

**INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE
TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS**

**CLAUDIA YANETH PEÑARANDA
WILSON REINALDO SILVA
EULICES GÓMEZ ARIAS**



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

2014

**INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE
TANQUES ACOPLADOS EN EL LABORATORIO DE CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS**

**CLAUDIA YANETH PEÑARANDA
WILSON REINALDO SILVA
EULICES GÓMEZ ARIAS**

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

**Director
RICARDO ALZATE CASTAÑO, PhD**

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

2014

DEDICATORIA

*A Dios por ser mi fortaleza y motor en los momentos difíciles,
A mi mamá María Beatriz y a mi papá Reinaldo que está en el cielo
porque*

Me han impulsado a seguir adelante hasta lograr mis metas.

A mis hermanos Yarizma y Javier

Porque han estado ahí cuando los necesito.

A mis amigos incondicionales por estar ahí siempre.

*A los profesores por brindarme su amistad y conocimiento en este largo
Camino que es el de la universidad.*

Wilson Reinaldo Silva Fonseca

La concepción de este proyecto está dedicada a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y familia en general. También dedico este proyecto a mi novia, Mi Naranjita, compañera inseparable de cada jornada. Ella representó gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio. A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

Eulices Gomez Arias

*A Dios por ser mi fortaleza en los momentos difíciles,
A mis papas Yaneth y Oswaldo porque me han
Impulsado a seguir adelante hasta lograr mis metas.
A mis hermanitos Kamila, Paula y Alejandro
porque han estado ahí cuando los necesito.
A Annu por ser mi apoyo incondicional, por aguantarme
y consentirme cuando lo necesité.
A doña Claudia, Don Douglas y Oski por convertirse en mi familia.
A mi precioso regalo del cielo Juan Felipe por ser mi motor,
mi felicidad, mi impulso, mi vida!
A mis amigos super incondicionales Laura y
Nonyto por estar ahí siempre.*

Claudia Yaneth Peñaranda

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. PRELIMINARES	21
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	21
1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo general.....	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
2 DESCRIPCION DEL SISTEMA	24
2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA	24
2.2 MÓDULO PARA CAPTURA DE DATOS	34
2.3 AJUSTE EN RANGOS DE SEÑAL	35
2.3.1. Caracterización de rango en transmisión de presión.....	35
2.3.2. Caracterización de rango en válvula proporcional.....	36
3. CALCULO DE PARAMETROS	39
3.1. IDENTIFICACION DEL MODELO DEL SISTEMA	39
3.2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA	41
3.2.1 Capacitancia hidráulica.....	42
3.2.2 Resistencia hidráulica	42
3.3. VALIDACION DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA	45
4. DISEÑO DEL CONTROLADOR	48

4.1 CONTROLADOR PID	48
4.2 CÁLCULO TEÓRICO DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR	49
4.3 VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE PARAMETROS CALCULADOS.....	52
4.4 CONTROLADOR INDUSTRIAL EN MODO DE AUTOAJUSTE	56
5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	63
REFERENCIAS	65
BIBLIOGRAFÍA.....	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques para el sistema de control de nivel de líquido en el prototipo de laboratorio	24
Figura 2. Controlador UDC1200	25
Figura 3. Diagrama de conexiones controlador UDC1200.....	26
Figura 4. Válvula proporcional	27
Figura 5. Sistema de tanques acoplados.....	29
Figura 6. Trasmisor de presión diferencial Honeywell ST3000 serie 900	30
Figura 7. Conexión SM3000 en series 100e/900 ST3000	31
Figura 8. Instrumentación del sistema de control de nivel de líquido: (a) prototipo del sistema de tanques acoplados, (b) controlador UDC1200, (c) trasmisor de presión Honeywell, (d) válvula proporcional Danfoss	32
Figura 9. Conexión entre elementos del sistema de control y captura de datos....	34
Figura 10. Relación corriente- altura en el tanque de salida.....	36
Figura 11. Relación entre caudal de entrada y corriente de válvula proporcional..	37
Figura 12. Prueba para determinación de la resistencia R1	43
Figura 13. Prueba para determinación de la resistencia R2	45
Figura 14. Validación del modelo del sistema.....	46
Figura 15. Curva de la respuesta ante una entrada tipo escalón con forma de S..	50
Figura 16. Respuesta escalón simulada con PID diseñado.....	51
Figura 17. Respuesta escalón simulada con PID sintonizado	52
Figura 18. Respuesta escalón experimental con PID diseñado.....	54
Figura 19. Respuesta escalón experimental con PID sintonizado	54
Figura 20. Respuesta ante perturbaciones en modo manual	55
Figura 21. Comparación del sistema controlado teórico vs. Experimental.....	56
Figura 22. Configuración controlador UDC1200 en modo Autoset	57

Figura 23. Respuesta ante cambios de referencia en modo de autoajuste60
Figura 24. Respuesta ante perturbaciones en modo de autoajuste60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos técnicos válvula Danfoss EV260B	27
Tabla 2. Datos técnicos TPD ST3000 serie 900 modelo ST930	31
Tabla 3. Prueba para determinación de la resistencia R1	43
Tabla 4. Prueba para determinación de la resistencia R2	44
Tabla 5. Parámetros controlador por cálculo teórico.....	50
Tabla 6. Parámetros control PID implementados en UDC-1200.....	53
Tabla 7. Parámetros controlador en modo de autoajuste	58

RESUMEN

Título: “Instrumentación y control de nivel para un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS”

Autores: Claudia Yaneth Peñaranda
Wilson Reinaldo Silva
Eulices Gómez Arias**

Palabras Clave: Control de nivel, Control industrial, PID autosintonizado, Regulación experimental, Sistema de tanques acoplados

Descripción:

El presente proyecto presenta la instrumentación y el montaje para un sistema de tanques acoplados que permite regular el nivel de líquido en el tanque de salida empleando un controlador industrial marca HONEYWELL UDC1200. Inicialmente, se realizó el cálculo para los parámetros del sistema representados por resistencias y capacitancias hidráulicas. Posteriormente se obtuvo un modelo para la función de transferencia del sistema, relacionando el caudal de entrada con respecto al nivel del tanque de salida. Este modelo fue validado experimentalmente a partir de una respuesta al escalón. Con este modelo se sintonizaron los parámetros para un controlador PID empleando el primer método de Ziegler & Nichols, se realizó un procedimiento de sintonización manual con el fin de mejorar el comportamiento del sistema. Estos valores de parámetro fueron ingresados a un controlador industrial mostrando resultados similares a la teoría. Sin embargo, mejores resultados prácticos fueron obtenidos a través de la auto sintonización automática del controlador industrial. Trabajos futuros incluyen adecuación de un sistema de recirculación de líquido, la implementación de un sistema de sensado que sea cercano a los valores reales, la implementación de un sistema de control que contemple la interacción de flujo entre los dos tanques y la re-calibración del sistema para mejorar la respuesta del controlador al incorporar parámetros manuales

* Trabajo de grado

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

SUMMARY

Title: "Instrumentation and industrial control for a coupled-tanks system in the control and instrumentation laboratory of the E3T-UIS"

Authors: Claudia Yaneth Peñaranda,
Wilson Reinaldo Silva,
Eulices Gómez Arias**

Keywords: Coupled-tanks system, Experimental regulation, Industrial control, Level control, PID Autotuning.

Description:

This project presents the instrumentation of a system for controlling the level of coupled tanks by using industrial devices: HONEYWELL UDC1200 controller and a DANFOSS valve. Mathematical modelling of system by mean of a transfer function and corresponding calculation of parameters (hydraulic resistances and capacitances) has been performed by experimental analysis of data for measurements of input flow and output level in the second tank of the system. After obtaining and validating the model, a PID controller was calculated by employing the Ziegler & Nichols first method. manual tuning procedure in order to improve the behavior of the system was performed. These PID values were further implemented in an industrial controller showing similar results to those predicted by simulations. A second practical implementation of the parameters was performed by autotuning the industrial device giving better results in the convergence of the system towards the setpoint chosen. As complementary work it is proposed adapting a liquid recirculation system, the implementation of a sensing system that is close to the actual values, the implementation of a control system that includes the interaction of flow between two tanks and re-calibration system to improve the response of the controller to enter manual settings

* Degree work.

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

INTRODUCCIÓN

La evolución en la parte de instrumentación y control ha logrado que lo que décadas atrás parecía fantasía, hoy sea una realidad cotidiana y a la vez difícil de desprendernos de ella. En estos dos campos se evidencia un gran crecimiento e innovación tecnológica, desde controlar el líquido (agua) que llega a la casa para dar origen a lo que se presenta en el sector industrial actualmente, rápidamente se desarrollaron equipos más compactos y con más prestaciones, que desplazaron la telefonía fija que ahora es un servicio más económico y de acceso ilimitado.

Con base en los avances en control e instrumentación, se ha visto la necesidad de estar siempre en contacto con la sociedad y el medio que lo rodea, incluyendo el hogar y el sitio de trabajo, aprovechando los medios disponibles para conocer y familiarizarse con ellos y a la vez ver como es el control de dispositivos con la menor complejidad de instalación y que ofrezca un servicio confiable y accesible en cualquier punto sin que se pierda la calidad del servicio.

En este trabajo de grado se expone la necesidad de implementar conocimientos de estas dos asignaturas como es la instrumentación y el montaje para un sistema de dos tanques acoplados el cual va a permitir regular el nivel en el tanque de salida por medio de un dispositivo industrial. Donde inicialmente se adecuara el sistema seguido de cálculos para encontrar las características del sistema como son los parámetros que intervienen en el y al final se efectuara la tarea de controlar el nivel. Este proyecto dará un aporte al laboratorio de instrumentación y control de la E3T UIS ya que proporcionara a los estudiantes a ver más claro lo que se ve en la teoría de estas asignaturas y así hacerse una idea más clara que es lo que podemos encontrar en el campo laboral, por lo anterior este trabajo será una ayuda para que los estudiantes vean de manera física un control de nivel de

alguna sustancia que se puede encontrar en la industria(en este caso liquido) y así podrá reflexionar y darse cuenta que en esta rama de nuestra carrera tiene muchos campos actualmente donde poder atacar y porque no trabajar en el para ser reconocidos como los mejores.

El desarrollo del trabajo se divide en tres partes: la primera se refiere al estudio bibliográfico que incluye su funcionamiento, modulaciones, ventajas, desventajas y el estado actual de los instrumentos a utilizar (válvulas, sensores, controlador industrial). En la segunda parte se expone un estudio para la caracterización e implementación de un sistema de control de nivel y las pruebas de laboratorio en cada una de sus etapas de implementación y en la tercera parte se exponen las conclusiones y recomendaciones.

1. PRELIMINARES

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander cuenta con 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. Sin embargo, las actuales condiciones del laboratorio no son propicias para desarrollar de manera satisfactoria las sesiones de laboratorio programadas, principalmente debido a no contar con una dotación de equipos suficientemente actualizada, operativa y funcional. La historia reciente del Laboratorio de Control de la E3T se remonta al año 2001, donde a través de un trabajo de grado denominado “Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T” [1], se realizó el diseño y la construcción de bancos de trabajo para medición de flujos de aire, nivel y temperatura de agua, con prácticas de laboratorio asociadas. De manera más reciente en el año 2007 el trabajo de grado “Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación electrónica de la E3T” [2] buscó complementar el anterior proponiendo una manera de realizar medición remota de las variables disponibles en los equipos diseñados previamente en 2001. Sin embargo, actualmente el deterioro de las instalaciones del laboratorio y los instrumentos asociados (tanto plantas como dispositivos de medida) hacen que no sea posible emplear dicho espacio para el propósito que alguna vez fue adecuado.

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 requiere realizar

registros 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, la producción de papel, el tratamiento de aguas y los procesos químicos, 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 [3]. También en [4] se implementa el diseño y la instrumentación de un sistema de tanques acoplados para prácticas de laboratorio universitario. En [5] 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 [6] de la UPB-Medellín donde se plantea una solución para la industria de tintorerías local a partir de un control de nivel y [7] 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: [8, 9, 10].

