



## ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

Titulación:

INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL  
(ELECTRICIDAD)

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

Alumna: Sara Pérez Izquieta

Tutores: Iñaki Arocena Elorza

Gabriel Lera Carreras

Pamplona, 28 de Junio de 2011

## **INDICE**

<b>CAPITULO 1 – INTRODUCCION.....</b>	<b>5</b>
1.1 – PRESENTACION DEL PROYECTO.....	6
1.2 – CONDICIONES DE LAS QUE SE PARTE.....	7
1.2.1 – Esquema de funcionamiento.....	7
1.2.2 – Desperfectos de la maqueta.....	8
1.2.3 – Puesta en marcha.....	9
1.3 – CARACTERISTICAS DE CADA ELEMENTO DE LA MAQUETA.....	10
1.3.1 – Bomba de diafragma.....	11
➤ Estructura interna.....	11
➤ Principio de funcionamiento.....	12
➤ Características generales.....	12
➤ Funcionamiento real de la bomba.....	12
➤ Relación $Q_{\text{salida}} / V_{\text{bomba}}$ .....	13
➤ Aproximación al comportamiento dinámico constante.....	14
➤ Comportamiento dinámico real.....	16
1.3.2 – Caudalímetro.....	24
➤ Dimensiones y elementos.....	25
➤ Conexionado y datos técnicos.....	26
➤ Característica estática.....	26
➤ Característica dinámica.....	28
1.3.3 – Sensor de nivel.....	30
1.3.4 – Tarjeta de adquisición de datos.....	31
1.3.5 – Equipo en entorno gráfico y equipo con sistema operativo en tiempo real..	34
1.4 – ELECCION DEL SENSOR DE MEDIDA DEL NIVEL DE LIQUIDO.....	35
1.4.1 – Tipos de sensores según el tipo de medida.....	35
➤ Sensores inductivos.....	35
➤ Sensores capacitivos.....	36
➤ Sensores fotoeléctricos.....	37
➤ Sensores magnéticos.....	38
➤ Sensores de nivel conductivos.....	38
➤ Encoders (codificadores).....	39
➤ Sensores de proximidad de ultrasonidos.....	40

1.4.2 – El sensor UA18CLD05AKTR de Carlo Gavazzi.....	41
➤ Datos técnicos.....	41
➤ Ajuste de salida analógica.....	42
➤ Dimensiones.....	43
➤ Distancia de detección.....	43
➤ Normas de instalación.....	43
➤ Característica estática del sensor.....	45
➤ Característica dinámica.....	46
➤ Procedimiento Teach-in (autoajuste).....	47
1.4.3 – Montaje final en la maqueta.....	50
<b>CAPITULO 2 – MODELO MATEMATICO DE LA PLANTA.....</b>	<b>52</b>
<b>CAPITULO 3 – SIMULACION DEL SISTEMA.....</b>	<b>76</b>
3.1 – SIMULACION CON ENTRADA $Q_{\text{REFERENCIA}}$ .....	84
3.2 – SIMULACION CON ENTRADA $Q_{\text{CAUDALÍMETRO}}$ .....	90
<b>CAPITULO 4 –DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL REGULADOR.....</b>	<b>99</b>
4.1 – CONTROL PROPORCIONAL.....	101
4.1.1 – Algoritmo de control P teórico.....	101
4.1.2 – Ensayo en la maqueta con control proporcional.....	103
4.1.3 – Influencia del funcionamiento real de la bomba.....	115
4.2 – CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO.....	121
4.2.1 – Algoritmo de control PID teórico.....	121
4.2.2 – Ensayo en la maqueta con control proporcional-integral-derivativo.....	134
4.2.3 – Modificación de los parámetros del método de Ziegler-Nichols.....	135
➤ Reducción de la ganancia.....	135
➤ Desplazamiento de los ceros del controlador hacia el origen.....	138
➤ Método de Ziegler-Nichols por respuesta frecuencial.....	140
➤ Ajuste del margen de ganancia y el margen de fase.....	142
4.2.4 – Modificación de la acción derivativa del PID.....	144
4.2.5 – Modificación de la acción integradora del PID.....	151

CAPITULO 5 – CONCLUSIONES.....	157
BIBLIOGRAFIA.....	159
ANEXOS.....	161
A1 – CALIBRADO DEL SENSOR DE ULTRASONIDOS	
A2 – ESTRUCTURA EN POLICARBONATO	
A3 – DATOS DEL ENSAYO DE LA VALVULA 1	
A4 – DATOS DEL ENSAYO DE LA VALVULA 3	
A5 – SIMULACION (target)	
A6 – SIMULACION (subVI alta prioridad)	
A7 – SIMULACION (subVI prioridad normal)	
A8 – SIMULACION (subVI configuración de tareas)	
A9 – SIMULACION (host)	
A10 – CONTROL (target)	
A11 – CONTROL (subVI configuración de tareas)	
A12 – CONTROL (host)	
A13 – CONTROL (subVI prioridad normal)	
A14 – CONTROL (subVI alta prioridad)	

## **Capítulo 1 - Introducción**

## 1.1 – PRESENTACION DEL PROYECTO

A medida que el ser humano va evolucionando, y con él sus necesidades, se presenta la necesidad de implementar nuevas tecnologías para solucionar los problemas que surgen día a día ya sea en el ámbito cotidiano como en el aspecto industrial.

Antiguamente la obtención de un producto industrializado estaba bajo un control puramente manual, es decir se requería personal que operara con una máquina determinada; cuando las variables del proceso se desviaban del valor deseado el operador humano trataba de corregir el error ya producido. Con una finalidad de tipo competitiva y económica surgió el concepto de control automático cuya idea es la de automatizar los procesos y mejorar la calidad de los productos.

La amplia competencia del mercado a nivel industrial da lugar a la optimización del control, y también a la búsqueda de nuevas estrategias de control que permitan una mayor eficiencia y un alto grado de flexibilidad en los procesos industriales. El objetivo de todo sistema de control en el día de hoy es pues el de actuar sobre las variables controladas para que estas reaccionen a los cambios en el funcionamiento de un proceso considerando criterios económicos, medioambientales, cualitativos, de seguridad, etc.

El control de nivel de líquidos en depósitos y el flujo entre ellos es un problema básico que se presenta en gran cantidad de procesos industriales. Estos procesos requieren de líquidos para ser bombeados, almacenados en tanques y luego bombeados a otros tanques. Muchas veces este líquido es procesado mediante tratamientos químicos en los propios tanques pero el nivel de fluido en el interior del mismo debe ser controlado y el flujo entre ellos regulado. Algunos tipos de industria donde el control de nivel y el flujo son esenciales son la industria petroquímica, de fabricación de papel y de tratamiento de aguas.

Los sistemas de control de nivel de depósitos además de en el ámbito industrial se encuentran en aspectos cotidianos que van desde elementos sencillos como el control del nivel de líquido en la cisterna de un inodoro hasta elementos complejos como el control del nivel del lago artificial Silveretta Stausee (2034 m) con el Vermunt Stausee (1717 m).

Consecuentemente en este proyecto a partir de la maqueta de tanques acoplados CE105 disponible en el laboratorio de automática se tratará de controlar y supervisar el nivel de líquido en uno de los tanques dotado de una válvula de drenaje utilizando para ello el lenguaje de programación de LabVIEW. Con ello se pretenderá profundizar en los aspectos relacionados con el control del nivel de un sistema de tanques y así aplicar los conocimientos que se han estudiado a lo largo de la carrera y aquellos que a pesar de no haber formado parte del plan de estudios de la propia titulación, están estrechamente relacionados con este proyecto de fin de carrera.

## 1.2 – CONDICIONES INICIALES DE LAS QUE SE PARTE

La maqueta de tanques acoplados CE105 del fabricante *TecQuipment* [1], es un aparato compacto y robusto de dimensiones 540 x 330 x 600 mm y de 23 Kg de peso apto para la investigación de problemas prácticos de control cuyo diseño ha sido pensado para su trabajo en un ambiente didáctico. Es por ello que se puesta en marcha y utilización es sencilla, y los bajos niveles de energía eléctrica y mecánica preservan la seguridad de su usuario en todo momento.

La maqueta CE105 posee una bomba de diafragma que toma el fluido del depósito inferior y tras atravesar un transductor de caudal es dirigido al primero de los tanques. El flujo atraviesa un tubo de vidrio calibrado en el que está alojada una pieza metálica que oscila en este tubo dependiendo de la velocidad que tenga el fluido. Existen además tres válvulas de paso variable: dos de ellas (de desagüe) conectan el cada tanque con el depósito inferior y la otra permite el flujo entre los dos tanques. Además la maqueta está preparada para trabajar con una segunda bomba que aporte fluido al tanque derecho y así permitir la operación con un sistema multivariable (con dos entradas al sistema). El tanque izquierdo está conectado a un transductor de presión de profundidad capaz de proporcionar señales de salida en el rango de 0 a 10V en proporción directa con el nivel real de agua en cada tanque. Además el nivel del líquido en cada uno de los tanques es claramente visible a través de las ventanas transparentes del panel frontal dotadas de una escala de calibración adyacente que permite observar los niveles de líquido reales en una escala de 0 a 250 mm.

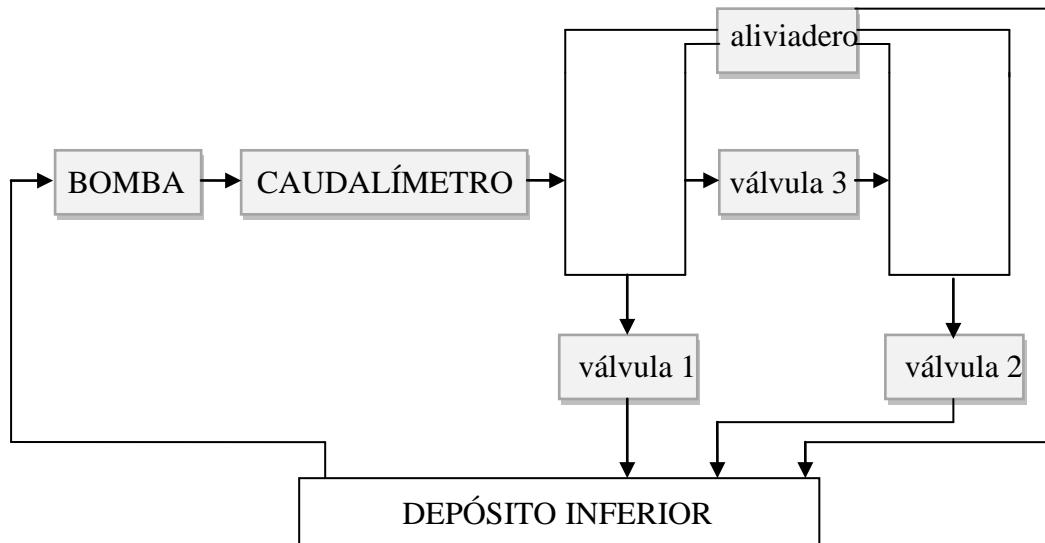
Todas las entradas y salidas operan en un rango de tensión de 0 a 10V, y estas son accesibles desde el panel frontal. El cableado entre la tarjeta de conexiones y los circuitos de la CE105 se hacen a través de tomas de 2 mm, de forma que sea posible la interconexión con un ordenador en el que esté instalado el programa LabVIEW y que por tanto permita ese control. Con el fin de asegurar la exactitud y fidelidad de los datos que se empleen se utiliza además otro equipo que trabaje con el sistema operativo en tiempo real y que se conecte con el primero a través de la red Ethernet.

El CE105 está diseñado para trabajar con el tablero de mando del controlador CE122 disponible también en el laboratorio, sin embargo no será utilizado en el desarrollo del proyecto.

### 1.2.1 - Esquema de funcionamiento

La maqueta CE105 de tanques acoplados sigue un determinado patrón de funcionamiento en función del recorrido que sigue el agua a lo largo del proceso. En el instante inicial todo el líquido permanece estático en el depósito situado en la parte inferior de la maqueta. La bomba de diafragma a través de su tubería de aspiración toma el líquido y lo hace circular a través de la manguera flexible de goma atravesando además el cuerpo del caudalímetro hasta llegar al tanque izquierdo. Una vez llegado a este estado el funcionamiento dependerá de la configuración de las diferentes válvulas. Existirá la posibilidad entonces de que el agua discorra hacia el tanque derecho a través de la válvula

que los comunica y/o que el agua regrese al depósito inferior del que ha partido. En el caso en que el fluido pase al tanque acoplado la única salida que dispondrá será al depósito inferior de nuevo. En el caso de que los tanques lleguen al máximo de su capacidad existe un aliviadero por el que discurre el líquido hacia el depósito de forma que no existe riesgo de derramamiento del líquido sobre la zona de trabajo.



**Figura 1.1 - Esquema del proceso del fluido**

### 1.2.2 – Desperfectos de la maqueta

Debido al tiempo en que ha estado inutilizada la maqueta CE105, ésta posee algunos desperfectos que tratarán de subsanarse para así poder hacer el estudio de forma cómoda y precisa. Por ejemplo las tuberías de goma flexible se encuentran en un grado de deterioro importante e incluso existen algunas fugas, así que todas las conexiones por las que discurre el líquido de trabajo van a ser remplazadas por nuevas mangueras transparentes de diámetro interior de 20 mm que permitan canalizar el líquido sin ningún tipo de obstáculo y permitiendo la visualización del curso del fluido así como la posible generación de burbujas que perturben el estudio.

Existe además una fuga en la propia salida de la bomba así que se refuerza la unión entre la tubería flexible y la salida de la bomba con una porción de cinta flexible de teflón.

En el panel frontal existen tres indicadores prismáticos del estado del nivel del depósito: vacío, medio lleno, y lleno. El indicador del estado de llenado del depósito consiste en un tubo de material transparente y rígido con sus extremos conectados al panel frontal y cerrados por prensaestopas unidos al depósito, generalmente, mediante tres válvulas (dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo, para impedir el escape del líquido en caso de rotura del cristal, y una de purga). Así cuando el depósito se encuentra

en cada uno de estos niveles, es observado a través de estos indicadores desde el propio panel frontal. No obstante estos indicadores prismáticos de nivel están agrietados impidiendo así conocer el grado de llenado del depósito, pero al no suponer esto un impedimento a la hora de hacer ensayos con la maqueta no se tendrá en consideración la posible reparación de este daño.



**Figura 1.2 - Indicadores de nivel prismáticos**

El tubo de vidrio que indica, a través de la pieza metálica adjunta, el caudal que circula a través del tubo flexible será suprimido de forma definitiva puesto que además de frenar de forma considerable la circulación de líquido a través del sistema la medida que este aporta no es concisa debido a las oscilaciones de la pieza metálica. Además es el transductor de caudal el que aporta la medida exacta del volumen de líquido que circula por unidad de tiempo.

Por otro lado el sensor de nivel de presión además de estar completamente descalibrado, aporta una medida demasiado ruidosa luego se reemplazará este sensor por otro sensor de nivel apto para la medida del nivel de líquido del interior de un tanque.

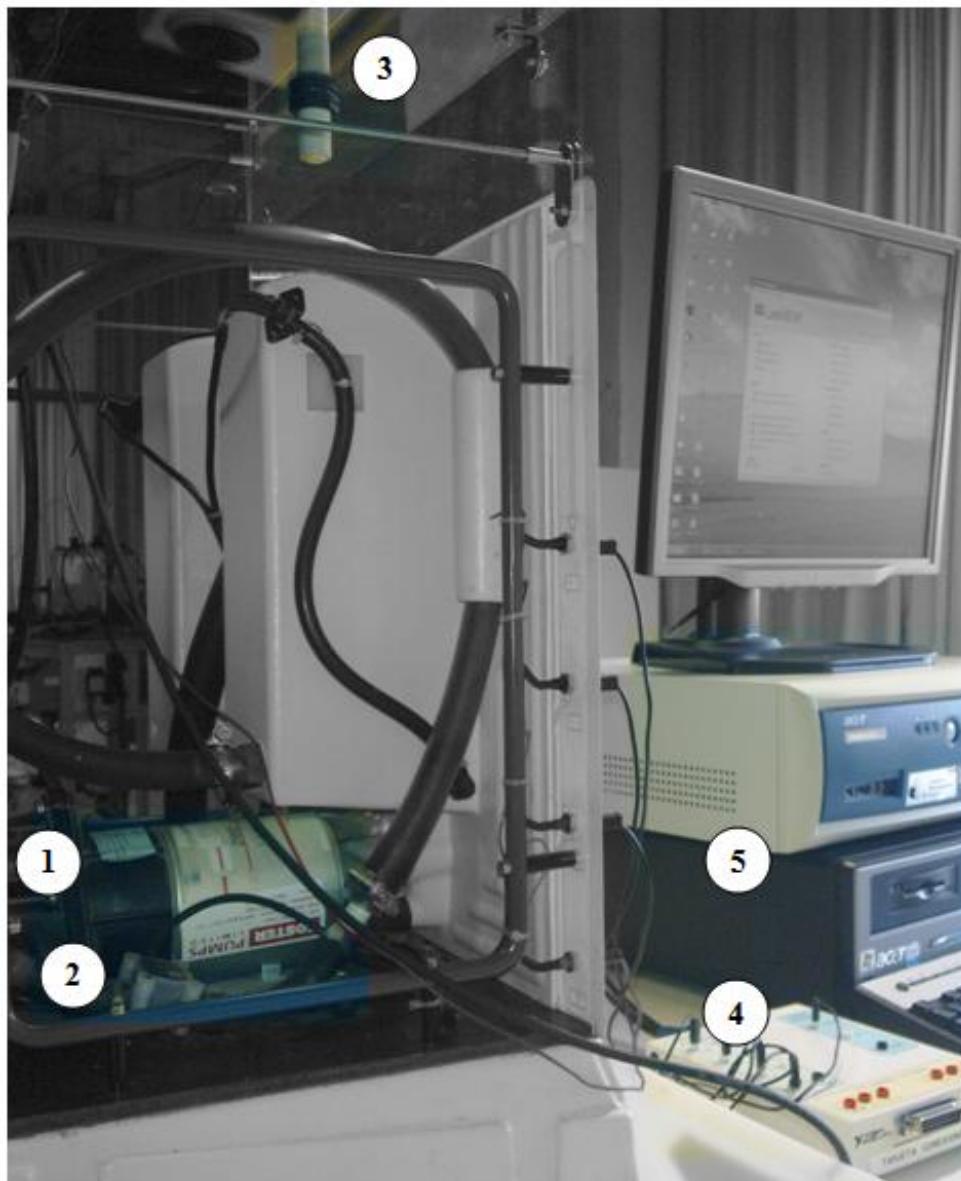
### **1.2.3 - Puesta en marcha**

Para poner a punto la maqueta la primera tarea a realizar es la introducción del fluido en el sistema. Para ello se necesita un bidón con una cantidad de unos 8,5 l de agua destilada, una botella de agua mineral de 2 l y otra de 50 cl, unos 8-10 ml de colorante del tono “Strawberry” y un par de guantes de látex.

Se recorta la botella de 50 cl de agua mineral por su base y se agujerea el tapón con un sacabocados para tener un agujero de unos 3 mm de diámetro a modo de embudo. Se coloca la botella de 2 litros en la que se efectuara la disolución del colorante en una bandeja rectangular para así evitar que un posible derramamiento anegue el suelo del laboratorio. Se coloca el embudo sobre la botella, sujetando ambos elementos con la mano fuertemente para evitar que se mueva el embudo y se derrame el líquido. Se precisa la ayuda de otra persona que se encargue de ir echando el agua destilada en el interior del embudo. Una vez está llena la botella se echa un tapón del colorante y a continuación, y tras colocar el embudo ahora en el tanque izquierdo de la maqueta y abriendo la llave que drena el agua del tanque hasta el depósito inferior y cerrando el resto de llaves, se procede a ir llenando el propio depósito hasta que el líquido llegue al borde del rebase (8,5 litros).

### 1.3 – CARACTERISTICAS DE CADA ELEMENTO DE LA MAQUETA

Este apartado va a tratar de profundizar en los elementos de la maqueta de forma aislada, trabajando de forma independiente del resto. Para ello en primer lugar se hace una localización de los mismos en el conjunto:



- 1 Bomba de diafragma
- 2 Caudalímetro
- 3 Sensor de nivel de ultrasonidos
- 4 Tarjeta de conexiones
- 5 PC host y PC target

### 1.3.1 – Bomba de diafragma o membrana

El impulso de líquidos a través de tuberías es una exigencia básica muy difundida en la técnica moderna y las máquinas encargadas de desempeñar esta labor son las bombas de agua [2]. Estas bombas se instalan con frecuencia junto al motor eléctrico. Existe una gran cantidad de tipologías de bombas en el mercado dependiendo de la aplicación a la que va a estar dirigida.

La bomba de membrana o bomba de diafragma es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, generalmente alternativo en la que el aumento de presión se realiza por el empuje de unas paredes elásticas (diafragmas) que varían el volumen de la cámara aumentándolo y disminuyéndolo alternativamente. Unas válvulas de retención controlan que el movimiento del fluido se realice de la zona de menor presión a la de mayor presión.



**Figura 1.4 - Bomba SHURflo en la maqueta**

#### ➤ Estructura interna

1 – Cambiador automático coaxial: encargado del movimiento alternativo

2 – Cuerpo bomba: carcasa exterior de la propia bomba

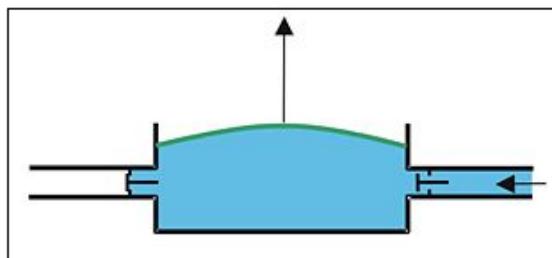
3 – Membrana: pared elástica

4 – Colector: etapa de introducción del líquido en el interior de la bomba

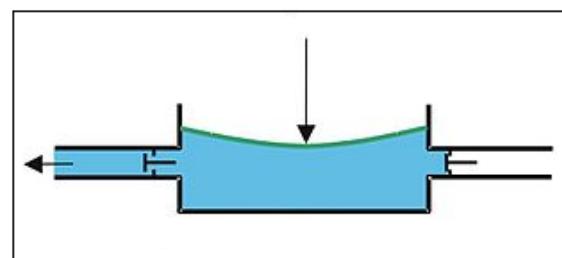
5 – Esfera: elemento encargado de que el fluido circule en la dirección apropiada o bien sea frenado

6 – Membrana: pared elástica

### ➤ Principio de funcionamiento



**Figura 1.5a – Aspiración**



**Figura 1.5b - Expulsión**

La bomba de diafragma del fabricante SHURflo está ajustada para trabajar a una presión de 30 PSI (*pounds per square inch* o libra-fuerza por pulgada cuadrada) es decir unos 2 bares de presión. Es capaz de aportar un caudal de 1,4 IMPG/M (galones imperiales por minuto) equivalente a  $5298,72 \frac{cm^3}{min}$ .

### ➤ Características generales

- Existen modelos de bombas de diafragma sumergibles y no sumergibles
- Son muy versátiles
- Son capaces de manejar inclusive materiales críticos de una manera confiable y segura
- Trabajo libre de aceite y funcionan sin obstáculos
- Funcionamiento en seco
- Caudal y altura de elevación regulables
- Regulación final de velocidad y presión
- Mantenimiento simple y rápido

### ➤ Funcionamiento real de la bomba

Para saber de forma general el comportamiento que tiene la bomba se procede al análisis de su comportamiento físico trabajando libremente, sin ningún patrón de comportamiento específico. Se aprecia una irregularidad en el ruido que emite la bomba al aportar un caudal constante, ya que este es monótono y en un momento dado (aleatorio) disminuye como si la bomba se dispusiera a pararse y a continuación reanuda su aporte de caudal. Así al introducir a la bomba una tensión invariable el caudal que ésta debería aportar debería de ser también constante, sin embargo la bomba presenta una anomalía en su comportamiento. Como se ha mencionado esta irregularidad se presenta a través de una caída repentina de caudal y una posterior recuperación al cabo de unos segundos de su caudal normal.

