

The background features a decorative graphic consisting of three overlapping green circles of varying sizes, arranged in a descending diagonal line from the top right towards the bottom right. Two thin, light green lines intersect at the top left, forming a large triangular shape that frames the central text.

# **CAPÍTULO**

# **5**

**“Pruebas y Resultados”**

## Pruebas y Resultados

Con este capítulo se concluye el proceso de automatización de la planta piloto de tipo industrial, se presentan las pruebas y resultados del sistema automatizado. Se muestran gráficas del comportamiento del sistema bajo los esquemas de control de flujo, de nivel y de cascada.

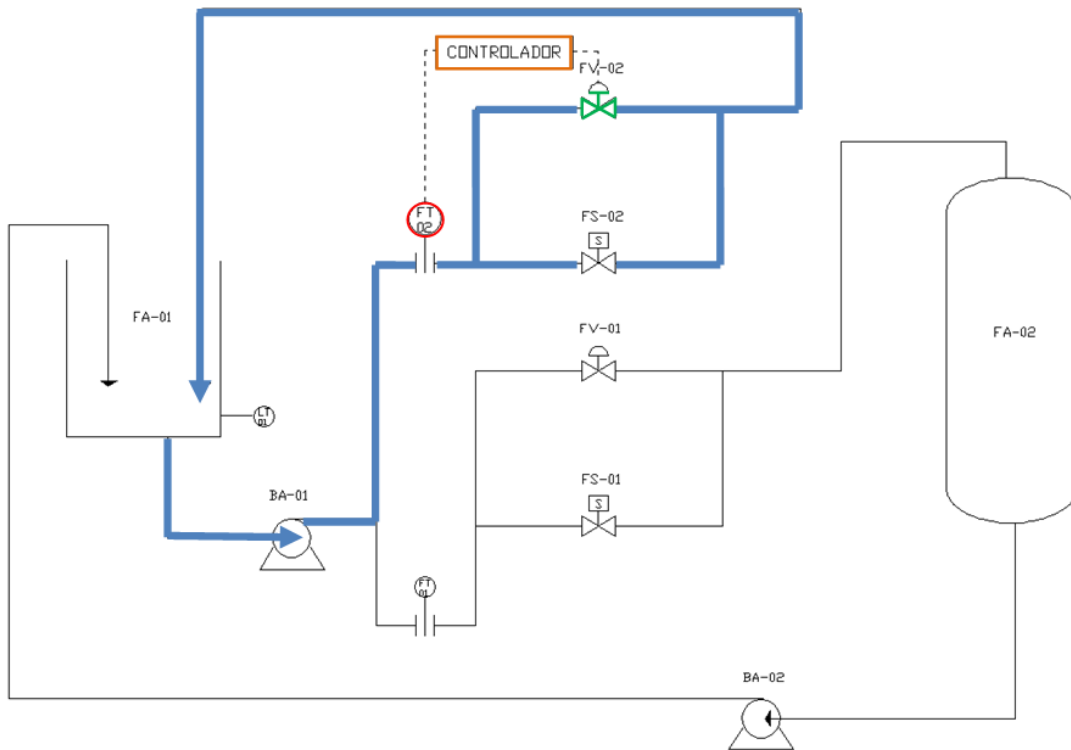
### CONTROL DE FLUJO

El control de flujo que se realiza en la tubería de la rama dos es regulado con la válvula proporcional FV-02. La tabla 1 muestra la relación de flujo con la apertura de la válvula FV-02 operando en condiciones normales, es decir, con la bomba BA-01 encendida y las válvulas FV-01, SV-01 y SV-02 cerradas. Sin embargo si alguna de las válvulas FV-01 o SV-01 es abierta, la relación apertura/flujo es afectada y el flujo en la rama dos es diferente respecto al mostrado en la tabla 1.

% de apertura	Flujo GPM
10	0
15	2
20	4
25	5.5
30	7
35	8.5
40	10
45	11
50	12.5
55	13.5
60	14.5
65	15.5
70	16
75	17
80	18
85	18.5
90	18.5
95	18.5
100	19

Tabla 3. Apertura de válvula FY-02 contra GPM

El esquema de control hace que el flujo en la tubería de la rama dos sea el establecido por el usuario a pesar de perturbaciones. Como se muestra en la ilustración 1 el controlador recibe información del transmisor FT-02 y envía una a la válvula FV-02 con el propósito de igualar el flujo real con el flujo de referencia establecido por el usuario.