1.2 PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Algunos proyectos como el trabajo de grado denominado “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” [11] realizado en 2008, requieren de un alto presupuesto para su realización lo cual no es garantía para una factibilidad a corto plazo. El presente proyecto de grado se constituye en una contribución para aliviar la carencia de infraestructura para el desarrollo de

actividades prácticas en asignaturas afines al control y a la instrumentación electrónica de la Escuela E3T, a partir de la adecuación de la capacidad funcional de un sistema de dos tanques acoplados, constituido con base en los objetivos propuestos a continuación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Instrumentar un sistema de tanques acoplados con el fin de controlar el nivel de líquido, empleando un controlador industrial.

1.3.2 Objetivos específicos

- Configurar un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de Instrumentación y Control de la E3T
- Instrumentar y calibrar sensores y actuadores para efectuar manipulación del nivel de líquido en el sistema mediante un controlador industrial
- Realizar un procedimiento experimental para obtener los parámetros de un modelo matemático apropiado para el sistema
- Validar el modelo matemático obtenido con medidas del sistema real.

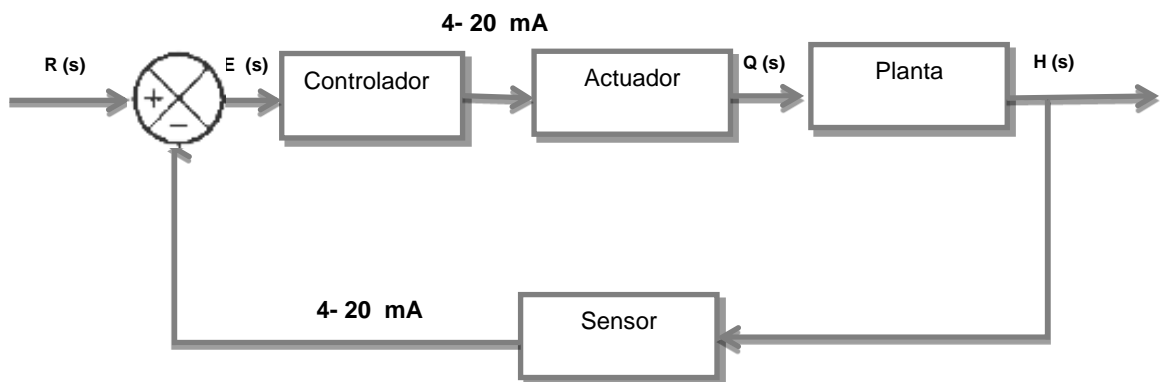
2 DESCRIPCION DEL SISTEMA

En el presente capítulo se lleva a cabo la descripción de un prototipo de sistema de control de nivel de líquido para el laboratorio de instrumentación y control de la E3T-UIS, así como también la explicación detallada de las características, instalación y funcionamiento de los elementos utilizados como son: el actuador, el sensor y el controlador; los cuales fueron empleados para ejecutar las tareas de un control PID.

2.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA

En la Figura 1 se presenta un diagrama de bloques donde se pueden observar cada uno de los componentes utilizados en la implementación del sistema de control del nivel de líquido en el prototipo de laboratorio. Una descripción funcional de los respectivos bloques se realiza a continuación.

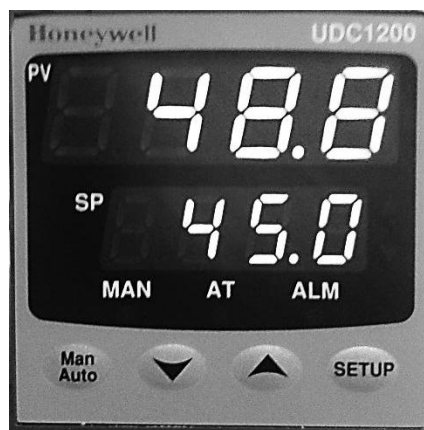
Figura 1. Diagrama de bloques para el sistema de control de nivel de líquido en el prototipo de laboratorio



Fuente: Autores

- **Controlador:** Elemento industrial que compara la señal sensada con el valor deseado y proporciona al actuador la señal de corriente. El elemento encargado de ejercer el control es un controlador industrial universal UDC1200 (Figura 2). Este dispositivo permite realizar control, indicar y limitar las variables de determinados procesos así como medirlas y mostrarlas en el visualizador. Las variables permitidas son temperatura, presión, flujo y nivel.

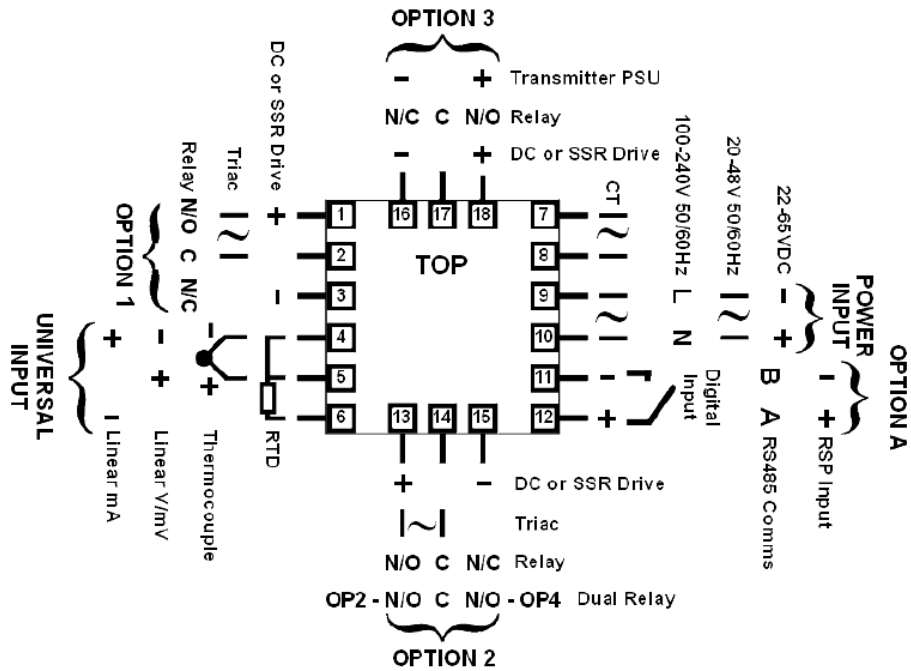
Figura 2. Controlador UDC1200



Fuente: Autores

Como entrada permite señales de corriente y tensión entre los siguientes rangos: 0 a 20 [mA], 4 a 20 [mA], 0 a 50 [mV], 10 a 50 [mV], 0 a 5 [V], 1 a 5 [V], 0 a 10 [V], 2 a 10 [V], al igual que en la salida y presenta opción de Relays y controladores SSR o triacs los cuales pueden ser usados en procesos de control, alarmas o retransmisión de variables de procesos. También permite ajustar parámetros para configurar un control ON-OFF, PI, PD o PID. Además realiza un autoajuste de los parámetros PID mediante la función AUTOSSET [12]. Un diagrama de conexiones del dispositivo se presenta en la Figura 3, en el cual se muestra como para la entrada de corriente proveniente del sensor se utilizaron los terminales 4-6 y para la salida hacia la válvula proporcional los terminales 16-18.

Figura 3. Diagrama de conexiones controlador UDC1200



Fuente : www.honeywell.com

- **Actuador:** Válvula que controla el caudal de agua que entra al sistema. El elemento de actuación consta de una electroválvula proporcional servo accionada (ver Figura 4) de dos vías marca Danfoss, modelo EV260B. Esta válvula permite hacer una regulación proporcional del caudal del fluido con el que se requiere trabajar, como son: agua, aceite o líquidos neutros similares a estos.

Figura 4. Válvula proporcional



Fuente: www.danfoss.com

La manipulación de la válvula se logra mediante la regulación progresiva de la señal de control, la cual debe ser en corriente de 4 a 20 [mA], a medida que esta aumente se logra mayor apertura en el paso de la válvula lo que permite obtener mayor caudal a la salida. En la Tabla 1 se muestran algunas características de conexión de la válvula.

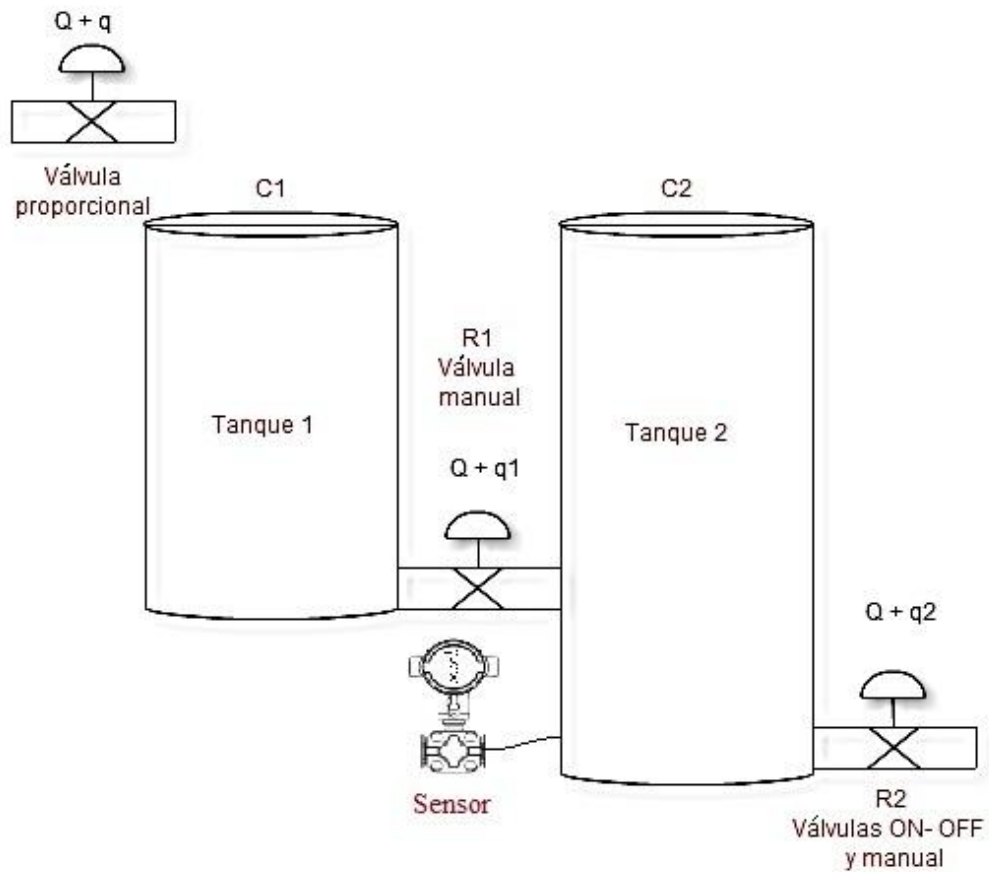
Tabla 1. Datos técnicos válvula Danfoss EV260B

Tensión	Sin generador de señales : 24 V \pm 10%, tensión ca rectificada de onda completa Con generador de señales : 21 - 30 V cc
Señal de control	Sin generador de señales: 300 - 600 mA Con generador de señales: 4 - 20 mA o 0 - 10 V
Potencia bobina	Máx. 20 W
Aislamiento del bobinado	400 k Ω para la señal de control de 0 - 10 V. 250 Ω para la señal de control de 4 - 20 mA
Resistencia de la bobina	23,5 Ω a una temperatura ambiente de 20°C
Aislamiento del bobinado	Clase H de conformidad con el IEC 85
Conexión	Sin generador de señales: Caja de terminales Pg 13,5 Con generador de señales: 3 cables núcleo de 2 m, Pg 13,5
Protección de la bobina, IEC 529	IP 67
Temperatura ambiente	-25°C a +50°C
Régimen de trabajo	Continuo

Fuente: www.danfoss.com

- **Planta:** Sistema sobre el cual se requiere hacer el control de nivel. Consta de dos tanques acoplados mediante tubería PVC de 1" como se observa en la Figura 5. El líquido cuyo nivel se desea controlar (agua) se obtiene mediante una tubería que tiene acceso al laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Asimismo se emplearon los tanques del laboratorio previamente contruidos para las prácticas de instrumentación [1]. Como medidas de adecuación fue necesaria la instalación de una válvula de paso manual, además de arreglos como el corte de los tanques ya que cada uno tenía una altura de aproximadamente 1.50 [m] y cierre de orificios utilizados para diferentes fines. Luego de la válvula manual, se instaló la válvula proporcional encargada de realizar la acción de control. Para ello se adecuó la tubería mediante el uso de codos de PVC para que la salida de líquido coincidiera con la altura del primer tanque. Para realizar el acople entre los dos tanques, se instaló una tubería de 1" con una válvula de paso manual (ver Figura 5) para simular una resistencia hidráulica. Esta misma fue posteriormente utilizada para realizar una perturbación. En el segundo tanque, se instaló un sensor (transmisor de presión) haciendo uso de una boquilla metálica macho-hembra y una manguera de 50 [cm] para realizar una medición confiable de la altura del líquido. Finalmente en la tubería de desagüe se utilizó una válvula on-off normalmente cerrada accionada con 110 [VAC], así como una llave de paso manual.