El tipo de bombas de diafragma no necesitan ser cebadas en el momento del arranque y dado que su principal característica es su funcionamiento sencillo y la simplicidad de sus componentes no se puede llegar a la conclusión de que esta anomalía en su funcionamiento este ocasionado por un arranque incorrecto de la bomba en vacío.

Un fenómeno que podría haber ocasionado este funcionamiento errático en la bomba es llamado golpe de ariete, producido por una brusca variación en el caudal. Esto ocurre cuando la bomba se encuentra parada o con una tensión de alimentación muy pequeña y de repente esta tensión de entrada pasa a su valor máximo o a un valor muy cercano a él. Así para asegurar una vida útil de la bomba lo más amplia posible se evitarán estas variaciones bruscas en la tensión de entrada.

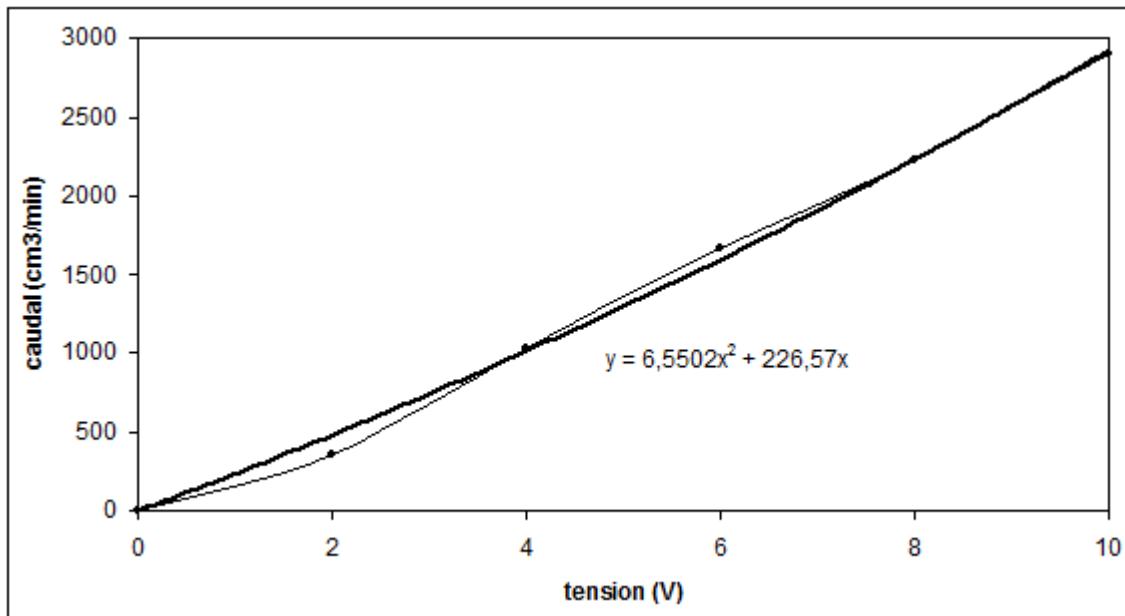
#### ➤ Relación $Q_{\text{salida}} / V_{\text{bomba}}$

Para saber la relación que existe entre la tensión de entrada a la bomba y el caudal que ésta aporta al sistema de tanques, basta con hacer un ensayo directamente sobre la maqueta. El ensayo se desarrolla con las válvulas totalmente cerradas de forma que se pueda trabajar con el tanque izquierdo de forma aislada aplicando a la bomba una tensión constante durante toda la prueba. Para llevar a cabo este ensayo se trabaja a los niveles de tensión de 2, 4, 6, 8 y 10 V, y a partir de los datos de incremento de altura del líquido y su correspondiente variación de tiempo. Con la sección del propio tanque  $A = 72,25\text{cm}^2$  se puede conocer la variación en el volumen, y con los tiempos, su relación entre la magnitud obtenida obteniendo el caudal aportado para ese valor de tensión,

<b><math>V_{\text{bomba}}</math> (V)</b>	<b><math>\Delta H</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta V</math> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\Delta T</math> (min)</b>	<b><math>Q</math> (cm<sup>3</sup>/min)</b>
0	0	0	0	0,00
2	2,25	162,56	0,46	350,85
4	2,65	191,64	0,19	1026,66
6	2,38	172,14	0,10	1665,83
8	3,86	278,89	0,13	2231,08
10	3,14	227,05	0,08	2898,45

**Figura 1.7 - Datos obtenidos del ensayo**

Tras representar gráficamente estos datos, se agrega la línea de tendencia y se representa en el grafico la ecuación que relaciona el caudal con la tensión.



**Figura 1.8 - Caudal en función de la tensión de la bomba**

Por lo que la relación aproximada que existe entre la tensión de la bomba y el caudal que esta es capaz de aportar es:

$$Q = 6,5502V_b^2 + 226,57V_b \quad (1.1)$$

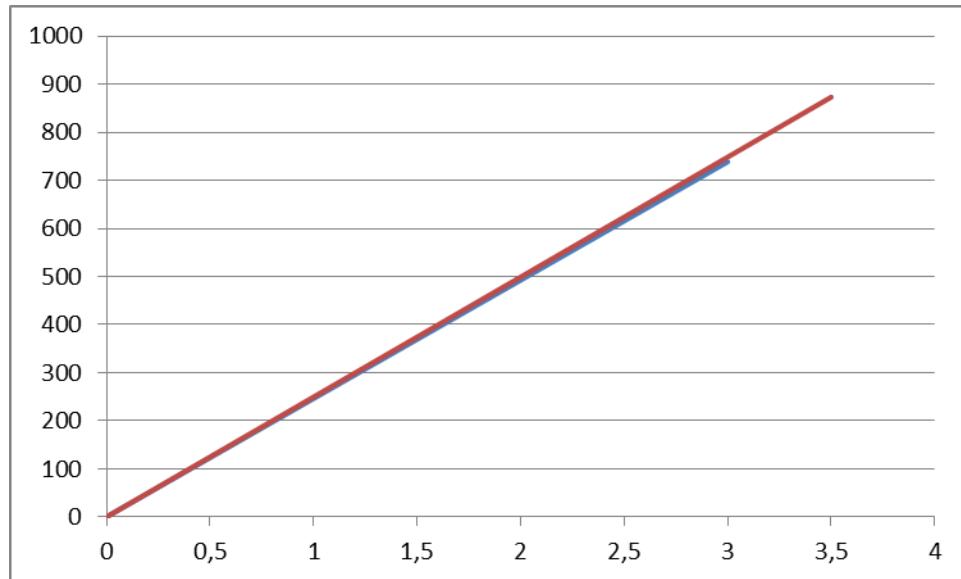
#### ➤ Aproximación al comportamiento dinámico constante

La bomba hidráulica es un elemento no lineal con un límite inferior y un límite superior que corresponden a los valores mínimos y máximos de caudal que puede proporcionar la bomba. Al no disponer de la función de transferencia de la bomba, entre los dos límites se considera el comportamiento lineal puesto que el tiempo de respuesta es mucho menor que el comportamiento de la planta general y no representan una variación significativa al modelo de la planta.

Para conocer esta linealidad que existe entre tensión y caudal se fija un punto de operación, por ejemplo alrededor de los  $3,25V$  fijando como tensión mínima  $3V$  y como tensión máxima  $3,5V$ . De la ecuación 1.1 se puede hallar el caudal correspondiente a estos voltajes.

$$Q_{3V} = 6,5502 \cdot 3^2 + 226,57 \cdot 3 = 738,66 \frac{cm^3}{min} \quad (1.2)$$

$$Q_{3,5V} = 6,5502 \cdot 3,5^2 + 226,57 \cdot 3,5 = 873,23 \frac{cm^3}{min} \quad (1.3)$$

**Figura 1.9 - Rectas caudal / tensión**

Las pendientes respectivas de estas rectas y el valor medio de las mismas son:

$$m_1 = \frac{738,66}{3} = 249,22 \frac{\text{cm}^3}{\text{min} \cdot \text{V}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 4,104 \frac{\text{cm}^3}{\text{s} \cdot \text{V}}$$

$$m_2 = \frac{873,23}{3,5} = 249,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{min} \cdot \text{V}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 4,158 \frac{\text{cm}^3}{\text{s} \cdot \text{V}}$$

$$\bar{m} = \frac{4,104 + 4,158}{2} = 4,1311 \frac{\text{cm}^3}{\text{s} \cdot \text{V}} \quad (1.4)$$

De forma experimental el funcionamiento esta descrito por la siguiente ecuación:

$$q = k_b \cdot v_i \quad (1.5)$$

Donde  $q$  es el caudal de salida de la bomba en  $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ ,  $v_i$  es el voltaje aplicado a la

bomba en V y  $k_b$  es la pendiente de la curva linearizada en torno al punto de operación de  $3,25V$ .

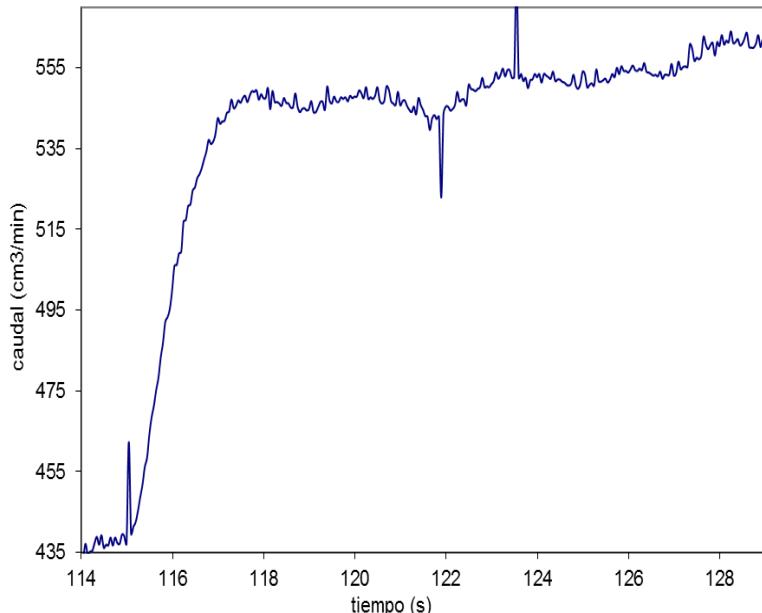
Aplicando la transformada de Laplace se obtendrá entonces la función de transferencia (constante) de la bomba:

$$G_b(s) = \frac{Q(s)}{V_b(s)} = k_b = 4,1311 \quad (1.6)$$

### ➤ Comportamiento dinámico real

Al someter a la bomba a un determinado escalón de tensión la respuesta del aporte de caudal sigue una determinada curva hasta que alcanza su valor final, a partir del cual es válida la ecuación anterior. Es por eso que es necesario analizar este comportamiento dinámico mediante el estudio minucioso a partir de los datos obtenidos de un ensayo en el que se somete a la bomba a un cierto escalón de tensión.

Para ver el comportamiento dinámico se realiza un ensayo en el que una vez introducido un voltaje de tensión se somete a la bomba a un escalón de tensión y se observa el comportamiento de la señal del caudalímetro.



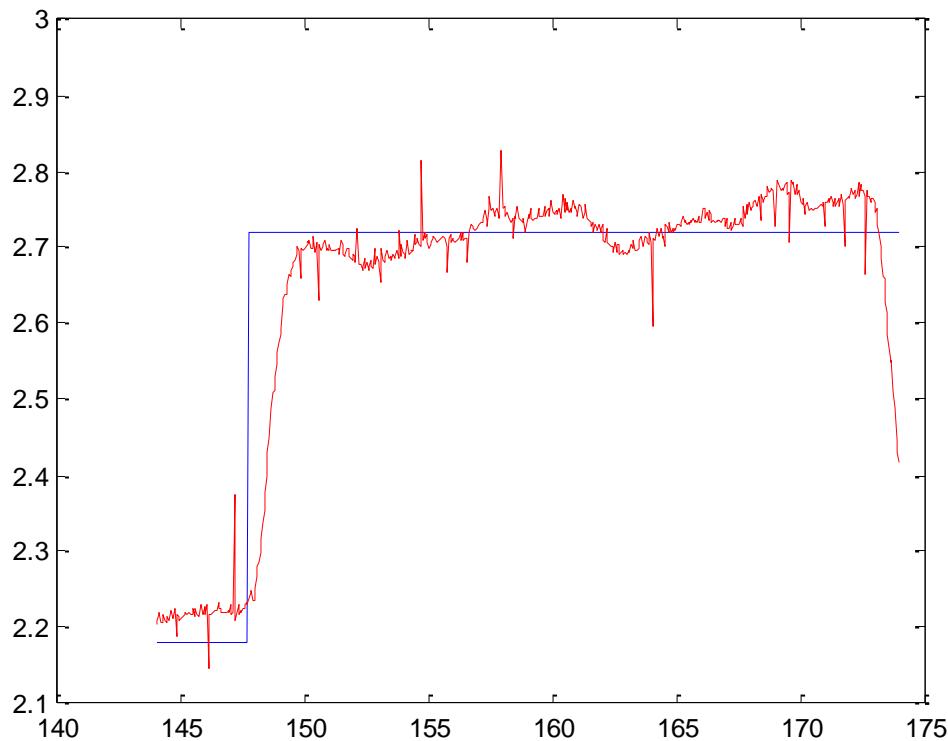
**Figura 1.10 - Respuesta de caudal**

La dinámica de este sistema es típica de un sistema de segundo orden cuya función de transferencia puede calcularse de forma analítica con Matlab importando los datos desde el fichero de Excel y definiendo las variables con las que se va a trabajar. El tiempo en segundos se define tomando los datos correspondientes a la columna 2 (todas sus filas). Del mismo modo se define la tensión de referencia o de la bomba tomando los datos de la columna 7, la tensión del caudalímetro con los datos de la columna 5, el caudal de la bomba con la 8 y finalmente el caudal referido a la medida del caudalímetro con los datos de la columna 6. Las órdenes a utilizar en la ventana de comandos serán en consecuencia:

```
>> size(datos)
ans =
  600   8
>>t=datos(:,2);
>>t(length(t))
ans =
  173.9910
>>vref=datos(:,7);
>>vref(length(vref))
ans =
  2.7200
>>vcaudal=datos(:,5);
>>vcaudal(length(vcaudal))
ans =
  2.4180
>>qref=datos(:,8);
>>qref(length(qref))
ans =
  873.2309
>>qcaudal=datos(:,6);
>>qcaudal(length(qcaudal))
ans =
  797.9713
```

Si ahora se quiere tener la representación conjunta de la tensión de referencia y los distintos valores de tensión que va tomando el caudalímetro en función del tiempo:

```
>> plot(t,vref)
>> hold
Current plot held
>> plot(t,vcaudal,'r')
```

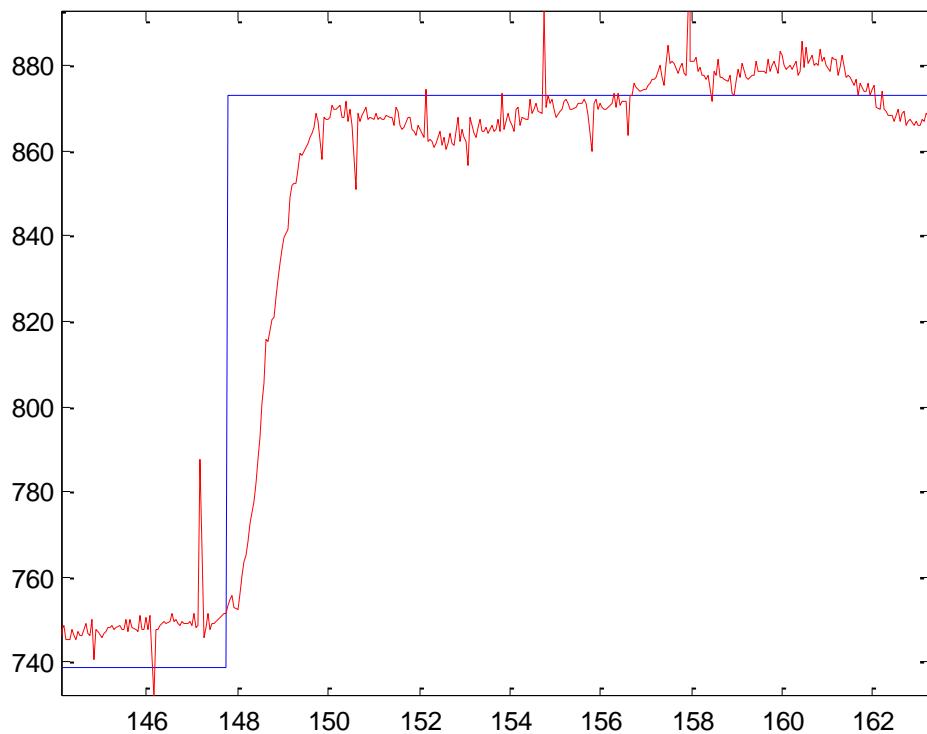


**Figura 1.11 - Tensión del caudalímetro teórica y real (V)**

Como se observa el caudalímetro toma unos valores muy oscilantes en un corto periodo de tiempo, sin embargo en estado estacionario estos se corresponden con los valores de la referencia. Una vez se tiene la gráfica de las tensiones se procede del mismo modo, pero en esta ocasión con los datos de caudal:

Caudal de referencia asociado a la Vref:

```
>> plot(t,qref)
>> hold
Current plot held
>> plot(t,qcaudal,'r')
```



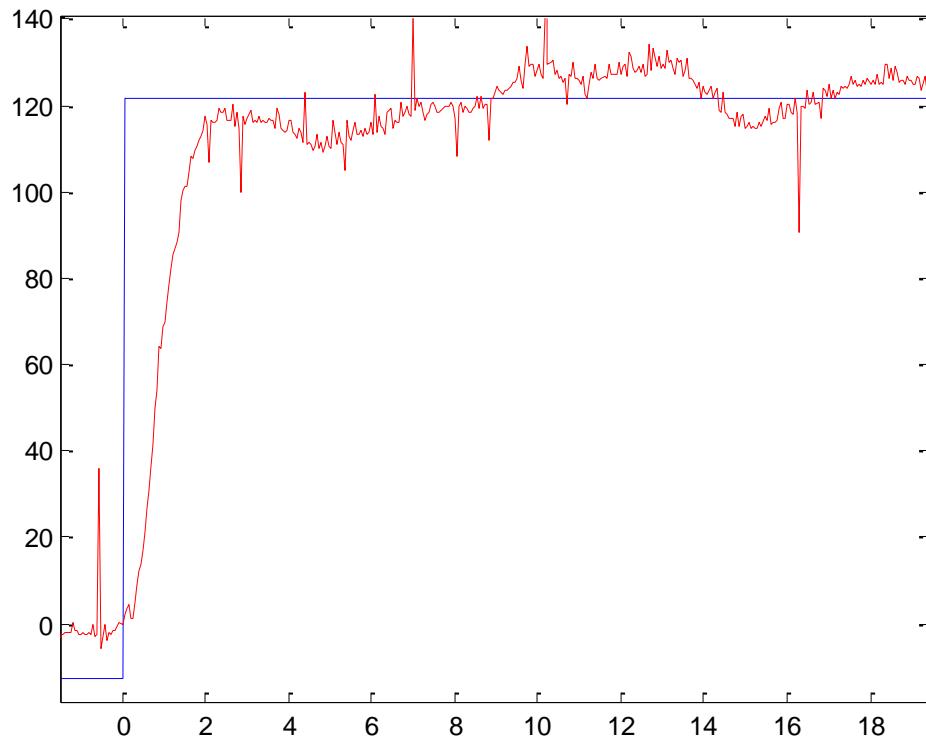
**Figura 1.12 - Caudal de salida real del caudalímetro y caudal real ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )**

Como puede apreciarse la representación del caudal es idéntica a la de la tensión, simplemente han variado los rango de valores. Para poder hacer una comparación entre esta representación gráfica y la de la función de transferencia que se trata de conseguir se van a referenciar los tiempos al momento en el que se produce el escalón, es decir, tomando como origen el valor  $t = 147,741\text{s}$ . Esto se consigue restando a cada muestra de tiempo este tiempo de arranque:

```
>> to=t-147.741;
```

Por último al igual que en el eje de abscisas, se referencia el eje de ordenadas al valor del caudal en el instante  $t = 0\text{s}$ . Este valor, del fichero de datos, se corresponde con  $Q = 751,37 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  luego basta con restarlo a cada uno de los datos de caudal tanto de la referencia como del caudalímetro:

```
>> qrefo=qref-751.37;
>> qcaudalo=qcaudal-751.37;
>> plot(to,qrefo)
>> hold
Current plot held
>> plot(to,qcaudalo,'r')
```



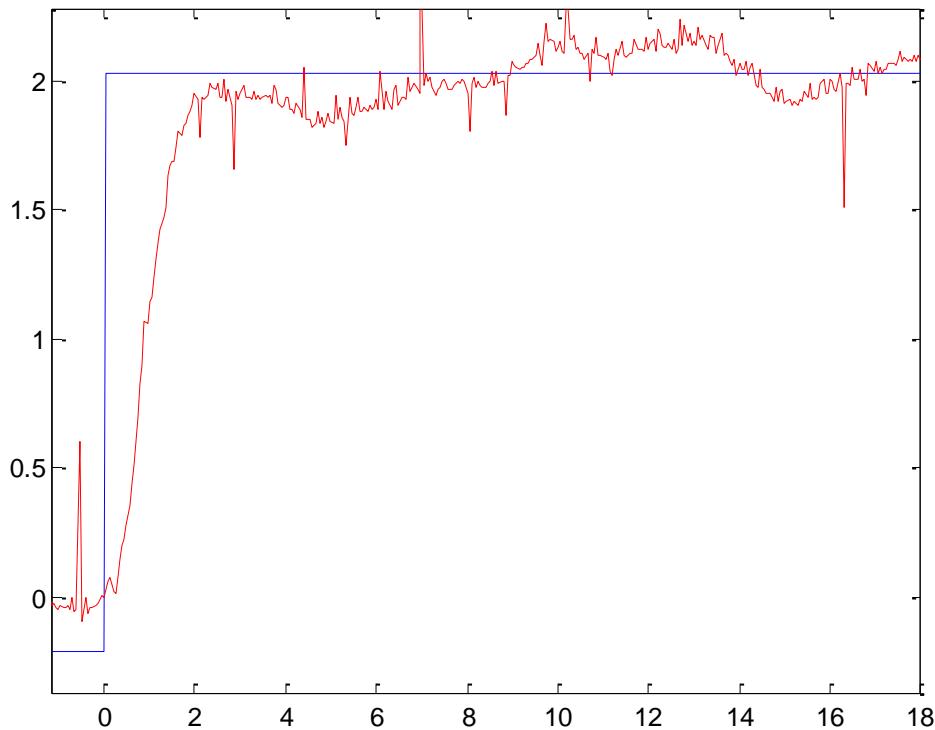
**Figura 1.13 - Caudal teórico y real referenciado al origen (cm<sup>3</sup>/min)**

Una vez centrada la respuesta del sistema en el origen, se observa que el 63% del valor final, 75,6cm<sup>3</sup>/min, se alcanza alrededor de 1 segundo. La constante de tiempo aproximada de la función de transferencia será entonces  $\tau = 1s$ .