**Ilustración 43. Esquema de control de flujo.**

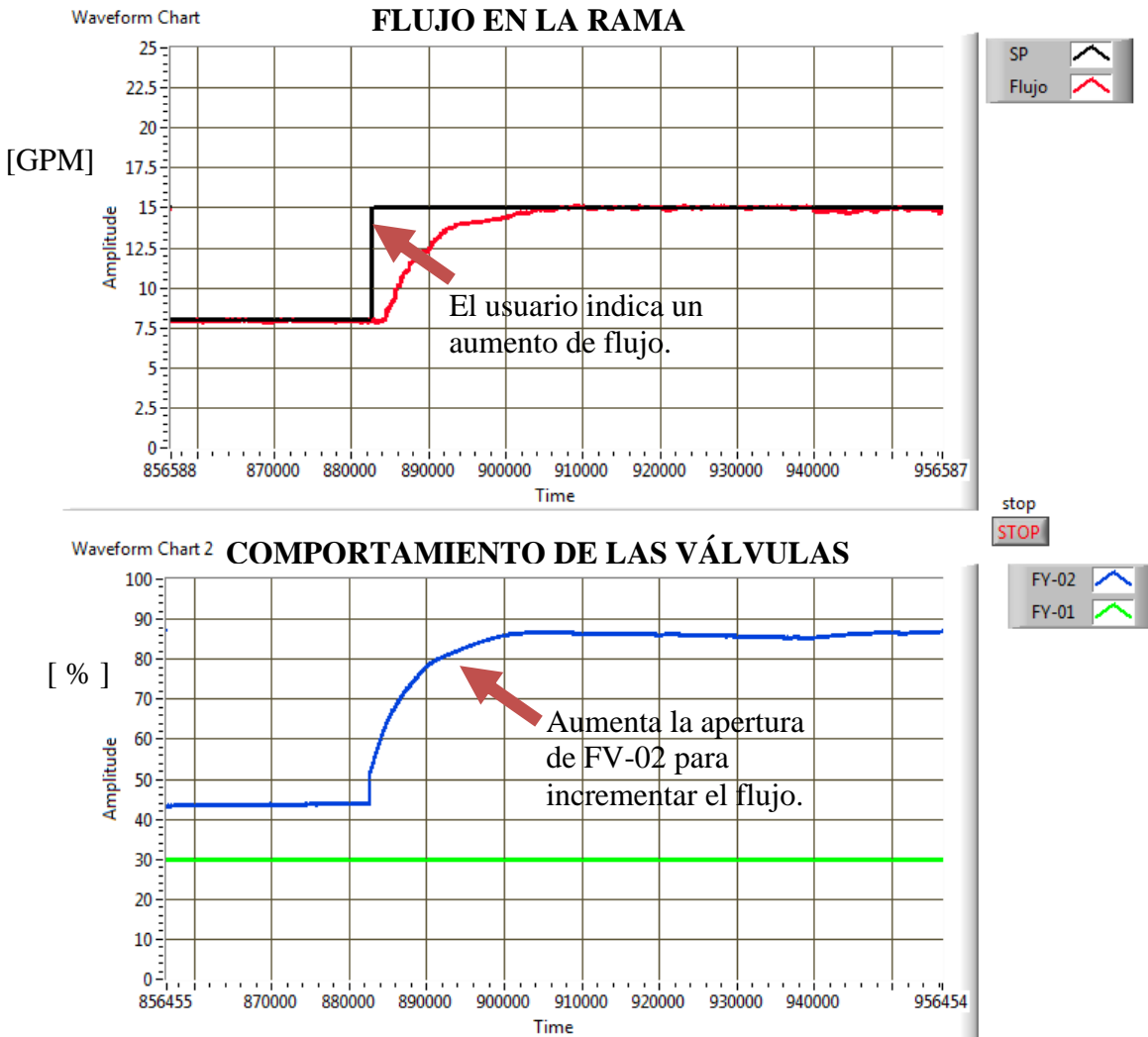
Las siguientes ilustraciones se componen de dos gráficas, la primera presenta la variable controlada y la señal de referencia (set point) indicada por el usuario. La segunda grafica el comportamiento de las válvulas FV-01 y FV-02.

