reescribir como sigue:

$$C_1 \frac{d}{dt} h_1(t) + \frac{h_1(t)}{R_A} = q_i(t) + \frac{h_2(t)}{R_A} \quad (9)$$

Aplicando transformada de Laplace a (8) y (9), considerando condiciones iniciales iguales a cero se obtiene:

$$C_2 s H_2(s) = \frac{H_1(s)}{R_A} - \frac{H_2(s)}{R_A} - \frac{H_2(s)}{R_B} \quad (10)$$

y

$$\begin{aligned} C_1 s H_1(s) + \frac{H_1(s)}{R_A} &= Q_i(s) + \frac{H_2(s)}{R_A} \\ H_1(s) \left( C_1 s + \frac{1}{R_A} \right) &= Q_i(s) + \frac{H_2(s)}{R_A} \\ H_1(s) &= \frac{Q_i(s) + \frac{H_2(s)}{R_A}}{C_1 s + \frac{1}{R_A}} \\ H_1(s) &= \frac{R_A Q_i(s) + H_2(s)}{R_A C_1 s + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

Reemplazar este último resultado en (10) permite obtener:

$$\begin{aligned} R_A R_B C_2 s H_2(s) &= R_B \left( \frac{R_A Q_i(s) + H_2(s)}{R_A C_1 s + 1} \right) - H_2(s) (R_B + R_A) \\ R_A R_B C_2 s H_2(s) + H_2(s) (R_B + R_A) &= R_B \left( \frac{R_A Q_i(s) + H_2(s)}{R_A C_1 s + 1} \right) \\ H_2(s) (R_A R_B C_2 s + R_B + R_A) (R_A C_1 s + 1) &= R_A R_B Q_i(s) + R_B H_2(s) \\ H_2(s) ((R_A R_B C_2 s + R_B + R_A) (R_A C_1 s + 1) - R_B) &= R_A R_B Q_i(s) \\ \frac{H_2(s)}{Q_i(s)} &= \frac{R_A R_B}{(R_A R_B C_2 s + R_B + R_A) (R_A C_1 s + 1) - R_B} \\ \frac{H_2(s)}{Q_i(s)} &= \frac{R_B}{R_A R_B C_1 C_2 s^2 + (R_A C_1 + R_B (C_1 + C_2)) s + 1} \end{aligned} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta la expresión que relaciona caudal de entrada con la corriente que se suministra a la válvula proporcional:

$$Q_i(s) = K_v I_i(s)$$

Se obtiene la función de transferencia que relaciona la salida de nivel del tanque 2 ( $H_2(s)$ ) ante un estímulo correspondiente con la corriente entregada a la válvula proporcional ( $I_i(s)$ )

$$\frac{H_2(s)}{I_i(s)} = \frac{K_v R_B}{R_A R_B C_1 C_2 s^2 + (R_A C_1 + R_B (C_1 + C_2))s + 1} \quad (13)$$

**4.1.2. Determinación de parámetros del modelo.** La relación matemática dada en (12) permite cuantificar el comportamiento dinámico del sistema en términos de parámetros físicos correspondientes con las resistencias ( $R_A$  y  $R_B$ ) y capacitancias ( $C_1$  y  $C_2$ ) hidráulicas del modelo.

Tomando en cuenta la geometría constante de los tanques en las Figs. 10 y 18, esta capacitancia hidráulica corresponde con su área de sección transversal, y por tanto:

$$C_1 = \pi r_1^2 = \pi(0.1985)^2 = 0.1237 \text{ m}^2,$$

$$C_2 = \pi r_2^2 = \pi(0.199)^2 = 0.1244 \text{ m}^2$$

Ahora bien, la Fig. 16 permitió observar la respuesta escalón del sistema experimental. A partir de ello se obtienen los siguientes parámetros:

$$t_s = 6738 \text{ s} \quad \Delta h_2(t_s) = 0.0257 \text{ m} \quad (14)$$

Por tanto, del teorema del valor final se tiene que:

$$\Delta h_2(t_s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta H_2(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left( \frac{R_B \Delta Q_i(s)}{R_A R_B C_1 C_2 s^2 + (R_A C_1 + R_B (C_1 + C_2))s + 1} \right)$$

De esta manera asumiendo una entrada de tipo escalón de amplitud  $U$ , es decir:

$$\Delta Q_i(s) = \frac{U}{s},$$

la expresión se reduce a:

$$\Delta h_2(t_s) = R_B U$$

Para determinar  $U$ , se debe tener en cuenta que según (14) el tanque 2 almacenó un cambio de volumen de:

$$\Delta V = C_2 \Delta h_2(t) = (0.1244)(0.0257) = 0.003195 \text{ m}^3$$

obteniendo en el tiempo un caudal equivalente de:

$$U = \frac{\Delta V}{t_s} = \frac{0.003195}{6738} = 4.74 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Así entonces:

$$R_B = \frac{\Delta h_2(t_s)}{U} = \frac{0.0257}{4.74 \times 10^{-7}} = 54163.9 \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$$

Teniendo información acerca de los parámetros  $C_1$ ,  $C_2$  y  $R_B$ , además de las características de respuesta escalón dadas en (12), es posible determinar un valor para  $R_A$  empleando la aproximación matemática propuesta en el Anexo B.

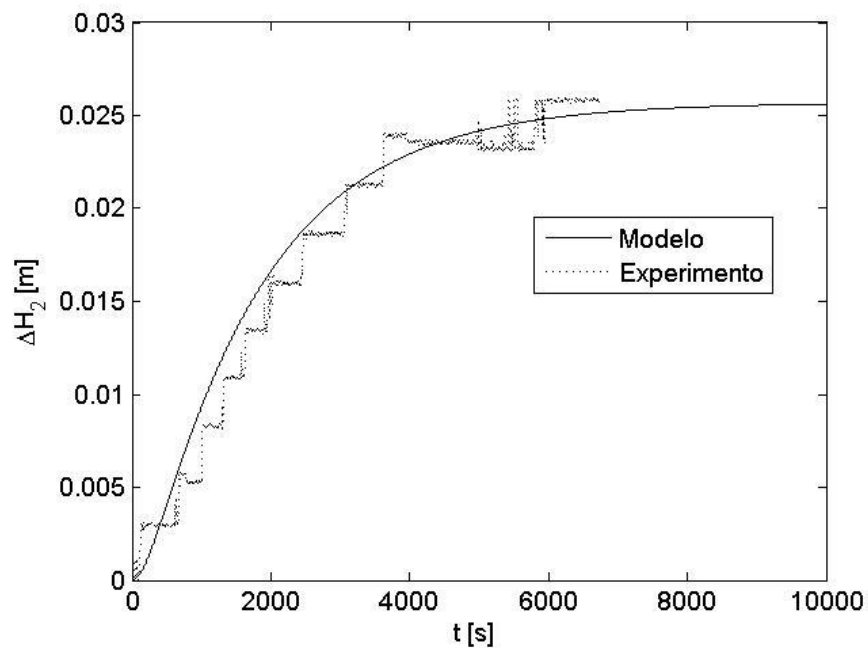
El valor determinado corresponde con  $R_A = 4590.3 \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$  permitiendo obtener la siguiente función de transferencia identificada para el modelo (en términos de variaciones):

$$\frac{\Delta H_2(s)}{I_i(s)} = \frac{3.19 \times 10^{-8}}{s^2 + 0.00495s + 2.56 \times 10^{-6}} \quad (15)$$

Las resistencias hidráulicas  $R_A$  y  $R_B$  empleadas en los desarrollos matemáticos del modelo, corresponden respectivamente con las válvulas  $R_1$  y  $R_3$  en el diagrama del sistema experimental de las Figs. 1 y 10.

**4.1.3. Validación de la respuesta escalón.** El modelo matemático para los valores identificados dados en (15), permite reproducir la respuesta experimental de cambio de nivel en el tanque 2 ante un cambio de escalón instantáneo en la corriente aplicada en la electro válvula R6 pasando de 14 mA a 16.1 mA. Como se observa de la Fig. 19, se replica una respuesta sobre-amortiguada con el mismo tiempo de establecimiento y valor final entre las predicciones teóricas del modelo y el comportamiento del sistema experimental. Este equivalente matemático permitirá realizar tareas de análisis numérico del sistema a través de simulación, para justificar valores de diseño de estrategias de control. En la tabla 2 se tiene el valor del error calculado a partir de los cambios de altura.

**Figura 19.** Validación del modelo del sistema



**Tabla 2.** Calculo del error del cambio de altura

$\Delta h_{experimental}$	$\Delta h_{simulación}$	% <i>Error</i>
0,02594	0,0251	3,2382

## 4.2. ANÁLISIS DE GANANCIA DEL LAZO DE CONTROL

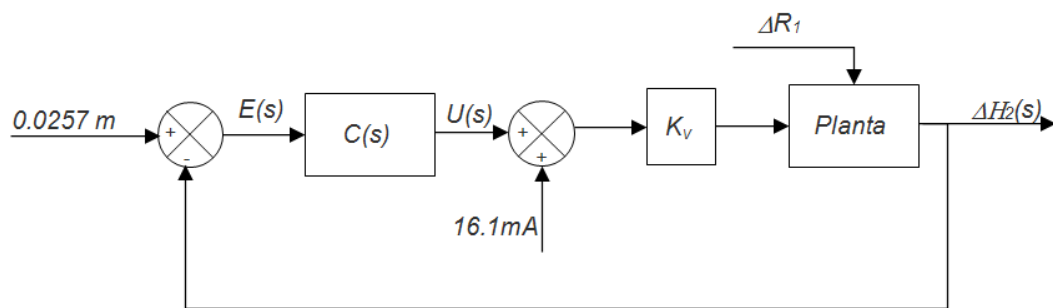
Al constituir el lazo de realimentación en el dispositivo de control (PLC) se configura por defecto una acción proporcional de ganancia unitaria, siendo la estrategia más simple e inherente a la realimentación negativa. Asimismo, de la función de transferencia del sistema (dada por (13) o (15)) se observa que el modelo corresponde con un sistema “tipo 0” y por tanto, representa un error de estado estacionario finito ante un estímulo de tipo escalón [24].

Para compensar esta situación y permitir el análisis del efecto de la ganancia proporcional (es decir  $C(s) = k_p$ ), se debe agregar una precarga correspondiente con el valor de entrada para condiciones nominales de lazo abierto (es decir, un valor de corriente correspondiente con 16.1 mA de señal de comando en la electroválvula R6). Además se tiene en cuenta un valor de ganancia  $K_v$  igual a  $2.25 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s \cdot mA}$ , que representa la ganancia de la válvula proporcional.

De esta manera se constituye el esquema ilustrado en la Fig. 20, donde la salida del sistema en estado estacionario corresponde con el nivel expresado en (14) ante condiciones nominales de operación (es decir sin perturbaciones), anulando el error del lazo realimentado. En el momento que se aplica una perturbación en el sistema (desviación en el valor nominal de R1) el error se modifica alterando el valor aplicado como entrada a la planta, lo cual repercute en una desviación en el nivel de salida  $\Delta h_2$ .

**4.2.1. Simulación para acción de control proporcional.** Inicialmente, se realizó simulación numérica para el modelo identificado del sistema utilizando los comandos de la herramienta *Control System Toolbox* de *MATLAB®*. A partir de ello, se obtuvieron las respuestas escalón presentadas en la Fig. 21 para diferentes valores de la ganancia de lazo  $k_p$  y empleando una perturbación de tipo escalón en el valor de corriente de entrada  $\Delta I_i$ , transcurridos 15000 s de simulación.

**Figura 20.** Sistema realimentado para análisis de la acción proporcional



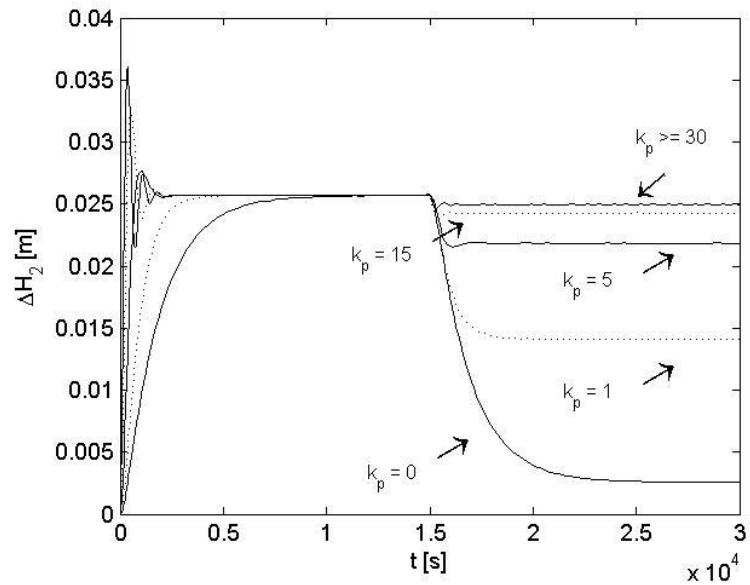
El cambio en el caudal de entrada en la planta, es una consecuencia del cambio de resistencia hidráulica considerado experimentalmente.