A continuación, se procede a hacer una correspondencia entre las unidades de esta etapa del ensayo y la etapa siguiente. La salida de esta función de transferencia, el caudal, es al mismo tiempo la entrada a la función de transferencia de los tanques acoplados. Las unidades de tiempo del caudal vienen expresadas en segundos, con lo cual para poder trabajar conjuntamente con ambas ecuaciones basta con escalar la gráfica anterior y

transformar el caudal de  $\frac{cm^3}{min}$  a  $\frac{cm^3}{s}$  dividiendo a este primero entre 60.

```
>> qrefos=qrefo/60;
>> qcaudalos=qcaudalo/60;
>> plot(to,qrefos)
>> hold
Current plot held
>> plot(to,qcaudalos,'r')
```



**Figura 1.14 - Caudal teórico y real referenciado al origen (cm<sup>3</sup>/s)**

Partiendo del valor de la constante de tiempo  $\tau = 1$  vemos la relación entre la respuesta real de sistema y la simulación a través de la función de transferencia a calcular. Conocido el valor de la constante proporcional entre la tensión y el caudal calculada para el estado estacionario  $k_b = 4,13$  partiendo de un sistema de primer orden con el fin de comparar los resultados, la función de transferencia correspondiente es,

$$G_b(s) = \frac{k_b}{\tau s + 1} \quad (1.7)$$

Luego,

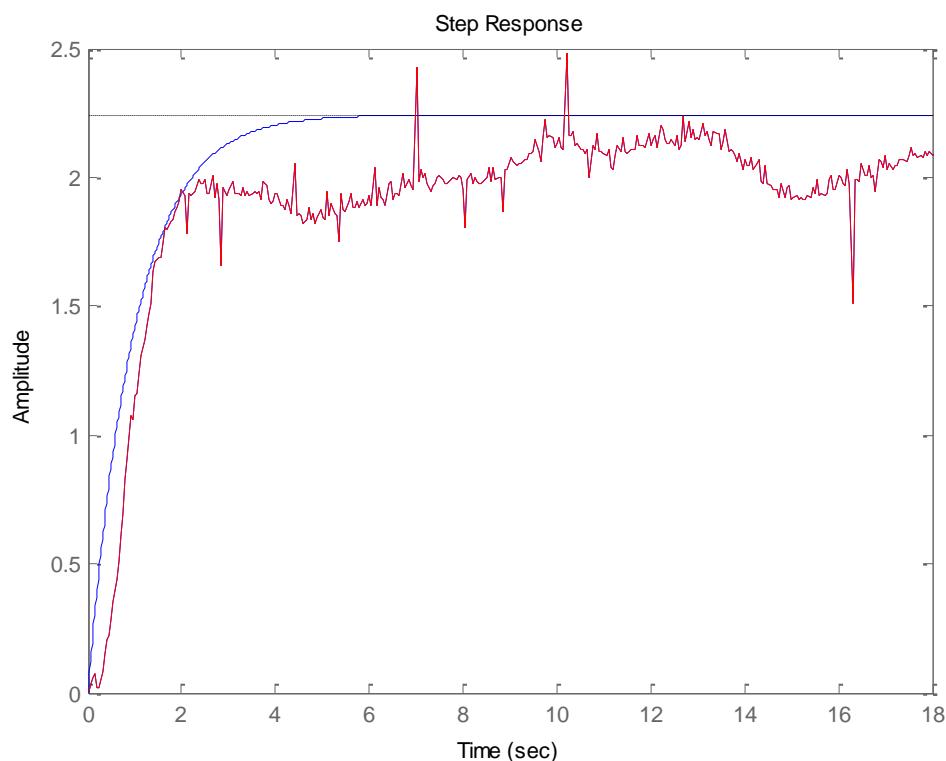
$$G_{b1}(s) = \frac{4,13}{s + 1} \quad (1.8)$$

Para poder hacer la representación en el mismo eje de tiempos que la medida real del transductor de caudal hay que definir inicialmente el eje de tiempos para la simulación. Para ello a través del comando *linspace* se crea una división de tiempos definida por el valor inicial, el valor final, y el número de divisiones entre ambos.

```
>> tsimu=linspace(0,18,1000);
```

Introduciendo la función de transferencia  $G_{bl}(s)$  en Matlab, asignando el eje de tiempos calculado, aplicando un escalón de amplitud 0,5 y haciendo la representación gráfica de la respuesta junto con la respuesta real del caudal se obtiene:

```
>> g1=tf([4.13],[1 1])
Transfer function:
4.13
-----
s + 1
>> step(g1*0.5,tsimu)
```

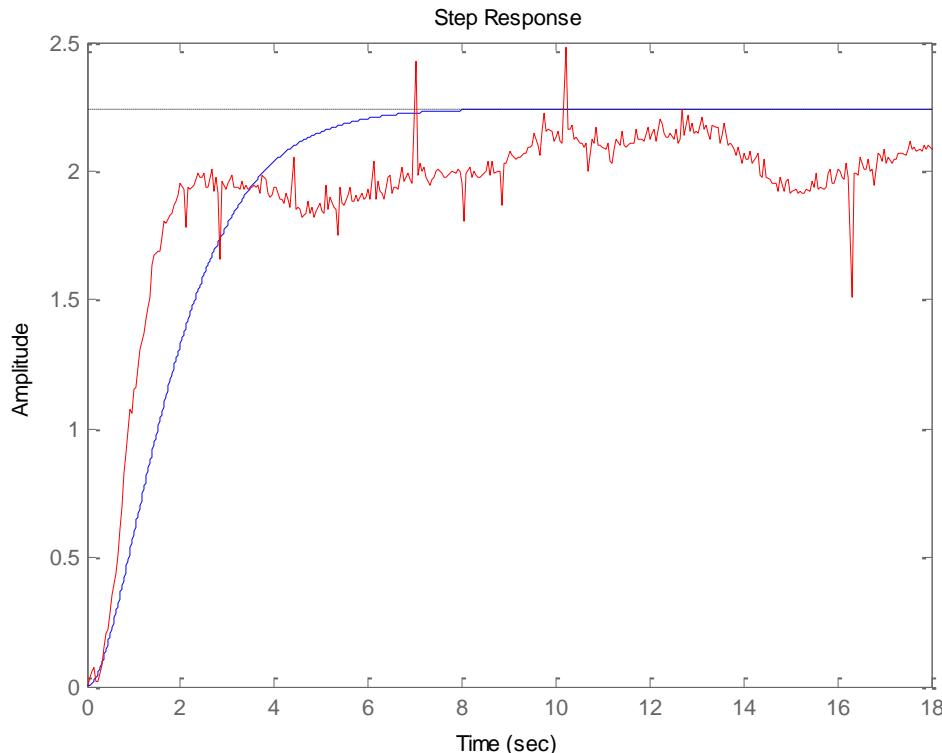


**Figura 1.15 - Función de transferencia de la bomba de primer orden**

La tendencia de ambas curvas en el transitorio es muy diferente por lo que queda confirmado que la función de transferencia de la bomba ha de ser de segundo orden. La curva de la simulación parte del origen hacia el valor estacionario, mientras que la curva del caudalímetro inicialmente toma unos valores muy pequeños y a partir de los 10 ms aproximadamente comienza a crecer. Este comportamiento del caudalímetro es el típico de un sistema de segundo orden. Así pues se modifica la función de transferencia tomando ahora un polo doble:

$$G_{b2}(s) = \frac{4,13}{(s+1)^2} \quad (1.9)$$

```
>> g2=tf([4.486],[1 2 1])
Transfer function:
 4.486
-----
s^2 + 2 s + 1
```

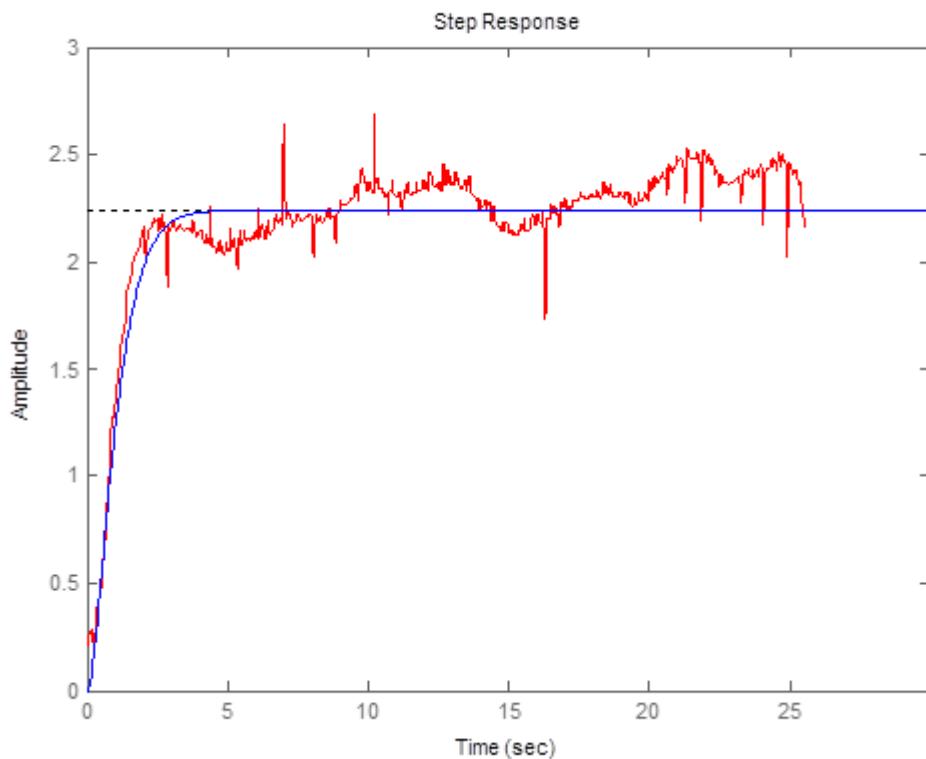


**Figura 1.16 - Función de transferencia de la bomba de segundo orden ( $\tau=1s$ )**

Ahora el comportamiento en los tiempos cercanos a 0, es similar al real. Sin embargo el sistema simulado es más lento que el real, luego ahora se probara con una nueva función de transferencia en la que la constante de tiempo  $\tau$  sea más pequeña, por ejemplo  $\tau = 0,7s$ .

$$G_2(s) = \frac{4,13}{(0,7s + 1)^2} \quad (1.10)$$

```
>> g3=tf([4.13],[0.49 1.4 1])
Transfer function:
 4.13
-----
0.49 s^2 + 1.4 s + 1
```



**Figura 1.17 - Función de transferencia de segundo orden ( $\tau=0,7\text{s}$ )**

Con la nueva constante temporal el sistema simulado es ahora tan rápido como el real. Por ello la conclusión acerca del comportamiento dinámico del sistema es que su función de transferencia tiene al menos dos polos, sin embargo no se conoce la presencia o ausencia de ceros. Al no disponer de dicha función este análisis ha de ser completamente experimental por lo que se analizará más en profundidad en el capítulo 4 relativo al control del sistema.

### 1.3.2 – Caudalímetro

Este transductor de flujo ha sido diseñado para su uso con una gama de diferentes líquidos entre los que se encuentra el agua destilada. La unidad es capaz de operar en dos rangos de flujo: flujo alto (0,2 a 9 l/min) mediante la inserción del No jet suministrado en la tubería de entrada [3]. El transductor acepta tanto tuberías como otros accesorios de 8 mm y 12 mm de diámetro.

Para evitar que el flujo del líquido circule a más velocidad en una zona de la tubería que en otra está instalado lo más próximo a la bomba posible, sin que le afecten las perturbaciones que ocasionan las uniones en T, codos o válvulas entre otros accesorios.



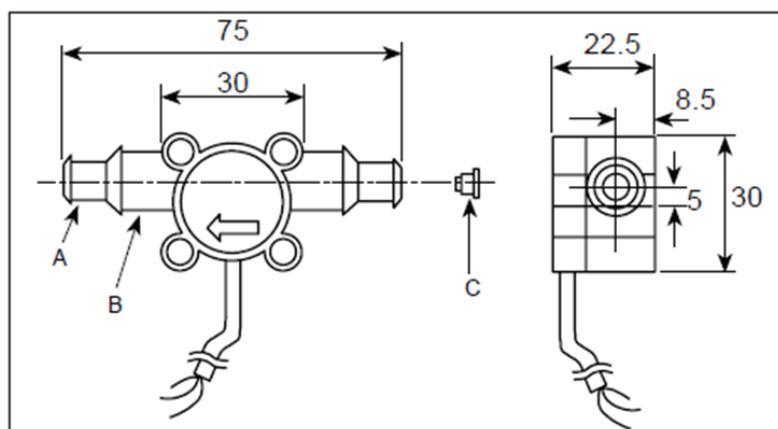
**Figura 1.18 - Transductor de caudal de la maqueta CE105**

Todos los transductores se ven afectados por la viscosidad, por lo que en la medida de lo posible se mantendrá la temperatura (y por consiguiente la viscosidad) constante.

Dentro del habitáculo existe un interruptor de efecto Hall que se activa por tres pequeños imanes en la turbina. Cada circuito de efecto Hall incluye un regulador de tensión, un generador de tensión Hall cuadrática, circuito estabilizador de temperatura, amplificador de señal, disparador de Schmitt y una salida de colector abierto con una resistencia pull-up. El regulador de a bordo permite operar con una tensión de alimentación de 4,5V a 24V. La salida de los interruptores puede descender hasta 20mA por lo que se incluye la resistencia interna de 10kΩ pull-up. Pueden ser utilizados directamente con un circuito lógico bipolar o MOS. El detector tiene un rango de operación de -40°C a +125°C.

Los materiales empleados en el caudalímetro son: PVDF en el cuerpo, la carcasa y el rotor, zafiro en el husillo y los rodamientos, viton en el anillo circular y resina de PVC para el cable.

#### ➤ Dimensiones y elementos



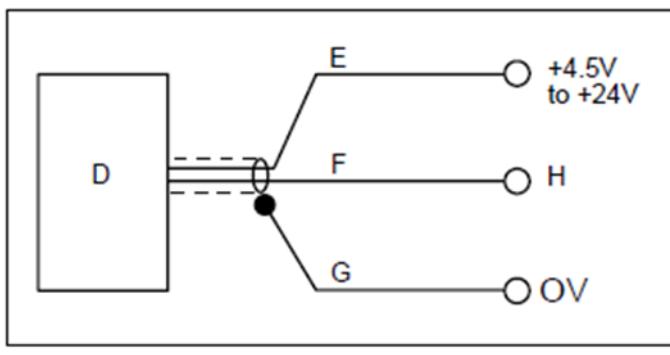
A: manguera de 8 mm de diámetro

B: manguera de 12 mm de diámetro

C: eliminación del accesorio para caudales elevados

**Figura 1.19 - Estructura y caudalímetro**

➤ Conexión y datos técnicos



D: caudalímetro

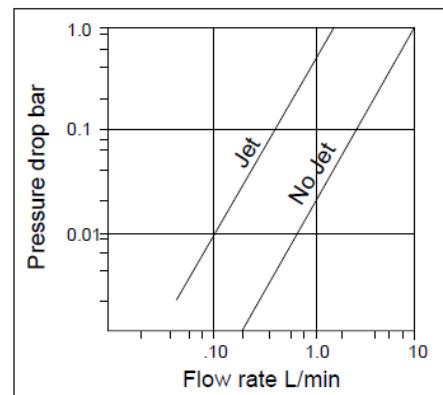
E: alimentación

F: señal

G: tierra

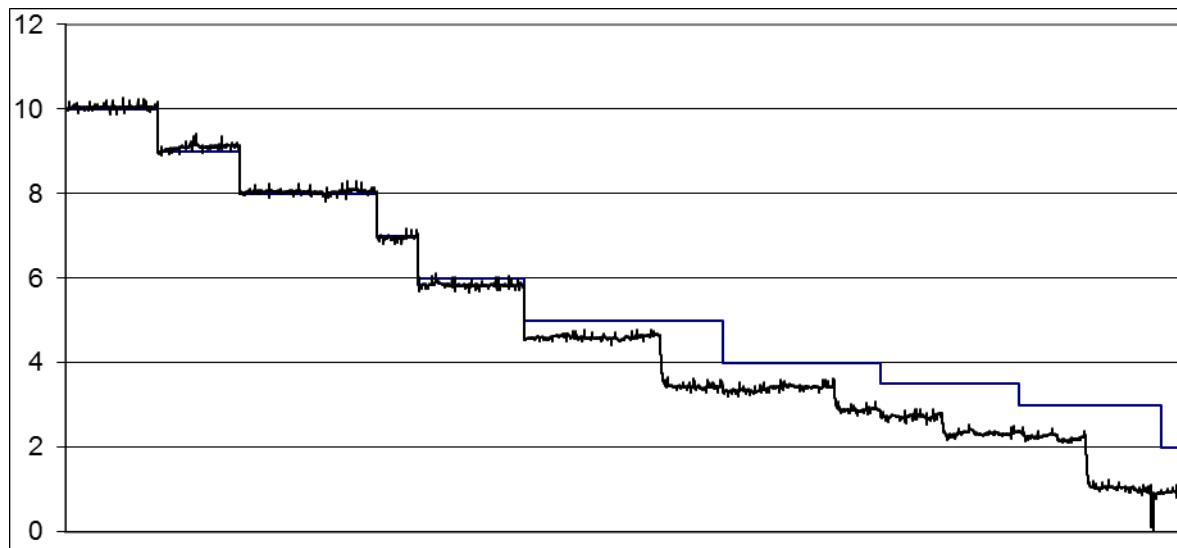
**Figura 1.20 - Cableado**

Caudal	3-90l/h
Frecuencia a fondo de escala	175Hz
Frecuencia a 12l/h	23Hz
Margen de viscosidad	0,8-20cSt.
Caída de presión fondo de escala	1Bar a 1cSt.
Presión de funcionamiento (max.)	10Bar
Temperatura de funcionamiento	-25°C a +125°C
Repetibilidad	±0,25
Linealidad	1%
Tensión de alimentación	4,5 a 24 Vcc
Consumo de corriente	10Ma
Tiempo de subida y bajada	2µs

**Figura 1.21 - Parámetros del caudalímetro****Figura 1.22 - Relación entre caudal (normal / elevado) y presión**

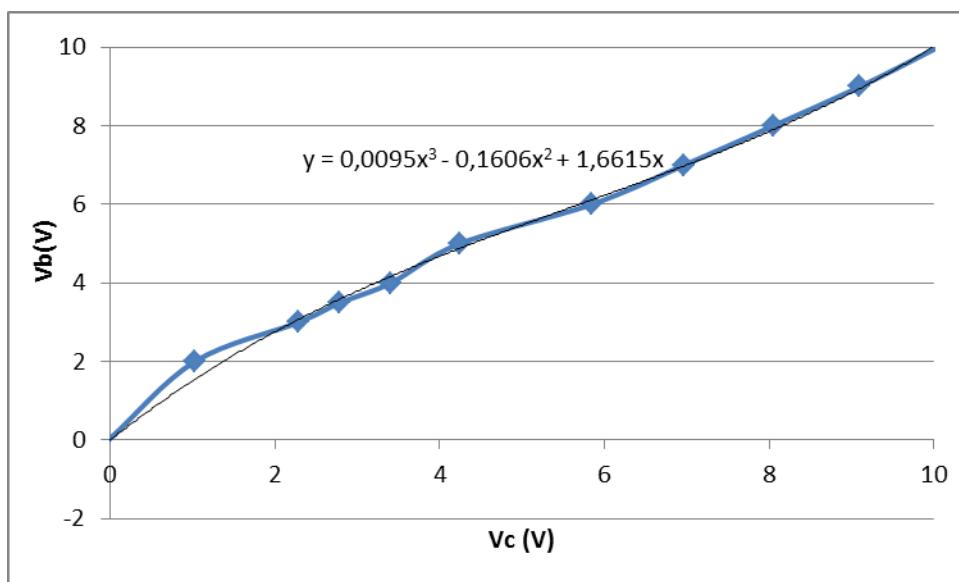
➤ Característica estática

Para conocer la relación que existe en estado estacionario entre la tensión que se aplica a la bomba y la tensión de salida del caudalímetro es necesario realizar un ensayo que relacione ambos parámetros. Para realizar este ensayo, se aporta a la bomba ciertos valores de tensión entre 0 y 10V y de esta forma se obtiene en régimen permanente un cierto valor de tensión de salida del caudalímetro (suprimiendo los datos en los que la bomba sufre caídas de tensión).



**Figura 1.22 - Tensión de la bomba y del caudalímetro**

Basta con tomar el valor medio de los datos obtenidos durante un mismo valor de la tensión de la bomba, para poder representar gráficamente ese valor medio frente al valor de tensión correspondiente.



**Figura 1.23 - Relación entre tensión de la bomba y del caudalímetro**

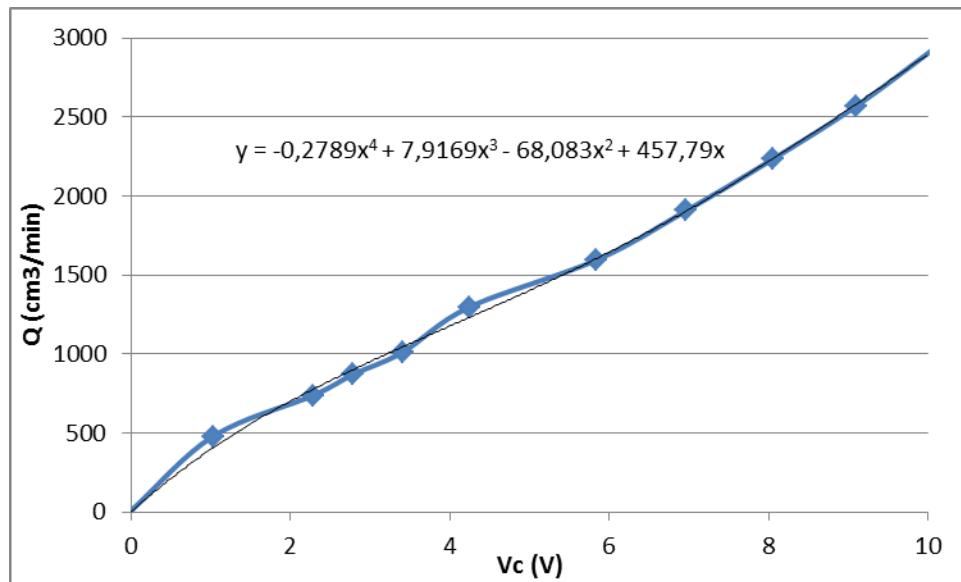
De la línea de tendencia se encuentra la relación expresada por:

$$V_b = 0,0095V_c^3 - 0,1606V_c^2 + 1,6615V_c \quad (1.11)$$

Y consecuentemente,

$$V_c = -0,009V_b^3 + 0,1562V_b^2 + 0,3397V_b \quad (1.12)$$

Con la relación que existe entre la tensión de la bomba y el caudal real que esta aporta se puede conocer por ende la relación entre la tensión del caudalímetro y el caudal que está circulando a través de él:



**Figura 1.24 - Relación entre el caudal y la tensión del caudalímetro**

Con lo que se obtiene la ecuación que relaciona ambos parámetros gracias a la línea de tendencia:

$$Q = -0,2789V_c^4 + 7,9169V_c^3 - 68,083V_c^2 + 457,79V_c \quad (1.13)$$

Ésta ecuación no deja de ser una aproximación entre la relación entre dos parámetros obtenida a partir de otra aproximación más o menos fiel. Por ello si se desea calcular el caudal es preferible obtenerlo a partir de la tensión de la bomba ya que los ensayos que se realizaron para obtener las curvas que relacionan estas variables se obtuvieron directamente de la maqueta a través de un análisis experimental.