El ajuste de la ganancia proporcional, el tiempo integral y el tiempo derivativo se realizó de la siguiente manera. Primero las ganancias se colocaron en 0. Posteriormente se estableció un valor para la ganancia proporcional y se aplicó una entrada escalón al sistema. El usuario debe establecer las características de la respuesta del sistema cuando su entrada es un escalón.

En este caso se buscó una constante que no provocara sobrepasos ni oscilaciones. Si la ganancia proporcional es muy grande entonces la respuesta del sistema será oscilante. Una vez que se ha obtenido la ganancia proporcional deseada, se prosigue a encontrar el tiempo de integración. Cada vez que se cambia alguna constante del controlador se debe aplicar una entrada escalón para observar los efectos que tiene sobre la respuesta del sistema.

Se debe buscar un tiempo de integración que anule el error en estado estacionario provocado por la ganancia proporcional teniendo cuidado de no hacer al sistema inestable. Una vez que se han ajustado el tiempo de integración y la ganancia proporcional se procede a buscar el tiempo derivativo para el controlador. En este caso no se implementó el tiempo derivativo porque su acción provoca que el controlador sea muy sensible al ruido. Sin embargo, por fines de estudio se permite que el usuario proponga las tres constantes para observar cada uno de sus efectos sobre el sistema.

La ilustración 2 muestra las gráficas del funcionamiento del controlador de flujo ante un cambio en el SP de 8 a 15 GPM. El usuario indica el SP del flujo de la rama dos y el controlador modifica la apertura de la válvula FV-02. Como se requiere incrementar el fluido entonces la válvula FV-02 debe aumentar su apertura.

