



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



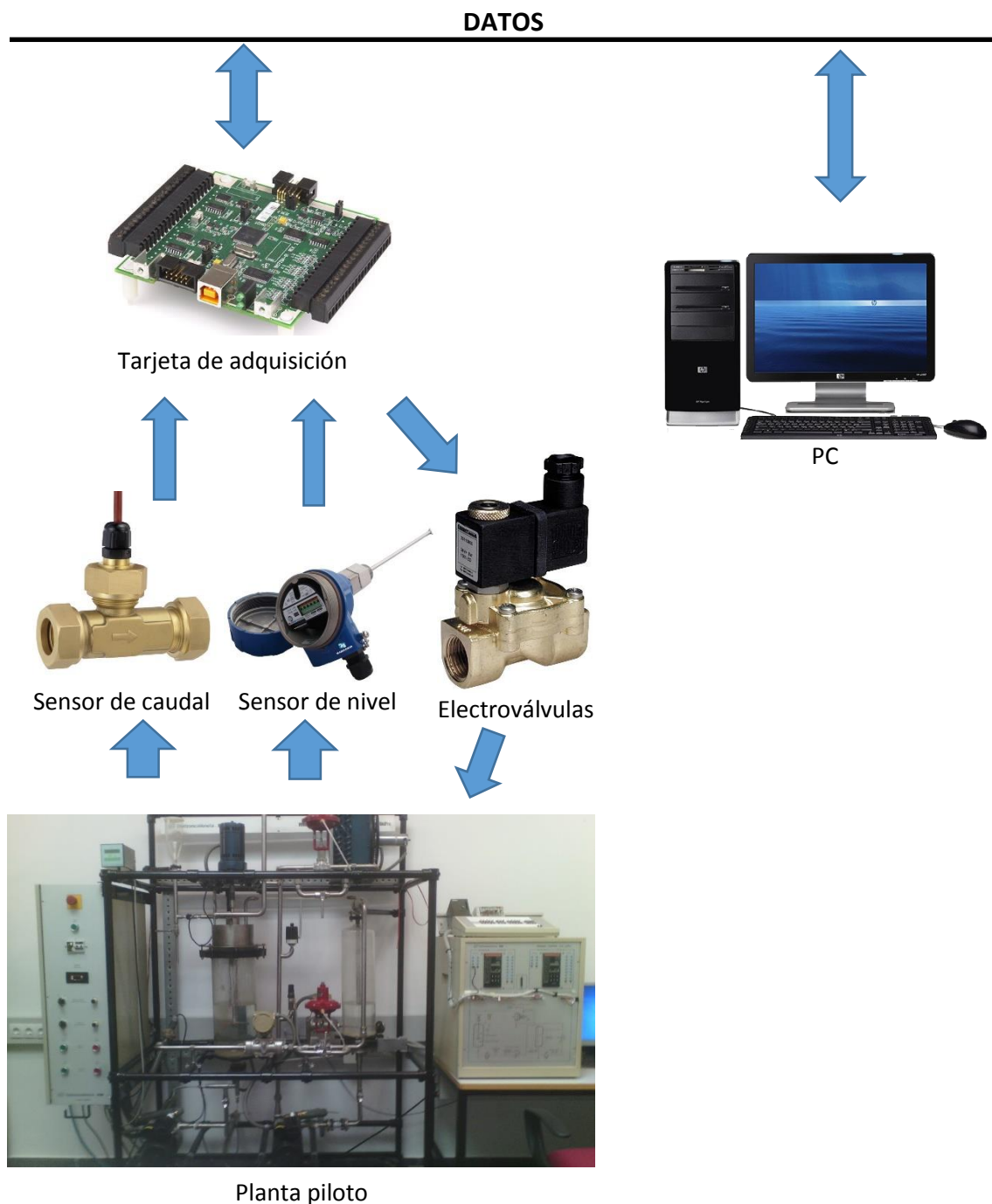
ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

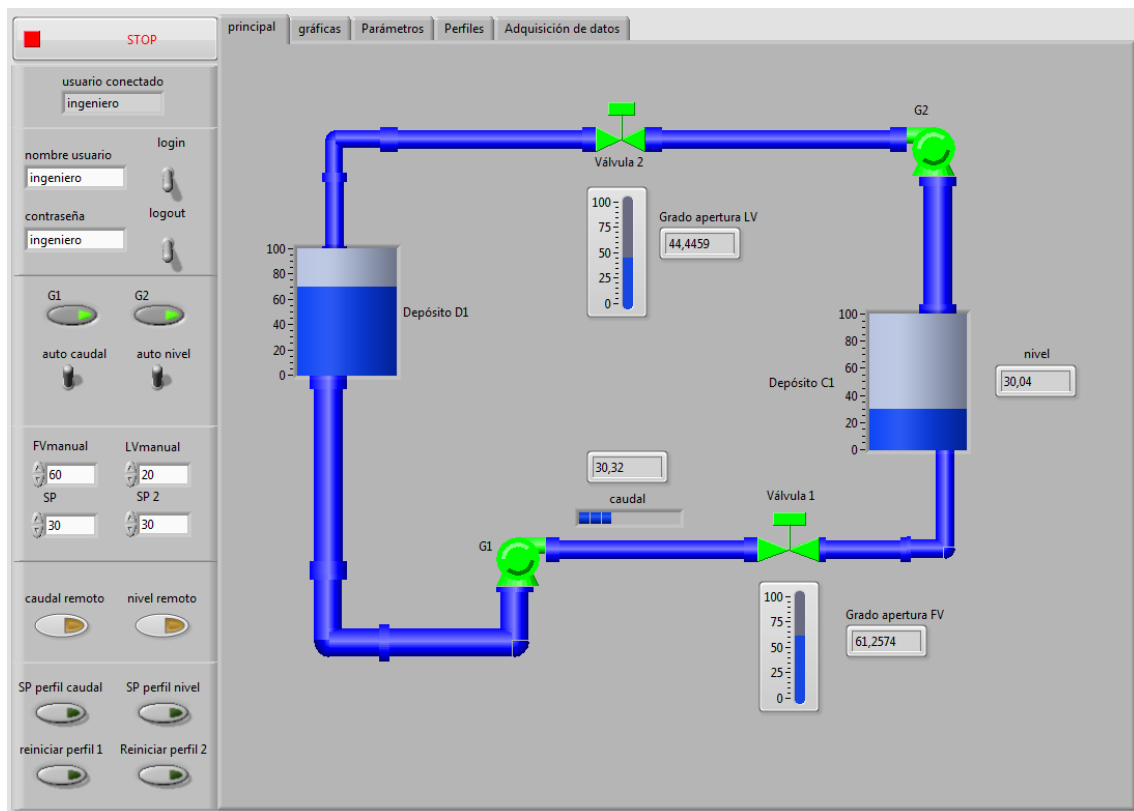
El presente proyecto consiste en el desarrollo de una aplicación que permita el control automático de la planta piloto UniPro. El control consiste en el uso de dos electroválvulas para regular dos señales medidas en la planta. Una de las electroválvulas controla el caudal en cierto punto de la planta, y la otra controla el nivel de un depósito. Estas entradas y salidas al sistema se comunican con el PC mediante una tarjeta de adquisición de datos.

La aplicación se ha desarrollado mediante el Software LabVIEW de National Instruments, con apoyo de Matlab de Mathworks para el diseño de los controladores, así como de sus herramientas Ident y Simulink.



Además del control como tal, la aplicación desarrollada incluye una serie de funciones que ayudan a manejar la planta de una forma más completa y pestañas que permiten monitorizar de varias maneras la información recogida, ya sea mediante un modelo SCADA, mediante gráficas, o como datos numéricos.

La aplicación permite una serie de acciones en función del nivel de acceso al “logearse”. De esta manera, desde el nivel “usuario” se puede básicamente visualizar la información, desde el nivel “operario” se puede también manejar las funciones mencionadas anteriormente y desde el nivel “ingeniero” se tiene acceso total, pudiéndose así modificar parámetros importantes de la aplicación y valores que regulan el funcionamiento del control.



Índice

ÍNDICE	1
ÍNDICE DE FIGURAS	3
1.-OBJETO DEL PROYECTO	5
1.1.-ESPECIFICACIONES DEL CLIENTE	5
1.2.-RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DEL CONTROL AUTOMÁTICO.....	5
2.-DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA	6
2.1.- DESCRIPCIÓN DE LAS ELECTROVÁLVULAS	8
2.1.1-Válvula FV1 (llenado)	8
2.1.1-Válvula LV1 (Vaciado)	9
2.2.-DESCRIPCIÓN DE LOS SENSORES.....	10
2.2.1-Sensor de nivel	10
2.2.2-Sensor de caudal	10
3.- IDENTIFICACIÓN DE MODELOS DE LA PLANTA	12
3.1.- IDENTIFICACIÓN DEL CAUDAL	12
3.2.-IDENTIFICACIÓN DEL NIVEL	17
4.-DISEÑO DE LOS CONTROLADORES	21
4.1.-DISEÑO DEL CONTROLADOR DE CAUDAL.....	21
4.2.-DISEÑO DEL CONTROLADOR DE NIVEL.....	25
4.3.- RESUMEN DE LAS SOLUCIONES ADOPTADAS	28
5.-APLICACIÓN EN LABVIEW	29
5.1.-INTERFAZ	29
5.2.-ESTRUCTURA DE PROGRAMA	34
6.-CONCLUSIONES	36
7.-PRESUPUESTO	37
7.1.- MANO DE OBRA	37
7.2.- MATERIALES	37
7.3.- CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS.....	37
7.4.- CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	37
7.5.- PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	39
8.- ANEXO. MANUAL DE USUARIO	40
8.1.-BARRA DE CONTROL IZQUIERDA.....	40
8.1.1- "login", "logout" y Stop.....	40
8.1.2.-Activación de las bombas.....	41
8.1.3.-Control manual/automático	41

8.1.4.- Control remoto.....	41
8.1.5.-Generación de perfiles para referencias	41
8.2.-PESTAÑA DE PARÁMETROS	42
8.2.1.- Parámetros PID	43
8.2.2.-Rangos.....	43
8.2.3.-Interruptores PID calculados.....	43
8.2.4.- Filtrado y periodo	44
8.3.-PESTAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	44
9.- ANEXO. MANUAL DE PROGRAMACIÓN.....	45
9.1.-BUCLE DE ADQUISICIÓN DE DATOS	45
9.1.1.-Lectura y escritura de señales.....	45
9.1.2.-Generación de fichero txt.....	47
9.1.3.-Control de seguridad y acceso	48
9.2.-BUCLES DE CONTROL DE CAUDAL Y NIVEL	49
9.2.1.-Bloques relativos al filtrado	50
9.2.2.-Bloques relativos a la referencia (SP).....	51
9.2.3.-Bloques relativos a controladores y sus parámetros	52
9.3.- BUCLE Y FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL REMOTO	53
9.4.- CÓDIGO DE BLOQUES PID	55
9.4.1- Código común a ambos PID	57
9.4.2.-Diferencias entre las partes no comunes a ambos PID.....	58
10.- BIBLIOGRAFÍA	59

Índice de figuras

Figura 1: Foto de la planta piloto	6
Figura 2: Esquema de planta piloto aportado por el fabricante de la planta.	7
Figura 3: Gráfica de llenado del depósito	9
Figura 4: Gráfica de vaciado del depósito	10
Figura 5: Gráfica de medidas del sensor de caudal.....	11
Figura 6: Comparación de sensor de caudal con medidas de llenado (sensor en rojo, medidas de llenado en azul).	12
Figura 7: Efecto de escalones sobre el caudal.....	13
Figura 8: Comparación de modelos de caudal en todos los escalones (en rojo el modelo general, en verde el del escalón inferior y en azul el superior).	15
Figura 9: Comparación de modelos de caudal en escalón de bajada	16
Figura 10: Comparación de modelos de caudal en escalón de subida	16
Figura 11: Validación de modelos de caudal con ensayo adicional	17
Figura 12: Efecto de escalones sobre el nivel	18
Figura 13: Comparación de modelos de nivel.....	19
Figura 14: Comparación del modelo elegido con la señal real	20
Figura 15: Comparación de modelos de nivel en escalón de bajada	20
Figura 16: Gráfica de respuesta de nivel con controlador del escalón superior.....	22
Figura 17: Gráfica de respuesta de nivel con controlador del escalón inferior	22
Figura 18: Gráfica de funcionamiento del caudal ante rampa.....	23
Figura 19: Estructura en simulink para caudal	24
Figura 20: “Scope” de la simulación en simulink de la respuesta del caudal (señal real en azul, simulada en rosa).	24
Figura 21: Error de posición en el nivel.....	25
Figura 22: Evolución del error del nivel en función del aumento del caudal.....	26
Figura 23: Funcionamiento del nivel introduciendo T_i en el controlador.....	26
Figura 24: Funcionamiento del nivel ante rampa y escalón con controlador definitivo.	27
Figura 25: Estructura en simulink para nivel	28
Figura 26: “Scope” de la simulación en simulink de la respuesta del caudal ((señal real en azul, simulada en rosa).	28
Figura 27: Vista de la pestaña principal de la interfaz en funcionamiento.....	29
Figura 28: Contenido de la pestaña “gráficas”	31
Figura 29: Contenido de la pestaña “parámetros”	32
Figura 30: Contenido de la pestaña “perfiles”	33
Figura 31: Contenido de la pestaña “adquisición de datos”	33
Figura 32: Parte superior del bucle de adquisición (control de acceso y seguridad).....	34
Figura 33: Parte central del bucle de adquisición (generación de documento txt y entradas analógicas).....	34
Figura 34: Parte inferior del bucle de adquisición (salidas analógicas y digitales)	35
Figura 35: Bucle de control de caudal	35
Figura 36: Bucle de control de nivel	36
Figura 37: Carpeta de la aplicación	40
Figura 38: Acceso directo a la aplicación	40
Figura 39: Panel de acceso y Stop	40

Figura 40: Botones de bombas.....	41
Figura 41: Panel auto/manual.....	41
Figura 42: Interruptores de remoto	41
Figura 43: Recorte del panel de perfiles	41
Figura 44: Recorte del panel de diseño de perfiles.....	42
Figura 45: "clusters" de parámetros PID.....	43
Figura 46: "Clusters" de rangos.....	43
Figura 47: Interruptores de PID calculados.....	43
Figura 48: Interruptores de filtros, "alpha" y periodo.	44
Figura 49: Rutas de entrada y salida	44
Figura 50: Bloques de "finished late"	45
Figura 51: Bloques de periodo	45
Figura 52: Escritura de señal analógica.....	46
Figura 53: Comienzo de la escritura digital.....	46
Figura 54: Parte central de la escritura digital	46
Figura 55: Final de la escritura digital	47
Figura 56: Estructura para leer señales de los sensores	47
Figura 57: Estructura de generación del fichero txt.....	47
Figura 58: Bucle de eventos para control de seguridad y acceso	48
Figura 59: Bucle de evento para el "logout"	49
Figura 60: Bucle de control de caudal.....	50
Figura 61: Bloques relativos al filtrado.....	50
Figura 62: Bloques relativos a la referencia	51
Figura 63: Bloques de rangos y parámetros PID	52
Figura 64: Bloques de control auto/manual	52
Figura 65: Vista de la ventana del proyecto.....	53
Figura 66: Interfaz del VI remoto	53
Figura 67: Bucle temporal del VI remoto	54
Figura 68: Código del PID de caudal y sus entradas/salidas	55
Figura 69: Código del PID de nivel y sus entradas/salidas	56
Figura 70: Inicio código PID.....	57
Figura 71: Núcleo del código PID	57
Figura 72: Final del código PID	57
Figura 73: Código PID calculado para caudal	58
Figura 74: Código PID calculado para nivel	58
Figura 75: Rango SP para caudal	58
Figura 76: Rango SP para nivel.....	58

1.-Objeto del proyecto

EL objetivo del proyecto es el desarrollo de una aplicación en Labview que permita el control automático de la planta piloto de nombre UniPro situada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la UPV, y que se puede ver en la figura 1.

La planta es un circuito hidráulico cerrado en el que buscamos controlar tanto el nivel de un depósito principal, como el caudal existente en la tubería de entrada a dicho depósito. Para ello se utilizarán dos electroválvulas, las cuales controlan cada una de estas dos variables.

Para el desarrollo de la aplicación se utilizará principalmente el software LabVIEW de National Instruments, con apoyo de Matlab de MathWorks para la identificación de modelos y diseño de controladores.

1.1.-Especificaciones del cliente

Se busca que la aplicación desarrollada realice el control automático mediante controladores PID. La aplicación deberá contener una interfaz que permita monitorizar y manipular el funcionamiento de la planta, e incorporará una serie de funciones para ello:

- Control de acceso y seguridad
- Control remoto
- Filtrado
- Generación de perfiles para la referencia

Además de estas características, la interfaz permitirá poder alternar entre varios modos de funcionamiento, manipular los parámetros del control, definir rutas de entradas y salidas del sistema y monitorizar la información de forma esquemática y mediante gráficas.

1.2.-Resumen del procedimiento para el desarrollo del control automático

Los pasos para el desarrollo de este control serán:

- Realizar ensayos para determinar la velocidad de llenado y vaciado del depósito C1 en función del grado de apertura de las válvulas controladas.
- Realizar ensayos que recojan la respuesta del caudal y el nivel ante entradas en escalón y guardar la información recogida.
- Mediante Matlab, llevar el punto de equilibrio de las señales a cero e importar los datos a la herramienta Ident.
- Mediante Ident, obtener varios modelos matemáticos que describan el comportamiento del caudal y el nivel ante variaciones en las válvulas.
- En función de los parámetros de estos modelos, obtener los controladores pertinentes mediante las tablas de Ciancone.

- Comprobar el correcto funcionamiento de los controladores y validar su comportamiento mediante la herramienta Simulink de Matlab

2.-Descripción de la planta



Figura 1: Foto de la planta piloto

El esquema básico de funcionamiento de la planta consiste en un circuito cerrado con dos depósitos, comunicados entre ellos por dos sistemas de tuberías. En cada una de estas vías de comunicación encontramos una bomba y una electroválvula que controlan el flujo de agua en el circuito.

Este sistema hidráulico contiene varios subsistemas susceptibles de control.

Los dos lazos que se tratarán serán el de caudal y el de nivel.

El de caudal es un sistema cuyo control se realizará mediante un sensor de caudal.

El de nivel es un sistema en el que encontramos el caudal como perturbación, y se controlará con ayuda de un sensor de nivel.

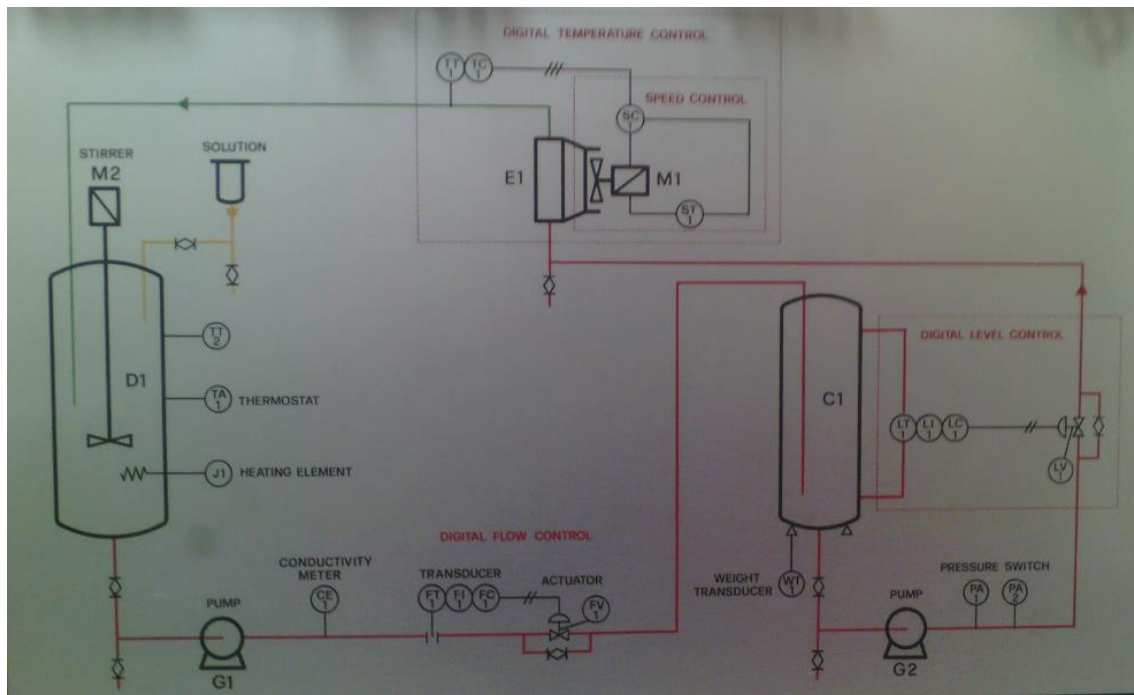


Figura 2: Esquema de planta piloto aportado por el fabricante de la planta.

En la Figura 2 se encuentran los elementos principales del sistema a controlar, así como los necesarios para este control.

G1: Bomba hidráulica 1.

FT1: Transmisor de caudal.

FV1: Electroválvula 1.

C1: Depósito principal respecto al cual se realiza el control de nivel.

LT1: Transmisor de nivel.

G2: Bomba hidráulica 2.

LV1: Electroválvula 2.

D1: depósito secundario, que no interviene en ningún lazo de control.

El resto de elementos no descritos o bien pertenecen al lazo de temperatura o bien no son operativos, como es el caso del transductor de peso WT1.

Respecto al lazo de caudal, sus entradas son G1 y FV1, y su salida FT1.

Respecto al lazo de nivel, sus entradas son G2 y LV1, y su salida LT1.

2.1.- Descripción de las electroválvulas

Ambas válvulas trabajan entre 0 y 10 voltios, haciendo variar el grado de apertura de la válvula entre un 0% y un 100%

Las dos son de funcionamiento neumático y, dado que su comportamiento es no lineal, se han realizado ensayos de llenado y vaciado para determinar su influencia sobre el sistema en función de su grado de apertura.