### ➤ Característica dinámica

Es posible conocer la relación en régimen permanente entre el caudal de entrada al transductor y su tensión de salida gracias a la característica estática calculada con anterioridad en régimen permanente. Sin embargo el propio caudalímetro tendrá su respuesta característica en régimen transitorio. Como no se conoce la función de transferencia del transductor y dado que su respuesta ante una entrada escalón es muy rápida en comparación con el sistema general, se puede tomar como constante si se trabaja en torno a un punto de operación. Este punto de operación será aquel en el que la bomba

este sometida a una tensión de 3,25V. Así el comportamiento del caudalímetro viene expresado a través de la ecuación:

$$v_c = k_c \cdot q \quad (1.14)$$

Donde  $q$  es el caudal de salida de la bomba en  $\frac{cm^3}{s}$ ,  $v_c$  es la señal de tensión de salida del caudalímetro en Voltios y  $k_c$  es la pendiente de la curva linearizada en torno al punto de operación. Fijando los valores límites alrededor de ese punto de trabajo,  $V_- = 3V$  y  $V_+ = 3,5V$  puede calcularse dicha pendiente:

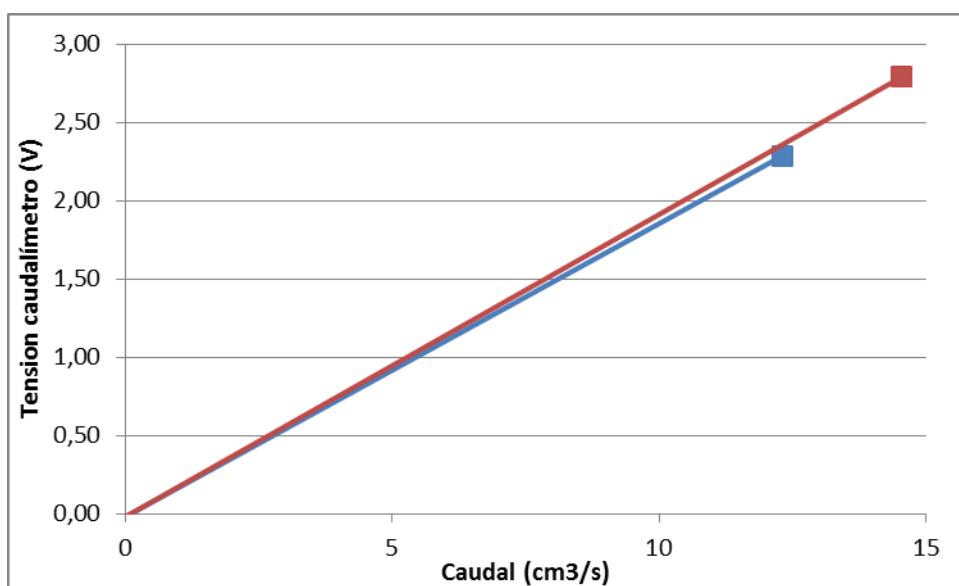
$$Q_{3V} = 6,5502 \cdot 3^2 + 226,57 \cdot 3 = 738,66 \frac{cm^3}{min} \quad (1.15)$$

$$Q_{3,5V} = 6,5502 \cdot 3,5^2 + 226,57 \cdot 3,5 = 873,23 \frac{cm^3}{min} \quad (1.16)$$

Del ensayo reflejado en la figura 1.24:

$$V_{C_{3V}} = 2,29VV \quad (1.17)$$

$$V_{C_{3,5V}} = 2,79V \quad (1.18)$$



**Figura 1.25 - Rectas entorno a un punto de equilibrio**

Luego las pendientes de ambas rectas se corresponden con:

$$m_1 = \frac{2,29}{12,31} = 0,186 \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

$$m_2 = \frac{2,79}{14,55} = 0,192 \frac{V \cdot s}{cm^3}$$

$$\bar{m} = \frac{0,186 + 0,192}{2} = 0,189 \frac{V \cdot s}{cm^3} \quad (1.19)$$

Por lo tanto tras aplicar la transformada de Laplace a la ecuación 1.19 para conseguir su función de transferencia entorno a un punto de trabajo concreto:

$$G_c(s) = \frac{V_c(s)}{Q(s)} = k_c = 0,189 \quad (1.20)$$

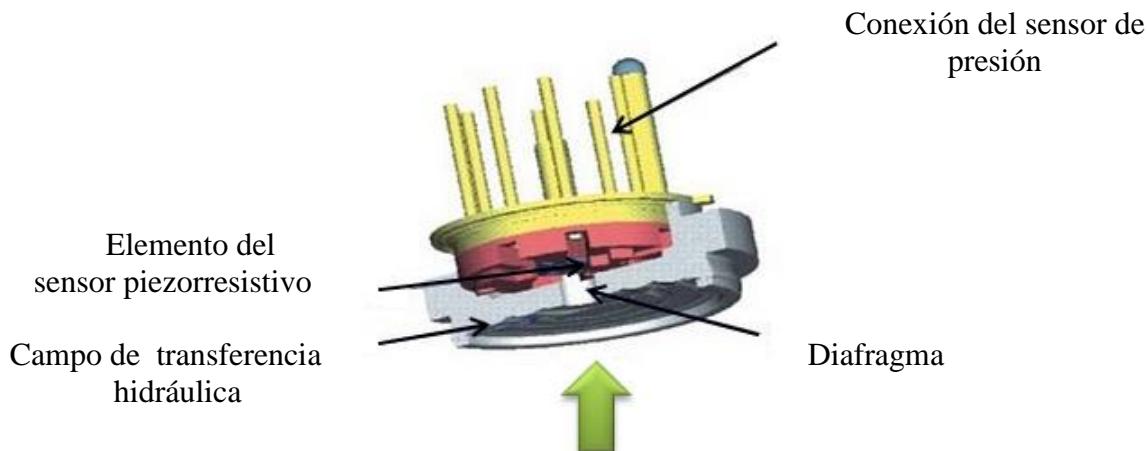


**Figura 1.26 - Variables de entrada y salida del caudalímetro**

### 1.3.3 – Sensor de nivel

El sensor de nivel que dispone el equipo de tanques acoplados CE105 es un sensor de presión de silicio piezorresistivo. El sensor piezorresistivo está en contacto con un fluido hidráulico de protección, y separado del medio por una membrana de acero inoxidable. La flexión de la membrana como resultado de la presión externa produce un cambio en la presión del fluido hidráulico que rodea al sensor piezorresistivo. Este sensor emite una señal de presión proporcional que se convierte en una señal de salida de 0 a 10V.

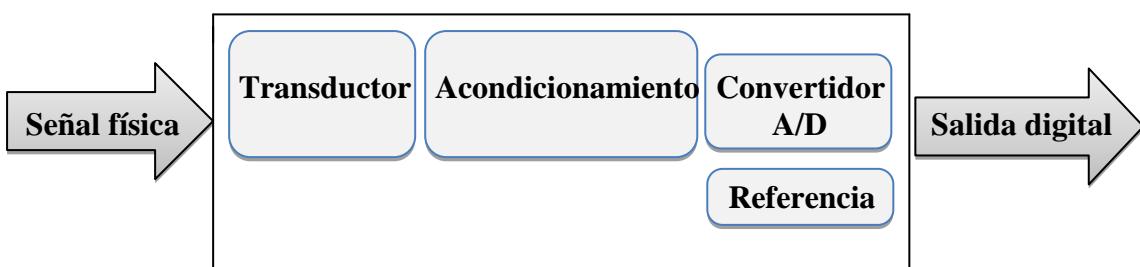
Este método de medición es muy adecuado para detectar bajas presiones, y permite obtener elevados factores de sobrecarga.



**Figura 1.27 - Sensor de presión**

#### 1.3.4 – Tarjeta de adquisición de datos

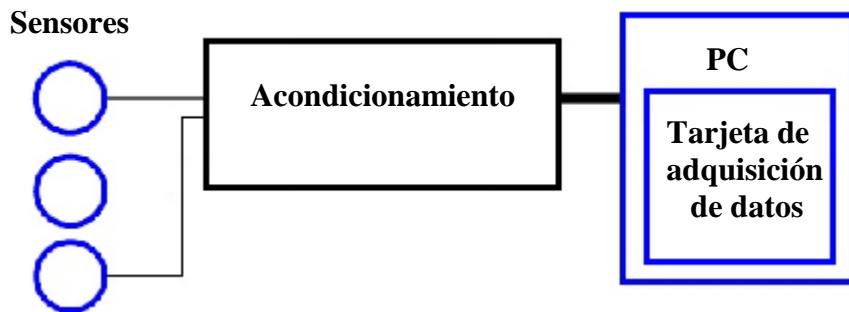
La adquisición de datos o adquisición de señales consiste en la toma de muestras de un sistema real (sistema analógico) para generar datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otro elemento electrónico (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es el módulo de digitalización o tarjeta de adquisición de datos (DAQ).



**Figura 1.28 - Sistema de adquisición de datos**

Los sistemas de adquisición de datos (SAD) basados en un ordenador se han convertido en una de las alternativas más prometedoras debido a su coste y versatilidad. En esta configuración, suele utilizarse un ordenador como plataforma para realizar el procesamiento, el almacenamiento y la visualización, y una tarjeta de adquisición de datos para la captura de las señales analógicas. Aunque el computador se ha convertido en un excelente recurso para construir un SAD, esta plataforma no está suficientemente acondicionada para trabajar en un entorno industrial exigente, así, su inmunidad a

interferencias es bastante pobre, su refrigeración deficiente, sus ranuras de expansión muy limitadas, etc. Goza, sin embargo, de un alto grado de conectividad que permiten realizar la administración y monitorización remota a través de redes (LAN, Internet, etc.) y sobre todo, una capacidad de visualización y cómputo bastante avanzadas, junto a un soporte de herramientas de programación muy potente. En general, suele utilizarse una alternativa de este tipo cuando no se requieran altas prestaciones de velocidad y el número de señales de captura no sea excesivo. Es por ello que esta configuración es óptima para el control en la maqueta CE105.



**Figura 1.29 - Sistema basado en un PC**

No obstante existen otras configuraciones como los sistemas de adquisición de datos basados en instrumentos independientes. Estos suelen utilizarse en aplicaciones más exigentes que requieran capturar un gran número de variables con gran precisión y fiabilidad.

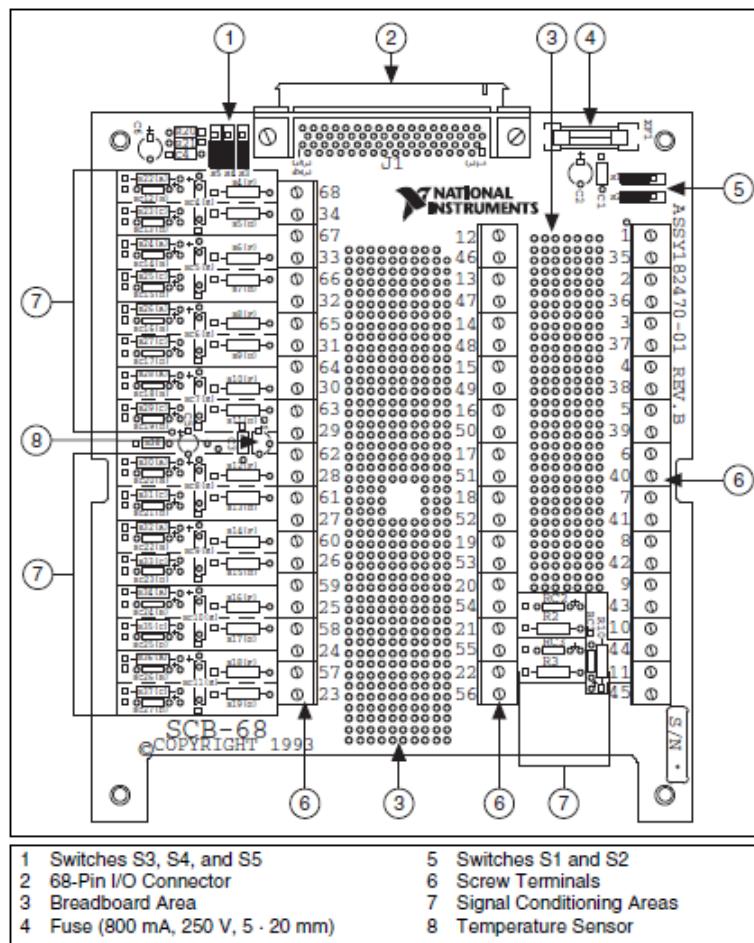
Además están los SAD modulares que permiten configurar sistemas de adquisición de datos más potentes y a un coste que puede llegar a ser más reducido que con instrumentos autónomos, sobre todo en sistemas de cierta dimensión o con necesidad de crecimiento futuras.

El núcleo central de una tarjeta de adquisición de datos está compuesto por los circuitos analógicos de entrada y el CAD. Los circuitos analógicos de entrada incluyen un multiplexor, al que llegan las distintas variables de entrada, un amplificador de ganancia programable y un circuito de muestreo y retención, a continuación se encuentra el propio CAD. En general, las tarjetas disponen de una memoria temporal donde se almacenan las muestras capturadas por el CAD antes de transferirlas a la memoria del computador con el objeto de permitir una mayor velocidad de trabajo del sistema. La comunicación entre los bloques que constituyen la tarjeta se realiza a través de un bus interno y la conexión con el bus de E/S del computador se realiza a través del interfaz de bus.

La tarjeta de adquisición de datos del equipo opera con múltiples entornos de programación: NI LabVIEW, NI LabWindows/CVI, C/C++, Visual C# y Visual Basic .NET. El voltaje de entrada y salida analógico que soporta la tarjeta SCB-68 está en el rango de 0 a 10V DC y la corriente que soporta está en el rango de 250 a 750mA.

El terminal con la señal del transductor es conectado a la carcasa NI SCB-68, también de la casa *National Instruments*. Consiste en un bloque conector de entradas/

salidas blindado para realizar interfaz de señales de entrada/ salida a dispositivos de adquisición de datos insertables con conectores de 68 pines. En combinación con los cables blindados el SCB-68 brinda terminación de señal robusta con muy poco ruido. Es compatible con dispositivos de un conector o de doble conector de la Serie X y la Serie M con conectores de 68 pines. El bloque conector es también compatible con la mayoría de los dispositivos DAQ de la Serie E, B, S y R de *National Instruments*.



**Figura 1.30 – Conexiones NI SCB-68**

Las conexiones de los pinos de salida y entrada están ya configuradas, y han sido extraídas en trabajos anteriores a través de la carcasa las, de forma que se pueden hacer las conexiones entre el panel frontal de la maqueta y la tarjeta de conexiones de forma simple.

En cuanto a entradas analógicas se tienen 6 puertos (AI0, AI1, AI2, AI8, AI9 y AI10) con sus respectivos terminales de tierra. Las salidas analógicas constan de 2 puertos (AO0 y AO1) y su correspondiente terminal de tierra. Además las E/S digitales disponen de 6 puertos (PFI8, PFI9, PFI10, PFI3, PFI4 y PFI11).

Para el caso de la maqueta CE105 se van a utilizar gran parte de estos puertos. La única salida analógica del sistema va a ser la referente a la bomba, que es la que irá conectada con el puerto AO0. En el caso de disponer de una segunda bomba para el tanque derecho esta iría conectada al otro puerto de salida. A diferencia de las salidas, el sistema

Sara Pérez Izquierda

33

consta de varias entradas: caudalímetro, sensor de ultrasonidos, sensor de nivel de presión original (reemplazado por el anterior). No hay que olvidar la conexión de todo el conjunto a tierra.

Además si se desea conocer la morfología de una señal en lugar de utilizar un osciloscopio para ese fin se pueden utilizar los puertos correspondientes con las E/S digitales y a partir de esta señal y de la tarjeta de adquisición de datos poder manipularla con la propia programación de LabVIEW.

### **1.3.5 – Equipo en entorno gráfico y equipo con sistema operativo en tiempo real**

Tanto el equipo con el sistema operativo en tiempo real (target) como el equipo con el sistema operativo Windows (host) tienen la misma apariencia física, sin embargo existen diferencias sustanciales entre ellos. La necesidad de trabajar tanto con el host como con el target radica en la estructura de trabajo y manejo de los datos que se obtienen de la maqueta.

#### **➤ Host**

El equipo con el sistema operativo Windows es el entorno gráfico de trabajo y por tanto en él tendrá que instalarse el programa LabVIEW en su versión de 2009. El método de trabajo consiste en la visualización de gráficas, definición de los parámetros de entrada al sistema, etc. En definitiva el host permite interactuar entre el usuario y los datos tomados de las diferentes variables ya sea de tensión, caudal, tiempo, o nivel de líquido en el interior del tanque.

#### **➤ Target**

Un sistema en tiempo real es cualquier sistema de procesado de información que tiene que responder a estímulos de entrada externos dentro de un periodo especificado finito. Así la corrección depende no solo del resultado lógico son también del tiempo de respuesta. El fallo en la respuesta es tan malo como tener una respuesta incorrecta. Una de las características más importantes del sistema en tiempo real es que manipula números reales por lo que está basado en la teoría del control digital. Además quedan garantizadas las respuestas temporales precisas. La transmisión de datos entre el host y el target se efectúa a través de la red Ethernet de la UPNA a través de un conector de tipo roseta.

En el equipo en RT está alojada la tarjeta de adquisición de datos, es decir las señales de tensión de la bomba, del caudalímetro y del sensor de nivel estarán directamente conectadas con el target o RT. Esta tarjeta se conecta directamente al computador a través de las ranuras de expansión y a la maqueta a través de la tarjeta de conexiones NI SCB-68.

## 1.4 – ELECCION DEL SENSOR DE MEDIDA DEL NIVEL DE LIQUIDO

El sensor es uno de los componentes de entradas de datos a un sistema de control. El sensor detecta la variación física del elemento que controla y lo transmite en forma de magnitud eléctrica. Básicamente el sensor dispone de un transductor y de un circuito o sistema amplificador de la señal. La señal que entrega a un sensor debe ser recogida por el controlador, y en caso necesario será ampliada y acondicionada para su posterior uso.

Determinados sensores deben estar alimentados eléctricamente conforme a sus características y se les denominan sensores activos. Otros sin embargo no necesitan alimentación eléctrica y son los llamados sensores pasivos. El hecho de ser pasivos no significa que no sean atravesados por una corriente eléctrica, por ejemplo una fotorresistencia está conectada a una corriente eléctrica pero mientras no exista una variación luminosa en este caso no la atraviesa la corriente eléctrica luego es un sensor pasivo.

### 1.4.1 – Tipos de sensores

La clasificación de los diferentes sensores se puede hacer en base a diferentes criterios: por la forma mecánica de actuar, por los componentes que lo integran, dependiendo del lugar en el que actúa,... Así un forma general de clasificación es según la naturaleza de la señal que entrega al sistema en que se acopla, siendo esta de tipo discreto (todo / nada) y continuo (mediciones en función de un periodo de muestreo característico del propio sensor) Los sensores de tipo discreto se utilizan para la detección de un determinado objeto, el alcance de un determinado nivel en la señal de medida, etc. Los sensores de tipo continuo toman datos de la señal de forma constante e iterativa dependiendo su rapidez en la medida y la naturaleza de la señal que pueden medir de sus características específicas.

En este caso se comentará cada tipo de sensor desde una visión global de los mismos y una vez esté hecha esta clasificación se procederá a seleccionar aquellos que más se ajusten a la aplicación deseada.

#### ➤ Sensores inductivos

Los sensores inductivos son una clase especial de sensores discretos que sirven para detectar materiales metálicos ferrosos. Son de gran utilización en la industria, tanto para aplicaciones de posicionamiento como para detectar la presencia de objetos metálicos en un determinado contexto (control de presencia o de ausencia, detección de paso, de atasco, de posicionamiento, de codificación y de conteo). Cuando la tensión se convierte en información, a menudo, la inducción pasa a ser importante. Los sensores inductivos detectan objetos metálicos en áreas de exploración generalmente muy pequeñas. El diámetro del sensor es el factor decisivo para la distancia de conmutación, que con

frecuencia es de sólo unos cuantos milímetros. Por otra parte, los sensores inductivos son rápidos, precisos y extremadamente resistentes.



**Figura 1.31 - Sensores inductivos**

#### ➤ **Sensores capacitivos**

Un sensor capacitivo es un sensor de tipo discreto que puede detectar materiales conductores y no conductores, en forma líquida o sólida. Las sustancias metálicas y las no metálicas, tanto si son líquidas como sólidas, disponen de una cierta conductividad y una constante eléctrica. Los sensores capacitivos detectan los cambios provocados por estas sustancias en el campo eléctrico de su área de detección. Existen distintas aplicaciones, incluso control de niveles en depósitos, también para detectar el contenido de contenedores, o en máquinas empaquetadoras. Otras aplicaciones incluyen el posicionado y montaje de materiales en sistemas de transporte y almacenaje, por ejemplo cintas transportadoras y mecanismos de guía.

Los materiales típicos que pueden ser detectados en función del estado en que se presentan son los sólidos como madera, cerámica, vidrio, apilamientos de papel, plástico, piedra, goma, hielo, materiales no férricos y materiales vegetales; líquidos como agua, aceite, adhesivo y pinturas; granulados como semillas, alimentos, sal y granulados plásticos; polvos como tintas, polvo de jabón, arena, cemento, fertilizantes, azúcar, harina y café.

La función del detector capacitivo consiste en señalar un cambio de estado, basado en la variación del estímulo de un campo eléctrico. Los sensores capacitivos detectan objetos metálicos, o no metálicos, midiendo el cambio en la capacitancia, la cual depende de la constante dieléctrica del material a detectar, su masa, tamaño, y distancia hasta la superficie sensible del detector. Los detectores capacitivos están construidos en base a un oscilador RC.



**Figura 1.32 - Sensores capacitivos**

➤ **Sensores fotoeléctricos**

Un sensor fotoeléctrico es un sensor de tipo discreto consistente en un dispositivo electrónico que responde al cambio en la intensidad de la luz. Estos sensores requieren de un componente emisor que genera la luz, y un componente receptor que recibe esa luz generada por el emisor. Todos los diferentes modos de sensado se basan en este principio de funcionamiento. Están diseñados especialmente para la detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficie, incluso bajo condiciones ambientales extremas.

En la actualidad la mayoría de los sensores fotoeléctricos utilizan LEDs como fuentes de luz. Un LED es un semiconductor, eléctricamente similar a un diodo, pero con la característica de que emite luz cuando una corriente circula por él en forma directa.

Los LEDs pueden ser construidos para que emitan en verde, azul, amarillo, rojo, infrarrojo, etc. Los colores más comúnmente usados en aplicaciones de sensado son rojos e infrarrojos, pero en aplicaciones donde se necesite detectar contraste, la elección del color de emisión es fundamental, siendo el color más utilizado el verde. Los fototransistores son los componentes más ampliamente usados como receptores de luz, debido a que ofrecen la mejor relación entre la sensibilidad a la luz y la velocidad de respuesta, comparado con los componentes fotorresistivos, además responden bien ante luz visible e infrarroja. Las fotocélulas son usadas cuando no es necesaria una gran sensibilidad, y se utiliza una fuente de luz visible.



**Figura 1.33 - Sensores fotoeléctricos**

### ➤ Sensores magnéticos

Los sensores de proximidad magnéticos son de tipo discreto y están caracterizados por la posibilidad de distancias grandes de la comutación, disponible de los sensores con dimensiones pequeñas. Detectan los objetos magnéticos (imanes generalmente permanentes) que se utilizan para accionar el proceso de la comutación. Los campos magnéticos pueden pasar a través de muchos materiales no magnéticos, el proceso de la comutación se puede también accionar sin la necesidad de la exposición directa al objeto. Usando los conductores magnéticos (ej. hierro), el campo magnético se puede transmitir sobre mayores distancias para, por ejemplo, poder llevarse la señal de áreas de alta temperatura. Los sensores magnéticos tienen una amplia gama de usos. Por ejemplo: la detección del objeto a través del plástico containers / pipes, detección en medios agresivos a través de las paredes protectoras del teflón, detección en áreas de alta temperatura, reconocimiento de la codificación usando los imanes, etc.