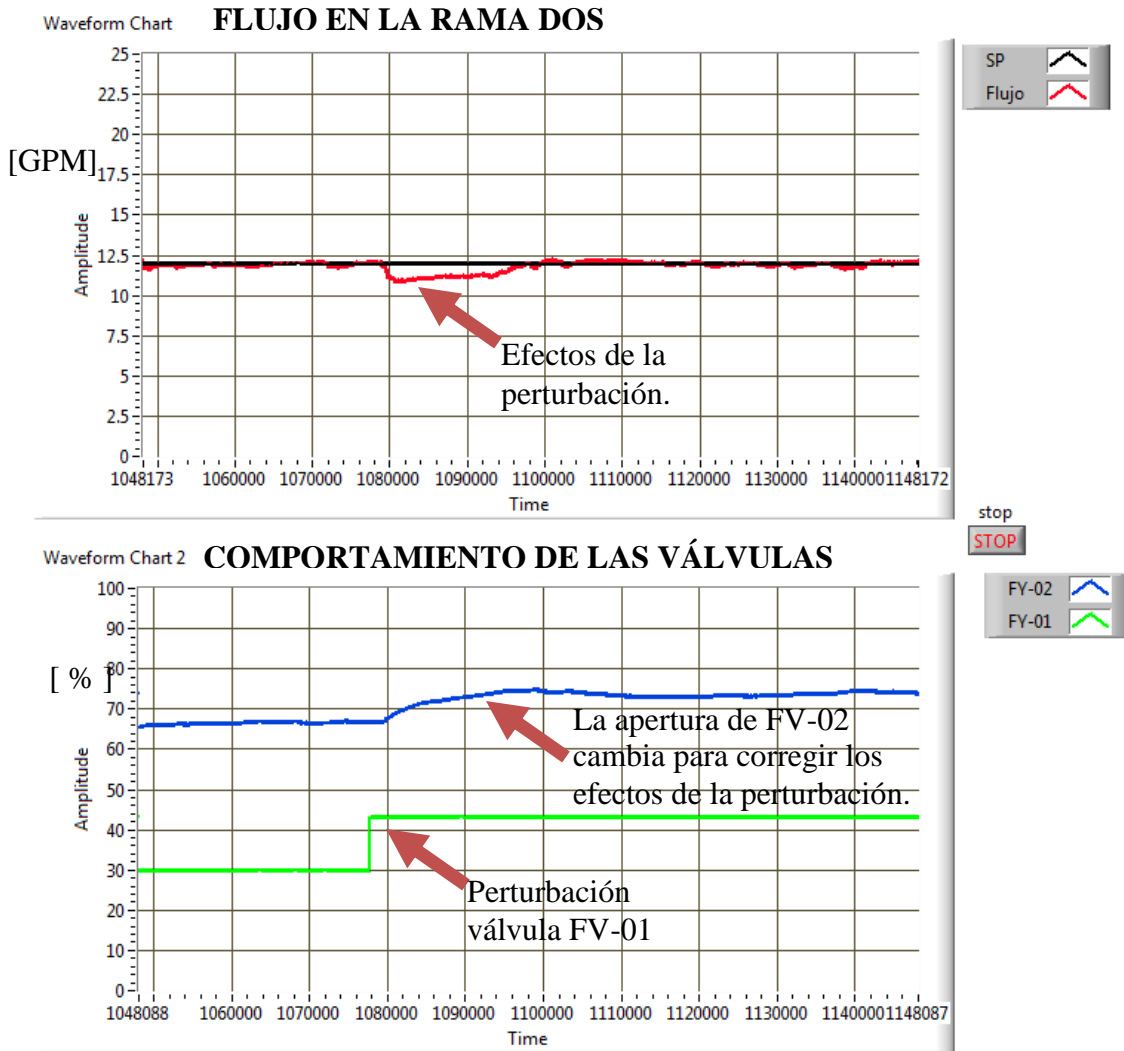


**Ilustración 44. Control de flujo.**

En la ilustración 3 se observa el efecto de una perturbación provocada por un cambio de apertura en la válvula FV-01. Al detectar el cambio de flujo en la rama dos, el controlador envía una señal a la válvula FV-02 en respuesta a la perturbación.

Cuando la válvula FV-01 aumenta su apertura, el flujo en la rama dos disminuye. En cuanto el controlador detecta el error provocado por la diferencia entre el flujo de referencia y el real, envía una señal correctora al actuador. En éste caso la válvula FV-02 tiene que aumentar su apertura para hacer que el flujo real aumente e iguale al flujo de referencia.

Las ganancias del controlador fueron sintonizadas experimentalmente y después de varias pruebas se obtiene que los valores con los que mejor trabaja son  $K_c=1$ ,  $T_i=0.01$  y  $T_d=0$ .



**Ilustración 45. Control de flujo con perturbación.**

## CONTROL DE NIVEL

El control de nivel del tanque FA-01 es un proceso más lento que el control de flujo. Es un esquema de un solo lazo pero ofrece un buen resultado. Responde ante los cambios indicados por el usuario aunque no reacciona ante perturbaciones sino hasta que han afectado el nivel del tanque.

En la ilustración 4 se muestra el esquema de control de nivel. El controlador recibe la señal del transmisor de nivel LT-01 y de acuerdo con el error entre el nivel real y el de referencia, envía una señal correctiva a la válvula FV-02.

Las ganancias para este controlador también fueron ajustadas experimentalmente obteniendo que los valores en los que mejor se desempeña son  $K_c=10$ ,  $T_i=4$  Y  $T_d=0$ .

