



Estudio de alternativas para la realización de control remoto en el laboratorio de instrumentación y control de la Universidad de Antioquia, desde un servidor web.

Mateo Ospina Cardona

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Asesor

Milton Jhovany Mejía Ospina

Silvia Mercedes Ochoa Cáceres

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Ospina Cardona, 2022)
Referencia	Ospina Cardona, M (2022). <i>Estudio de alternativas para la realización de control remoto en el laboratorio de instrumentación y control, desde un servidor web</i> . [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María Gonzáles Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
2 Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 Marco teórico	12
3.1 Sistema de Control	12
3.2 Estrategia de Control en el nivel de tanques	12
3.2.1 Objetivos de control	12
3.2.2 Variables controladas	13
3.2.3 Elemento final de control	13
3.3 Control por retroalimentación	13
3.3.1 Control proporcional (P)	13
3.3.2 Control proporcional-integral (PI).....	14
3.3.3 Control proporcional-integral-derivativo (PID).....	14
3.4 Control en cascada	14
3.5 Función de transferencia	15
3.6 Sintonización de Controladores	15
3.6.1 Cohen Coon.....	15
3.6.2 Ciancone.....	16
3.6.3 Ziegler-Nichols lazo cerrado	17
3.7 Programación para servidores web local.....	17
3.8 Comunicaciones seriales	18

4 Metodología	19
5 Desarrollo	21
5.1. Equipo y requerimientos	21
5.2. Controladores	22
5.3. Diagrama P&ID.....	23
5.4. Interfaz	23
5.5. Sintonización de controladores	29
6 Resultados y Análisis	30
6.1. Sintonía de controladores	30
6.2. Operación y evaluación	30
6.3. Servidor web y conexión remota.....	33
7 Conclusiones	35
8 Recomendaciones	36
Referencias	37

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Parámetros de controlador para modelo Cohen Coon</i>	15
Tabla 2. <i>Parámetros de controlador para modelo Ziegler-Nichols lazo cerrado</i>	17
Tabla 3. <i>Parámetros de controlador PID</i>	31

Lista de figuras

Figura 1. <i>Correlaciones de Ciancone para control por seguimiento.</i>	16
Figura 3. <i>Diagrama P&ID de módulo de nivel</i>	23
Figura 4. <i>Página de inicio del sistema de control.</i>	24
Figura 5. <i>Página de principal del sistema de control.</i>	24
Figura 6. <i>Página de conexión establecida del sistema de control.</i>	25
Figura 7. <i>Página de conexión no establecida del sistema de control.</i>	26
Figura 8. <i>Página de monitor del sistema de control.</i>	26
Figura 9. <i>Página de niveles de configuración del sistema de control.</i>	27
Figura 10. <i>Página de grafica del sistema de control.</i>	28
Figura 11. <i>Página de proceso del sistema de control.</i>	28
Figura 12. <i>Menú desplegable de opciones del sistema de control.</i>	29
Figura 13. <i>Curva de reacción de nivel y porcentaje de apertura en el tiempo</i>	30
Figura 14. <i>Controlador operado con parámetros PID por método Ciancone (PV, SP, Apertura)</i>	31
Figura 15. <i>Controlador operado con parámetros PID por método Ciancone (PV, SP)</i>	32
Figura 16. <i>Controlador operado con parámetros PID por método Ziegler-Nichols (PV, SP, Apertura)</i>	32
Figura 16. <i>Controlador operado con parámetros PID por método Ziegler-Nichols (PV, SP)</i>	33
Figura 17. <i>Almacenamiento del servidor local</i>	34

Siglas, acrónimos y abreviaturas

EFC	Elemento Final de Control
SP	Set Point
PV	Process Value
P	Proporcional
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo

Resumen

El control de procesos es una especialidad en la que actualmente se están viendo implicados diferentes perfiles profesionales, esto debido al desarrollo tecnológico que se está llevando a cabo; donde se requieren procesos más eficientes a menores costos, pero con óptimos sistemas de seguridad tanto para las personas como los equipos e instrumentos. Con un mundo cada vez más interconectado, es notorio que, desde hace ya algunos años, el control de procesos ha empezado a hacer uso de tecnologías que permiten su implementación de forma remota.

En el presente trabajo se estableció una ruta de actualización e implementación de control remoto a uno de los módulos del laboratorio de control de procesos de la Universidad de Antioquia, esto con el fin de poder generar un espacio de aprendizaje mediante la virtualidad, y así mismo una posibilidad de hacer un uso más eficiente de los diferentes espacios de la Universidad.

En este caso se estableció una comunicación RS-485 con los controladores y el servidor local, para la adquisición y almacenamiento de datos, donde posteriormente se realizó una prueba del módulo en manual para obtener datos experimentales y determinar los parámetros de un modelo del proceso para posteriormente realizar la sintonía de los controladores PID.

Los resultados indicaron que el almacenamiento de datos y la comunicación para posteriormente visualizar las variables de proceso fueron adecuadas, y que el trabajo en el servidor local fue estable. Adicionalmente, los parámetros PID encontrados por el método Ziegler-Nichols en lazo cerrado mostraron un mejor desempeño, aun teniendo una respuesta rápida igual que el método de Ciancone.

Palabras clave: Control remoto, PID, control de nivel

Abstract

Process control is a specialty in which different professional profiles are currently being involved, due to the technological development that is taking place; where more efficient processes are required at lower costs, but fulfilling optimal safety constraints, in order to protect the people, process equipment and instruments. For this reason, a fundamental role of control is to be able to group and define the objectives of the process in order to optimize and control a specific process. With an increasingly interconnected world, it is notorious that, for some years now, process control has begun to make use of technologies that allow its implementation remotely.

In this work a route for updating and implementing the remote control of one of the modules of the process control laboratory at University of Antioquia was established, this in order to generate a virtual learning space.

In this case a RS-485 communication was established with the controllers and the local server for data acquisition and storage, where later a manual test of the module was performed to obtain experimental data and determine appropriate PID-controller parameters.

Results indicated that the data storage and communication for later visualization of the process variables were adequate, and that the work on the local server was stable. Furthermore, the PID parameters by the Ziegler-Nichols closed-loop method had a better performance, than the Ciancone method, even though both have shown the same fast response. Likewise.

Keywords: Remote control, PID, level control.

Introducción

El avance tecnológico que se tiene actualmente hace que cada proceso este en constante actualización, es por esto por lo que muchos procesos industriales están tomando partida en la automatización de su cadena productiva, con el fin de tener control sobre estos y mejorar su proceso productivo.

La necesidad de seguir avanzando ha hecho que el control automático de los procesos sea una parte fundamental del crecimiento de las industrias en la actualidad, donde han evolucionado tanto los equipos como las técnicas de control a tal punto que se está experimentando una nueva revolución industrial llamada industria 4.0 donde combinan las técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes. El control de procesos de manera remota es una de estas tecnologías que está siendo implementada cada vez con más frecuencia en diferentes tipos de industrias (Sigov, Ratkin, Invanov, & Xu, 2022).

En este orden de ideas, se plantea una actualización al sistema de control que se tiene en el módulo de nivel ubicado en el laboratorio de instrumentación y control de procesos de la facultad de ingeniería, desarrollando e implementando un software web que permita visualizar, almacenar, procesar datos y generar reportes in situ para el usuario. Con esta actualización, se podrán realizar prácticas remotas, de forma segura, tanto para los usuarios, como para los equipos que integran el módulo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Seleccionar la mejor alternativa para la implementación de control desde un servidor web, para el desarrollo de prácticas de control remoto del laboratorio de instrumentación y control.

2.2 Objetivos específicos

- Implementar y comparar diferentes alternativas para la realización de prácticas de control, desde un servidor web.
- Realizar el diagrama P&ID del sistema.
- Implementar los lazos de control requeridos para operar, garantizando la seguridad de los usuarios, del laboratorio y de los equipos.
- Realizar la programación requerida para el funcionamiento del sistema de control operado desde la web, con conexión estable para los usuarios.

3 Marco teórico

3.1 Sistema de Control

Un sistema de control es el conjunto de elementos interconectados entre sí para lograr la manipulación de ciertas variables con el fin de satisfacer una necesidad específica; teniendo en cuenta requerimientos económicos, ambientales y de seguridad.

