

**INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROL DE NIVEL DE
LÍQUIDOS EMPLEANDO UN PLC ALLEN-BRADLEY**

**ANDERSON JULIÁN ATUESTA ROBLEDO
JULIÁN ALEXANDER VELANDIA SUÁREZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROL DE NIVEL DE
LÍQUIDOS EMPLEANDO UN PLC ALLEN-BRADLEY**

**ANDERSON JULIÁN ATUESTA ROBLEDO
JULIÁN ALEXANDER VELANDIA SUÁREZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

Director

**RICARDO ALZATE CASTAÑO, PhD
Doctor en Ingeniería Informática y Automática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIAS

*Dedicado a la memoria de mi nonito JOSE SIFREDO VELANDIA NIÑO
(QEPD).*

*Con su ejemplo de vida dedicación esfuerzo y sacrificios logro formar mi
carácter, aunque no está a mi lado sé que donde se encuentre está orgulloso
de lo que he conseguido.*

Julián Alexander Velandia Suárez.

DEDICATORIAS

A mi familia y amigos.

Anderson Julián Atuesta Robledo.

AGRADECIMIENTOS

A todos los que hicieron posible esta meta.

Anderson Julián Atuesta Robledo.

AGRADECIMIENTOS

Dios es el encargado de dirigir cada uno de mis pasos doy gracias a Él por permitirme culminar con éxito mi carrera profesional.

De igual manera es necesario dar gracias a varias personas que hacen parte de este triunfo:

A mi padre Alexander Velandia que con su ejemplo esfuerzo y dedicación logro formar en mi la persona que soy, este triunfo es tuyo papi.

A mi madre Nancy Suárez que con su amor, valentía, entrega y sacrificios me guío y fortaleció para llegar con éxito a lograr esta meta.

A mi hermana Ana Sofía Velandia Suárez, por su compañía incondicional.

A B Helena Duarte, gracias por tu apoyo incondicional tu paciencia y amor.

A mi compañero de trabajo de grado Anderson Atuesta quien trabajo hombro a hombro conmigo para la consecución de nuestros objetivos.

A mis amigos quienes formaron parte fundamental en el camino recorrido, con todos y cada uno de ustedes hay una historia que contar

Gracias Salas, Gustavo, Flaco, Sardi, Sebastián, Rolito, Dago, Paulis, Luisa, Héctor, Rojo, Andreo, Pinzón, Mis amigos del garage, Mis colegas y amigos de otras carreras (Electricistas, Mecánicos, Industriales, civiles), a mi equipo PFU.

A todas mis familiares y amigos que participaron en la construcción de este logro

Muchas gracias.

Julián Alexander Velandia Suárez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo general.....	22
1.1.2 Objetivos específicos	22
2. CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE NIVEL	23
2.1 SISTEMAS INDUSTRIALES DE NIVEL DE LÍQUIDO	23
2.1.1 Sistema de tratamiento de aguas	25
2.2 SISTEMA CONSTRUIDO EN LABORATORIO	25
2.2.1 Dispositivo de sensado	28
2.2.2 Dispositivos de actuación.....	28
2.2.3 Dispositivo de control.....	30
2.2.4 Acondicionamiento de señales	30
2.2.5 Sistema final constituido	31
3. INTERACCIÓN CON EL PLC ALLEN-BRADLEY.....	33
3.1 PROGRAMACIÓN CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE	33
3.1.1 Creación de un programa básico en <i>RSLogix 5000®</i>	35
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO	38
3.2.1 Llenado de tanque sin perturbación.....	41
3.2.2 Llenado de tanque con perturbación.....	49
4. REGULACIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS	51
4.1 CONTROL ON-OFF (ENCENDIDO-APAGADO).....	51
4.2 CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO (PID)	55
4.2.1 Bloque de modulación por ancho de pulso (PWM)	55

4.2.2 Descripción y configuración de bloque PID.....	57
4.2.3 Pruebas para control PID.....	59
5. CONCLUSIONES	64
6. RECOMENDACIONES.....	66
7. TRABAJO FUTURO	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración para un reactor químico.....	24
Figura 2. Planta para potabilización de agua.....	26
Figura 3. Diagrama P&ID para el sistema de control de nivel de líquido.....	27
Figura 4. Sensor ultrasónico para medida de nivel.....	28
Figura 5. Dispositivos de actuación: (a) electroválvula; (b) bombas.....	29
Figura 6. PLC empleado para efectuar el control del sistema.....	30
Figura 7. Interconexión entre sensor de nivel y PLC.....	31
Figura 8. Interconexión entre bomba y PLC.....	31
Figura 9. Sistema construido para control de nivel de líquido.....	32
Figura 10. Interfaz RSLogix 5000®.....	35
Figura 11. Interfaz <i>RsLinx Classic</i>	36
Figura 12 Creación de nuevo controlador y nuevo módulo.....	36
Figura 13. Asignación de <i>TAG</i>	37
Figura 14. Rutina de ejemplo para PLC.....	38
Figura 15. Carga de programa en controlador.....	38
Figura 16. Rutina para captura de señales del sistema.....	40
Figura 17. Perfil de llenado para dos condiciones iniciales de abastecimiento.....	42
Figura 18. Estímulo de flujo de entrada experimental.....	42
Figura 19. Modelo de llenado de un tanque.....	45
Figura 20. Modelo de llenado de dos tanques en cascada.....	46
Figura 21. Validación de modelo del sistema.....	49
Figura 22. Sistema perturbado.....	50
Figura 23. Diagrama de bloques para rutina de control ON-OFF implementada en PLC.....	52

Figura 24. Respuesta de nivel ante una acción de control ON-OFF	53
Figura 25. Señal de control ON-OFF en el actuador.....	54
Figura 26. Diagrama de bloques para modulador PWM implementado.....	56
Figura 27. Herramienta especial PID en <i>RSLogix 5000®</i>	57
Figura 28. Configuración de bloque PID en <i>RSLogix 5000®</i>	58
Figura 29. PID configurado en rutina de programación en escalera	59
Figura 30. Diagrama de bloques para esquema de control PID implementado en PLC	59
Figura 31. Respuesta de nivel ante una acción de control PID para ganancias unitarias	61
Figura 32. Señal de control PID en el actuador, para ganancias unitarias	61
Figura 33. Respuesta de nivel ante una acción de control PID sintonizado	63
Figura 34. Señal de control PID sintonizado, en el actuador	63
Figura 35. Perfil de llenado para actuador modificado.....	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características técnicas del sensor de nivel	28
Tabla 2. Requerimientos de instalación <i>RLogix 5000</i> ®.....	33

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Diagramas en escalera para rutinas ejecutadas en el PLC	75

RESUMEN

TÍTULO: INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDOS EMPLEANDO UN PLC ALLEN-BRADLEY¹.

AUTORES: ANDERSON JULIÁN ATUESTA ROBLEDO
JULIÁN ALEXANDER VELANDIA SUÁREZ².

PALABRAS CLAVE: Actuador PWM, control PID, instrumentación industrial, PLC ALLEN BRADLEY, programación en escalera, sistema de nivel de líquidos.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto de grado aborda el prototipado, la caracterización y el control de un sistema de nivel de líquidos empleando instrumentación industrial. Partiendo de un modelo reducido para un sistema de tratamiento de aguas, se constituyó un lazo de recirculación de líquido con el objetivo de mantener invariante el nivel en uno de los dos tanques en cascada, a pesar de la influencia de perturbaciones en la resistencia hidráulica de salida del sistema. Para ello se realizó la caracterización del comportamiento dinámico de la planta, una aproximación de los valores de parámetros relevantes y la posterior implementación de una estrategia de control ON-OFF en un PLC ALLEN-BRADLEY. Con el objetivo de implementar un regulador de tipo PID, fue necesario construir mediante una rutina lógica en el lenguaje de programación en escalera, un módulo de PWM que permitió comandar una electro-válvula de dos posiciones (elemento final de control) mediante una señal continua entregada por el módulo de control. Los resultados obtenidos por ambas estrategias de control son satisfactorios en cuando a la reducción de los efectos de perturbaciones, siendo el PID una acción más suave en términos de desgaste del actuador dada su reducción en conmutaciones de alta frecuencia. Esta solución puede representar una reducción de costo en aplicaciones reales de la industria. Se plantea como trabajo futuro mayor caracterización del comportamiento de la electroválvula para determinar su potencial aplicación en la industria.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD.

ABSTRACT

TITLE: INSTRUMENTATION AND COMMISSIONING OF A LIQUID LEVEL CONTROL USING AN ALLEN-BRADLEY PLC³.

AUTHORS: ANDERSON JULIÁN ATUESTA ROBLEDO
JULIÁN ALEXANDER VELANDIA SUÁREZ⁴.

KEY WORDS: PWM actuation module, PID control, industrial instrumentation, ALLEN BRADLEY industrial controller, ladder programming, two tank hydraulic system.

DESCRIPTION:

In this work, a two-tank hydraulic system has been designed, built and controlled using industrial instrumentation devices. Taking as a base a small-scale water treatment unit, two tanks were coupled in cascade in order to create a recirculation loop for water, trying to keep fixed the content levels at the output reservoir in spite of perturbations applied on hydraulic resistances of the system. Then, characterization of the dynamic behavior was performed and main parameters approximated by testing experimental data. An ON-OFF control strategy was implemented in an ALLEN-BRADLEY industrial controller. In order to be able to perform PID actions, a PWM actuation module was coded in ladder language such that a two-position electro-valve could be switched appropriately by a continuous law. Both, the ON-OFF and the PID controllers, shown good performance to annihilate changes in the hydraulic resistance. Nevertheless, the PID action was better in terms of actuation wearing avoidance, given its reduced high-frequency switching. This solution may represent a cost reduction in real industrial applications. Mayor characterization of the behavior of the solenoid were planted as future work for their potential application in industry. It applies the reference value even after applying disturbances corresponding position in the outlet valve thereby demonstrating better comparative performance

³ Degree work.

⁴ Physico-mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Supervisor: Ricardo Alzate Castaño, PhD.

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 Scheider Electric, entre otras, reconocidas por el desarrollo de tecnologías aplicables en entornos industriales. Sin embargo, el costo de 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 el alto 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. Asimismo, la industria de dulces procesados, lácteos y frutas, es el tercer renglón de la agroindustria en Santander, precedido por la avicultura y la producción de palma. En regiones como Vélez y

Floridablanca el sector del dulce emplea al 35% de la población. Sin embargo, el nivel de tecnificación de estas fábricas, en su mayoría pequeñas y microempresas, no es suficiente para asumir retos de calidad como los impuestos por tratados de libre comercio y otros de competencia internacional [11, 12], lo cual motiva a desarrollos tecnológicos que puedan orientarse a potenciar este tipo de industria en la región y el país [11, 12].

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 [13]. También en [14] se implementa el diseño y la instrumentación de un sistema de tanques acoplados para prácticas de laboratorio universitario. En [15] 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 [16] de la UPB-Medellín donde se plantea una solución para la industria de tintorerías local a partir de un control de nivel y [17] 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: [18, 19, 20, 2].

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: ¿Qué es la tecnología ALLEN-BRADLEY? ¿Es posible emplear un PLC para controlar la dinámica de dos tanques en cascada? ¿Cómo se deben seleccionar y 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, además de fortalecer las actividades de cooperación entre la Universidad Industrial de Santander y el Tecno-Parque SENA nodo Bucaramanga, todo esto con base en los objetivos propuestos a continuación.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general. Seleccionar la instrumentación y configurar el equipo de control requeridos para automatizar un proceso de nivel de líquidos en el Tecno-Parque SENA Nodo Bucaramanga, empleando un PLC ALLEN-BRADLEY.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir a partir de elementos disponibles, un sistema de recirculación de agua como modelo a escala de un proceso industrial en el Tecno-Parque SENA Nodo Bucaramanga
- Configurar e instrumentar los elementos requeridos para la instalación y puesta en marcha de un lazo de control de nivel basado en un PLC ALLEN-BRADLEY
- Describir el procedimiento para programar un control PID en un PLC ALLEN-BRADLEY, utilizando como ejemplo un modelo a escala de proceso industrial en el Tecno-Parque Sena Nodo Bucaramanga
- Validar el desempeño del sistema controlado ante perturbaciones de nivel.

2. CONFIGURACIÓN DE UN SISTEMA PARA CONTROL DE NIVEL

El presente capítulo describe la configuración de un sistema para recirculación de aguas, como modelo a escala de un proceso industrial. Para ello se aborda la descripción técnica de elementos a ser empleados y su respectiva interconexión, constituyendo un sistema sobre el cual se desarrollarán posteriores acciones de control para regular niveles de líquido contenido.

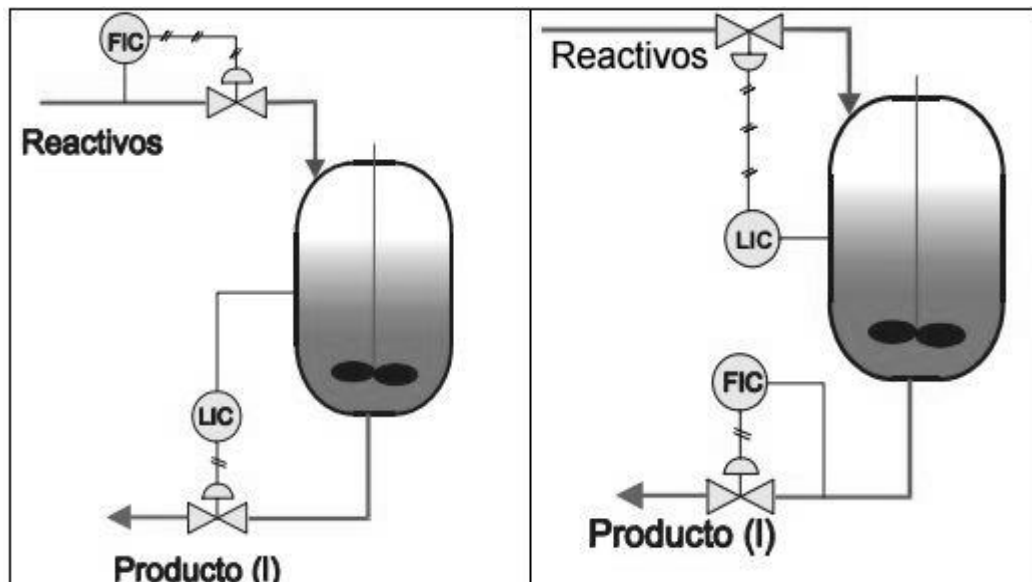
2.1 SISTEMAS INDUSTRIALES DE NIVEL DE LÍQUIDO

Un proceso industrial acoge el conjunto de operaciones diseñadas para la obtención, transformación o transporte de uno o varios productos primarios. Dicho de otra manera, el propósito de un proceso industrial se basa en el aprovechamiento eficaz de los recursos naturales de forma que se conviertan en materiales, herramientas y sustancias capaces de satisfacer más fácilmente las necesidades de los seres humanos y, en consecuencia, mejorar su calidad de vida. Otra definición indica que los procesos industriales son procedimientos que involucran agentes de tipo: químico, físico, eléctrico o mecánico, para manufacturar un producto, usualmente desarrollado a gran escala. Por tanto, en general estos procesos pueden ser clasificados como: de calentamiento, electrólisis, corte, moldeo, separación, destilación o alteraciones orgánicas, entre otros, dependiendo del tipo de transformación efectuado sobre los materiales operados [21].