Figura 5. Sistema de tanques acoplados.



Fuente: Autores

- **Sensor:** Dispositivo de medición, el cual es un transmisor de presión diferencial con capacidad para 100 [psi]. El elemento de medición utilizado es un transmisor de presión diferencial Honeywell ST3000 serie 900, modelo STD930 (ver Figura 6). Este dispositivo permite obtener a la salida una señal de corriente de 4 a 20 [mA].

Figura 6. Trasmisor de presión diferencial Honeywell ST3000 serie 900



Fuente: Autores

La medición se realiza mediante un sensor piezo-resistivo, el cual tiene tres sensores en uno. Este elemento permite obtener presión diferencial, temperatura y presión estática entre 0 y 100 [psi]. Para su uso, fue necesario realizar el cálculo de la máxima presión que se podía obtener en el tanque sobre el cual se deseaba realizar la acción de control (tanque de salida), mediante la ecuación que representa la ley básica de la hidrostática (2.1) [13]:

$$P = d * g * h \quad (2.1)$$

Donde P es la presión estática medida por el dispositivo, al tiempo que d representa la densidad del líquido medido, h su altura y g la fuerza de gravitación universal. Así se determinó que la máxima presión posible sería de 1 [psi]; por tal motivo fue indispensable hacer un ajuste del límite superior al mínimo posible, en este caso 5 [psi], siguiendo las indicaciones del fabricante (Tabla 2). Este ajuste de configuración se obtuvo mediante calibración externa empleando el módulo de comunicación HART del dispositivo.

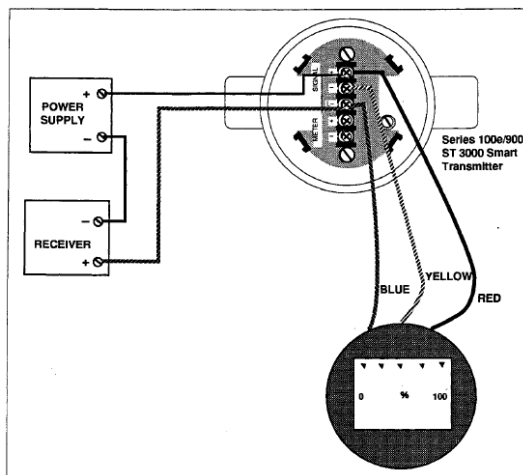
Tabla 2. Datos técnicos TPD ST3000 serie 900 modelo ST930

Parámetros		Descripción
Límite Superior	psi	100
	bar	7
Rango mínimo	psi	5
	bar	0.35
Relación de reducción	20 a 1	

Fuente: www.honeywellprocess.com

El dispositivo también cuenta con un visualizador SM3000, indicador de la señal de salida y estado de la medición, compatible con transmisores Honeywell. El indicador opera con una señal de corriente de 4 a 20 [mA] y la lectura digital puede ser configurada para que se muestre en unidades como: in H₂O, PSI, mm Hg, °F, °C, GPM, GPH y %. Para realizar la conexión de este dispositivo (ver Figura 7), se debe utilizar una resistencia de lazo, cuyo valor depende de la tensión aplicada para operar el transmisor de presión.

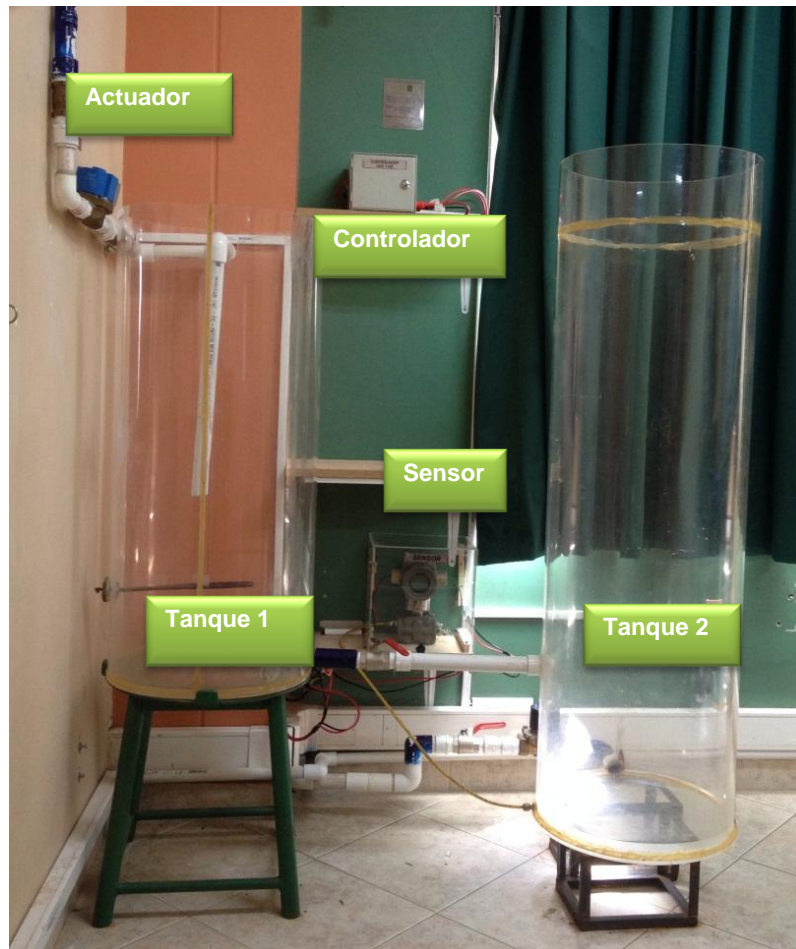
Figura 7. Conexión SM3000 en series 100e/900 ST3000



Fuente: www.honeywellprocces.com

Teniendo en cuenta los elementos anteriormente mencionados, se realizó el montaje e instrumentación electrónica de la planta para un sistema de tanques acoplados que se muestra en la Figura 8.

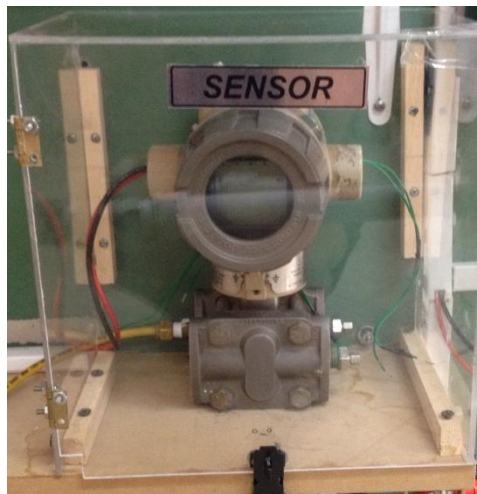
Figura 8. Instrumentación del sistema de control de nivel de líquido: (a) prototipo del sistema de tanques acoplados, (b) controlador UDC1200, (c) transmisor de presión Honeywell, (d) válvula proporcional Danfoss



(a)



(b)



(c)



(d)

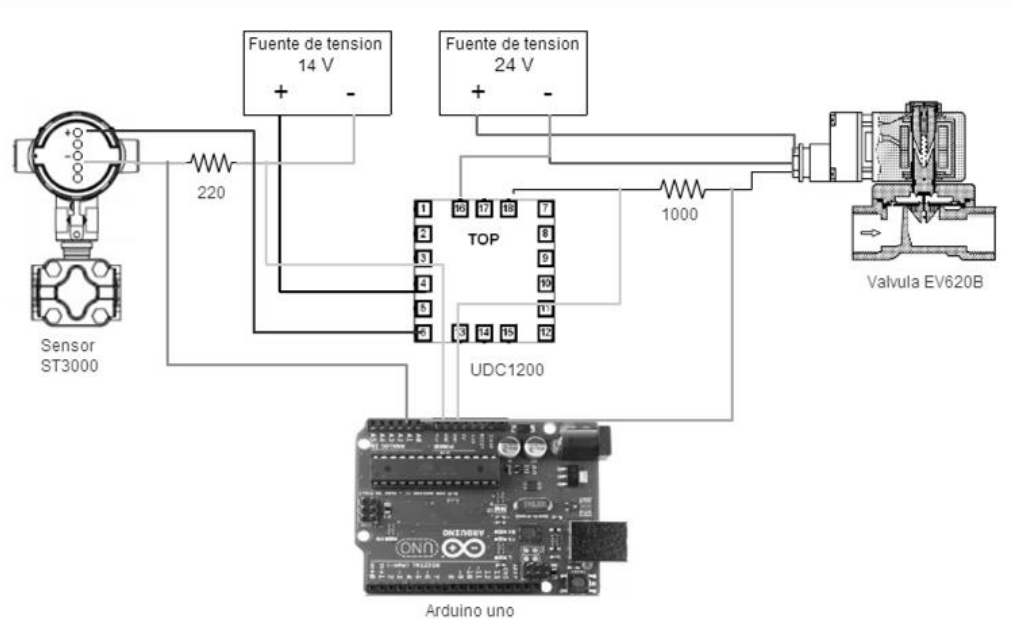
Fuente: Autores

2.2 MÓDULO PARA CAPTURA DE DATOS

Para realizar la adquisición de los datos provenientes del sensor y del actuador, se realizaron las conexiones presentadas en la Figura 9, donde se acopló una resistencia de 220 $[\Omega]$ en el cable de conexión de la señal de salida y una resistencia de 1[k Ω] en la señal de entrada a la válvula proporcional.

Así la medición fue capturada por un sistema de desarrollo Arduino mediante comunicación USB. Para ello, se utilizó la librería “*AnalogRead*” para lectura analógica de datos convertidos en salida de tensión de 0 a 5 [V]. Estos datos se visualizan por medio del puerto COM y son registrados en un archivo para su procesamiento.