Como se observa, a partir de la configuración sugerida en la Fig. 20 el sistema se establece en condiciones nominales independiente de la ganancia de lazo. Para el caso de lazo abierto ( $k_p = 0$ ), la perturbación genera una caída de nivel apreciable que se va reduciendo en la medida que se aumenta el valor de la ganancia de lazo. Asimismo, el cierre de lazo ( $k_p = 1$ ) ocasiona una reducción por defecto del tiempo de establecimiento del sistema. El efecto de la ganancia proporcional se satura para valores a partir de  $k_p \geq 30$ .

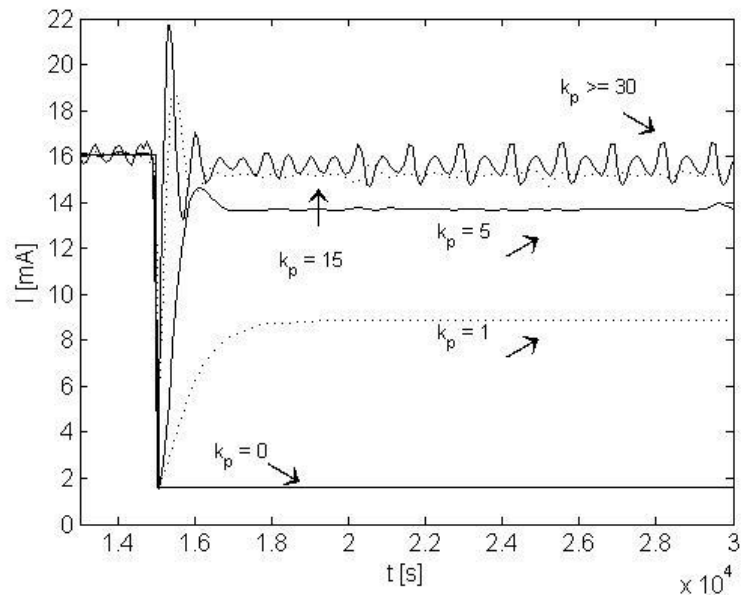
El comportamiento del sistema realimentado es una consecuencia de su esfuerzo de control, visualizado en la Fig. 22. Esta forma de onda permite verificar la

recuperación del valor nominal de entrada en la planta, a medida que se incrementa la ganancia de lazo  $k_p$ .

**Figura 21.** Simulación respuesta ante acción proporcional



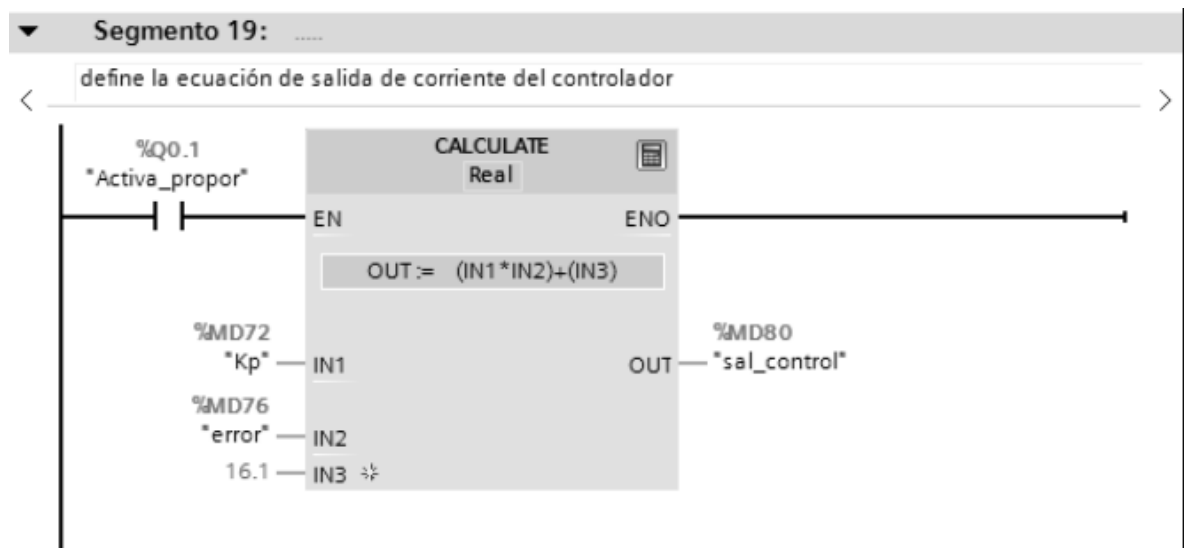
**Figura 22.** Simulación de la corriente que entrega el controlador proporcional



**4.2.2. Verificación experimental para control proporcional.** Posteriormente, el diagrama de la Fig. 20 fue codificado en el PLC mediante programación de la herramienta *SIMATIC STEP 7* (ver Anexo A) permitiendo configurar la rutina ilustrada en la Fig. 23, donde se observa el bloque central correspondiente con el cálculo de la acción proporcional como el producto del error y el valor de  $k_p$ , adicional al valor de precarga de 16.1 mA. Otros bloques del programa incluyen una subrutina de activación para la acción de control y condicionales para mantener los rangos de señal en los valores definidos en la Sección 2.1.3.

Es importante resaltar que experimentalmente la altura del tanque se lee como una medida en corriente, y por tanto, el valor de referencia  $\Delta h_2 = 0.0257\text{ m}$  para el lazo de control realimentado corresponde con 8.38 mA.

**Figura 23.** Rutina de programa para control proporcional en PLC



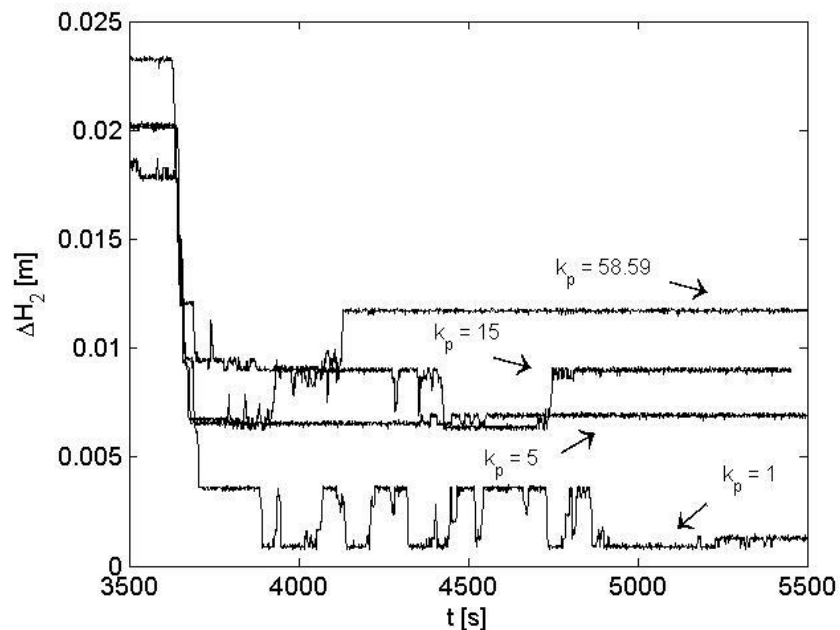
A partir de ello, fue posible obtener las curvas experimentales visualizadas en las Figs. 24 y 25, ilustrando respectivamente la altura sensada en el tanque de salida (tanque 2) y la señal de corriente aplicada en la válvula proporcional de entrada (R6).

Estos resultados permiten replicar cualitativamente los resultados observados empleando simulaciones numéricas. En particular, se observa la sensibilidad del sistema experimental para responder ante la perturbación aplicada en  $t = 3600$  s.

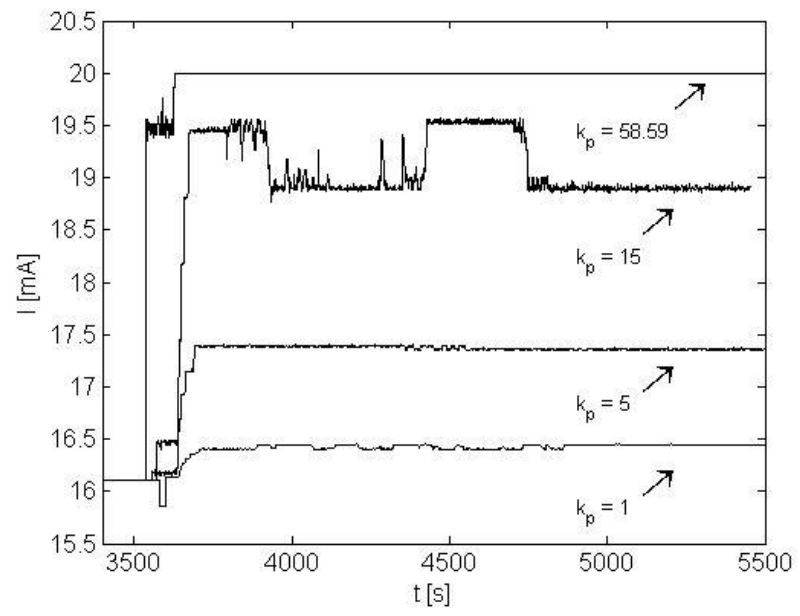
El nivel se recupera en la medida que aumenta la ganancia de lazo  $k_p$  como consecuencia de la acción de control, misma que presenta un efecto visible hasta saturarse para  $k_p \approx 60$ .

A diferencia del sistema simulado, el sistema experimental no recupera un valor cercano al nivel de salida nominal posterior al instante en que se aplica la perturbación. Lo anterior se explica en las limitaciones de actuación, referidas a la capacidad de flujo de entrada del sistema.

**Figura 24.** Respuesta experimental ante acción proporcional



**Figura 25.** Acción de control proporcional experimental



## 5. CONTROL PID DEL SISTEMA DE TANQUES

Como complemento a la definición de las condiciones nominales de operación para el sistema en lazo abierto y al análisis del lazo realimentado ante una acción proporcional, en este Capítulo se presenta el diseño y ajuste para una estrategia de control PID, ejecutada en el PLC SIEMENS S7 1200. Los parámetros de control ingresados al dispositivo se calculan con base en el modelo teórico del proceso, siendo condiciones iniciales para el ajuste de una rutina de sintonización automática.

### 5.1. CONTROL PID

El control Proporcional Integral Derivativo (PID) es el controlador más empleado en aplicaciones industriales, debido fundamentalmente a su simplicidad estructural y amplia eficiencia en procesos de pocas variables. Como su nombre lo indica, el controlador PID está constituido a partir de la superposición entre las tres acciones básicas de control y por tanto puede definirse, para el caso continuo, en el modo siguiente [24]:

$$U_{PID}(s) = k_p + \frac{k_p}{T_I s} + k_p T_D s, \quad (16)$$

donde  $k_p$  es la constante proporcional, mientras  $T_I$  y  $T_D$  son los tiempos integral y derivativo, respectivamente.

Aunque existen representaciones alternativas para (16), esta forma es enteramente compatible con el método de cálculo de parámetros abordado y las características del dispositivo de implementación para la estrategia de control correspondiente.

**5.1.1. Cálculo de constantes del controlador.** Para obtener los parámetros de un controlador PID (es decir, para efectuar su diseño), existen una gran variedad de técnicas analíticas y experimentales de ajuste. En este proyecto se hará uso de una combinación de las anteriores, a partir del uso del método de Ziegler & Nichols [24], tradicionalmente elaborado mediante pruebas experimentales, esta vez formulado analíticamente a partir de la información del modelo del sistema dado en (14).