Así mismo el sistema de control está compuesto por cuatro componentes básicos que permiten mantener controladas las variables del proceso, y cada uno de estos desempeña una función en el sistema (Smith & Corripio, 1997).

- **Sensor:** También llamado el elemento primario es el encargado de producir una señal (usualmente eléctrica) que refleja el valor de una propiedad mediante una alguna correlación definida por el elemento.
- **Transmisor:** Se conoce como elemento secundario el cual se encarga de transmitir la señal producida por el sensor.
- **Controlador:** Es el cerebro del sistema de control, es quien toma las decisiones de qué hacer en la estrategia de control.
- **Elemento final de control (EFC):** Es quien ejecuta cierta acción de control de acuerdo con la decisión del controlador.

3.2 Estrategia de Control para el nivel de tanques

3.2.1 Objetivos de control

Tanto en la industria como en cualquier ámbito es indispensable poder definir cuál es el fin de lo que se requiere; es así que como controlar el nivel en tanques es posible hacerlo desde diferentes enfoques, teniendo en cuenta la particularidad de las posibles variables que puedan existir en el proceso. No obstante, los principales enfoques que se utilizan en actualmente por su facilidad en implementación, tanto por seguridad y protección en el módulo de nivel, teniendo en cuenta que el objetivo es mantener constante el nivel en el valor deseado son:

- Medición directa del nivel
- Medición del caudal entrante

3.2.2 Variables controladas

En cuanto a las variables controladas en el proceso de nivel de tanques, se tiene que principalmente es el nivel, el cual se puede hacer de forma directa (usando instrumentos de medida de la altura de líquido en el tanque) o de forma indirecta (usando instrumentos de medida de la cantidad de líquido que entra en el tanque). Así mismo es posible hacer uso de una de estas variables o de las dos a la vez donde se puede tener un lazo simple o un control en cascada.

3.2.3 Variable manipulada

Es la variable manipulada por medio del EFC, de acuerdo a la señal que éste recibe del controlador. En dicho caso, se manipula la apertura de una válvula de control para regular el nivel del tanque o el flujo entrante al mismo.

3.3 Control por retroalimentación

En este tipo de control se mide la variable controlada, la cual se envía al controlador y este compara el valor con el SP, donde el controlador genera un valor de salida que modifica el EFC.

3.3.1 Control proporcional (P)

Para este control se establece un ajuste a la variable manipulada, el cual es proporcional a la señal de error, porque a medida que aumenta el error este debería aumentar el ajuste de la variable manipulada. La representación de un control proporcional esta dado por la ecuación 3.1.

$$u(t) = u_{EE}(t) + K_C e(t) \quad (3.1)$$

$$e(t) = y_{SP}(t) - y(t) \quad (3.2)$$

Donde,

$u(t)$: Salida del controlador

$u_{EE}(t)$: Salida del controlador en estado estacionario, cuando $e(t) = 0$

K_C : Ganancia del controlador

$e(t)$: Error o diferencia entre set point y valor actual de la variable controlada

$y_{SP}(t)$: Set point de la variable controlada

$y(t)$: Valor actual de la variable controlada

3.3.2 Control proporcional-integral (PI)

Dado que el modo de proporcional no elimina por completo los efectos de las perturbaciones, es necesario ajustar la variable manipulada hasta evitar el off-set, por lo que se incluye la acción integral; dicha representación del control proporcional-integral se presenta en la ecuación 3.3.

$$u(t) = u_{EE}(t) + K_C e(t) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

Donde,

τ_I : Tiempo integral

3.3.3 Control proporcional-integral-derivativo (PID)

La acción derivativa tiene como finalidad aplicar un cambio sustancial a la variable manipulada reducir las oscilaciones y el sobrepaso. Es así como la representación del control proporcional-integral-derivativo se presenta bajo la ecuación 3.4.

$$u(t) = u_{EE}(t) + K_C e(t) + \frac{K_C}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt + K_C \tau_D \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.4)$$

Donde,

τ_D : Tiempo derivativo

3.4 Control en cascada

Es una estrategia de control compuesta por dos o más lazos de control por retroalimentación, la cual mejora significativamente el desempeño del lazo de control. Cuando establecemos dos lazos de control, en este caso la salida de uno de los controladores se convierte en el set point del segundo controlador y donde este regula el EFC.

3.5 Función de transferencia

La función de transferencia define completamente las características de estado estacionario y dinámico, es decir, la respuesta total de un sistema que se describe mediante una ecuación diferencial lineal. Ésta es característica del sistema, y sus términos determinan si el sistema es estable o inestable y si su respuesta a una entrada no oscilatoria es oscilatoria o no.

Así mismo, la función de transferencia relaciona las transformadas de las variables de entrada con las de salida, a partir de algún estado inicial estacionario, donde cabe resaltar que dicha representación dinámica del sistema está en el dominio Laplace. De esta manera, se puede representar el algoritmo PID del dominio tiempo en el dominio de Laplace mediante su función de transferencia del controlador.

$$G_C(s) = K_C \left[1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right] \quad (3.5)$$

Donde,

$G_C(s)$: Función de transferencia para un controlador PID

3.6 Sintonización de Controladores

En la sintonización de controladores hay gran número de métodos por el cual se puede lograr realizar esta tarea, estos se pueden obtener de manera experimental, mediante prueba y error; como también mediante modelos aproximados que consideran el proceso como una función de primer orden. Algunos de los métodos de sintonía disponibles son: Ziegler-Nichols lazo cerrado, Ciancone y Cohen Coon.

3.6.1 Cohen Coon

Este método se estableció basándose en diferentes criterios de optimización donde se propuso las diferentes relaciones para cada uno de los controles establecidos, ya fuese P, PI o PID, estas se muestran a continuación.

Tabla 1. *Parámetros de sintonía por Cohen Coon (Marlin, 2015).*

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$\left(\frac{1}{K'_P}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)\left(1 + \frac{t_d}{3\tau}\right)$	----	----
PI	$\left(\frac{1}{K'_P}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)\left(0,9 + \frac{t_d}{12\tau}\right)$	$\frac{t_d\left(30 + \frac{3t_d}{\tau}\right)}{9 + 20\left(\frac{t_d}{\tau}\right)}$	----
PID	$\left(\frac{1}{K'_P}\right)\left(\frac{\tau}{t_d}\right)\left(\frac{16 + 3\frac{t_d}{\tau}}{12}\right)$	$\frac{t_d\left(32 + \frac{6t_d}{\tau}\right)}{13 + 8\left(\frac{t_d}{\tau}\right)}$	$\frac{4t_d}{11 + 2\left(\frac{t_d}{\tau}\right)}$

3.6.2 Ciancone

Las correlaciones de Ciancone son utilizadas para cambios en el set point o cambio en la perturbación, esto teniendo en cuenta que tiene ciertos criterios como la restricción en la variación de la variable manipulada, aplicando un modelo de primer orden. Así mismo los errores de un 25% en los parámetros del modelo establecido.

