



## Experiencia 1: Control de Procesos

Grupo N°1: Milena González - Mathías Lambert - Rodrigo Nazar

6 de abril de 2020

### 1. Introducción

Un sistema SCADA (**S**upervisory **C**ontrol and **D**ata **A**cquisition) es un sistema de software para computadores utilizado para la adquisición de datos, monitoreo y control de sistemas mediante una interfaz humano – máquina. La arquitectura SCADA está compuesta por computadores, redes de comunicación de datos interfaces gráficas, dispositivos periféricos (controladores lógicos programables) y controladores (regidos por variadas leyes de control).

Esta arquitectura de sistema presenta son infinitas aplicaciones en areas tan variadas como: generación y distribución de energía eléctrica, manufactura, reciclaje, transporte y muchas más. Con esto, es esperable que la mayoría de las personas haya interactuado con un sistema SCADA, como en un sistema de aire acondicionado, bombas modernas de piscinas o en riegos automáticos.

Para poder comunicar todos estos equipos y etapas en la arquitectura SCADA se desarrolló el estándar de comunicación OPC (**O**le for **P**rocess **C**ontrol). Éste ofrece una interfaz común para comunicación vía cliente - servidor. Donde el servidor OPC ofrece el sistema de suscripción para los clientes, para que estos puedan leer, enviar o escribir datos tantos a las bases de datos, los distintos procesos o dispositivos. En la Fig. 1 se puede observar como se interconectan los componentes de un sistema de comunicación OPC.

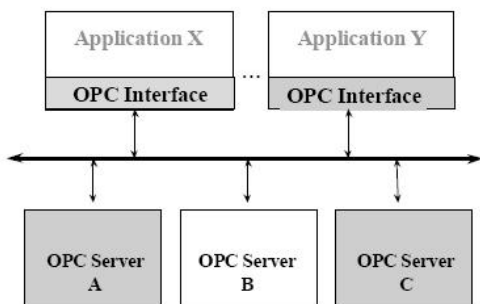


Figura 1: Diagrama de comunicación OPC

El presente informe busca documentar nuestra implementación de un sistema SCADA simple. Este se desarrolló para trabajar sobre una planta compuesta por distintas intercone-

xiones de estanques. Gracias a esta arquitectura se puede adquirir mediciones de la planta, mostrar los datos en una interfaz gráfica para el usuario y también controlar el sistema mediante un controlador PID digital.

## 2. Sistema SCADA implementado y Código

### 2.1. Descripción del Programa

El funcionamiento y modularización del programa que levanta el sistema SCADA se puede apreciar en la Fig. 2. Al centro de este diagrama podemos observar que está el módulo *ServidorOPC.py*, este es el encargado de establecer la comunicación vía OPC entre las distintas partes del sistema: la base de datos, la planta y la interfaz gráfica.

La interfaz gráfica *OPC-QuadrupleTank* se suscribe mediante un cliente OPC al servidor, con el cual es capaz de enviar y recibir datos de este. El módulo fue desarrollado con la librería de gráficos en *Python: Bokeh*, esta permite un amigable manejo en alto nivel de gráficos que reciben un streaming de datos. La interfaz va instancia y trabaja con la ley de control desarrollada en este experimento, un controlador PID. Mediante ésta, el usuario es capaz de alternar entre el modo automático de operación y el manual, pudiendo cambiar referencias, constantes y ajustar las variables manipuladas respectivamente.

Por su parte, la planta es simulada por el módulo *QuadrupleTank.py* y esta se suscribe al servidor mediante un cliente OPC. Con esto se envían los datos al sistema y el usuario puede verlos en la interfaz gráfica.

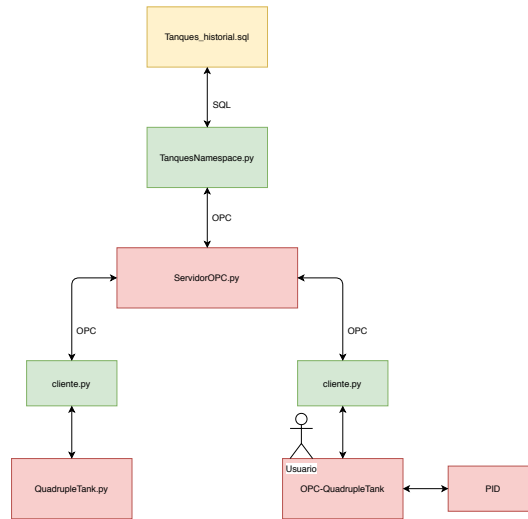


Figura 2: Diagrama de Flujo del Programa

El módulo *main.py* ubicado dentro del directorio *OPC-QuadrupleTank* es el que condensa la participación de todos los otros módulos. Este se inicia creando un *thread* (hilo concurrente) que levanta el servidor OPC, montándolo en el servidor local y puerto 4840, uno puede

acceder a el haciendo request al enpoint `localhost:4840/freopcua/server/`. Con el servidor ya funcionando, se crea un segundo *thread* que se encarga de conectar la planta a la red SCADA. Finalmente se desarrolla todo el código relacionado a la interfaz gráfica y control PID, que corre en el *main scope* del programa.