Se observa entonces como estos procesos industriales son en esencia procesos químicos. Los procesos químicos basan su principio en la transformación de la materia a través de reacciones químicas. Dichas reacciones químicas se realizan

al interior de un reactor químico. Así, para garantizar el éxito de la reacción, es necesario controlar las condiciones de presión, nivel, flujo y temperatura al interior del reactor durante la realización del proceso. En la Figura 1 se ilustra un modelo de reactor químico básico.

Figura 1. Ilustración para un reactor químico



Fuente: [22]

Dentro de las posibles formas de clasificación que posee un reactor químico, se destacan dos categorías principales: el reactor por lotes (o batch) y el reactor continuo de tanque agitado (CTSR, continuous flow stirred-tank reactor). Fundamentalmente, esta clasificación distingue procesos que se realizan de manera interrumpida de aquellos que lo hacen de manera ininterrumpida, con correspondientes justificaciones, ventajas y desventajas, dependiendo del tipo de proceso [22]. En cualquier caso, se observa como el reactor es el principal protagonista del proceso, y por tanto será el control de este elemento, lo que esencialmente compete al desarrollo tecnológico de la ingeniería aplicada al

proceso. Luego, siendo un reactor fundamentalmente un tanque, se puede asociar fácilmente el control de tanques con el control de procesos industriales.

De esta manera, regular la presión, el nivel, la temperatura y/o el caudal al interior de un tanque, constituye parte esencial de diversos procesos en la industria, como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas textiles, plantas petroleras, plantas de gas, industrias de metales, industrias de licores, industrias de pinturas, estaciones de gasolina y granjas agroindustriales, entre otras.

2.1.1 Sistema de tratamiento de aguas. En la Figura 2, se ilustra el diagrama genérico de una planta de tratamiento para potabilización de aguas. El objetivo principal de una planta de potabilización de agua, es reacondicionar el agua para que pueda ser de nuevo apta para el consumo humano. Esencialmente, se realizan procedimientos de captación, decantación, filtración, adición de agentes químicos y almacenamiento para distribución [23, 24]. Estas plantas se acoplan a los sistemas de acueducto municipal y por tanto, es importante mantener niveles de líquido suficientes para satisfacer la demanda de la población, en un modo apropiado, aún en los momentos de mayor consumo.

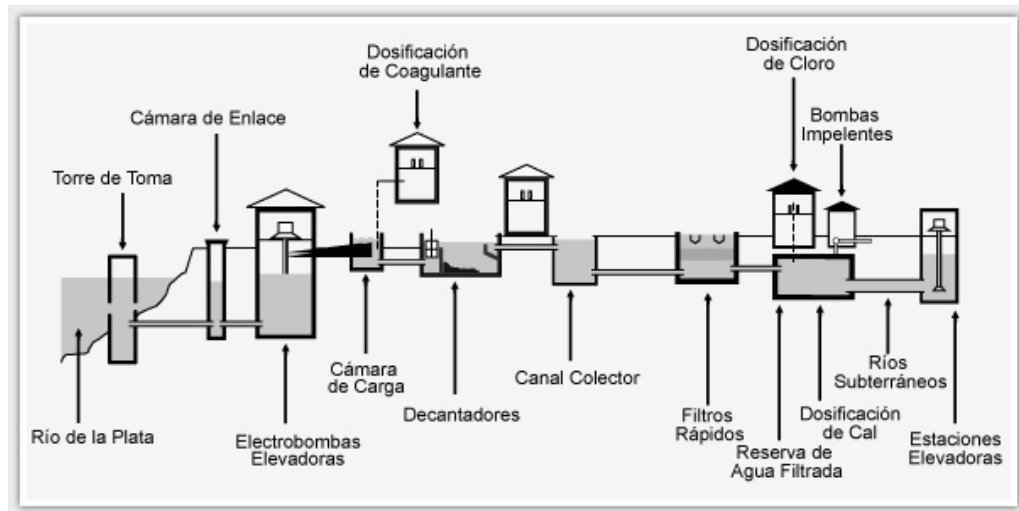
2.2 SISTEMA CONSTRUIDO EN LABORATORIO

En la Figura 3, se presenta un diagrama P&ID⁵ de un sistema de control de nivel de líquido implementado en el Tecno-Parque SENA Nodo Bucaramanga. Con referencia al sistema propuesto en la sección 2.1.1, este modelo puede representar un prototipo a pequeña escala de un sistema para tratamiento de aguas, en el cual el tanque de almacenamiento relaciona el agua sin tratar; las

⁵ Piping and instrumentation diagram/drawing (P&ID) es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental.

etapas de ablandamiento, filtración y desinfección se realizan en el tanque A; mientras que el tanque B cumple las funciones de depósito de abastecimiento. En cuanto al dimensionamiento, el tanque de almacenamiento posee una capacidad máxima instalada de 250 L, mientras los tanques denotados como A y B poseen cada uno 100 L. De otro lado, todas las interconexiones se dimensionan para diámetros de 1" con fluido (agua) circulando a temperatura ambiente.

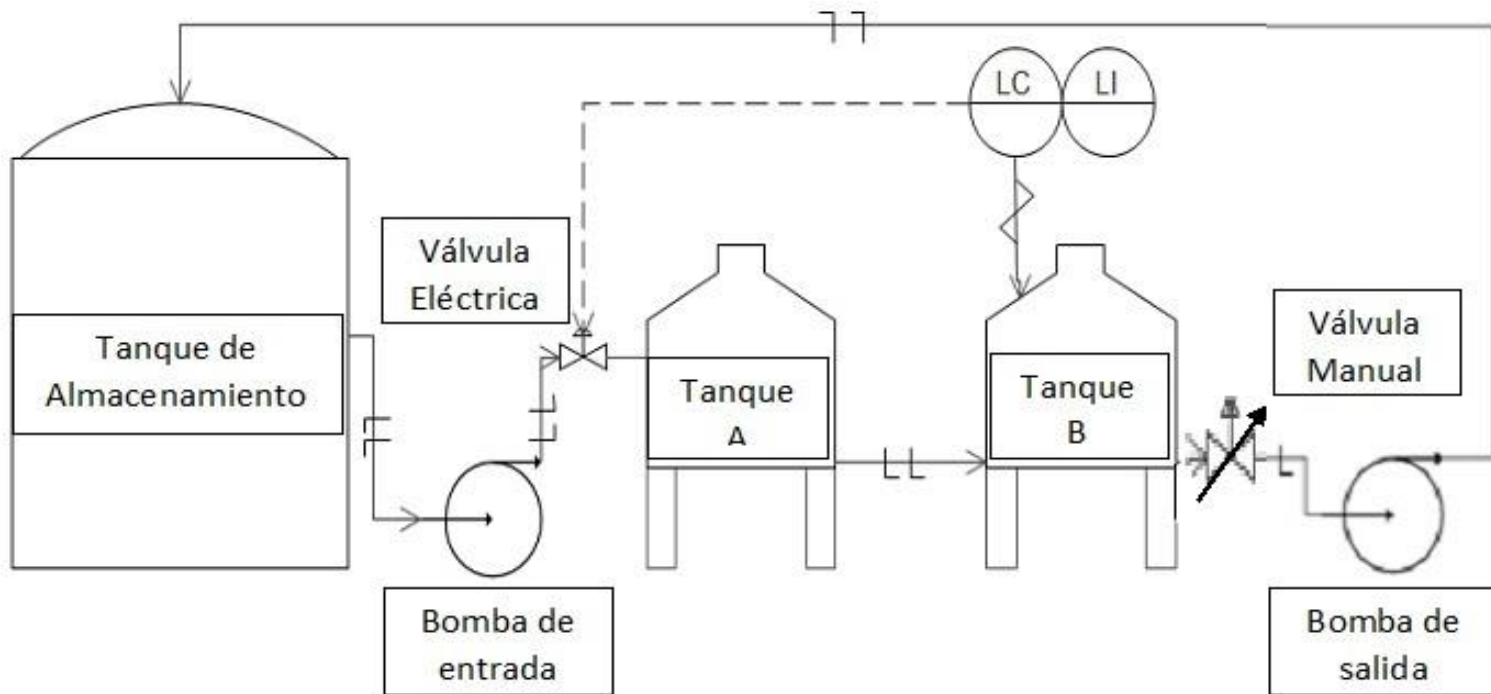
Figura 2. Planta para potabilización de agua



Fuente: Wikipedia.org

A continuación se realizará una descripción de los elementos configurados para sensar y actuar el sistema de recirculación de agua, cuyo objetivo de control será mantener en un nivel preestablecido, la cantidad de líquido contenida en el tanque B, a pesar de la presencia de perturbaciones de carga hidráulica aplicadas en el sistema, simulando cambios en los perfiles de demanda de consumo. Cabe aclarar que el sistema construido se adecuó para operar con un conjunto de dispositivos (instrumentos) existente.

Figura 3. Diagrama P&ID para el sistema de control de nivel de líquido



2.2.1 Dispositivo de sensado. El elemento de medición empleado para tomar los datos de nivel en el tanque de salida, corresponde con un sensor ultrasónico marca EGE serie ARKU 400 GI, según se ilustra en la Figura 4. Este dispositivo permite obtener como medida una señal de corriente en el rango de 4 a 20 mA. Otras características técnicas del dispositivo se incluyen en la Tabla 1.

Figura 4. Sensor ultrasónico para medida de nivel



Tabla 1. Características técnicas del sensor de nivel

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Rango	30	mm
	400	mm
Alimentación	15	V
	30	V
Temperatura de operación	-15	°C
	70	°C
Repetibilidad	±0.2	%

Fuente: www.ege-elektronik.com

2.2.2 Dispositivos de actuación. Como elemento de actuación se empleó una válvula eléctrica de tipo encendido-apagado (electroválvula) en combinación con bombas para impulsión del fluido en el circuito de recirculación.

La electroválvula se localizó para regular el paso de fluido entre el tanque de almacenamiento y el tanque de entrada (Tanque A en Figura 3). Dicha electroválvula se activa con un nivel lógico correspondiente con una tensión de entre 14 y 24 VDC a no menos de 650 mA. De otro lado, se emplearon dos bombas centrífugas horizontales, con caudal de 90 L/min, de tipo monofásico. Estas bombas se ubicaron respectivamente cada una en la salida del tanque de almacenamiento y en la salida del tanque de abastecimiento (Tanque B en Figura 3). Ambos elementos se ilustran en la Figura 5.

Figura 5. Dispositivos de actuación: (a) electroválvula; (b) bombas



(a)



(b)

2.2.3 Dispositivo de control. El elemento central para el control del proceso está constituido por un PLC Allen-Bradley de la serie *ControlLogix® 1756*, considerado como de gama alta. Dicho dispositivo se compone de una CPU acoplada a un módulo de alimentación y otros módulos periféricos, entre ellos de entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, módulos de comunicación e interfaces humano-máquina. La programación del dispositivo se realiza empleando el paquete de herramientas RSLogix 5000, exclusivo del fabricante Allen-Bradley. La Figura 6 presenta una ilustración para el controlador industrial utilizado.

Figura 6. PLC empleado para efectuar el control del sistema



2.2.4 Acondicionamiento de señales. A pesar que el PLC utilizado posee módulos de entrada configurables para diferentes tipos de señal, fue necesario realizar una conversión en la señal de salida del sensor de nivel, de manera que la medida pudiera ser transformada a niveles de voltaje entre 2 y 10 VDC, empleando dos resistencias de 1 k Ω en paralelo de la manera ilustrada en la Figura 7. De manera similar, fue necesario construir un circuito de activación para las bombas mediante el acople entre salidas digitales del PLC y un solenoide, tal y como se ilustra en la Figura 8.

Figura 7. Interconexión entre sensor de nivel y PLC

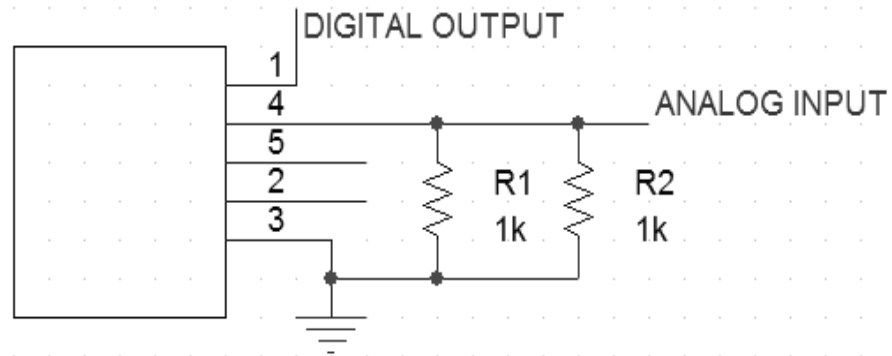
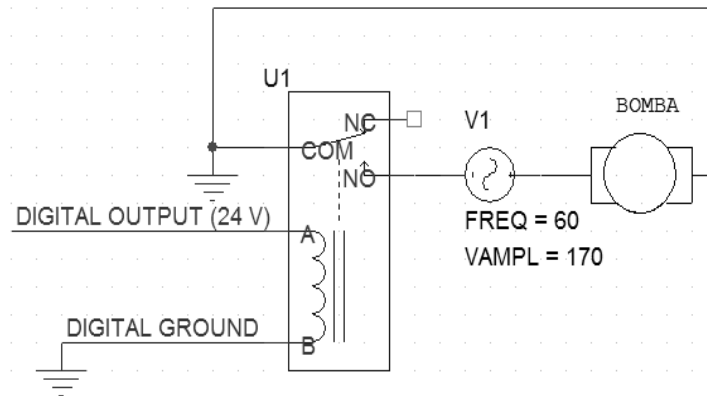


Figura 8. Interconexión entre bomba y PLC



2.2.5 Sistema final constituido. Finalmente, la interconexión adecuada de los elementos anteriormente mencionados, permitió configurar el sistema ilustrado en la Figura 9, a partir del cual es posible identificar los elementos esquematizados previamente en la Figura 3, y que permiten por tanto constituir un sistema para el control de nivel de líquido en el tanque B, a partir de recirculación del flujo, como modelo a escala de un sistema de tratamiento de aguas.

Figura 9. Sistema construido para control de nivel de líquido.