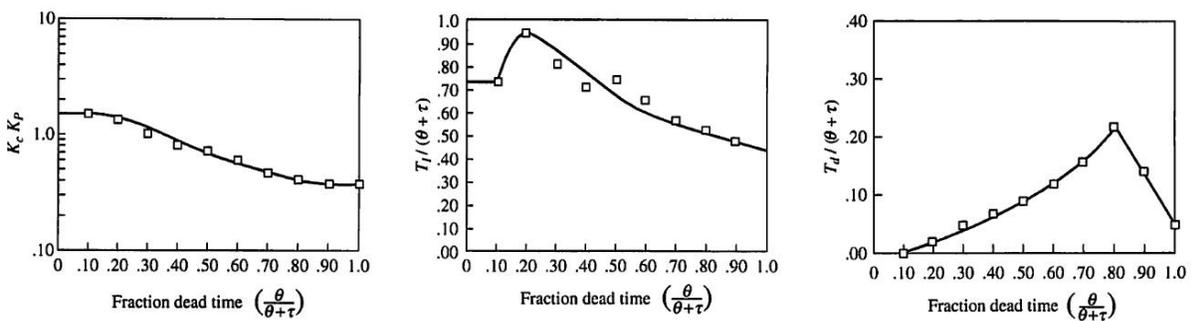


Figura 1. Correlaciones de Ciancone para control por seguimiento (Marlin, 2015)

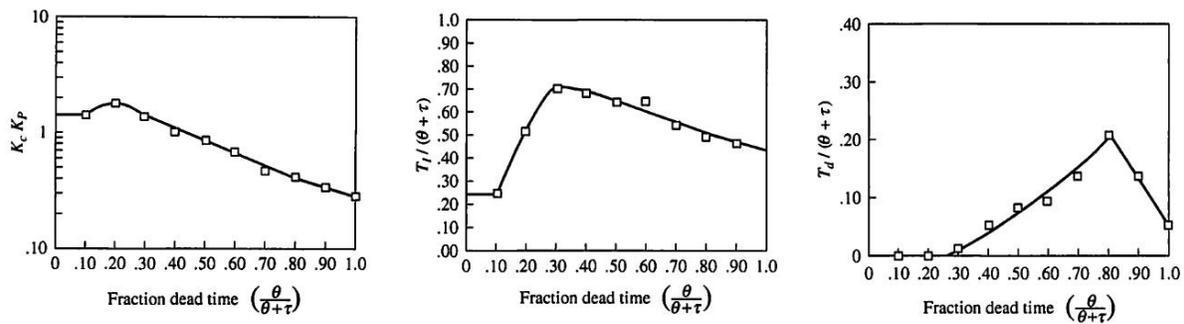


Figura 2. Correlaciones de Ciancone para control por regulación (Marlin, 2015)

3.6.3 Ziegler-Nichols de lazo cerrado

Este método requiere obtener la ganancia última y el periodo último para poder hacer uso de las correlaciones (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de Sintonía por Ziegler-Nichols lazo cerrado

Controlador	K_C	T_I	T_D
P	$\frac{K_U}{2}$	----	----
PI	$\frac{K_U}{2,2}$	$\frac{P_U}{1,2}$	----
PID	$\frac{K_U}{1,7}$	$\frac{P_U}{2}$	$\frac{P_U}{8}$

3.7 Programación para servidores web local

Un servidor web local es aquel servidor instalado en un equipo determinado con el fin de trabajar offline y online, este se trata de un entorno controlado donde al ser local no se correrá ningún riesgo a la hora de poder realizar cualquier tipo de trabajo (Vincent, 2022). Los servidores locales tienen características que hacen que este tenga grandes prestaciones:

- **Remoto:** si se configura correctamente, el servidor en local permite el acceso al mismo en remoto de forma segura, sin ningún tipo de vulnerabilidad.
- **Ampliable:** Permite que su capacidad se pueda ampliar o modificar dependiendo del equipo utilizado.

- **Actualización:** se puede actualizar de forma periódica para mejorar su rendimiento.

3.8 Comunicaciones seriales

La comunicación de diferentes equipos se puede establecer como la lengua que hablan, es decir, cada uno de estos interactúa con los demás de acuerdo a como el otro lo entienda. Todo esto se basa en el intercambio de datos, el comunicar un equipo o instrumento con otro es simplemente el envío de datos por parte de los dos. Cuando hablamos de comunicaciones seriales hacemos referencia a un protocolo de comunicación (intercambio de información) entre dispositivos.

Las comunicaciones seriales más conocidas y usadas son RS-232, RS-485 y RS-422; estas comunicaciones lo que establecen son diferentes parámetros para poder establecer conexión y realizar el intercambio de datos; por lo general los parámetros establecidos para estas conexiones son:

- **Puerto:** La entrada física del equipo con el que se desea comunicar
- **Velocidad de transmisión (baud rate):** Es la velocidad con la que se transfieren datos de un equipo al otro.
- **Bits de datos:** Se refiere a la cantidad de bits en la transmisión o el envío de datos
- **Bit de parada:** Se usa para indicar el fin de la comunicación, sino que también el margen de tolerancia.
- **Paridad:** Es la selección del bit para verificar si hay errores en la transmisión serial.

4 Metodología

El desarrollo para la implementación del software de control remoto se realiza basado en la metodología cascada modificada por el Dr. Winston W. Royce, el cual implementa una serie de pasos secuenciales donde se establece un proceso iterativo para poder llegar a un software final (Royce, 1970). A partir de lo planteado anteriormente, y en función de conseguir los objetivos planteados anteriormente, se muestran a continuación los pasos a seguir de manera general que se llevarán a cabo, los cuales se describen claramente.

1. Requerimientos

Se requiere evaluar los diferentes instrumentos y equipos presentes en el proceso con el fin de adecuarlos para la realización de un posterior control, determinar las variables a medir, variables a controlar, variables a monitorear, rangos de operación, función de los dispositivos, entradas y salidas; caracterizando aquellos que tengan como función ser un elemento final de control. Así mismo, se requiere determinar los diferentes protocolos de comunicación para establecer una ruta de transferencia de datos (Morales, 2011).

2. Evaluación del proceso

Se estudiará el proceso instalado y sus posibles variantes, para de esta manera poder establecer los lazos de control adecuados para el modelamiento y control de proceso. No obstante, se requiere implementar el diagrama P&ID para identificar las variables medidas y los elementos finales de control.

3. Diseño de software

Crear un modelo relacional de datos, donde se integren los diferentes datos generados; así mismo, se integrarán las comunicaciones y los datos con una interfaz gráfica para el uso del sistema de control. Todo esto teniendo en cuenta la evaluación del proceso y su aplicación dentro del marco estudiantil.

4. Implementación de software

Se realizará la comprobación de las diferentes conexiones, así como el correcto funcionamiento de las variables medidas y los elementos finales de control. De igual manera, se efectuará la configuración de los parámetros requeridos para el control (Diestefano, 1999).

5 Desarrollo

5.1. Equipo y requerimientos

A continuación, se describen los instrumentos y equipos que intervienen en el módulo de control de nivel.

- **Bomba hidráulica**

Bomba hidráulica de marca Emerson para el bombeo del agua de proceso del tanque principal de almacenamiento, su conexión es trifásica y es la encargada de alimentar el proceso hacia los tanques naranjas.

Referencia: BM55A

Potencia: 1HP

Rpm: 3450

Factor S: 1.15

Máxima corriente: 3.9A

- **Válvula proporcional eléctrica**

Válvula solenoide de marca Danfoss es un actuador eléctrico para el control de procesos. Es de ½ pulgada, y es uno de los elementos finales de control del proceso.

Referencia: 018Z0291

Temperatura de operación: -40/50°C

Tensión de alimento: 24V

Tamaño del actuador: 13.5mm

- **Válvula proporcional neumática**

La válvula proporcional de marca Spiraxsarco es un actuador neumático para el control del proceso, teniendo en cuenta el funcionamiento que se requiera. Esta es de 1 pulgada y esta normalmente abierta.

Referencia: TN3420

Temperatura de operación: -15/110°C

Presión máxima: 57 psi

Carrera del actuador: 20mm

- **Placa de orificio**

Este cuenta con un medidor de presión diferencial con el cual se puede relacionar la caída de presión con el flujo que está pasando.

- **Transmisor presión diferencial tanque**

Este transmisor de presión diferencial lo que permite es tomar la presión de la columna de aire y la columna líquida conjunto la de aire del primer tanque, de esta manera se podrá obtener la presión de la columna líquida para así controlar las dos válvulas que se tienen.

Suministro de voltaje: 11-45 VDC

Presión máxima: 2300 psi

5.2. Controladores

El módulo cuenta con dos controladores Maxthermo, los cuales tienen una tarjeta de comunicaciones modbus RTU sobre un bus RS-485, entrada y salida analógica por corriente para leer la variable a controlar y manipular el E.F.C Por otra parte, la comunicación establecida mediante RS485 se establece bajo las siguientes especificaciones:

Paridad: None

Bit de paro: 1

Longitud de bits: 8

Eco del protocolo: False

Para este caso el controlador se puede utilizar de modo manual, en el cual se varía la salida del controlador que sería el porcentaje de apertura de la válvula o EFC; por otra parte, se puede usar

en modo automático el cual regula la variable a controlar mediante la salida calculada por el controlador con los parámetros PID ajustados.