**IMPORTANTE:** Toda las instrucciones de como ejecutar el programa en una máquina local se encuentran en el archivo *README.md* adjunto al informe. Cualquier duda, dirigirse por correo a cualquiera de los integrantes del grupo.

## 2.2. Interfaz gráfica

En esta sección se discutirá sobre la imagen de la interfaz gráfica, junto a las funcionalidades que tiene incorporada. A continuación, en la Fig. 3 podemos observar como luce la interfaz en modo automático y manual respectivamente.

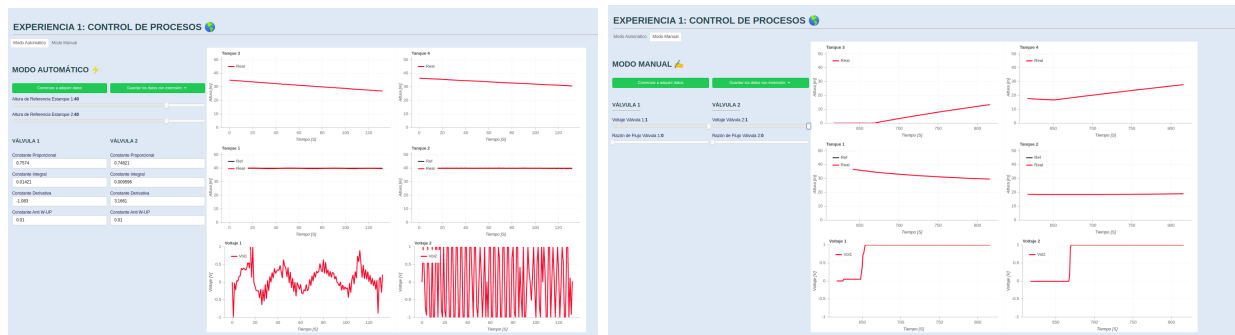


Figura 3: Interfaz gráfica en modo automático y manual respectivamente

Podemos notar que ambos modos muestran los gráficos de los niveles de los cuatro estanques (variables controladas) y también las posiciones de las válvulas (variables manipuladas) en todo momento. Las características que pueden observarse y manipularse exclusivamente en cada uno de estos modos son:

- Modo automático:

En la Fig. 4 se puede apreciar los controles que se tienen cuando se está en modo automático.



Figura 4: Características del modo automático

- En rojo podemos observar el panel de guardado de información. En este, podemos indicarle a la interfaz que deseamos comenzar a adquirir datos. Si comenzamos a guardar, el botón se torna color rojo si se clickea nuevamente, se terminará de guardar los datos y estos se exportarán en un archivo. La extensión en que se guarda estará dada por la opción que se haya seleccionado en la barra que dice "Guardar los datos con extensión:", el cual entregará al usuario tres opciones: formato *csv*, *txt* o *npv*.
- Luego, el color azul podemos observar los parámetros referidos a la planta y control de esta. En la parte superior se encuentran dos *sliders* con los cuales se puede ajustar la referencia a la cual se desean estabilizar los estanques 1 y 2 respectivamente en tiempo real. En la parte inferior están los parámetros de los controladores PID de cada una de las válvulas. Entre estos están los valores de  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  y la constante que evita el *wind-up* de la acción integral. Uno puede actualizar los valores de estas constantes en tiempo real. Los efectos que pueden causar los cambios en los parámetros contenidos en la sección azul se pueden revisar inmediatamente en los gráficos de la parte derecha de la interfaz (revisar Fig. 3).

- Finalmente, en color verde podemos observar el sector de alertas. Estas alarmas se despliegan en la interfaz cuando el sistema reporta una alarma vía OPC. La interfaz notificará al usuario cual es el estanque que está presentando niveles peligrosos de operación, para que este pueda reaccionar y solucionar los problemas.

■ Modo manual:

En la Fig. 5 se puede apreciar los controles que se tienen cuando se está en modo manual.