3. INTERACCIÓN CON EL PLC ALLEN-BRADLEY

Una vez construido el prototipo de sistema en laboratorio, se procede con la implementación de rutinas de control en el PLC (*Allen-Bradley*), para mantener constante el nivel de líquido contenido en el tanque de salida del sistema. El presente capítulo describe por tanto, la configuración para dichas rutinas e ilustra los resultados obtenidos a partir de pruebas experimentales en el proceso.

3.1 PROGRAMACIÓN CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE

Para la programación del PLC *Allen-Bradley* se emplea el paquete de herramientas *RSLogix 5000®*, diseñado para programar controladores de la familia *Logix 5000* y la plataforma *logix* de *Rockwell Automation*. Este paquete utiliza para su programación varios tipos de lenguaje, como: escalera (*ladder*), bloques de funciones (*function blocks*), texto estructurado (*structured text*) y esquemas de funciones secuenciales (*sequential function chart*). Para su instalación, se deben cumplir los requerimientos presentados en la Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos de instalación *RSLogix 5000®*

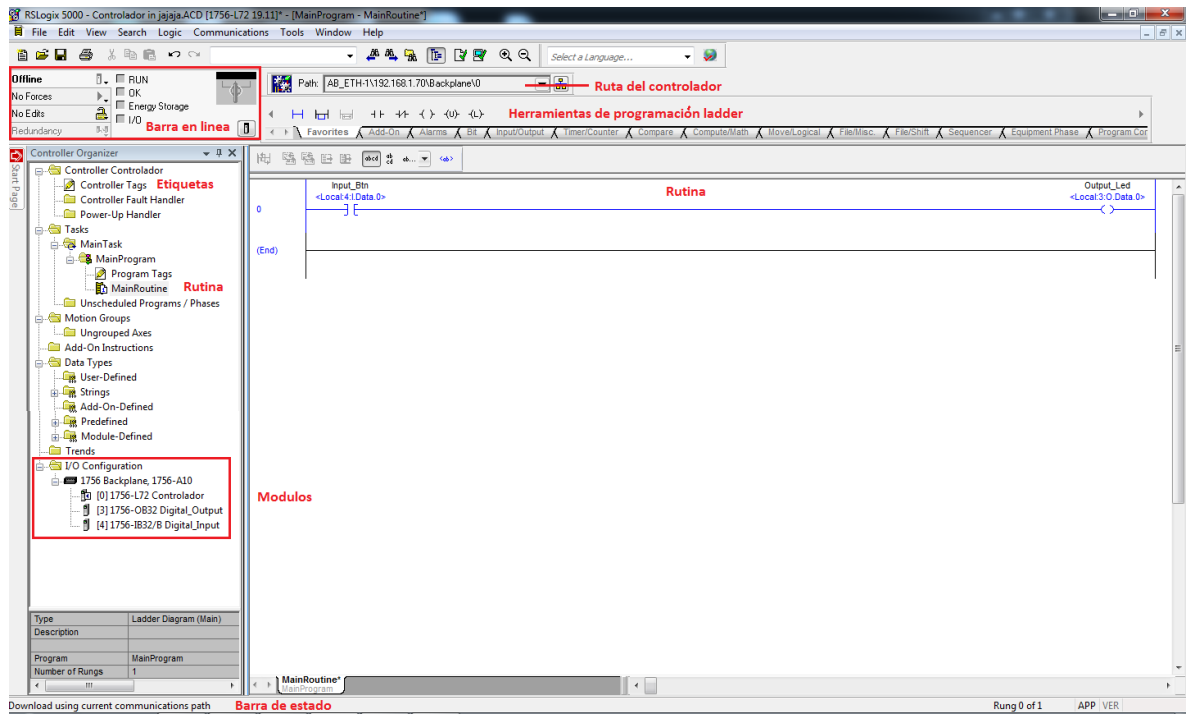
Características	Requerimiento
Procesador	2.8 GHz Intel Core i5 o superior
Memoria	8 GB o más
Sistema Operativo	Windows
Almacenamiento	20 GB libres o más
Gráficos	DirectX 9, con WDDM 1.0 o superior

Fuente: www.rockwellautomation.com

La interfaz de usuario, o ventana principal del programa, se presenta en la Figura 10. De ella se pueden destacar, además de elementos típicos en ambientes de desarrollo para el *Sistema Operativo Windows®*, comandos importantes como los siguientes:

- *Barra en línea*: permite conocer el estado de operación del PLC y del programa;
- *Barra de herramientas de programación ladder*: contiene todas las conexiones de la lógica *ladder* (ramas, paralelos, etc.), como también las instrucciones más utilizadas;
- *Ruta del controlador*: permite identificar el controlador con el que se está trabajando y el modo de conexión del mismo;
- *Etiquetas*: permite acceder al área de trabajo de etiquetas (*TAG*), donde se asignan características a cada una de las que interactúan como entradas y salidas del programa (nombre, valor, etc.);
- *Rutina*: muestra la rutina principal y subrutinas diseñadas a partir de herramientas de programación *ladder*;
- *Módulos*: selección de módulos de entrada y salida del controlador;
- *Barra de estado*: permite conocer información de estado en curso del programa.

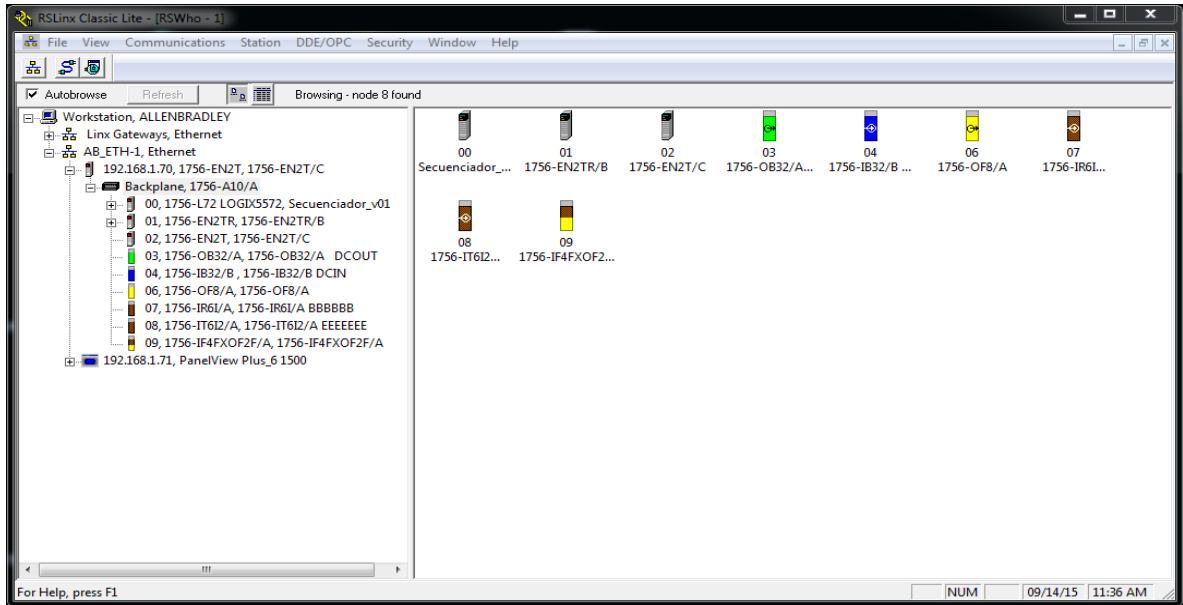
Figura 10. Interfaz RSLogix 5000®



3.1.1 Creación de un programa básico en RSLogix 5000®. Para ilustrar la utilización del RSLogix 5000®, se realizará una rutina simple correspondiente con la activación (o desactivación) de una salida lógica (encendido o apagado de un LED) a partir de una señal de entrada binaria (botón pulsador). Para poder ejecutar dicha tarea en el PLC Allen-Bradley se deben seguir los siguientes pasos:

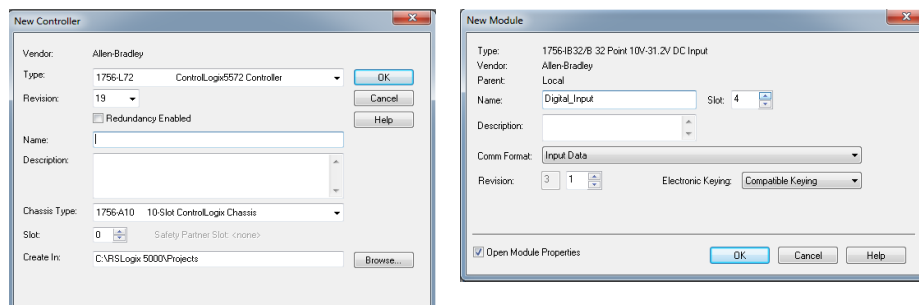
- 1) Inicialmente, se establece comunicación entre el RSLogix 5000® y el PLC. Para ello se emplea la interfaz *RsLinx Classic* (ver Figura 11), en la cual se debe configurar la comunicación entre el equipo y el controlador. Una vez establecida esta comunicación, aparecen características del controlador como referencia, revisión y módulos conectados, siendo para nuestro caso: *1756-L72 ControllLogix5572 Controller, revisión 19, con chasis de 10 ranuras* comunicado vía *Ethernet*.

Figura 11. Interfaz *RsLinx Classic*



2) Posteriormente, se debe crear un proyecto y configurar el controlador y los módulos de entrada y salida a ser conectados, teniendo en cuenta la referencia, revisión y posición en el chasis. Para el caso del ejemplo considerado, se requiere configurar un módulo de entrada digital y uno de salida digital, por lo cual se agregan los módulos en la carpeta *I/O configuration*, seleccionando su referencia, posición en la ranura y revisión según el *RsLinx Classic*. Las interfaces respectivas se muestran en la Figura 12.

Figura 12 Creación de nuevo controlador y nuevo módulo



3) Después de tener establecida la comunicación, de haber creado un proyecto y de haber configurado los módulos en el dispositivo, el paso siguiente corresponde con la codificación de la rutina de programa a realizar por parte del autómeta. En el caso considerado, se realizará una rutina simple, empleando lógica *ladder* o en escalera para implementar una compuerta YES, o en otras palabras, que permita transferir una entrada binaria a la salida. Para esto se definen identificadores de señal al interior del programa denominados TAG, correspondientes con: *pulso de entrada (Input_Btn)* y *led de salida (Output_led)*. La Figura 13 muestra la asignación del TAG para la entrada. La lógica en escalera propuesta se ilustra en la Figura 14.

4) Finalmente, el programa es compilado y ejecutado en alguna de las dos siguientes opciones: mediante una rutina de simulación empleando el recurso *RSLogix Emulated 5000*; o cargándolo en la memoria del procesador en el PLC. Conviene mencionar que la simulación es útil para verificar comportamientos lógicos y codificación del programa, pero una verificación de rutinas requiere la interacción real con el proceso mediante el PLC. Para ejecutar el programa en el *RSLogix 5000®* se sigue la siguiente ruta: “offline” - > “download” (ver Figura 15).

Figura 13. Asignación de TAG

Name	Alias For	Base Tag	Data Type	Description	External Access	Constant	Style
Local3:C		AB:1756_DO:C:0			Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local3:I		AB:1756_DI:I:0			Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local3:O		AB:1756_DO:O:0			Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local4:C		AB:1756_Dt:C:0			Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Local4:I		AB:1756_Dt:I:0			Read/Write	<input type="checkbox"/>	
Input_Btn	Local4:I Data:0		BOOL		Read/Write	<input type="checkbox"/>	Decimal

Name	Data Type
Local3:C	AB:1756_DO...
Local3:I	AB:1756_DO...
Local3:O	AB:1756_DO...
Local4:C	AB:1756_Dt...
Local4:I	AB:1756_Dt:0
Local4:I:Fault	DINT
Local4:I Data	DINT

0	1	2	3	4	5	6	7
8	Used: N	2	13	14	15		
16	DINT Used: N	0	21	22	23		
24	25	26	27	28	29	30	31

Figura 14. Rutina de ejemplo para PLC

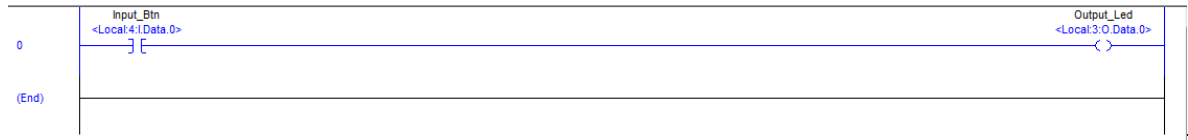
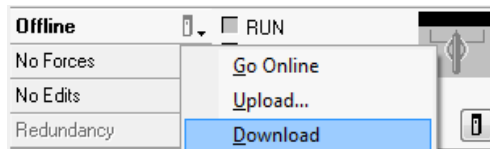