Por razones prácticas, los ensayos de llenado se han realizado desde la situación del depósito C1 totalmente vacío hasta que el nivel del agua alcanzaba el comienzo de la tubería de llenado (situación que corresponde con la medida en voltios de 4,15 en el sensor de nivel). Para los ensayos de vaciado se ha realizado el proceso opuesto por el mismo motivo.

2.1.1-Válvula FV1 (llenado)

La tabla 1 muestra el tiempo de llenado del depósito C1 en función del grado de apertura de la válvula FV1.

Válvula FV1 (% apertura)	Tiempo de llenado (s)
30	295
40	135
50	70
60	45
70	33
80	26
90	20
100	19

Tabla 1: Tabla de llenado del depósito

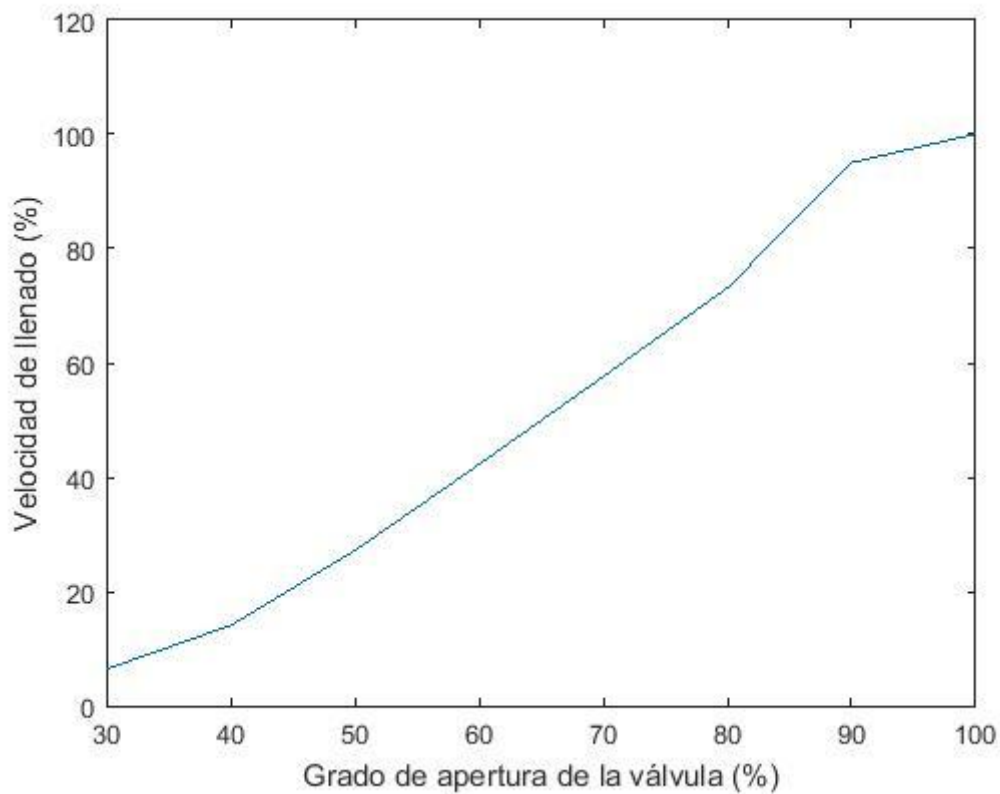


Figura 3: Gráfica de llenado del depósito

Se reescala el rango de funcionamiento, ya que para porcentajes de apertura iguales o menores al 20% el caudal es prácticamente cero.

2.1.1-Válvula LV1 (Vaciado)

Siguiendo un proceso análogo al anterior, se obtiene el tiempo de vaciado del depósito C1 en función del grado de apertura de la válvula LV1 (tabla 2).

Válvula LV1 (% apertura)	Tiempo de vaciado (s)
20	253
30	167
40	87
50	55
60	39
70	28
80	24
90	22
100	20

Tabla 2: Tabla de vaciado del depósito

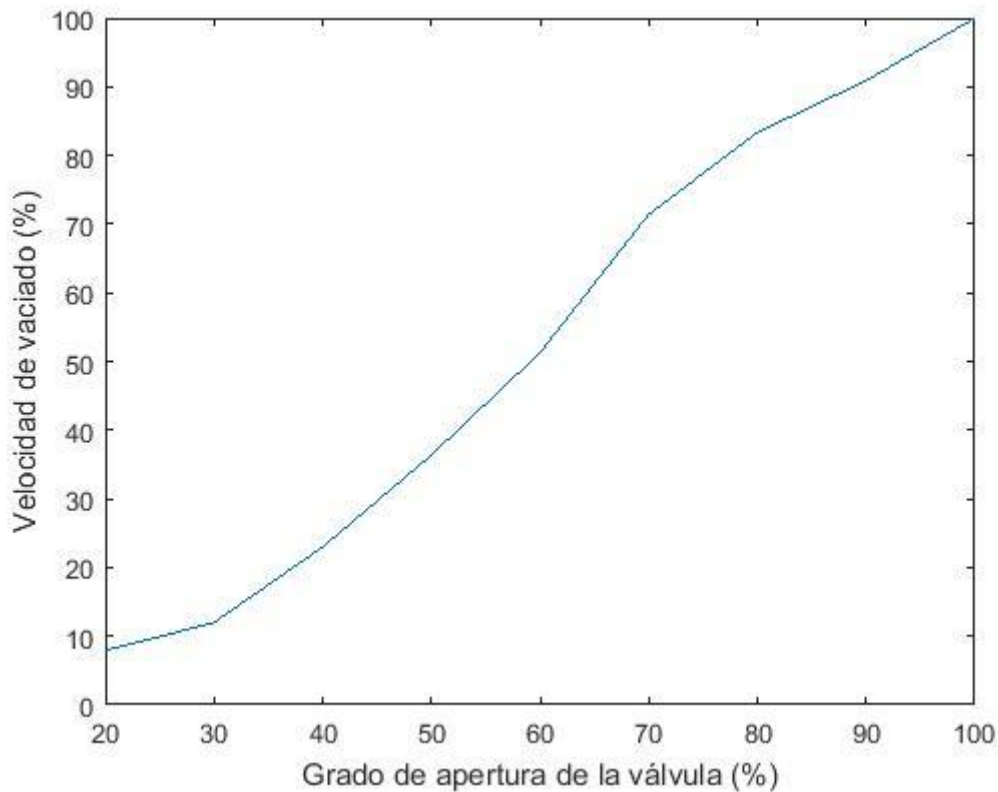


Figura 4: Gráfica de vaciado del depósito

Se reescala el rango de funcionamiento al igual que en el apartado anterior.

2.2.-Descripción de los sensores

Tanto el sensor de caudal como el de nivel tienen salidas a 4-20 mA, que traducidas a voltaje nos da un rango entre 2 y 10 Voltios.

2.2.1-Sensor de nivel

Se trata de un sensor que mide la diferencia de presión entre dos puntos del tanque C1

Se ha comprobado experimentalmente que con el depósito C1 vacío la media es efectivamente de 2 voltios, con el depósito lleno es de 10, y entre ambos estados la medida evoluciona de forma lineal sin problemas.

2.2.2.-Sensor de caudal

Se trata de un sensor que mide la diferencia de presión entre dos puntos del conducto que va del depósito D1 al C1.

Durante el ensayo de llenado también se obtuvieron los datos relativos a la media del sensor de caudal, los cuales se muestran en la tabla 3.

Válvula FV1 (% apertura)	Medida sensor caudal (V)
30	2,08
40	2,35
50	2,95
60	4,4
70	7,05
80	10
90	10
100	10

Tabla 3: Tabla de medidas del sensor de caudal

Considerando que 2 Voltios corresponde a un 0% de caudal y 10 V un 100%, la respuesta es la siguiente.

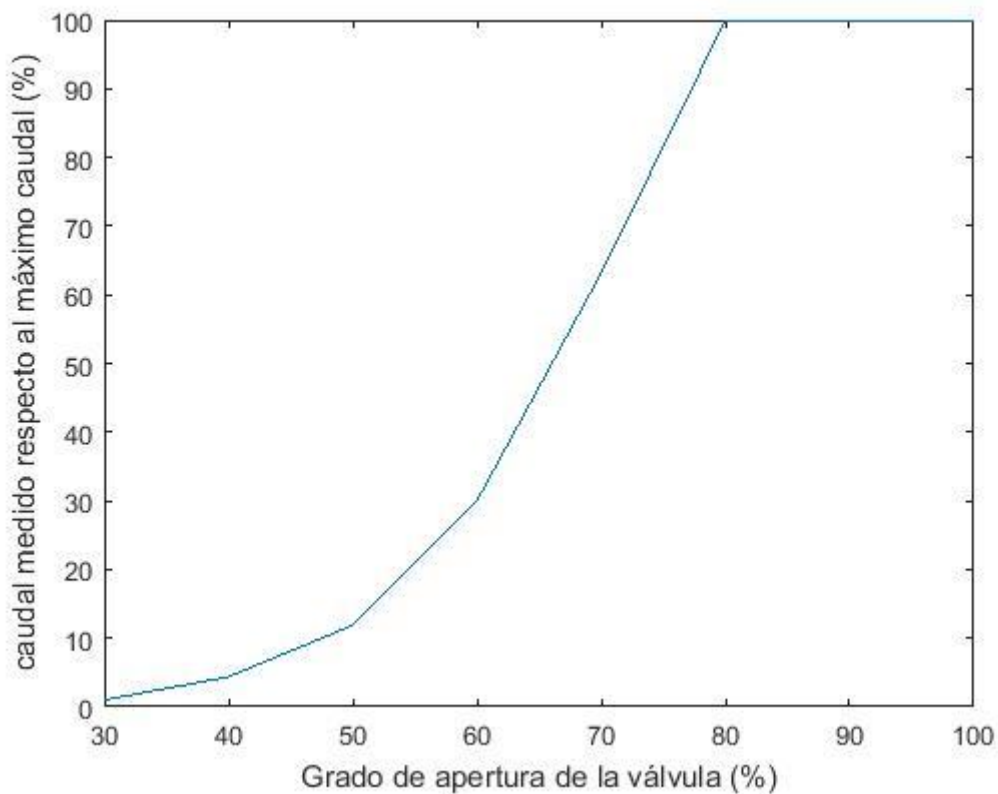


Figura 5: Gráfica de medidas del sensor de caudal

Como se puede observar en la figura 5, por debajo de 30 y por encima de 80 el sensor satura. Comparándolo con la respuesta real obtenida queda de manifiesto la no linealidad en el funcionamiento del sensor de caudal.

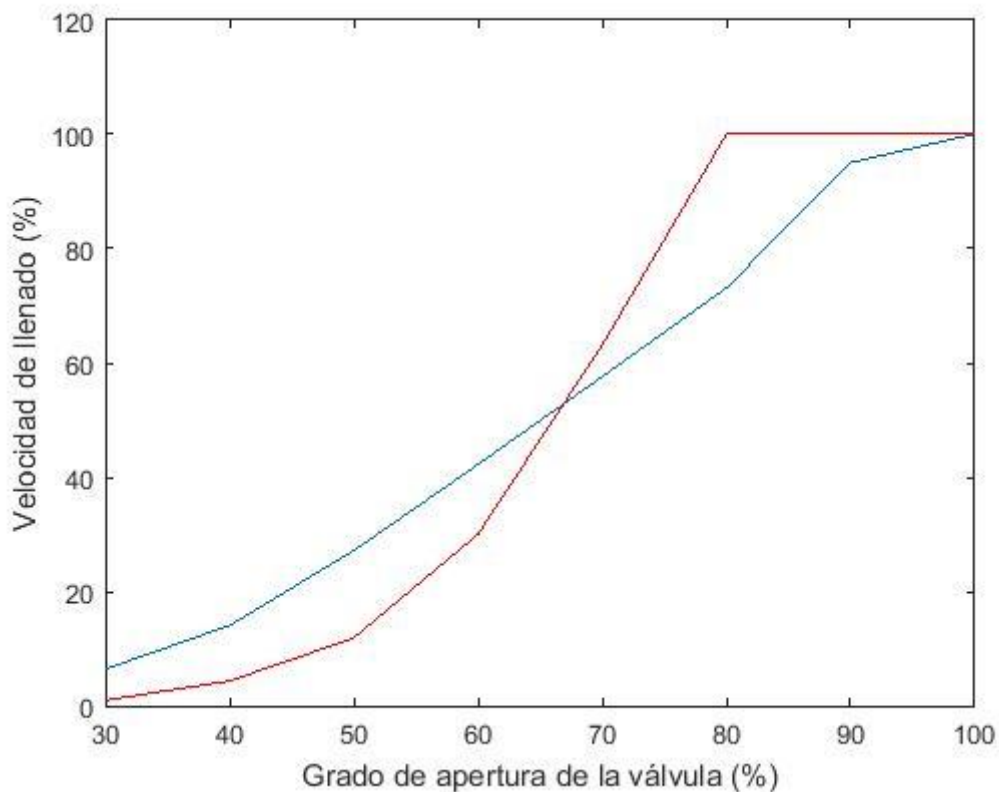


Figura 6: Comparación de sensor de caudal con medidas de llenado (sensor en rojo, medidas de llenado en azul).

Dado que el sensor no diferencia medidas entre el 80% y el 100% de grado de apertura, se limitará el rango de actuación de la válvula.

3.- Identificación de modelos de la planta

El primer paso para desarrollar un control automático de la planta es la identificación de los modelos que definen el comportamiento del caudal y el nivel ante entradas en escalón.

3.1.- Identificación del caudal

El primer paso es asegurarse de que la bomba 2 está parada y la válvula 2 completamente cerrada para que el segundo tramo de la instalación no influya en la identificación del modelo.

Seguidamente con la bomba 1 encendida se establece un 60% de apertura de la válvula 1, este será nuestro punto de equilibrio. A partir de aquí se una serie de escalones tanto positivos como negativos respecto a este punto.

Para la identificación, en nuestro caso, se ha decidido que estos escalones sean del 20% ya que buscamos un control robusto que funcione correctamente al alejarnos del punto de

funcionamiento. Si aun así el sistema no respondiese correctamente, se repetiría la identificación con diferentes puntos de funcionamiento.

Al acabar el proceso, obtenemos el fichero txt que contiene los datos necesarios y lo cargamos en Matlab.

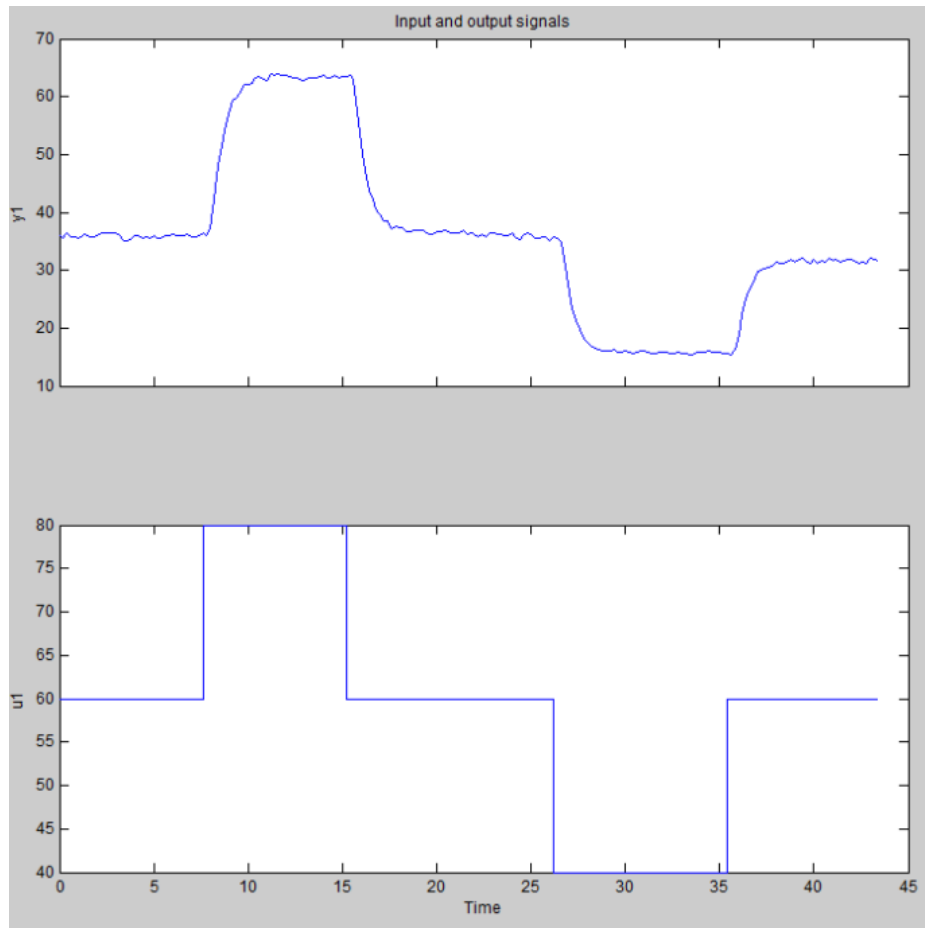


Figura 7: Efecto de escalones sobre el caudal

En la figura 7 podemos ver los escalones y su respuesta sobre el caudal. Ambas señales están contenidas en vectores, a los cuales hay que restar el valor inicial de la señal para su correcta linealización.

Tras esto, se importan los datos en la herramienta ident de Matlab y se identifica el modelo, bajo la premisa de que es un sistema de primer orden con un posible retardo.

En nuestro caso se ha obtenido 3 modelos (ecuaciones 1, 2 y 3). Para el primero de ellos se ha aplicado la herramienta ident a todo el vector de datos importado.

Para las otras dos se ha hecho un recorte, de forma que analizamos el escalón de subida y el escalón de bajada por separado. El motivo de esta decisión es que al provocar unos escalones del 20%, es muy fácil que un modelo general no sea válido para todo el rango de funcionamiento del modelo.

$$G(s) = \frac{Kp}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \quad Kp = 1.1952 \quad \tau = 0.804 \quad \theta = 0.3672$$

Ecuación 1: Parámetros modelo caudal general

$$G(s) = \frac{Kp}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \quad Kp = 1.0066 \quad \tau = 0.49299 \quad \theta = 0.629$$

Ecuación 2: Parámetros modelo caudal inferior

$$G(s) = \frac{Kp}{\tau s + 1} e^{-\theta s}, \quad Kp = 1.3753 \quad \tau = 0.63623 \quad \theta = 0.4356$$

Ecuación 3: Parámetros modelo caudal general

Tras la identificación de los 3 modelos, los comparamos su respuesta tanto con la señal general como con los dos escalones por separado. Los resultados se pueden ver en la figura 8.

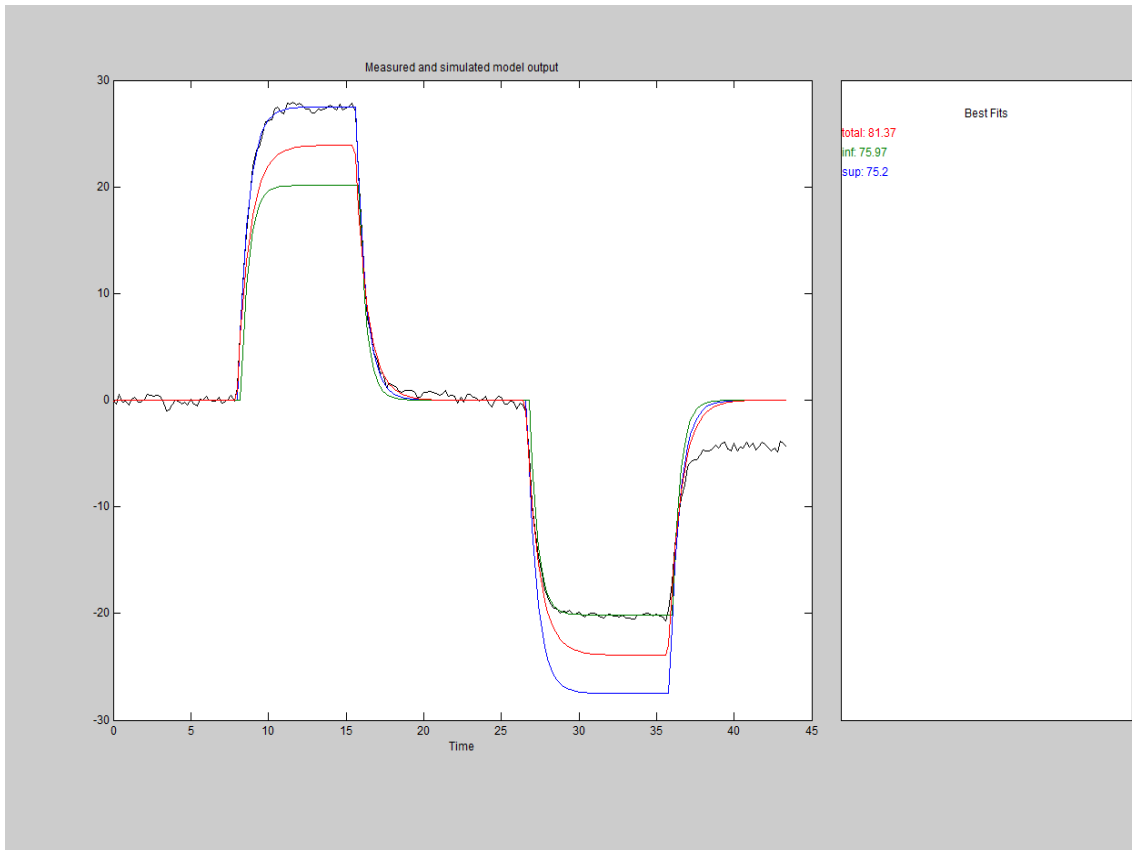


Figura 8: Comparación de modelos de caudal en todos los escalones (en rojo el modelo general, en verde el del escalón inferior y en azul el superior).