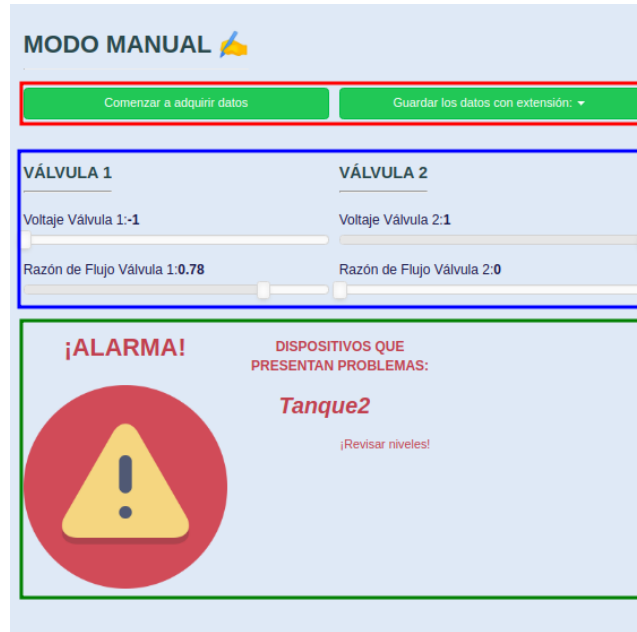


Figura 5: Características del modo manual

- En la parte superior, está la sección roja. Esta es compartida con la del modo automático, por lo que su funcionamiento es idéntico.
- La sección de color azul muestra las variables manipuladas de la planta, es decir, los voltajes junto a las razones flujo de cada una de las válvulas del sistema. Estas se pueden ajustar deslizando los *sliders* respectivas. Los efectos producidos por los cambios en cualquiera de estas se verán inmediatamente en los gráficos ubicados en la parte izquierda de la pantalla (revisar Fig. 3).
- Finalmente se ubica la sección de alarmas, resaltada en color verde. Esta corresponde a la misma funcionalidad que en el modo automático.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Punto de equilibrio

El sistema que se quiere controlar corresponde al de 4 tanques que se muestra a continuación

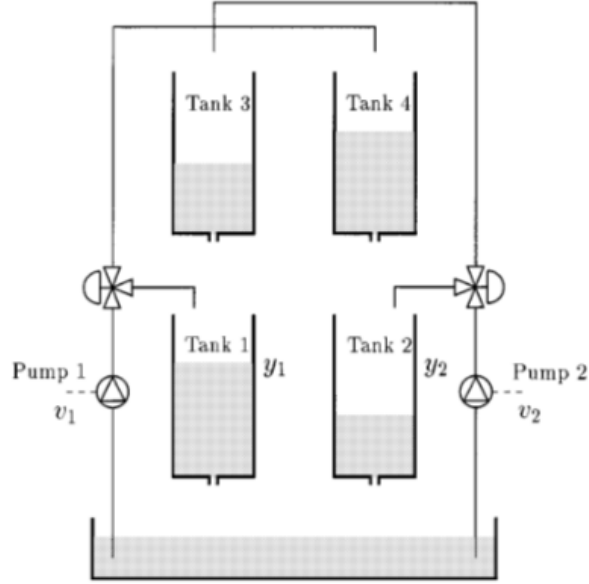


Figura 6: Sistema de 4 Tanques

El sistema queda definido por las siguientes ecuaciones

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1 v_1}{A_1} \quad (1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2 v_2}{A_2} \quad (2)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1 - \gamma_2) k_2 v_2}{A_3} \quad (3)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1 - \gamma_1) k_1 v_1}{A_4} \quad (4)$$

Vectorialmente

$$\frac{d\vec{h}}{dt} = f(\vec{h}, \vec{u})$$

Para encontrar el punto de equilibrio debemos encontrar una combinación (h,u) tal que

$$\frac{d\vec{h}}{dt} = 0$$

Despejando encontramos que los puntos de equilibrio son

$$h_1 = 0.55v_1^2 + 0.628v_1v_2 + 0.18v_2^2$$

$$h_2 = 0.156v_1^2 + 0.626v_1v_2 + 0.626v_2^2$$

$$h_3 = 0.179v_2^2$$

$$h_4 = 0.156v_1^2$$

Luego para un  $(v_{1eq}, v_{2eq})$  dados, se pueden encontrar las alturas de equilibrio.

### 3.2. Linealización

La linealización de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineal corresponde a una aproximación de Taylor de primer orden que supone un rango de operación pequeño y se define en torno a un punto de equilibrio, como la relación que encontramos en el inciso anterior. Para un sistema tal que  $\dot{x} = f(x, u)$  y  $y = g(x, u)$  y condición inicial nula la linealización se obtiene como sigue.

$$\Delta \dot{x} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \cdot \Delta u$$

$$\Delta \dot{u} = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \cdot \Delta x + \left. \frac{\partial g}{\partial u} \right|_{\substack{x=x_{eq} \\ u=u_{eq}}} \cdot \Delta u$$

donde  $\frac{\partial f}{\partial x}$  corresponde al Jacobiano de  $f$ .