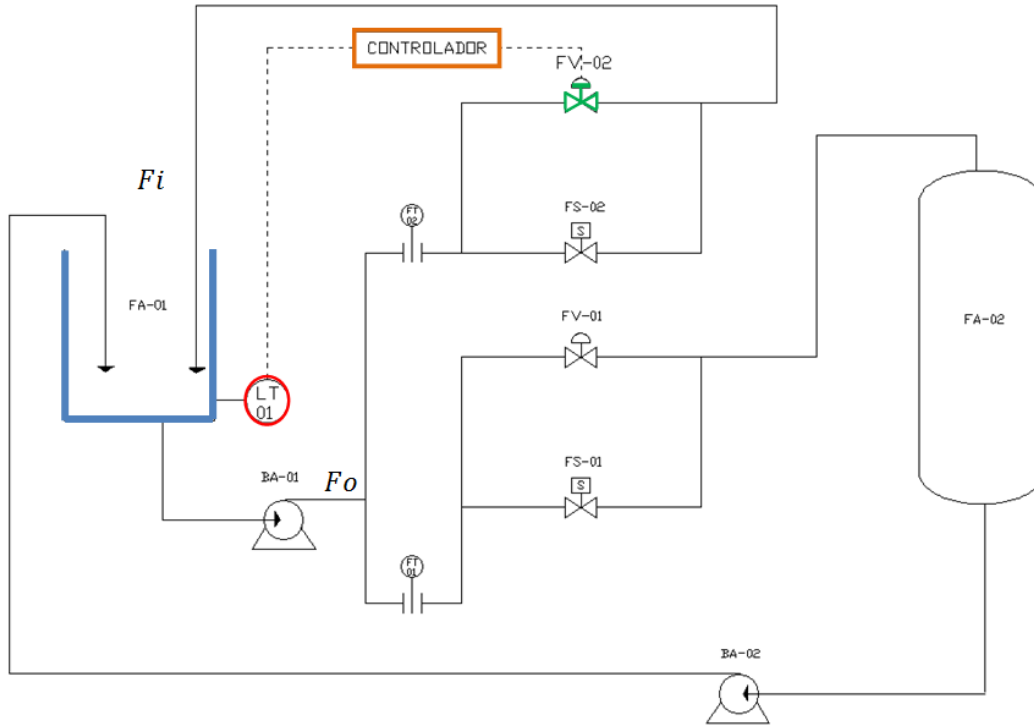


Ilustración 46. Esquema de Control de nivel

En el ejemplo, el usuario cambia el SP de 20 a 15 pulgadas de agua. Ya que el nivel del tanque debe disminuir, el flujo de entrada decrece y a medida que el nivel del tanque se acerca al establecido por el usuario la apertura de la válvula FV-02 aumenta.