5.3. Diagrama P&ID

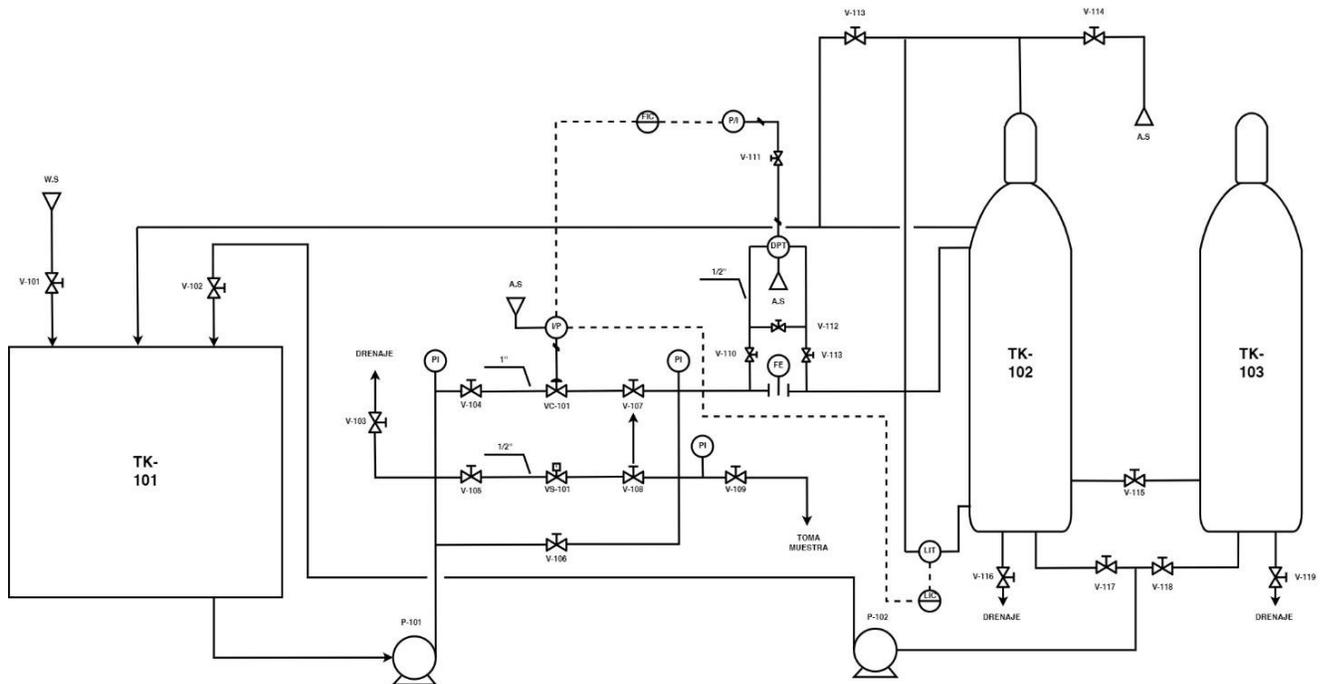


Figura 3. Diagrama P&ID de módulo de nivel

5.4. Interfaz

Para desarrollar el sistema de control remoto es necesario poder visualizar las diferentes variables del proceso, igualmente se hace necesario poder visualizar el comportamiento en tiempo real de las variables medidas y de los diferentes parámetros de cada controlador para su posterior análisis, es por ello que una interfaz donde poder interactuar es indispensable teniendo en cuenta la finalidad del control remoto. La interfaz desarrollada permite interactuar con los diferentes niveles del controlador, así mismo cambiar parámetros específicos de los controladores y poder graficar en tiempo real el comportamiento de las variables deseadas. El inicio del software de control desarrollado se muestra la figura 4, de la cual se puede acceder a la pantalla principal para establecer las conexiones con los controladores.

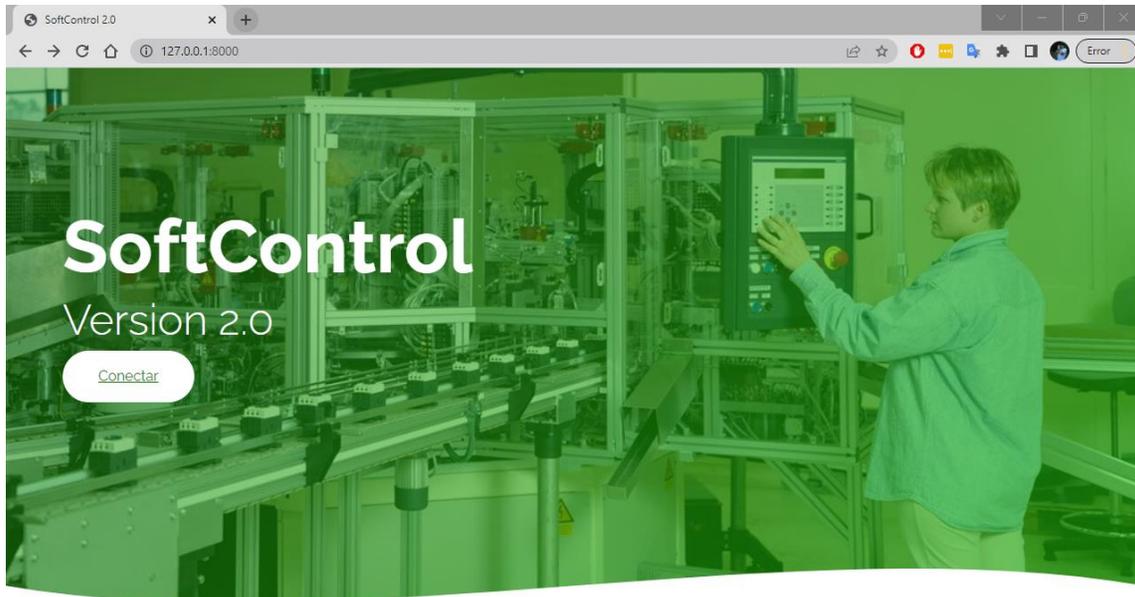


Figura 4. *Página de inicio del sistema de control.*

Al seleccionar conectar se presenta la página principal del software mostrada en la figura 5.



Figura 5. *Página de principal del sistema de control.*

En esta página es posible seleccionar el controlador al cual se desea conectar o conectar ambos, de igual manera permite seleccionar el puerto y la velocidad de transferencia de datos. Si se presiona el botón conectar el software podrá dar dos respuestas, en caso de lograr conexión mostrará que se ha conectado (figura 6) o que no ha podido establecer conexión en caso contrario (figura 7).