Para el caso de los estanques, siguiendo el proceso anterior obtenemos las siguientes matrices del sistema linealizado:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial h} \right|_{\substack{h=h_0 \\ u=u_0}} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1 g}{A_1 \sqrt{2gh_{10}}} & 0 & \frac{a_3 g}{A_1 \sqrt{2gh_{30}}} & 0 \\ 0 & -\frac{a_1 g}{A_1 \sqrt{2gh_{10}}} & 0 & \frac{a_4 g}{A_2 \sqrt{2gh_{40}}} \\ 0 & 0 & -\frac{a_3 g}{A_3 \sqrt{2gh_{30}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{a_4 g}{A_4 \sqrt{2gh_{40}}} \end{bmatrix}$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{h=h_0 \\ u=u_0}} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Si escogemos valores de voltaje  $v_1 = 3$  y  $v_2 = 3$  obtenemos un punto de equilibrio

$$\vec{h}_0 = \begin{bmatrix} 12.222 \\ 12.672 \\ 1.611 \\ 1.404 \end{bmatrix}$$

Reemplazando los valores de las constantes y evaluando en el punto de equilibrio encontrado, las matrices A, B, C y D serán

$$A = \begin{bmatrix} -0.016 & 0 & 0.044 & 0 \\ 0 & -0.011 & 0 & 0.033 \\ 0 & 0 & -0.044 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.033 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.083 & 0 \\ 0 & 0.062 \\ 0 & 0.0416 \\ 0.0357 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 3.3. Función de Transferencia

La función de transferencia del sistema está dada por

$$G = C(SI - A)^{-1}B + D$$

Por lo tanto, reemplazando las matrices encontradas anteriormente obtenemos

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{2\gamma_1 k_1 \sqrt{gh_1}}{\sqrt{2a_1 g + 2A_1 \sqrt{gh_1}} \cdot s} & \frac{-2\sqrt{2a_3 g k_2 \sqrt{gh_1}}(\gamma_2 - 1)}{(\sqrt{2a_1 g + 2A_1 \sqrt{gh_1}} \cdot s) \cdot (\sqrt{2a_3 g + 2A_3 \sqrt{gh_3}} \cdot s)} \\ \frac{-2\sqrt{2a_4 g k_1}(\gamma_1 - 1)}{(\sqrt{2a_2 g + 2A_2 \sqrt{gh_2}} \cdot s) \cdot (\sqrt{2a_4 g + 2A_4 \sqrt{gh_4}} \cdot s)} & \frac{2\gamma_2 k_2 \sqrt{gh_2}}{\sqrt{2a_2 g + 2A_2 \sqrt{gh_2}} \cdot s} \end{bmatrix}$$

Evaluando los valores de los parámetros del problema obtenemos la siguiente función

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{5.182}{62.25s+1} & \frac{2.961}{1407s^2+84.85s+1} \\ \frac{2.817}{2710s^2+120.3s+1} & \frac{5.634}{90.24s+1} \end{bmatrix}$$

### 3.4. Simulación del Sistema

Utilizamos *Simulink* para implementar el sistema y simular el control, con el cual obtuvimos los valores iniciales desde los cuales empezamos a iterar en el programa de *Python*.