**Figura 1.34 - Sensores magnéticos**

### ➤ Sensores de nivel conductivos

El sensor de nivel conductor es de tipo continuo y se puede utilizar para medir la conductividad en una solución o la concentración total de iones en muestras acuosas que se investigan en el campo o en el laboratorio. La conductividad es una de las pruebas ambientales más fáciles en muestras acuáticas. Aunque no dice qué iones específicos están presentes, determina rápidamente la concentración total de iones en una muestra. Se puede utilizar para realizar una amplia variedad de pruebas o planear experimentos para determinar cambios en los niveles de iones o salinidad total.

Permite ver la diferencia cualitativa entre la naturaleza iónica y molecular de una sustancia en una solución acuosa. Este puede incluir diferencias en fuerza de ácidos débiles y bases, o número de iones que una sustancia iónica puede disociar en unidad por fórmula.

El sensor de conductividad mide la capacidad de una solución de conducir una corriente eléctrica entre dos electrodos. En la solución, la corriente fluye por el transporte del ión. Por lo tanto, una gran concentración de iones en la solución dará lugar a valores más altos de conductividad. Éste mide realmente la conductancia, definida como el recíproco de la resistencia.

Sara Pérez Izquieta

38

Una diferencia potencial se aplica a los dos electrodos del sensor de conductividad. La corriente que resulta es proporcional a la conductividad de la solución. Esta corriente se convierte en un voltaje que se leerá por una interface.

La corriente alterna se provee para prevenir la migración completa del ión a los dos electrodos. Con cada ciclo de corriente alterna, la polaridad de los electrodos se invierte, la cual invierte alternamente la dirección del flujo iónico. Esta es una característica muy importante del sensor de conductividad que evita que la mayoría de la electrólisis y de la polarización ocurran en los electrodos. Así, las soluciones que se están midiendo para la conductividad no se ensucian.

Una de las aplicaciones más comunes del sensor de conductividad es encontrar la concentración de sólidos disueltos totales en una muestra de agua. Esto puede ser logrado porque se genera una relación entre conductividad y concentración iónica en una solución. La relación persiste hasta que se alcanzan concentraciones iónicas muy grandes.



**Figura 1.35 - Sensores de conductividad**

#### ➤ **Encoders (codificadores)**

El encoder es un sensor continuo que permite detectar el movimiento de rotación de un eje. Es en definitiva un transductor que convierte una magnitud (posición lineal y angular) en una señal digital. El encoder opera solidario al eje del elemento cuya posición se desea determinar. Utiliza un haz de luz para obtener la medida.

Se basan en optoacopladores. Un diodo fotoemisor y un transistor fotorreceptor. Detectan la presencia/ ausencia de luz a través de un disco solidario al eje, con ranuras radiales.



**Figura 1.36 - Encoders**

➤ **Sensores de proximidad de ultrasonidos**

Existen sensores de ultrasonidos de tipo discreto (salida binaria) y de tipo continuo (salida analógica). Otras ventajas adicionales son la excelente supresión de fondo y la inmunidad ante todo tipo de impurezas del aire circundante. Algunas de las características de los sensores de proximidad por ultrasonidos son la detección sin contacto y medición de distancia de objetos empleando ultrasonido, la elevada precisión en la propia medición, la amplitud en el alcance de exploración, la detección incluso de objetos transparentes y líquidos, la inmunidad ante partículas de contaminación en el aire, el diseño compacto y resistente a la suciedad así como la salida de commutación digital o analógica. Además es capaz de detectar objetos transparentes y líquidos, y suprimir tanto el fondo como todo tipo de impurezas del aire circundante.

Este tipo de sensor es el que más se ajusta a la aplicación de medida continua del nivel de líquido en un tanque, por lo que se hará una búsqueda más al detalle para encontrar el sensor de ultrasonidos con las características idóneas para esta aplicación.

Para comenzar a optimizar esta búsqueda determinaremos los parámetros de los propios tanques, es decir lo que será el campo de trabajo del sensor. Las dimensiones de cada tanque son 250 mm de altura, 100 mm de ancho y 110 mm de profundidad, por consiguiente el sensor tiene que ser capaz de medir desde que el tanque esté vacío ( $h = 0$  mm) hasta que esté completamente lleno ( $h = 250$  mm). Para dar con el sensor pertinente consultamos los diferentes productos de la empresa de componentes italiana, con distribuidor oficial en Pamplona, Carlo Gavazzi Automation Components. Las características principales de los distintos productos que se nos ofrecen son:

- Cajas de M18 y M30
- Distancia de sensado de hasta 8000 mm
- Modelos analógicos con salidas de 0-10 V o de 4-20 mA
- Modelos avanzados para configurar de forma remota puntos de ajuste determinados.

La serie de sensores ultrasónicos de Carlo Gavazzi están diseñados tanto para la medición de distancia como para la detección de objetos en entornos difíciles. Los sensores de tipo de salida analógica están disponibles para aplicaciones que requieren una medición del objeto de destino, tales como detectar el nivel de líquido en un tanque. La versión para Windows también permite la configuración para guardar y descargar a dispositivos múltiples.

Así que se trata de ajustar las características deseadas (detección del líquido en un rango de 25 cm, salida de 0 a 10V y mínimo tiempo de respuesta posible), obteniendo así el sensor de referencia UA18CLD05AKTR, la cual permite conocer las características específicas del sensor.

#### **1.4.2 – El sensor de nivel de ultrasonidos UA18CLD05AKTR de Carlo Gavazzi**

En este apartado se tratará de profundizar en las características, aplicaciones e instalación del sensor de nivel de líquido por ultrasonidos en la maqueta CE105 de tanques acoplados.

U → Sensor por ultrasonidos	D → Principio de detección
A → Tipo de caja	05 → Distancia de detección (60-500 mm)
18 → Tamaño de la caja (M18x93 mm)	A → Tipo de salida (0-10 V)
C → Material de la caja	K → Configuración de salida
L → Longitud de la caja	TR → Ajuste remoto

**Figura 1.37 - Codificación de la referencia**

#### ➤ Datos técnicos

Tensión de alimentación nominal (Ue) → 15 a 30 Vcc (ondulación incluida)

Ondulación → <= 10%

Consumo de corriente sin carga (Io) → <= 40 mA

Protección → Cortocircuitos, transitorios e inversión de polaridad

Tensión nominal de aislamiento → >1 KV

Retardo de la conexión → 60 ms

Salida → 0 – 10 Vcc

Inclinación de salida → Positiva o negativa

Error de linearidad → < 0,5 %

Repetibilidad ® → <= 0,2 %

Distancia nominal de detección/ resolución → 60-500 mm/ 0,25 mm

Carga → mín. 1 KΩ

Frecuencia de la portadora → 330 Khz

Tiempo de respuesta → 100 ms

Indicación → Puntos de consigna, 2 LED amarillos; Eco, 1 LED verde

Compensación de temperatura → Sí  
 Ángulo del haz → 8°  
 Temperatura ambiente → -15 a +70 °C  
 Grado de protección → IP 67  
 Material de la caja → Poliéster, PBT  
 Conexión → Cable 2 m, 5x0,25 mm<sup>2</sup>  
 Peso → 96 g  
 Par de apriete → 2,6 Nm  
 Marca CE → Sí

### ➤ Ajuste de salida analógica

El LED Eco se enciende al recibir un eco (este es el LED de alineación que confirma que el objeto está correctamente alineado). El LED P1 Se enciende cuando el objeto está entre la cara del sensor y P1. El LED P2 se enciende cuando el objeto está más lejos que P2.

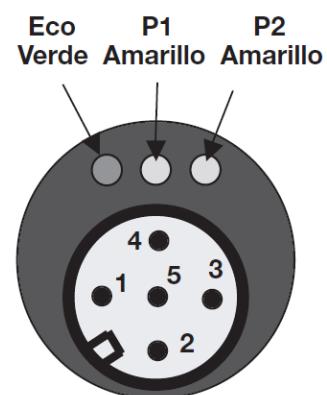


Figura 1.38 - LEDs indicadores

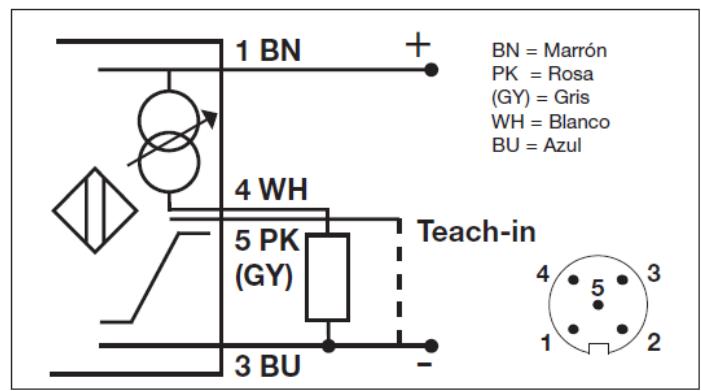
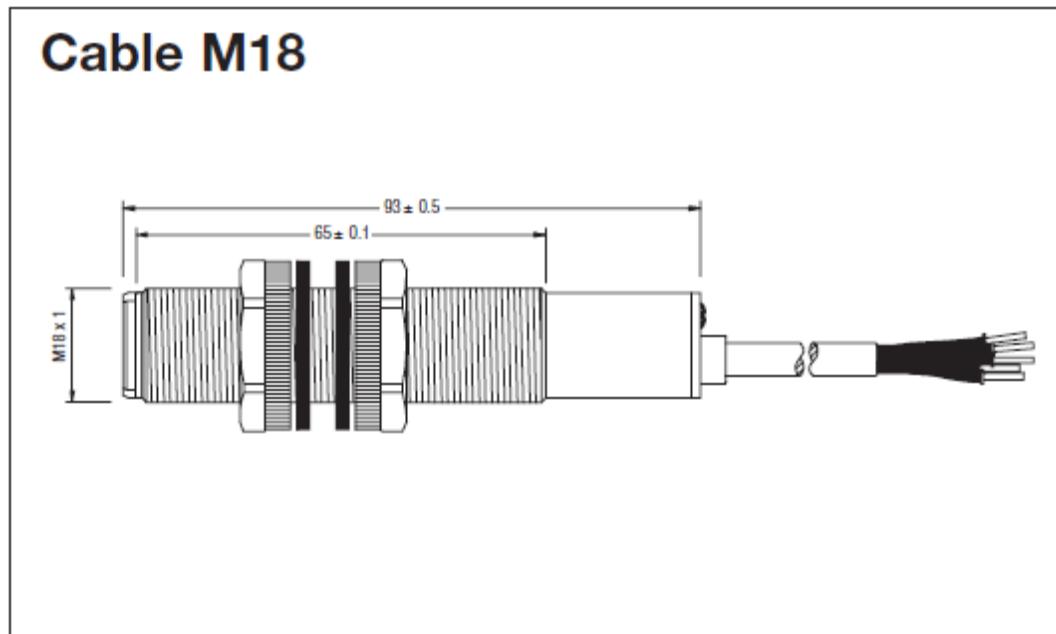


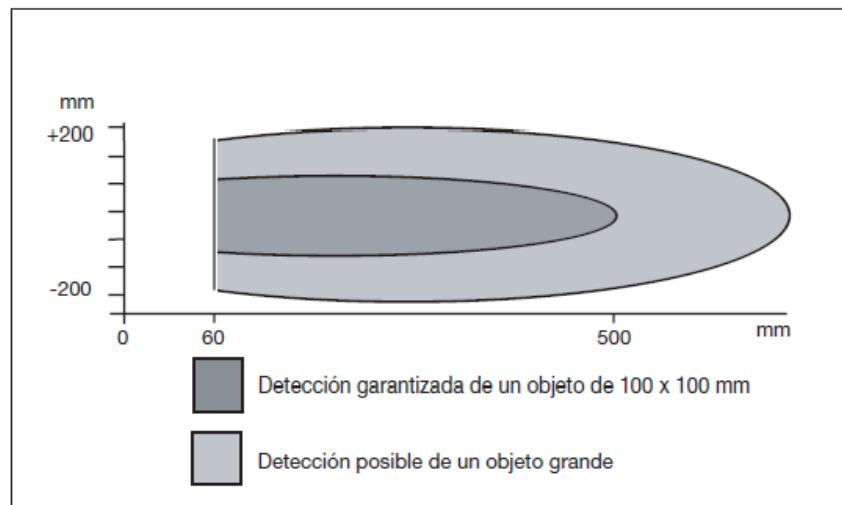
Figura 1.39 - Diagrama de conexiones del autoajuste

➤ **Dimensiones**



**Figura 1.40 - Dimensiones normalizadas**

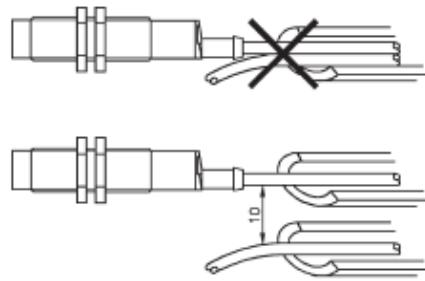
➤ **Distancia de detección**



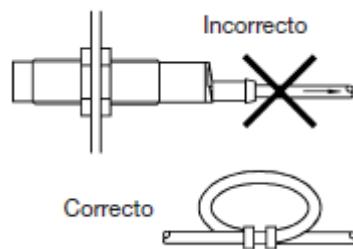
**Figura 1.41 - Esquema de la zona de detección del sensor**

➤ **Normas de instalación**

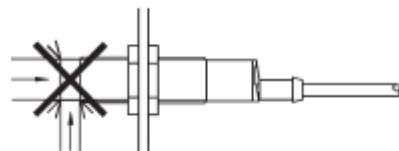
Para evitar interferencias de tensión inductiva/ picos de intensidad, los cables del sensor deben separarse del resto de los cables de alimentación tales como cables de motor, contactores o solenoides.

**Figura 1.42a - Colocación de los cables**

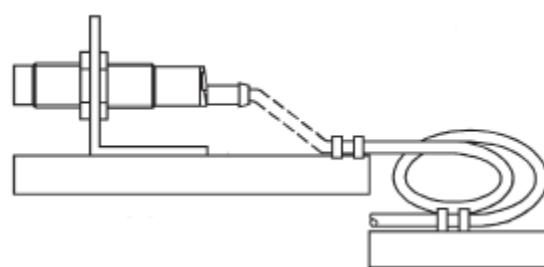
Alivio de la tensión del cable

**Figura 1.42b - Colocación del cable**

Protección de la cara de detección

**Figura 1.42c - Funcionamiento erróneo como tope mecánico**

Conector montado sobre portadora móvil

**Figura 1.42d - Enrollamiento inapropiado del cable**

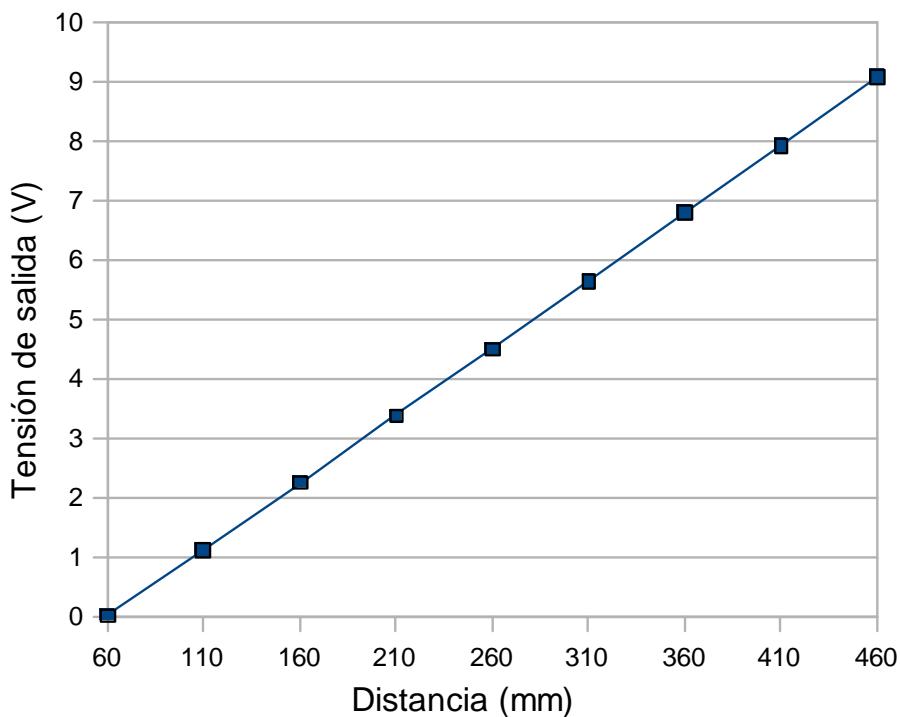
### ➤ Característica estática del sensor

El sensor de nivel por ultrasonidos UA18CLD05AKTR ha sido sometido a una serie de ensayos por parte del fabricante. Las condiciones ambientales que se han dado durante este ensayo son a una temperatura de 31,4 °C y con una humedad relativa del 15,72 %. El resultado del ensayo ha sido el siguiente:

Distancia (mm)	Tensión de salida (V)
60	0,04
110	1,14
160	2,27
210	3,4
260	4,52
310	5,66
360	6,8
410	7,94
460	9,08

**Figura 1.43 - Tabla de datos**

La desviación de los valores obtenidos en el ensayo respecto de los reales se ven representadas en el siguiente gráfico:



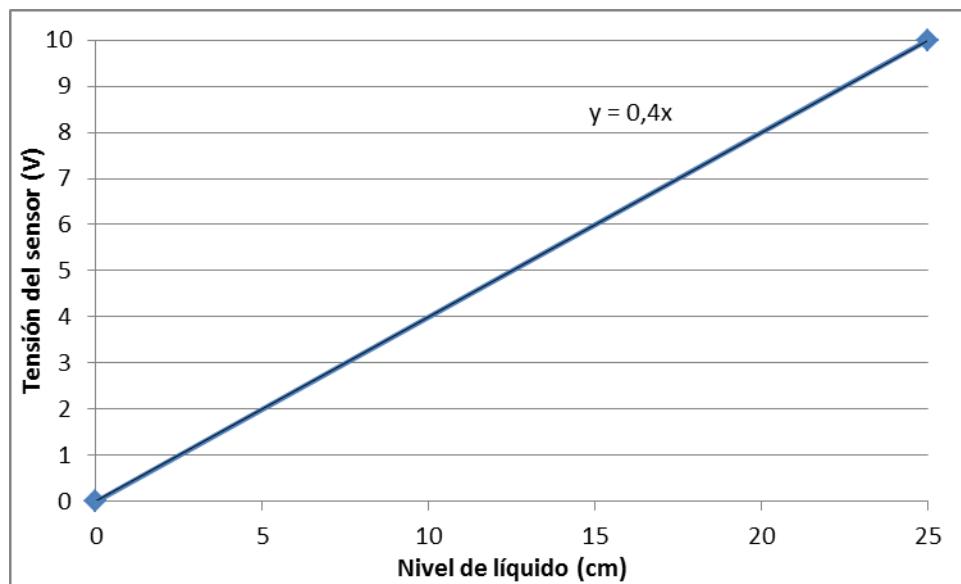
**Figura 1.44 - Relación proporcional entre el nivel y la tensión según el fabricante**

Esta relación proporcional es la que caracteriza al sensor cuando se está trabajando entre su nivel máximo de detección y su nivel mínimo a los que les corresponde su valor de tensión de salida de 0 y 10V. Sin embargo en la aplicación que se está estudiando el

Sara Pérez Izquieta

45

nivel máximo se va a corresponder con el nivel de 25cm por lo que la relación real en régimen permanente es la ecuación que relaciona estos parámetros.



**Figura 1.45 - Relacion tensión nivel de líquido**

$$V_{US} = 0,4H \quad (1.21)$$

### ➤ Característica dinámica

Se desconoce el comportamiento del sensor en régimen transitorio, es decir no se conoce la respuesta de tensión que da el sensor cuando se produce un escalón en el nivel del líquido del tanque, es decir su función de transferencia. Sin embargo como esta respuesta es muy rápida en comparación con la respuesta del sistema general puede tomarse como constante.



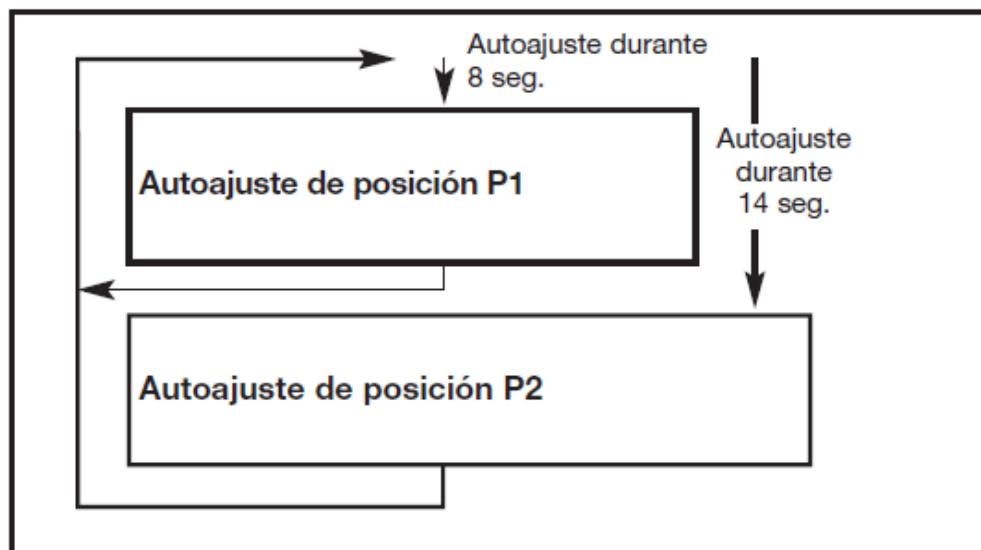
Así el comportamiento del sensor viene expresado a través de la ecuación:

$$v_{US} = k_{US} \cdot H \quad (1.22)$$

Donde  $v$  es la tensión de salida del sensor en V,  $H$  es la altura del líquido en el tanque en cm y  $k_{US}$  es la pendiente de la recta que relaciona estos parámetros en estado estacionario. Por lo tanto tras aplicar la transformada de Laplace a la ecuación se tiene que:

$$G_{US}(s) = \frac{V_{US}(s)}{H(s)} = k_{US} = 0,4 \quad (1.23)$$

### ➤ Procedimiento teach-in (autoajuste)



**Figura 1.46 - Esquema general de autoajuste**

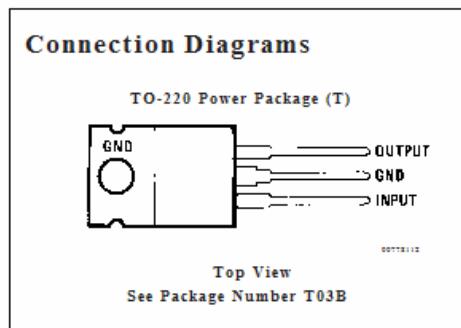
Ajuste de salida analógica: P1 y P2 definen la inclinación de la salida analógica. P1 determina la posición de 0 V y P2 la posición de 10 V. Inclinación positiva → P1 < P2.