Como era previsible, los modelos inferior y superior se ajustan perfectamente a los escalones de donde han sido obtenidos. El modelo general no se ajusta perfectamente a ninguno de los dos debido a la no linealidad del sistema, sin embargo, es el que en conjunto se ajusta mejor a todo el sistema. Esto pone de manifiesto el comportamiento no lineal que presenta el proceso.

A continuación, en las figuras 9 y 10, se puede ver la comparación realizada en los escalones superior e inferior, donde se confirma lo comentado anteriormente.

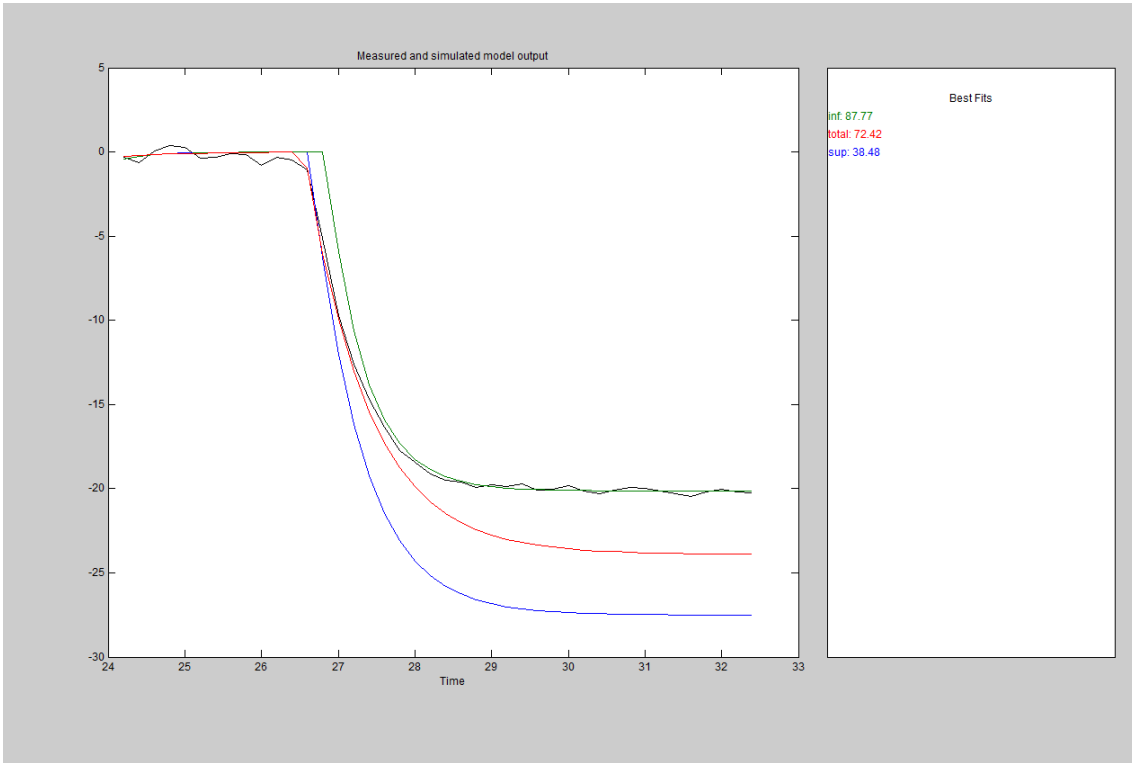


Figura 9: Comparación de modelos de caudal en escalón de bajada

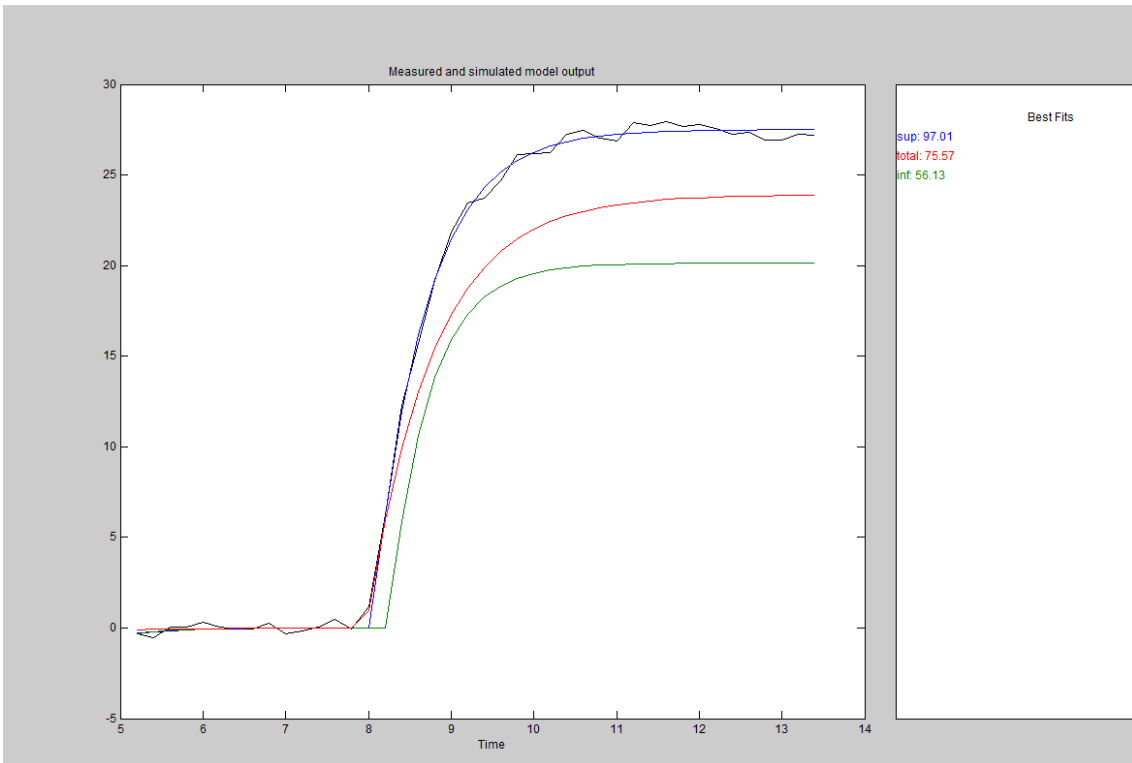


Figura 10: Comparación de modelos de caudal en escalón de subida

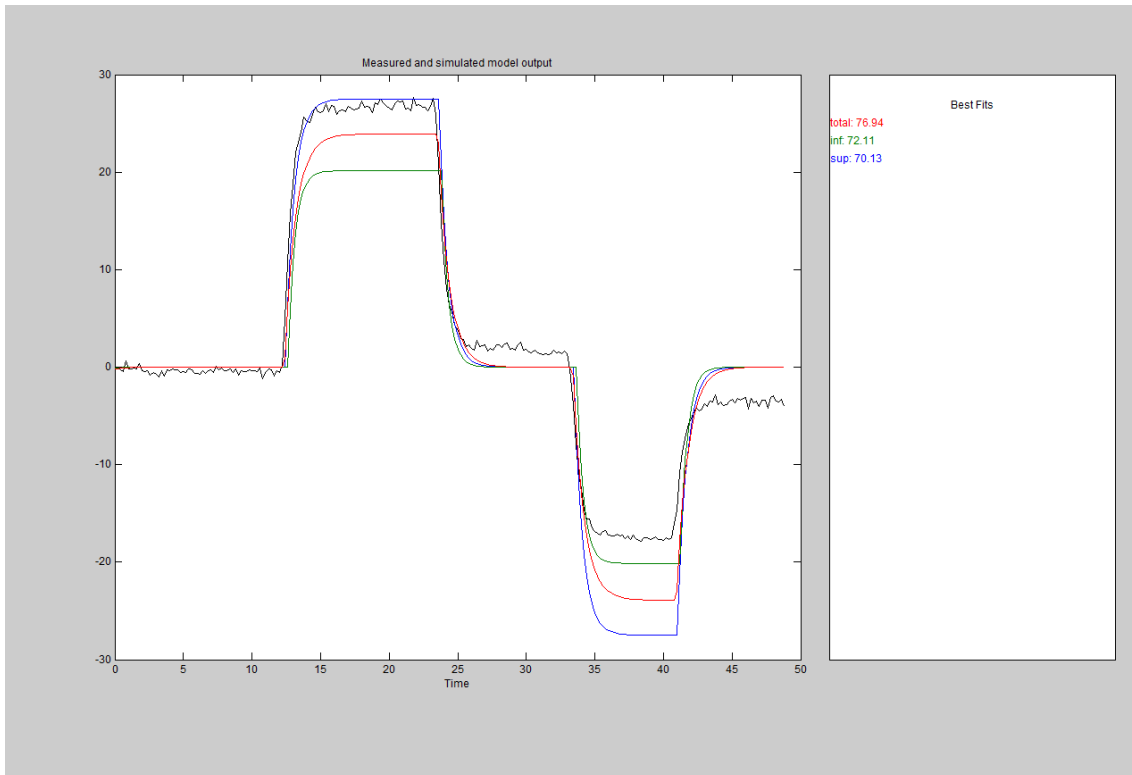


Figura 11: Validación de modelos de caudal con ensayo adicional

Para este caso se ha considerado interesante repetir el proceso de obtención de datos para realizar una validación de los modelos. Como se puede ver en la figura 11, el mismo patrón se repite.

Con esto queda acabada la identificación. Cuando obtengamos los controladores, probaremos su funcionamiento en el sistema real y según los resultados usaremos un solo conjunto de parámetros para todo el sistema o varios dependiendo del punto de funcionamiento.

3.2.-Identificación del nivel

Análogamente a la identificación del caudal, el primer paso será cerrar completamente la válvula 1 y asegurarnos de que la bomba 1 está parada, aunque en este caso hay un matiz a comentar.

El primero es que, mientras que desactivando el funcionamiento del tramo 2 se puede controlar el caudal de forma independiente, en este caso no es así. Ahora nos encontramos con un sistema

de primer orden con integrador, con la particularidad de que la válvula 2 solo controla la cantidad de agua que sale del depósito donde controlamos el nivel.

Los escalones positivos y negativos no harán aumentar o disminuir el nivel sino la velocidad de vaciado del depósito.

A continuación, en la figura 12, tenemos los datos obtenidos en este caso y de donde obtendremos los modelos del proceso.

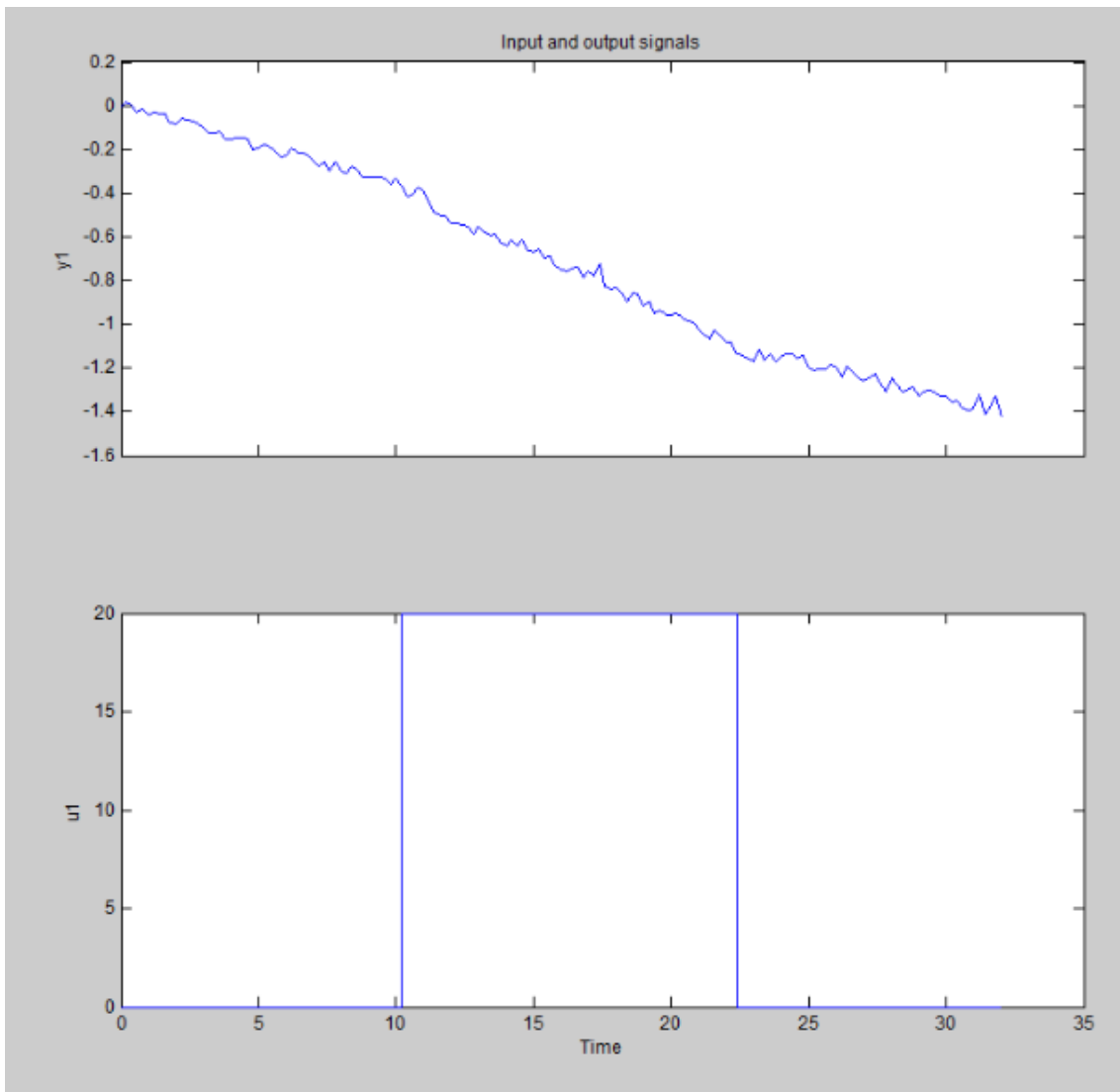


Figura 12: Efecto de escalones sobre el nivel

En este caso se han sacado dos modelos, referentes a cada uno de los dos escalones que existen, y que corresponden con las ecuaciones 4 y 5.

$$G(s) = \frac{Kp}{s(\tau s + 1)}, \quad Kp = -0.0035 \quad \tau = 0.0003$$

Ecuación 4: Parámetros modelo nivel 1

$$G(s) = \frac{Kp}{s(\tau s + 1)}, \quad Kp = -0.0025 \quad \tau = 0.00021$$

Ecuación 5: Parámetros modelo nivel 2

Como se puede comprobar en la comparación que se muestra en la figura 13, el modelo número 1 es que el mejor se ajusta a la respuesta real del sistema.

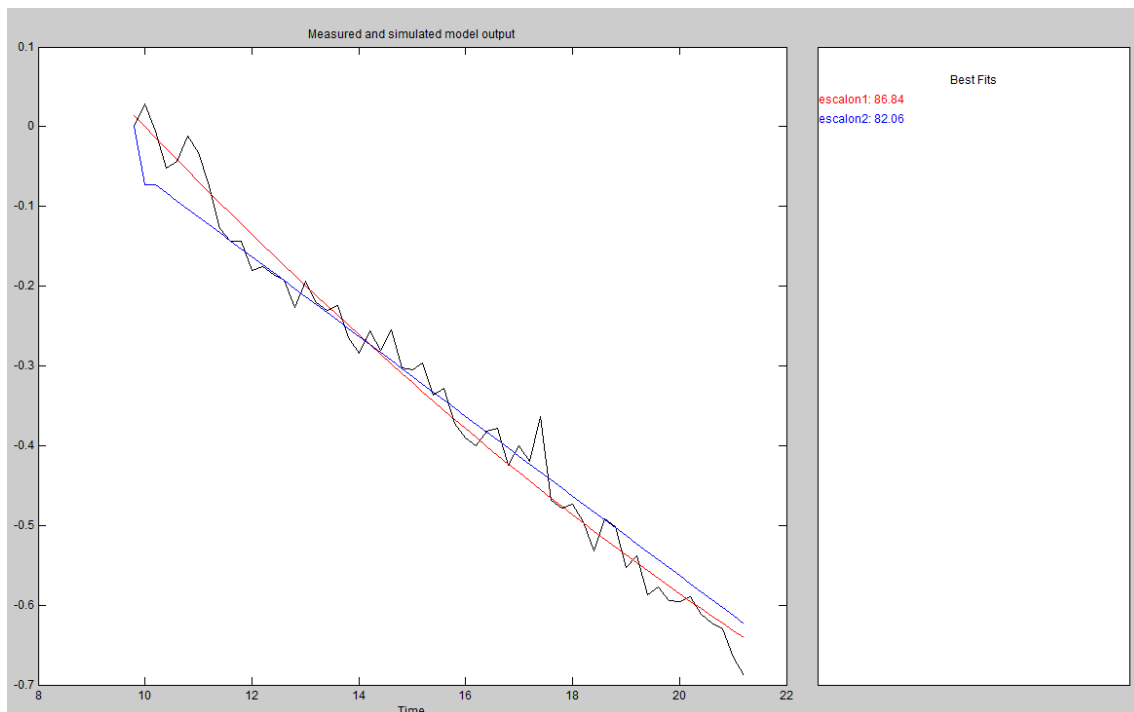


Figura 13: Comparación de modelos de nivel

Tras la selección del modelo número 1 se ha comparado su respuesta con la de la señal real obtenida durante todo el ensayo, como se puede ver en la figura 14.

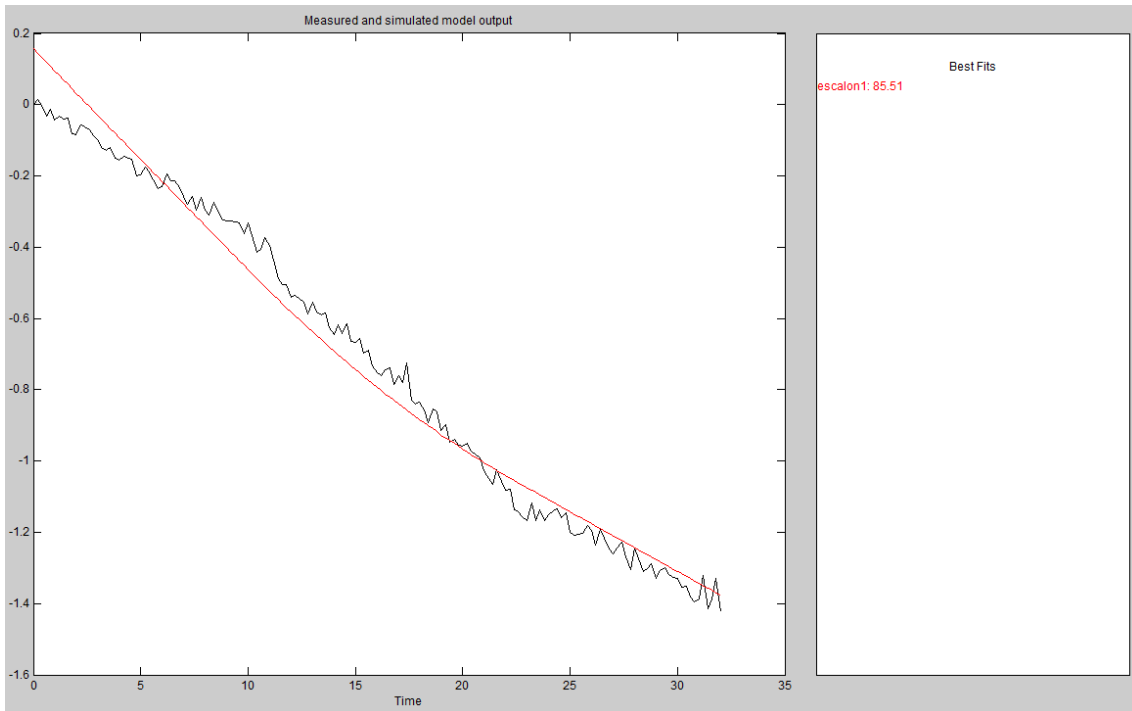


Figura 14: Comparación del modelo elegido con la señal real

Posteriormente, con un segundo ensayo en el que se filtró la señal, se volvió a comparar el modelo con la misma. Al no presentarse el rizado, se puede observar en la figura 15 como la respuesta del modelo se ajusta mejor a la señal real.

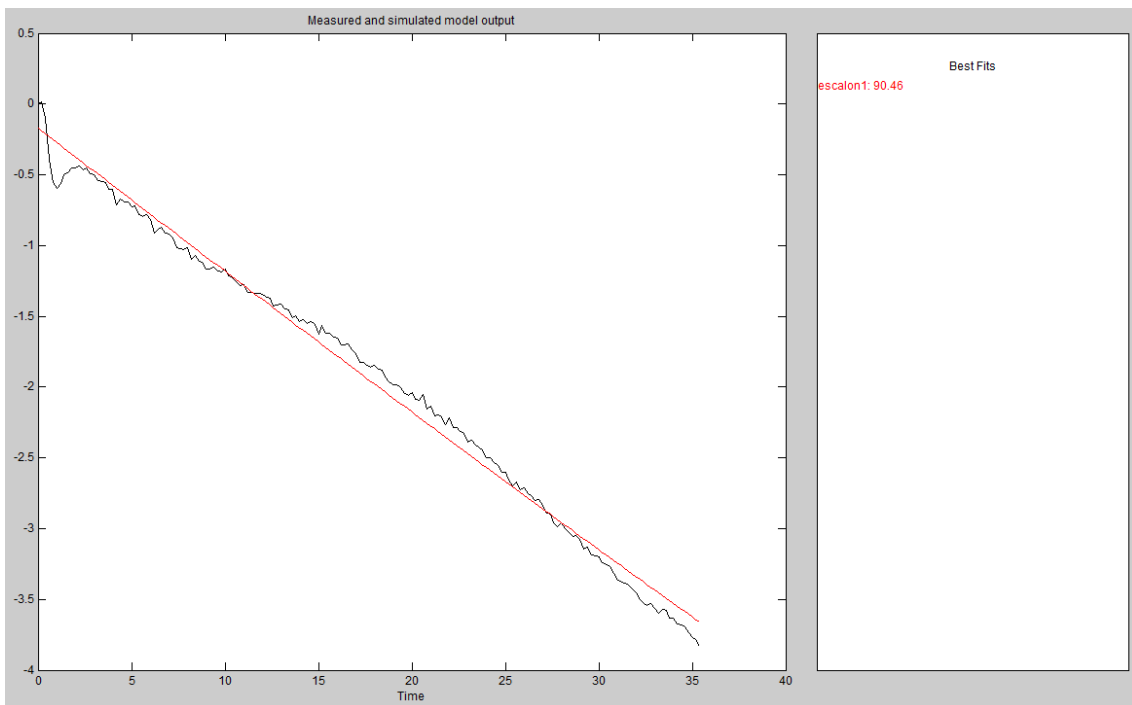


Figura 15: Comparación de modelos de nivel en escalón de bajada

4.-Diseño de los controladores

La primera idea fue utilizar la herramienta Rtool de Matlab, que es bastante exacta a la hora de proporcionar controladores que cumplan unas especificaciones concretas.