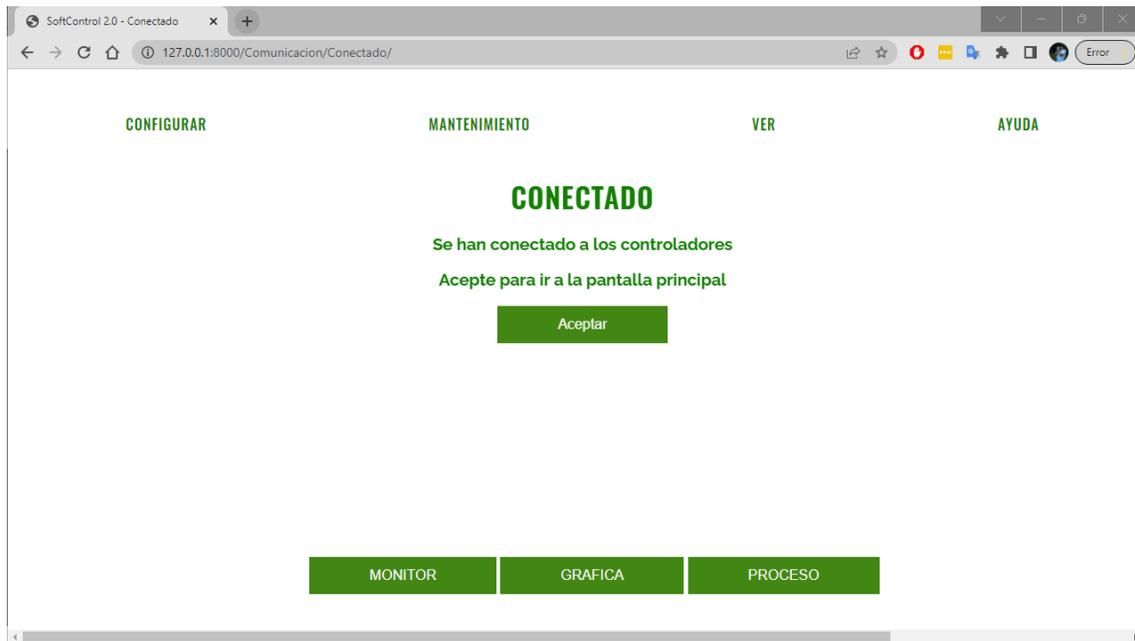


Figura 6. *Página de conexión establecida del sistema de control.*

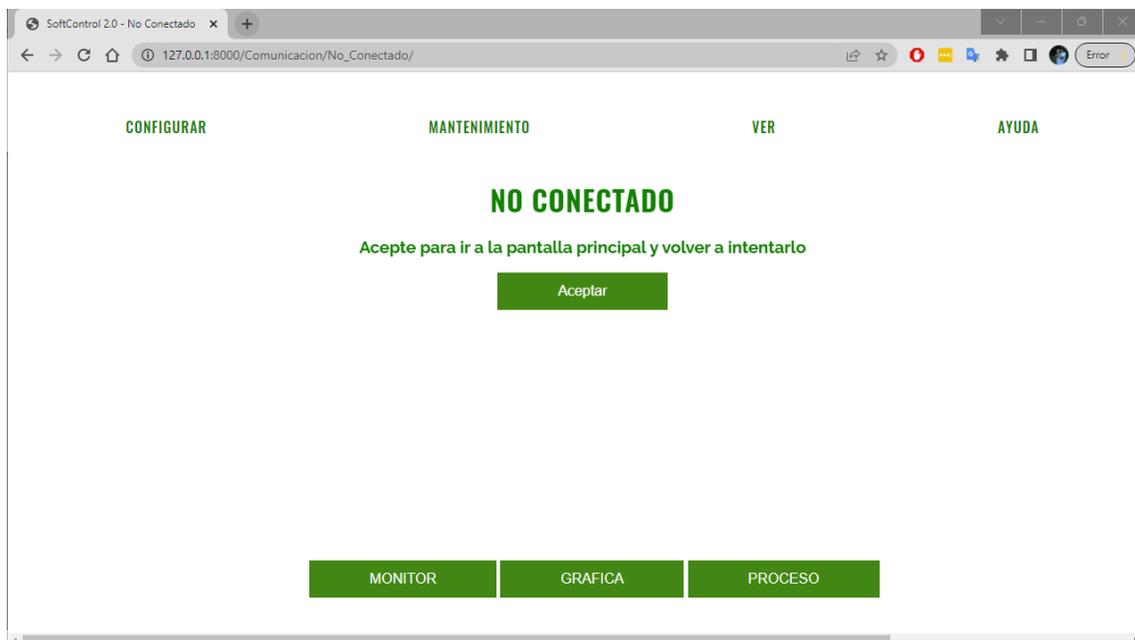


Figura 7. *Página de conexión no establecida del sistema de control.*

Al establecer conexión, este seguirá a la parte del monitor (figura 8) donde aparecen los parámetros de los controladores, y al no establecer conexión esta se redirige a la página principal para reintentar la conexión.

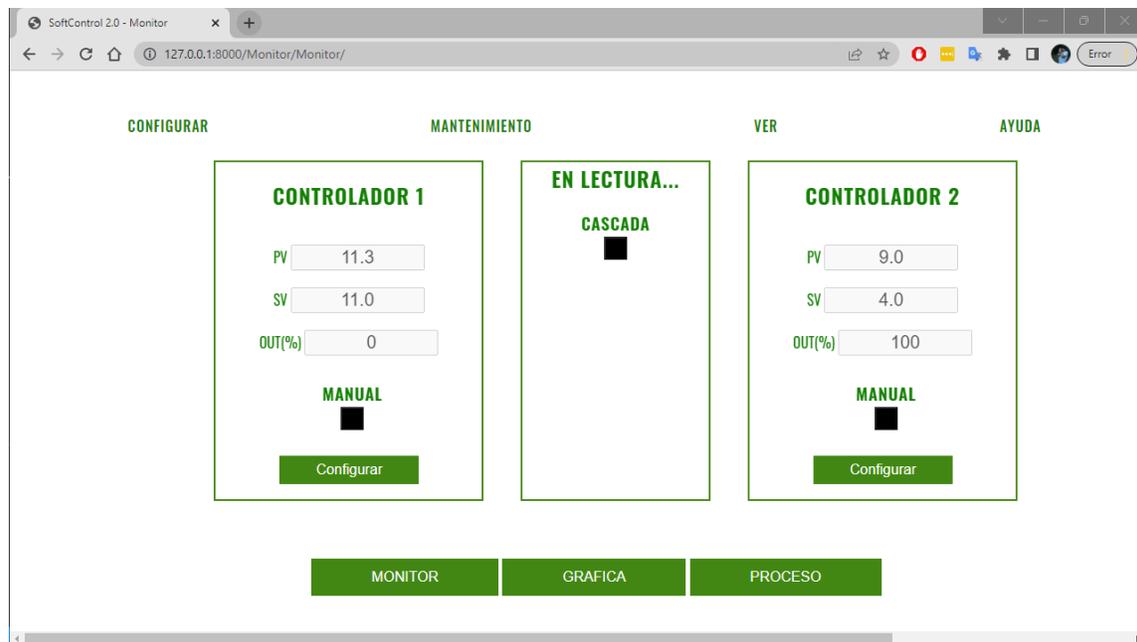


Figura 8. *Página de monitor del sistema de control.*

En esta página se puede configurar los dos controladores donde al presionar el botón configurar se pueden acceder a los diferentes niveles del controlador y modificar sus parámetros. Esto se puede observar en la figura 9.

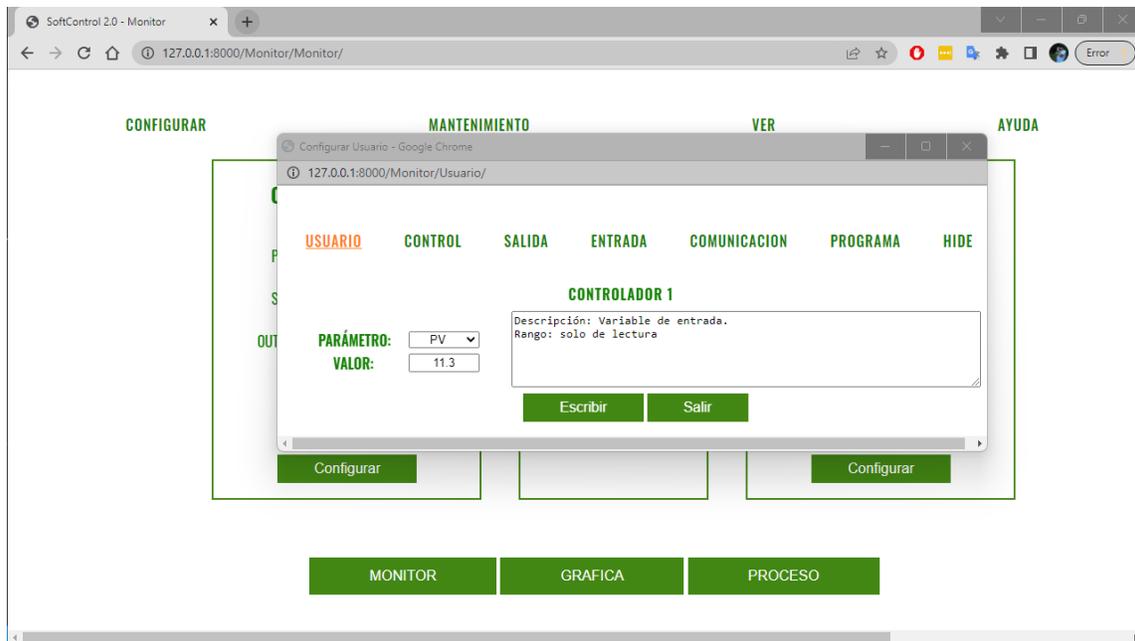


Figura 9. *Página de niveles de configuración del sistema de control.*

Por otra parte, en los botones inferiores de la página monitor se puede dirigir a la parte de la gráfica donde en tiempo real se podrán graficar los datos o borrar los datos anteriores, tal como se ve en la figura 10. En la parte de proceso se podrá ver el proceso con las variables en tiempo real, esto se observar en la figura 11.