Por tanto, la aplicación del método de cálculo se resume en el modo siguiente:

- Inicialmente, se observa a partir de la respuesta escalón del sistema en lazo abierto dada en la Fig. 19, que el sistema de segundo orden posee una respuesta sobreamortiguada que puede aproximarse a una curva en forma de “s” y por tanto, puede aplicarse el método de Ziegler & Nichols denominado de la curva de reacción.
- En este método, la respuesta del sistema se caracteriza por el tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T) obtenidos trazando una recta tangente en el punto de inflexión, como se observa en la Fig 26.
- Para poder determinar estos valores analíticamente, se reescribe (15) en la forma:

$$\Delta H_2(s) = R_B \left( \frac{2.56 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.004945s + 2.56 \times 10^{-6}} \right) \left( \frac{4.74 \times 10^{-7}}{s} \right),$$

que a su vez puede descomponerse en fracciones parciales como:

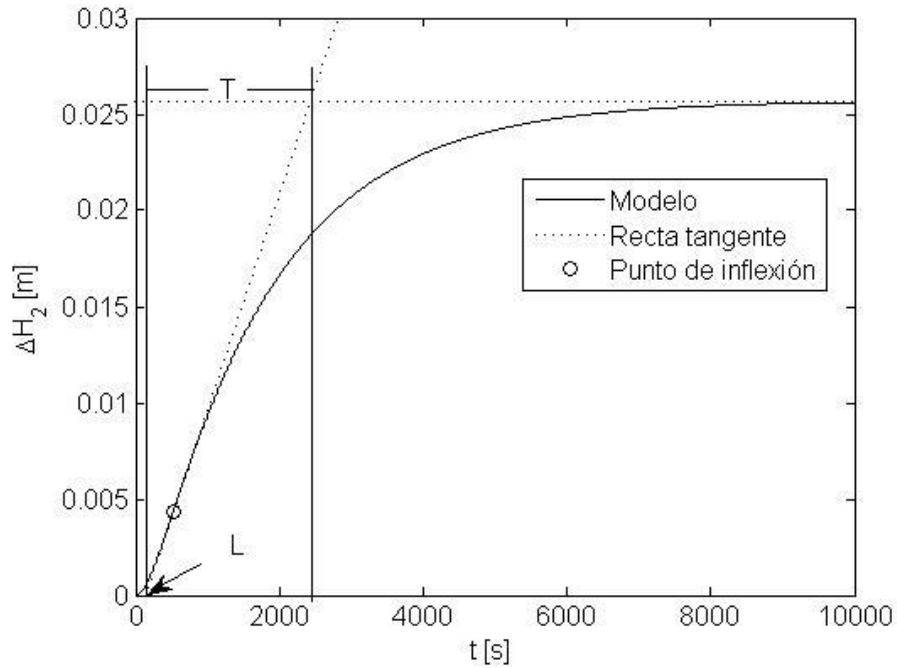
$$\Delta H_2(s) = \frac{4.0725 \times 10^{-3}}{s + 4.3632 \times 10^{-3}} - \frac{30.2860 \times 10^{-3}}{s + 5.8671 \times 10^{-3}} + \frac{26.2135 \times 10^{-7}}{s}$$

- Aplicando transformada inversa de Laplace a esta última expresión se obtiene:

$$\Delta h_2(t) = 4.07 \times 10^{-3} e^{-4.36 \times 10^{-3} t} - 30.28 \times 10^{-3} e^{-5.86 \times 10^{-4} t} + 26.21 \times 10^{-3} \quad (17)$$

como la función equivalente en el dominio del tiempo para la curva de respuesta de nivel.

**Figura 26.** Aproximación para curva de reacción



- El punto de inflexión para esta curva puede calcularse igualando a cero su segunda derivada; es decir, resolviendo para  $t = t_i$  en la expresión:

$$\frac{d^2}{dt^2} \Delta h_2(t) = -1.04 \times 10^{-8} e^{-5.86 \times 10^{-4} t} + 7.75 \times 10^{-8} e^{-4.36 \times 10^{-3} t} = 0,$$

permitiendo obtener  $t_i = 531.29$  s como el valor de tiempo para el cambio de concavidad.

- A partir de cálculo fundamental se tiene:

$$\frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) = \lim_{t \rightarrow t_i} \frac{\Delta h_2(t) - \Delta h_2(t_i)}{t - t_i},$$

y por tanto, la recta tangente al punto de inflexión puede definirse como:

$$\begin{aligned} l(t) &= \Delta h_2(t_i) + (t - t_i) \frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) \\ &= t \left( \frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) \right) + \left( \Delta h_2(t_i) - t_i \frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) \right) \end{aligned}$$

De esta manera se deriva (17), siendo:

$$\frac{d}{dt} \Delta h_2(t) = 1.77 \times 10^{-5} (e^{-5.86 \times 10^{-4} t} - e^{-4.36 \times 10^{-3} t}),$$

se calcula:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) &= 1.1207 \times 10^{-5} \\ \Delta h_2(t_i) - t_i \frac{d}{dt} \Delta h_2(t_i) &= -0.0015 \end{aligned}$$

y

$$l(t) = 1.1207 \times 10^{-5} t - 0.0015 \quad (18)$$

- El punto de cruce con el eje horizontal se determina de (18) en el modo siguiente:

$$0 = 1.1207 \times 10^{-5} t_0 - 0.0015,$$

para  $t_0 = 133.85$  s. Asimismo, se determina el punto donde la recta alcanza la altura de estado estacionario en el modo siguiente:

$$0.0257 = 1.1207 \times 10^{-5} t_f - 0.0015,$$

para  $t_f = 2427.1$  s.

- Con base en la Fig. 26,  $L = t_0 = 133.85$  s y  $T = t_f - t_0 = 2293.2$  s, valores que permiten determinar los parámetros del controlador PID en (15) a partir de las formulaciones para el método de Ziegler & Nichols incluidas en la Tabla 2.

**Tabla 3.** Parámetros controlador PID para método Ziegler & Nichols

Parámetro	Fórmula	Valor
$K_P$	$1.2 T/L$	17.13
$T_I$	$2L$	267.7 s
$T_D$	$0.5L$	66.92 s

## 5.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA CONTROLADO PID

Empleando condiciones similares al caso proporcional de la Sección 3.2, se presentan a continuación los resultados obtenidos para la dinámica del sistema ante una acción PID, haciendo uso de los parámetros de control previamente calculados.

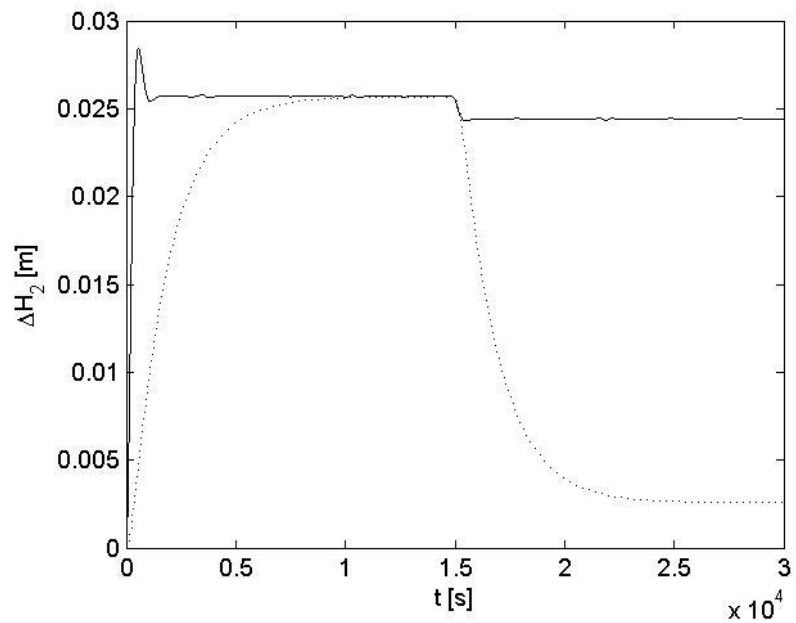
**5.2.1. Simulación para acción de control PID.** Inicialmente, se realizó simulación numérica para el modelo del sistema (14) en cascada con la realización de PID paralelo (15) con valores de la Tabla 2, utilizando los comandos de la herramienta *Control System Toolbox* de *MATLAB®*. A partir de ello, se obtuvo la respuesta escalón presentada en la Fig. 27 ante una perturbación de tipo escalón en el caudal de entrada  $\Delta Q_i$  transcurridos 15000 s de simulación. Para efectos de comparación, se muestran resultados del sistema en lazo abierto sin control a partir de una línea punteada.

Como se observa, el sistema ante la acción PID se establece de manera rápida y sin mayor sobre elongación en el valor deseado. En particular, se mide en la respuesta simulada un pico de 0.0285 *m* correspondientes con un sobreimpulso aproximado del 10.89% y un tiempo de establecimiento de alrededor 2000 s, siendo valores esperados ante un diseño a través del método de Ziegler & Nichols.

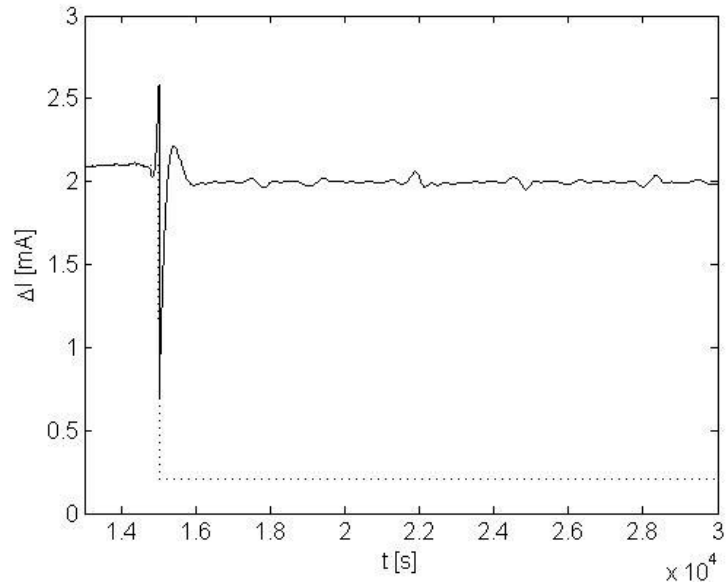
Asimismo se verifica corrección (mas no eliminación total) para el efecto de perturbación, a través de una recuperación evidente en el nivel de estado estacionario posterior al cambio del nivel de entrada. La justificación para el error remanente está en la acción integral, la cual no se satura del todo según se observa en el comando de control ilustrado en la Fig. 28. Esta situación es preferible en la práctica, pues una respuesta saturada (o con wind-up) es más lenta ante cambios de entorno en el sistema de control.

Los resultados de simulación obtenidos para el control PID demuestran superioridad ante los casos de acción proporcional visualizados en las Figs. 21 y 22, debido a evidenciar una respuesta dinámica más rápida y con menor oscilación.

**Figura 27.** Simulación respuesta ante acción PID



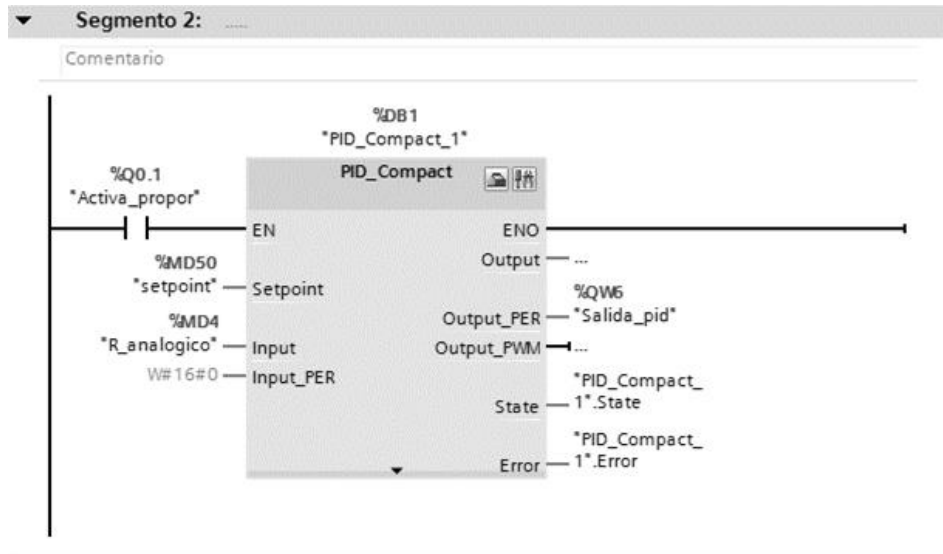
**Figura 28.** Simulación de la corriente que entrega el controlador PID



**5.2.2. Verificación experimental para control PID.** El control PID fue implementado en el prototipo de laboratorio para el sistema de tanques a través de configuración en el PLC para el bloque “*PID\_Compact*”, responsable de ejecutar la rutina de control correspondiente en el *SIMATIC STEP 7*. Dicho procedimiento de configuración se detalla en la Sección A.2 del Anexo A.

En la Fig. 29 se visualiza el segmento de la rutina respectiva incluyendo el bloque de control PID. Otros bloques del programa se definen de manera similar a los presentados en la Sección 2.1.3.

**Figura 29.** Rutina de programa para control PID en PLC



A partir de ello, fue posible obtener las curvas experimentales visualizadas en las Figs. 30 y 31, ilustrando respectivamente la altura sensada en el tanque de salida (tanque 2) y la señal de corriente aplicada en la válvula proporcional de entrada (R6).