Como en este caso no ha habido ninguna especificación concreta a cumplir en términos cuantitativos (tiempo de establecimiento, sobreoscilación...), se tomó la decisión de utilizar las tablas de Ciancone y, una vez obtenidos los parámetros, ajustarlos para que el funcionamiento fuese robusto y sin inestabilidades en ningún punto de funcionamiento.

4.1.-Diseño del controlador de caudal

Mediante los parámetros del modelo obtenidos con la herramienta ident, se entra a las tablas de Ciancone y se obtienen los parámetros de los controladores que se muestran en la tabla 4.

Parámetros	Modelo escalón superior	Modelo escalón inferior
Kc	0,654	0,75
Ti	0,8	0,841
Td	0,06	0,11

Tabla 4: Tabla de parámetros de controladores del caudal

Seguidamente, se introducen estos parámetros en nuestro PID de Labview y comprobamos la respuesta del sistema. Lo primero que se ha hecho es dos ensayos, correspondientes a los dos controladores de la tabla anterior. El resultado es un sistema con fuertes oscilaciones como se puede comprobar en las figuras 16 y 17:

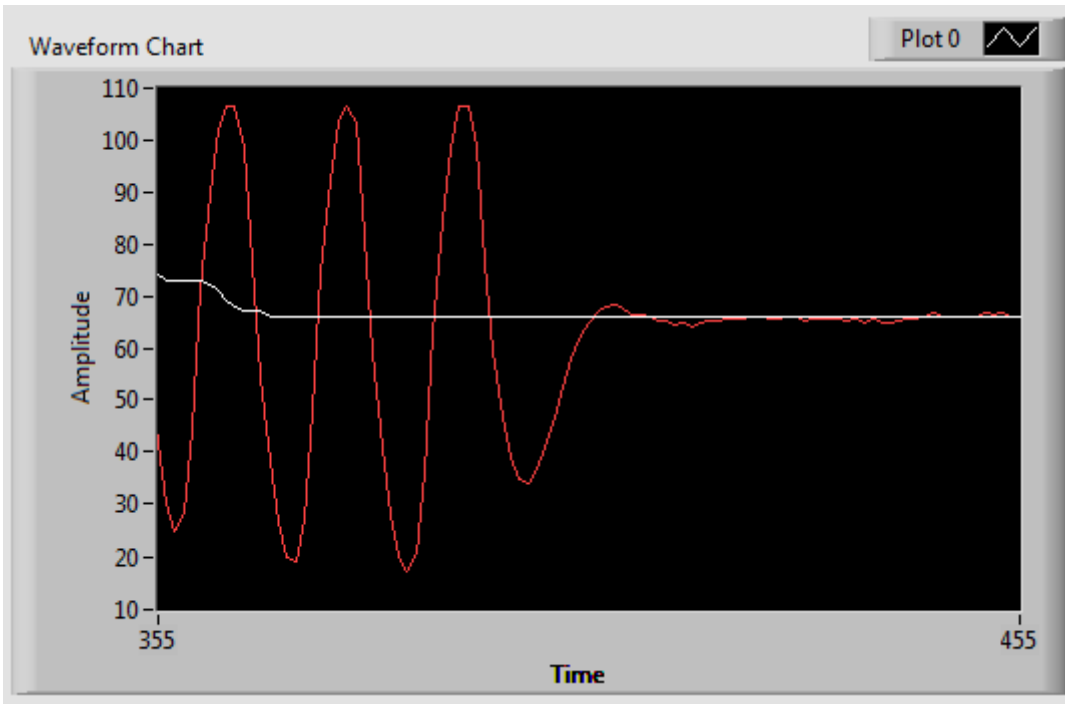


Figura 16: Gráfica de respuesta de nivel con controlador del escalón superior

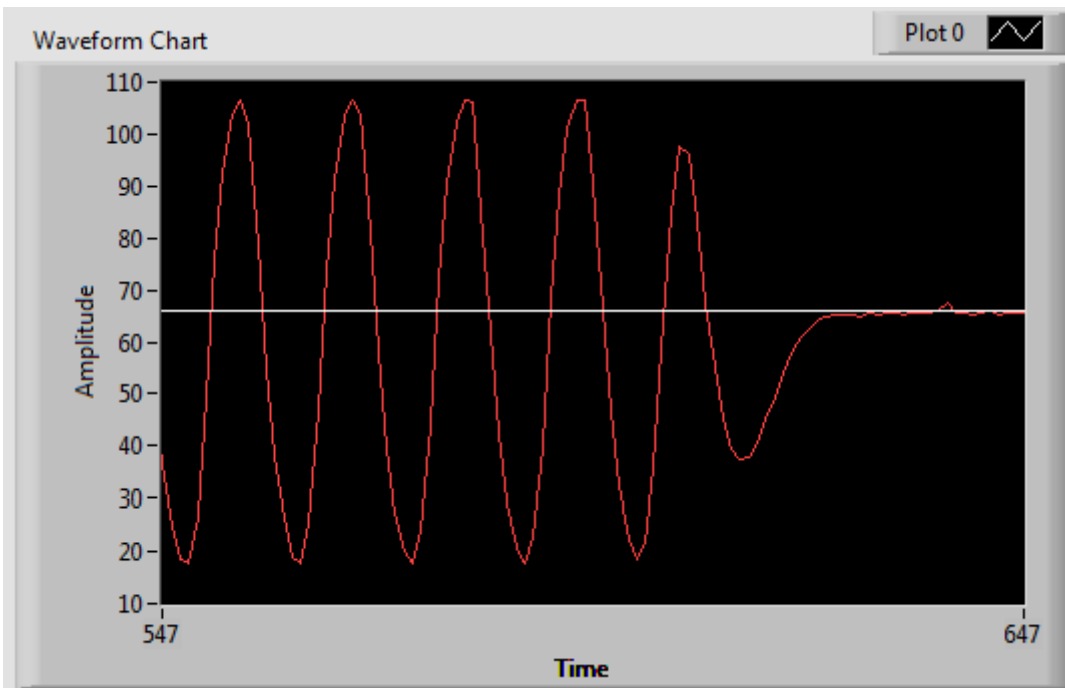


Figura 17: Gráfica de respuesta de nivel con controlador del escalón inferior

La solución adoptada ha sido disminuir manualmente el parámetro proporcional del PID hasta obtener la respuesta deseada. El valor que finalmente se ha seleccionado ha sido 0,2.

Las figuras 16 y 17 corresponden a la respuesta producida por los parámetros iniciales, sin embargo, fijándose en la parte final se puede ver el funcionamiento al haber introducido el valor de 0,2 en ese punto del proceso, el cual ya es correcto.

Dado que ambos controles han mostrado un comportamiento correcto tras ajustar la ganancia del sistema, y que el parámetro T_i es casi igual en los dos, se ha decidido finalmente utilizar un solo controlador.

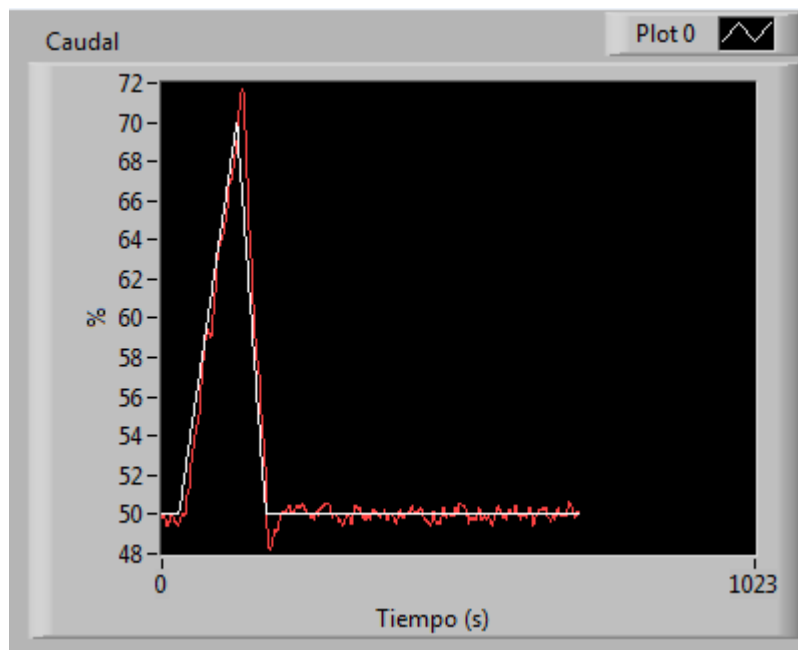


Figura 18: Gráfica de funcionamiento del caudal ante rampa

La figura 28 muestra como el caudal sigue de una manera rápida la referencia en rampa introducida. Ante cambios grandes de la referencia se produce sobreoscilación, aunque esta es breve y tiene un valor máximo de un 2%, como puede apreciarse en la imagen al final de la bajada en rampa de la referencia.

Para acabar, se ha utilizado simulink para comparar la respuesta real del sistema ante unos escalones con la que teóricamente tendría que producirse si el modelo representase fielmente la realidad. La estructura utilizada ha sido la que se ve en la figura 19:

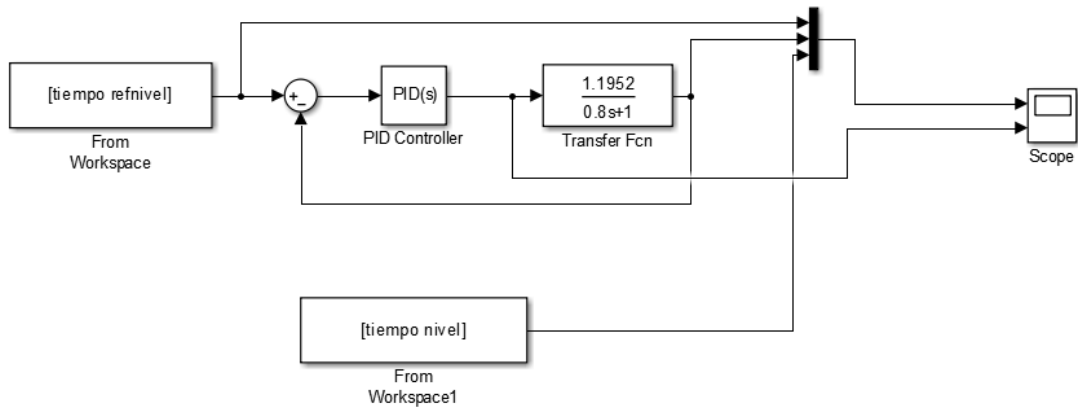


Figura 19: Estructura en simulink para caudal

A continuación se observan los resultados del “scope”.

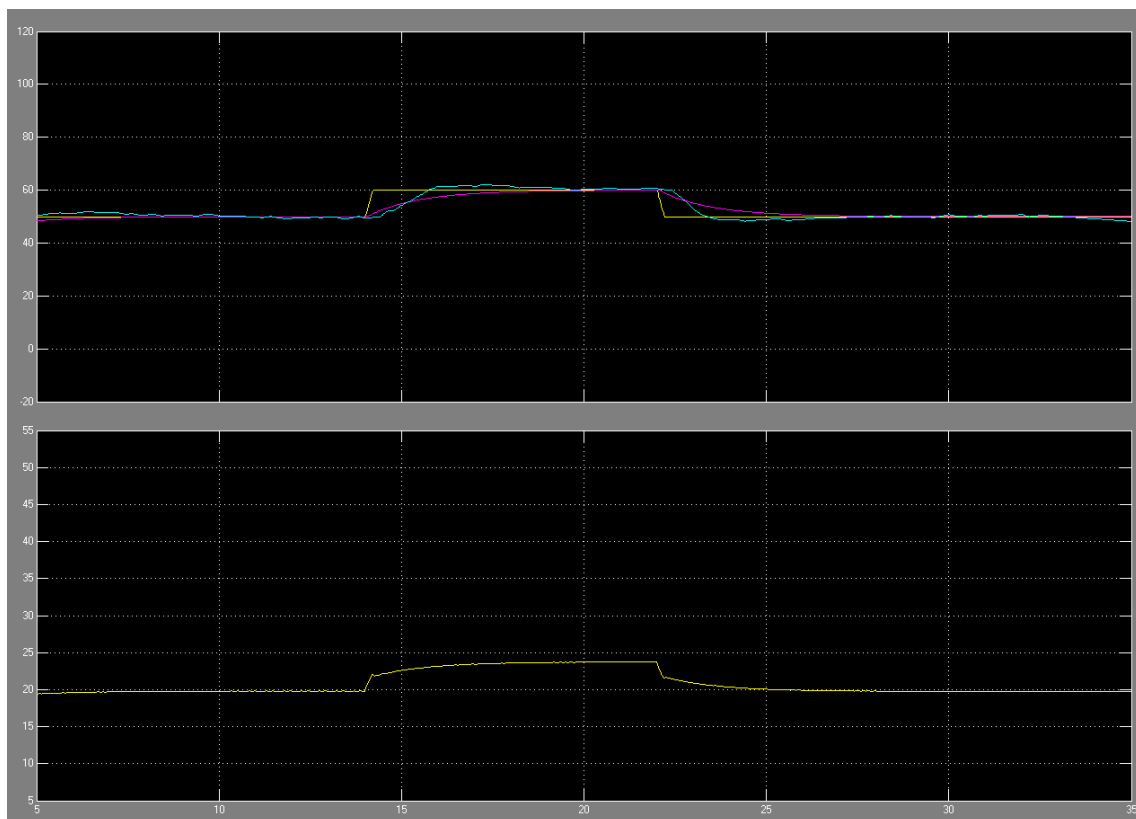


Figura 20: “Scope” de la simulación en simulink de la respuesta del caudal (señal real en azul, simulada en rosa).

Como se puede ver en la figura 20, las respuestas se parecen, aunque la real es ligeramente más rápida y también tiene una ligera sobreoscilación.

4.2.-Diseño del controlador de nivel

El proceso seguido es análogo al usado para obtener el controlador de caudal, aunque los resultados y la solución adoptada son muy diferentes debidos a las diferencias entre los modelos.

Primeramente, se busca controlar un proceso con comportamiento de primer orden con integrador, lo que implica que con un simple control proporcional se debería poder manejar el proceso con un error de posición cero sin necesidad de un término integral en el controlador.

Mediante las tablas de Ciancone se obtiene el controlador proporcional que será $K_c = -270$.

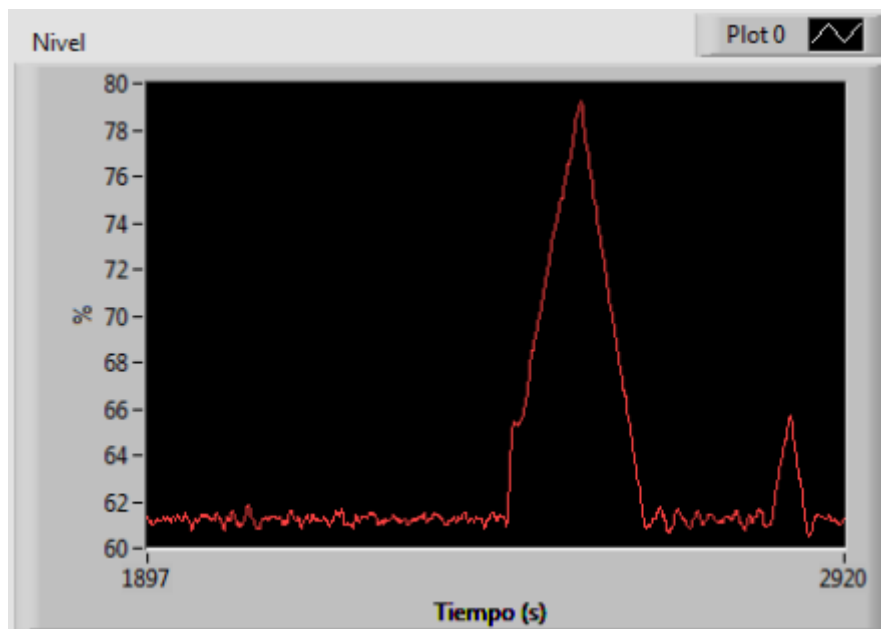


Figura 21: Error de posición en el nivel

Con la referencia fijada en 60%, se comprobó que el sistema era todo lo rápido posible a la hora de estabilizarse, pero se percibió también un error de posición constante que según lo comentado anteriormente no tendría que existir. Los grandes picos que se observan en la figura 21 son pruebas manuales que se realizaron para comprobar que se mantenía el error.

La explicación es que la premisa de que teóricamente no habría error de posición era falsa. En un proceso estándar es cierto que en bucle cerrado el sistema no tendría error de posición, pero la existencia del caudal como perturbación crea en bucle cerrado un error proporcional a esa perturbación, como se puede ver en las dos imágenes siguientes.

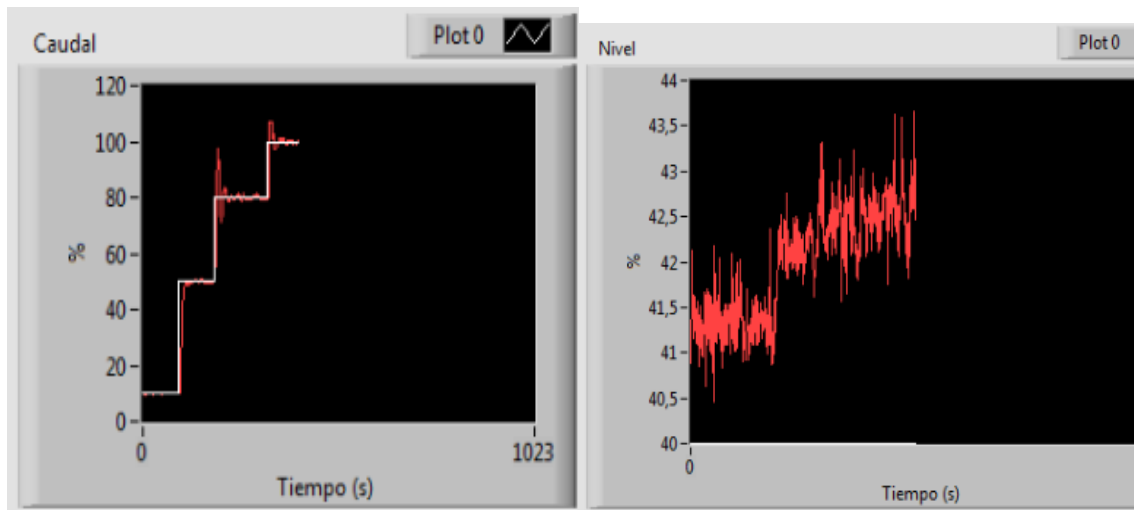


Figura 22: Evolución del error del nivel en función del aumento del caudal

Con la prueba experimental que se muestra en la figura 22 se confirma lo explicado. Existe un error de posición que es proporcional al caudal, el cual se comporta como perturbación.

La primera solución pensada fue añadir al controlador el término integral, también a través de las tablas de Ciancone, para que se eliminase este error. Se obtuvo un $TI=0,7$.

Con el nuevo controlador el sistema funcionaba bien y eliminaba el error de posición para pequeños escalones, pero creaba inestabilidades para escalones grandes por las cuales tardaba mucho tiempo para eliminar el error, lo cual implicaba que la mayor parte del tiempo estábamos trabajando con un error incluso mayor que el obtenido con un simple proporcional.

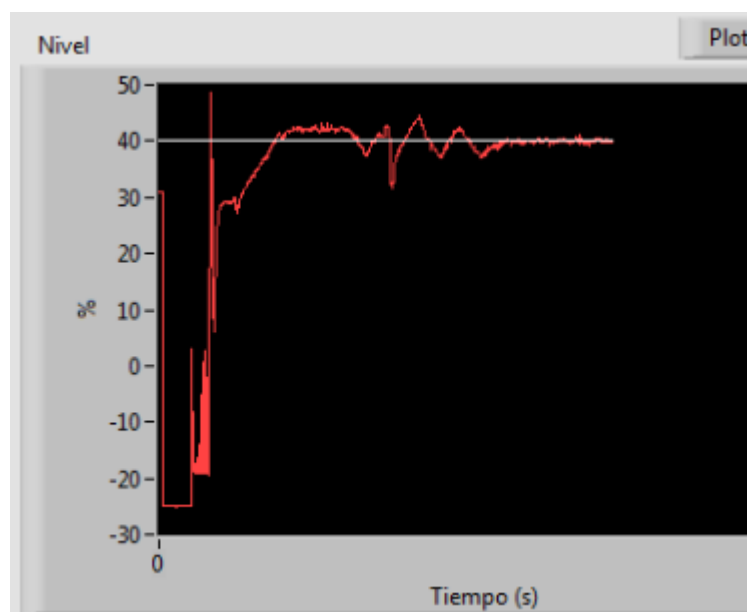


Figura 23: Funcionamiento del nivel introduciendo T_i en el controlador

Se fue aumentando el T_i para disminuir la acción integral hasta llegar a $T_i = 5$, donde el problema seguía y el tiempo de establecimiento empezó a aumentar demasiado, como se puede apreciar en la figura 23.