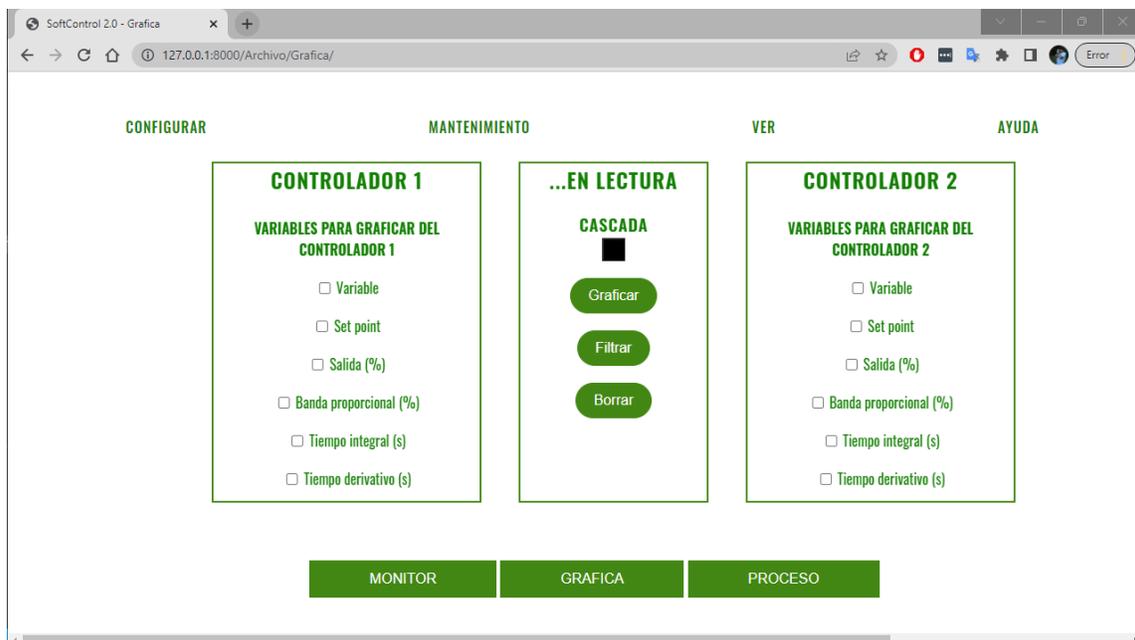
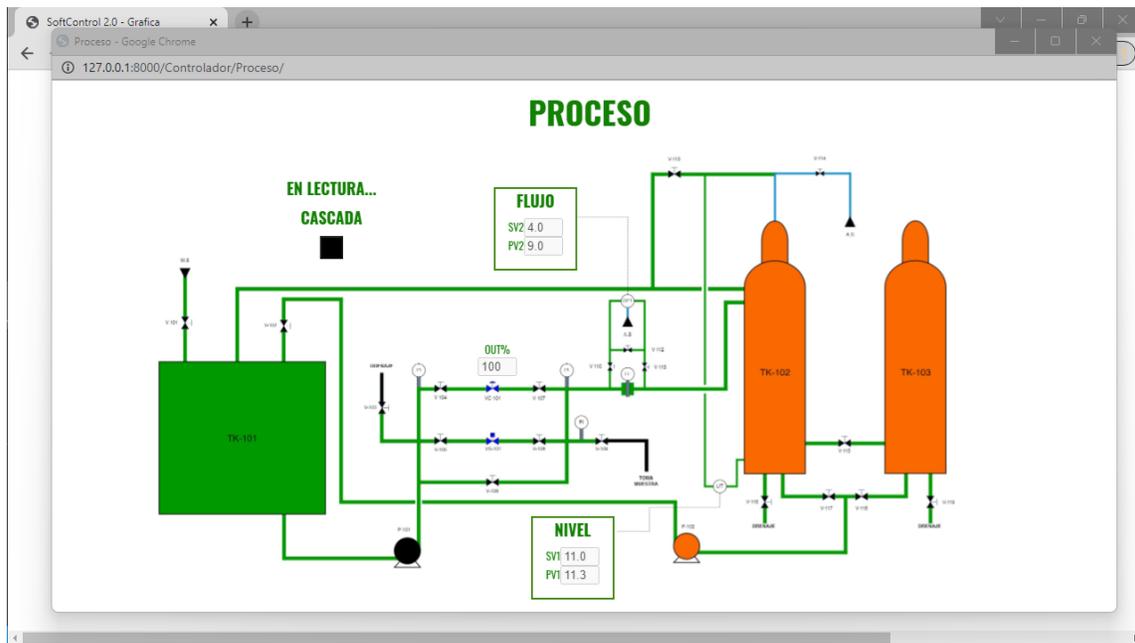


Figura 10. *Página de grafica del sistema de control.***Figura 11.** *Página de proceso del sistema de control.*

En la parte superior de la pantalla principal, se encontrarán diferentes páginas en las que se encontrara información del software y sus controladores, tanto como el manual de usuario del controlador y del mismo software. En este mismo se podrá conectar y desconectar de los controladores y elegir la variable y la estrategia de control que se desea establecer (Nivel o Flujo y lazo simple o Cascada).



Figura 12. Menú desplegable de opciones del sistema de control.

5.5. Sintonización de controladores

Para realizar la sintonía de los controladores, se sugiere colocar el controlador en modo manual y utilizar el método de la curva de reacción para determinar los parámetros de un modelo de Primer Orden Más Tiempo Muerto (POMTM), y de esta manera utilizar alguna(s) de las correlaciones de sintonía disponibles en la literatura.

Para aplicar el método de la curva de reacción, en primera instancia se procedió a realizar un escalón de la variable de salida, esperando el tiempo necesario para llegar al estado estacionario. Una vez recolectados los datos, se procedió a su análisis y se encontraron los parámetros del modelo POMTM. Finalmente, con los parámetros encontrados del proceso se determinan los valores de los parámetros de sintonía por diferentes métodos: Ciancone y Ziegler—Nichols lazo cerrado. Para este último caso, los parámetros últimos se encontraron por el método de BODE, donde mediante la función de transferencia se puede obtener la magnitud y frecuencia a -180° de fase, y de esta manera poder hallar la ganancia ultima y el periodo ultimo.

6 Resultados y Análisis

6.1. Sintonía de controladores

En la obtención de los datos experimentales se realizó la curva de reacción mostrada en la figura 13, donde se establece el escalón del porcentaje de apertura para ver la respuesta del controlador y como llega al estado estacionario.