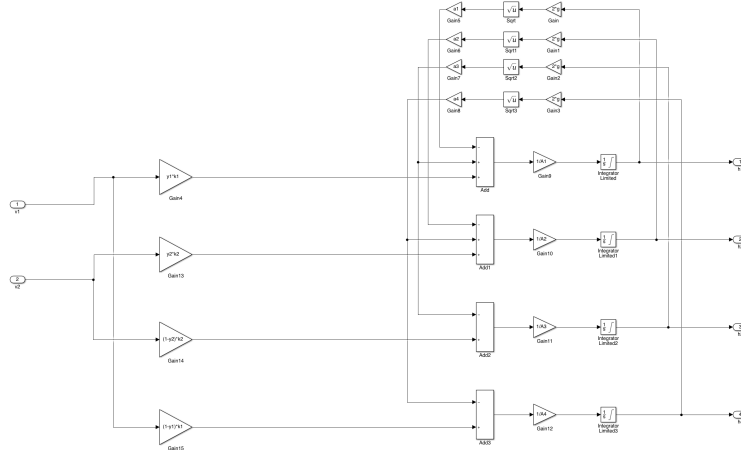


Figura 7: Modelo Simulink

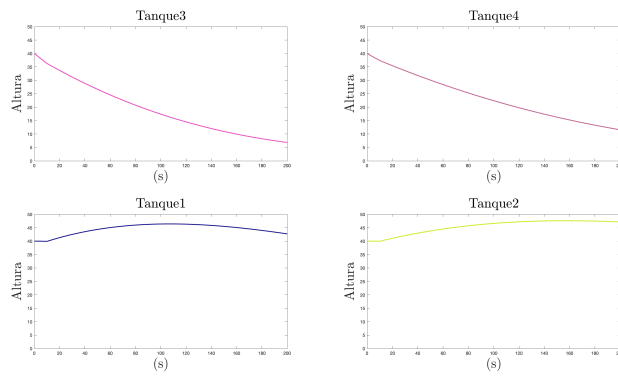


Figura 8: Simulación lazo abierto - Dos escalones iguales de entrada

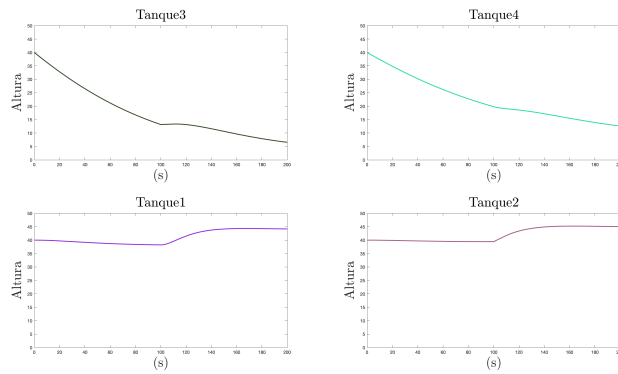


Figura 9: Simulación lazo cerrado - Dos escalones de 45cm

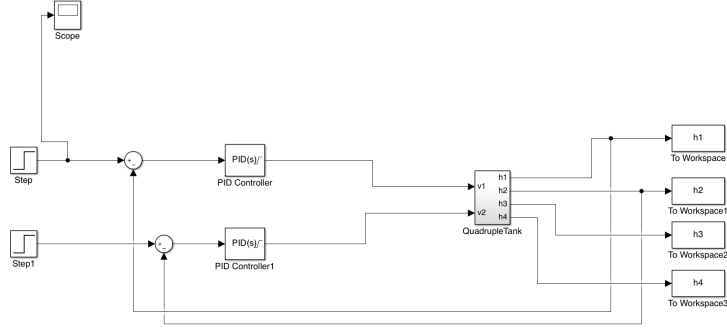


Figura 10: Sistema en lazo cerrado

### 3.5. Fase mínima y fase no mínima

El sistema se transforma en un sistema de fase mínima cuando  $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$  cómo establece el enunciado. Esto significa que los ceros del sistema se encuentran en el semiplano izquierdo y que el sistema es estable (polos en el semiplano derecho) Un sistema de fase mínima es de la forma

$$G(jw) = \frac{1 + jwT}{1 + jwT}$$

Un sistema de fase no mínima posee ceros en el semiplano derecho y es estable, para nuestro sistema, esto ocurre cuando  $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$ . Un sistema de fase no mínima es de la forma

$$G(jw) = \frac{1 - jwT}{1 + jwT}$$

Ambos sistemas tienen la misma característica de magnitud, pero diferente característica de ángulo de fase.

## 4. Experimentos

### 4.1. Respuesta a Escalón

Se colocó en la interfaz el modo manual y se le aplicó un escalón a los voltajes 1 y 2 y se muestra la respuesta de las variables desde la interfaz.

#### 4.1.1. Fase Mínima

La respuesta de fase mínima se muestra a continuación, se consideraron valores de  $\gamma_1 = 0.7$  y  $\gamma_2 = 0.6$ .