Se ajustó el proporcional de forma similar para intentar obtener una respuesta menos agresiva. El K_c que inicialmente estaba en -270 se fue disminuyendo hasta llegar a un valor 10 veces menor ($K_c = -27$). A partir de este punto llegamos a la misma situación que con el ajuste del T_i , y se dejó de disminuir el proporcional debido al aumento del tiempo de establecimiento.

Puesto que ni el P ni el PI cumplieron los objetivos, se pensó programar un sistema que aprovechara las características de cada uno.

Se decidió introducir en el código del PID un control en el que para errores mayores al 3% el sistema trabajase con el proporcional y cuando la señal se acercase a la referencia, siendo el error menor al 3%, el sistema trabajase con el PI.

Se eligió el valor de 3% porque estaba por encima del máximo error en régimen permanente observado.

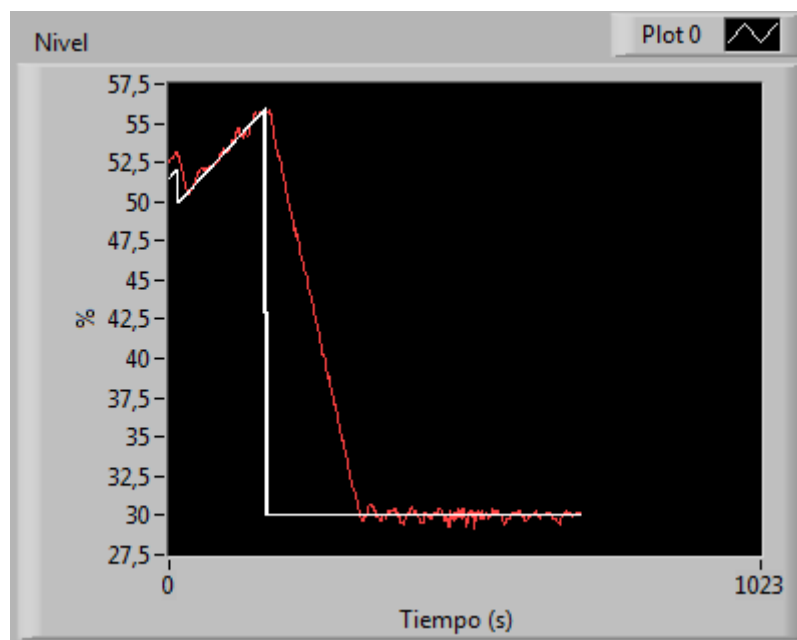


Figura 24: Funcionamiento del nivel ante rampa y escalón con controlador definitivo.

La figura 34 muestra la respuesta del nivel con el nuevo control programado ante una referencia en rampa. La señal sigue correctamente y bastante rápido la rampa inicial. Posteriormente, se produce un escalón que hace que el nivel baje con la máxima velocidad posible. Al alcanzar la referencia, el nivel se sitúa en la misma sin las inestabilidades observadas con el control anterior.

En la figura 25 se muestra la comprobación en simulink, aunque como para ello teníamos que desactivar la parte 1 de la planta (bomba 1 y válvula 1), simplemente se pudo comprobar que el comportamiento del proporcional era similar al simulado durante el vaciado del depósito.

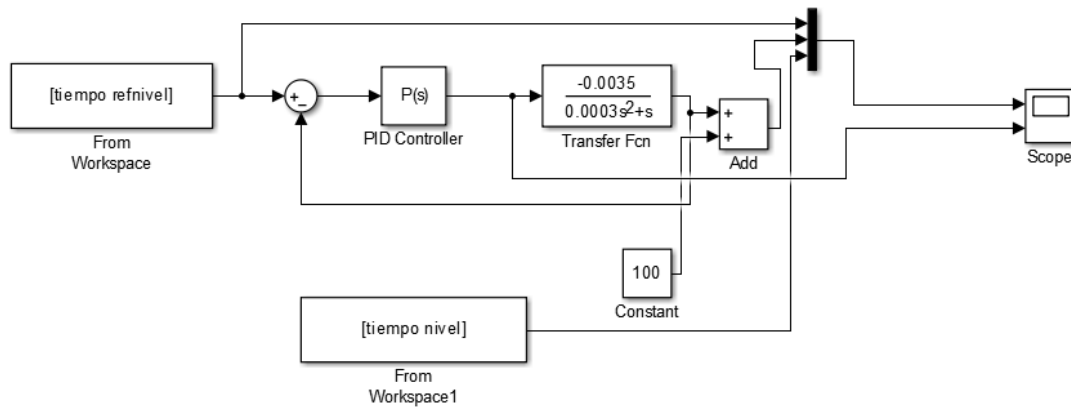


Figura 25: Estructura en simulink para nivel

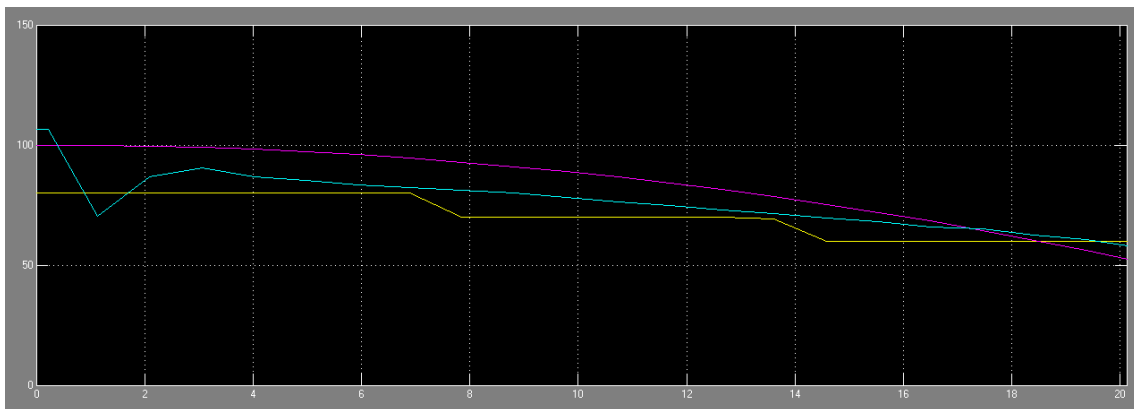


Figura 26: "Scope" de la simulación en simulink de la respuesta del caudal ((señal real en azul, simulada en rosa).

4.3.- Resumen de las soluciones adoptadas

Lo más característico del proceso seguido ha sido que las soluciones adoptadas para el control no han sido las previstas al comienzo.

Respecto al caudal, en un principio se pensó que el mayor problema a solucionar sería la no linealidad de la respuesta, que haría necesaria una planificación de ganancia. En la práctica el sistema se mostró inestable con los PID diseñados inicialmente para diferentes puntos de funcionamiento. Al corregir su ganancia para solucionarlo, los controladores obtenidos resultaron muy similares entre ellos y se optó por un solo PID que tenía una respuesta correcta.

Respecto al nivel, como se ha explicado en el apartado de diseño se ha optado por programar un control que alterna entre controlador P y PI. Se pensó en solo utilizar un PI y buscar unos parámetros que dieran un buen balance entre velocidad y eliminación del error, pero no se consiguió mejorar la respuesta del control que se programó. Además, teniendo en cuenta que está la opción en la interfaz de desactivar el control programado, en un momento dado si es necesario se puede funcionar mediante un PID con los parámetros que se requieran.

5.-Aplicación en Labview

En este apartado se explica cómo está organizada la interfaz y que elementos la componen. También se introduce la estructura de bloques con la que está programada. Toda esta información está complementada en los anexos.

5.1.-Interfaz

El objetivo del diseño de la interfaz realizada es ser funcional para cualquier tipo de usuario que la utilice. La aplicación permite el control y visualización de datos de forma numérica, pero también a través de gráficas o incluso de una forma más visual y esquemática, como se puede observar en la imagen. Las funciones de la interfaz están disponibles o no en función de tres niveles de acceso: ingeniero, operario y usuario.

Hay dos partes principales en la interfaz, visible en la figura 27: la barra izquierda que se muestra en todo momento y el panel central que cambia según la pestaña seleccionada.

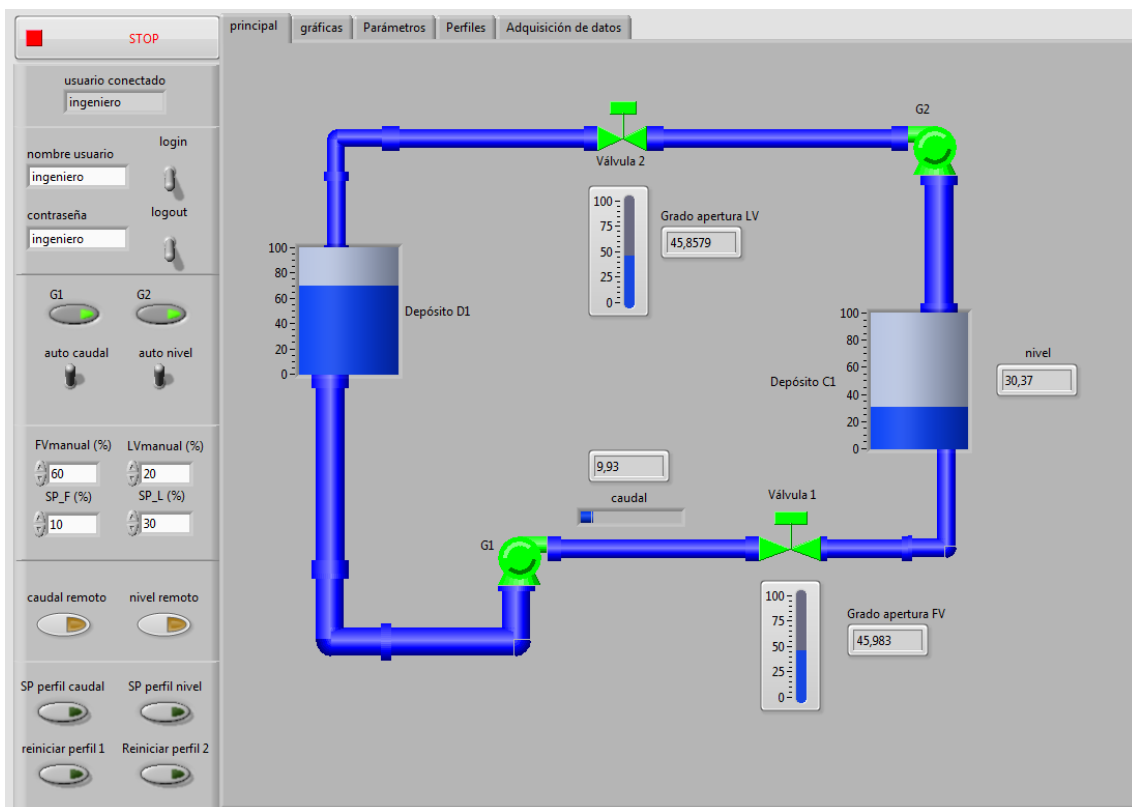


Figura 27: Vista de la pestaña principal de la interfaz en funcionamiento

En la barra izquierda de la figura 27 se sitúan los principales controles de la interfaz. Esta barra está siempre visible. Las funciones disponibles en esta barra son las siguientes, empezando por la parte superior:

- Botón de Stop: detiene el sistema y guarda los datos recogidos.

- Indicador de usuario conectado.
- Casillas para introducir nombre de usuario y contraseña, así como los interruptores para hacer “login” y “logout”.
- G1 y G2: activan las bombas de la planta piloto.
- Auto caudal/nivel: ponen en funcionamiento el control PID automático.
- FV/LV manual: permiten introducir valores a la actuación de las válvulas cuando el modo automático está apagado.
- SP_F y SP_L: recogen, respectivamente, el valor de la referencia deseada para el caudal y el nivel.
- Botones de control remoto: cuando están encendidos, hacen que la referencia se introduzca desde otra interfaz remota.
- SP perfil caudal/nivel: sustituyen la referencia manual por un perfil preestablecido que puede contener escalones y rampas.
- Reiniciar perfil 1/2: permiten reiniciar los perfiles diseñados en cualquier momento.

Todas las opciones de esta barra están disponibles para los niveles operario e ingeniero. Desde el nivel de usuario solo están disponibles los controles para “logearse” y las casillas para modificar la referencia.

La mayor parte de la interfaz la ocupa la ventana central que muestra diferente información según la pestaña que esté seleccionada. Las pestañas y su contenido son las siguientes:

- Pestaña principal: es la que está activa en la figura 27. Muestra el esquema visual de la planta en funcionamiento de sus señales así como el valor numérico de las mismas (caudal, nivel y apertura de las válvulas) en tiempo real.
- Pestaña “gráficas” (figura 28): muestra la evolución temporal del grado de apertura de las válvulas así como la del nivel y el caudal con sus respectivas referencias.

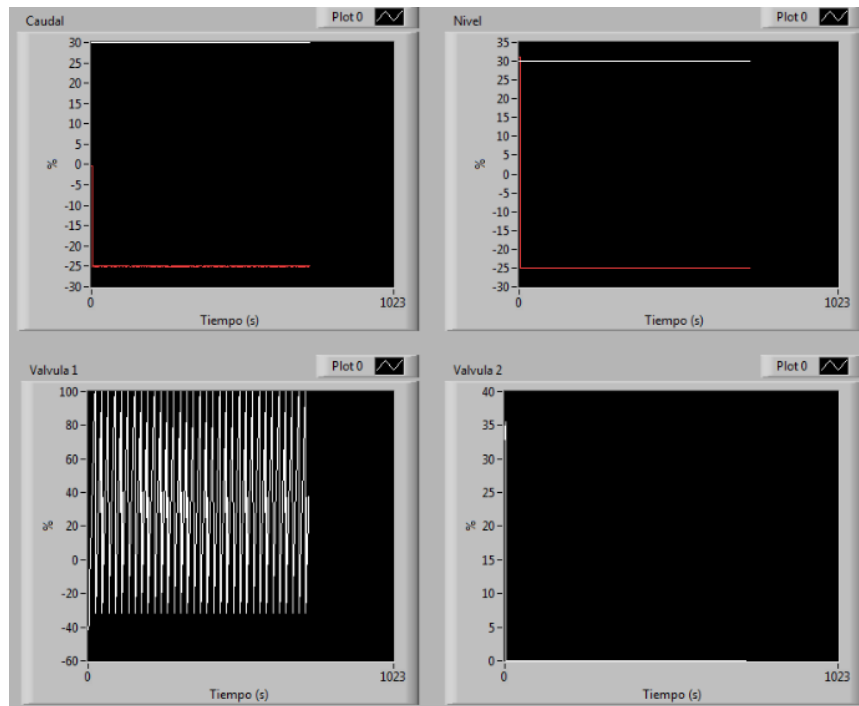


Figura 28: Contenido de la pestaña “gráficas”

- Pestaña “parámetros” (figura 29): permite modificar los parámetros de los PID que funcionan cuando “PID calculado” está desactivado. Cuando estos interruptores se encuentran activos el control funciona mediante los parámetros calculados en el apartado de diseño.

También permite activar los filtros, variar su parámetro “alpha” y el periodo, así como modificar los rangos de las referencias y los actuadores (válvulas).

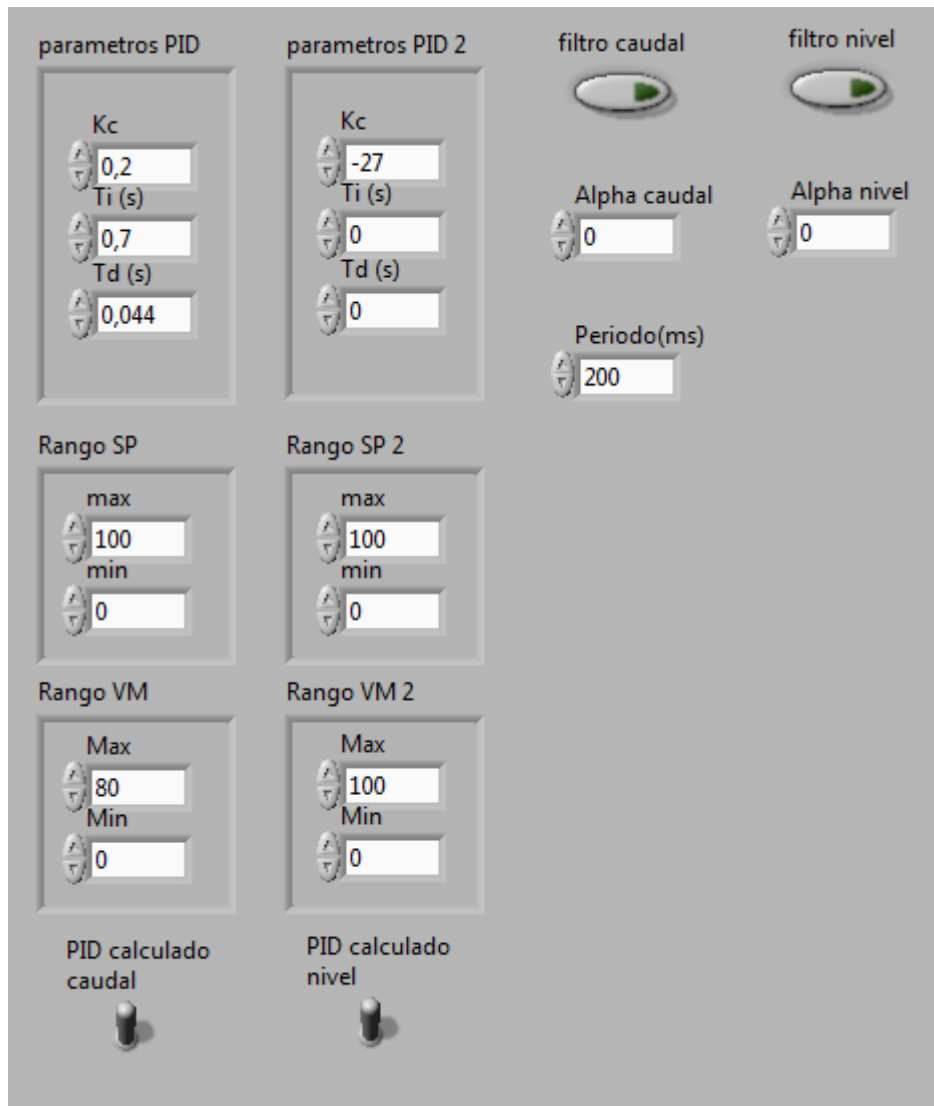


Figura 29: Contenido de la pestaña "parámetros"

Nota: para valores grandes de "alpha", el filtrado aumenta mucho la sobreoscilación de las señales.

- Pestaña "perfiles" (figura 30): permite programar los perfiles para las referencias de caudal y nivel. Aunque tanto como desde el nivel ingeniero como operario se puede activar esta opción, solo el ingeniero puede modificar los parámetros de esta pestaña.



Figura 30: Contenido de la pestaña "perfiles"

- Pestaña "adquisición de datos" (figura 31): en esta pestaña se designan las rutas para las entradas y salidas del sistema. También se pueden visualizar distintos parámetros internos del sistema como valores en tensión y los "finished late". Las rutas de entrada y salida solo son modificables por el ingeniero.

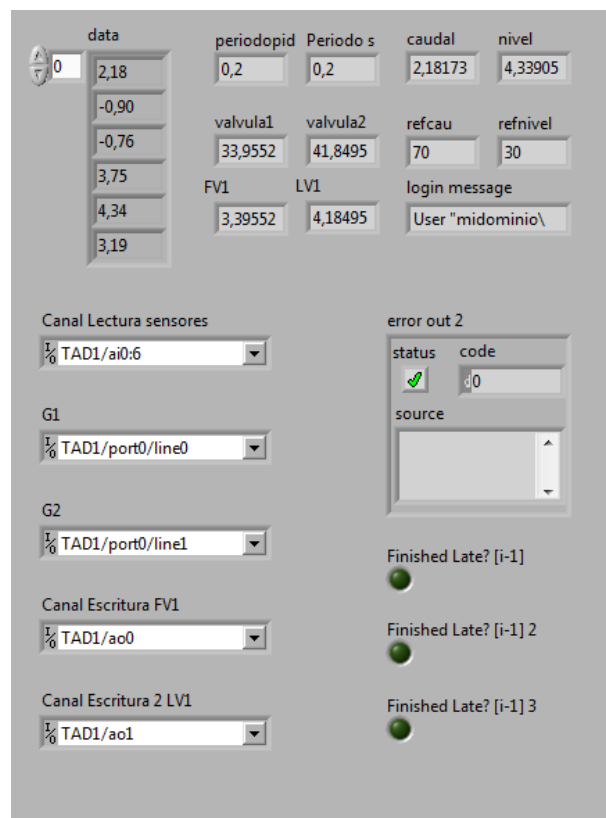


Figura 31: Contenido de la pestaña "adquisición de datos"

5.2.-Estructura de programa

La estructura que regula el funcionamiento de la aplicación está compuesta por tres bucles temporizados:

- Bucle de adquisición de datos: administra las entradas y salidas del sistema, el guardado de datos y el control de acceso y seguridad. Se muestra en las figuras 32, 33 y 34.