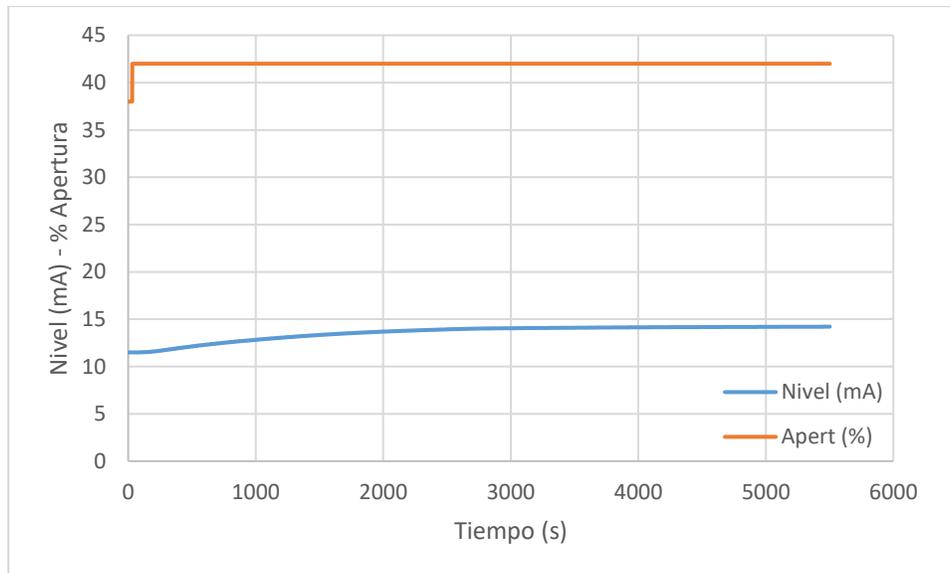


Figura 13. Curva de reacción de nivel y porcentaje de apertura en el tiempo

Se puede observar en la figura el cambio del nivel, que en este caso se mide en miliamperios (mA), para un cambio en la apertura del 4%, es pequeño del aproximadamente 2mA; esto aun en cambios de apertura superiores por lo que la ganancia del proceso es pequeña. Es relevante mencionar que la dinámica del proceso es demasiado lenta, ya que esta tarda 30 minutos en poder llegar al nuevo estado estacionario.

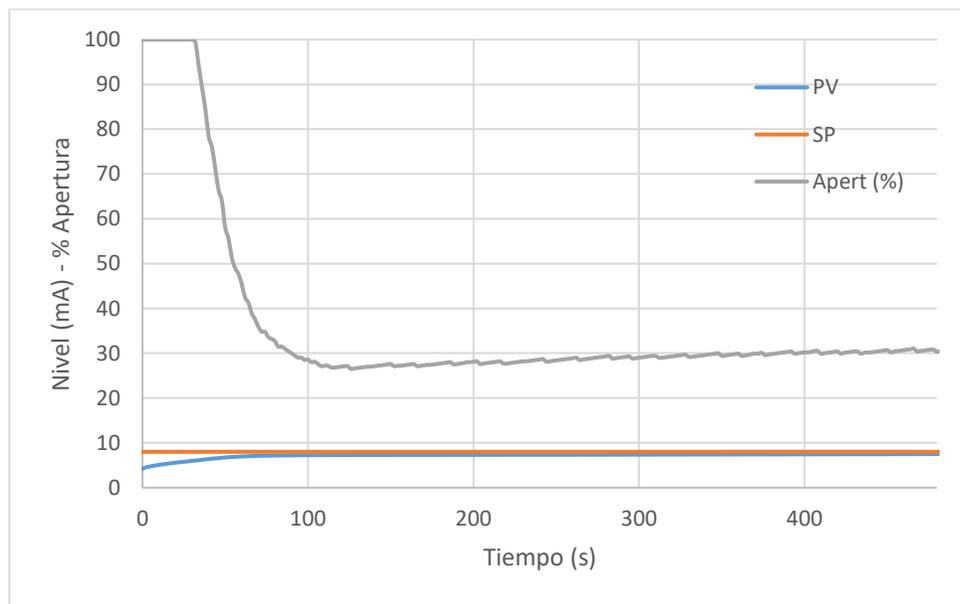
6.2. Operación y evaluación

A partir la curva de operación se hizo posible poder obtener los parámetros PID, bajo los métodos establecidos y poder evaluar su operación en tiempo real, dichos parámetros se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de controlador PID

Parámetros	Cohen-Coon			Ciancone (set point)			Ziegler-Nichols Close Loop		
	K_C	T_I (s)	T_D (s)	K_C	T_I (s)	T_D (s)	K_C	T_I (s)	T_D (s)
P	5,14	-	-	-	-	-	0,21	-	-
PI	4,58	179,09	-	0,47	1020,75	-	0,19	104,93	-
PID	6,81	142,42	21,27	0,47	979,92	0,00	0,24	62,96	15,74

En cuanto a los resultados obtenidos se tiene que para el método de Cohen-Coon la ganancia es muy alta, por lo que este quedaría descartado para el proceso de evaluación del módulo de nivel bajo estos parámetros. Por otra parte, al realizar las pruebas con los otros métodos establecidos con un control PID se pudo obtener los resultados mostrados en las figuras 14 y 15, mediante el método de Ciancone; 16 y 17 mediante el método de Ziegler-Nichols lazo cerrado.

**Figura 14. Controlador operado con parámetros PID por método Ciancone (PV, SP, Apertura)**

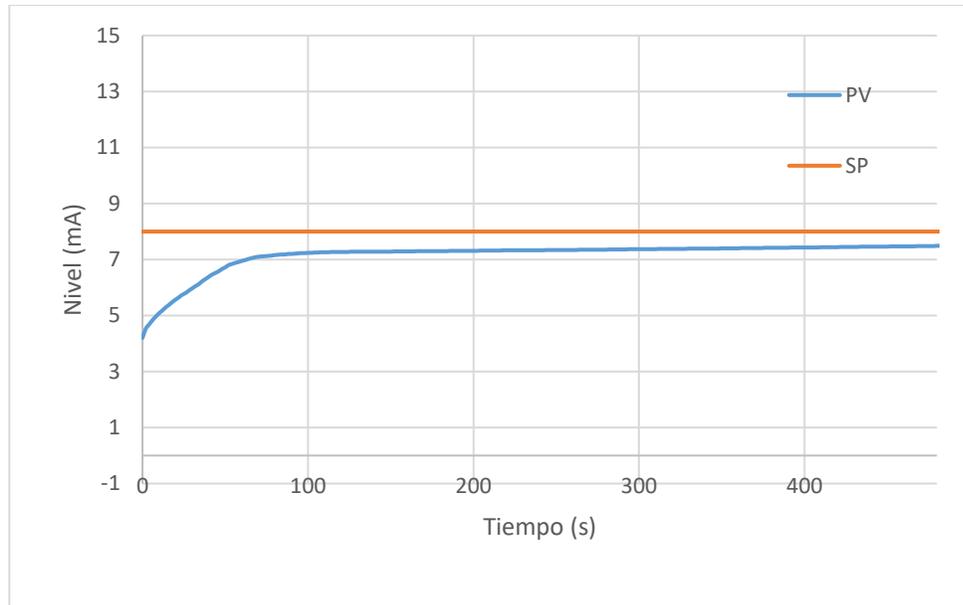


Figura 15. Controlador operado con parámetros PID por método Ciancone (PV, SP)

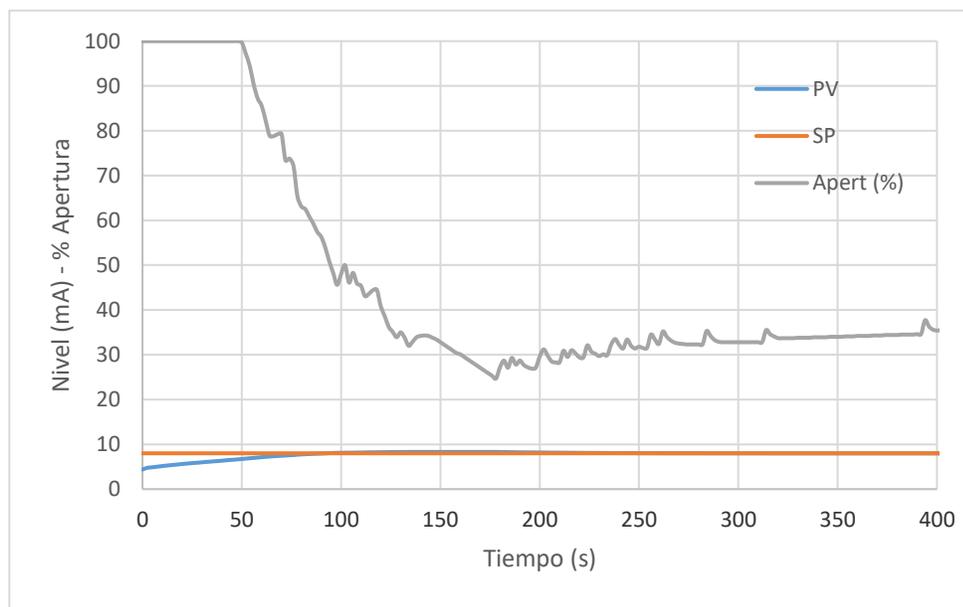


Figura 16. Controlador operado con parámetros PID por método Ziegler-Nichols (PV, SP, Apertura)