Para el tanque 1

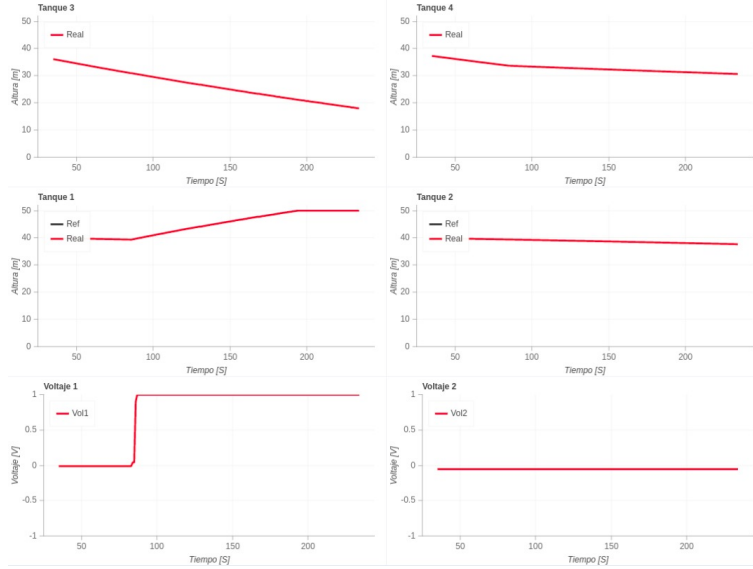


Figura 11: Respuesta al escalón Fase Mínima Tanque 1  
El tanque 2

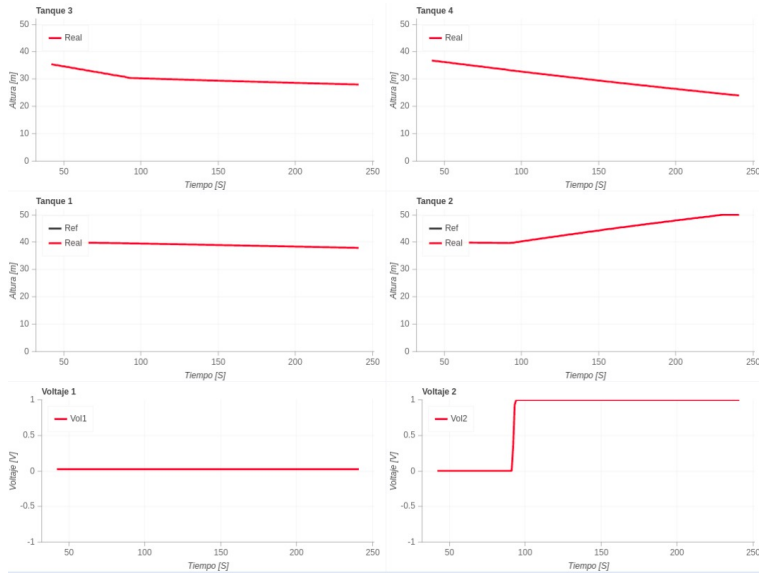


Figura 12: Respuesta al escalón Fase Mínima Tanque 2

#### 4.1.2. Fase No Mínima

La respuesta de fase mínima se muestra a continuación, se consideraron valores de  $\gamma_1 = 0.35$  y  $\gamma_2 = 0.35$  El tanque 1