Figura 9. Conexión entre elementos del sistema de control y captura de datos



Fuente: Autores

2.3 AJUSTE EN RANGOS DE SEÑAL

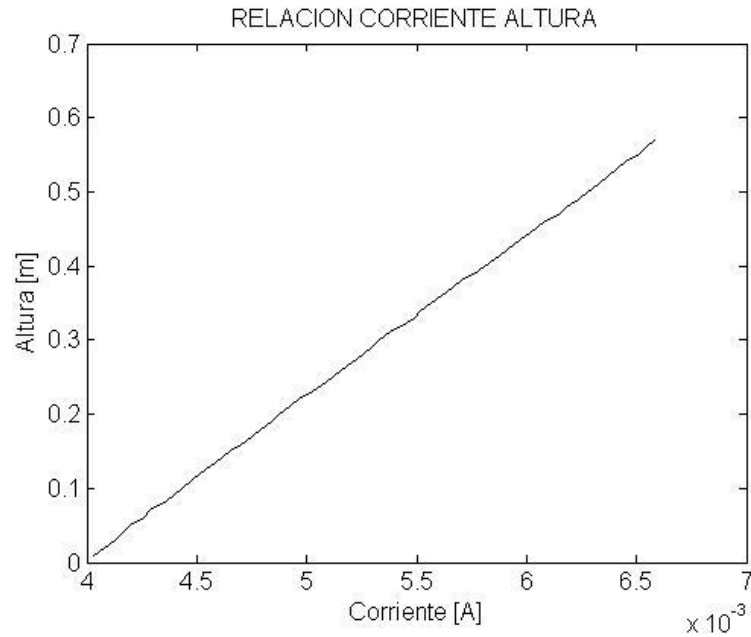
Una vez seleccionados los dispositivos que constituyen los bloques funcionales del sistema, se deben determinar los rangos de operación para cada uno con el fin de garantizar compatibilidad entre señales con valores admisibles en la práctica.

2.3.1. Caracterización de rango en transmisión de presión. Teniendo en cuenta que la variable a controlar es el nivel de líquido presente en el tanque de salida, se estableció una relación entre la señal de salida del transmisor de presión y la variable de interés. Esta relación se obtuvo mediante pruebas de laboratorio que consistían en registrar la señal de corriente en la salida con un amperímetro conectado en serie, a medida que aumentaba 1 [cm] la altura del nivel de líquido. Para obtener mayor precisión en los datos, se realizó este experimento en repetidas ocasiones, tomando un promedio del valor para cada altura; así se obtuvo el resultado visualizado en la Figura 10, a partir de lo cual se observa una relación corriente- altura lineal que puede ser representada por medio de la ecuación (2.2):

$$h = 238.38 * I - 0.8891 \quad (2.2)$$

Donde I es la corriente obtenida en el transmisor de presión medida en [mA] y h representa la altura del nivel de líquido en el tanque de salida medida en [m].

Figura 10. Relación corriente- altura en el tanque de salida



Fuente: Autores

De otro lado, la medición utilizando el SM3000 se realiza en unidades de porcentaje, por tanto se empleó la transformación (2.3) para obtener una relación entre la medida porcentual y la altura:

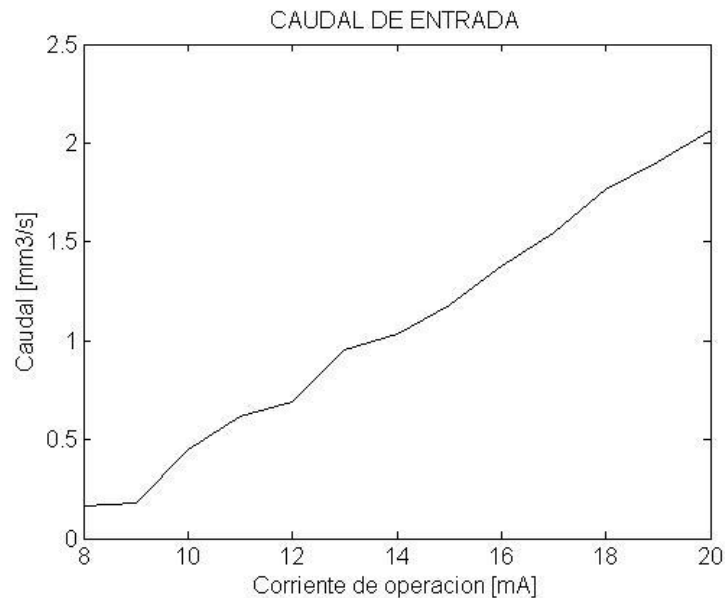
$$h = 0.0349 * x - 0.0301 \quad (2.3)$$

Donde x representa el porcentaje de presión medida por el sensor y h la altura en [m].

2.3.2. Caracterización de rango en válvula proporcional. Se definió como variable de entrada el caudal proporcionado por la válvula proporcional Danfoss EV260B, equivalente a una corriente de 4 a 20 [mA]. Para generar la señal de corriente necesaria, se utilizó un circuito convertidor tensión/corriente basado en el circuito integrado XTR110, el cual permite obtener una señal entre 4 y 20 [mA] dependiendo de la tensión aplicada en la entrada del mismo.

Por tanto, para determinar la relación experimental entre caudal de salida de la válvula y corriente de entrada, se realizaron medidas de corriente de entrada a la válvula mediante un amperímetro conectado en serie con el circuito conversor. Teniendo en cuenta la definición de caudal [13]: “*flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo*” se mantuvo una porción de volumen constante para realizar la prueba. Conociendo el área transversal en el tanque de entrada, se registró el tiempo que tardaba el nivel de líquido en disminuir 1 [cm], además de la señal de corriente con la que operaba la válvula, obteniendo los datos representados en la Figura 11.

Figura 11. Relación entre caudal de entrada y corriente de válvula proporcional



Fuente: Autores

A partir de los datos de la figura, se estableció que la relación existente entre la corriente de operación de la válvula Danfoss EV260B y el caudal de entrada a la planta es lineal y creciente. Esto demuestra que a medida que aumenta la corriente en la bobina de la válvula, la apertura en la misma es mayor permitiendo

que el flujo de líquido a través de ella aumente. Lo anterior se formaliza a través de la ecuación (2.4):

$$Q = 0.1631 * I - 1.2124 \quad (2.4)$$

Donde Q es el caudal medido en $[\text{mm}^3/\text{s}]$ e I representa la señal de corriente de operación de la válvula proporcional medida en $[\text{mA}]$.

3. CALCULO DE PARAMETROS

En este capítulo se define la función de transferencia que representa el comportamiento del sistema. También se define el valor de los parámetros de dicho modelo matemático mediante pruebas experimentales complementadas por procedimientos de validación basados en el análisis de la respuesta ante un estímulo de tipo escalón.

3.1. IDENTIFICACION DEL MODELO DEL SISTEMA

Para realizar una aproximación al modelo del sistema, se determinó el tipo de flujo de líquido presente en el proceso seleccionando entre laminar y turbulento. En el caso laminar, el flujo es estable lo cual significa que no se presentan turbulencias en las corrientes del líquido, situación ideal cuando se busca realizar una descripción dinámica de tipo lineal. Por tal motivo se determinó a este como el régimen presente en la planta teniendo en cuenta la distribución y las medidas de los elementos y componentes que hacen parte de la misma.

Por tanto, a partir de la interacción entre los dos tanques se estableció una función de transferencia de segundo orden, haciendo uso de las variables definidas en la Figura 5, tal y como se explica a continuación.

La cantidad de líquido almacenada en un tanque durante un tiempo determinado es igual a la diferencia de flujo entre la entrada y la salida del mismo. Las ecuaciones que representan dicho comportamiento son [13]:

$$C_1 dh_1 = q - q_1 dt \quad (3.1)$$

$$C_2 dh_2 = q_1 - q_2 dt \quad (3.2)$$

Donde C_1, C_2 son las capacitancias para los tanques de entrada (primer tanque) y salida (segundo tanque); dh_1, dh_2 relacionan el cambio de nivel de líquido; q es el flujo de líquido aplicado en la entrada del primer tanque; y q_1, q_2 representan los cambios de caudal en los tanques 1 y 2 respectivamente en un intervalo de tiempo dt .

Dado que el caudal depende de la altura del líquido en cada tanque y la resistencia entre ellos, la cual se opone al flujo, se obtiene [13]:

$$q_1 = \frac{h_1}{R_1} \quad (3.3)$$

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2} \quad (3.4)$$

Siendo h_1 y h_2 pequeñas desviaciones de altura a partir de su valor en estado estable, mientras R_1 y R_2 son resistencias representativas para cada válvula.

Reemplazando las ecuaciones que describen el caudal del líquido en las ecuaciones (3.1) y (3.2) se obtienen:

$$\frac{C_1 dh_1}{dt} = q - \frac{h_1}{R_1} \quad (3.5)$$

$$\frac{C_2 dh_2}{dt} = \frac{h_1}{R_1} - \frac{h_2}{R_2} \quad (3.6)$$

Aplicando transformada de Laplace a las ecuaciones anteriores y considerando condiciones iniciales iguales a cero se obtiene:

$$sC_1 H_1 s + \frac{1}{R_1} H_1 s = Q s \quad (3.7)$$

$$sC_2 H_2 s + \frac{1}{R_2} H_2 s = \frac{H_1 s}{R_1} \quad (3.8)$$

Posteriormente, realizando manipulación algebraica de estas expresiones es posible encontrar las siguientes relaciones de transferencia para cada tanque:

$$\frac{H_1 s}{Q s} = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \quad (3.9)$$

$$\frac{H_2 s}{H_1(s)} = \frac{R_2}{R_1 R_2 C_2 s + R_1} \quad (3.10)$$

Finalmente, combinando ambas expresiones y tras considerar al flujo de entrada $Q(s)$ como la entrada del sistema total y a la altura del segundo tanque $H_2 s$ como la respectiva salida del sistema total, se determina como función de transferencia global a la siguiente:

$$\frac{H_2 s}{Q s} = \frac{R_2}{(R_1 R_2 C_1 C_2) s^2 + R_1 C_1 + R_2 C_2 s + 1} \quad (3.11)$$

Desde el punto de vista operativo, se definió un punto en el que el flujo de caudal de líquido en la entrada es igual al flujo en la válvula de desagüe; es decir el punto de equilibrio. Para esto se aplicaron diferentes valores de corriente entre 4 y 20 [mA] a la válvula proporcional, hasta encontrar el valor para el cual el sistema alcanzaba una altura constante. Lo anterior se hizo con el fin de realizar las pruebas de validación del modelo alrededor de este punto de operación. A partir de ello, se determinó que al aplicar una corriente a la válvula de entrada de 8 [mA] (cuyo valor en caudal corresponde a 0,1651 [mm³/s]), el nivel de líquido en el tanque 1 se mantenía alrededor de 14.7 [cm] y en el tanque de salida en 23 [cm], para un grado de apertura predeterminada en las válvulas de acople entre los dos tanques y en la tubería de desagüe.

3.2. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA

Una vez determinada la función de transferencia que describe la relación entre el caudal de entrada del primer tanque y el nivel de líquido en el segundo, se procedió a hallar los valores de parámetro correspondientes a las resistencias y capacitancias hidráulicas del modelo.

3.2.1 Capacitancia hidráulica. La capacitancia C de un tanque se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado para producir un cambio de unidad en el potencial de altura [13]:

$$C = \frac{\text{cambio en el líquido almacenado [m}^3\text{]}}{\text{cambio en la altura [m]}}, \quad (3.12)$$

que para el caso de una geometría uniforme con respecto a la altura representa su área transversal. Por tanto, teniendo en cuenta que el tanque de entrada tiene un radio de 19.85 [cm] y el tanque de salida de 19.9 [cm] y asumiendo una sección de área transversal para un cilindro a partir de:

$$A = \pi * r^2, \quad (3.13)$$

se obtiene una capacitancia $C_1 = 0.1238 \text{ [m}^2\text{]}$ para el tanque de entrada, al tiempo que para el tanque de salida $C_2 = 0.1244 \text{ [m}^2\text{]}$.