Autoajuste de posición P1: Se vacía el tanque hasta el nivel mínimo de 0 cm, teniendo así el nivel de líquido en su nivel más bajo, esto es, en la posición P1. Se mantiene el autoajuste durante 8 segundos hasta que los LED P1 y Eco empiecen a parpadear 2 veces por segundo. El sensor ya está en modo de ajuste para P1. Se desactiva el autoajuste, la función Teach-in (autoajuste) queda ahora abierta durante 1 minuto para la programación de P1. El LED P1 parpadea una vez por segundo y el LED Eco recupera su funcionamiento normal (LED de alineación). Se activa el autoajuste: P1 ya está programada. El sensor recupera su funcionamiento normal con un nuevo valor para P1.

Autoajuste de posición P2: Se llena el tanque hasta el nivel máximo de 25 cm, teniendo así el nivel máximo, esto es, en la posición P2. Se mantiene el autoajuste durante 14 segundos hasta que los LED P2 y Eco empiecen a parpadear 2 veces por segundo. Tras 8 segundos, los LED P1 y Eco comienzan a parpadear, lo cual debe ignorarse ya que hay que mantener el autoajuste 6 segundos más para llegar a P2. El sensor ya está en modo de

ajuste para P2: El modo Teach-in (autoajuste) queda ahora abierto durante 1 minuto para la programación de P2. El LED P2 parpadea una vez por segundo. El LED Eco recupera su funcionamiento normal (LED de alineación). Se activa el autoajuste: P2 ya está programada. El sensor recupera su funcionamiento normal con un nuevo valor para P2.

Para poder calibrar ambos niveles del sensor se opta por utilizar el programa LabVIEW y así crear un instrumento que al ser ejecutado haga directamente el autoajuste pertinente.



**Figura 1.47 - Semiconductor**

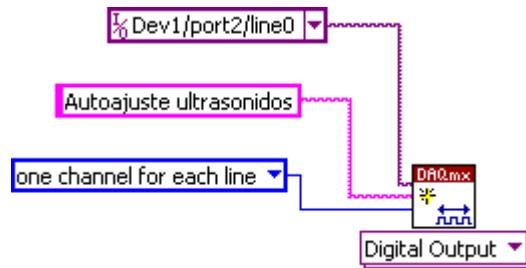
El sensor de ultrasonidos consta de 4 cables: marrón, rosa, azul y negro. El cable marrón será el que alimente al propio sensor y puesto que el rango de tensión admisible es de entre 12 y 24 V, este es conectado a la salida del semiconductor (regulador positivo de tres terminales) alojado en la placa electrónica de la propia maqueta, concretamente al terminal indicado en la imagen como OUTPUT.

El cable de color azul, referente a masa, se conecta a la patilla central del semiconductor GND.

El cable negro es el que da la salida en el rango de 0 a 10 V, y que por tanto irá directamente a la tarjeta de conexiones, a uno de los terminales de las entradas analógicas.

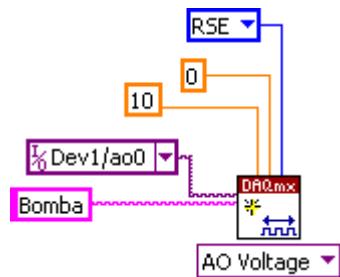
El cable de color rosa es el referido al autoajuste, y que por tanto se conectara a uno de los terminales PFI, configurables en cada caso como entradas o salidas digitales/encoders. En el caso del autoajuste se configura como salida de tipo digital.

Para poder calibrar de forma dinámica y sencilla el sensor de ultrasonidos siempre que sea necesario, se va a crear un instrumento virtual, es decir, un archivo de LabVIEW .vi dentro del proyecto general. Para ello se creará un nuevo canal, que será el canal del autoajuste o teach-in. En la propia tarjeta de conexiones del fabricante National Instruments, además de seis entradas analógicas (AI0, 1, 2, 8, 9, 10) y dos salidas analógicas (AO0, 1), seis canales configurables en entradas o salidas digitales/ encoders según se necesite en cada caso (PFI3, 4, 8, 9, 10, 11). Puesto que la salida del autoajuste es de tipo digital escogemos uno de estos canales configurables, es este caso el PFI8, y se hacen los ajustes pertinentes. La nomenclatura que sigue la tarjeta de conexiones a la hora de asignar un puerto y otro se encuentra en el manual DAQ M Series User Manual. Para el puerto PFI8 está asignada la ruta Dev1/port2/line0.



**Figura 1.48 - Creación de canal de entrada analógica**

Para calibrar el nivel mínimo del tanque correspondiente con el nivel mínimo de tensión basta con que este esté vacío sin embargo para calibrar el punto P2 el tanque tiene que estar completamente lleno y de esta forma asignarle el valor máximo de tensión de salida, es decir, +10V. Entonces una vez se ha creado el canal para el autoajuste hay que crear el canal de la bomba de agua que va a permitir alcanzar la máxima altura del nivel del líquido, procediendo de forma similar, a sabiendas de que ahora se trata de una salida de tipo analógico de tensión, por lo tanto se escoge el puerto AO0, cuya ruta a asignar es Dev1/ao0. Por otro lado hay que determinar los valores máximo y mínimo que va a tomar ésta salida, esto es, 0 y +10V. En cuanto a la configuración de los terminales de entrada, ésta es de tipo RSE (referenced single-ended mode) ya que el único punto de referencia para este canal va a ser la propia masa GND.



**Figura 1.49 - Creación del canal de salida analógica**

Una vez creado el canal de la bomba hay que especificar la frecuencia de muestreo. Este valor viene expresado en muestras por canal por segundo.



**Figura 1.50 - Frecuencia de muestreo**

Ahora se va a proceder a crear una serie de secuencias de acuerdo con los rangos de tiempo que especifica el propio fabricante para la calibración del sensor de ultrasonidos. Para poder detectar la secuencia en la que se encuentra en cada momento a la hora de ejecutar el programa, es decir cuando se está calibrando, se van a ir colocando una serie de

testigos de tipo LED, que se activen y desactiven en el momento en que se esté ejecutando una determinada acción.

Ahora bien, el calibrado en resumen consiste en la conexión y desconexión (triestado o estado de alta impedancia) alternativa según un patrón temporal. Para ver el comportamiento de la señal y el valor de tensión que se alcanza según este en modo conexión/ desconexión hacemos uso del osciloscopio y de forma manual conectamos y desconectamos el cable rosa (autoajuste). Como se ha citado con anterioridad la señal del autoajuste es de tipo digital luego solamente quedaran registrados en el osciloscopio el valor mínimo de 0 y el valor máximo de 1. Para el nivel 0 el osciloscopio muestra un valor de tensión igual a 0 voltios y para el nivel 1 una tensión de +15V.

Secuencia 1: El indicador digital comienza en False (estado 0) y permanece así durante 8 segundos, que es cuando entra en la calibración de P1.

Secuencia 2: Ahora se desconecta, esto es, pasa al estado de +15V (True) durante unos 5 segundos.

Secuencia 3: Se vuelve a conectar por un periodo de unos 5 segundos, es decir, se pasa al estado 0.

Secuencia 4: Como conclusión del calibrado de la posición P1 basta con terminar dejando el cable de autoajuste al nivel 1 (+15V).

Secuencias 5 y 6: Una vez se ha alcanzado este estado, manualmente se para el calibrado de P1, y en la secuencia posterior el LED indicador del calibrado de P1 se apaga.

Secuencias 7 y 8: Comienza a trabajar la bomba, ajustando el nivel de tensión deseado hasta que se alcanza el nivel de líquido que se quiere asignar a P2, en el caso del tanque esta altura va a ser el nivel máximo de 250 mm. Una vez se ha alcanzado dicha altura se para la bomba, pasando en ese momento a la siguiente secuencia, encargada de dar a la bomba el valor de tensión igual a 0.

Secuencia 9: Comienza ahora el calibrado de P2 con la conexión del cable del canal PFI8 (terminal de autoajuste) a los +15V. La duración de esta conexión debe ser mayor o igual a 8 segundos para así pasar del estado de calibrado de P1 al de P2, por ello se le asigna una temporización de 22 segundos.

Secuencia 10: Una vez se alcanza esta posición se pasa al nivel de +15V, equivalente a estar desconectado, estando así durante 5 segundos.

Secuencia 11: A continuación se vuelve a conectar durante el mismo tiempo.

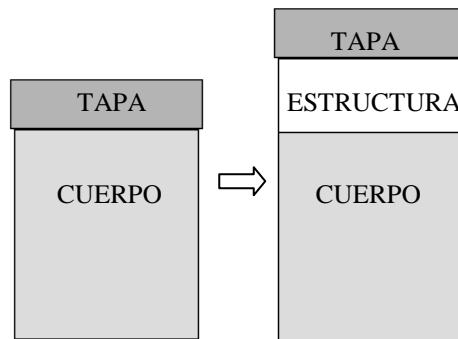
Secuencia 12: Para terminar con esta serie de secuencias basta con finalizar con el estado de desconexión.

Por último solamente resta parar y a continuación destruir la tarea (*véase anexo 1*).

#### **1.4.3 – Montaje final en la maqueta**

Las especificaciones del sensor de ultrasonidos muestran que entre el nivel máximo del objeto a detectar y el propio sensor debe existir al menos un espacio libre de 60 mm. Sin embargo en la maqueta a 60 mm del nivel máximo del tanque se encuentra la plancha metálica en la que se encuentra tanto la fuente como la placa electrónica. Por tanto es necesario reubicar estos elementos en la maqueta para dejar el espacio necesario al sensor. Tras barajar una serie de posibilidades (colocación dentro de la estructura de la maqueta,

en la pared trasera, etc.) por razones de seguridad, sencillez, estética y finalidad didáctica se opta por elevar la plancha metálica unos centímetros desde su posición inicial a través de una estructura sólida con el fin de que además de sujetar esta plancha aloje el propio sensor de ultrasonidos.



**Figura 1.51 – Incorporación de la estructura para el sensor**

El material con el que se ha construido esta estructura es el policarbonato. Este se caracteriza básicamente por ser un material muy resistente especialmente a los impactos y al ser transparente es una buena alternativa al vidrio o incluso al metacrilato. Este material está preparado para soportar condiciones meteorológicas extremas por lo que es apto para aplicaciones tanto en la intemperie como en el exterior.

Para construir esta estructura se cortan dos placas de policarbonato que formarán la cara anterior y posterior indiferentemente, y otra placa que a la vez que ejerce de travesaño y por tanto aporta estabilidad al soporte, actúa como base donde estará colocado el sensor. Para reforzar esta estructura se colocan también cuatro varillas metálicas de forma que una las dos paredes de dicha estructura. Se hacen los taladros pertinentes para introducir los tornillos, para pasar los cables que sean necesarios para ser conectados a la placa electrónica o a la fuente y por último los agujeros donde se presentarán tanto el sensor del tanque izquierdo como en un futuro el sensor del tanque derecho. Para que la estructura tome su posición final en el conjunto basta con unir la placa horizontal a las verticales por medio de unas escuadras, y estas a la parte delantera y trasera de la maqueta por medio de unas pletinas. Solamente falta colocar la plancha metálica donde se aloja la placa electrónica y la fuente sobre la estructura y colocar la tapa (*véase anexo 2*).

## **Capítulo 2: Modelo matemático de la planta**

El comportamiento de un sistema dinámico no puede ser descrito por relaciones instantáneas entre entradas y salidas, desde que la respuesta a la salida no depende únicamente de las entradas sino también de las acciones sucedidas con anterioridad al tiempo de estudio (energía almacenada) del sistema. La extensión de un sistema masa-resorte, por ejemplo, no solo depende de la fuerza aplicada sino que también depende de la energía potencial almacenada en el propio resorte ( $\frac{1}{2}kx^2$ ) así como la energía cinética de la masa ( $\frac{1}{2}mv^2$ ). De forma similar la corriente de un circuito RLC depende no solo de la conducción del potencial eléctrico son también de la energía almacenada en el condensador ( $\frac{1}{2}Q^2/C$ ) así como la de la inductancia ( $\frac{1}{2}LI^2$ ). Entonces para completar la descripción del sistema, aparte de las entradas y salidas, se necesita una nueva serie de parámetros llamados estados; que serán el desplazamiento  $x$  y la velocidad  $v$  en el ejemplo de la masa-resorte o la carga  $Q$  y la corriente  $I$  en el ejemplo del circuito eléctrico. Las variables de estado normalmente son denominadas por  $x_i$ , para  $i=1, 2, \dots, n$  y son funciones de las variables de entrada  $u_j$ ,  $j=1, 2, \dots, l$  y de ellas mismas. Las variables de salida  $y_k$ ,  $k=1, 2, \dots, m$  por otra parte, dependen de los estados y de las salidas.

Para un gran número de sistemas se tiene que,

$$\begin{aligned}\frac{dx_i(t)}{dt} &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) + h_i(u_1, u_2, \dots, u_l; t) \\ y_i &= p_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + q_i(u_1, u_2, \dots, u_l; t)\end{aligned}\quad (2.1)$$

Dicho sistema se encontrará en reposo cuando,

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = 0 \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, n$$

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) + h_i(u_1, u_2, \dots, u_l; t) = 0 \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

Por lo que con la ecuación (3), los puntos de equilibrio tienen coordenadas  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ , que satisfacen la ecuación,

$$x_i(t) = x_i^0(t) + \partial x_i(t); u_i(t) = u_i^0(t) + \partial u_i(t)$$

$$\begin{aligned}\frac{dx_i(t)}{dt} &= d(x_i^0(t) + \partial x_i(t)) \\ (\partial x_i)^i &= o(\partial x_i, \partial u_i); (\partial u_i)^i = o(\partial x_i, \partial u_i) \quad \text{con } i > 1\end{aligned}\quad (2.3)$$

La serie de Taylor correspondiente alrededor de este punto de equilibrio es,

$$f[x_i(t), u_i(t), t] = f[(x_i^0(t), u_i^0(t), t] + f_x(t)\partial x_i(t) + f_u(t)\partial u_i(t) + O(\partial x_i, \partial u_i) \quad (2.4)$$

donde,

$$f_x(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_0, u_0}, f_u(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial u_i} \right|_{x_0, u_0} \quad (2.5)$$

Se puede comprobar que cuando  $f(\cdot), x(\cdot), u(\cdot)$  son vectores,  $f_x(\cdot)$  y  $f_u(\cdot)$  son matrices de la dimensión apropiada que dependen de  $x_0(\cdot), u_0(\cdot)$ . Ahora pues, las ecuaciones linearizadas pueden expresarse como,

$$\dot{\underline{x}}_i = f_x \partial x_i + f_u \partial u_i \quad (2.6)$$

que expresado de forma matricial,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \partial x_1 \\ \partial x_2 \\ \dots \\ \partial x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial x_1 \\ \partial x_2 \\ \dots \\ \partial x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u_1 \\ \partial u_2 \\ \dots \\ \partial u_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

y de forma normalizada suele expresarse como,

$$\dot{\underline{x}}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B\underline{u} \quad (2.8)$$

donde,

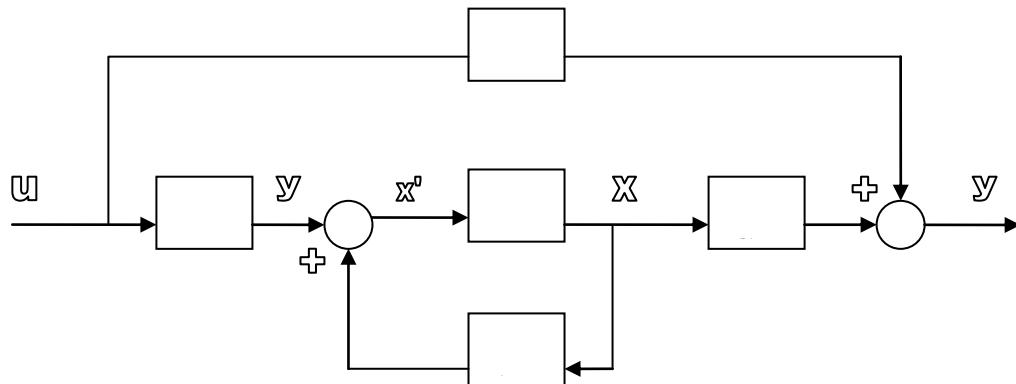
$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

y se corresponden con las matrices Jacobianas. Además las funciones de salida  $y_i(t)$  operan de la misma forma solo que ahora:

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

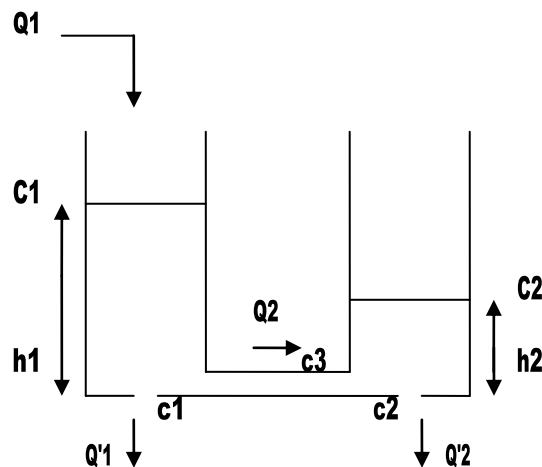
$$\underline{y} = A\underline{x} + B\underline{u} \quad (2.10)$$

Los vectores  $\underline{u}$  e  $\underline{y}$  son de dimensión l y m con elementos  $u_i$  e  $y_i$  respectivamente. Además el vector  $\underline{x}$  es de dimensión n y A, B y C son matrices de las dimensiones correspondientes en cada caso. De forma esquemática las ecuaciones de estado pueden ser expresadas en forma de diagrama de bloques,



**Figura 2.1 – Diagrama de bloques de las ecuaciones de estado**

Ahora se considerará el sistema formado por los dos tanques acoplados correspondiente con el siguiente esquema de parámetros,



**Figura 2.2 - Variables de los tanques acoplados**

donde  $C_1$  y  $C_2$  son las secciones transversales de los tanques 1 (izquierdo) y 2 (derecho) respectivamente;  $c_1, c_2$  y  $c_3$  son las secciones de las válvulas;  $Q_1$  es el caudal de entrada al tanque y por tanto al sistema;  $Q'_1$  y  $Q'_2$  son los caudales de salida de los tanques a través de las válvulas inferiores hacia el depósito;  $Q_2$  es el caudal de salida del depósito 1 y al mismo tiempo de entrada al tanque 2; y por último  $h_1$  y  $h_2$  son las respectivas alturas del nivel del líquido dentro de los tanques.

Para ajustar las ecuaciones físicas que describan al sistema, hay que hacer el balance de variación del volumen dentro de los tanques, esto es, a través del caudal de entrada y de salida de los mismos,

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dh_1}{dt} &= \{Q \text{ de entrada}\} - \{Q \text{ de salida por el orificio 1}\} - \{Q \text{ de salida por el orificio 3}\} \\ C_1 \frac{dh_1}{dt} &= Q_1 - Q'_1 - Q_2 \\ C_1 \frac{dh_1}{dt} &= Q_1 - kc_1 \sqrt{2gh_1} - kc_3 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Del mismo modo para el tanque 2,

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = kc_3 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - kc_2 \sqrt{2gh_2} \quad (2.12)$$

Ahora se toman los valores  $h_1^0, h_2^0$  y  $Q_1^0$  como aquellos valores de  $h_1, h_2$  y  $Q_1$  para los que se cumple que

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{dh_2}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

Y se considera también  $x_1, x_2$  y  $u_1$  como una pequeña variación de estos parámetros,

$$x_1 = h_1 - h_1^0, x_2 = h_2 - h_2^0, u_1 = Q_1 - Q_1^0 \quad (2.14)$$

Entonces el desarrollo de Taylor que se obtiene para las ecuaciones 19 y 20 es el siguiente,

$$C_1 \dot{x}_1 = \left\{ Q_1^0 - kc_1 \sqrt{2gh_1^0} - kc_3 \sqrt{2g(h_1^0 - h_2^0)} \right\} + u_1 - \frac{1}{R_1} x_1 - \frac{1}{R_3} x_1 + \frac{1}{R_3} x_2 \quad (2.15a)$$

$$C_2 \dot{x}_2 = \left\{ kc_3 \sqrt{2g(h_1^0 - h_2^0)} - kc_2 \sqrt{2gh_2^0} \right\} - \frac{1}{R_2} x_2 - \frac{1}{R_3} x_2 + \frac{1}{R_3} x_1 \quad (2.15b)$$

Como puede observarse se han ignorado todos los términos de orden 2 o superior de la serie de Taylor y a además se ha utilizado el término  $\frac{1}{R}$  dado por,

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial [kc_1 \sqrt{2gh_1}]}{\partial h_1} \Big|_{h_1^0} = \frac{kc_1 g}{\sqrt{2gh_1^0}} \quad (2.16a)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial [kc_2 \sqrt{2gh_2}]}{\partial h_2} \Big|_{h_2^0} = \frac{kc_2 g}{\sqrt{2gh_2^0}} \quad (2.16b)$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{\partial [kc_3 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}]}{\partial h_1} \Big|_{h_1^0, h_2^0} = \frac{kc_3 g}{\sqrt{2g(h_1^0 - h_2^0)}} \quad (2.16c)$$

Entonces las ecuaciones 23a y 23b pueden ser reescritas del siguiente modo,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_1} & \frac{1}{R_3 C_1} \\ \frac{1}{R_3 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} - \frac{1}{R_3 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (2.17)$$

Si ahora se procede del mismo modo con las ecuaciones de las salidas del sistema linearizándolas se tiene que,

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = kc_1 \sqrt{2gh_1} + kc_2 \sqrt{2gh_2} \quad (2.18a)$$

$$\dot{Q}_3 = kc_3 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.19b)$$

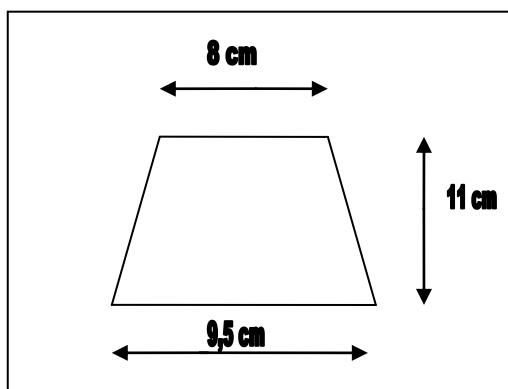
y de este modo se consigue lo siguiente,

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (2.20)$$

Como puede observarse las ecuaciones 25 y 27 tiene la forma típica de las ecuaciones de estado,  $\dot{x} = Ax + Bu$  y  $y = Cx + Du$  por lo que queda definido de forma teórica el sistema de los dos tanques acoplados.

Ahora se tratará de asignar los diferentes valores numéricos para cada variable, correspondientes a la propia maqueta de tanques acoplados.

- Sección de los tanques: la morfología de la sección transversal del tanque tiene la siguiente forma y dimensiones,



Luego la sección, en  $cm^2$  será,

$$C = 8^2 + 2 \frac{0,75 \cdot 11}{2} = 72,25 cm^2 \quad (2.21)$$

y al tratarse de una pareja de tanques de idénticas dimensiones se tiene que,

$$C_1 = C_2 = 72,25 cm^2 \quad (2.22)$$

**Figura 2.3 - Sección del tanque**

-Resistencias referentes a las válvulas: Se considera un flujo a través de una determinada válvula. La resistencia a la que se ve sometido el caudal del líquido está definida como la variación de la altura del propio líquido en función de la variación en el propio caudal, esto es,

$$R = \frac{dH}{dQ} \quad (2.23)$$

En este caso se tienen 3 válvulas, en la que la válvula 1 es la situada en la parte inferior del tanque 1, la 2 es la situada en la parte inferior de tanque 2 y la válvula 3 es la correspondiente a la unión entre ambos tanques. Para calcular el valor de sus resistencias basta con realizar los ensayos pertinentes en estado estacionario y a través de las siguientes relaciones hallar tanto  $R_1$  como  $R_2$  y como  $R_3$ ,

$$R_1 = \frac{h_1}{q_1} \quad \text{con la válvula 3 cerrada y la 1 abierta} \quad (2.24a)$$

$$R_2 = \frac{h_2}{q_2} \quad \text{con la válvula 1 cerrada y la 2 y la 3 abiertas} \quad (2.24b)$$

$$R_3 = \frac{h_1 - h_2}{q_3} \quad \text{con la válvula 1 cerrada y la 2 y la 3 abiertas} \quad (2.24c)$$

Con el fin de conocer el valor de la R, es decir, de la pendiente de la recta tangente a la curva altura/caudal de salida en un punto cualquiera de equilibrio, se procede a hacer una serie de ensayos para cada válvula y para cada posición posible de esta válvula (0, 1, 2, 3 y 4). Para ello se procede al estudio independiente de cada válvula del sistema.