El procedimiento experimental desarrollado intenta replicar el escenario considerado para el control proporcional en las Figs. 24-25 y fue ejecutado como sigue, para una mejor visualización de la respuesta dinámica de la acción de control PID:

- Se inició el experimento aplicando al sistema un estímulo constante correspondiente con el valor nominal de 16.1 mA en la corriente aplicada a la electro válvula de entrada (R6). Posterior al establecimiento del sistema, se activó la rutina de control PID realimentado en el PLC en  $t = 3600$  s.
- Una vez verificado que el sistema se mantiene en el valor final deseado y que la acción de control oscila alrededor del valor nominal, como consecuencia de un error cero, se aplica la perturbación sobre R1 en alrededor de  $t = 5600$  s, a partir de lo cual se observa la reacción de la ley de

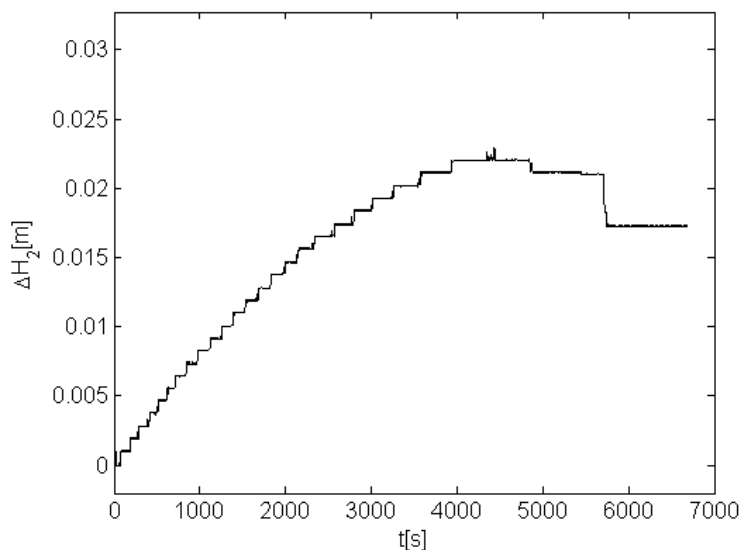
control en modo creciente a manera de rampa hasta saturarse en el máximo valor de 20 mA (ver Fig. 31).

- Esta acción de control permite mantener el nivel en un nuevo valor constante (ver Fig. 30), que no corrige completamente el efecto de perturbación debido a la saturación verificada en el esfuerzo de control y a las limitaciones presentes en el caudal de suministro a la válvula de entrada del sistema.

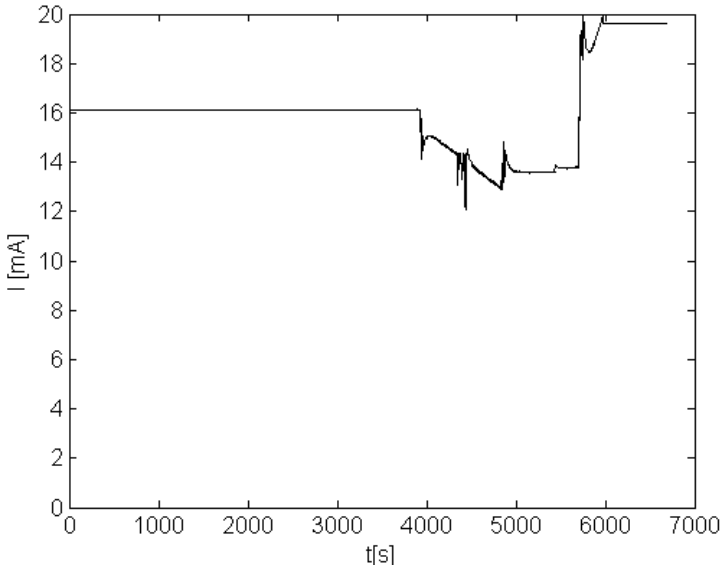
En comparación con los resultados obtenidos para el controlador proporcional, se observa la manera en que la acción de control PID reacciona en un modo dinámicamente dependiente de la acción integral (en forma de rampa), que permite mantener un nivel próximo del valor nominal deseado.

Es importante mencionar que los parámetros para el controlador PID calculados mediante el método de Ziegler & Nichols, corresponden con valores iniciales incorporados manualmente en la rutina de programación del PLC, posteriormente ajustados mediante sintonía fina en tiempo de ejecución. Los parámetros se optimizan para el punto de operación a partir de la amplitud y la frecuencia [20].

**Figura 30.** Respuesta experimental ante acción PID



**Figura 31.** Acción de control PID experimental



## 6. CONCLUSIONES

Con base en los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos en el presente proyecto de grado, es posible concluir que fue posible controlar el nivel de líquido de un sistema de tanques en cascada (en el laboratorio de instrumentación y control de la E3T-UIS LAT-209) empleando un PLC SIEMENS S7-1200. En particular:

- Se diseñó el bucle de recirculación de agua en el sistema de tanques del laboratorio de instrumentación de la E3T-UIS. A partir de los desarrollos presentados en la Sección 2.1, se describe la configuración de elementos para construir un circuito de recirculación de líquido en el contexto de un sistema de abastecimiento de agua simple. La Fig. 1 muestra la distribución de elementos en el circuito de recirculación. Las Secciones 2.1.1 – 2.1.6 describen características generales de los dispositivos empleados. La Fig. 10 ilustra el sistema final constituido en laboratorio.
- Se configuró la instrumentación requerida para la instalación y puesta en marcha de un lazo de control de nivel basado en el PLC SIEMENS S7-1200. La Sección 2.2 define un protocolo de inicialización (ver Fig. 11) para operación del sistema, que permite determinar valores nominales para las variables del proceso. A partir de esta información se procede a realizar calibración para los rangos de sensado (Sección 2.2.2) y actuación (Sección 2.2.3), como elementos fundamentales de operación del lazo de control de nivel. El Anexo A describe la configuración del dispositivo de control: PLC S7-1200. En la Sección 2.3 se presentan resultados para la respuesta del sistema en lazo abierto, debidamente instrumentado.

- Se ilustró el procedimiento para realizar el control PID en PLC SIEMENS S7-1200 utilizando como ejemplo el sistema de tanques del laboratorio de instrumentación de la E3T-UIS. Inicialmente, se verificó la sensibilidad del lazo de control realimentado para mitigar el efecto de perturbaciones mediante ajuste de la ganancia proporcional, como preámbulo a una acción PID. Estos desarrollos se presentan en el Capítulo 3, destacándose las Figs. 21, 22 para el sistema simulado y 24, 25 para el sistema experimental en laboratorio. El modelo matemático del sistema (ver Sección 3.1 y el Anexo B) permitió determinar las constantes de un controlador PID a través del método de Ziegler & Nichols, denominado de la curva de reacción (ver Sección 4.1). Estos parámetros fueron posteriormente simulados (ver Sección 4.2.1) e implementados en el PLC SIEMENS S7-1200 (ver Secciones 4.2.2 y A.2), permitiendo verificar el comportamiento del sistema controlado.
  
- Se sintonizaron las constantes del controlador PID del nivel del agua del tanque. A partir de los resultados presentados en la Sección 4.1 y tomando como referencia las características de respuesta escalón del sistema (Figs. 16 y 19) y la función de transferencia que describe su modelo matemático (Ec. (15) y Sección 3.1), se procedió a realizar el cálculo analítico para las constantes de un controlador PID mediante el método Ziegler & Nichols de la respuesta escalón, o curva de reacción. Este procedimiento analítico, desarrollado sobre una técnica tradicionalmente obtenida en modo experimental, se justifica para efectos de ilustración didáctica en asignaturas de formación del área de sistemas de control. Los valores obtenidos para los parámetros del controlador (incluidos en la Tabla 2) fueron programados en el PLC SIEMENS S7-1200 (ver Sección A.2), correspondiendo con valores iniciales sobre los cuales la rutina realiza ajuste fino automático.
  
- Se validó el desempeño del sistema controlado a partir de pruebas de laboratorio. Inicialmente, se efectuó verificación del comportamiento del

sistema controlado a partir de simulación de modelos matemáticos en MATLAB según presentado en la Sección 3.2.1 para el caso del control proporcional y en la Sección 4.2.1 para el control PID. Estos resultados permitieron observar el efecto esperado de la acción de control para mejorar tiempos de respuesta y valores de estado estacionario, en comparación con el comportamiento del sistema en lazo abierto perturbado sin control (ver Figs. 16, 21, 22, 27 y 28). Posteriormente, este comportamiento cualitativo fue replicado experimentalmente en laboratorio a través de los desarrollos presentados en la Sección 3.2.2 para el control proporcional y en la Sección 4.2.2 para el control PID, a partir de lo cual fue posible observar que el sistema controlado percibe en la práctica sensibilidad ante el cambio de ganancia de lazo, mejorando el valor final cuanto mayor sea este parámetro. Asimismo, se verifica que la acción de control PID presenta un comportamiento dinámico que varía a manera de rampa en la señal de actuación, a diferencia del cambio instantáneo observado en el control proporcional. Sin embargo, se observa también en todos los casos una fuerte limitación en la capacidad de respuesta del sistema para recuperar el nivel nominal como consecuencia de las restricciones del flujo de líquido suministrado por la válvula de entrada.

- Se puede concluir que el sistema es sensible ante cualquier cambio externo, esto se puede apreciar durante las realizaciones de las pruebas. Ya que al aplicar cualquier mínimo cambio sobre la válvula que conecta el tanque 2 con la electrobomba (R3), el sistema pierde su comportamiento estable.
- El presente trabajo permitió aplicar conceptos teóricos de modelado y simulación de sistemas para caracterizar el comportamiento dinámico de un prototipo de tanques. A partir de esto fue posible ajustar los valores experimentales de un sistema real en laboratorio y posteriormente determinar estrategias de control implementadas en un PLC. Fue posible verificar en la

practica la manera en que el sistema gobierna una válvula de actuación para compensar la perturbación aplicada en el proceso.

## 7. RECOMENDACIONES

Para realizar la recirculación del líquido es imperativo verificar la presencia de agua en las tuberías que alimentan la electrobomba, con el fin de evitar su arranque en vacío.

Asimismo, se debe tomar precaución de residuos o sedimentos que puedan obstruir el circuito de recirculación. Para ello se recomienda utilización permanente de un filtro.

Para evitar el rebose de líquido en el tanque de almacenamiento principal, se recomienda no superar el 80% de su máxima capacidad instalada (250 L) como cantidad de volumen de líquido recirculante.

El sensor de protección térmica de la electrobomba fue removido debido a mal funcionamiento, siendo reemplazado por un contactor externo. Se recomienda por tanto, monitorear permanentemente la temperatura de este dispositivo durante la operación del sistema.

## 8. TRABAJO FUTURO

Para mejorar el desempeño del sistema implementado en laboratorio se requiere adicionar una bomba de impulsión que mejore la capacidad del flujo de entrada.

La instrumentación actualmente instalada puede ser complementada por otros dispositivos de sensado y actuación para efectuar lazos múltiples de control.

La verificación remota del comportamiento del sistema puede ser realizada a través de un sistema SCADA.

Incorporar tecnologías de comunicación inalámbrica sería una importante contribución para acercar al estudiante con los últimos desarrollos utilizados a nivel industrial.

## CITAS

- [1] L. V. Herrera Sepúlveda y U. A. Melo Pinzón, «Control en espacio de estados para un prototipo real de péndulo invertido,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
  
- [2] E. Gomez Arias, C. Y. Peñaranda y W. R. Silva, «Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2014.
  
- [3] S. F. Muñoz Suárez, D. F. Guarín Mantilla y G. R. Sarmiento Cruz, «Instrumentación y control de velocidad para un motor de corriente alterna en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013.
  
- [4] D. F. Novoa Díaz y J. A. Prada Mejía, «Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2001.
  
- [5] D. H. Ramírez Vega y E. E. Torres Sánchez, «Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación de electrónica de la E3T,» Universidad Industrial de Santander, 2007.
  
- [6] L. Y. Neira Duarte y R. I. Prada Medina, «Diseño del proyecto para implementación de una sala TIA (Totally Integrated Automation) y adaptación de un proceso industrial para desarrollo de prácticas de entrenamiento en las áreas de instrumentación, automatización y control,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.

- [7] S. Kandiah, M. Hasan y M. Yaacob, «Overview of automation in a palm oil mill - the sterilisation process,» *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 3, nº 1, pp. 45-52, 1992.
- [8] G. W. Drewiske, «Arc flash study and remediation project in a pulp and paper mill,» de *Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2012 Annual IEEE*, 2012.
- [9] A. Ning y A. Yu, «A water-level controller for greenhouse sump tank,» de *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference On*, 2011.
- [10] M. P. Gómez Quintero, G. A. Zabala Domínguez y J. A. Dávila Rincón, «Uso de LabView para sistemas de control en ingeniería química,» *DYNA*, vol. 78, nº 169, pp. 150-157, 2011.
- [11] E. Fabregas, G. Farías, S. Dormido-Canto, S. Dormido y F. Esquembre, «Developing a remote laboratory for engineering education,» *Computers & Education*, vol. 57, nº 2, pp. 1686-1697, 2011.
- [12] J. B. Leyes Franco y D. R. Navarrete Díaz, «Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de LabView,» Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2007.
- [13] D. S. Benitez Mejía, «Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1994.
- [14] S. M. Arango Restrepo, «Desarrollo del sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería,» Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2004.