3.2.2 Resistencia hidráulica Para determinar el valor de cada una de las resistencias hidráulicas R_1 y R_2 correspondientes respectivamente a la válvula entre los tanques y a la válvula en el desagüe, se tuvo en cuenta que la resistencia para el flujo de líquido en un tubo corto que conecta dos tanques se define como el cambio en la diferencia de nivel necesaria para producir un cambio en la velocidad de flujo [13]:

$$R = \frac{\text{cambio en la diferencia de nivel [m]}}{\text{cambio en la velocidad de flujo [m}^3 \text{ s}]}, \quad (3.14)$$

De esta forma se planteó una prueba para determinar la resistencia hidráulica en el acople entre los dos tanques. Dicha prueba consistió en registrar el tiempo en que se obtenía una disminución de una altura predeterminada de 1,5 [cm] en el nivel del primer tanque, comenzando con el valor en estado estable o punto de equilibrio (alrededor de 15 [cm]), tras una interrupción en el flujo de entrada. Por tanto, conociendo el volumen desalojado y el tiempo empleado para ello, se genera una aproximación al flujo que circula por la válvula. Una vez obtenidos

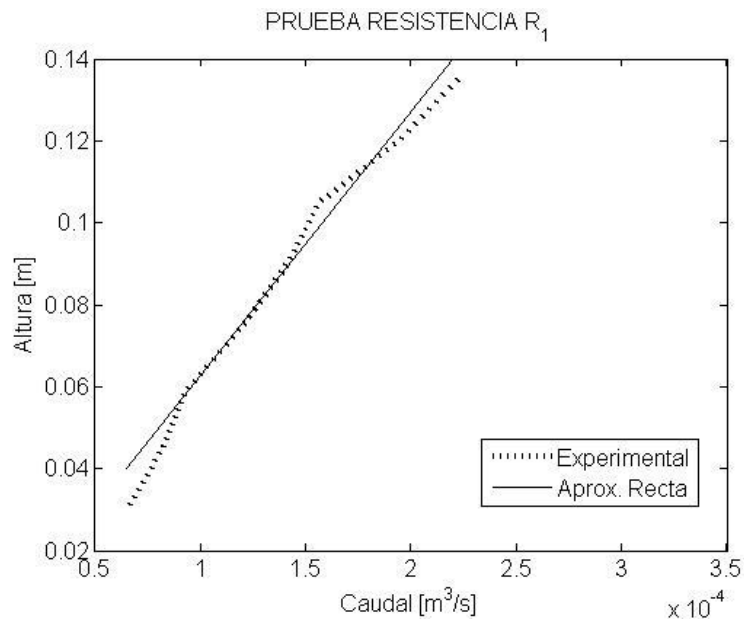
estos datos, se construyó la Tabla 3 y a partir de ella la Figura 12 según la cual una aproximación para la pendiente de la curva en la vecindad del punto de equilibrio indica un valor aproximado para la resistencia de alrededor 620 [s/m²].

Tabla 3. Prueba para determinación de la resistencia R1

Volumen [m ³]	Δ Tiempo [s]	Caudal [m ³ /s]	Altura [m]
3.11E-03	0	2.48E-04	0.15
3.11E-03	14	2.22E-04	0.135
3.11E-03	16	1.94E-04	0.12
3.11E-03	20	1.56E-04	0.105
3.11E-03	22	1.41E-04	0.09
3.11E-03	26	1.20E-04	0.075
3.11E-03	33	9.43E-05	0.06
3.11E-03	38	8.18E-05	0.045
3.11E-03	48	6.48E-05	0.03

Fuente: Autores

Figura 12. Prueba para determinación de la resistencia R1



Fuente: Autores

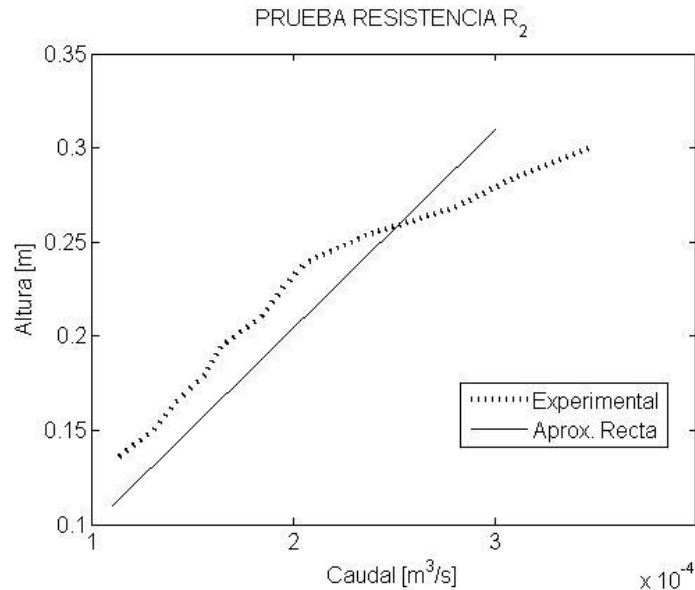
Para el cálculo de la resistencia R_2 (que es la resistencia de la válvula del desagüe) se utilizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, con datos equivalentes incluidos en la Tabla 4 y graficados en la Figura 13, para un valor aproximado de resistencia hidráulica R_2 de 1020 [s/m²].

Tabla 4. Prueba para determinación de la resistencia R2

Volumen [m ³]	Δ Tiempo [s]	Caudal [m ³ /s]	Altura [m]
3.11E-03	0	3.71E-04	0.315
3.11E-03	9	3.46E-04	0.3
3.11E-03	10	3.11E-04	0.285
3.11E-03	11	2.83E-04	0.27
3.11E-03	13	2.39E-04	0.255
3.11E-03	15	2.07E-04	0.24
3.11E-03	16	1.94E-04	0.225
3.11E-03	17	1.83E-04	0.21
3.11E-03	19	1.64E-04	0.195
3.11E-03	20	1.56E-04	0.18
3.11E-03	22	1.41E-04	0.165
3.11E-03	24	1.30E-04	0.15
3.11E-03	28	1.11E-04	0.135

Fuente: Autores

Figura 13. Prueba para determinación de la resistencia R₂



Fuente: Autores

Finalmente reemplazando en la expresión (3.11) los valores obtenidos para las capacitancias y las resistencias hidráulicas, se determina la siguiente función de transferencia con valores de parámetro asignados, para relacionar las variables de entrada y salida del sistema:

$$\frac{H_2 s}{Q s} = \frac{1020}{9739 s^2 + 203.6 s + 1} \quad (3.15)$$

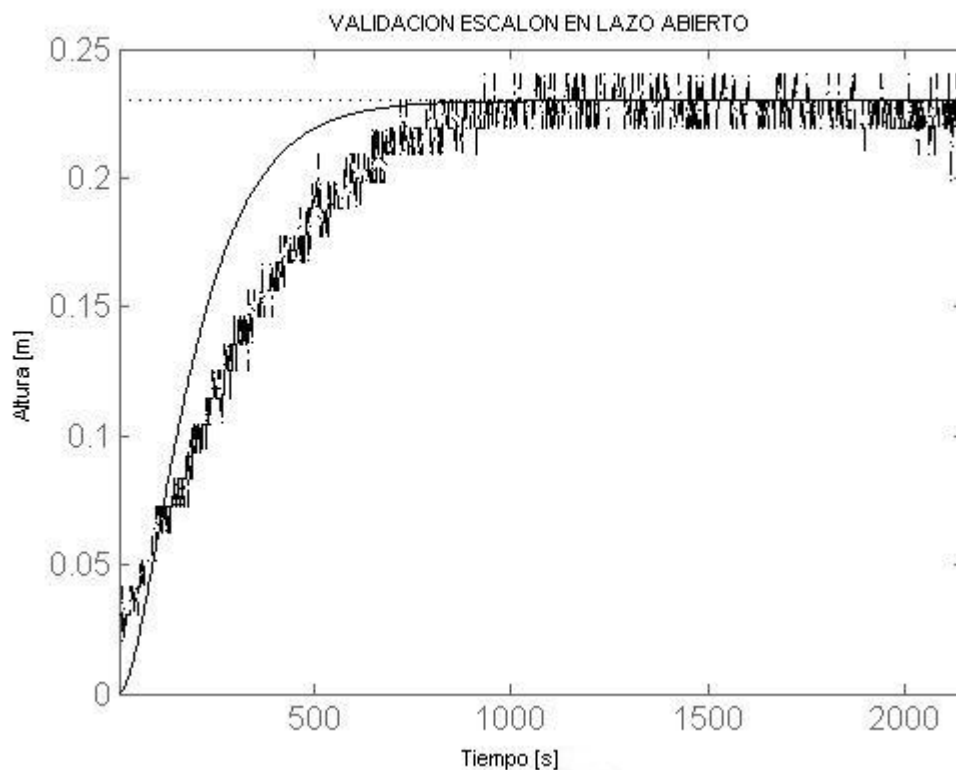
Donde H_2 está dada en [m] y Q en [mm³/s].

3.3. VALIDACION DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA

Para determinar la validez del modelo matemático propuesto para el sistema y de los valores de parámetro obtenidos, se realizó una prueba en lazo abierto que consistió en aplicar una entrada escalón al sistema experimental para comparar posteriormente, cualitativa y cuantitativamente, los resultados de su respuesta con los generados numéricamente para el modelo empleando MATLAB®.

La Figura 14 presenta los resultados obtenidos partiendo del reposo, con el tanque de entrada completamente desocupado, el tanque de salida con un nivel de líquido mínimo de 2 [cm] y flujo de caudal en cero. Posteriormente se aplicó una corriente de aproximadamente 8 [mA] en la válvula proporcional de entrada, dando como resultado un estímulo de tipo escalón al sistema de caudal $0,1651 \text{ [mm}^3/\text{s]}$ tal que la altura en el segundo tanque se incrementa en modo sobre amortiguado hasta alcanzar su valor de equilibrio.

Figura 14. Validación del modelo del sistema.



Fuente: Autores.

De la respuesta numérica obtenida (línea sólida de la gráfica) se puede observar que el modelo captura características de la respuesta como el comportamiento sobreamortiguado, el valor de la altura en estado estable y el tiempo de

establecimiento, mostrando la validez del modelo matemático propuesto y de los valores de parámetro calculados.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR

Una vez instrumentado y modelado el sistema para controlar el nivel de líquido de dos tanques acoplados, en el presente capítulo se ilustrará el diseño y la implementación de un controlador PID empleando el controlador industrial UDC 1200 de HONEYWELL. Se realizará el cálculo de las variables del controlador y se contrastará con los resultados obtenidos tras ejecutar la rutina de autoajuste (autoset) del controlador industrial.

4.1 CONTROLADOR PID

Un control PID es un tipo de controlador ampliamente utilizado en la industria debido a la alta eficiencia que presenta al momento de ser implementado en procesos industriales en lazo cerrado. El algoritmo básico del control PID se puede expresar de la siguiente forma [14]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.1)$$

donde $e(t)$ es la señal de error, K_p , K_d y K_I son las ganancias proporcional, derivativa e integral respectivamente. Dicha expresión puede ser reformulada como:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (4.2)$$

a partir de lo cual:

$$K_I = \frac{K}{T_I} \quad K_D = K T_D. \quad (4.3)$$

La acción de control proporcional hace que el error en estado estacionario disminuya a expensas de un aumento en la amplitud de las oscilaciones. La acción derivativa permite mejorar el factor de amortiguamiento, lo que significa que el proceso se estabiliza en menor tiempo sin que aumenten las oscilaciones y la acción de control integral elimina el error en estado estable [14].