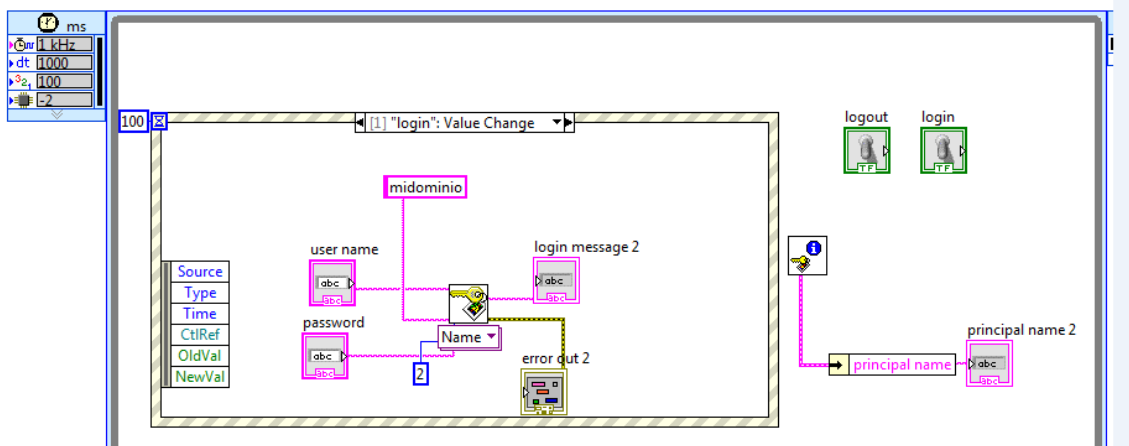


Figura 32: Parte superior del bucle de adquisición (control de acceso y seguridad)

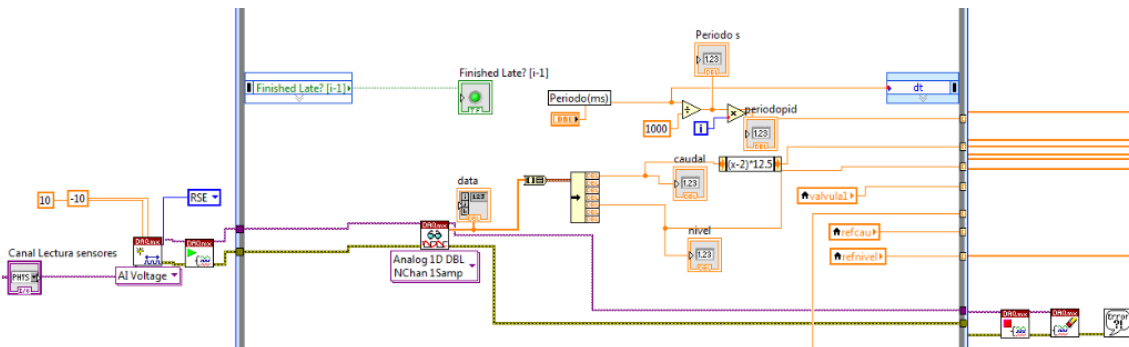


Figura 33: Parte central del bucle de adquisición (generación de documento txt y entradas analógicas)

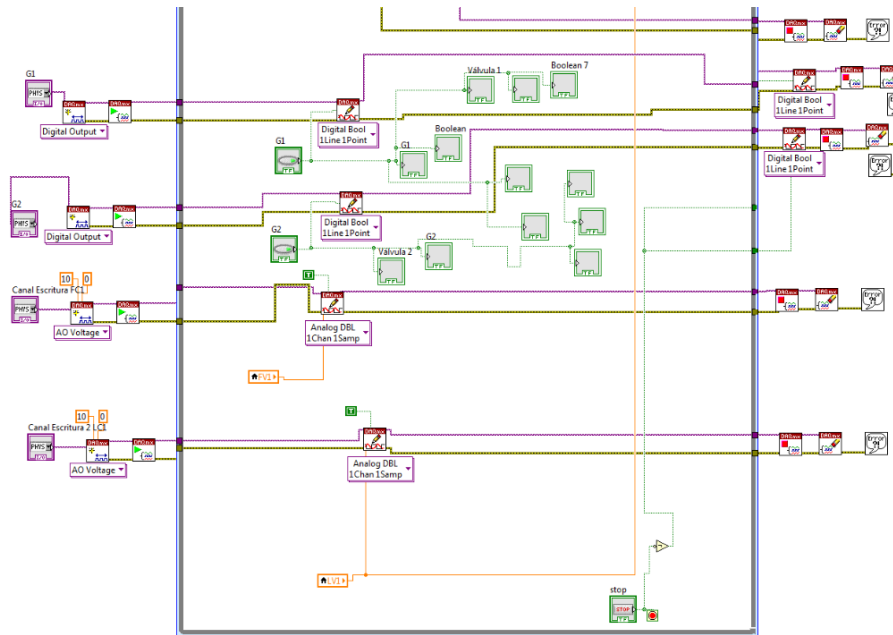


Figura 34: Parte inferior del bucle de adquisición (salidas analógicas y digitales)

- Bucle de control de caudal (figura 35): administra las entradas y salidas al bloque PID que controla el caudal (cuyo código se explica en el anexo de programación). Se ocupa también de regular el funcionamiento de interruptores, entradas de las gráficas, etc.

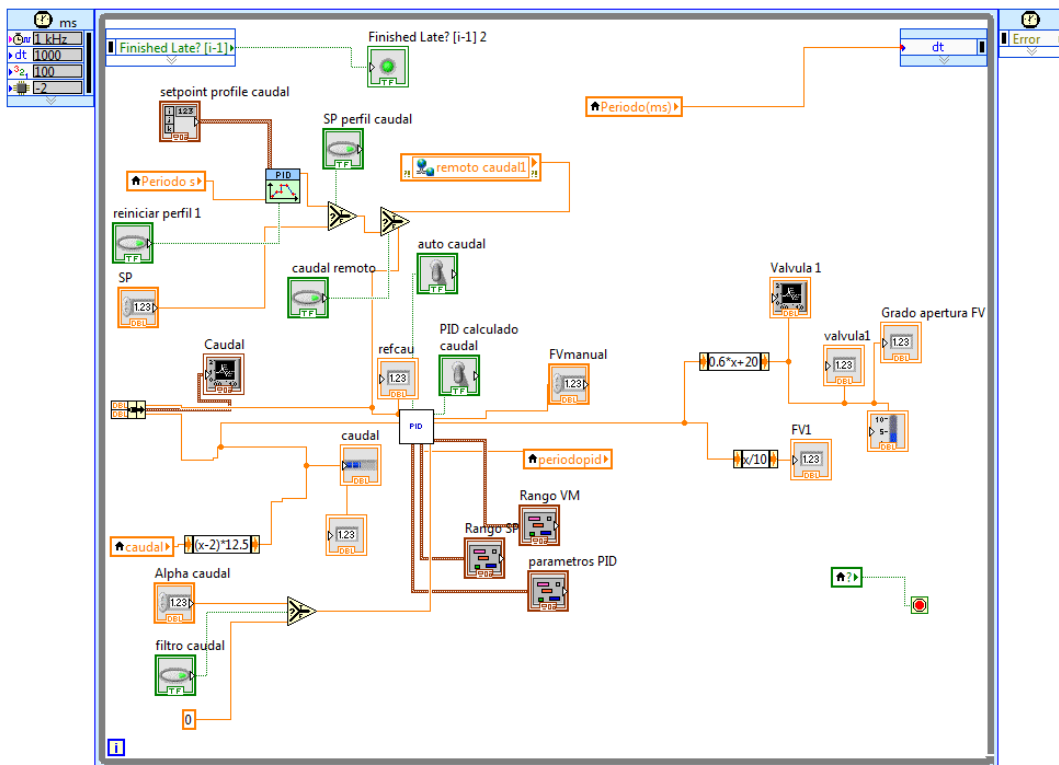


Figura 35: Bucle de control de caudal

- Bucle de control de nivel (figura 36): tiene un funcionamiento análogo al bucle anterior pero para el bloque PID que controla el nivel.

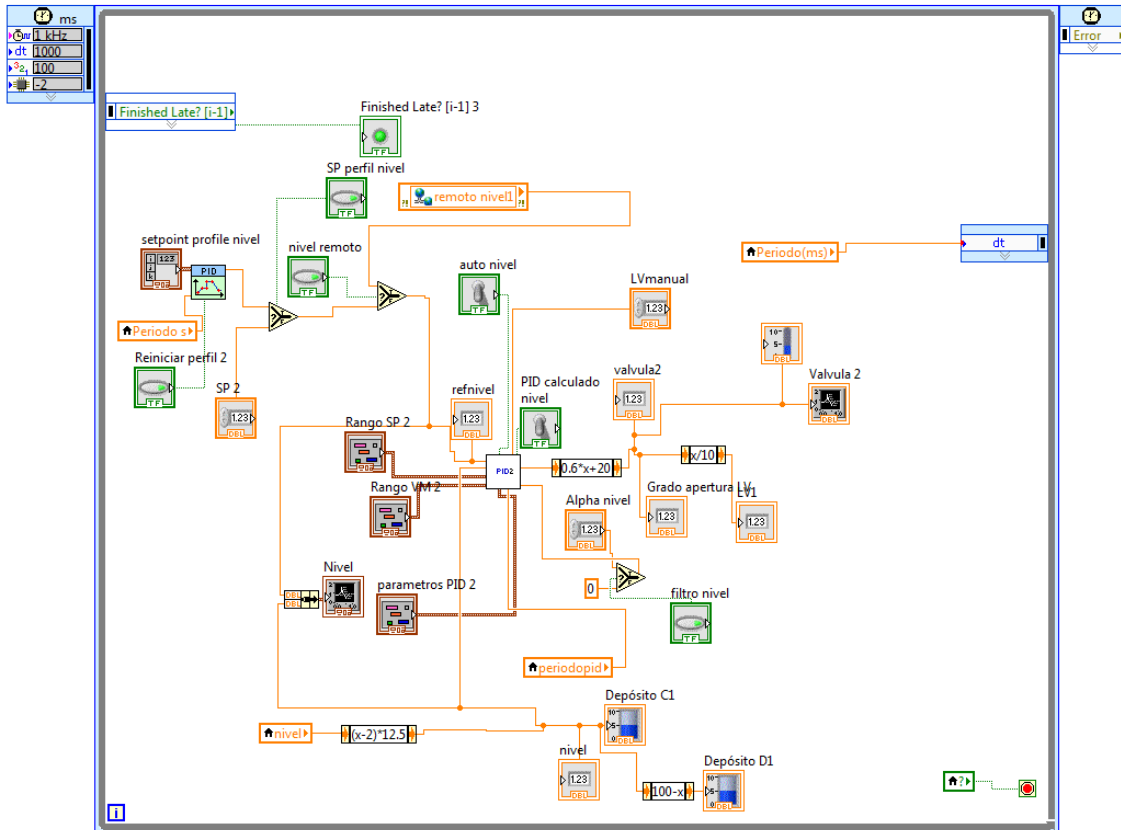


Figura 36: Bucle de control de nivel

6.-Conclusiones

Se ha desarrollado una aplicación en LabVIEW que cubre las especificaciones planteadas por el cliente:

- Control automático de la planta: mediante un controlador PID para el lazo de caudal y una programación que alterna entre P y PI para el de nivel.
- Control de acceso y seguridad: se han incluido la opción de “login” y “logout” con 3 niveles de acceso (ingeniero, operario y usuario).
- Control remoto: se ha aplicado esta función como forma de introducir la referencia tanto de caudal como de nivel.
- Filtrado: además de la activación del filtrado, se ha añadido la opción de variar el parámetro “alpha” que determina el grado de filtrado deseado.
- Generación de perfiles para la referencia: con la posibilidad de introducir escalones y rampas.

7.-Presupuesto

7.1.- Mano de obra

Operario	Precio (€/h)
Ingeniero de control	25
Programador	25
Técnico de laboratorio	20
Administrativo	20

7.2.- Materiales

Descripción	Precio (€/h)
<i>Licencia de Labview de National Instruments versión completa</i>	2,4
<i>Matlab de MathWorks versión Estándar</i>	5,7

7.3.- Cuadro de precios unitarios

Descripción	Importe (€)
Puesta en marcha de la planta	774
Identificación de los modelos	1150
Desarrollo de los controladores	2332
Desarrollo de las funciones de la aplicación	2979

7.4.- Cuadro de precios descompuestos

Descripción de la unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio	Importe
Puesta en marcha de la planta. Incluye desarrollo del bucle de adquisición por el programador e instalación de las tarjetas de adquisición por el técnico.				
Programador	h	10	25	250
Técnico	h	15	20	300
Labview	h	10	2,4	24
Administrativo: generación de documentación	h	10	20	200
Costes directos				774
Costes directos complementarios (2%)				15,50
Coste total				789,50€

Descripción de la unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio	Importe
Identificación de los modelos. Incluye ensayos de llenado, vaciado y respuesta en escalón por el técnico e identificación y comprobación de modelos por el ingeniero de control.				
Técnico	h	15	20	300
Ingeniero de control	h	20	25	500
LabVIEW	h	15	2,4	36
Matlab y su herramienta Ident	h	20	5,7	114
Administrativo: generación de documentación	h	20	20	400
Costes directos				1350
Costes directos complementarios (2%)				27
Coste total				1377€

Descripción de la unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio	Importe
Desarrollo de los controladores. Incluye Diseño y validación de controladores por el ingeniero, programación de PID y bucles de control por el programador y ensayos de ajuste de los controladores por el técnico.				
Ingeniero de control	h	25	25	625
Programador	h	25	25	625
Técnico	h	15	20	300
Labview	h	40	2,4	96
Matlab y su herramienta Simulink	h	15	5,7	86
Administrativo: generación de documentación	h	30	20	600
Costes directos				2332
Costes directos complementarios (2%)				46,60
Coste total				2378,60€

Descripción de la unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio	Importe
Desarrollo de las funciones de la aplicación.				
Programación de la estructura de bloques por el programador, Diseño de la interfaz de control por el ingeniero y comprobación del comportamiento de las funciones por el técnico.				
Ingeniero de control	h	25	25	625
Programador	h	35	25	875
Técnico	h	15	20	300
Labview	h	75	2,4	179
Administrativo: generación de documentación	h	50	20	1000
Costes directos				2979
Costes directos complementarios (2%)				59,60
Coste total				3038,60€

7.5.- Presupuesto de ejecución material

Descripción	Unidades	Importe
Puesta en marcha de la planta	1	789,50
Identificación de los modelos	1	1377
Desarrollo de los controladores	1	2378,60
Desarrollo de las funciones de la aplicación	1	3038,60
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)		7583,70
Gastos Generales (13% del PEM)		985,90
Beneficio Industrial (6% del PEM)		455
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)		9024,60€
ICA (21% del PEC)		1895,20
Presupuesto Base de Licitación		10919,80€

Asciende el presupuesto a la presente cantidad de:

DIEZ MIL NOVECIENTOS DIECINUEVE CON OCHENTA CÉNTIMOS

Nota: las licencias de software anuales son aprovechadas para 10 proyectos diferentes de media. Su valor conjunto en el presupuesto es 10 veces menor al del precio total de la licencia.

Licencia de Labview de National Instruments versión completa (335€/proyecto).

Matlab de MathWorks versión Estándar (200€/proyecto).

8.- Anexo. Manual de usuario.



La aplicación junto a los archivos necesarios para su funcionamiento está contenida en la carpeta “controlplanta”, mostrada en la figura 37.

Figura 37: Carpeta de la aplicación



El acceso directo de la figura 38 sirve para acceder a la aplicación contenida en la carpeta de la figura 37.

Figura 38: Acceso directo a la aplicación

A continuación se analizan en profundidad la interfaz y todas las funciones incluidas en la aplicación, así como el nivel de acceso a cada una de ellas según el usuario que esté “logueado”.

8.1.-Barra de control izquierda

En esta barra se encuentran los principales controles de la interfaz y es desde donde se realiza la mayoría de operaciones.

8.1.1- “login”, “logout” y Stop



Figura 39: Panel de acceso y Stop

En los apartados nombre de usuario y contraseña de la figura 39 se introducen los datos en función del nivel de usuario al que se pertenezca (usuario, operario o ingeniero).

Tras ello, se activa el interruptor de “login”. Para cerrar la sesión de usuario se activará el interruptor “logout”.

El botón de Stop solo puede ser activado por el ingeniero. Este botón para el proceso, desactiva las bombas y guarda en un fichero los datos del proceso desde su activación (tiempo, grado de apertura de electroválvulas, caudal, nivel y sus respectivos valores de referencia).

8.1.2.-Activación de las bombas



Figura 40: Botones de bombas

Las bombas pueden activarse o desactivarse a partir del nivel operativo mediante los interruptores de la figura 40. Conviene mantener ambas activas a menos que sea para algún ensayo concreto.

8.1.3.-Control manual/automático

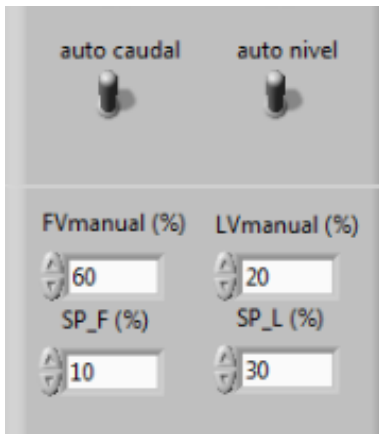


Figura 41: Panel auto/manual

El funcionamiento automático mediante PID se activa mediante los interruptores de la figura 49. Cualquier usuario puede desactivar el modo automático, aunque es necesario por lo menos el nivel de operario para cambiar los valores de funcionamiento manual de las electroválvulas.

La referencia (SP) a seguir por las señales es modificable por cualquier usuario pero los límites de la misma no.

8.1.4.- Control remoto

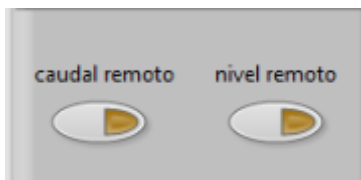


Figura 42: Interruptores de remoto

Cuando los interruptores de la figura 42 se activan, la referencia se importa desde otra interfaz a través de la red. Esta función está disponible para operario e ingeniero.

8.1.5.-Generación de perfiles para referencias

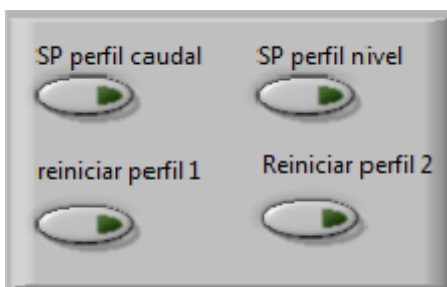


Figura 43: Recorte del panel de perfiles

Utilizar un perfil permite preestablecer escalones para la referencia con la velocidad y magnitud deseada, así como rampas de forma muy sencilla.

Tanto la activación como el reinicio de los perfiles diseñados son activables por cualquier usuario mediante los interruptores de la figura 43, aunque el diseño en si está limitado.

En la figura 44 se puede observar el contenido de la pestaña “perfiles”. El mismo es manipulable a partir del nivel de operario.

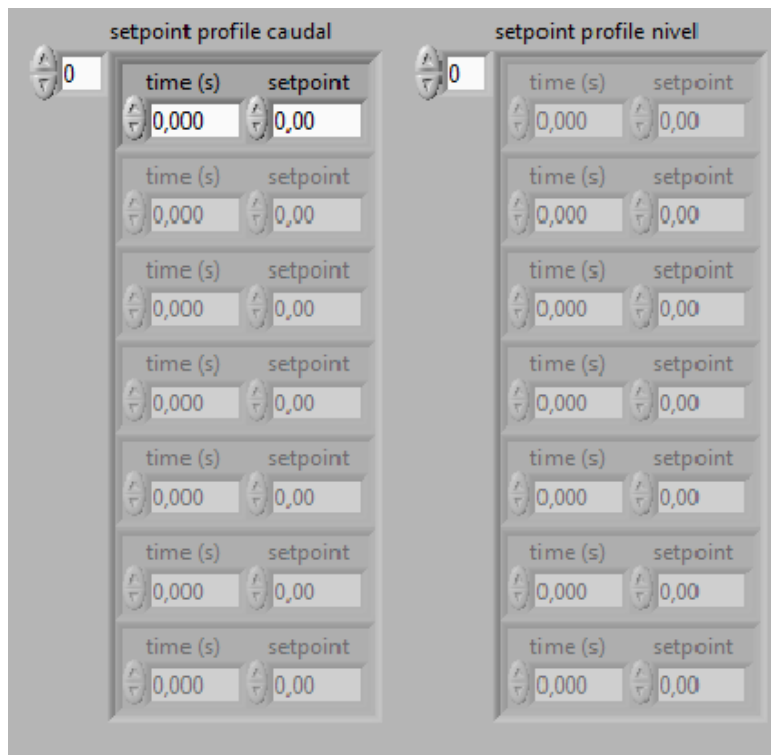


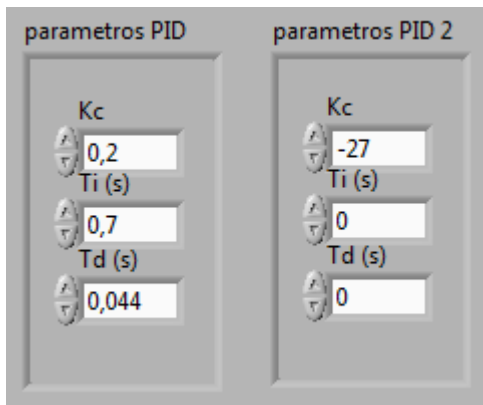
Figura 44: Recorte del panel de diseño de perfiles

Para cada instante de tiempo se puede definir un valor de referencia. Si se introduce en dos casillas el mismo instante de tiempo pero un valor de referencia para cada una, se provocará un escalón para ese instante entre esos dos valores. Si se introducen dos instantes y dos valores de referencia diferentes se producirá una rampa entre ambas situaciones.

8.2.-Pestaña de parámetros

En esta pestaña se puede modificar todos los valores relativos al control del sistema. Todos los elemento de esta pestaña son exclusivamente modificables o activables desde el nivel de ingeniero.