Figura 15. Carga de programa en controlador

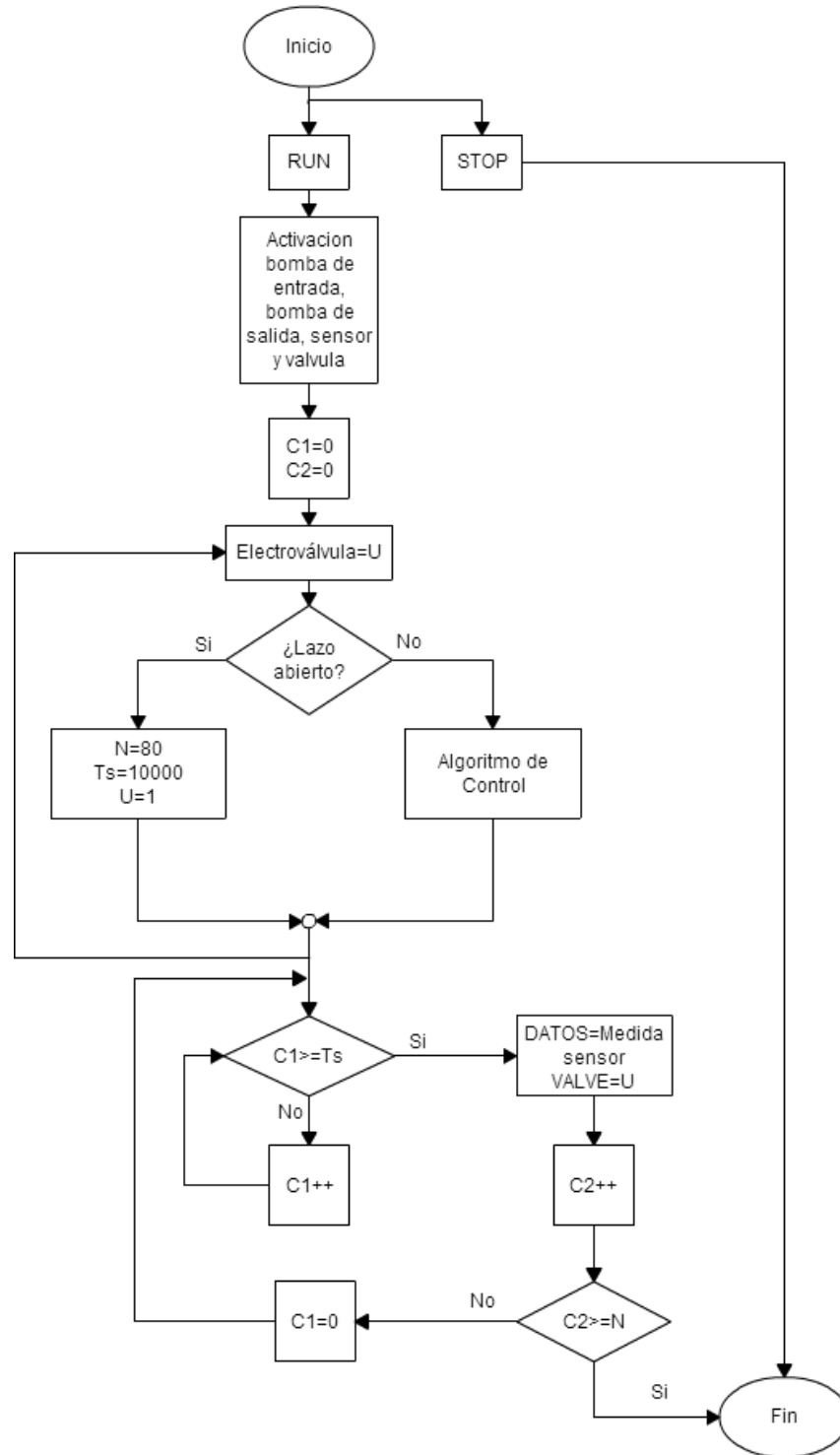


3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA EN LAZO ABIERTO

Para verificar la operatividad del proceso, se procede a realizar pruebas experimentales correspondientes con el envío de señales de actuación y el análisis de las respectivas lecturas en los registros de sensado para la respuesta del sistema. Para ello se ejecutó en el controlador la rutina esquematizada en el diagrama de flujo de señal representado en la Figura 15, donde fundamentalmente se crea un esquema de estímulo-respuesta para tomar datos de altura en centímetros del líquido contenido en el tanque B, conforme avanza el tiempo. El algoritmo cuenta con un botón de inicio (RUN) que activa las bombas de entrada y salida, el sensor y la electroválvula. La activación del sensor es un requisito obligatorio para la captura de registros del sistema, por tanto se verifica esta condición antes de realizar la toma de datos. Partiendo de un ciclo de reloj de 1 *ms*, el contador C1 genera un retardo de T_s ciclos de máquina en la toma de datos, con el objetivo de muestrear cada T_s *ms*. Por su parte el contador C2 permite contabilizar la cantidad N de medidas registradas. La longitud pre-establecida para la cantidad de datos, garantiza un muestreo adecuado de

información de la respuesta del sistema. Para pruebas en lazo abierto, se determinó que $T_s = 10000$ (un dato cada 10 s) y $N = 80$ son suficientes para mapear el perfil de llenado. En lazo cerrado (ver Capítulo 4), $T_s = 250$ (un dato cada 250 ms) y $N = 2000$ permiten capturar cambios instantáneos en electroválvula. Los registros de altura $h(t)$ son almacenados en la variable *DATOS* y los registros para la señal de actuación $u(t)$ son almacenados en la variable *VALVE*. Estas variables son exportadas a un archivo de hoja de cálculo de *Microsoft Excel*. El sistema cuenta también con un botón de paro de emergencia (STOP) que aborta el proceso de manera voluntaria en cualquier paso de ejecución.

Figura 16. Rutina para captura de señales del sistema



A continuación, se presentan resultados para dos tipos de prueba: llenado de tanques sin perturbación y llenado de tanques con perturbación. Para cada caso se analizan dos condiciones de llenado inicial en el tanque de abastecimiento.

3.2.1 Llenado de tanque sin perturbación. La manera más natural para comprender el comportamiento de un sistema de tanques, es a través de la verificación de las características de llenado y vaciado de líquido en condiciones reales de operación. Para realizar estas pruebas, se considerarán dos condiciones iniciales en el llenado del tanque de abastecimiento: 60% y 80%. Asimismo, se considerará una apertura de la válvula de salida manual (ver Capítulo 2, Figura 3) de 20° con respecto a un sistema de referencia donde 90° es la posición de apertura extrema.

A partir de ello, la Figura 17 ilustra el perfil de llenado del tanque de salida (Tanque B, Figura 3), para las dos condiciones de llenado inicial en el tanque de abastecimiento. Como se observa, las pendientes de crecimiento del llenado son idénticas en ambos casos, reflejando el flujo constante del líquido en el lazo de recirculación construido. También se observa un cambio en el valor final (nivel de llenado), consistente con la cantidad de volumen de agua distribuido en el sistema y que tras tener una mayor fuente (o entrada) repercute en una amplificación del nivel en la salida.

Esta respuesta de llenado, corresponde con el estímulo de entrada presentado en la Figura 18, en el cual la apertura de la electroválvula de entrada realiza un cambio de 0% a 100% en $t = 0$.

En términos dinámicos, la respuesta del sistema puede representarse como un sistema lineal de segundo orden sobreamortiguado. Matemáticamente, esto se expresa a partir de la aplicación de la conservación de la masa según se explica en la siguiente subsección.

Figura 17. Perfil de llenado para dos condiciones iniciales de abastecimiento

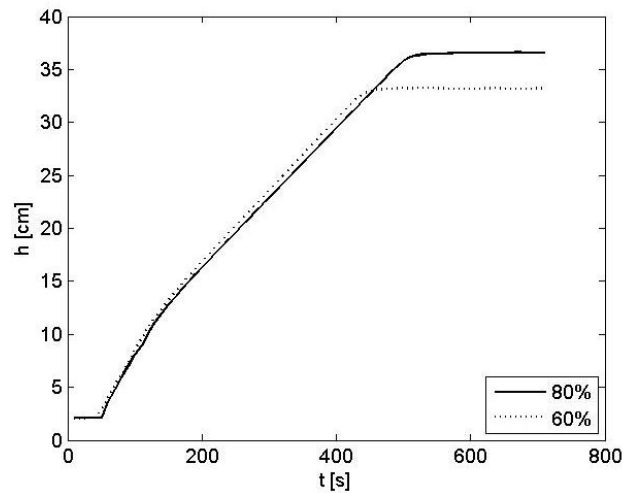
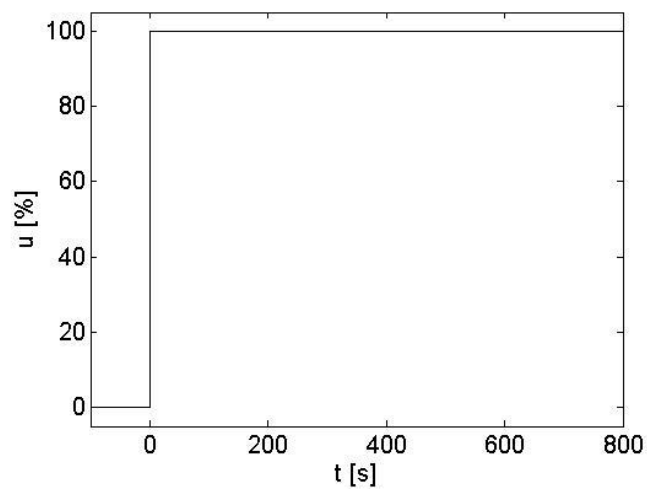


Figura 18. Estímulo de flujo de entrada experimental



3.2.1.1 Modelado Matemático del Sistema: Para modelar matemáticamente el sistema, se parte del principio de la conservación de la energía, que aplicado a la dinámica de un tanque se traduce en términos de volúmenes de líquido; es decir: el volumen almacenado es igual al volumen de entrada menos el volumen de salida [25]:

$$V_{contenido} = V_{entrada} - V_{salida}.$$

Ahora bien, el volumen contenido en un tanque puede expresarse como:

$$V_{contenido} = A_{tanque} h_{contenido},$$

Donde A_{tanque} refiere el área de sección transversal en el tanque, mientras $h_{contenido}$ indica la altura o nivel del líquido contenido. Por tanto, para analizar el comportamiento del sistema en el tiempo, conviene estudiar la manera cómo cambia el volumen, o en otras palabras:

$$\frac{d}{dt}(V_{contenido}) = A_{tanque} \frac{d}{dt}(h_{contenido}),$$

Tras considerar que el área de sección transversal del tanque es constante (es decir, misma área para cualquier altura), como es el caso del prototipo construido en laboratorio. Aplicando entonces el balance de masas inicialmente considerado, esta vez respecto a un cambio temporal, se obtiene:

$$A_{tanque} \frac{d}{dt}(h_{contenido}) = Q_{entrada} - Q_{salida},$$

siendo $Q = \frac{d}{dt}V$ el flujo volumétrico. Asimismo, es posible definir dos parámetros importantes en sistemas hidráulicos o de nivel de líquido [25]:

- *Capacitancia hidráulica*: se define como la relación (o cociente) entre el cambio de líquido almacenado y el cambio de altura:

$$C = \frac{dV}{dh},$$

La cual puede fácilmente demostrarse, corresponde con el área de sección transversal para el caso particular en que la misma no varía con la altura (tal y como en el sistema considerado).

- *Resistencia hidráulica*: se define como la relación (cociente) entre el cambio de nivel y el cambio de flujo de líquido:

$$R = \frac{dh}{dQ},$$

La cual puede considerarse constante ante flujo laminar (i.e. fluido ordenado y suave, para un número de Reynolds inferior a 2100).

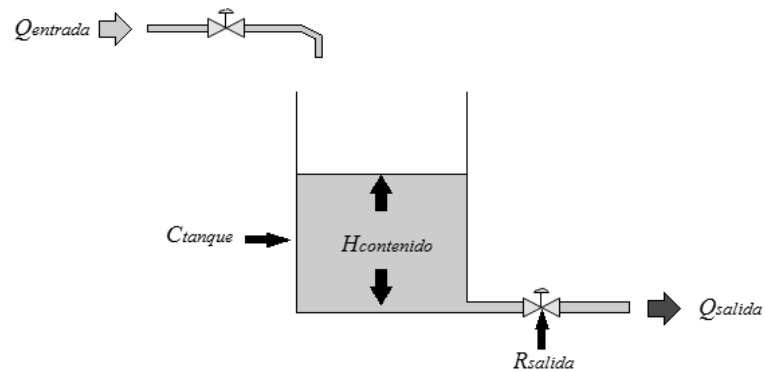
Así, reemplazando dichas cantidades en la ecuación de conservación de masa, se obtiene la siguiente forma modificada:

$$C_{tanque} \frac{d}{dt}(h_{contenido}) = Q_{entrada} - \frac{(h_{contenido} - h_{salida})}{R_{salida}},$$

Siendo $h_{salida} = 0$, con base en el diagrama de la Figura 19. A partir de ello, es posible expresar la relación entrada-salida del sistema en el dominio de Laplace (función de transferencia) mediante la siguiente expresión:

$$\frac{H_{contenido}(s)}{Q_{entrada}(s)} = \frac{R_{salida}}{(R_{salida}C_{tanque})s + 1}.$$

Figura 19. Modelo de llenado de un tanque



Estas mismas ideas pueden extenderse para modelar un sistema de dos tanques en cascada tal y como se presenta en la Figura 20, produciendo la siguiente función de transferencia total:

$$\frac{H_B(s)}{Q(s)} = \frac{R_B}{R_A C_A R_B C_B s^2 + (R_A C_A + R_B C_B + R_B C_A) s + 1}$$

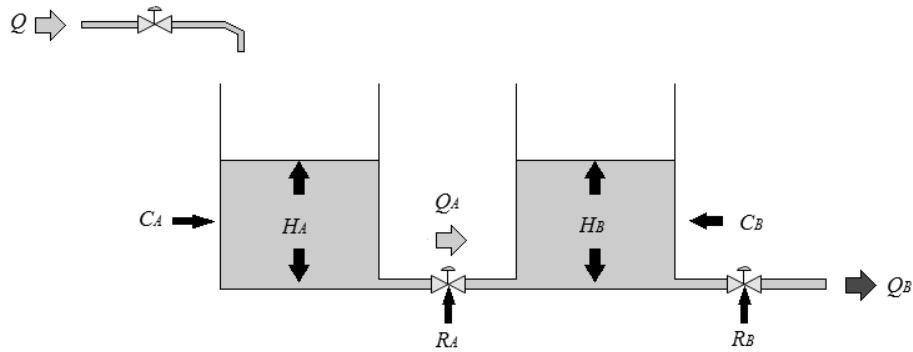
Donde básicamente, se considera que la entrada del segundo tanque es la salida del primero, y por tanto en el cálculo la resistencia de acople entre los dos tanques, R_A , se define como la relación (cociente) entre la diferencia de alturas de los dos tanques y el flujo que circula a través del ducto de acople.

Una vez determinada la función de transferencia para el sistema en lazo abierto, es posible emplear la información de la Figura 17 para aproximar los valores de parámetro del sistema. Para ello, se considerará el perfil de llenado de 60% en el tanque de abastecimiento, a partir de lo cual se tiene:

$$t_s = 436 \text{ s}; \quad h_B(t_s) = 33.2 \text{ cm.}$$

Tomando en cuenta que la respuesta escalón del sistema es sobre amortiguada, no pueden emplearse fórmulas típicas para calcular sus parámetros, debido a que $\zeta > 1$ [26].

Figura 20. Modelo de llenado de dos tanques en cascada



Por tanto, se debe realizar un análisis de la información disponible para tratar de determinar las constantes del sistema. Inicialmente, se recurre a la geometría de los tanques para obtener una capacitancia constante correspondiente con su sección de área transversal ($C_A = C_B = \pi r^2 = 2123.7 \text{ cm}^2$).

De manera similar, el volumen almacenado en el tanque B durante el estado estacionario de la Figura 17, es:

$$V(t) = C_B h_B(t) = 70506.84 \text{ cm}^3,$$

Para todo $t > t_s$. A partir de esto es claro que se requirieron 436 segundos para transferir dicho volumen de agua hacia el tanque B desde el reposo, o en otras palabras:

$$q = \frac{V}{t} = 161.71 \frac{cm^3}{s},$$

Como caudal de entrada constante. Luego, aplicando el teorema de valor final a la función de transferencia del sistema se obtiene:

$$h_B(t_s) = qR_B = 33.2 \text{ cm}; \quad R_B = \frac{h_B(t_s)}{q} = 0.2053 \frac{s}{cm^2}.$$

Ahora bien, considerando la forma canónica de un sistema de segundo orden [26]:

$$\frac{H_B(s)}{Q(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2},$$

Es posible establecer las siguientes equivalencias, tras comparar con la función de transferencia formulada en función de los parámetros del modelo:

$$\omega_n^2 = \frac{1}{R_A C_A R_B C_B}; \quad 2\zeta\omega_n = \frac{R_A C_A + R_B C_B + R_B C_A}{R_A C_A R_B C_B}; \quad K = R_B.$$

Por tanto, puede formularse el siguiente sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas:

$$t_s = \frac{4}{Re(\zeta, \omega_n)}; \quad \omega_n^2 R_A = \frac{1}{C_A R_B C_B}; \quad 2\zeta\omega_n R_A + R_A \left(\frac{1}{R_B C_B} \right) = \frac{C_A + C_B}{C_A C_B},$$

donde:

$$Re(\zeta, \omega_n) = |-\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}|,$$

para $\zeta > 1$.