Un parámetro importante en el ámbito industrial corresponde con la banda proporcional. *La banda proporcional BP se define como el porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. El valor de la banda proporcional de un instrumento en particular se expresa en tanto por ciento de su campo de medida total, por ejemplo si la escala de un instrumento es 200 [°C] y se necesitan 50 [°C] de cambio para provocar una carrera total de la válvula, el tanto por ciento de la válvula es 50/200 es decir 25%.¹*

Esta banda proporcional *BP* se relaciona con la ganancia proporcional K_p , a partir de:

$$\text{Banda proporcional (BP)} = \frac{100}{K_p} \quad (4.4)$$

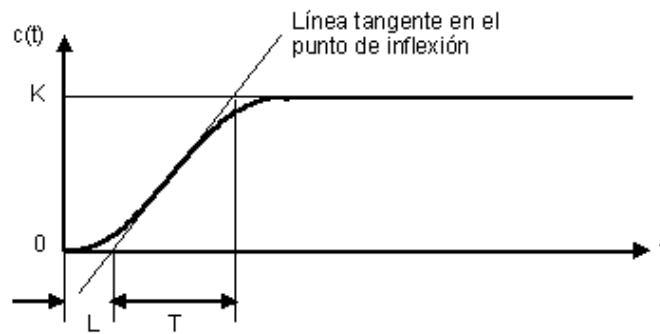
4.2 CÁLCULO TEÓRICO DE PARÁMETROS DEL CONTROLADOR

Para el cálculo de los parámetros del controlador PID se utilizó el primer método de Ziegler & Nichols [15]. Teniendo en cuenta que la función de transferencia de la planta no posee integradores o polos dominantes complejos conjugados, la respuesta escalón del sistema se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T (ver Figura 15), los cuales se obtienen respectivamente a partir de la recta tangente en el punto de inflexión a la curva en

¹ Tomado literalmente de: T. F. Jorge. "Regulación automática: apuntes de clase". Universidad de Atacama. Chile.

forma de S, determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$. Para el caso particular analizado, los valores obtenidos fueron $L = 27.3531$ y $T = 237.89$. Posteriormente, empleando estos valores y las relaciones contenidas en la Tabla 5 se realizó el cálculo para los parámetros del controlador.

Figura 15. Curva de la respuesta ante una entrada tipo escalón con forma de S



Fuente: [13]

Tabla 5. Parámetros controlador por cálculo teórico

Parámetro	Ecuación Z&N	Valor calculado
K_p	$1.2T/L$	12.016
T_D	$0.5L$	13.67 [s]
T_I	$2L$	54.7 [s]

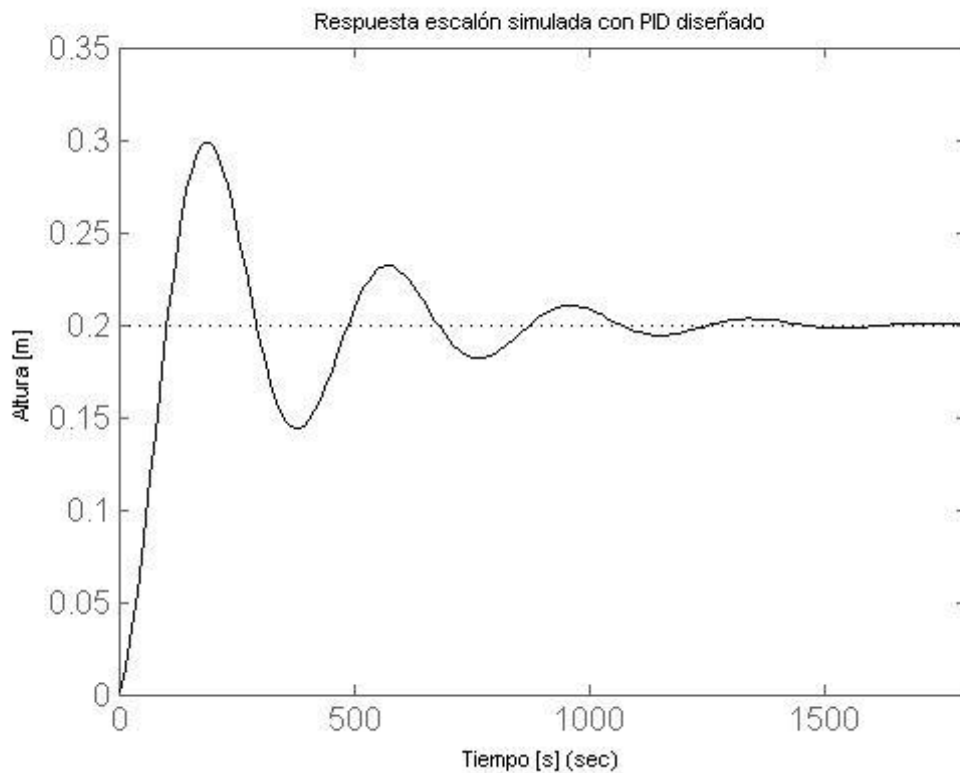
Fuente: Autores

Con estos valores de parámetro se procedió a realizar una simulación en MATLAB® para el sistema controlado, ante lo cual se presenta en la Figura 16 el resultado de su respuesta ante un estímulo de tipo escalón. A partir de ello se observa que el sistema controlado no presenta error en estado estable, alcanzando el valor deseado de 0.2 [m] en aproximadamente 1200 [s], además de un pico de 0.29 [m] que representa un sobre impulso del 45%, lo cual justifica

realizar sintonización manual de los parámetros para reducirlo hasta el valor típico del método de Ziegler & Nichols en alrededor de 25%.

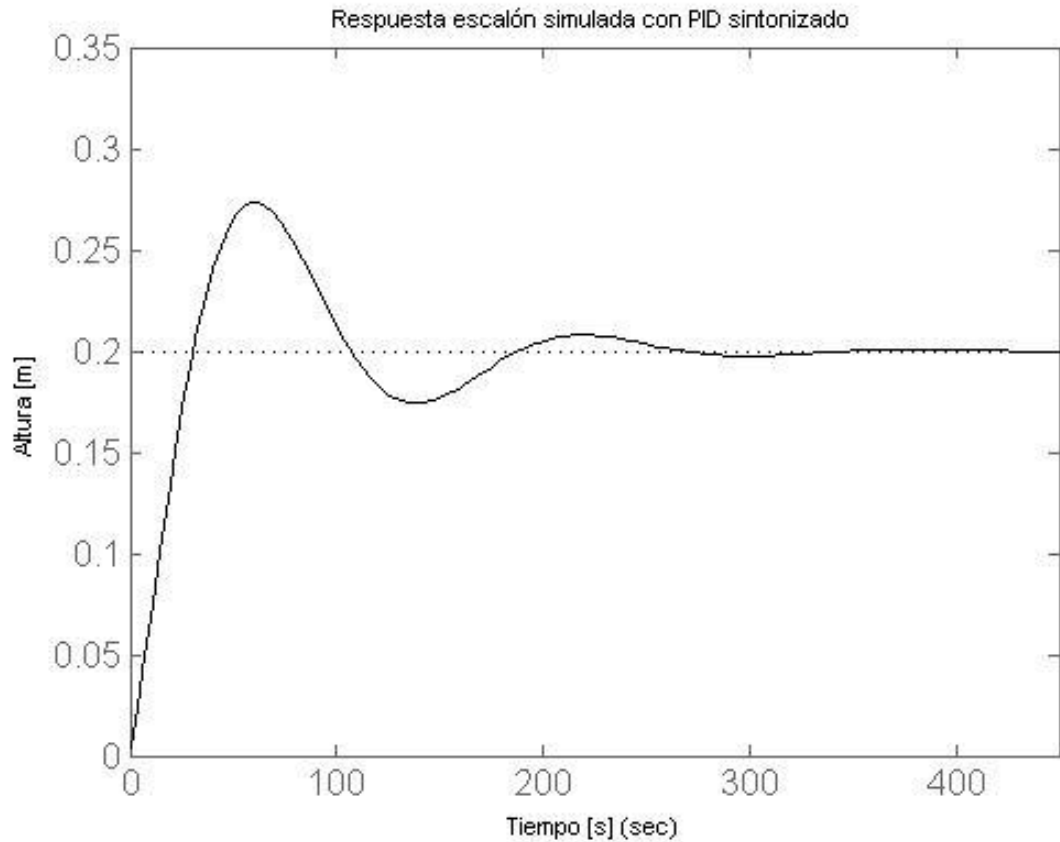
Por tanto, se modificó el término proporcional incrementándolo a un nuevo valor de 100 manteniendo invariantes los términos integral y derivativo, obteniendo la respuesta modificada que se muestra en la Figura 17 en la cual se verifica una disminución ostensible del tiempo de establecimiento (ahora en alrededor de 250 [s]) y del máximo sobre impulso de la curva.

Figura 16. Respuesta escalón simulada con PID diseñado



Fuente: Autores

Figura 17. Respuesta escalón simulada con PID sintonizado



Fuente: Autores

4.3 VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE PARAMETROS CALCULADOS

Estos valores de parámetro calculados y sintonizados fueron ingresados posteriormente, de manera manual, en el controlador industrial UDC-1200. El procedimiento para ingreso manual de las constantes del controlador se ilustra como sigue:

- a) Se mantienen los botones “*setup*” y “*flecha arriba*” presionados simultáneamente.

- b) Se selecciona el modo ajuste y se presiona “*setup*” para desplazarse a través de los parámetros.
- c) Se presionan las flechas para ajustar el valor necesario. La banda proporcional “*Pb_P*” admite valores en porcentaje de entre 0.0% y 99.9%; la constante de tiempo integral “*ArSt*” admite valores entre 0.1 [s] y 99 [min] con 59 [s] y la constante de tiempo derivativo “*rAtE*” admite valores entre 0 [s] y 99 [min] con 59 [s].

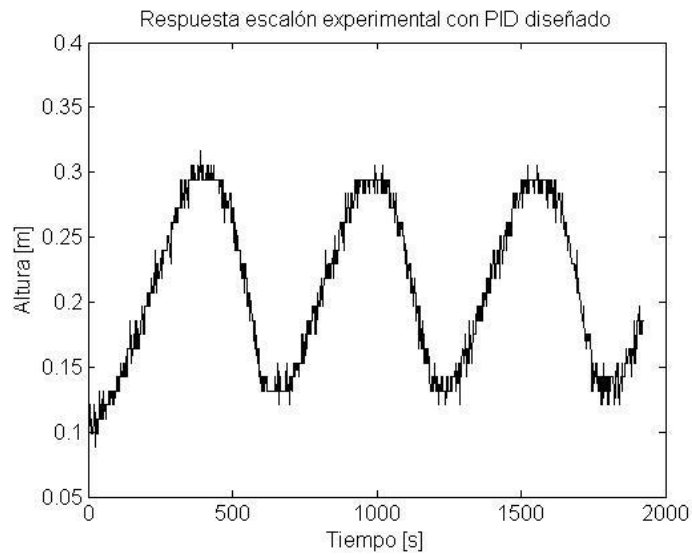
De esta forma, haciendo uso de las equivalencias dadas por las ecuaciones (4.3) y (4.4) se determinaron los parámetros para el control PID que se incluyen en la Tabla 6. Asimismo, la Figura 18 permite observar la respuesta oscilatoria obtenida tras ingresar al sistema los valores de parámetro teóricos iniciales, replicando el comportamiento inapropiado predicho en la teoría (Figura 16) corregido posteriormente tras variar el valor de la banda proporcional, como se indica a partir de la curva de la Figura 19, en la cual el sistema converge al valor de referencia deseado en algo más de 200 [s] verificando el valor obtenido en simulación.

Tabla 6. Parámetros control PID implementados en UDC-1200

Parámetro	Valor inicial	Valor ajustado
<i>BP</i>	8.33 [%]	1 [%]
<i>T_D</i>	14 [s]	14 [s]
<i>T_I</i>	54 [s]	54 [s]

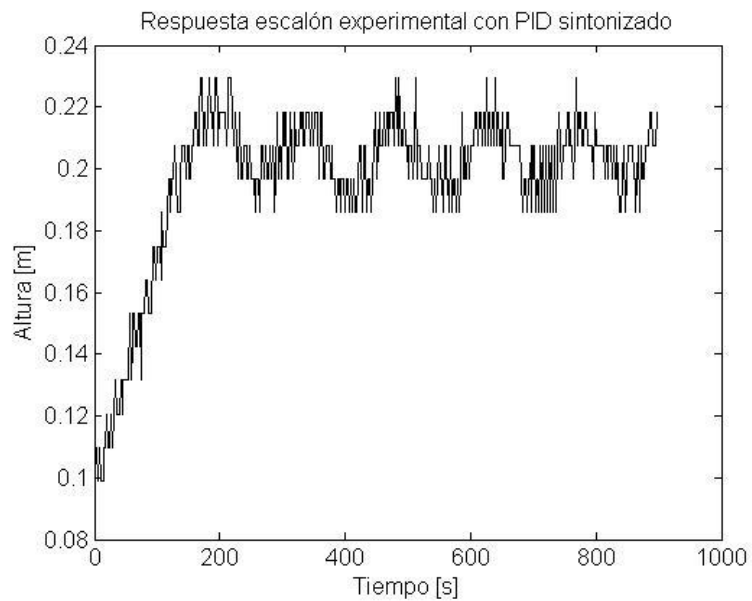
Fuente: Autores.