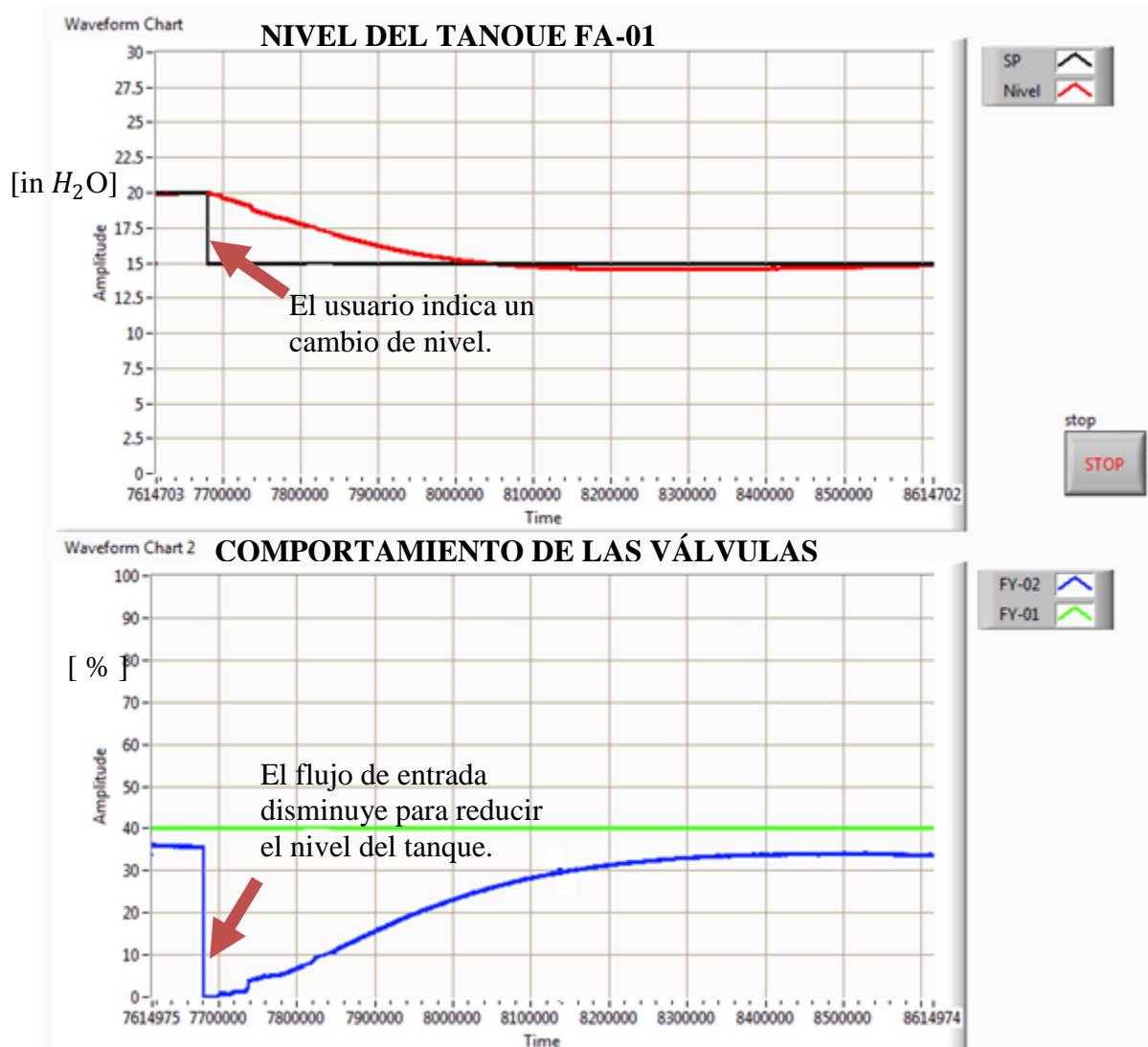


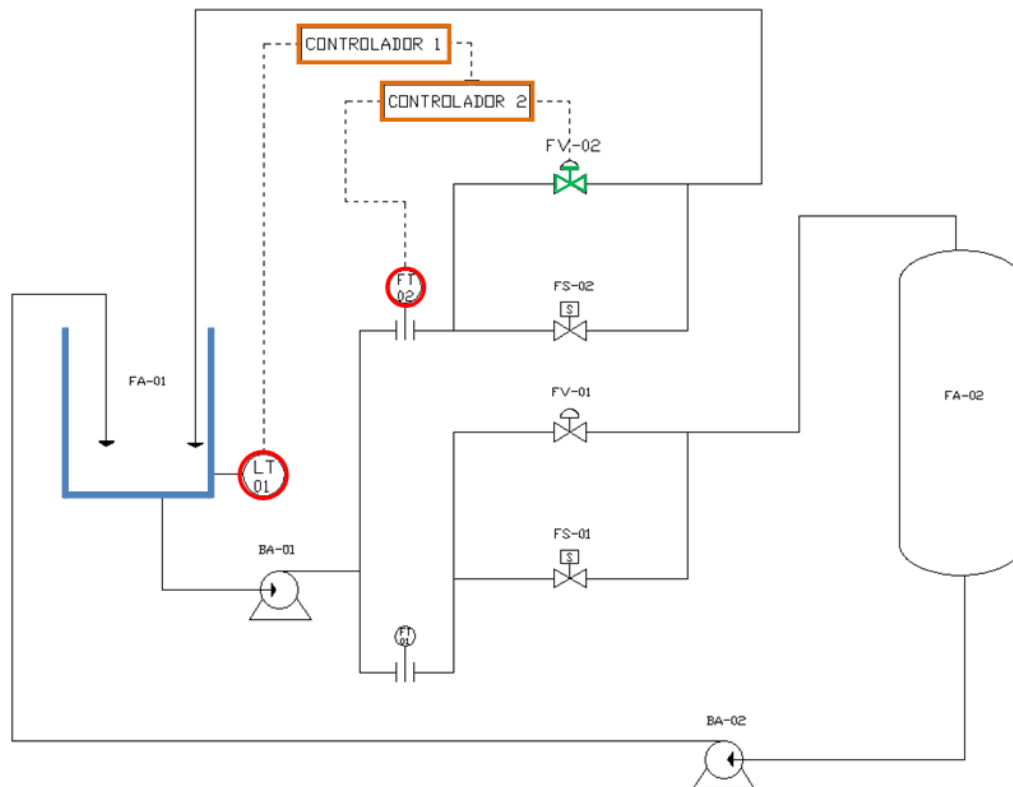
Ilustración 47. Control de nivel.

## CONTROL EN CASCADA

El control de nivel del tanque FA-01 bajo el esquema de control en cascada es más robusto frente a perturbaciones ocasionadas por cambios de flujo. Si se produce un cambio en el flujo de entrada entonces el controlador 2 actúa inmediatamente sobre la válvula FY-02 para corregir el cambio de flujo.