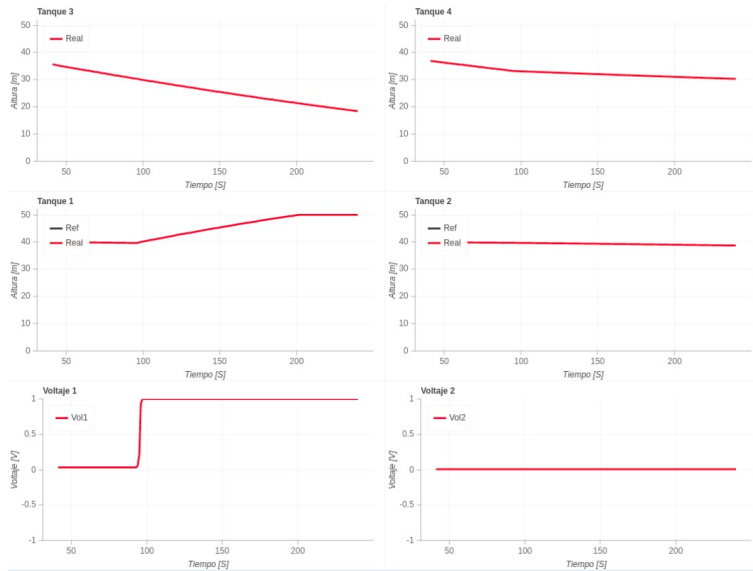


Figura 13: Respuesta al escalón Fase No Mínima Tanque 1

El tanque 2

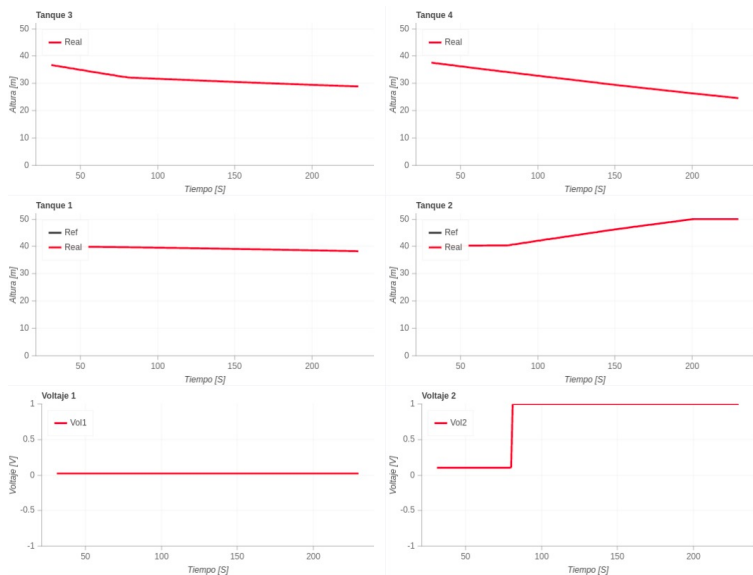


Figura 14: Respuesta al escalón Fase No Mínima Tanque 2

De la prueba del sistema en fase no mínima podemos ver que la entrada a escalón de la válvula 2 genera una disminución de la altura del estanque 1. Esto nos permite concluir que controlar un sistema de fase no mínima es más complejo, dado que las respuestas de la variable controlada al cambio en la entrada no son las esperadas.

## 5. Control PID

El control PID que utilizamos para el sistema de tanques es uno discreto y que tiene complementos para lidiar con el ruido de los sensores y con la saturación de los actuadores. Los parámetros utilizados, se consideraron para la válvula 1

$$K_p = 1.166 \quad K_i = 0.0293 \quad K_d = 0 \quad K_w = 0.01$$

y para la válvula 2

$$K_p = 1.02823 \quad K_i = 0.0188421 \quad K_d = -0.1349 \quad K_w = 0.01$$

### 5.1. Fase Mínima

A continuación se muestran los gráficos de la interfaz de control en modo automático para una referencia de 44.7 para el estanque 1 y de 44.6 para el estanque 2

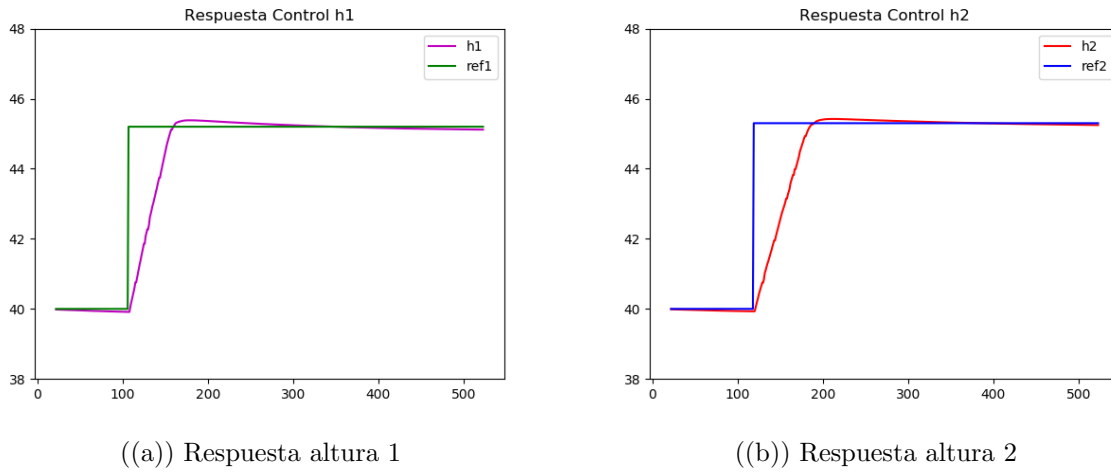


Figura 15: Respuesta Control Fase Mínima

Las características de la respuesta de control para los dos tanques son:

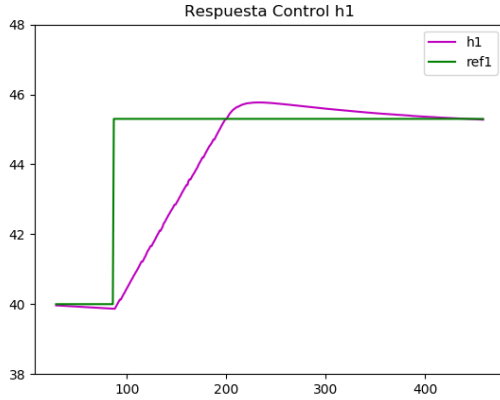
Estanque	Overshoot	Settling time	Response
1	4.9 %	4.3 s	2.7 s
2	18 %	5.2 s	3.7 s