- [15] I. M. Giraldo Betancur, «Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2004.
- [16] L. C. Mantilla Espinosa, «Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y elaboración de estrategias,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.
- [17] C. I. Suárez Moreno y C. A. Rodríguez Pérez, «Diseño de un control automático de nivel del condensador de la unidad uno en la central termoeléctrica de Paipa,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2003.
- [18] M. Acosta Galvis y L. A. Gómez Malagón, «Control de nivel de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998.
- [19] J. Balcells y J. L. Romeral, Autómatas programables, Madrid: Marcombo, S.A, 2000.
- [20] Siemens-AG, «S7, controlador programable S7-1200: Manual de usuario,» TIA Portal, Berlin, 2009.
- [21] M. A. Pérez Garcia, J. C. Álvarez Antón, J. C. Campo Rodríguez, F. J. Ferrero Martín y G. J. Guillo Ortega, Instrumentación Electrónica, Madrid: Paraninfo S.A., 2004.
- [22] A. Noyola , J. M. Morgan Sagastume y L. P. Güereca , Selección de Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 2013.
- [23] J. S. Alonso , Proyecto de un sistema de abastecimiento de agua potable en togo, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

[24] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 5 ed., Madrid: Pearson Educación S.A., 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

OGATA, Katshuhiko. Ingeniería de control moderna. 5ed. Madrid: Pearson, 2010. 894p.

PEÑARANDA, Claudia Yaneth; SILVA, Wilson Reynaldo y GOMEZ ARIAS, Euclides. Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Trabajo de grado ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2014.

SIEMENS. SIMATIC S7. Controlador programable S7-1200: Manual de sistema. [en línea] Nurnberg, Alemania: Siemens AG Industry, 2009. [consultado: 15 mayo 2016] Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>

SIEMENS. Ultrasonic Transmitters: The Probe. Siemens: Catálogo Siemens. [en línea] Peterborough, Ontario, Canada: Siemens Milltronics Process Instruments, 2010. [consultado: 3 marzo 2016] Disponible en: <http://www.lesman.com/unleashd/catalog/sensors/Siemens-Milltronics-The-Probe/Siemens-The-Probe-man-7ML19985GD62-2010-03.pdf>

## ANEXO A

### PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Para realizar la configuración del PLC Siemens (*SIMATIC* s71200) empleado en el presente proyecto de grado, se hizo uso del paquete de programación *SIMATIC STEP 7 BASIC* versión 13.

Esta herramienta dispone de diferentes opciones para tipos de lenguaje de programación, que dependen de las características específicas de licencia y del tipo de CPU configurada. Para el caso particular considerado, se emplearon los siguientes dos tipos de lenguaje de programación gráfica:

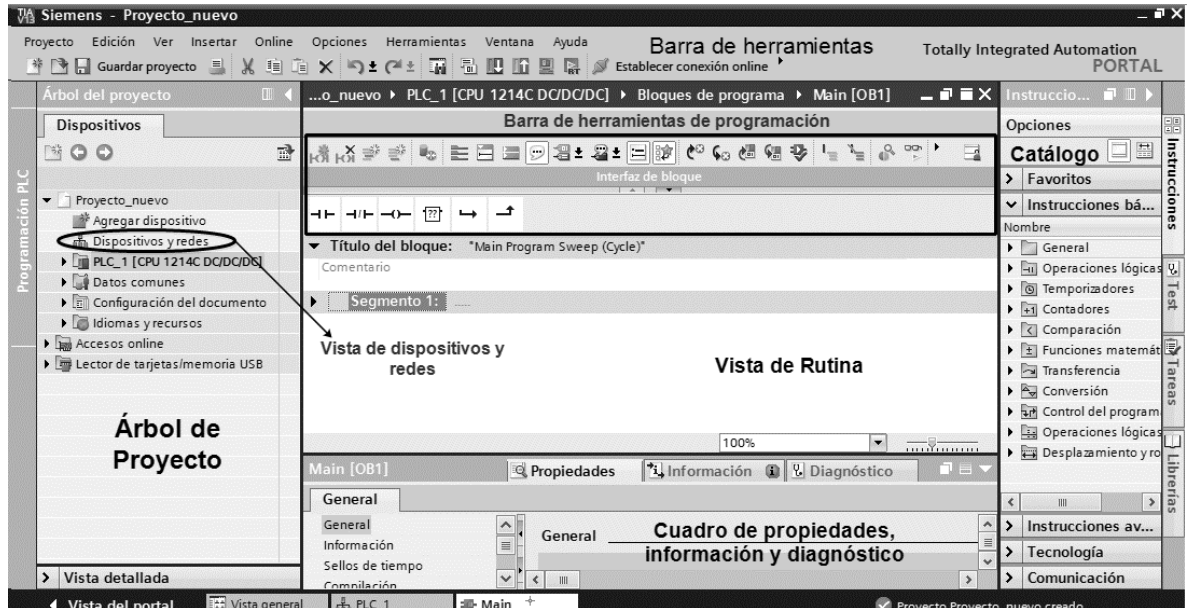
- KOP (Esquema de contactos, del alemán *Kontaktplan*): representa esquemas de circuitos empleando símbolos como contactores y bobinas,
- FUP (Diagrama de funciones, del alemán *Funktionsplan*): utiliza símbolos gráficos basados en lógica de álgebra booleana.

La Fig. A.1 presenta el ambiente de programación del STEP7 v13, a partir del cual se destacan los siguientes elementos:

- *Árbol del proyecto*: organiza todos los archivos vinculados a un proyecto, permitiendo vincular dispositivos y bloques de funciones adicionales,
- *Catálogo*: contiene librerías de proyecto, dispositivos de la CPU, instrucciones de programación e información del estado del programa (run, stop, error),
- *Vista de dispositivos y redes*: permite verificar la conexión del hardware del sistema (CPU y módulos),
- *Vista de rutina*: espacio para visualización de rutinas de programación,
- *Barra de herramientas de programación*: permite seleccionar elementos para construir una rutina de programa,

- Cuadro de propiedades, información y diagnóstico: espacio para mensajes de alerta y error relacionados con la compilación y ejecución de programas.

**Figura A.1.** Ambiente de programación del SIMATIC STEP7 v13



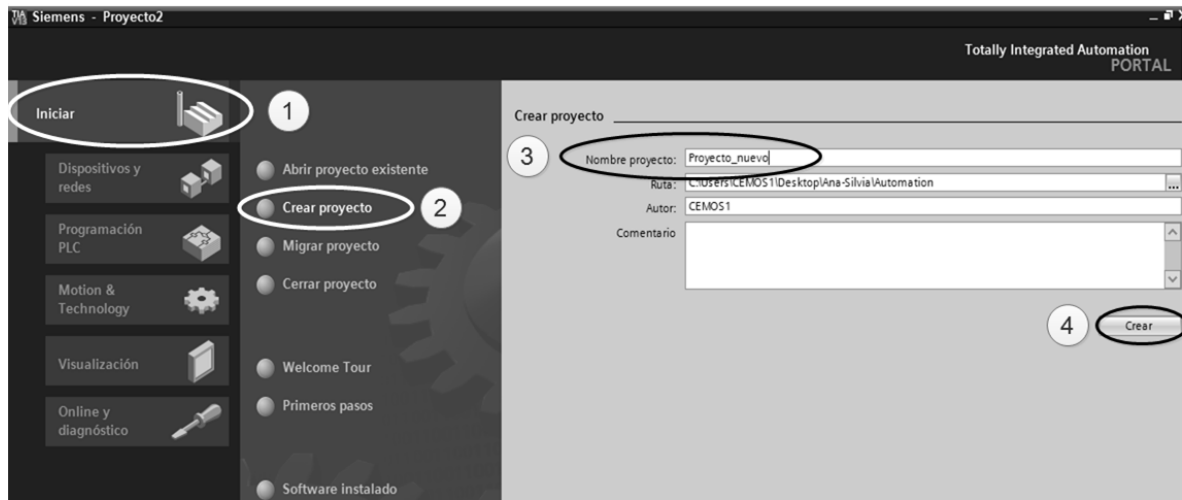
## A.1. DESARROLLO DE RUTINAS EN STEP7

Para introducir otros elementos importantes del paquete de programación e ilustrar su uso, se realizará a continuación la descripción del procedimiento ejecutado para efectuar la configuración de una rutina simple en PLC, correspondiente con la activación y desactivación de una salida digital como consecuencia de los valores binarios de entrada (compuerta lógica YES).

### A.1.1. Creación de programa y configuración de dispositivos

Inicialmente, en el ambiente de programación se selecciona la opción “*Crear proyecto*” siguiendo la siguiente secuencia de pasos, ilustrada en la Fig. A.2: 1) *Iniciar* -> 2) *Crear proyecto* -> 3) *Nombre proyecto* -> 4) *Crear*.

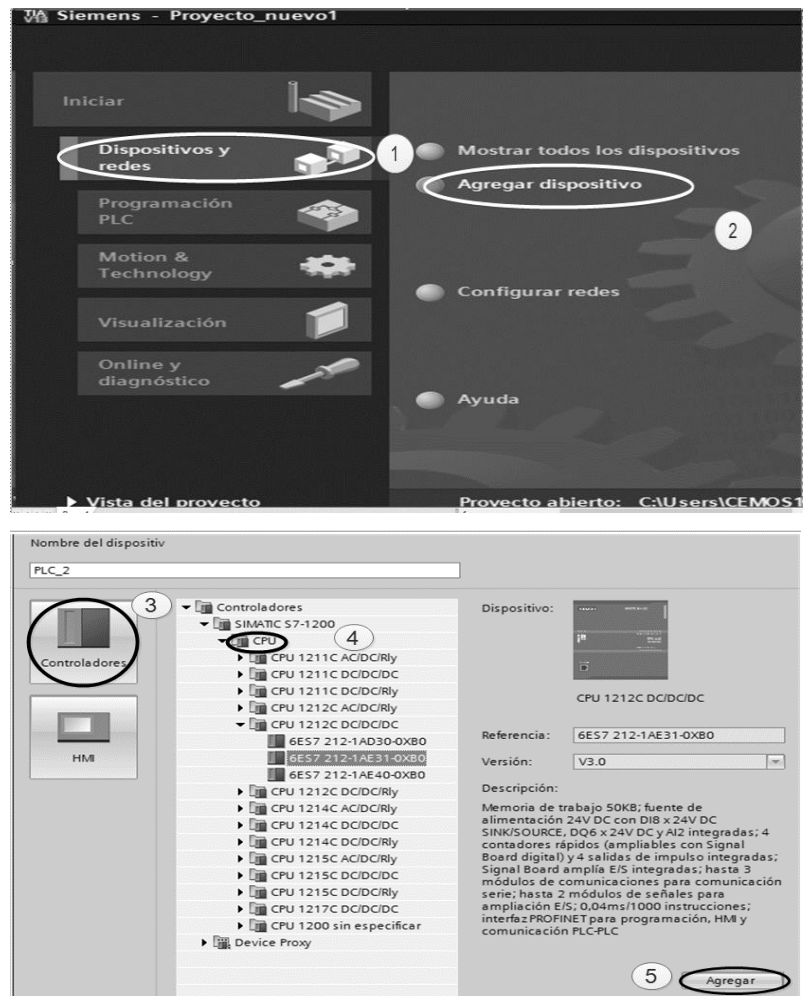
**Figura A.2.** Pasos para crear un proyecto



Una vez creado y guardado un proyecto, se debe seleccionar el dispositivo sobre el cual se configurarán las condiciones de programación a través de la opción “*Agregar dispositivo*” siguiendo la secuencia de pasos ilustrada en la Fig. A.3: 1) *Dispositivos y redes* -> 2) *Agregar dispositivo* -> 3) *Controladores* -> 4) *CPU* -> 5) *Agregar*. A partir de las opciones disponibles, se selecciona la CPU 1214c 6E57 214-1A631-0XB0.

Posteriormente, el equipo seleccionado debe configurarse accediendo a la opción “*Propiedades*” siguiendo la secuencia de pasos ilustrada en la Fig. A.4: 1) *Dispositivos y redes* -> 2) *Vista de dispositivos* -> 3) *Dispositivo seleccionado* -> 4) *Click derecho sobre dispositivo* -> 5) *Propiedades*. Las propiedades típicas a configurar en el dispositivo son: la dirección IP, las entradas, las salidas, la zona horaria y los elementos de protección.