En la ilustración 6 se muestra el diagrama de control de nivel en cascada. El controlador 1 (primario) ajusta el flujo de entrada del tanque FA-01, dicho flujo es comparada con el flujo real y el controlador 2 (secundario) establece el porcentaje de apertura para la válvula FV-02.

En este caso se emplearon las ganancias de los controladores de flujo y nivel obtenidos previamente. Para el controlador primario se usaron las ganancias  $K_c=10$ ,  $T_i=4$  y  $T_d=0$  y para el controlador secundario  $K_c=1$ ,  $T_i=0.01$  y  $T_d=0$ .



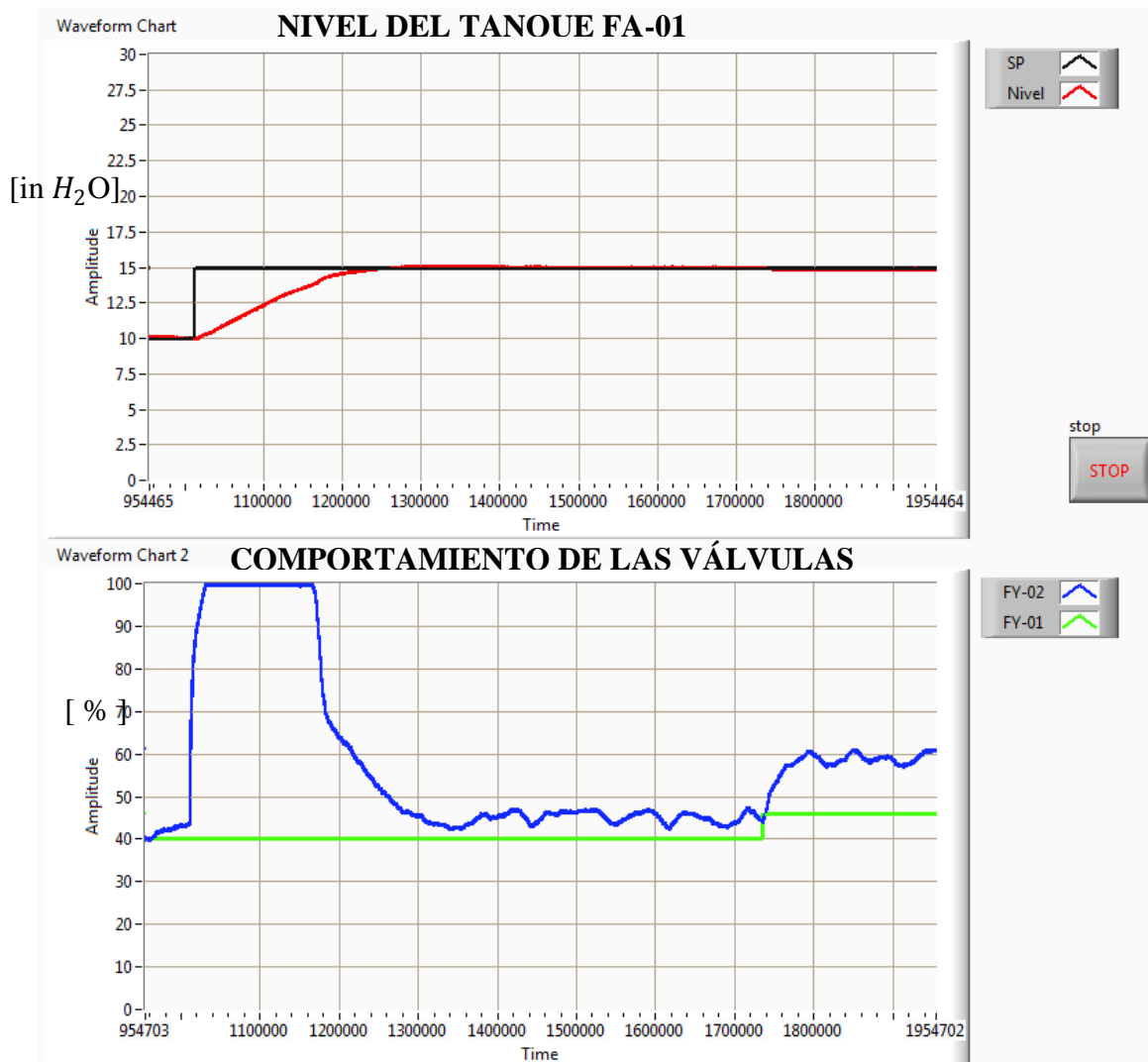
**Ilustración 48. Esquema de control en cascada.**

Al ajustar las ganancias del esquema de control en cascada, primero deben obtenerse los valores del controlador secundario y posteriormente, con el lazo secundario funcionando, se ajustan los valores del controlador primario.