En este punto, es importante mencionar que existe una dificultad matemática para resolver, analíticamente, el valor de R_A que permite obtener el tiempo de establecimiento deseado para un valor de R_B . La razón está en que al despejar los términos de la ecuación de segundo grado para el denominador del sistema, se debe elevar al cuadrado la expresión para eliminar el radical, y así, teniendo en cuenta que las raíces son reales y diferentes, no es posible manipular el polo dominante.

Por tanto, se realizaron experimentos numéricos para determinar un nuevo valor de R_B , a ser denominado dinámico o R_{Bd} , que permitiera obtener el tiempo de establecimiento deseado en la dinámica del polo dominante y a partir de este calcular los demás parámetros dinámicos del sistema, obteniendo:

$$R_{Bd} = 0.021 \frac{s}{cm^2}; \quad \zeta = 1.5870; \quad \omega_n = 0.0259 \frac{rad}{s}; \quad R_A = 0.0158 \frac{s}{cm^2}.$$

Posteriormente, para conservar las características de estado estacionario, se define un factor de ajuste $P = 9.7762$ entre R_B estacionario y R_{Bd} , de manera que:

$$R_B = 0.2053 = PR_{Bd}.$$

La Figura 21 muestra la superposición entre los datos obtenidos experimentalmente y las predicciones teóricas del modelo. Como se observa, las respuestas coinciden en las regiones de inicio y final de cambio en la curva. Sin embargo, el sistema real no sigue un comportamiento muy ajustado al modelo en otros puntos, debido a dinámicas no modeladas (como saturaciones u otro tipo de no linealidad) en el proceso. Para los objetivos del presente proyecto, esta aproximación se considera suficientemente válida.

3.2.2 Llenado de tanque con perturbación. En un segundo momento, se realizó el llenado del tanque B modificando el ángulo de apertura en la válvula de salida (20° en las pruebas de las Figuras 17 y 21), para dos nuevos valores de 30° (en $t = 540$ s) y 45° (en $t = 660$ s) según se ilustra en la Figura 22. Como se observa, el sistema experimenta una condición de vaciado para la perturbación de 45°, debido a que el flujo de salida es grande y no es capaz de alcanzarse la condición de equilibrio. De otro lado para 30°, el sistema se establece en un nuevo valor de altura $h(t_s) = 31.35$ cm, con lo cual es posible determinar el nuevo valor para la resistencia R_B empleando el teorema del valor final; es decir, para este caso:

$$R_B = \frac{h(t_s)}{q} = 0.1938 \frac{s}{cm^2}.$$

Este valor de perturbación será empleado para las pruebas del control de nivel a ser desarrolladas en el próximo capítulo.

Figura 21. Validación de modelo del sistema

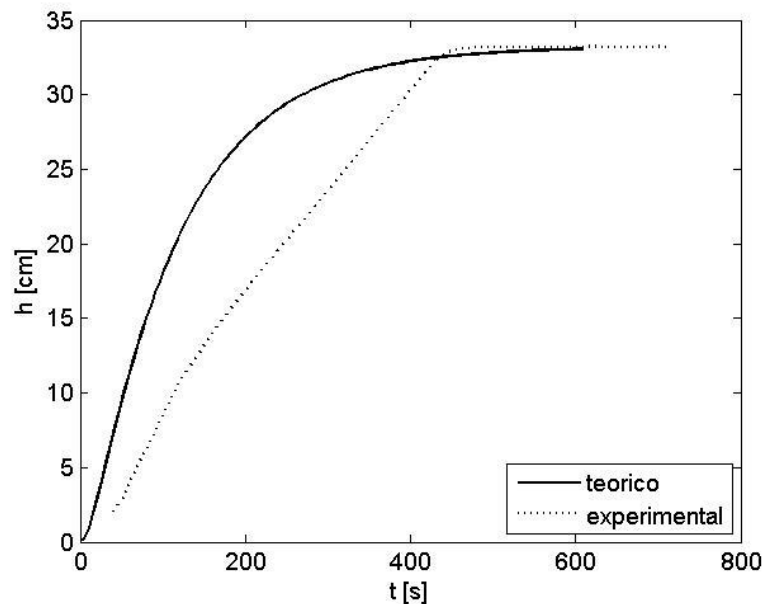
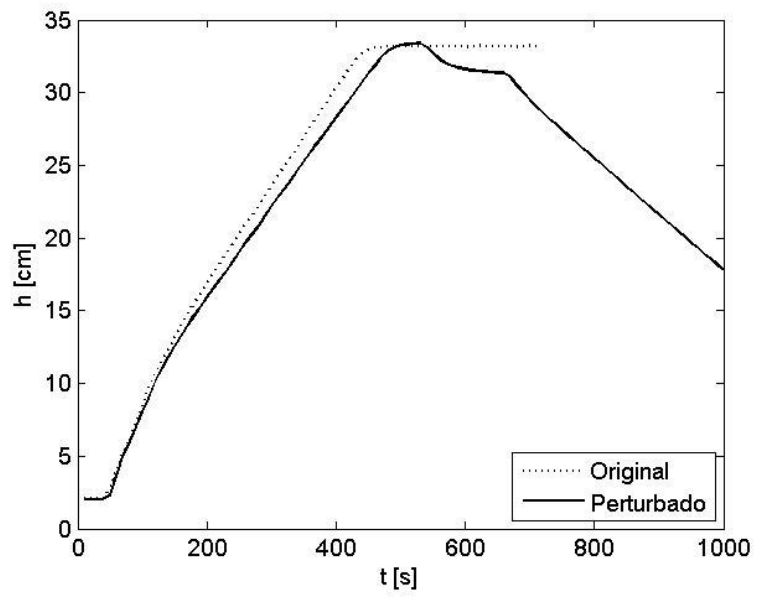


Figura 22. Sistema perturbado



4. REGULACIÓN DE NIVEL DE LÍQUIDOS

Posterior a la caracterización y modelado del sistema a partir de pruebas experimentales en lazo abierto, el presente capítulo presenta la implementación en el PLC (Allen-Bradley) para tareas de regulación en lazo cerrado, buscando mantener constante el nivel de líquido en el tanque de salida, bajo la influencia de perturbaciones. El abordaje se realizará partiendo de una estrategia simple del tipo ON-OFF, posteriormente complementada por la configuración y ejecución para un controlador PID.

4.1 CONTROL ON-OFF (ENCENDIDO-APAGADO)

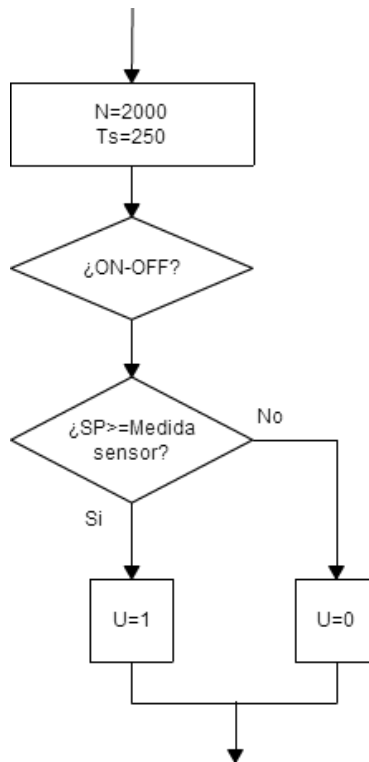
Una estrategia ON-OFF (o encendido-apagado) corresponde con la acción de control más simple, siendo también la más viable desde el punto de vista práctico para el caso considerado, teniendo en cuenta el tipo de actuador del cual se dispone: una electroválvula de dos posiciones. En dicha acción de control, se envía una señal de activación al actuador (ON, $u(t) = 1$) cuando la medida h es menor que la referencia h_r , y se desactiva (OFF, $u(t) = 0$) cuando la salida del proceso h iguala o supera el valor deseado de referencia h_r . En términos matemáticos:

$$u(t) = \text{sgn}(e(t)) = \begin{cases} 1, & e(t) > 0 \\ 0, & e(t) \leq 0 \end{cases}$$

donde $e(t) = h_r - h(t)$ representa el error de nivel y $\text{sgn}(\cdot)$ es la función signo.

Por tanto, para implementar una acción de control ON-OFF en el PLC (Allen-Bradley), se requiere simplemente calcular el error de nivel $e(t)$ y aplicar sobre él un condicional para determinar su signo. La Figura 23 ilustra el diagrama de bloques para la rutina implementada en el cálculo del control, misma que corresponde para este caso con la subrutina “*Algoritmo de Control*” incluida en el diagrama de flujo general de la Figura 15. El diagrama en escalera correspondiente se ilustra en el Anexo A.

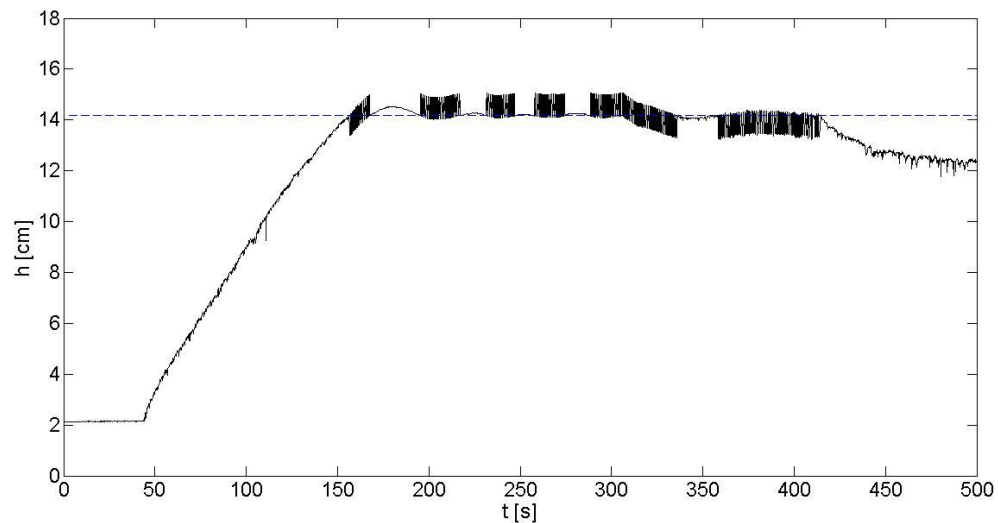
Figura 23. Diagrama de bloques para rutina de control ON-OFF implementada en PLC



Una vez ejecutada dicha rutina en el proceso, se obtiene el comportamiento mostrado en la Figura 24. Las condiciones de operación para efectuar este y los demás experimentos, corresponden con valores nominales definidos en el

Capítulo 3; es decir, partiendo desde el reposo ($h(0) = 0$), para 60% de llenado en el tanque de abastecimiento y 20° de apertura en la válvula de salida manual (con respecto a un sistema de referencia donde 90° es la posición de apertura extrema). Como nivel deseado se establece $h_r = 14 \text{ cm}$.

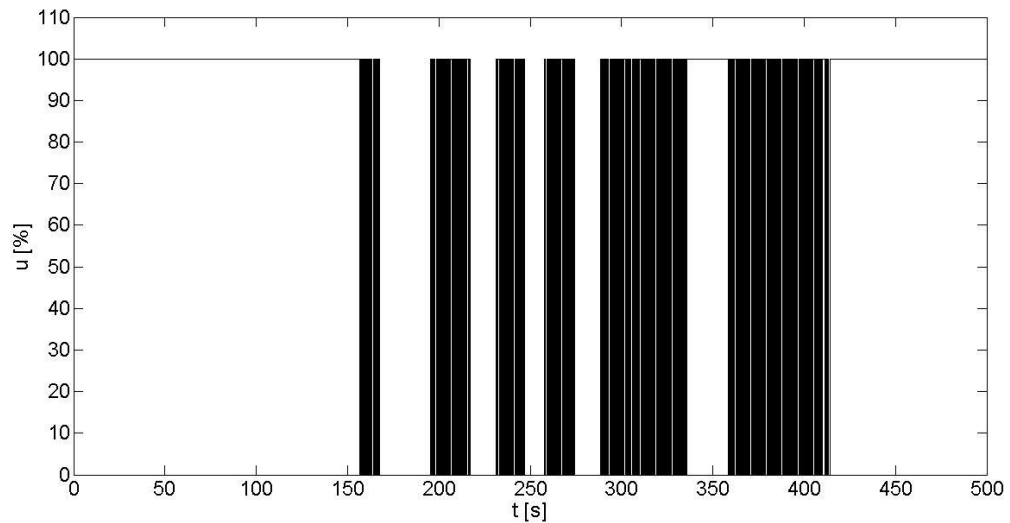
Figura 24. Respuesta de nivel ante una acción de control ON-OFF



Como se observa de la respuesta, la pendiente de crecimiento de nivel es similar a la obtenida en las pruebas en lazo abierto, lo cual se justifica tras operar a máxima apertura de la válvula de ingreso, y por tanto, con el máximo caudal durante el tiempo de activación (ON) dado por la ley de control ilustrada en la Figura 25. En el momento que la altura $h(t)$ alcanza el valor de referencia h_r , el comportamiento de la señal de control oscila entre estados de activación y desactivación de alta frecuencia, por cuenta de un comportamiento similar en el signo del error de nivel. Este comportamiento permite sin embargo mantener el nivel de líquido en el valor deseado.

Posterior al estado estacionario, se aplica en $t = 300$ s una perturbación en el ángulo de apertura de la válvula de salida, correspondiente con un cambio de 20° a 35° . Como se observa en las Figuras 24 y 25, el sistema reacciona tratando de mantener su nivel, reduciendo levemente su valor final. Una vez estabilizado, se aplica en t cercano a 400 s una nueva perturbación de ángulo, pasando en este caso de 30° a 45° . El resultado es una acción de control invariante, debido a una incapacidad del sistema para compensar dicha perturbación según fue mostrado en la Sección 3.2.2. Como consecuencia de esto, no es posible mantener el nivel de líquido en el valor de referencia.

Figura 25. Señal de control ON-OFF en el actuador



Desde el punto de vista de consumo energético, generación de ruidos y desgaste de actuadores, una estrategia de control ON-OFF ofrece amplias desventajas con respecto a soluciones continuas, como el control PID, enunciado a continuación.