Figura 18. Respuesta escalón experimental con PID diseñado



Fuente: Autores

Figura 19. Respuesta escalón experimental con PID sintonizado

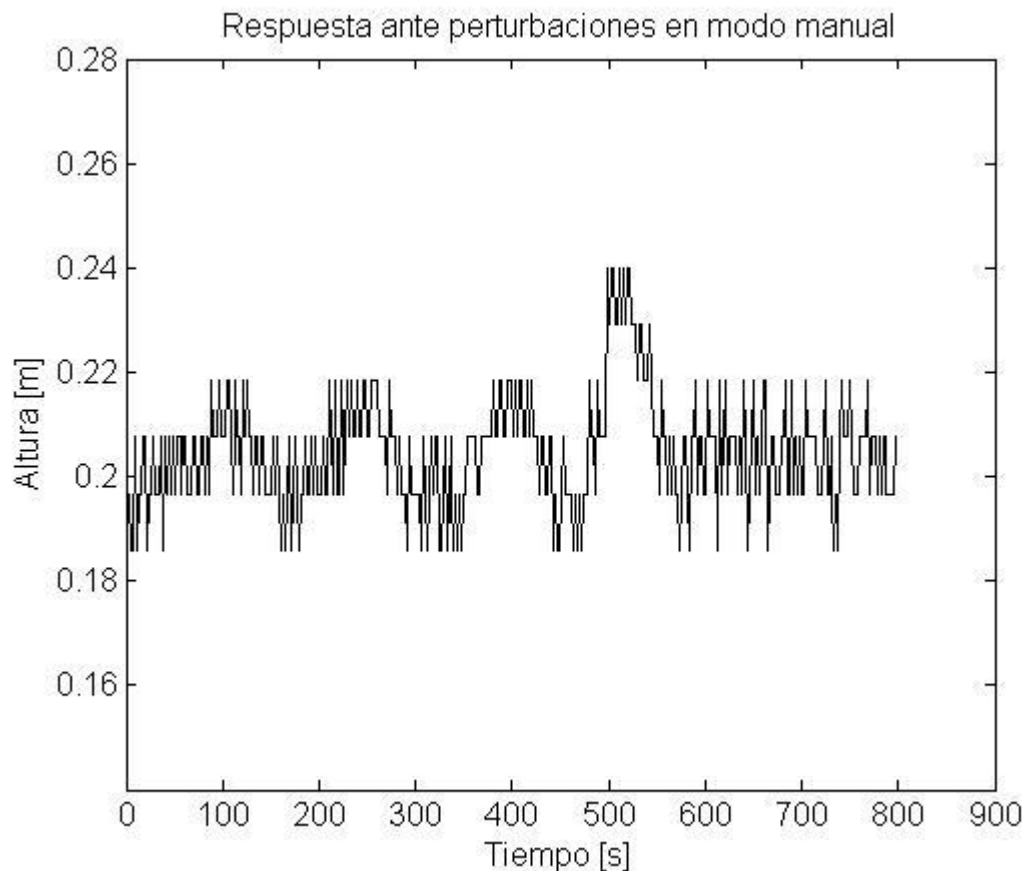


Fuente: Autores

Posteriormente, con el PID sintonizado en ejecución, se realizó una perturbación al sistema a través del parámetro R1 modificando su valor nominal de 620 a 1144

[s/m²] (es decir, un aumento del 45.8%), lo cual genera un aumento en el caudal de entrada para el tanque de salida. El resultado de este experimento se observa en la Figura 20, donde se verifica una atenuación de la perturbación en aproximadamente 150 [s] que permite demostrar la robustez de la técnica de control implementada.

Figura 20. Respuesta ante perturbaciones en modo manual

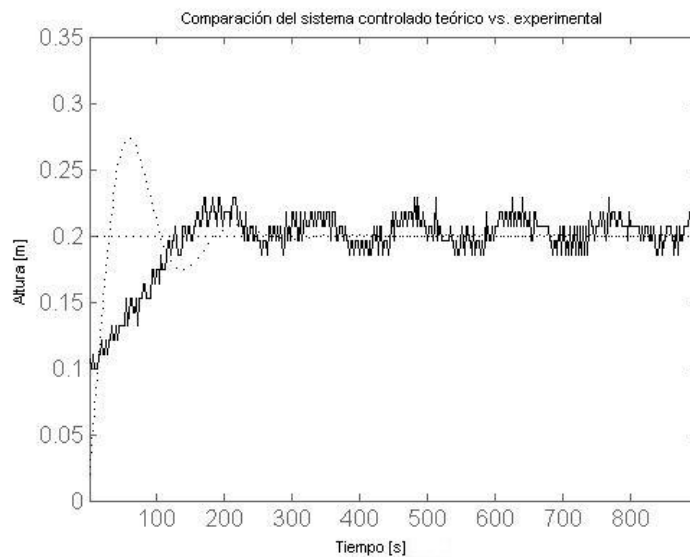


Fuente: Autores

Finalmente, comparando los resultados de la respuesta del sistema controlado y sintonizado obtenidos por simulación y a través de medidas experimentales, la Figura 21 muestra que parámetros como el tiempo de establecimiento y el valor en estado estacionario presentan características similares, justificando la acción de

control PID diseñada e implementada mediante el dispositivo industrial. Sin embargo, también es evidente que existen notorias discrepancias (principalmente en el tiempo de levantamiento o de subida y la no atenuación de oscilaciones) debidas en parte a factores como la calibración de instrumentos, ruidos de medida y dinámicas no modeladas en el diseño teórico, los cuales alteran la aproximación del sistema. Lo anterior será el objetivo fundamental de futuros trabajos complementarios al presentado en este informe que, a través de mejorar el acondicionamiento de señales del sistema, permitan replicar de mejor manera las predicciones teóricas en modo experimental.

Figura 21. Comparación del sistema controlado teórico vs. Experimental



Fuente: Autores

4.4 CONTROLADOR INDUSTRIAL EN MODO DE AUTOAJUSTE

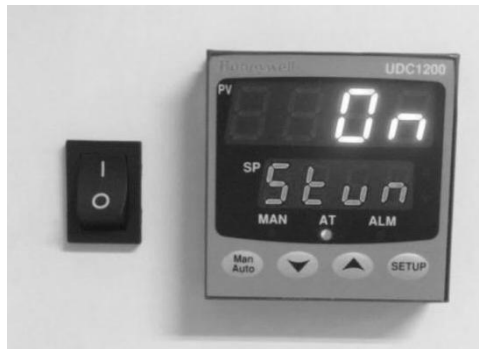
El controlador UDC 1200 permite implementar el control PID realizando un ajuste manual de los parámetros mediante el ajuste automático en modo *Autoset* [1]. Para configurar el controlador en modo de autoajuste (*Autoset*), se deben

mantener los botones “*setup*” y “*flecha arriba*” simultáneamente presionados para acceder a las funciones del menú de configuración y funcionamiento. Luego se selecciona la opción “*Atun*” como se muestra en la Figura 22.a (donde “*SLCt*” indica *selección*) y se utilizan las flechas para escoger la opción necesaria, bien sea “*Ptun*” que realiza un preajuste de los parámetros ó “*Stun*” que permite realizar el autoajuste. Finalmente se introduce la clave de bloqueo de ajuste “*tloc*”, la cual es por defecto 0 (ver Figuras 22.b y 22.c). Es necesario notar que para realizar el ajuste automático la banda proporcional debe ser configurada en un valor diferente de 0.

Figura 22. Configuración controlador UDC1200 en modo Autoset



(a)



(b)



(c)

Fuente: Autores

Los valores de parámetro configurados por el controlador en modo de autoajuste se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros controlador en modo de autoajuste

Parámetro	Valor configurado
BP	1 [%]
T_D	19.2 [s]
T_I	4.8 [s]

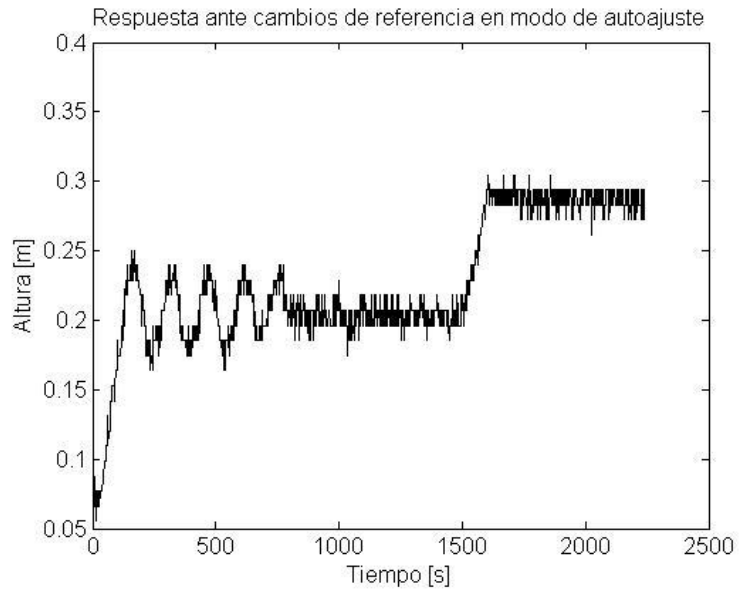
Fuente: Autores

A partir de ello se observa como los parámetros de banda proporcional y tiempo derivativo generados de manera automática, difieren levemente de los valores sintonizados incluidos en la Tabla 6, mientras el tiempo integral se reduce en un orden de magnitud. Es conveniente aclarar que la configuración inicial empleada para los parámetros y a partir de la cual se realizó la convergencia, corresponde con 0.5% para la banda proporcional, 0.01 [s] para la constante de tiempo integral y 0 [s] para la constante de tiempo derivativo.

El comportamiento del sistema controlado experimental empleando parámetros de control mediante autoajuste, fue valorado a partir de las siguientes pruebas:

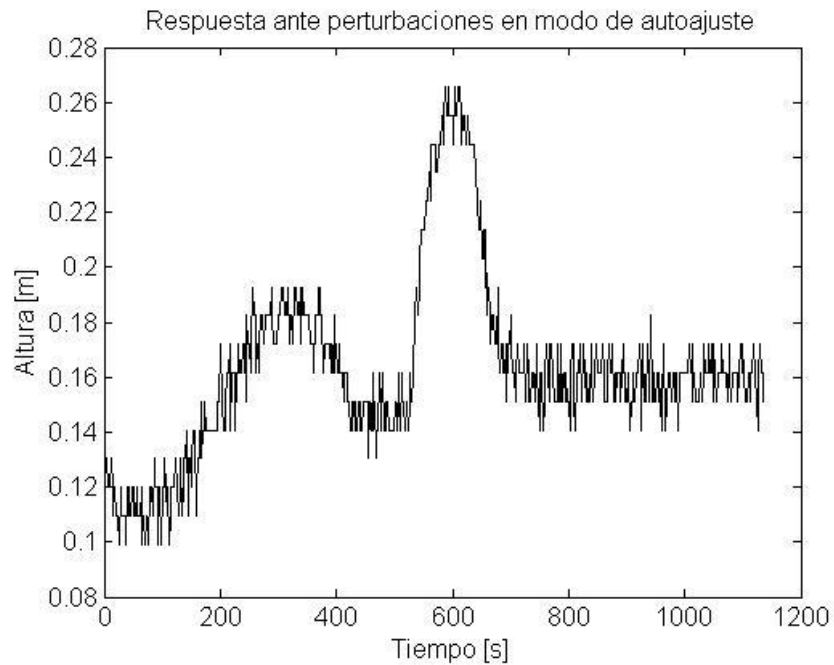
- La primera de ellas consistió en ajustar un valor de referencia hasta que el tanque de salida llegara al nivel de líquido deseado, siendo posteriormente modificado para verificar el seguimiento del sistema controlado ante diferentes valores de consigna. En la Figura 23 se muestran resultados para un nivel inicial en el tanque de salida de 7 [cm], con valor deseado de 21 [cm] (equivalentes en corriente a 4.65 [mA]), que una vez alcanzado es modificado a 29 [cm] (equivalentes a 4.95 [mA]). De los resultados observados se evidencia el tiempo de establecimiento del sistema controlado en alrededor de 750 [s] en el primer caso y de 200 [s] al aumentar el caudal, además de la eliminación del error en estado estable. Las oscilaciones observadas en la respuesta son producto de la sensibilidad de los elementos de medición y ruido durante el registro de los datos.
- Una segunda prueba consistió en realizar una perturbación en el sistema controlado en estado estable para verificar su robustez o capacidad de convergencia hacia el valor deseado. Como perturbación para el sistema se modificó el valor en la resistencia R1 de 620 a 1144 [s/m²] (es decir, un aumento del 45.8%), lo cual genera un aumento en el caudal de entrada para el tanque de salida. En la Figura 24 se observa el comportamiento del sistema perturbado, a partir de lo cual el sistema recupera el nivel deseado en aproximadamente 200 [s] a pesar del cambio permanente presente en el valor del parámetro.