Con el control en cascada se pueden corregir las perturbaciones en el flujo de entrada antes de afectar el nivel del tanque.

Como se observa en las gráficas de la ilustración 7 cuando se incrementa el SP de 10 a 15 pulgadas de agua para cambiar el nivel del tanque, la válvula FV-02 se abre para aumentar el flujo de entrada. Una vez que se alcanza el nivel de referencia (15 GPM), la válvula FV-02 se cierra hasta igualar el flujo de salida.

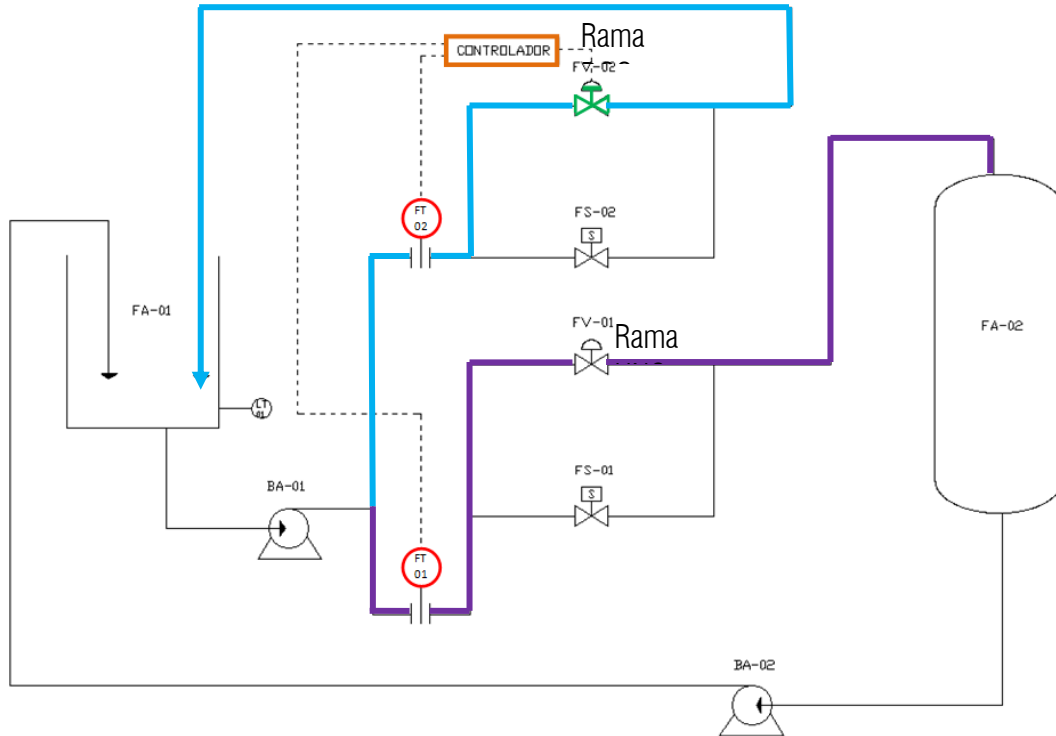




**Ilustración 49. Control de nivel en cascada.**

## CONTROL DE RELACIÓN

En la ilustración 8 se muestra el esquema de control de relación de flujo. El controlador recibe dos señales, una que proviene del transmisor de flujo FT-01 y otra del transmisor FT-02. En este caso el flujo de referencia es el flujo de la rama uno (rama indicada con color morado) y el flujo controlado es el de la rama dos (rama indicada con color azul). El controlador debe modificar la apertura de la válvula FV-02 según los cambios en el flujo de la rama uno y el factor de relación que establece el usuario.



**Ilustración 50. Esquema de control de Relación.**

No se realizaron pruebas del control de relación porque el transmisor de flujo FT-01 no está configurado de manera correcta. El transmisor debería producir una señal que varía de 4 a 20 mA según el flujo en la tubería, sin embargo, está configurado para producir una señal constante de 12 mA.