4.2 CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO (PID)

La estrategia de control proporcional, integral, derivativo (PID) es la forma de regular procesos más empleada en aplicaciones industriales [27]. Como su nombre lo indica, una acción de control PID realiza sobre el error acciones de tipo proporcional, de integración y de derivación, admitiendo un comportamiento variable dentro de un rango de continuo de operación determinado, mediante realizaciones del controlador en modo continuo o discreto (digital). Matemáticamente, una realización paralela para un PID corresponde con la expresión:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t),$$

donde k_p es la ganancia proporcional, k_i la ganancia integral y k_d ganancia derivativa. Por tanto, teniendo en cuenta que la señal de control PID presenta valores en un rango continuo de valores (a diferencia del control ON-OFF donde la señal de control es binaria), no es posible conectar de manera directa un actuador como la electroválvula de dos posiciones empleada en el presente proyecto.

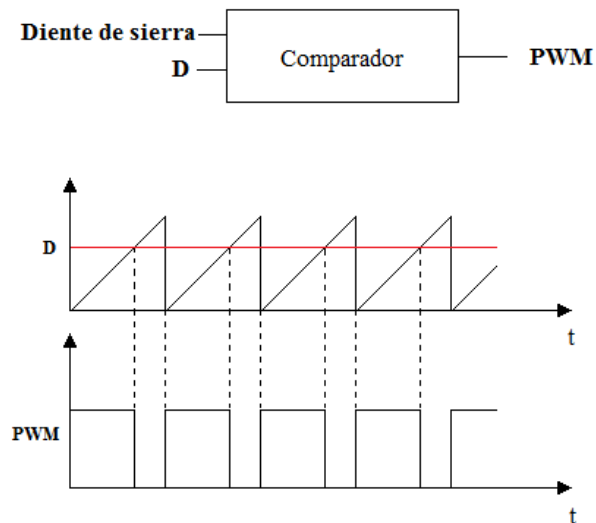
Como alternativa, se propone una etapa de pre-actuación, correspondiente con un bloque de modulación de ancho de pulso (PWM – pulse width modulation) donde la señal de rango continuo $u(t)$ pueda modular un tren de pulsos binarios. Dicho bloque de pre-actuación se constituyó de la manera descrita a continuación.

4.2.1 Bloque de modulación por ancho de pulso (PWM). La idea fundamental para el modulador de ancho de pulso implementado, corresponde con la comparación entre un nivel de referencia y una señal diente de sierra.

De esta manera, todo el tiempo que la amplitud de la señal diente de sierra sea menor al nivel de referencia la salida será cero, mientras en caso contrario se mantendrá en un nivel alto. La Figura 26 ilustra el diagrama de bloques para el modulador PWM implementado.

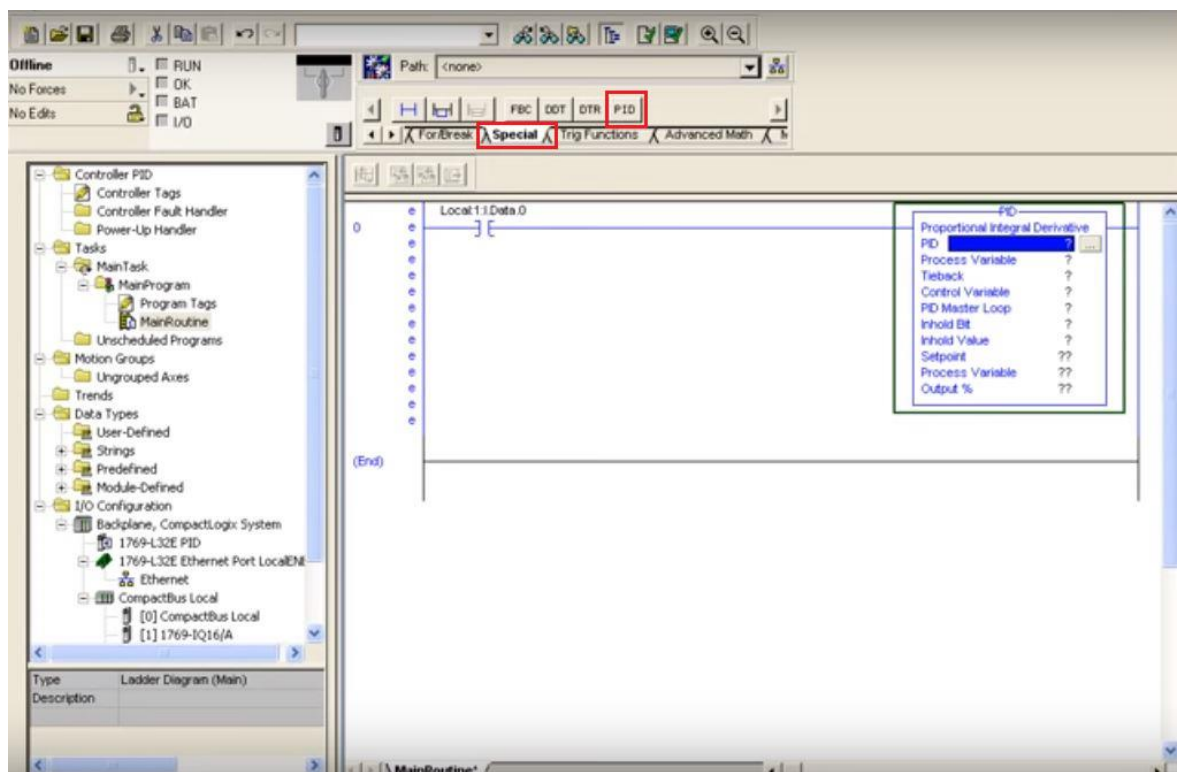
En la práctica, el periodo de la señal PWM se seleccionó como $T = 5$ s. Este valor fue seleccionado como el mínimo, que presentó una respuesta verificable en la práctica en cuando a efectos de apertura y cierre de la electroválvula. La señal diente de sierra se construyó con un contador ascendente, con reinicio (reset) en cada periodo. Otros detalles funcionales de la rutina en escalera para el PWM implementada en el PLC, pueden consultarse en el Anexo A.

Figura 26. Diagrama de bloques para modulador PWM implementado



4.2.2 Descripción y configuración de bloque PID en PLC. El software *RSLogix 5000*® cuenta con un bloque especialmente diseñado para ejecutar control PID mediante rutinas de programación en escalera. Para acceder a este componente, se debe seleccionar en la barra de herramientas de programación *ladder* la herramienta especial denominada PID, según se ilustra en la Figura 27.

Figura 27. Herramienta especial PID en *RSLogix 5000*®



Para poder incorporar el bloque PID a la rutina de programación, es necesario configurar los TAG del proceso. A partir de esto, la variable de proceso (PV – process variable) será la medida del sensor en voltios. Por otra parte, la variable de control (CV – control variable) corresponde a la señal de control, o salida del bloque PID. El punto de referencia (SP – set point) corresponde con la medida

deseada de nivel en la salida del proceso. Internamente, el bloque PID calcula la señal de error, en el modo siguiente:

$$e(t) = SP - PV.$$

Posteriormente el bloque calcula la señal de control $u(t)$ empleando las constantes del controlador: k_p , k_i y k_d según se indica en los cuadros de diálogo de la Figura 28. Otros parámetros de configuración incluyen: rangos límite en señal de control y de entrada, banda muerta, tasas de actualización y configuración de alarmas, entre otras [28].

El aspecto final del bloque PID implementado en la rutina de programación en escalera se muestra en la Figura 29. El diagrama completo se deja para referencia en el Anexo A. En este punto, es importante hacer notar que la señal de salida del controlador PID es la referencia de entrada para el módulo de PWM.

Esta idea se ilustra en la Figura 30, la cual representa para este caso la subrutina “*Algoritmo de Control*” incluida en el diagrama de flujo general de la Figura 15.

Figura 28. Configuración de bloque PID en RSLogix 5000®

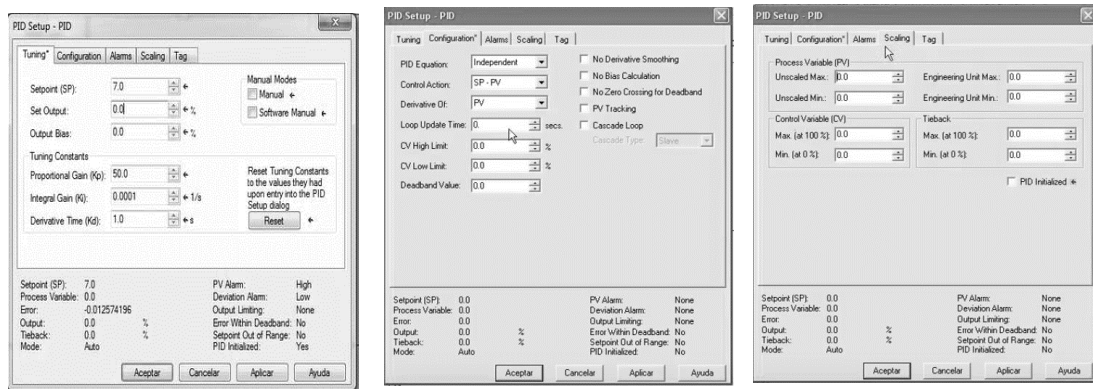


Figura 29. PID configurado en rutina de programación en escalera

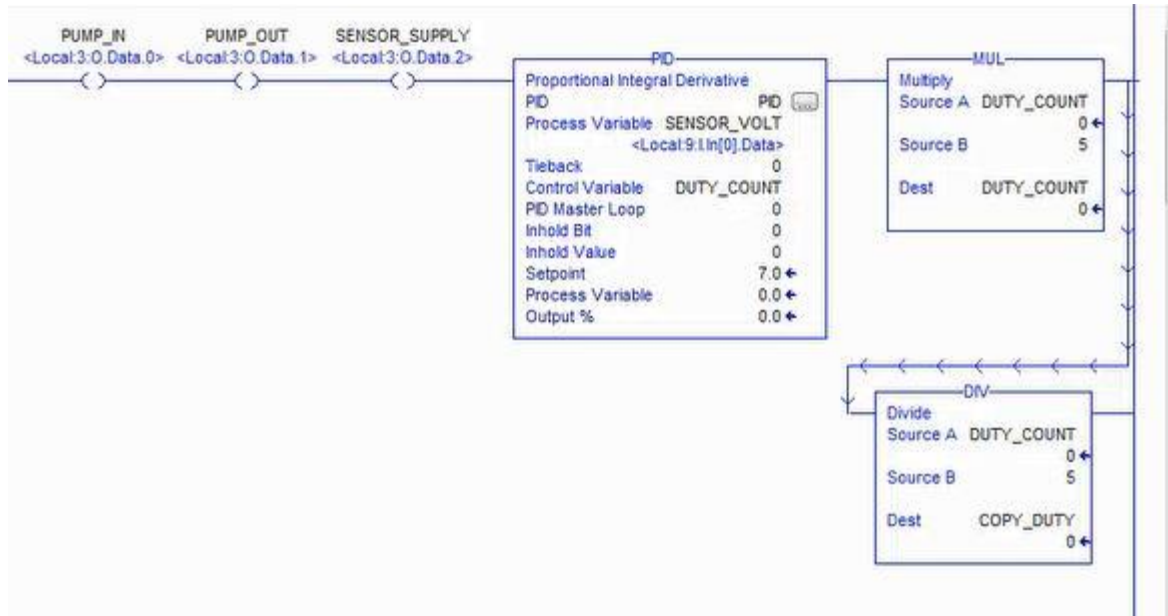
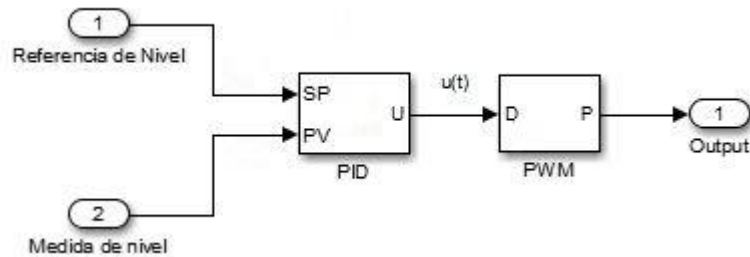


Figura 30. Diagrama de bloques para esquema de control PID implementado en PLC



4.2.3 Pruebas para control PID. Empleando un escenario experimental idéntico al descrito en la Sección 4.1 para el control ON-OFF, se realizaron pruebas de regulación en lazo cerrado perturbado para una acción de control PID.

En la primera prueba, se emplearon a manera de condición de partida, valores de ganancias proporcional, integral y derivativa, todos de valor unitario.

A partir de ello, la Figura 31 ilustra el perfil de llenado del tanque de salida controlado y perturbado. Como se observa, el tiempo que toma el sistema en llegar al valor de referencia es para este caso el mismo que el empleado por la acción ON-OFF.

Esto se explica analizando el comportamiento de la señal de control en la Figura 32, la cual se mantiene en un nivel alto durante todo el tiempo de crecimiento de la respuesta. A partir de ese momento, la señal de control se comporta en modo oscilatorio alrededor de valores extremos, consecuencia de variaciones en el signo del error. Se nota una evidente saturación de la señal de control actuando en un modo casi idéntico al evidenciado en el caso de la Figura 25.

Comentarios similares pueden realizarse respecto al efecto de las perturbaciones en la posición de la válvula de salida aplicadas para $t = 300$ s (30°) y $t = 400$ s (45°).

En un segundo momento, se realizó un ajuste a las constantes del controlador PID buscando obtener un comportamiento del sistema con variaciones continuas de rango en la señal de actuación, propias de un modo de operación no saturado.

Inicialmente, se intentó emplear la función de auto-sintonización de parámetros del módulo PID en el *RSTLogix 5000*® [29]. Sin embargo, aparentes restricciones de licencia del paquete de software impidieron acceder a dicha funcionalidad.