Figura 23. Respuesta ante cambios de referencia en modo de autoajuste



Fuente: Autores

Figura 24. Respuesta ante perturbaciones en modo de autoajuste



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con el presente proyecto de grado, es posible concluir que:

- Se realizó el montaje y la instrumentación electrónica de un sistema de tanques acoplados en el laboratorio de control e instrumentación de la E³T como se puede observar de los resultados presentados en la sección 2.1 (Figura 8), donde se evidencia la configuración del sistema de control implementado constituido por una válvula proporcional DANFOSS, válvulas manuales y de encendido apagado, un transmisor de presión diferencial HONEYWELL y un controlador universal UDC1200.
- Se instrumentaron y calibraron tanto el sensor de presión como el actuador (válvula proporcional), para efectuar manipulación del nivel de líquido en el sistema mediante el controlador industrial. Lo anterior se ilustra en las secciones 2.1 y 2.3, en las cuales se explica la caracterización de cada elemento del sistema de control y los respectivos ajustes en los rangos y escalas de sus correspondientes señales.
- Se realizó un procedimiento experimental para obtener los parámetros de un modelo matemático apropiado para el sistema, tales como resistencias hidráulicas representadas por válvulas manuales y on-off, al igual que capacitancias hidráulicas relacionadas con el área de sección transversal de los tanques. Lo anterior se ilustra en las secciones 3.1 y 3.2, desarrollos a partir de los cuales se obtuvo una representación matemática del comportamiento del sistema a manera de función de transferencia (ecuación 3.15).

- Se validó el modelo matemático obtenido con medidas del sistema real mediante una prueba en lazo abierto que consistió en aplicar una entrada escalón al sistema experimental y comparar posteriormente los resultados de su respuesta con los generados numéricamente para el modelo empleando MATLAB®, como se puede observar en la Figura 14 de la sección 3.3.
- Se diseñó e implementó un controlador PID en un dispositivo industrial de referencia HONEYWELL UDC1200 para regular el nivel del tanque de salida. Para esto se calcularon y sintonizaron los valores para las constantes del controlador utilizando el primer método de Ziegler & Nichols. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5, las Figuras 19-20 y la sección 4.3, verificando la acción de control y la atenuación del efecto de una perturbación aplicada al sistema mediante la variación del parámetro R_1 . A pesar de ello, la respuesta experimental obtenida difiere de la predicha por la teoría principalmente por la aparición de oscilaciones, lo cual puede deberse a los errores de aproximación generados por el modelo lineal propuesto para el sistema.
- Finalmente se implementó una sintonización automática de los parámetros para el controlador UDC1200, demostrando un mejoramiento en la respuesta del sistema controlado tal y como se describe en la sección 4.4.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En desarrollo del presente proyecto de grado se generaron las inquietudes resumidas a continuación:

- El sistema real no es un sistema lineal y por tal motivo las variaciones de referencia deben hacerse alrededor del punto de operación. Asimismo, este valor de referencia no debe superar los 40 [cm] de altura debido a restricciones prácticas.
- Tomando en cuenta la ubicación de la tubería de acople de los dos tanques y la tubería de desagüe, el mínimo nivel de líquido de cada uno de los tanques puede variar entre 1 y 4 [cm]. Para el caso del tanque de salida es posible disminuir este nivel mínimo desconectando la manguera del sensor de presión.
- La potencia de salida del controlador se ajustó al 40%, debido a que es mayor la cantidad de flujo de líquido suministrado al tanque de entrada que el evacuado por la tubería de acople hacia el tanque de salida, ocasionando que el tanque de entrada se rebase hasta su tope.
- El valor de perturbación seleccionado para R_1 fue la máxima apertura de la válvula, debido a que para otro valor de resistencia el efecto de la perturbación no era discriminante, ya que el sistema en estado estable presenta oscilaciones.

Así mismo, como trabajos futuros complementarios a este trabajo de grado se plantean:

- La implementación de un sistema de recirculación de líquido con el fin de aprovechar mejor el recurso hídrico del proceso.

- La elección o diseño de un sistema de sensado cuyos rangos de operación estén más cercanos al valor real del sistema.
- La implementación de una acción de control y modelado del sistema en donde se contemple la interacción de nivel de líquido entre los dos tanques.

REFERENCIAS

- [1]. NOVOA DIAZ Daniel Fernando, PRADA MEJIA Jorge Andrés. Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T. Bucaramanga, 2001, 112 HOJAS. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica.
- [2]. RAMIRES VEGA Diego Hernán, TORRES SANCHEZ Edgar Ernesto. Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación de electrónica de la E3T. Bucaramanga 2007. 128 hojas. Trabajo de grado (Ingeniero electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.
- [3]. E Fabregas, G Farias, S Dormido-Canto, S Dormido, F Esquembre. Developing a remote laboratory for engineering education. En Computers & Education, Volume 57, Issue 2, pp 1686-1697 (2011) Editorial Info: ISSN 0360-1315, Elsevier.
- [4]. LEYES FRANCO Jennifer Beatriz, NAVARRETE DÍAZ Darío Rafael. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de labview. Guayaquil-Ecuador, 2007. Trabajo de grado (Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica y Automatización Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de ingeniería en electricidad y computación.

[5]. BENITES MEJIA Diego Santiago. Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos. Quito, 1994. Escuela Politécnica Nacional. Facultad Escuela de ingeniería.

[6]. ARANGO RESTREPO Sandra Milena. Desarrollo el sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. Medellín, 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería electrónica.

[7]. GIRALDO BETANCUR Indira Marcela. Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos. Manizales, 2004. Trabajo de grado (maestría). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería y arquitectura posgrado en automatización industrial.

[8]. MANTILLA ESPINOSA Luis Carlos. Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y elaboración de estrategias. Bucaramanga, 2005. Recurso electrónico. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

[9]. SUAREZ MORENO Consuelo Inés, RODRIGUEZ PEREZ Carlos Arturo. Diseño de un control automático de nivel del condensador de la unidad uno en la central termoeléctrica de Paipa. Bucaramanga, 2003,147 Hojas. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

[10]. ACOSTA GALVIS Mauricio, GOMEZ MALAGON Luis Arturo. Control de nivel de la caldera piro tubular del laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga,

1998,100 H. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

[11]. NEITA DUARTE Lidia Yaneth, PRADA MEDINA Ricardo Iván. 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. Bucaramanga, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

[12]. Honeywell Inc. "1/8 and 1/16 DIN Controller and Indicator: Product Manual". Technical Report. Marzo 2005. 136 páginas.

[13] OGATA katsuhiko, dinámica de sistemas. México: Prentice-hall hispanoamericana. s.a. Primera edición, 1987.

[14] NUÑEZ ENRIQUE Fernando; Control de movimiento empleando Labview, un enfoque didáctico; Puebla, México 2007; Trabajo de grado (Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Computadoras). Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica.

[15] ACEDO SANCHEZ José; Instrumentación y control avanzado de procesos; España: Ediciones Díaz de Santos S.A; 2006.

BIBLIOGRAFÍA

ACEDO SANCHEZ José; Instrumentación y control avanzado de procesos; España: Ediciones Díaz de Santos S.A; 2006.

ACOSTA GALVIS Mauricio, GOMEZ MALAGON Luis Arturo. Control de nivel de la caldera piro tubular del laboratorio de plantas térmicas. Bucaramanga, 1998,100 H. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

ARANGO RESTREPO Sandra Milena. Desarrollo el sistema de control de nivel para un tanque surtidor de agua y almacenador de energía térmica en procesos de lavado y tintorería. Medellín, 2004. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de ingenierías. Facultad de ingeniería electrónica.

BENITES MEJIA Diego Santiago. Diseño y construcción de un sistema de control de nivel de líquidos. Quito, 1994. Escuela Politécnica Nacional. Facultad Escuela de ingeniería.

E Fabregas, G Farias, S Dormido-Canto, S Dormido, F Esquembre. Developing a remote laboratory for engineering education. En Computers & Education, Volume 57, Issue 2, pp 1686-1697 (2011) Editorial Info: ISSN 0360-1315, Elsevier.

GIRALDO BETANCUR Indira Marcela. Diseño y montaje de un control para una envasadora de lácteos. Manizales, 2004. Trabajo de grado (maestría). Universidad

Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería y arquitectura posgrado en automatización industrial.

Honeywell Inc. "1/8 and 1/16 DIN Controller and Indicator: Product Manual". Technical Report. Marzo 2005. 136 páginas.

LEYES FRANCO Jennifer Beatriz, NAVARRETE DÍAZ Darío Rafael. Diseño y construcción de un módulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma de labview. Guayaquil-Ecuador, 2007. Trabajo de grado (Ingeniero en Electricidad Especialización Electrónica y Automatización Industrial). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de ingeniería en electricidad y computación.

MANTILLA ESPINOSA Luis Carlos. Control de nivel para un sistema de tres tanques, diseño y elaboración de estrategias. Bucaramanga, 2005. Recurso electrónico. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

NEITA DUARTE Lidia Yaneth, PRADA MEDINA Ricardo Iván. 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. Bucaramanga, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

NOVOA DIAZ Daniel Fernando, PRADA MEJIA Jorge Andrés. Planeación, diseño y realización del laboratorio de instrumentación electrónica para la E3T. Bucaramanga, 2001, 112 HOJAS. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). UIS

facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica.

NUÑEZ ENRIQUE Fernando; Control de movimiento empleando Labview, un enfoque didáctico; Puebla, México 2007; Trabajo de grado (Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Computadoras). Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Computación, Electrónica y Mecatrónica.

OGATA katsuhiko, dinámica de sistemas. México: Prentice-hall hispanoamericana. s.a. Primera edición, 1987.

RAMIRES VEGA Diego Hernán, TORRES SANCHEZ Edgar Ernesto. Sistema de gestión para un prototipo de sistema SCADA en el laboratorio de instrumentación de electrónica de la E3T. Bucaramanga 2007. 128 hojas. Trabajo de grado (Ingeniero electrónico). UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.

SUAREZ MORENO Consuelo Inés, RODRIGUEZ PEREZ Carlos Arturo. Diseño de un control automático de nivel del condensador de la unidad uno en la central termoeléctrica de Paipa. Bucaramanga, 2003,147 Hojas. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico) UIS facultad de ingenierías físico-mecánica. Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica. Disponible en base de datos biblioteca UIS trabajos de grado.