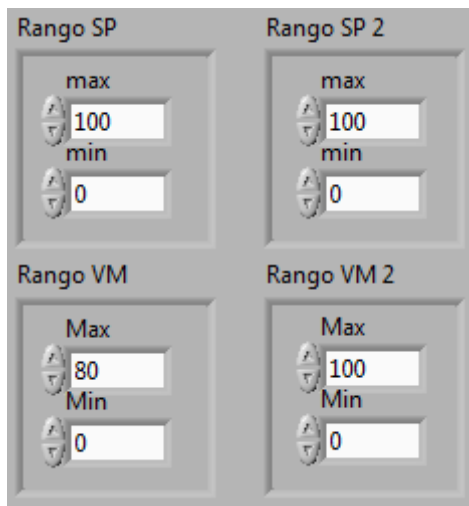
8.2.1.- Parámetros PID



La columna izquierda de la figura 45 recoge los valores de Kc, Ti y Td en en estructura ISA para el control de caudal, mientras que la columna derecha hace lo propio para el nivel.

Figura 45: "clusters" de parámetros PID

8.2.2.-Rangos

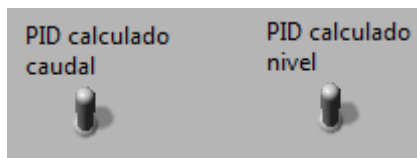


Rango SP y Rango SP 2 de la figura 46 recogen, respectivamente, los límites de la referencia para el caudal y el nivel.

Rango VM recoge el rango para el actuador FV y Rango VM 2 recoge el del actuador LV.

Figura 46: "Clusters" de rangos

8.2.3.-Interruptores PID calculados



Cuando los interruptores de la figura 47 se encuentran activos, el control PID funciona mediante los parámetros calculados en el apartado de diseño. Cuando no lo están, el control funciona mediante los parámetros introducidos.

Figura 47: Interruptores de PID calculados

8.2.4.- Filtrado y periodo

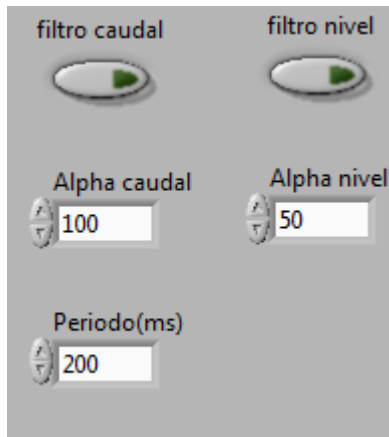


Figura 48: Interruptores de filtros, "alpha" y periodo.

Los dos interruptores de la figura 48 activan el filtrado de las señales.

Las dos casillas inferiores recogen el valor "alpha", que varía de 0 a 100 y regulan la potencia de filtrado.

Finalmente se encuentra la casilla de periodo mediante la que podemos modificar cada cuanto tiempo se vuelven a ejecutar los bucles temporales.

8.3.-Pestaña de adquisición de datos

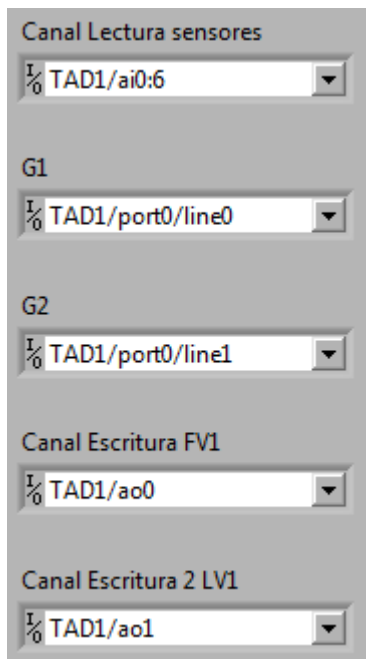


Figura 49: Rutas de entrada y salida

La pestaña adquisición de datos contiene principalmente las rutas de entrada y salida del sistema por las que funcionan los sensores, las bombas y las electroválvulas. Además contiene indicadores de parámetros secundarios como son las medidas de sensores en Voltios antes de ser convertidas a valores porcentuales, así como los indicadores de "finished late".

Las rutas de adquisición de datos se pueden observar en la figura 49 y son lo único realmente modificable en la pestaña. Solo pueden ser cambiadas por el ingeniero y no se recomienda su modificación a menos que se sepa efectivamente que están mal introducidas.

9.- Anexo. Manual de programación.

En este anexo se explica la estructura del diagrama de bloques que regula el funcionamiento de la interfaz y el control automático. Se ha decidido dividir el diagrama en tres bucles temporales.

En un principio se decidió así como una forma de organizar más claramente la estructura, aunque la consecuencia negativa es que esto puede llevar a que ante errores falle la coordinación entre los tres bucles.



Figura 50: Bloques de "finished late"

A pesar de esta desventaja, la existencia de un indicador de "finished late" en cada bucle ha servido para identificar más fácilmente el origen de ciertos problemas aparecidos durante el desarrollo de la aplicación.



Figura 51: Bloques de periodo

Los bucles temporales funcionan a un periodo en principio de 200ms, aunque puede ser modificado. Cuando uno de los bucles tarda más de ese tiempo en realizar todas las operaciones que contiene, su "finished late" se activa.

9.1.-Bucle de adquisición de datos

La función principal del bucle es la adquisición de datos de las señales de los sensores, así como la escritura para las bombas y electroválvulas.

El bucle también cumple otras dos funciones: la generación del documento txt resultante al presionar el botón de Stop en la interfaz y el control de acceso y seguridad.

9.1.1.-Lectura y escritura de señales

Hay tres casos a tratar: escritura de señales analógicas, escritura de señales digitales y lectura de señales analógicas.

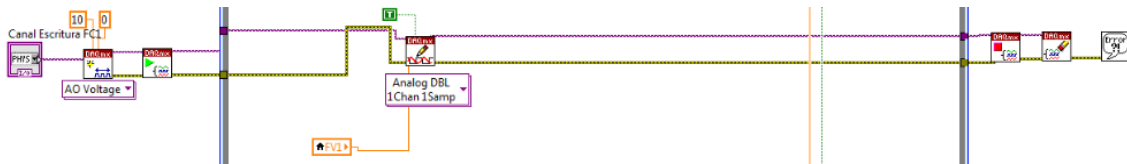


Figura 52: Escritura de señal analógica

En la figura 52 se muestra la estructura para la escritura de señales analógicas. Como ejemplo podemos ver en la imagen la escritura para la válvula FV1. Previamente a la entrada del bucle tenemos una serie de bloques, cuya función es introducir la ruta de escritura, definirla como analógica y establecer los límites de voltaje para la misma (0V a 10V).

Una vez dentro del bucle, utilizamos un bloque de escritura analógica que a cada iteración escribe el valor contenido en el elemento naranja, que en este caso es FV1 como se ha comentado. Los bloques a la salida del bucle se ocupan de detener la adquisición al detenerse el proceso.

Para el caso de escritura digital, la estructura es la misma pero con una serie de matices.

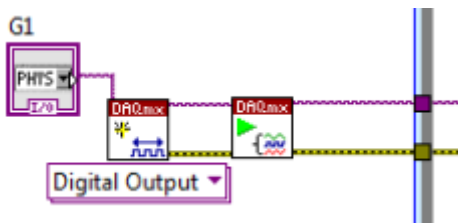


Figura 53: Comienzo de la escritura digital

La diferencia fundamental es que los bloques que utilizamos son digitales en lugar de analógicos. Previamente a la entrada al bucle la estructura es la misma como se observa en la figura 53.

Dentro del bucle, en lugar de flotantes dobles se utilizan booleanos dado que las bombas a controlar solo tienen dos estados. A los interruptores de las bombas (G1 en la figura 54), se encuentran conectados además una serie de booleanos que son los elementos gráficos de la interfaz que representan el esquema de la planta.

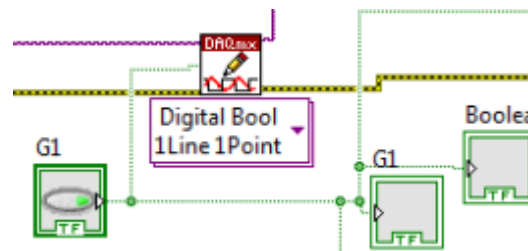
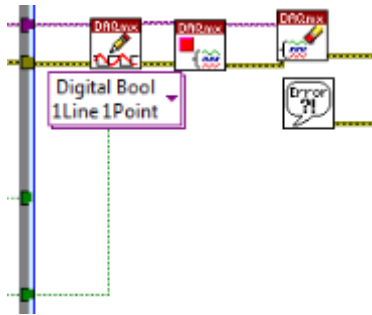


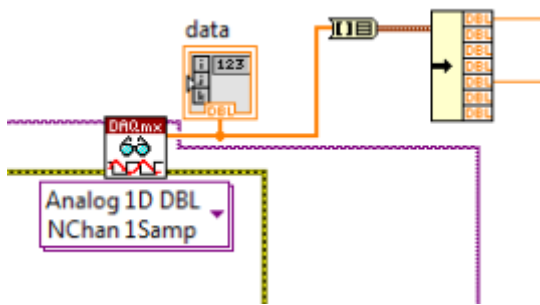
Figura 54: Parte central de la escritura digital



A la salida del bucle tenemos la misma estructura que para la escritura analógica, solo que se ha incorporado un bloque adicional que desactiva las bombas al presionar el botón de Stop. El booleano que se ocupa de dar esa señal de desactivación viene de la señal negada del Stop. De forma que al activar el Stop se escribe un cero para que ocurra la parada, como se muestra en la figura 55.

Figura 55: Final de la escritura digital

Para la lectura de las señales analógicas se utiliza un sistema similar al de la escritura analógica. A la entrada y salida del bucle la estructura es igual (utilizando AI en lugar de AO), pero en el interior del bucle funciona de manera diferente.



En los dos casos anteriores se trataban señales individuales, mientras que en la lectura analógica se adquieren al mismo tiempo diversas señales, de las cuales se buscan dos (caudal y nivel). Una vez adquiridos los datos que están en forma de "array" los convertimos en un "cluster" y, mediante la herramienta "unbundle", extraemos las dos señales, de la forma que se ve en la figura 56.

Figura 56: Estructura para leer señales de los sensores

9.1.2-Generación de fichero txt

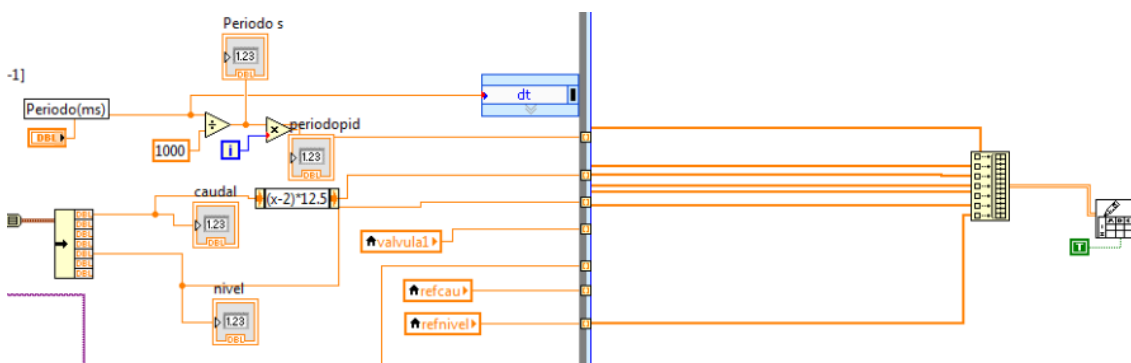


Figura 57: Estructura de generación del fichero txt

El fichero txt contendrá la información de 7 vectores correspondientes a los siguientes datos:

- Tiempo: definido como el periodo en segundos multiplicado por el número de iteración actual del bucle temporal.
- Señales de caudal y nivel: son las provenientes del “unbundle” en la lectura analógica de datos.
- Grado de apertura de las dos válvulas: son los datos introducidos en la escritura analógica.
- Referencia de caudal y nivel: estos dos datos vienen de los bucles de caudal y nivel (son variables locales en este bucle).

En la figura 57 se muestra como estos datos salen del bucle en modo “autoindexado” y, una vez fuera, se juntan en un cluster que será el que para acabar se escriba en el fichero final.

9.1.3-Control de seguridad y acceso

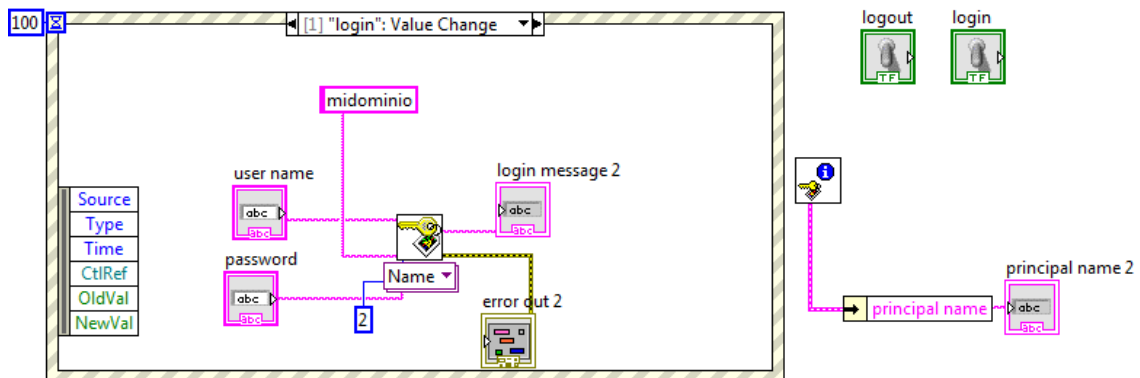


Figura 58: Bucle de eventos para control de seguridad y acceso

Para el control de seguridad y acceso se ha utilizado la estructura de eventos de la figura 58. Fuera de esta estructura se encuentran dos interruptores que corresponden al “login” y al “logout”, así como una serie de bloques que se ocupan de mostrar el nombre del usuario “logueado” en cada instante de tiempo.

La estructura de eventos se puede activar de dos formas diferentes. La estructura interna del bucle que se muestra en la imagen anterior se activa cuando se pulsa el interruptor de “login”, y se ocupa del “loguear” al usuario. Para que tenga efecto el “login” debe estar introducido el nombre de usuario que desea “loguearse” así como su contraseña.

La segunda estructura que se puede activar es la que se puede ver en la figura 59, formada por un solo bloque que desactiva al usuario que esté conectado al pulsarse el interruptor “logout”.

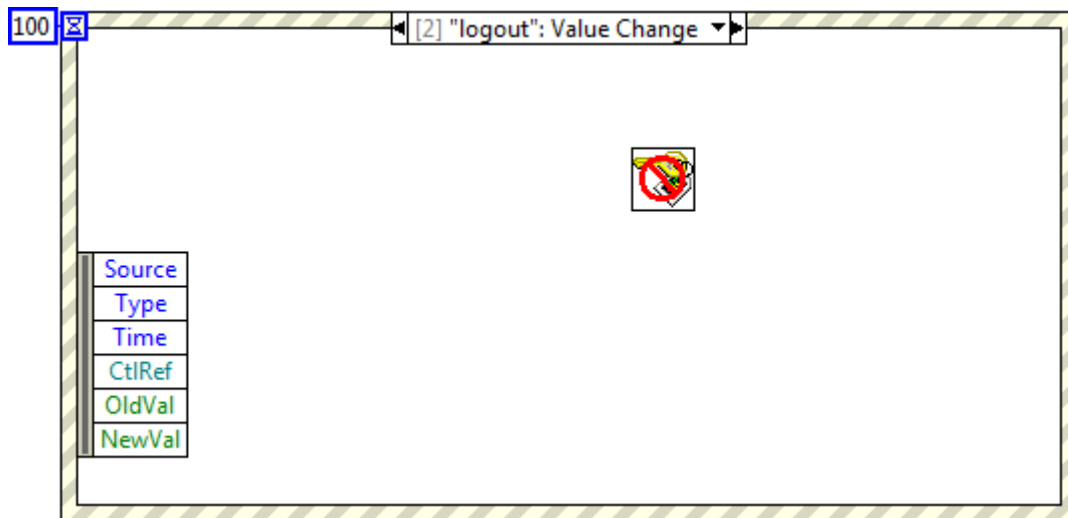


Figura 59: Bucle de evento para el "logout"

9.2.-Bucles de control de caudal y nivel

A pesar de que las dos variables a controlar son muy diferentes, sus bucles de control son exactamente iguales. Puesto que la estructura fundamental de ambos bucles es la misma, se explicará como ejemplo el bucle de caudal, visible en la figura 60. Posteriormente, se describirá el código de los bloques PID, los cuales también son prácticamente iguales entre sí, matizando la diferencia en el tramo de programación que incorpora los parámetros calculados en el diseño de los controladores.

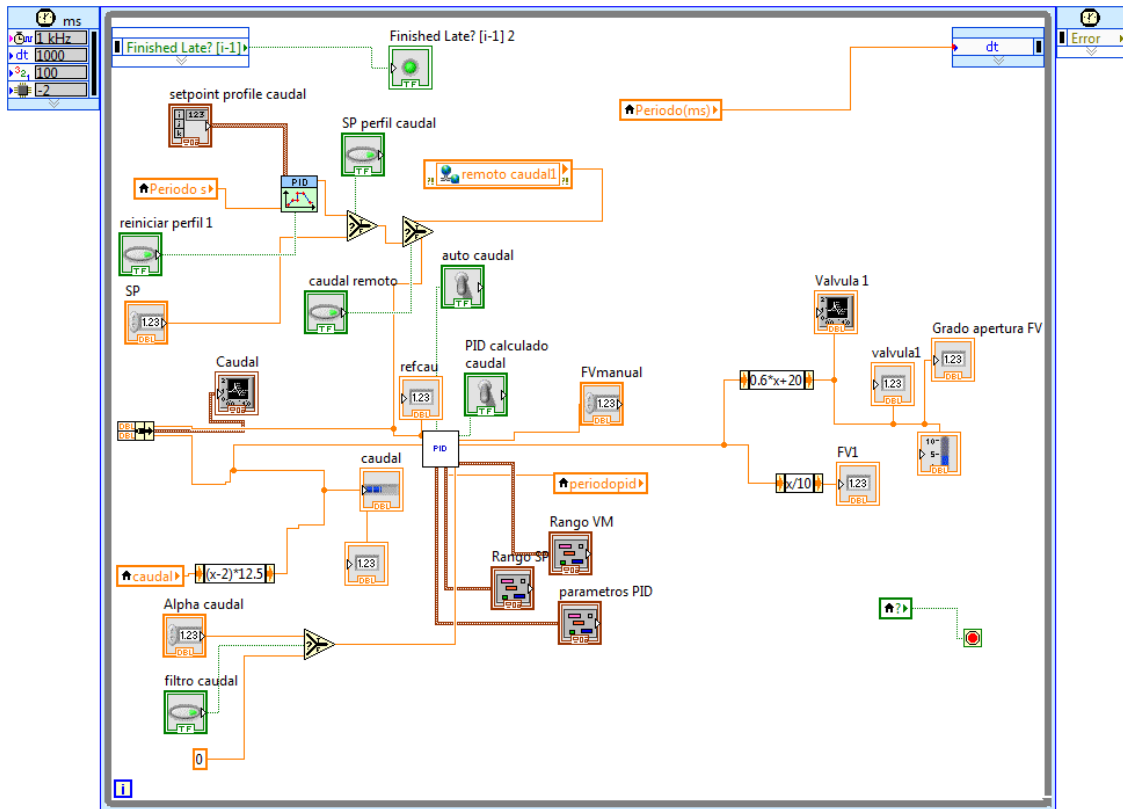


Figura 60: Bucl de control de caudal

9.2.1.-Bloques relativos al filtrado

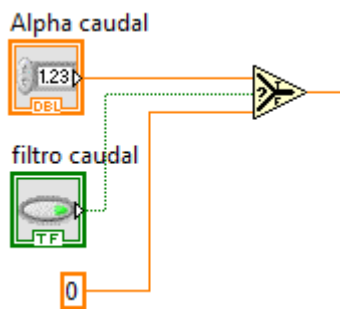


Figura 61: Bloques relativos al filtrado

El filtrado se activa y desactiva mediante la puerta “or” de la figura 61 . Si se activa el interruptor de filtrado, el parámetro “alpha” del filtro es el introducido en la interfaz. Si se desactiva el interruptor de filtrado el valor de “alpha” es cero, lo que equivale a desactivar el filtrado.

Al principio se utilizó para el mismo una función de Labview que introduciendo como entrada la señal la devolvía directamente filtrada.

De esta manera el filtrado funcionaba bien con la señal estable, pero al producirse cambios en la referencia se producían unas sobreoscilaciones mucho mayores a las observadas normalmente. Habitualmente la respuesta producía una pequeña sobreoscilación que se amortiguaba rápidamente, mientras que con el filtro activado se multiplicaba entre 5 y 10 el valor de la misma y necesitaba mínimo 2 oscilaciones para amortiguarse.