Figura A.3. Pasos para agregar un dispositivo



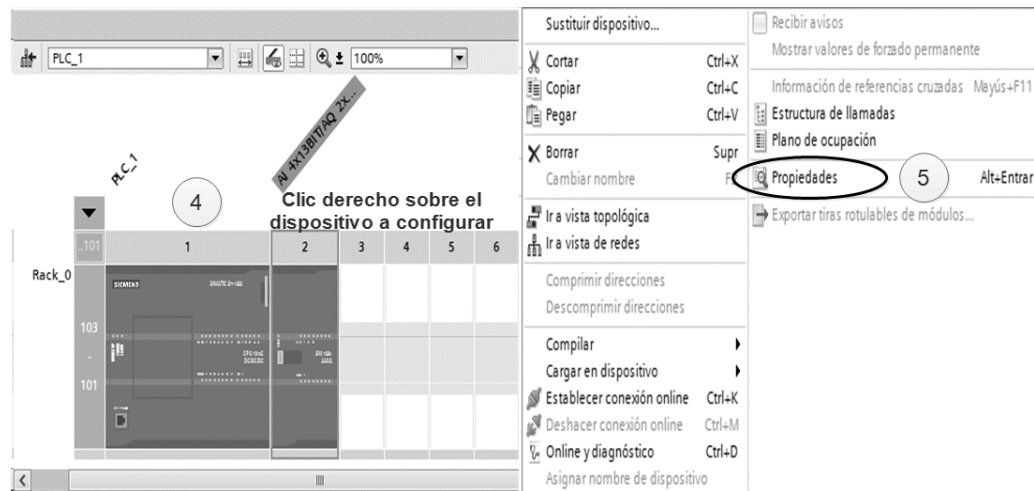
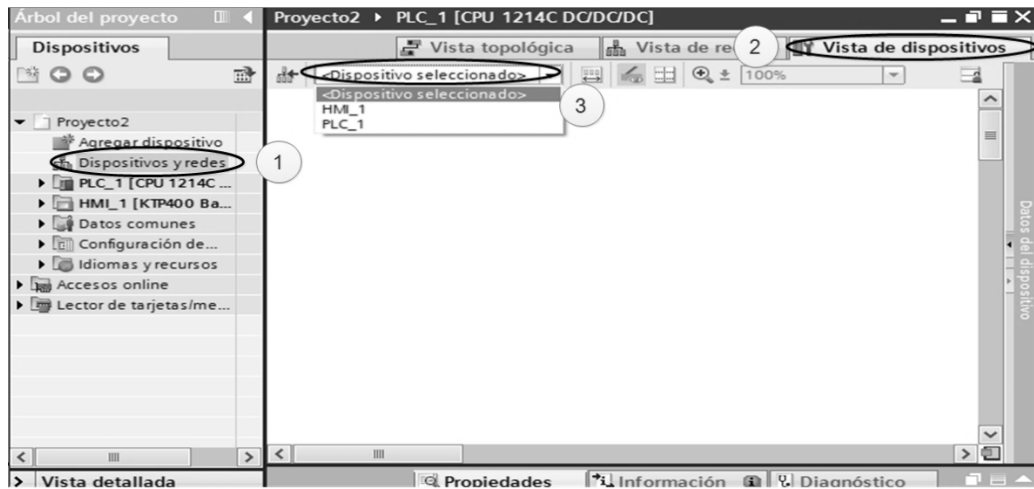
A partir de ello, en el Catálogo se seleccionan módulos de comunicación (máximo 3) y de entrada/salida (I/O, máximo 8) para el SIMATIC S7-1200.

### A.1.2. Conexiones y ejecución de programas

Para transmitir datos entre el PLC y el HOST (PC de programación) se verifican las conexiones IP (para evitar coincidencias por causa de asignaciones automáticas) y a su vez, se realiza la conexión entre dispositivos siguiendo la ruta de menú: *Online*

-> *Establecer conexión online*, creando la ventana mostrada en la Fig. A.5 para activar la comunicación.

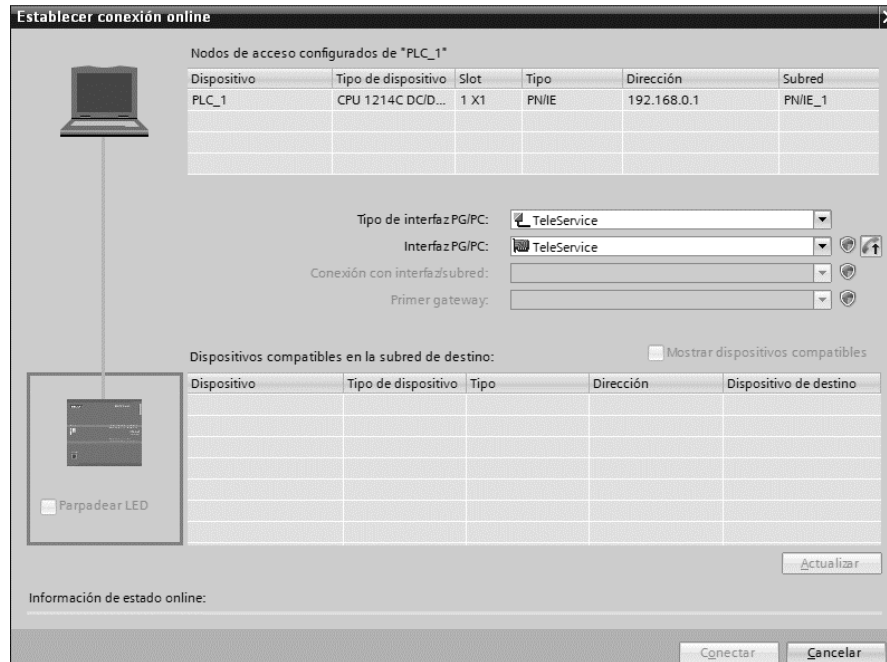
**Figura A.4.** Configuración de dispositivos



Una vez establecida la conexión, es posible transferir a la memoria de la CPU la rutina de programa constituida. En la Fig. A.6 se muestra el diagrama KOP para el caso de ejemplo, en el cual se emplearon contactores (*on-off switch*, *emergencia*) y bobinas (*comenzar*, *on*, *off*). La Fig. A.7 ilustra un diagrama equivalente en lenguaje

FUP para el mismo algoritmo, para el cual aplican indistintamente los procedimientos de configuración y carga de programa desarrollados.

**Figura A.5.** Ventana para comunicación entre dispositivos



Posteriormente se transfiere el programa al PLC accediendo a la instrucción "Transferir" en la barra de herramientas. La Fig. A.8 muestra la ventana de diálogo correspondiente.

Una vez la rutina se encuentra en ejecución, es posible realizar visualización en línea de los estados de variables a través de la opción de "Visualización online" en la barra de herramientas de programación.

Figura A.6. Programa en lenguaje KOP

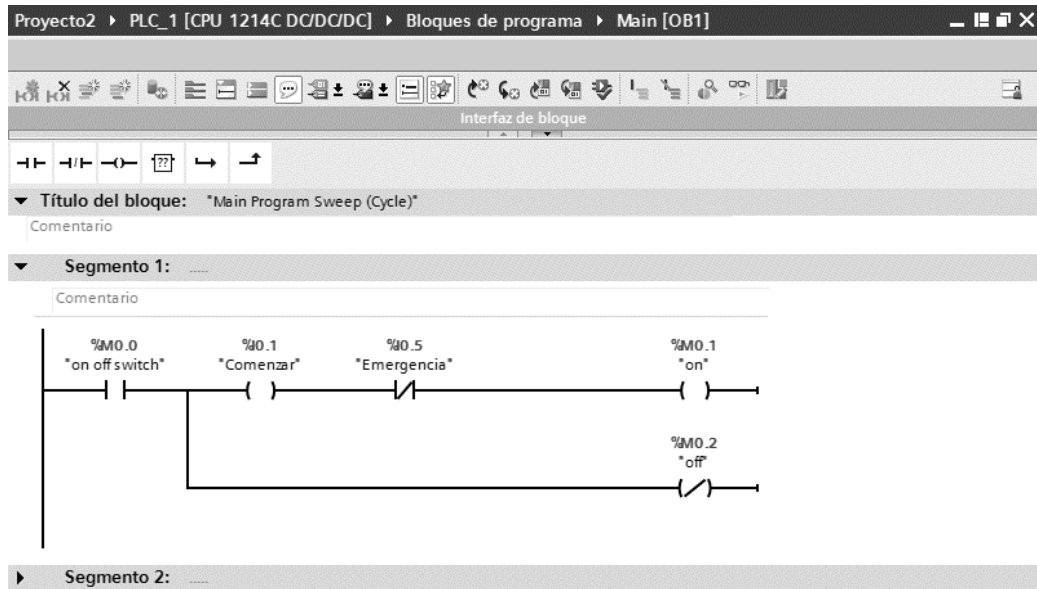
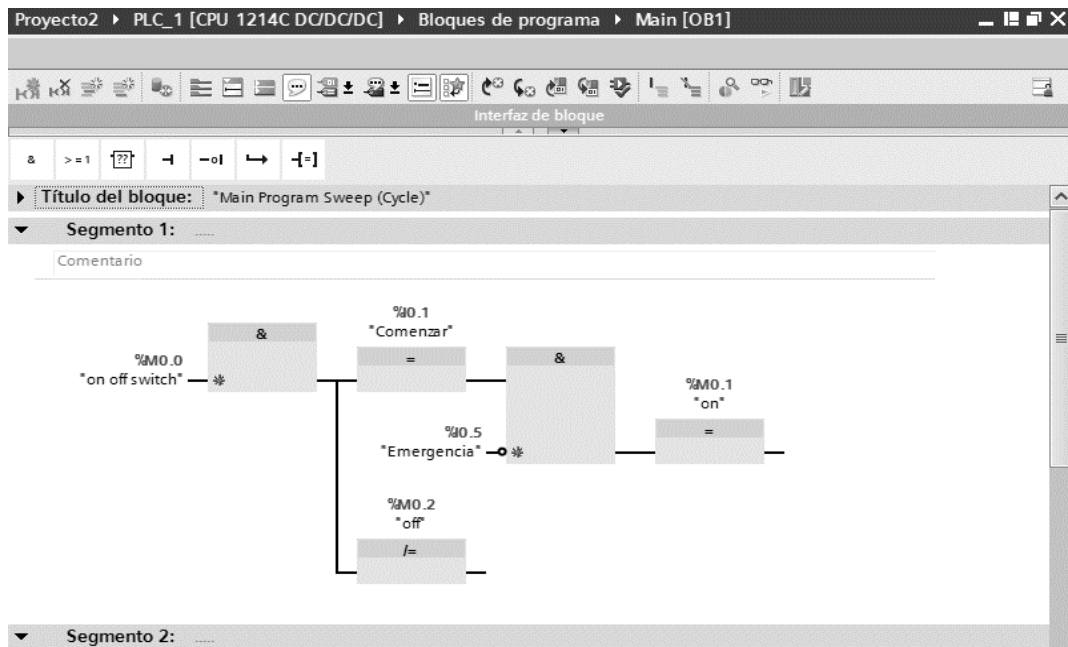


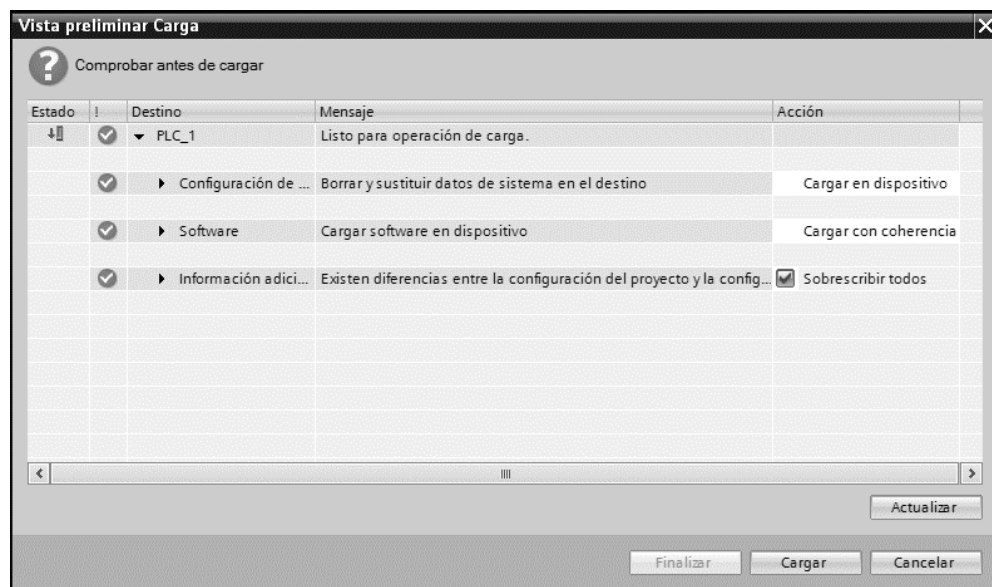
Figura A.7. Programa en lenguaje FUP



### A.1.3 Interacción con procesos en campo

De otro lado, la operación de la CPU de un PLC se resume en decisiones generadas como señales de salida, a partir de los valores de estímulo de entrada, operando de manera automática en ciclos repetitivos sin intervención posterior de un usuario (u operario). En algunos casos sin embargo, es conveniente interactuar con el dispositivo bien sea para ingresar comandos de entrada o visualizar valores de variables de salida para monitorear el comportamiento del proceso. De esta manera, se emplean regularmente interfaces hombre-máquina (HMI del inglés human-machine-interface) para realizar dicha interacción con el autómatas en campo.