Cuadro 1: Característica de Respuesta del Control Fase Mínima

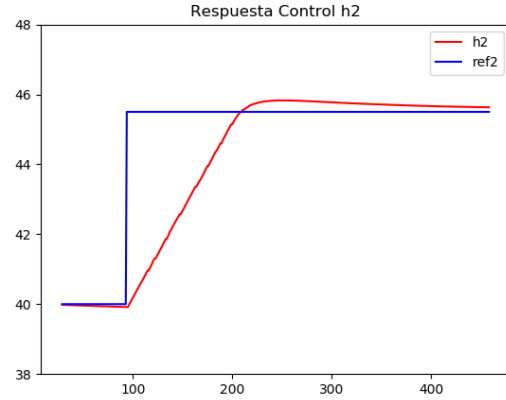
donde el overshoot se calculó como  $overshoot_i = \frac{\max(h_i) - ref_i}{ref_i} \cdot 100 \%$

## 5.2. Fase No Mínima mismo Controlador

A continuación se muestran los gráficos de la interfaz de control en modo automático para una referencia de 45 para el estanque 1 y de 45 para el estanque 2



((a)) Respuesta altura 1



((b)) Respuesta altura 2

Figura 16: Respuesta Control Fase Mínima

Las características de la respuesta de control para los dos tanques son:

Estanque	Overshoot	Settling time	Response
1	18.4 %	10.8 s	8.5 s
2	5.83 %	10.9 s	8.6 s

Cuadro 2: Característica de Respuesta del Control Fase No Mínima

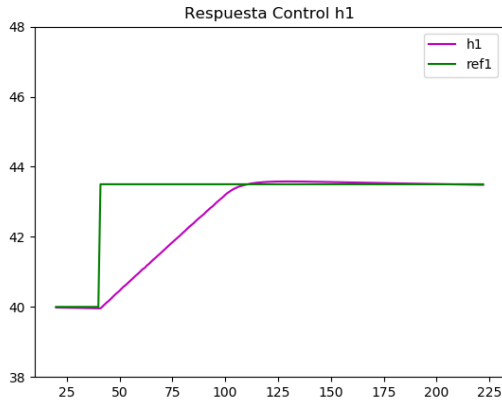
## 5.3. Fase No Mínima Optimizado

A continuación se muestran los gráficos de la interfaz de control en modo automático para una referencia de 45 para el estanque 1 y de 35 para el estanque 2 pero en fase no mínima, para lo que se dejaron las constantes de flujo en  $\gamma_1 = 0.35$  y  $\gamma_2 = 0.35$

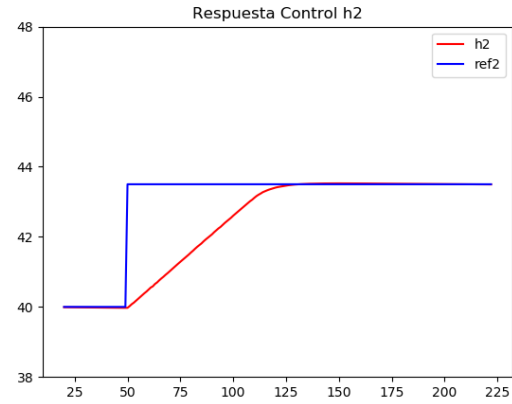
$$K_p = 1.759 \quad K_i = 0.02 \quad K_d = -0.1933 \quad K_w = 0.001$$

y para la válvula 2

$$K_p = 1.669 \quad K_i = 0.0109654 \quad K_d = -0.1933197 \quad K_w = 0.01$$



((a)) Respuesta altura 1



((b)) Respuesta altura 2

Figura 17: Respuesta Control Fase No Mínima Optimizado

Las características de la respuesta de control para los dos tanques son:

Estanque	Overshoot	Settling time	Response
1	1.03 %	6.1 s	5 s
2	0.723 %	6.4 s	6.2 s

Cuadro 3: Característica de Respuesta del Control Fase No Mínima Optimizado

## 6. Conclusiones

Los sistemas SCADA son usados a lo largo de todo el mundo, tanto en procedimientos industriales como en procesos domésticos. Actualmente la arquitectura ofrece una simple implementación gracias a las librerías disponibles en variados lenguajes de programación. En este caso se utilizó *Python* para implementar el software y su desarrollo fue bastante simple y directo. Gracias a esto, la tecnología SCADA es muy escalable por que está al simple alcance de la sociedad.

Por su parte, el sistema de comunicación OPC funciona de manera similar a un de recolección datos de forma *Read-Write* mediante un cliente. Junto a esto, la interacción entre las distintas componentes del sistema SCADA mediante *Python* se hace de una forma muy simple e intuitiva.

Finalmente, viendo como se ha utilizado este tipo de sistemas a lo largo del mundo, no cabe duda de que este se seguirá depurando e integrando en distintas aplicaciones, facilitando y automatizando aún más procesos en la sociedad.