Figura 31. Respuesta de nivel ante una acción de control PID para ganancias unitarias

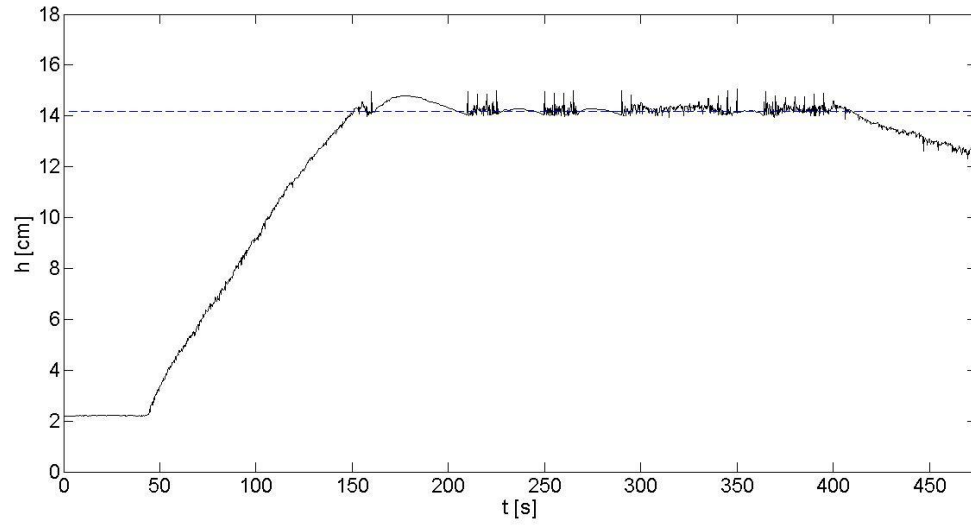
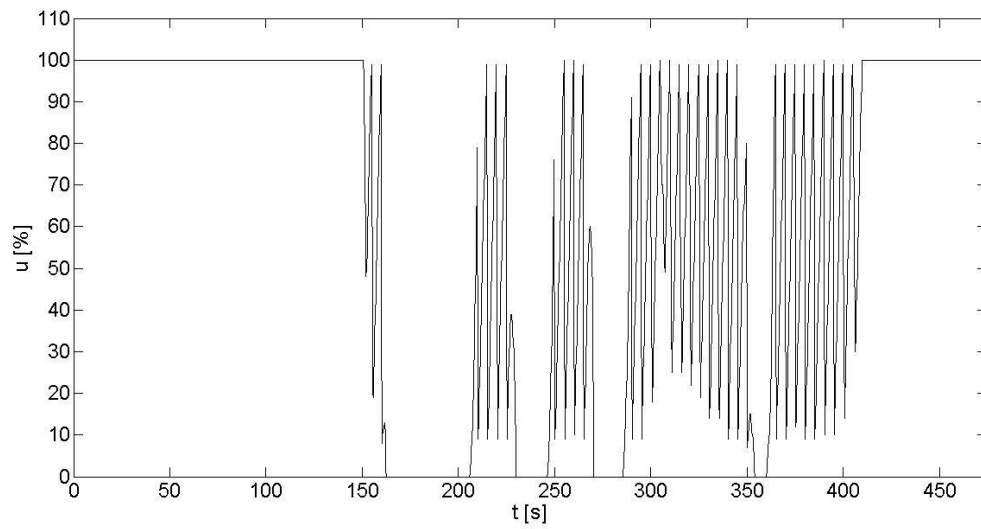


Figura 32. Señal de control PID en el actuador, para ganancias unitarias



Otra posibilidad consistió en el cálculo de las constantes empleando métodos de diseño analíticos, con base en la función de transferencia del sistema obtenida en la Sección 3.2.1.1. Sin embargo los valores numéricos calculados no permitieron obtener resultados satisfactorios, lo cual se justifica en las imprecisiones del modelo observadas respecto a los datos originales, teniendo en cuenta que en la práctica el sistema presenta comportamientos no lineales (por ejemplo, el crecimiento saturado evidenciado difiere de una respuesta típica para un sistema lineal de segundo orden).

Finalmente, se optó por realizar un procedimiento de ensayo y error a partir de pruebas experimentales ejecutadas en el modo siguiente: 1) se ajustó la constante proporcional hasta obtener una velocidad de respuesta (tiempo de establecimiento) aceptable; 2) posteriormente se ajustó la ganancia integral para reducir oscilaciones y sobre impulso; 3) se ajustó la ganancia derivativa para contribuir a la reducción de saturación del término integral.

Este procedimiento permitió seleccionar como valores de parámetros de PID sintonizado, a los siguientes:

$$k_p = 500, \quad k_i = 0.0001, \quad k_d = 0.1$$

Los resultados de simulación se presentan en las Figuras 33 y 34. En comparación con el caso presentado para ganancias PID unitarias, se observa como los parámetros sintonizados permiten obtener una respuesta más suave, en términos de esfuerzo en el actuador, con valor medio evidenciando una tendencia oscilatoria sinusoidal, resultado interesante si se tiene en cuenta que el elemento de actuación es una electroválvula de dos posiciones.

Por tanto, el nivel en el tanque de salida alcanza el valor deseado en tiempo similar a los casos anteriores, con un leve sobre impulso, que permite mantener el valor de referencia aún después de aplicar correspondientes perturbaciones de posición en la válvula de salida para $t = 300$ y $t = 400$ s, evidenciándose de esta manera un mejor desempeño comparativo.

Figura 33. Respuesta de nivel ante una acción de control PID sintonizado

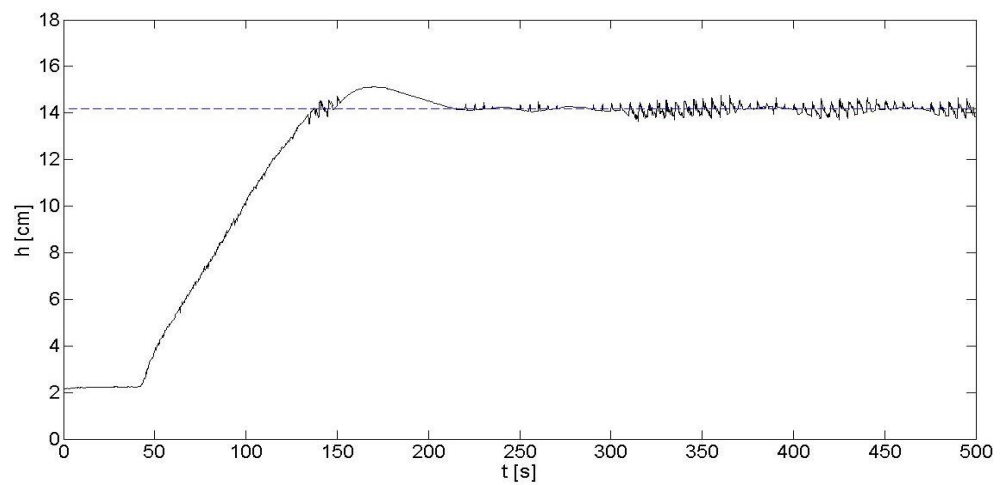
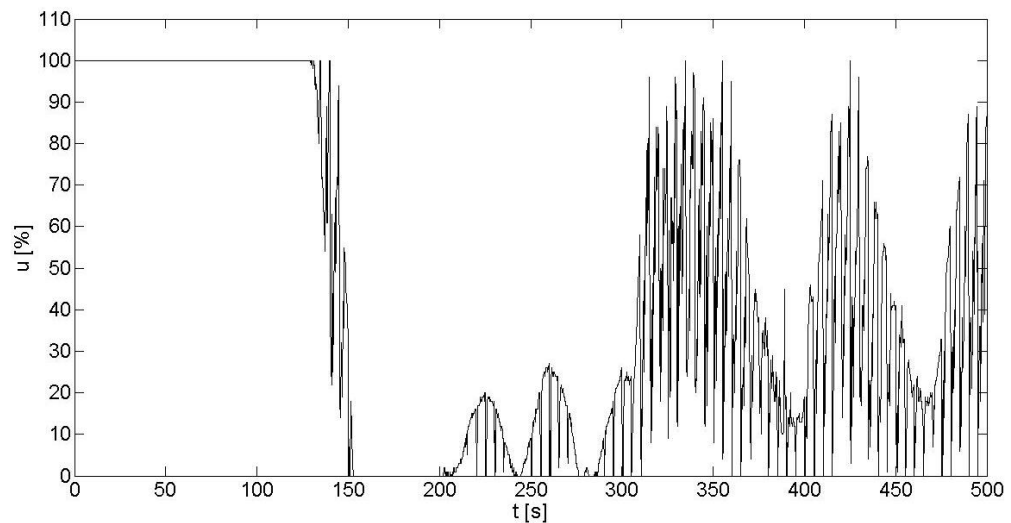


Figura 34. Señal de control PID sintonizado, en el actuador



5. CONCLUSIONES

Con base en los procedimientos desarrollados y los resultados obtenidos en el presente proyecto de grado, se puede concluir que fue posible construir un prototipo de laboratorio para regular el nivel de líquidos en un sistema de tanques, empleando equipos de instrumentación industrial, que permitieron comparar una acción de control simple de tipo ON-OFF con una estrategia PID implementada a partir del desarrollo de un módulo de actuación PWM. En particular:

- Se construyó a partir de elementos disponibles, un sistema de recirculación de agua como modelo a escala de un proceso industrial en el Tecno-Parque SENA Nodo Bucaramanga. En la Sección 2.2 (Figura 9), se ilustra la configuración de un sistema constituido por: dos bombas, una electroválvula, una válvula manual, un sensor de proximidad ultrasónico marca EGE serie ARKU 400 GI y un PLC Allen-Bradley de la serie *ControlLogix*® 1756. Este sistema puede considerarse como un prototipo simple para el tratamiento de aguas, como se menciona en la Sección 2.2.1.
- Se configuraron e instrumentaron los elementos requeridos para la instalación y puesta en marcha de un lazo de control de nivel basado en un PLC ALLEN-BRADLEY. En la Sección 2.2.4 se explica la adecuación para cada elemento y los respectivos ajustes de rangos y escalas para las señales del lazo de control. En la Sección 3.2.1 se realizó un procedimiento experimental para caracterizar el comportamiento del sistema, con el objetivo de determinar un modelo matemático adecuado y parámetros asociados como las resistencias hidráulicas y las capacitancias hidráulicas. En la Sección 4.1 se implementó una estrategia de control ON-OFF en un PLC *ControlLogix*® 1756, para regular el nivel del tanque B (ver Figura 3 del Capítulo 2). La lógica para la rutina implementada se ilustra en las Figuras 16 y 23.

- Se describió el procedimiento para programar un control PID en un PLC ALLEN-BRADLEY, utilizando como ejemplo un modelo a escala de proceso industrial en el Tecno-Parque SENA Nodo Bucaramanga. Se ilustró la configuración de una rutina de control PID en el software RSLogix5000®. Para ejecutar dicha rutina fue necesario construir un actuador que facilitara la interacción entre la estrategia de control PID (de naturaleza continua) y el elemento final de control; i.e. electro-válvula de dos posiciones. Dicho actuador corresponde con un módulo de PWM ilustrado en la Sección 4.2.1.
- Se validó el desempeño del sistema controlado ante perturbaciones de nivel. A partir de los resultados ilustrados en las Figuras 23, 24, 32 y 33, puede observarse como el sistema en lazo cerrado es capaz de mantener el nivel de referencia, a pesar de la perturbación de nivel provocada por la disminución de la resistencia hidráulica en el tanque de salida. El comportamiento del sistema perturbado es satisfactorio tanto para la acción de control ON-OFF como para la estrategia PID implementada mediante el módulo de PWM diseñado. Sin embargo, en términos de desgaste de actuadores pudo observarse como la acción PID presenta menores conmutaciones de alta frecuencia.

6. RECOMENDACIONES

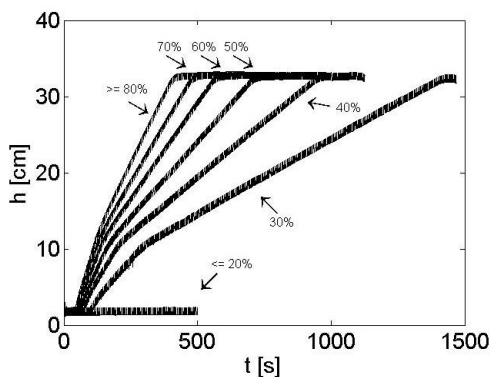
- Para el sistema construido se encontró, experimentalmente, un punto de operación alrededor del cual se deben desarrollar los distintos procesos y acciones de control. Este valor de referencia depende de las características del elemento de sensado (rango) y no debe superar 40 [cm] de altura. En otras palabras, los niveles de altura prácticos extremos del tanque de salida del sistema son: mínimo 2 [cm] y máximo 42 [cm].
- El sistema está conformado por dos tanques en cascada, con capacidad aproximada de 100 [L] cada uno y un tanque adicional de suministro de 250 [L]. Por tanto, se recomienda mantener este último en un porcentaje no mayor al 80% de su capacidad nominal, para evitar derramamiento de líquidos.
- Con el objetivo de mantener las mismas condiciones para todas las pruebas, es necesario extraer la totalidad de líquido almacenado en el tanque A, empleando la tubería de desagüe ubicada en su parte inferior. Lo anterior, debido a que el acople entre los dos tanques crea un nivel remanente de aproximadamente 3 [cm], que no circula hacia el resto del sistema.
- Para evitar daños en bombas y válvulas, es necesario realizar inspección permanente de las tuberías del circuito de recirculación, previniendo obstrucciones por objetos extraños ajenos al prototipo.

7. TRABAJO FUTURO

Como actividades complementarias, se propone el llenado automático del tanque de abastecimiento, la ejecución de auto-sintonización del controlador PID y la incorporación de una servo-válvula proporcional como elemento final de control. También se propone la utilización de otras variables en el lazo como bien puede ser el control de la temperatura de los líquidos contenidos, debido al amplio espectro de aplicaciones industriales que emplean dicho tipo de control multivariado.

Asimismo, uno de los resultados más importantes del presente proyecto se constituyó en la utilización de un actuador discreto a través de una ley de control continua, mediante un módulo de actuación. Esta solución puede representar una reducción de costo en aplicaciones reales de la industria. Por tanto, una de las tareas futuras es también realizar mayor caracterización del comportamiento de la electro-válvula para determinar su potencial de aplicación en reemplazo de costosos servo-actuadores mecánicos comerciales. La Figura 35 ilustra resultados experimentales preliminares para el perfil de carga de nivel respecto a diferentes valores de ciclo útil en el módulo PWM desarrollado, mostrando la regulación de flujo efectuada por el sistema modificado.

Figura 35. Perfil de llenado para actuador modificado



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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, n° 169, pp. 150-157, 2011.
- [11] J. F. Vargas Flórez, «Implementación sistema de gestión de la calidad ISO 9001 versión 2000 para la organización Dulces El Paraguitas,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2004.
- [12] J. P. Celis Vargas, «Tecnología SCADA: la industria del dulce en su mejor punto,» *Revista Santander INNOVA*, n° 3, pp. 27-32, 2014.
- [13] E. Fabregas, G. Farías, S. Dormido-Canto, S. Dormido y F. Esquembre, «Developing a remote laboratory for engineering education,» *Computers & Education*, vol. 57, n° 2, pp. 1686-1697, 2011.
- [14] 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.
- [15] D. S. Benitez Mejía, «Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1994.
- [16] 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.
- [17] I. M. Giraldo Betancur, «Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2004.