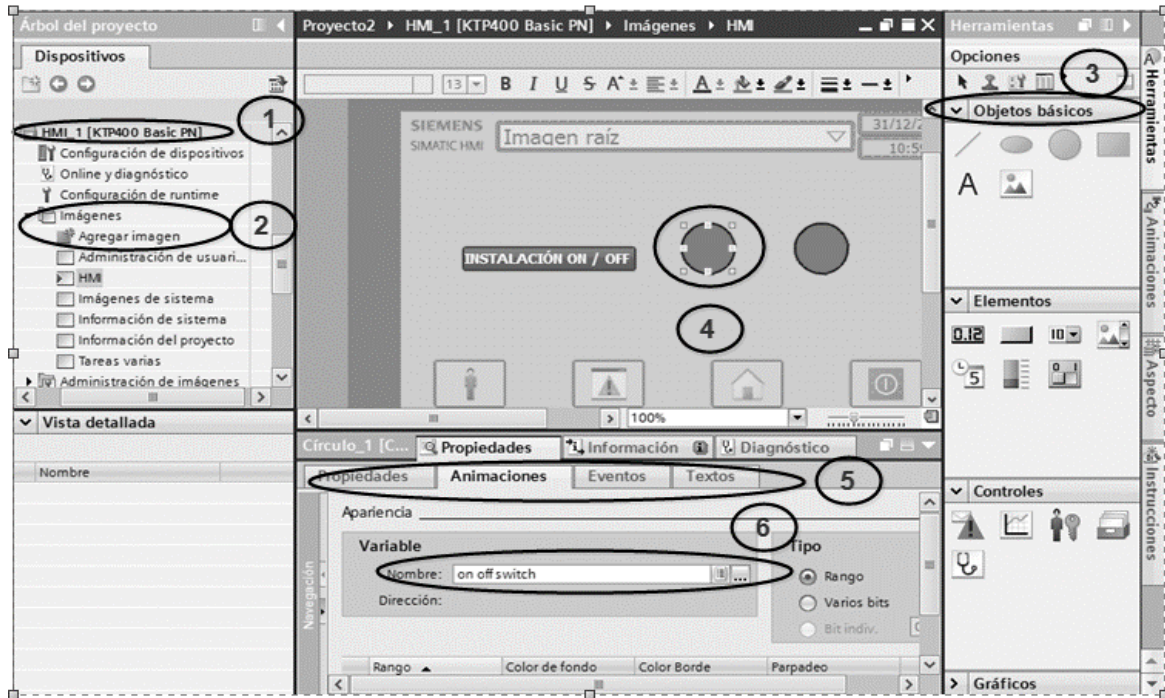
**Figura A.8.** Transferencia de rutina al PLC



Para agregar una HMI a un proyecto en STEP7 v13, se procede igual a como fuera sugerido previamente en la Fig. A.3, con cambios a partir de 3) *HMI* -> 4) *4" Display* -> 5) *Agregar*. Una vez agregada al proyecto, la HMI se configura siguiendo la secuencia de pasos ilustrada en la Fig. A.9: 1) *Árbol de proyecto (HMI)* -> 2) *Imágenes (Agregar imagen)* -> 3) *Herramientas (Opciones – Objetos básicos - Seleccionar)* -> 4) *Incorporar objetos en área de trabajo* -> 5) *Configurar acciones y*

propiedades de animación para el objeto -> 6) Relacionar variables de programa con objetos.

**Figura A.9.** Configuración de interfaz de programa para HMI



#### A.1.4. Captura de datos del proceso

Finalmente, en un proceso industrial es importante realizar almacenamiento de datos para efectuar análisis del comportamiento de variables. Una manera de realizar dicha captura de datos es a través de protocolos TCP/IP y Sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System), los cuales para la línea *SIMATIC* de SIEMENS requieren de herramientas hardware y software adicionales, no disponibles en el presente proyecto de grado.

Por tanto, como alternativa se optó por la captura de datos a través del panel HMI, empleando una unidad de almacenamiento externa tipo USB. El formato final de los datos, es un archivo de texto (de extensión .txt) creado a partir de la secuencia de



Posteriormente, el objeto tecnológico así creado se incluye en la rutina de programación mediante la secuencia ilustrada en la Fig. A. 12: 1) *Instrucciones* -> 2) *Tecnología* -> 3) *PID Control* -> 4) *Compact PID* -> 5) *PID\_Compact*. Para modificar las propiedades del bloque de control PID se accede a la ventana de configuración mostrada en la Fig. A.13, siguiendo la ruta: 1) *Árbol del proyecto* -> 2) *PLC* -> 3) *Objetos tecnológicos*-> 4) *PID\_compact* -> 5) *Configuración*.

Las opciones de configuración disponibles incluyen:

- *Ajustes básicos*, como el tipo de regulación (intensidad, tensión, temperatura, entre otros), parámetros de entrada y salida (analógica, real o PWM) y el set-point.
- *Ajustes del valor real*, donde se configuran los límites y el escalado de entradas analógicas del controlador.
- *Ajustes avanzados*, donde se configuran los parámetros del controlador PID y los límites de salida.

En particular, la ventana de “*Parámetros PID*” visualizada en la Fig. A.14, permite ingresar de manera manual valores para las constantes proporcional  $k_p$ , de tiempo integral  $T_i$  y de tiempo derivativo  $T_D$ . Posteriormente, es posible realizar un ajuste fino para estos parámetros iniciales mediante rutinas de optimización en tiempo de ejecución.

La ecuación del bloque PID es la siguiente:

$$y = K_p[(b * w - x) + \frac{1}{T_i * s}(w - x) + \frac{T_D * s}{a * T_D * s + 1}(c * w - x)]$$

En la tabla A.1 se menciona cada uno de los símbolos de la ecuación del bloque PID.

**Tabla A.1.** Descripción de los símbolos de la ecuación PID

Símbolos	Descripción
y	Valor de salida del algoritmo PID
$K_p$	Ganancia proporcional
s	Operador laplaciano
b	Ponderación de la acción P
w	Consigna
x	Valor real
$T_I$	Tiempo de integración
a	Coefficiente para el retardo de la acción derivativa ( $T_I = a * T_D$ )
$T_D$	Tiempo derivativo
c	Ponderación de la acción D

Fuente: [20]

**Figura A.11.** Bloque organizacional de interrupción cíclica



Figura A.12. Bloque de control PID en rutina de programa

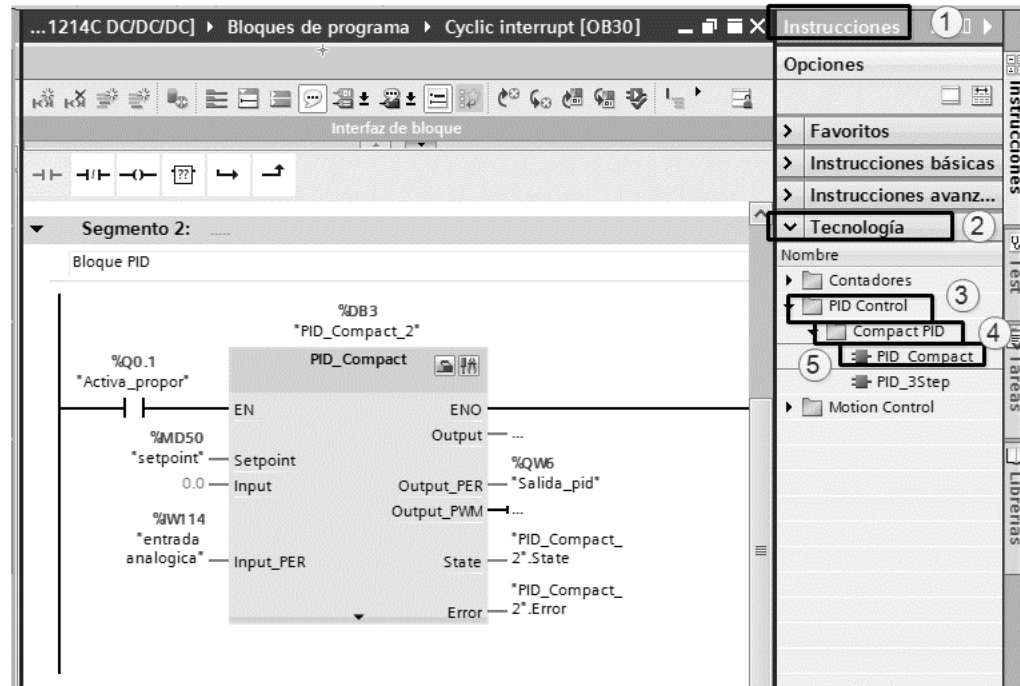
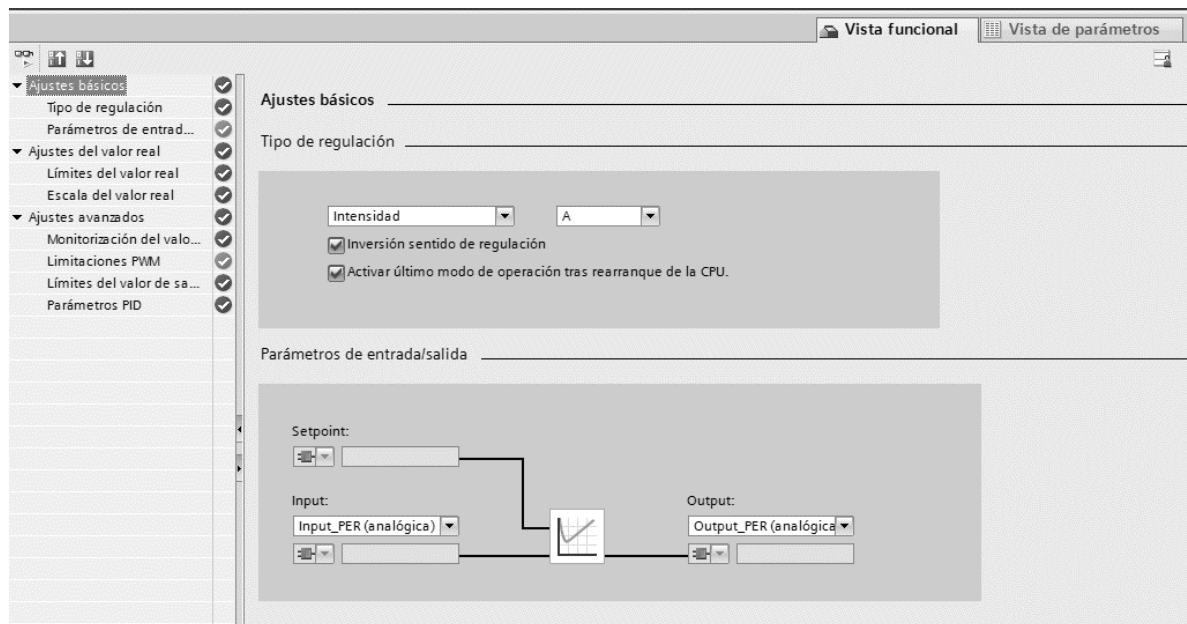
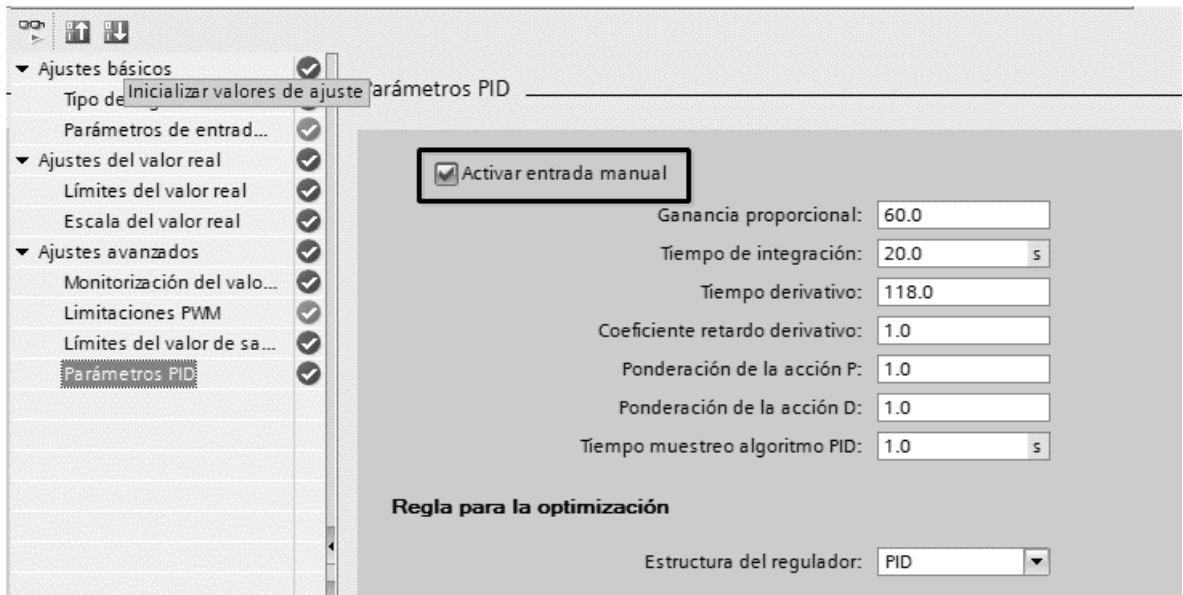


Figura A.13. Propiedades del bloque de control PID

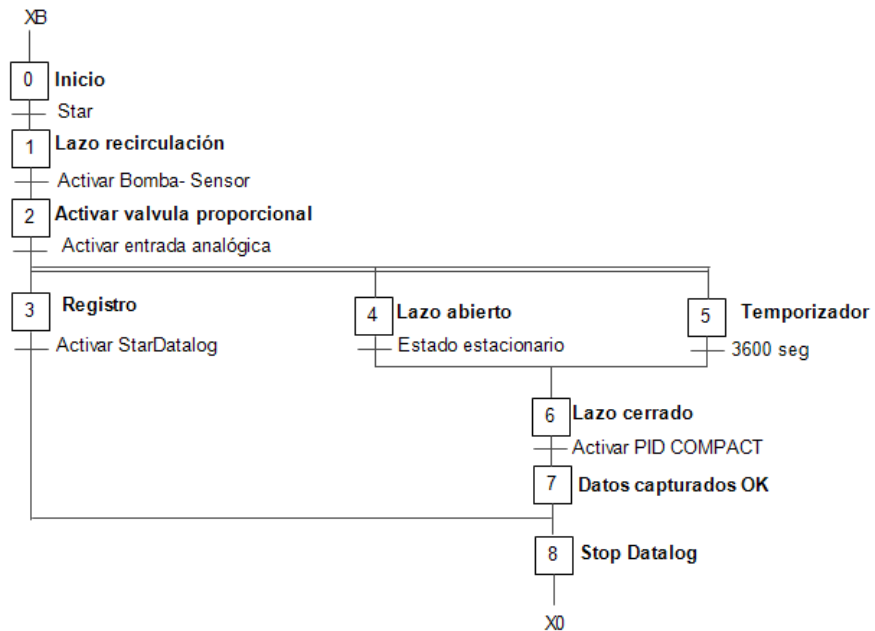


**Figura A.14.** Configuración de parámetros PID



En la Fig. A.15 se tiene el graficet del programa realizado para la configuración del sistema en el programa Step 7 V13.