### Válvula 1:

Para poder trabajar con las diferentes posiciones de la válvula 1 hay que conocer su papel respecto al conjunto del sistema. Para ello se va a representar de forma gráfica la relación existente entre el caudal que ésta válvula está dejando pasar y la altura del líquido en equilibrio que se consigue con dicho caudal, para cada una de las posiciones posibles. Para ello la válvula 3 estará completamente cerrada, para así poder trabajar con el tanque izquierdo de forma aislada. El ensayo consiste en llenar el tanque, con la válvula en la posición 0 (cerrada) hasta un nivel próximo a los 25 cm, y a continuación cambiar a una cierta posición de la válvula. Con los datos obtenidos a través de la obtención de un fichero en formato de texto con LabVIEW se trabaja con ellos con el fin de obtener las pequeñas variaciones de caudal para cada muestra. Se desechan además las primeras muestras ya que se corresponden con el cambio de posición de la propia válvula. Existe una gran variación en los datos obtenidos por el sensor de ultrasonidos para la altura, por lo que se hace uso del filtro Butterworth. Éste se encarga de filtrar los datos obtenidos por el sensor, dependiendo de la frecuencia de muestreo con la que se esté trabajando y fijando una frecuencia de corte. Así pues, en el fichero de texto con los datos de tiempo, caudal, referencia y alturas, aparecerán además los datos del sensor de ultrasonidos una vez filtrados según los parámetros deseados.

Los datos referentes al tiempo vienen expresados en el fichero de texto en segundos así que basta con pasarlos a minutos dividiéndolos entre 60.

Los datos de la altura captada por el sensor vienen dados en V, luego con la siguiente regla de tres se hace la conversión a cm,

$$\begin{aligned} 10V &----25\text{cm (niveles máximos)} \\ ( )V &----x \text{cm} \end{aligned} \quad (2.25)$$

luego,

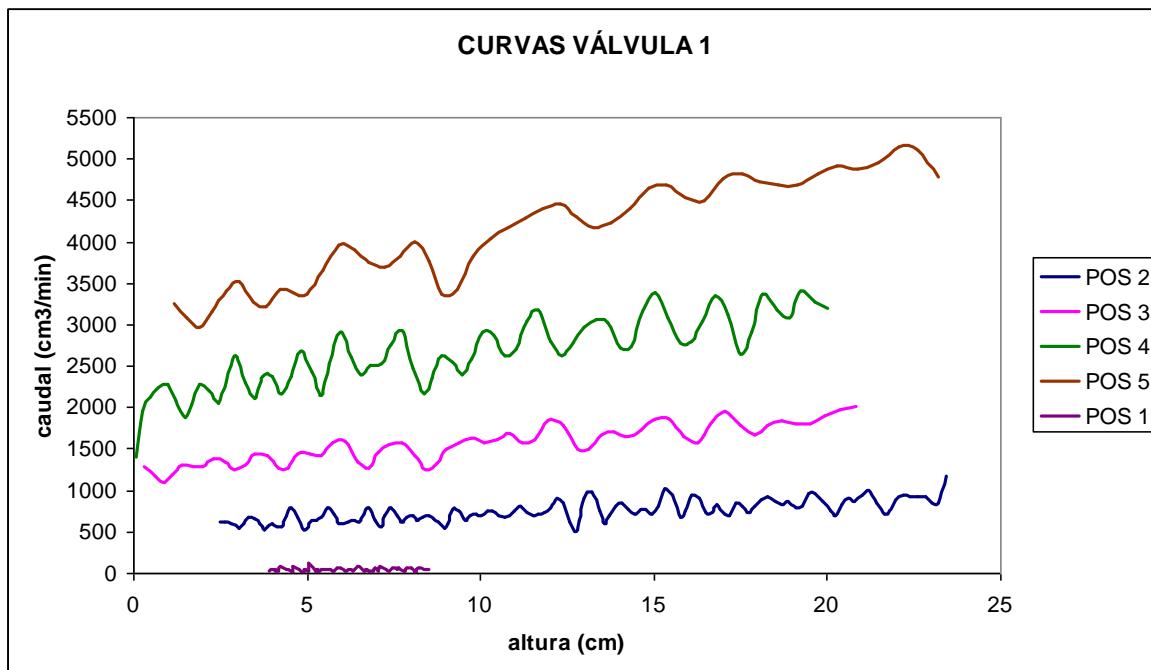
$$x(\text{cm}) = \frac{25}{10} ( ) \quad (2.26)$$

Con lo cual basta con multiplicar los Voltios referentes a la altura por 2,5 para conseguir el valor en cm.

Para conocer las pequeñas variaciones producidas se calcula el volumen existente en el tanque para cada muestra de altura, multiplicando este parámetro por la sección de  $72,25\text{cm}^2$ , obteniendo el volumen en  $\text{cm}^3$ .

Y por último para hallar las variaciones de caudal entre dos muestras consecutivas, se divide la variación de volumen (restando el volumen de la muestra anterior menos el volumen de la muestra actual) entre la variación de tiempo (restando al tiempo actual menos el tiempo de la muestra actual).

Si se representan gráficamente los datos obtenidos (anexo tal), se tiene que las curvas de la válvula 1, según la posición en que se encuentre son las siguientes,



**Figura 2.4 - Curvas vaciado de los tanques**

Como se puede apreciar cuanto más abierta esta la válvula, mayor diferencia entre el volumen desalojado en función de la altura del líquido, y por tanto mayor pendiente en el punto de equilibrio. Además en este grafico se observa que los datos tomados por el sensor de ultrasonidos a pesar de estar debidamente filtrados son bastante ruidosos.

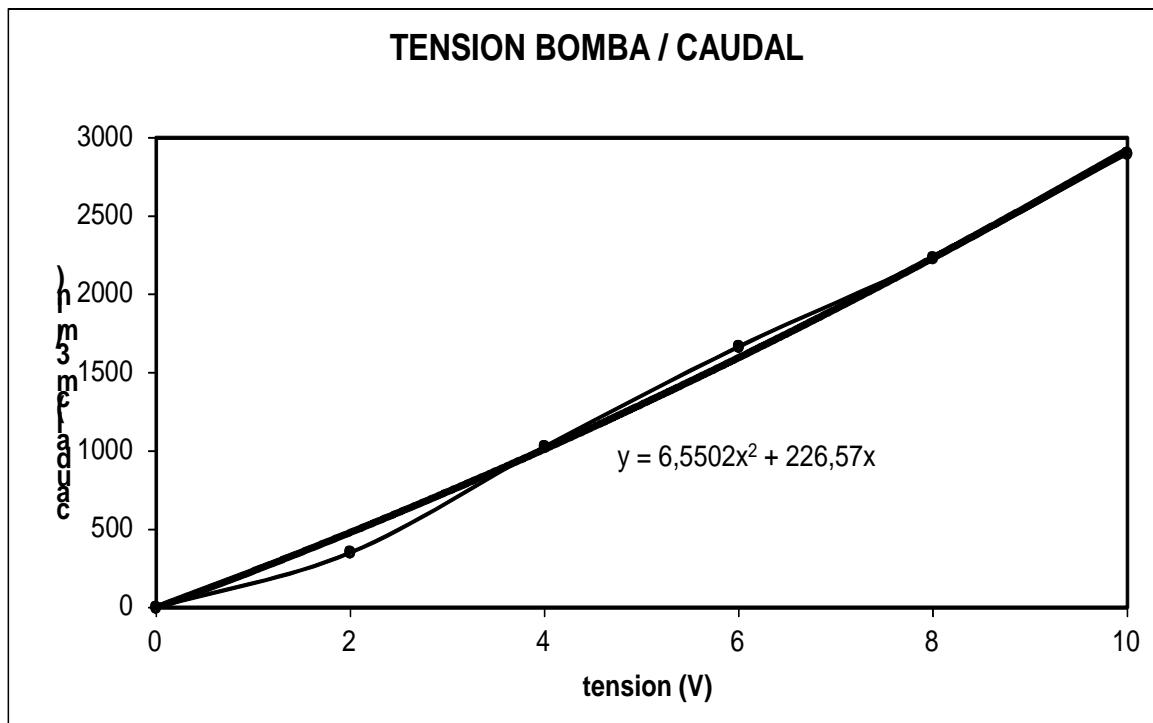
Estas curvas, como se ha citado con anterioridad, relacionan los distintos puntos de equilibrio del líquido en relación al caudal que se está desalojando. Bien pues, al darse en cada punto un estado estacionario, significa que el caudal que se está desalojando será exactamente el mismo que se está aportando al tanque, por lo que en el caso de la maqueta que se está tratando existirán algunas limitaciones en cuanto a caudal se refiere. Por ello el ensayo que se realizará a continuación tratará de encontrar la relación entre la tensión que se aporta a la bomba de agua y el caudal que ésta proporciona.

Para llevar a cabo este ensayo se trabajará a los niveles de tensión de 2, 4, 6, 8 y 10 V, y a partir de los datos de tiempo y altura del líquido del fichero de datos del ensayo en LabVIEW. Con la sección del propio tanque  $A = 72,25\text{cm}^2$  se puede conocer la variación en el volumen, y con los tiempos, su relación entre la magnitud obtenida obteniendo el caudal aportado para ese valor de tensión,

Vbomba (V)	$\Delta H$ (cm)	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta T$ (min)	Q (cm <sup>3</sup> /min)
0				0,00
2	2,25	162,56	0,46	350,85
4	2,65	191,64	0,19	1026,66
6	2,38	172,14	0,10	1665,83
8	3,86	278,89	0,13	2231,08
10	3,14	227,05	0,08	2898,45

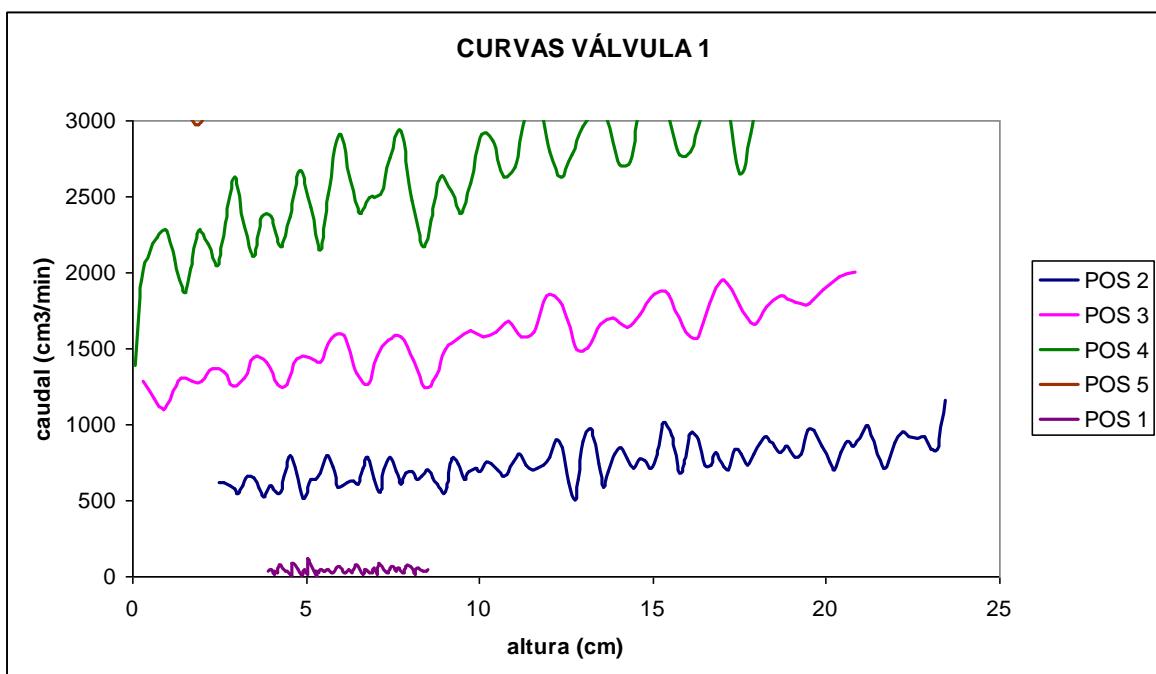
**Figura 2.5 - Datos relación tensión/ caudal**

Si ahora se representan gráficamente estos datos, se agrega la línea de tendencia y se representa en el gráfico su ecuación,



**Figura 2.6 - Curva característica de la bomba**

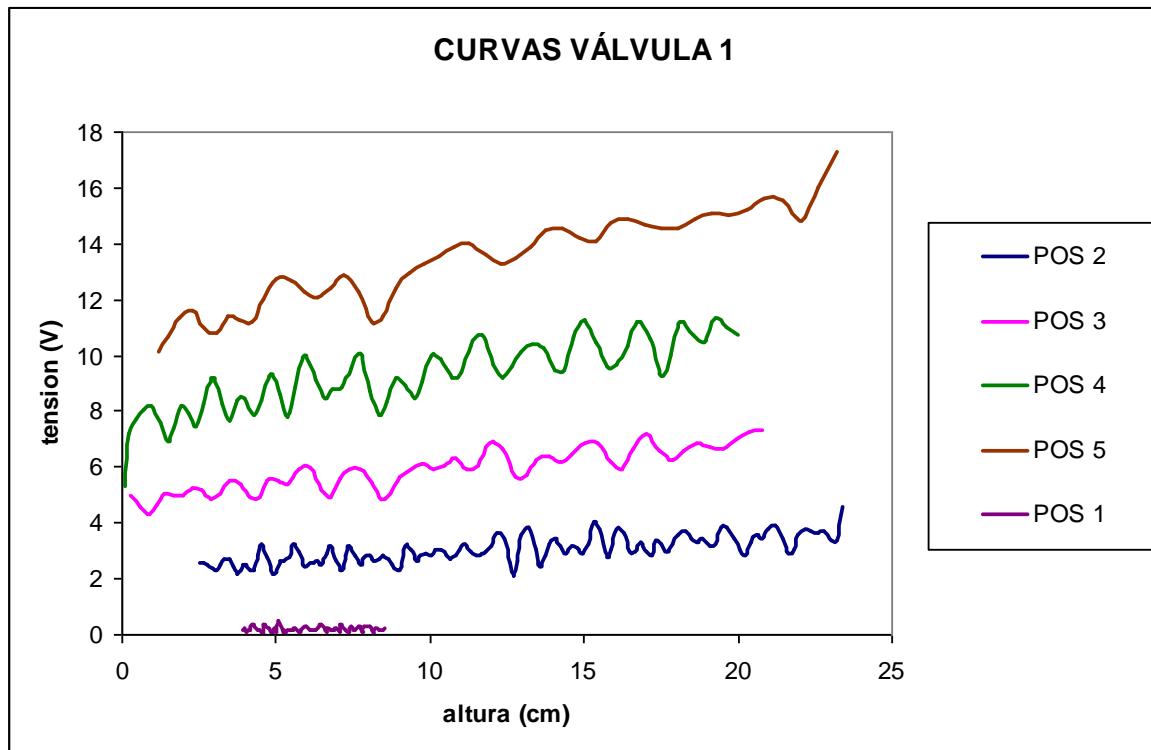
Como puede apreciarse para el valor máximo de tensión admitida por la bomba, es decir 10 V, el caudal proporcionado por la misma no es superior a  $3000\text{cm}^3/\text{min}$ . Luego las nuevas curvas que pueden conseguirse con la bomba de que se dispone estarán en el rango de alturas de  $0 < h < 25\text{cm}$  y en el rango de caudal de  $0 < Q < 3000\text{cm}^3/\text{min}$ , quedando las curvas de las distintas posiciones de la válvula del siguiente modo que la representación anterior queda limitada de la siguiente forma,



**Figura 2.7a - Curvas válvula 1**

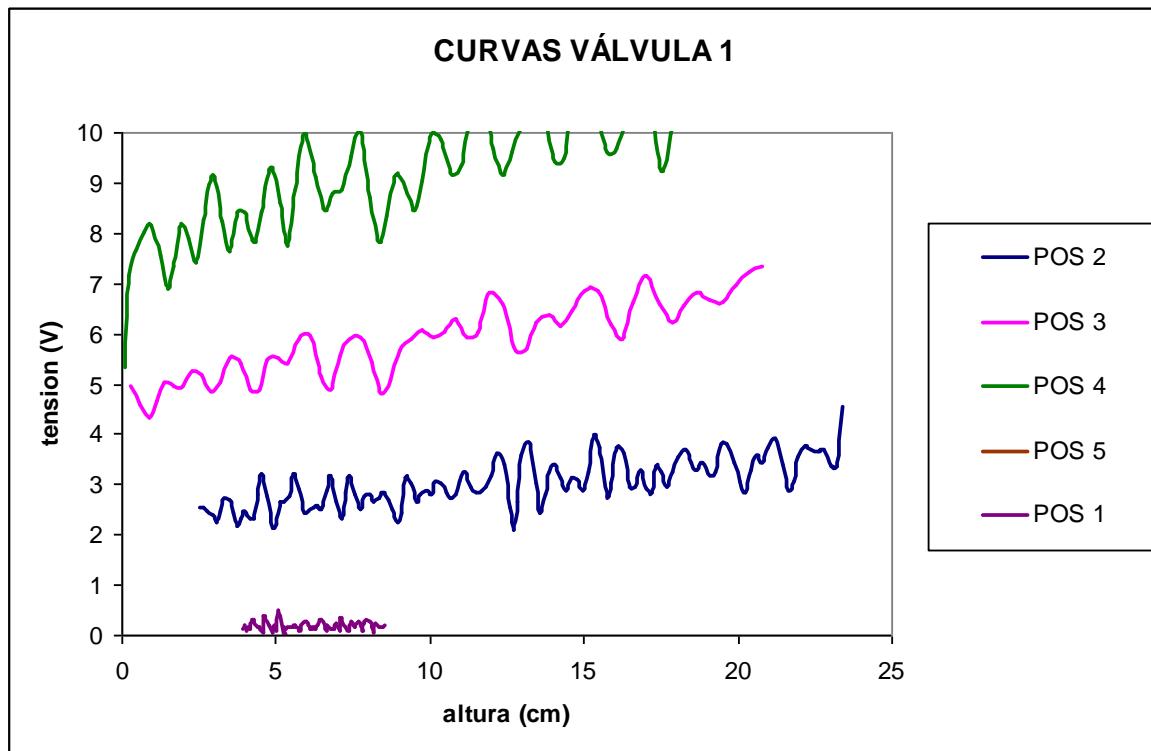
Si ahora se representa la altura en función de la tensión de la bomba cumpliéndose que,

$$Q = 6,5502V^2 + 226,57V$$



**Figura 2.7b - Curvas válvula 1**

Como la bomba tiene un límite de tensión, o tensión máxima de 10 V reduciendo el rango del eje de ordenadas de  $y_{\max} = 18V$  a  $y_{\max} = 1cm$  se tiene que,



**Figura 2.7c - Curvas válvula 1**

Se aprecia que la curva correspondiente a la posición 5 no aparece en el rango de funcionamiento de la maqueta luego no existirá el estado estacionario debido a que la cantidad de líquido que deja pasar la válvula en esta posición es siempre mayor al que es posible aportar con la bomba.

Del mismo modo se puede observar que para la posición 1 los valores de tensión de la bomba son muy pequeños, por lo que es muy difícil ajustar estos valores a la bomba de la maqueta.