- [18] L. C. Mantilla Espinosa, «Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y elaboración de estrategias,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005.
- [19] 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.
- [20] 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.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Galvis, M. y Gómez Malagón, L. A. «Control de nivel de la caldera pirotubular del laboratorio de plantas térmicas,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998

Allen-Bradley, «Logix5000 Controllers General Instructions,» [En línea]. Available: https://cours.etsmtl.ca/gpa754/references/fabricants/Logix_ang/1756-rm003_-en-p.pdf. pp. 510-525, 2009

Arango Restrepo, S. M. «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

ÁSTROM K. y HÄGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd Edition, ISA, 1995

Benitez Mejía, D. S. «Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1994

Celis Vargas, J. P. «Tecnología SCADA: la industria del dulce en su mejor punto,» *Revista Santander INNOVA*, nº 3, pp. 27-32, 2014

Drewiske, G. W. «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

Fabregas, E. Farías, G. Dormido-Canto, S. Dormido S. y Esquembre, F. «Developing a remote laboratory for engineering education,» *Computers & Education*, vol. 57, nº 2, pp. 1686-1697, 2011

Giraldo Betancur, I. M. «Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2004

Gomez Arias, E. Peñaranda, C. Y. y Silva, W. R. «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

Gómez Quintero, M. P. Zabala Domínguez G. A. y Dávila Rincón, J. A. «Uso de LabView para sistemas de control en ingeniería química,» *DYNA*, vol. 78, nº 169, pp. 150-157, 2011

Henry, J. G. y Heinke, G. W. *Ingeniería Ambiental*, México: PRENTICE HALL, 1999

Herrera Sepúlveda, L. V. y Melo Pinzón, U. A. «Control en espacio de estados para un prototipo real de péndulo invertido,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2013

Kandiah, S. Hasan M. y Yaacob, M. «Overview of automation in a palm oil mill - the sterilisation process,» *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 3, nº 1, pp. 45-52, 1992

Leyes Franco J. B. y Navarrete Díaz, D. R. «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

Lipták, B. G. Process Control and Optimization, CRC Press, 2005

Mantilla Espinosa, L. C. «Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y elaboración de estrategias,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005

Muñoz Suárez, S. F. Guarín Mantilla D. F. y Sarmiento Cruz, G. R. «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

Neira Duarte, L. Y. y Prada Medina, R. I. «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

Ning, A. y Yu, A. «A water-level controller for greenhouse sump tank,» de *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference On*, 2011

Novoa Díaz, D. F. y Prada Mejía, J. A. «Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2001

Ogata, K. Dinámica de sistemas, PRENTICE-HALL HISPANOAMERICA, S.A., 1987

Ogata, K. Ingeniería de control moderna, Tercera edición, PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A., 1998

Ramalho, R. S. Introduction Wasterwater Treatment Processes, España: Reverté, S.A, 1996

Ramírez Vega, D. H. y Torres Sánchez, E. E. «Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación de electrónica de la E3T,» Universidad Industrial de Santander, 2007

Rockwell Automation, «Getting Results with the PIDE Autotuner,» [En línea]. Available:
https://cours.etsmtl.ca/gpa754/references/fabricants/Logix_Complement/pide_autotune.pdf. pp. 13-20

Smith, C. A. y Corripio, A. B. Control automatico de procesos: Teoria y practica, LIMUSA, 1995

Suárez Moreno, C. I. y Rodríguez Pérez, C. A. «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

Vargas Flórez, J. F. «Implementación sistema de gestión de la calidad ISO 9001 versión 2000 para la organización Dulces El Paraguaitas,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2004

ANEXOS

ANEXO A. Diagramas en escalera para rutinas ejecutadas en el PLC

Figura A- 1. Rutina para el controlador ON-OFF

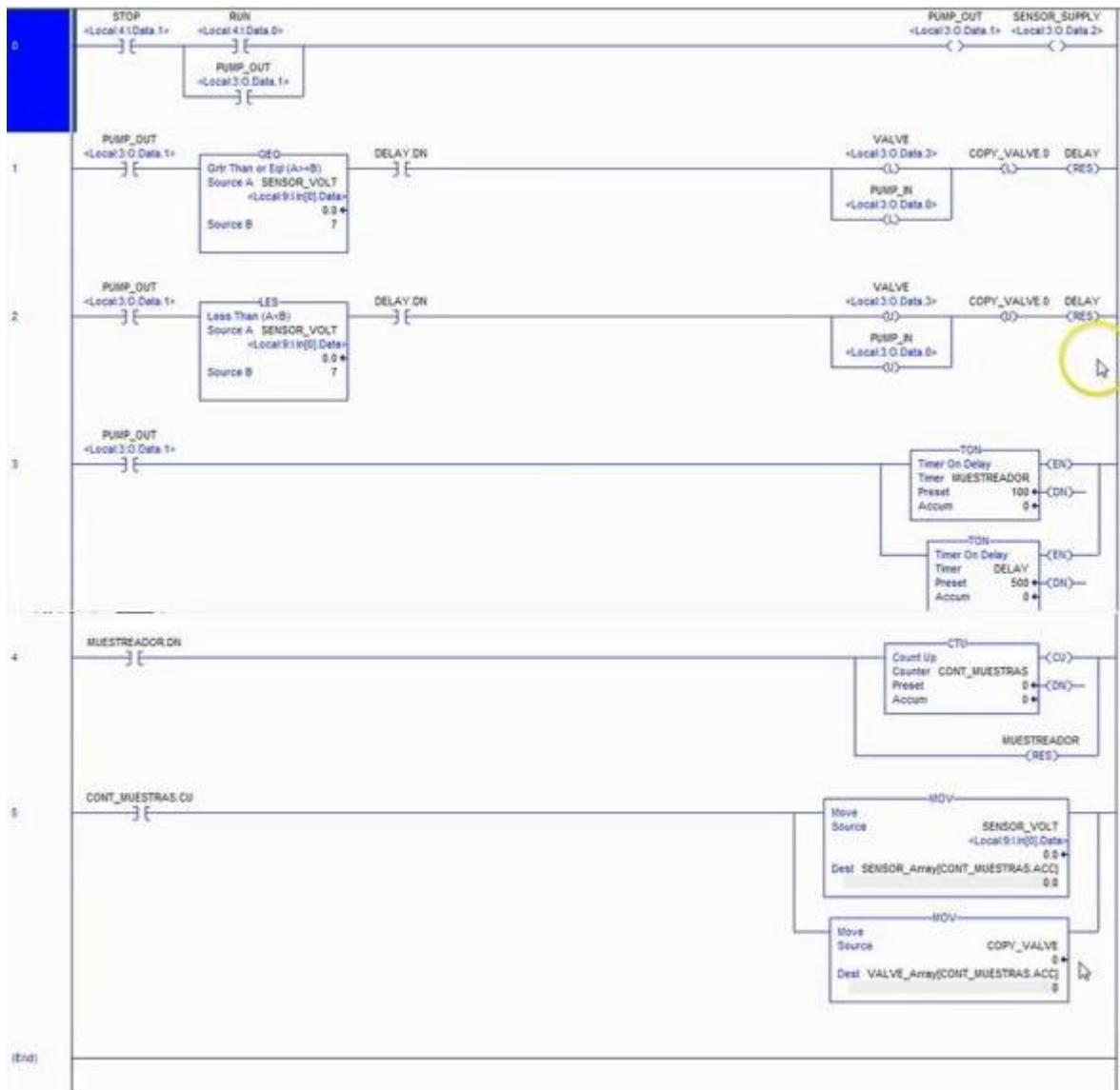


Figura A- 2. Rutina para el bloque PWM

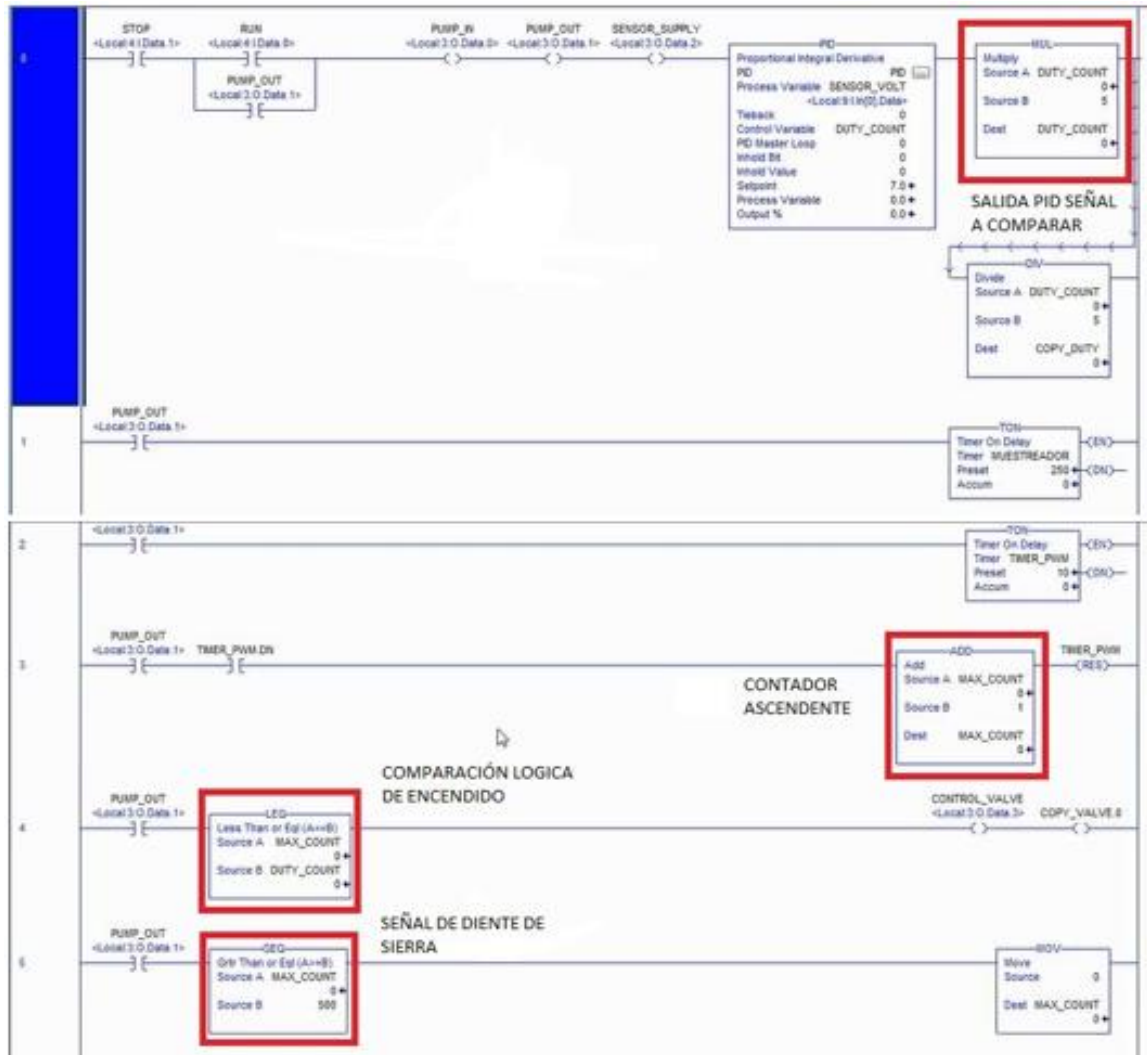


Figura A- 3. Rutina para control PID

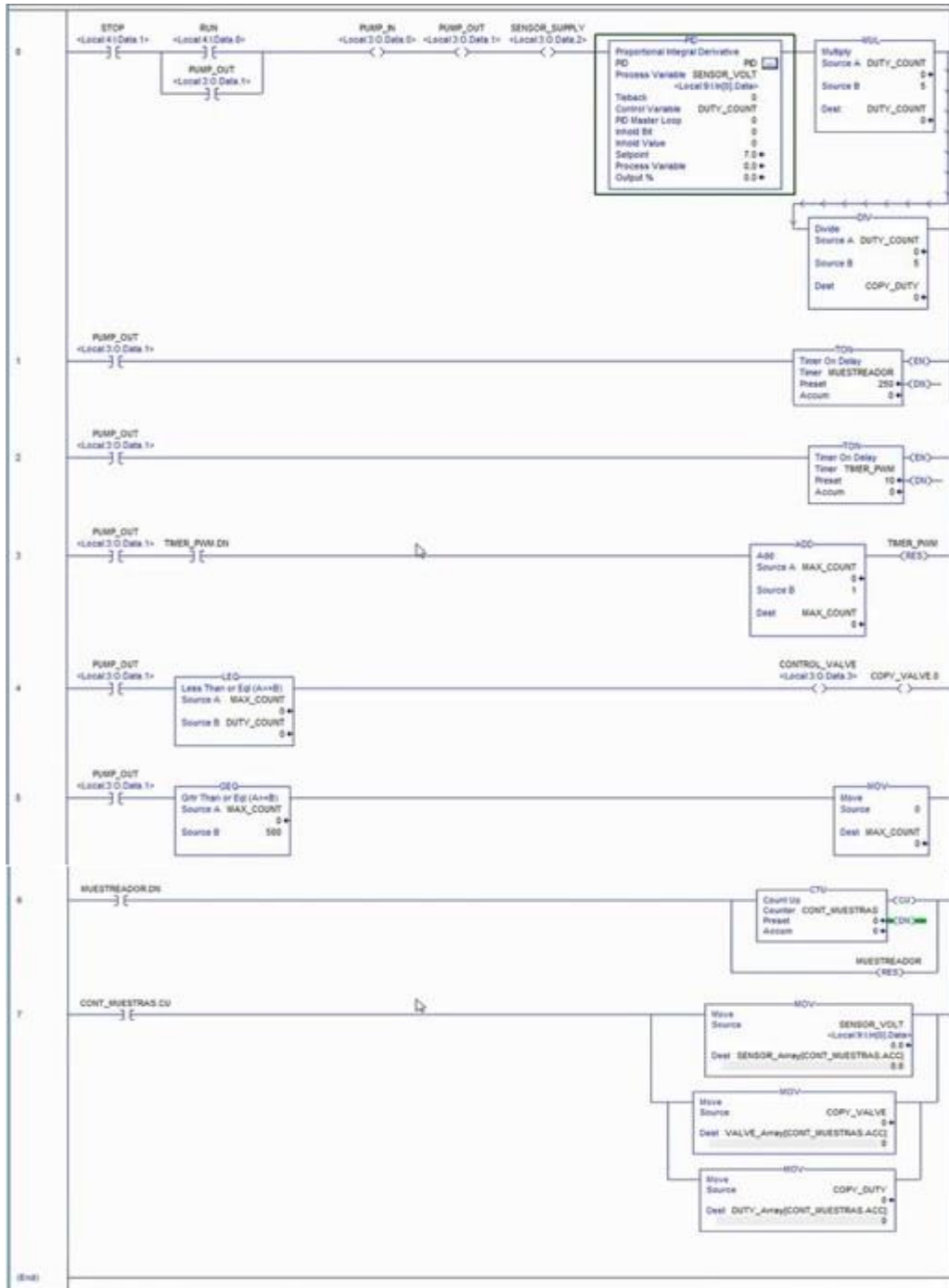


Figura A- 4. Diagrama GRAFCET