**Figura A.15.** Graficet del programa en el step 7 V13



## ANEXO B

### CÁLCULO DE PARÁMETRO $R_A$

Se tiene una ecuación que modela la función de transferencia para el sistema de dos tanques, dada a partir de la expresión:

$$G(s) = \frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_B}{s^2(R_A C_1 R_B C_2) + s(R_A C_1 + R_B(C_1 + C_2)) + 1} \quad (\text{B.1})$$

donde  $h_2(t)$  es la altura del segundo tanque,  $q_i(t)$  es el caudal de entrada al tanque 1,  $C_1$  es la capacitancia hidráulica del tanque 1,  $C_2$  es la capacitancia hidráulica del tanque 2,  $R_A$  es la resistencia hidráulica entre los tanques 1 y 2, al tiempo que  $R_B$  es la resistencia hidráulica en la salida del tanque 2.

Por propiedades geométricas de los tanques (sección de área transversal invariante con la altura), se tiene conocimiento de los valores  $C_1$  y  $C_2$ , siendo estos iguales. Asimismo, un análisis del sistema en estado estacionario aplicando el teorema de valor final permite obtener un valor aproximado para  $R_B$ .

De esta manera, el único parámetro desconocido es  $R_A$ .

Para determinar su valor se hace uso de la forma canónica general para un sistema de segundo orden, dada por:

$$G(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{B.2})$$

Por tanto, reorganizando (B.1) es posible obtener:

$$G(s) = \frac{R_B \frac{1}{R_A C_1 R_B C_2}}{s^2 + \left( \frac{R_A C_1 + R_B(C_1 + C_2)}{R_A C_1 R_B C_2} \right) s + \frac{1}{R_A C_1 R_B C_2}} \quad (\text{B.3})$$

A partir de lo cual se verifica:

$$K = R_B; \quad \omega_n^2 = \frac{1}{R_A C_1 R_B C_2}; \quad 2\zeta\omega_n = \frac{R_A C_1 + R_B(C_1 + C_2)}{R_A C_1 R_B C_2}$$

tras igualar coeficientes de  $s$  en (B.2) y (B.3). Nótese que los parámetros desconocidos para estas ecuaciones son  $\zeta$ ,  $\omega_n$  y  $R_A$ .

Así entonces, para resolver el sistema de ecuaciones se necesita una tercera expresión que relacione el tiempo de establecimiento  $t_s$  obtenido a partir de mediciones experimentales sobre el sistema. Por tanto:

$$t_s = \frac{4}{\sigma}, \quad (\text{B.4})$$

siendo  $\sigma$  la parte real del polo dominante para una respuesta subamortiguada (es decir  $0 < \zeta < 1$ ).

Sin embargo, en nuestro caso la respuesta escalón experimental del sistema presenta una sobreamortiguada ( $\zeta > 1$ ), razón por la cual la interpretación de (B.4) debe hacerse con respecto a la magnitud del polo dominante que corresponde con un valor real.

Las raíces del denominador de (B.2) para el caso sobreamortiguado, pueden calcularse como:

$$s = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

Así entonces, (B.4) se re-expresa mediante:

$$t_s = \frac{4}{|-\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}|} \quad (\text{B.5})$$

A partir de lo cual

$$|-\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}| = \frac{4}{t_s}, \quad (\text{B.6})$$

expresión que debe ser interpretada geoméricamente una cantidad que se suma o resta a  $\zeta\omega_n$  para producir  $\frac{4}{t_s}$ . Es decir, recordando que el tiempo de establecimiento

es positivo,  $\zeta\omega_n$  es la magnitud de la parte real de un polo complejo conjugado, que por acción de  $\zeta > 1$  se convierte en dos polos reales y diferentes, que se posicionan en un lugar equidistante de  $\zeta\omega_n$  en el eje real dado por la distancia  $\pm\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ .

De esta manera (B.6) puede volver a escribirse como:

$$-\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} = \frac{4}{t_s} \quad (\text{B.7})$$

y a partir de ello:

$$\zeta\omega_n - \frac{4}{t_s} = \pm\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

$$\left(\zeta - \frac{4}{t_s\omega_n}\right)^2 = \zeta^2 - 1$$

$$\zeta^2 - \frac{8\zeta}{t_s\omega_n} + \frac{16}{t_s^2\omega_n^2} = \zeta^2 - 1$$

$$\frac{8\zeta}{t_s\omega_n} = \frac{16}{t_s^2\omega_n^2} + 1$$

$$\frac{\zeta}{\omega_n} = \frac{t_s}{8} \left( \frac{16}{t_s^2\omega_n^2} + 1 \right)$$

$$\frac{\zeta}{\omega_n} = \left( \frac{2}{t_s\omega_n^2} + \frac{t_s}{8} \right) \quad (\text{B.8})$$

Ahora bien, observando que:

$$2\zeta\omega_n = \omega_n^2(R_A C_1 + R_B(C_1 + C_2)),$$

se obtiene:

$$\frac{\zeta}{\omega_n} = \frac{R_A C_1 + R_B(C_1 + C_2)}{2}$$

$$\frac{4}{t_s \omega_n^2} + \frac{t_s}{4} = R_A C_1 + R_B (C_1 + C_2)$$

$$\frac{4R_A R_B C_1 C_2}{t_s} + \frac{t_s}{4} = R_A C_1 + R_B (C_1 + C_2)$$

$$R_A \left( \frac{4R_B C_1 C_2}{t_s} - C_1 \right) = R_B (C_1 + C_2) - \frac{t_s}{4}$$

$$R_A = \frac{R_B (C_1 + C_2) - \frac{t_s}{4}}{\frac{4R_B C_1 C_2}{t_s} - C_1} \quad (\text{B.9})$$

tras reemplazar (B.8) y la expresión para  $\omega_n^2$  dada en términos de los parámetros del sistema.

La ecuación para  $R_A$  dada en (B.9) puede resolverse utilizando los parámetros conocidos para  $R_B$ ,  $C_1 = C_2$  y  $t_s$ . Posteriormente, será posible calcular  $\omega_n$  y  $\zeta$  empleando otras ecuaciones previamente formuladas.

Existe sin embargo, un inconveniente matemático derivado del procedimiento propuesto para formular la ecuación (B.8).

Si se observa detalladamente esta expresión, se puede notar que al elevar al cuadrado se pierde una de las posibles respuestas que satisface el problema, dado por el signo “ $\pm$ ” que precede el radical. En la práctica, conociendo  $\omega_n$  y  $\zeta$  es posible calcular la distancia que se suma y se resta a  $\zeta \omega_n$  para ubicar los polos y a partir de ello, determinar el dominante como aquel más cercano al eje imaginario.

También es cierto que sin saber el resultado, por intuición siendo  $\zeta \omega_n$  una magnitud, el polo dominante se ubicará al restar (diferencia de signo) el término  $\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$ .

Es precisamente esto último lo que se pierde al elevar la expresión al cuadrado, y por tanto, al simular el sistema de segundo orden obtenido con las ecuaciones propuestas, siempre se obtendrá el tiempo de establecimiento dado por el polo remanente (o sea, el polo real obtenido tras sumar la distancia a  $\zeta\omega_n$ ).

Regresando a la ecuación (B.1) se observa que los parámetros desconocidos son  $R_A$  y  $R_B$ . Sin embargo,  $R_B$  es obtenido empleando el teorema de valor final a partir de la información de estado estacionario en el sistema experimental real. Asimismo, de (B.2) se observa como este cálculo para  $R_B$  genera el término  $K$  que multiplica la forma canónica de segundo orden.

De esta manera se define un parámetro  $R_{Bd}$  (denominado  $R_B$  dinámico) que permite ajustar los cálculos para obtener el comportamiento dinámico requerido, y posteriormente ajustar la ganancia  $K$  mediante una relación que permite obtener el valor de  $R_B$  que satisface la ganancia experimental; en otras palabras:

$$K = R_{Bd}P = R_B$$

En resumen:

- Una selección para  $R_{Bd}$  hace que las ecuaciones calculen un  $R_A$  que resuelve (matemáticamente) el sistema.
- Posteriormente se verifica que  $\zeta > 1$ ,  $\omega_n \approx 0$  y  $R_A$  sea menor a  $R_{Bd}$  (teniendo en cuenta que la apertura en la válvula es mayor entre los dos tanques que en la salida).
- De no ser consistente, se repiten los cálculos para un nuevo  $R_{Bd}$ .
- La elección de  $R_{Bd}$  no es del todo aleatoria. Pruebas demuestran que  $10R_{Bd} = R_B$  es una medida justa para obtener valores consistentes.

## ANEXO C

### PRESUPUESTO

**Tabla C. 1.** Presupuesto global por fuentes de financiación (en miles de \$)

RUBROS	FUENTES			TOTAL
	UIS	Contrapartidas		
	Especie	Efectivo	Especie	
PERSONAL	1.600	0	5.250	6.850
EQUIPOS (Compra)	0	0	0	0
EQUIPOS/SOFTWARE (Uso)	20.550	0	2.000	22.550
SOFTWARE (Compra)	No financiable	0	0	0
MATERIALES (Compra)	No financiable	0	0	0
SALIDAS DE CAMPO	No financiable	0	0	0
BIBLIOGRAFIA (Compra)	7.000	0	0	7.000
SERVICIOS TÉCNICOS	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>29.150</b>	<b>0</b>	<b>7.250</b>	<b>36.400</b>

**Tabla C. 2.** Gastos de personal (en miles de \$)

NOMBRES Y APELLIDOS	FORMACIÓN ACADEMICA	FUNCIÓN DENTRO DE LA PROPUESTA	DEDICACIÓN Horas/semana	RECURSOS			TOTAL
				UIS	Contrapartida		
				Especie	Efectivo	Especie	
Ana Mendoza	Pregrado	Tesista	21	0	0	2.625	2.625
Silvia Acelas	Pregrado	Tesista	21	0	0	2.625	2.625
Ricardo Alzate	Postgrado	Director	1	1.600	0	0	1.600
<b>TOTAL</b>				<b>1.600</b>	<b>0</b>	<b>5.250</b>	<b>6.850</b>

**Tabla C. 3.** Descripción de los equipos/software (en miles de \$)

EQUIPO	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
		UIS	Contrapartida	
Fuente	Alimentación de circuitos	400	0	400
Osciloscopio	Medidas de circuito	600	0	600
Multímetro	Medidas de circuito	250	0	250
Computador Laptop	Documentación y simulación	1.500	2.000	3.500
Software: Matlab / STEP 7	Software requerido	2.800	0	2.800
Equipo completo de automatización (SIEMENS s7-1200; Sensores;	Equipo de automatización	15.000	0	15.000
TOTAL		20.550	2.000	22.550

**Tabla C. 4.** Valoraciones salidas de campo (en miles de \$)

ÍTEM	COSTO UNITARIO	Nº	TOTAL
N/A	0	0	0
TOTAL			0

**Tabla C. 5.** Materiales y suministros (en miles de \$)

MATERIALES	JUSTIFICACIÓN	VALOR
N/A	N/A	0
TOTAL		0

**Tabla C. 6.** Bibliografía (en miles de \$)

ÍTEM	JUSTIFICACIÓN	VALOR
Libros Biblioteca UIS	Información de base para el diseño de sistemas de control, instrumentación y sistemas automáticos	2.000
Bases de datos biblioteca UIS		5.000
TOTAL		7.000

**Tabla C. 7. Servicios Técnicos (en miles de \$)**

TIPO DE SERVICIO	JUSTIFICACIÓN	VALOR
N/A	N/A	0
N/A	N/A	0
TOTAL		0