Se eliminó esta función y se programó el filtrado dentro del código del PID. De esta manera ahora se puede regular la potencia del filtro y evitar el problema

9.2.2.-Bloques relativos a la referencia (SP)

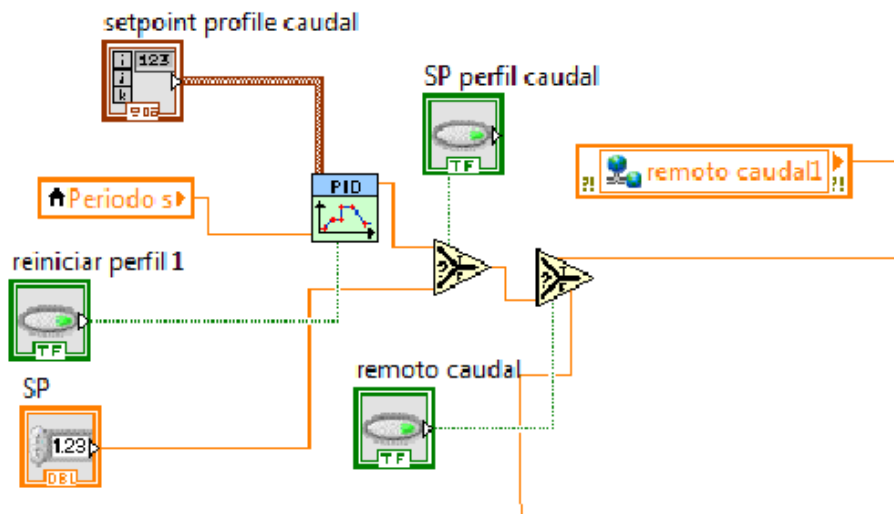


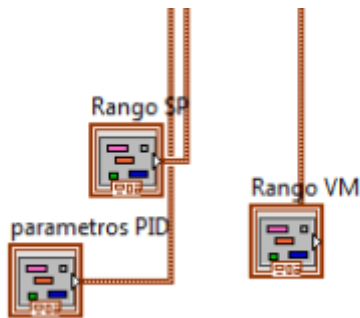
Figura 62: Bloques relativos a la referencia

La referencia es otra entrada al bloque PID. Esta puede estar determinada a través de tres vías diferentes: el bloque SP manual, el remoto, o el perfil diseñado. Para ello se usan unas puertas, mostradas en la figura 62, que según la posición de un interruptor dejan pasar como salida a una de las dos señales de entrada.

La primera puerta funciona mediante el interruptor “caudal remoto”, que al activarse deja pasar hace que la entrada al PID sea el dato introducido desde una interfaz remota. Al desactivarse entra una señal u otra de las dos que quedan, en función del siguiente interruptor.

Este otro interruptor es el “SP perfil caudal”, que si se activa manda como entrada el perfil diseñado y si se desactiva manda el dato SP introducido manualmente.

9.2.3.-Bloques relativos a controladores y sus parámetros



Por la parte inferior del bloque PID que se muestra en la figura 63 se encuentran tres “clusters” de entrada. El rango VM define los límites de la variable manejada (grado de apertura de las válvulas) y el rango SP los de la referencia.

Parámetros PID es el “cluster” que introduce al bloque PID los parámetros escritos desde la interfaz.

Figura 63: Bloques de rangos y parámetros PID

Mediante los tres bloques de la figura 64 regulamos el funcionamiento del control. Mientras que en el caso anterior regulábamos el funcionamiento de los interruptores mediante puertas, en este caso se hace mediante el código interno del bloque PID, que será descrito más adelante.

El interruptor auto caudal hace funcionar el control automático al estar activo. Al no estar activo, el grado de apertura de la válvula se introduce manualmente mediante “FC manual”.

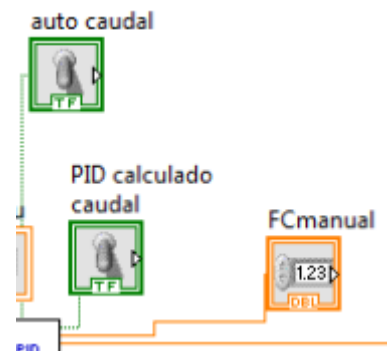


Figura 64: Bloques de control auto/manual

Con el interruptor “PID calculado caudal”, se selecciona cuál de los dos modos de control automático queremos hacer funcionar. Cuando el interruptor se activa, el PID funciona mediante los parámetros seleccionados en el apartado de diseño de controladores.

Cuando no está activo, el PID utiliza los parámetros que estén introducidos en la interfaz en ese momento, es decir, los del bloque “parámetros PID”.

9.3.- Bucle y funcionamiento del control remoto

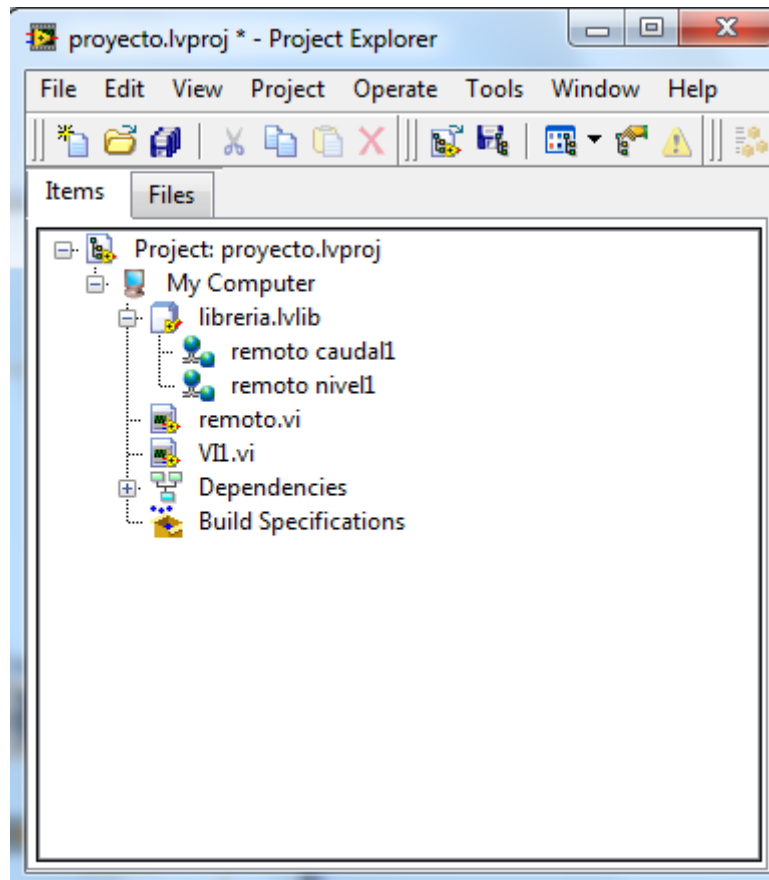


Figura 65: Vista de la ventana del proyecto

La figura 65 muestra la ventana utilizada para estructurar el proyecto, el cual es necesario para poder realizar el control remoto. Después de crear el proyecto se añade una librería donde se guardan las dos variables remotas, y se incorpora al proyecto un VI adicional al que ya tenemos.

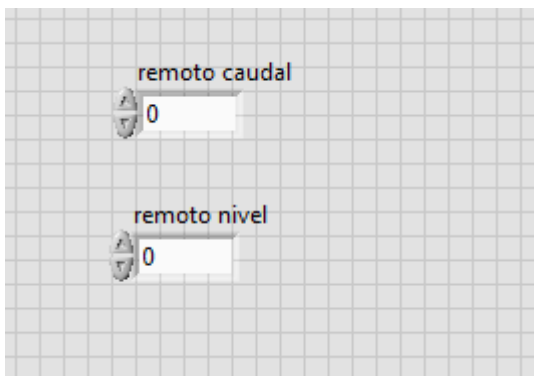


Figura 66: Interfaz del VI remoto

La interfaz de este VI nuevo es muy simple, como se puede ver en la figura 66. Su única función es recoger dos valores que se transmiten al VI principal cuando el interruptor indicado es activado.

Estos valores son la referencia para el caudal y el nivel.

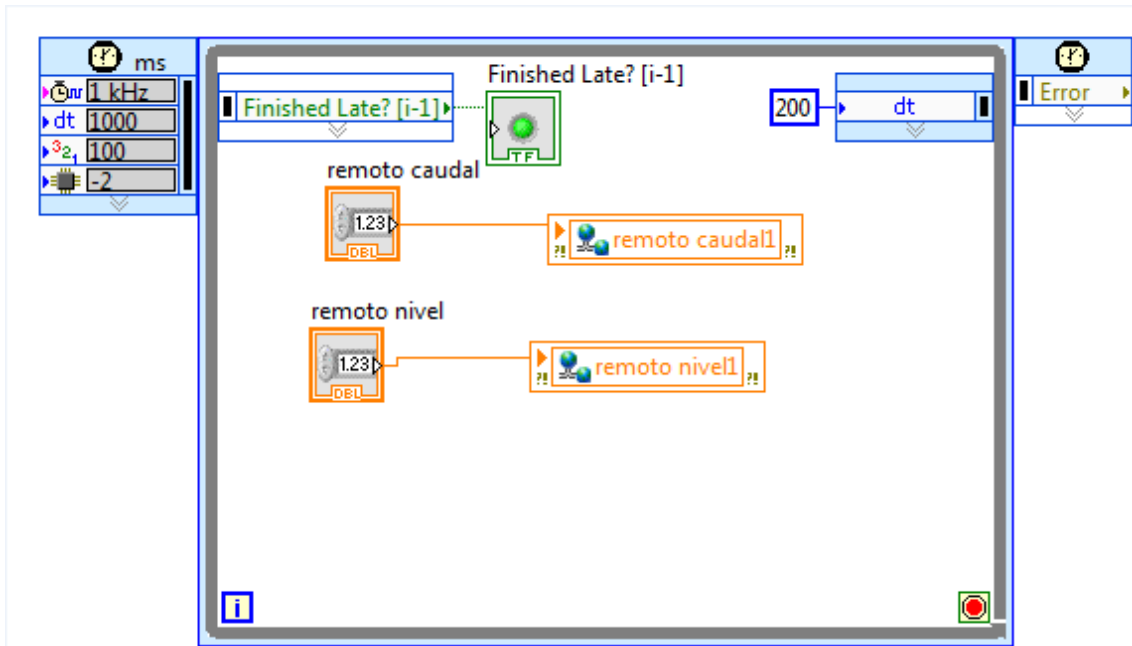


Figura 67: Bucle temporal del VI remoto

La estructura de bloques que hace funcionar a este VI es la de la figura 67. Las variables contenidas en la librería que se ha creado se introducen en un bucle temporal en modo lectura, leyendo el valor recogido en los controles.

Para que el sistema de los dos VI en conjunto funcione deben estar ambos en modo “run”.

9.4.- Código de bloques PID

A continuación se muestran los dos códigos diseñados y la estructura de entradas y salidas que los rodean. Posteriormente se explica en detalle estos códigos.

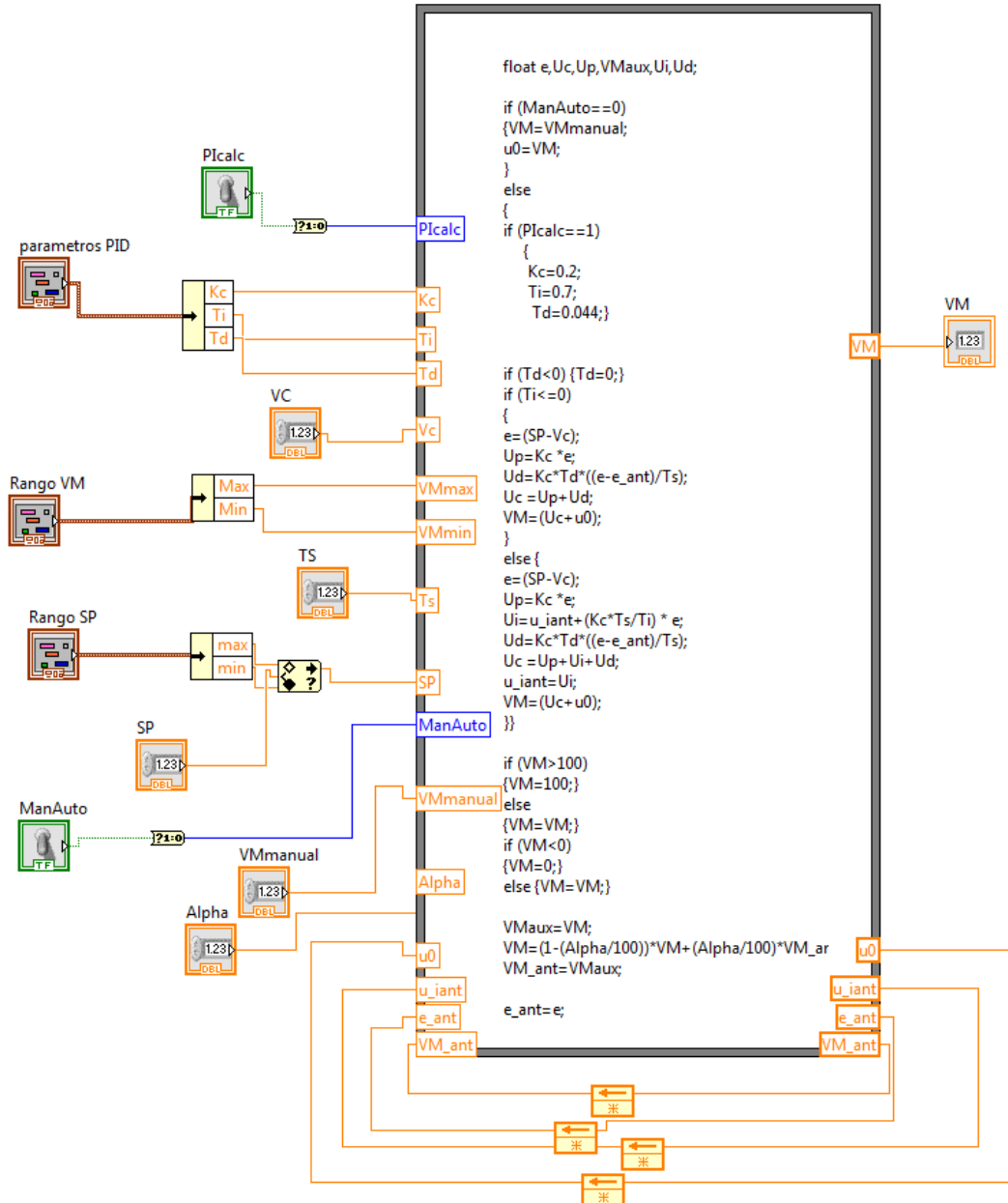


Figura 68: Código del PID de caudal y sus entradas/salidas

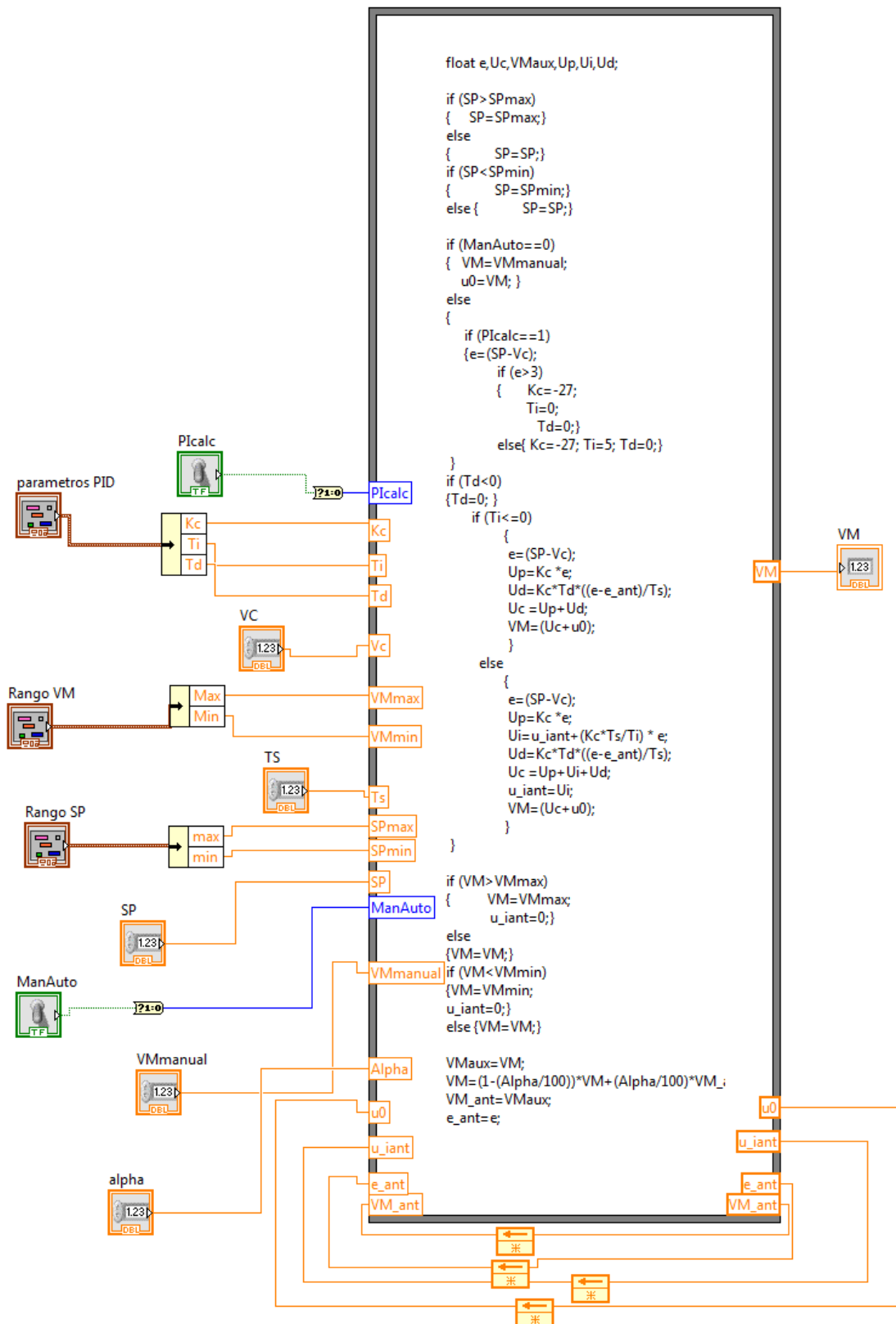


Figura 69: Código del PID de nivel y sus entradas/salidas

9.4.1- Código común a ambos PID

```
float e,Uc,Up,VMaux,Ui,Ud;
```

```
if (ManAuto==0)  
{VM=VMmanual;  
u0=VM;  
}
```

Figura 70: Inicio código PID

- Inicialización de las variables intermedias del código.
- Funcionamiento manual del control.

```
if (Td<0) {Td=0;}  
if (Ti<=0)  
{  
e=(SP-Vc);  
Up=Kc *e;  
Ud=Kc*Td*((e-e_ant)/Ts);  
Uc =Up+Ud;  
VM=(Uc+u0);  
}  
else {  
e=(SP-Vc);  
Up=Kc *e;  
Ui=u_iant+(Kc*Ts/Ti) * e;  
Ud=Kc*Td*((e-e_ant)/Ts);  
Uc =Up+Ui+Ud;  
u_iant=Ui;  
VM=(Uc+u0);  
}}
```

Figura 71: Núcleo del código PID

- Limitación de Td y Ti para que no acepten valores negativos.
- Código PD que funciona si el Ti se desactiva.
- Código PID que funciona habitualmente.

Nota: no hay caso PI ya que el derivador se desactiva dándole a Td el valor de 0.

```
if (VM>VMmax)  
{ VM=VMmax;  
u_iant=0;}  
else  
{VM=VM;}  
if (VM<VMmin)  
{VM=VMmin;  
u_iant=0;}  
else {VM=VM;}  
  
VMaux=VM;  
VM=(1-(Alpha/100))*VM+(Alpha/100)*VM_  
VM_ant=VMaux;  
e_ant=e;
```

Figura 72: Final del código PID

- Limitación de los rangos de los actuadores entre 0 y 100 e implementación del anti-windup.
- Código del funcionamiento del filtro en función del parámetro "Alpha".

9.4.2.-Diferencias entre las partes no comunes a ambos PID

La principal diferencia está en el código que define como funcionan los PID cuando los interruptores “PID calculado” se encuentran activos.

```
if (PIcalc==1)
{
  Kc=0.2;
  Ti=0.7;
  Td=0.044;}

```

El PID calculado en el caso del caudal funciona con estos parámetros fijos

Figura 73: Código PID calculado para caudal

```
if (PIcalc==1)
{e=(SP-Vc);
  if (e>3)
  { Kc=-27;
    Ti=0;
    Td=0;}
  else{ Kc=-27; Ti=5; Td=0;}
}
```

El PID calculado en el caso del nivel, tal y como se ha comentado anteriormente, trabaja como P o PI en función del error en cada instante.

Figura 74: Código PID calculado para nivel

La otra diferencia existente es en la forma de acotar el rango SP. No hay ninguna diferencia de funcionamiento en la práctica, pero en el caso del caudal se ha estructurado en bloques y para el nivel en forma de código. La estructura del caudal ha sido la de la figura 75.

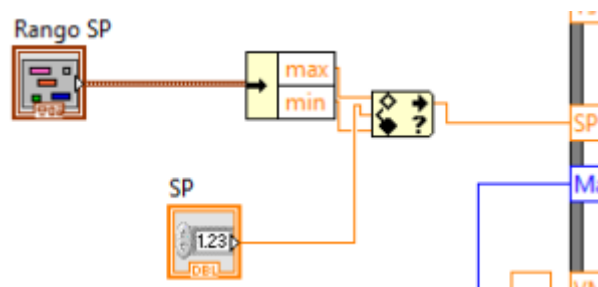


Figura 75: Rango SP para caudal

```
if (SP>SPmax)
{ SP=SPmax;}
else
{ SP=SP;}
if (SP<SPmin)
{ SP=SPmin;}
else { SP=SP;}

```

En el caso del nivel, al principio del código PID tenemos esta estructura, análoga a la limitación del rango de VM.

Figura 76: Rango SP para nivel

10.- Bibliografía

- Karl J. Aström & Tore Hagglund. (2009). *Control PID avanzado*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Karl J. Aström & Tore Hagglund. (1995). *PID controllers: [theory, design and tuning]*. Research Triangle Park: Instrument Society of America.
- José Rafael Lajara & José Pelegrí. (2011). *LabVIEW: entorno gráfico de programación*. Barcelona: Marcombo.
- Jose Vicente Romero, Maria Dolores Roselló & Ricardo Zalaya. (2002). *Fundamentos matemáticos para la ingeniería con matlab*. Valencia: editorial U.P.V.
- Subforo de LabVIEW existente dentro del foro de la empresa National Instruments: <http://forums.ni.com/t5/LabVIEW/bd-p/170>