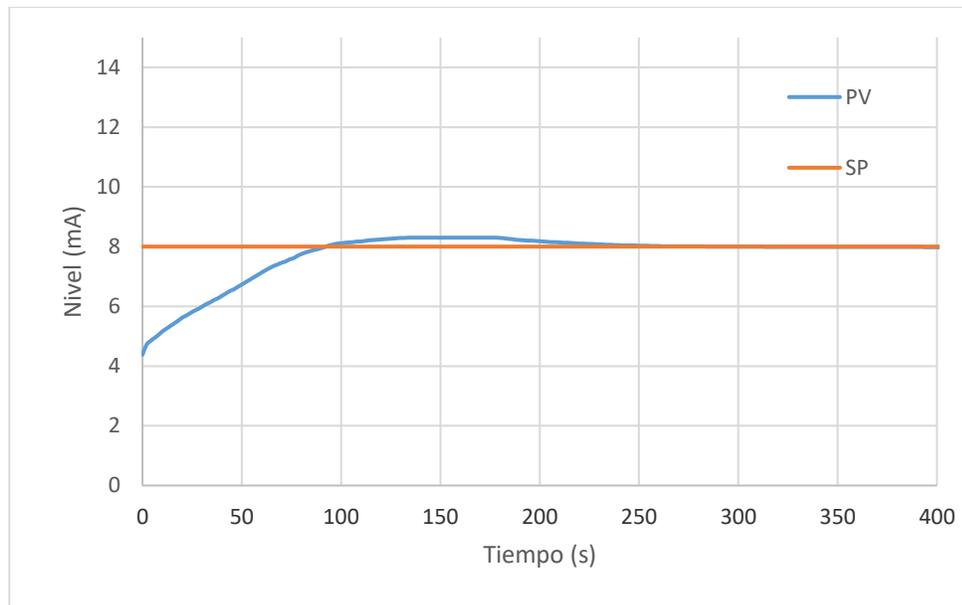


Figura 16. Controlador operado con parámetros PID por método Ziegler-Nichols (PV, SP)

Como se observa en las figuras anteriores el método Ziegler-Nichols tiene un comportamiento inicial oscilatorio, donde este es corregido por la acción derivativa del controlador hace reducir dicha oscilación, y así mismo la acción integral reduce el offset. Por otra parte, el método de Ciancone no alcanza a reducir el offset presente y la variable aunque permanece estable no esta en el valor deseado. Al evaluar los dos métodos por el criterio de desempeño de la integral del cuadrado del error se obtiene que tiene un mejor desempeño los parámetros establecidos por el método de Ziegler-Nichols.

6.3. Servidor web y conexión remota

El servidor web fue programado en local con conexión remota mediante el escritorio de Windows, donde las pruebas realizaron desde otro país con estabilidad de la red universitaria, en este caso se tiene que los datos almacenados en el control del módulo se guardan en la base local del software por lo que solo se tiene acceso a esta mediante los datos del servidor local, con las validaciones pertinentes. Así mismo se almacenan las conexiones realizadas al software que tienen como finalidad almacenar variables del proceso interno.

The screenshot displays the MySQL Workbench interface for a local instance of MySQL57. The main window shows a query executed against the 'softcontrol' database, specifically the 'django_session' table. The query is: `SELECT * FROM softcontrol.django_session;`

The Result Grid shows the following data:

session_key	session_data	expire_date
1uqa7h5wo1239qod1futabkyhu7x	.e.x9VWfUz2AM_ZVCS25w IRVDfEuaAQvQf9H...	2022-10-13 19:37:55.994669
1y198m6vypdys22on693ctefnrgaj	ey2j62xvc68fTB9J0KQOQWfHaY6wkaLjRQk...	2022-08-20 18:21:32.253709
27p16eeeyk6gh4fsh53ncag78c	.e.x9VE1v2zAM_SuFsdgCOJ33Y0B8agvYIay...	2022-10-11 10:07:46.854964
2fp0f45c9kummw3r126et2x92lb	.e.x9WMa2zAQ_JWAZ7ugCaFPAJWQsEKT...	2022-09-16 09:57:50.008214
5v4x856p1pf03ofv75fnd03r1vybk	.e.xlty9OAEQRf96m3Y0tbyl_2F6zCJ8BMDAb...	2022-09-28 11:25:07.349819
69vda8fdsovm01deh6gh9uomoz9cmfdo	.e.xltjsSwjAMBe=QqVJmZovRa7wkaWYcSxGL...	2022-09-23 20:14:37.805992
68zmo0f1mpmbnofff2qtkejh6vx7f	.e.x9VF9v2JAQ_yqVn2FKLJB3cBUIKrobWX35...	2022-10-19 14:59:49.983041
6h7c3zgyfrcs14g48ka554n8jjabwr	.e.xvNTJKOvJAQ_MVwZiyNQVFCr4wld0cZGk...	2022-08-25 21:16:45.206176

The Output panel shows the execution log:

#	Time	Action	Message	Duration / Fetch
1	21:45:57	SELECT * FROM softcontrol.registros LIMIT 0, 1000	0 row(s) returned	0.078 sec / 0.000 sec
2	21:46:05	SELECT * FROM softcontrol.auth_group LIMIT 0, 1000	0 row(s) returned	0.610 sec / 0.000 sec
3	21:46:13	SELECT * FROM softcontrol.django_session LIMIT 0, 1000	28 row(s) returned	0.016 sec / 0.000 sec

The Navigator on the left shows the database structure, including tables like 'alarmas', 'auth_group', 'auth_group_permissions', 'auth_permission', 'auth_user', 'auth_user_groups', 'auth_user_user_permissions', 'django_admin_log', 'django_content_type', 'django_migrations', 'django_session', 'Columns', 'Indexes', and 'Foreign Keys'. The Information panel shows details for the 'auth_group' table, including columns 'id' (int, AI, PK) and 'name' (varchar(150)).

Figura 17. Almacenamiento del servidor local

7 Conclusiones

En la implementación de un software de control es indispensable poder analizar principalmente las comunicaciones entre los diferentes instrumentos implicados, así mismo como una conexión establece entre el proceso y el sistema de control para que sea eficiente en su respuesta. La implementación de una interfaz y un sistema de adquisición de datos hizo que el desarrollo del trabajo fuera más fluido, donde se podía garantizar el correcto control del módulo de manera remota y así mismo la visualización en tiempo real de las variables que intervienen en el proceso.

El hecho de tener un proceso que puede ser visualizado y controlado de forma remota, abre la puerta para que los diferentes cursos que incluyen dentro de sus pensum la enseñanza de control de procesos, puedan disponer de espacios virtuales de aprendizaje; lo que permite flexibilizar y mejorar el proceso educativo.

8 Recomendaciones

Adecuar el control del módulo mediante el software con perturbaciones como lo serian la bomba de vaciado del tanque principal, debido a que requiere un módulo alternativo de comunicación serial para poder ser conectado al software principal y poder ser manipulado. Igualmente, poder realizar una actualización de los diferentes entornos de la universidad de mano de un grupo multidisciplinar para obtener mejores resultados.

Referencias

- Smith, C., & Corripio, A. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (2nd ed.).
- Diestefano, M. (1999). *Comunicación en Entornos Industriales*.
- Marlin, T. E. (2015). *Process Control, Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*.
- Morales, R. D. (2011). *Implementación de una red Modbus RTU inalámbrico en FPGA con aplicación en automatización de procesos*.
- Royce, W. W. (1970). *Managing the Development of Large Software Systems*.
- Sigov, A., Ratkin, L., Invanov, L. A., & Xu, L. Da. (2022). *Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and Beyond*.
- Smith, C., & Corripio, A. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (2nd ed.).
- Vincent, W. S. (2022). *Django for APIs: Build web APIs with Python and Django*.