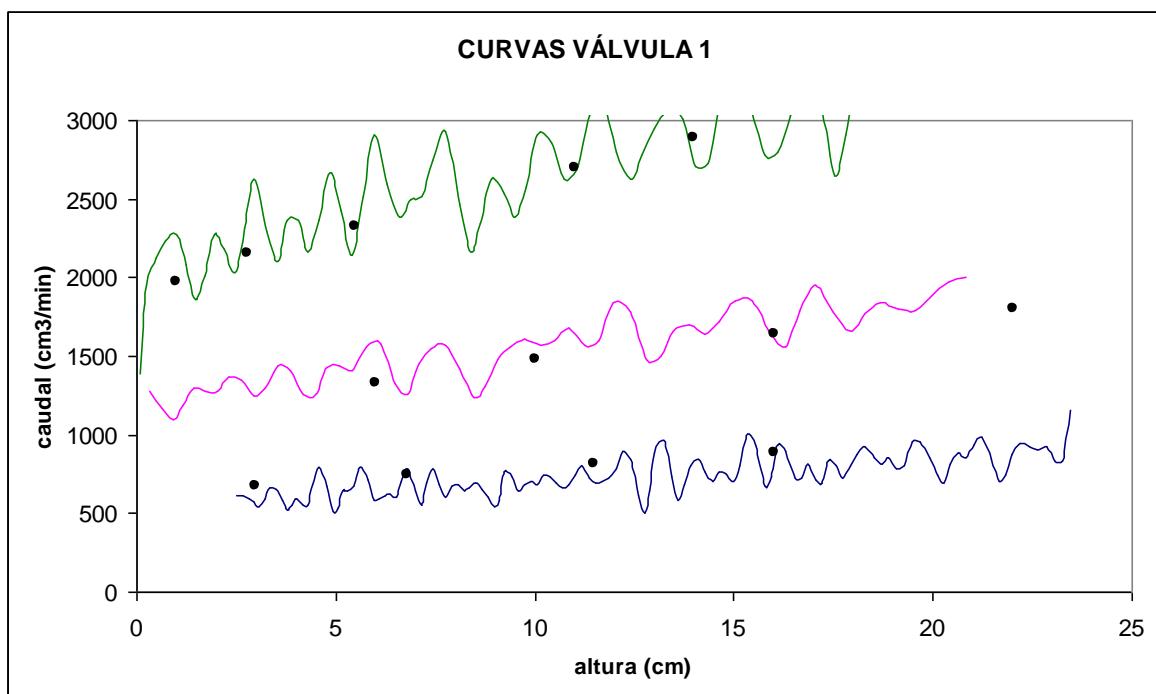
Para dar con el comportamiento de estas válvulas se va comprobar que efectivamente para determinado caudal (o tensión de la bomba) el punto de equilibrio se encuentra en la curva que se ha obtenido. Para ello realizaremos los ensayos pertinentes para las tres posiciones de la válvula en las que se da el equilibrio y de este modo para una tensión aplicada se comprobará si la altura alcanzada pertenece a la curva obtenida con anterioridad,

Del ensayo práctico se obtienen los datos de tensión y caudal siguientes para las diferentes posiciones de la válvula 1:

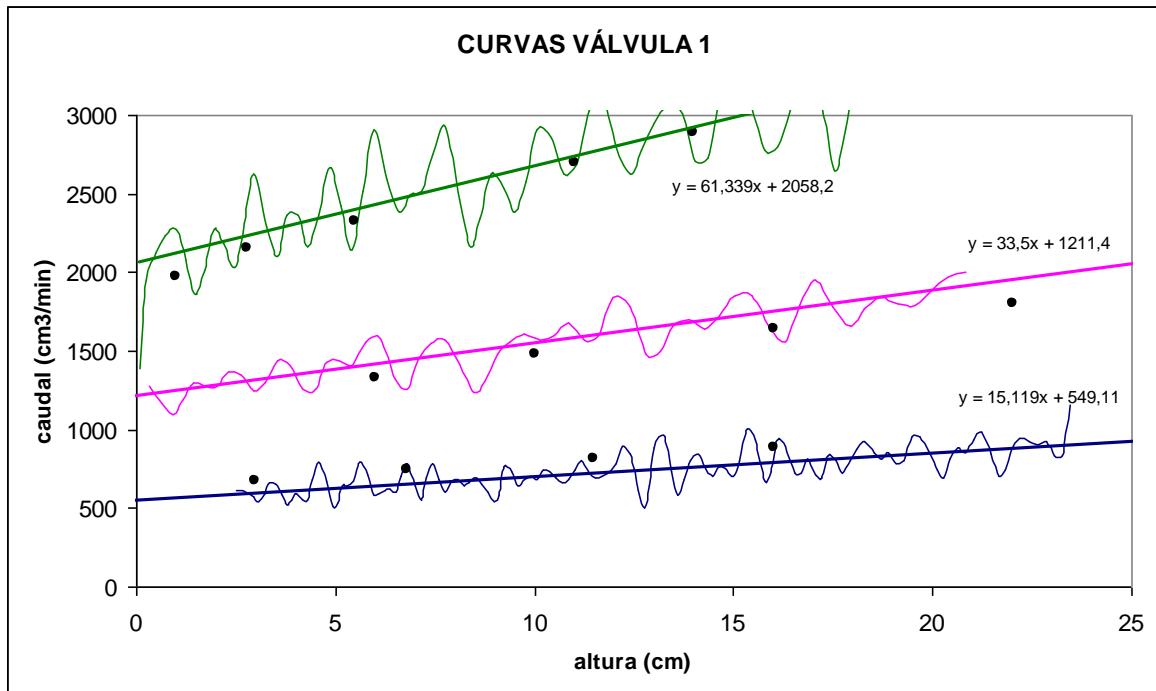
TENSION (V)	POS 0	POS 1	POS 2	POS 3	POS 4	POS 5	CAUDAL (cm <sup>3</sup> /min)
0	0					caudal de salida	0
1							230,06
2							477,52
2,75			3				674,52
3			6,8				742,36
3,25			11,5				811,29
3,5			16				881,3
3,75							952,4
4							1024,59
5				6			1324,21
5,5				10			1480,54
6				16			1641,21
6,5				22			1806,24
7					1		1975,61
7,5					2,8		2149,33
8					5,5		2327,4
9					11		2696,57
9,5					14		2887,68
10	25				17,5		3083,13

**Figura 2.7d – Tabla datos ensayo**

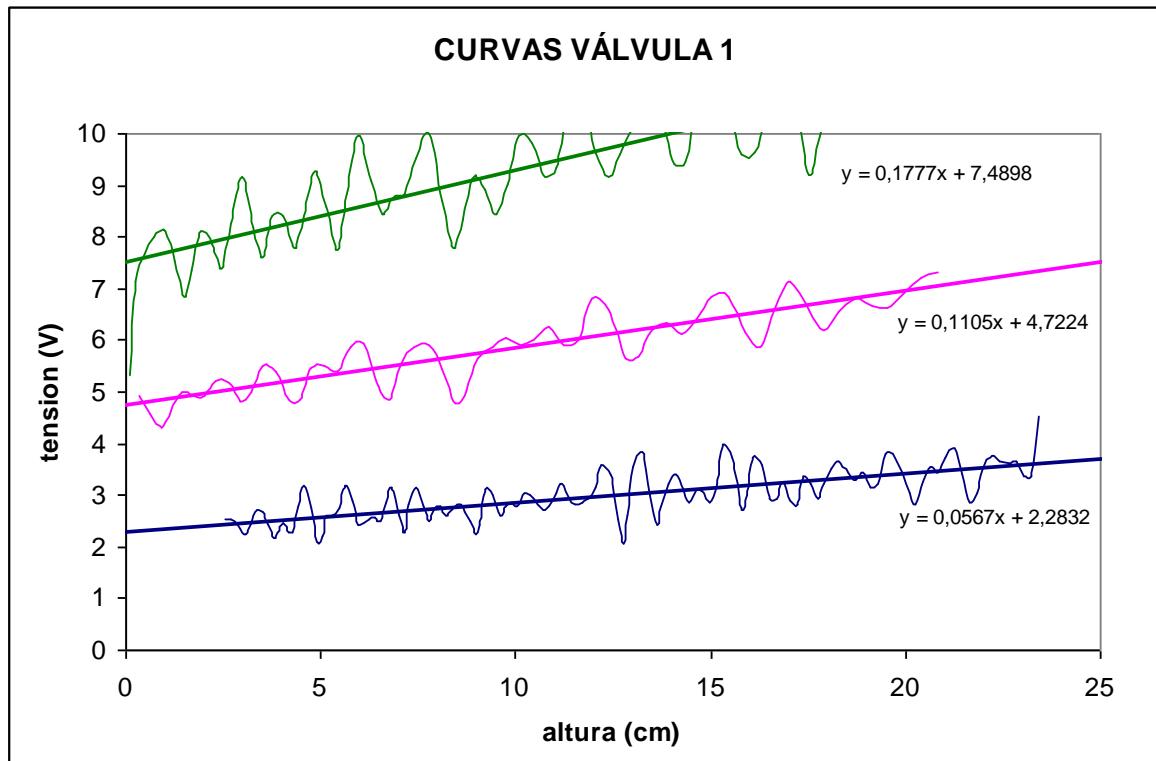
Por lo que si ahora insertamos estos datos en las curvas representadas para las tres posiciones de la válvula en que se puede dar el equilibrio,

**Figura 2.7e – Curvas vaciado y puntos del ensayo**

Ahora se van a trazar las líneas de tendencia de modo que mediante las ecuaciones correspondientes se pueda obtener la pendiente de cada una de ellas. El tipo de línea de tendencia que se empleara será de tipo lineal puesto que las gráficas son suficientemente rectilíneas como para tomar como modelo una recta,



**Figura 2.7f – Rectas caudal/ altura**



**Figura 2.7g – Rectas tensión/ altura**

Como se puede observar la relación entre caudal y altura o tensión es lineal, luego la pendiente será la misma independientemente del rango de alturas en que se esté trabajando. Así que se obtienen de las ecuaciones del gráfico los distintos valores que toma la pendiente ( $\frac{1}{R_1}$ ) para cada posición,

- Pos 2:  $\frac{1}{R_1} = 15,119 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 3:  $\frac{1}{R_1} = 35,5 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 4:  $\frac{1}{R_1} = 61,339 \text{ cm}^2 / \text{min}$

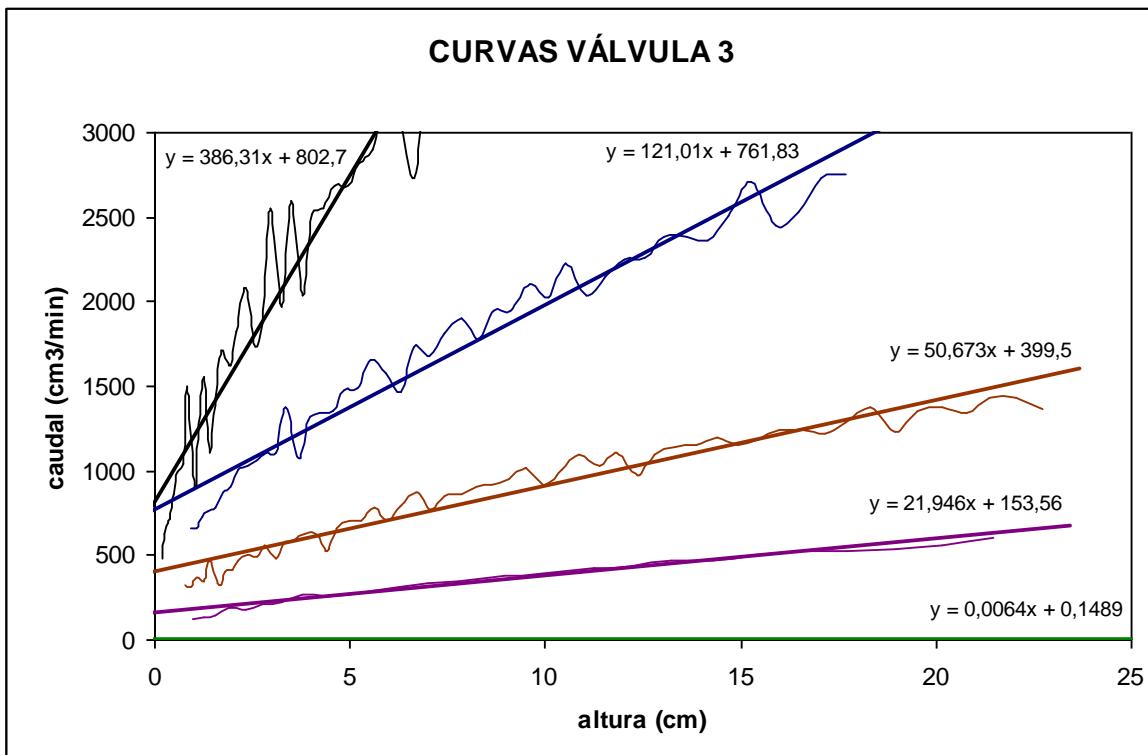
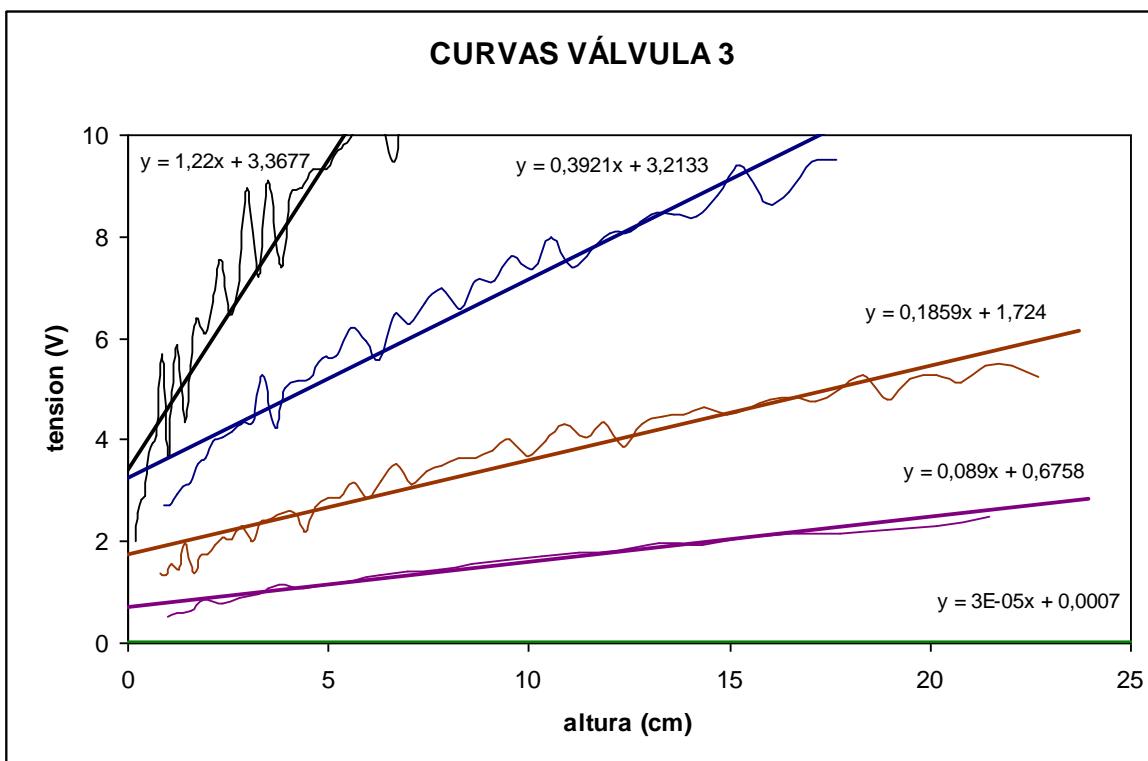
### Válvula 2:

Una vez se ha estudiado el comportamiento de la válvula en función de la posición de apertura referente al primero de los tanques se pasará al estudio de la válvula del tanque número 2. En un principio se puede pensar que el comportamiento de esta va a ser idéntico al de la válvula del tanque 1, ya que ambos tanques son exactamente iguales y la colocación de la válvula en el sistema es la misma. Sin embargo podremos comprobar si su comportamiento es el mismo de tal forma que no sea necesaria una segunda bomba en el tanque 2. Simplemente basta con llenar el tanque 2 hasta una cierta altura, por ejemplo hasta el nivel máximo de 25 cm, a continuación abrir la válvula 1 hasta las distintas posiciones y obtener los datos referentes al tiempo y nivel de líquido durante el vaciado. Los datos obtenidos en este ensayo son idénticos a los realizados de igual manera en el tanque 1. Se concluye así afirmando que el comportamiento de las válvulas 1 y 2 es el mismo y por tanto,

- Pos 2:  $\frac{1}{R_2} = 15,119 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 3:  $\frac{1}{R_2} = 35,5 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 4:  $\frac{1}{R_2} = 61,339 \text{ cm}^2 / \text{min}$

### Válvula 3:

Con el fin de conocer por último el comportamiento de la válvula 3, que conecta ambos tanques se procederá de igual forma que para la obtención del comportamiento de la válvula 1, solo que la disposición de las válvulas en este caso variará ya que la válvula 1 estará completamente cerrada mientras que las válvulas 2 y 3 estarán completamente abiertas para así dejar pasar el líquido que aporta la bomba al tanque 1 hacia el tanque 2 (válvula 3) y del tanque 2 hacia el depósito inferior (válvula 2). Vemos de igual forma los niveles de equilibrio para cada valor de tensión,

**Figura 2.8a – Curvas caudal válvula 3****Figura 2.8b – Curvas tensión válvula 3**

Como se puede observar la relación entre caudal y altura o tensión se puede entender como lineal, luego la pendiente será la misma independientemente del rango de

alturas en que se esté trabajando. Así que se obtienen de las ecuaciones del gráfico los distintos valores que toma la pendiente ( $\frac{1}{R_3}$ ) para cada posición,

- Pos 2:  $\frac{1}{R_3} = 21,946 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 3:  $\frac{1}{R_3} = 50,673 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 4:  $\frac{1}{R_3} = 121,01 \text{ cm}^2 / \text{min}$
- Pos 5:  $\frac{1}{R_3} = 386,31 \text{ cm}^2 / \text{min}$

Así para una determinada configuración de las válvulas (por ejemplo, válvula 1: posición 2; válvula 2: posición 0; válvula 3 posición 0) el sistema viene definido por las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_1} & \frac{1}{R_3 C_1} \\ \frac{1}{R_3 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} - \frac{1}{R_3 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{15,119}{72,25} - \frac{0}{72,25} & \frac{0}{72,25} \\ \frac{0}{72,25} & \frac{72,25}{72,25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{72,25} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0,21 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,014 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \end{aligned} \quad (2.27)$$

O bien para la configuración en la que participen los dos tanques (por ejemplo, válvula 1: posición 3; válvula 2: posición 2; válvula 3 posición 3) se tendrán las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_1} & \frac{1}{R_3 C_1} \\ \frac{1}{R_3 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_2} - \frac{1}{R_3 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{35,5}{72,25} - \frac{50,673}{72,25} & \frac{50,673}{72,25} \\ \frac{50,673}{72,25} & -\frac{15,119}{72,25} - \frac{50,673}{72,25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{72,25} \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,19 & 0,7 \\ 0,7 & -0,91 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,014 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 \quad (2.28)$$

Y en cuanto a las salidas, en este caso la altura del líquido,

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Si ahora se desea conocer la función de transferencia del sistema a partir de la ecuación de estados, basta con aplicar la transformada de Laplace para así trabajar en el dominio frecuencial en lugar de en el dominio temporal. La forma general de obtener esta transformada es la siguiente,

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$sX(s) = AX(s) + BU(s)$$

$$(sI - A)X(s) = BU(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s)$$

$$\frac{X(s)}{U(s)} = (sI - A)^{-1}B$$

$$G(s) = (sI - A)^{-1}B \quad (2.30)$$

Donde  $A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{A_1}{C_1} + \frac{A_3}{C_2}\right) & \frac{A_3}{C_1} \\ \frac{A_3}{C_2} & -\left(\frac{A_2}{C_2} + \frac{A_3}{C_2}\right) \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{C_1} \end{bmatrix}$  y  $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  puesto que se

desea relacionar la entrada de caudal con la salida del nivel de líquido en estado estacionario.

En el ensayo que se está llevando a cabo las válvulas 2 y 3 están completamente cerradas, es decir en la posición 0, significa que,

$$A_2 = A_3 = 0 \quad (2.31)$$

Luego se tiene que  $A = \begin{bmatrix} -\frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

Entonces,

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 G(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

Donde,

$$\begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{s + \frac{A_1}{C_1}} \begin{pmatrix} \text{Adj} \begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \end{pmatrix}^T$$

$$\begin{vmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{vmatrix} = s^2 + \frac{A_1^2}{C_1^2}, \quad \text{Adj} \begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s + \frac{A_1}{C_1} \end{bmatrix}$$

Por tanto,

$$\left( \text{Adj} \begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \right)^T = \begin{bmatrix} s + \frac{A_1}{C_1} & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

Sustituyendo en la ecuación de la función de transferencia,

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s + \frac{A_1}{C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 G(s) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{s}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 G(s) &= \begin{bmatrix} \frac{s}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.34}$$

Lo cual significa que,

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{s}{C_1}}{s\left(s + \frac{A_1}{C_1}\right)}$$

$$\frac{H_1(s)}{Q(s)} = \frac{\frac{1}{C_1}}{s + \frac{A_1}{C_1}} \quad (2.35)$$

Y en conclusión la función de transferencia para cada posición de la válvula es,

$$G(s) = \frac{\frac{1}{C_1}}{s + \frac{A_1}{C_1}} \quad (2.36)$$

Para ver el comportamiento que va a tener el sistema con Matlab, a partir no de la su función de transferencia sino a partir de su ecuación de estados para una situación determinada se va a crear una función del tipo .m con la que obtener la propia función de transferencia del sistema y su respuesta ante una entrada de tipo escalón a partir de la introducción de las variables  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $u$  (amplitud del escalón). De esta forma se puede obtener la función de transferencia de forma general independientemente de la configuración del sistema de las válvulas. La función *simulacion.m* es la que sigue,

```
function [b,a,z,p]=simulacion(A1,A2,A3,u)
C1= 72.25;
C2=C1;
A=[ -((A1/C1)+(A3/C1)), A3/C1 ;
     A3/C2 , -((A2/C2)+(A3/C2)) ];
B=[1/C1 0]';
C=[1, 0; 0, 1];
D=[0, 0]';
sistema=ss(A,B,C,D);
[b,a]=ss2tf(A,B,C,D);
gs = tf(b(1,:),a);
z=zero(gs);
p=pole(gs);
step(gs*u)
```

Para trabajar con los datos de altura en cm y de tiempo en min, basta con que  $A1$ ,  $A1$  y  $A3$  estén en  $\frac{cm^2}{min}$  y el escalón de caudal en  $\frac{cm^3}{min}$ . Entonces, partiendo de una situación de equilibrio donde la tensión de entrada a la bomba sea por ejemplo de 3 V y pase a ser de 3,5V el escalón de tensión será entonces la resta de ambos, lo que expresado en términos de caudal es de forma general,

$$Q = 6,5502V_b^2 + 226,57V_b$$

Para  $V_b = 3$ ,

$$\begin{aligned} Q &= 6,5502 \cdot 3^2 + 226,57 \cdot 3 \\ Q &= 738,66 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Del mismo modo que para  $V_b = 3,5$

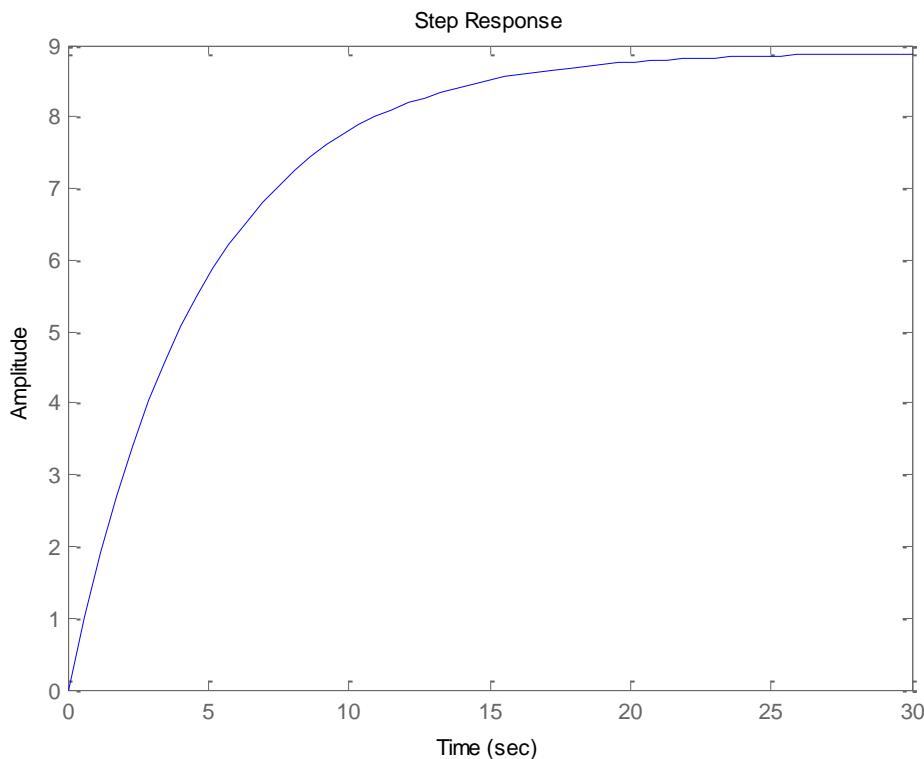
$$\begin{aligned} Q &= 6,5502 \cdot 3,5^2 + 226,57 \cdot 3,5 \\ Q &= 873,23 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Luego la variación de caudal entre un estado de la bomba y otro será,

$$\begin{aligned} \Delta Q &= 873,23 - 738,66 \\ \Delta Q &= 134,57 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Introduciendo directamente este valor junto con los de las constantes características de cada válvula en función de su posición (válvula 1 en la posición 2 y las válvulas 2 y 4 cerradas),

```
>> simulacion(15.119,0,0,134.57)
Transfer function:
 0.01384 s
-----
s^2 + 0.20
```



**Figura 2.9a - Respuesta en minutos**

Donde el eje de ordenadas muestra la variación de altura en cm y el de abscisas el tiempo en min, por tanto al aplicar al sistema una entrada en escalón de 0,5V a la bomba, es decir al aumentar el caudal en  $134,57 \frac{cm^3}{min}$  el nivel de equilibrio aumentará en unos 9 cm. Este estado estacionario se consigue una vez pasados los 25 minutos, con lo que queda demostrada la lentitud del sistema.

Ahora bien, si por el contrario se pretende obtener los resultado en segundos en lugar de en minutos basta con expresar A1, A2 y A3 en  $\frac{cm^2}{s}$  dividiendo los parámetros anteriores entre 60 y del mismo modo expresando el escalón de caudal u en  $\frac{cm^3}{s}$  dividiendo también entre 60. Así la consigna que se va a usar en este momento va a ser la siguiente,

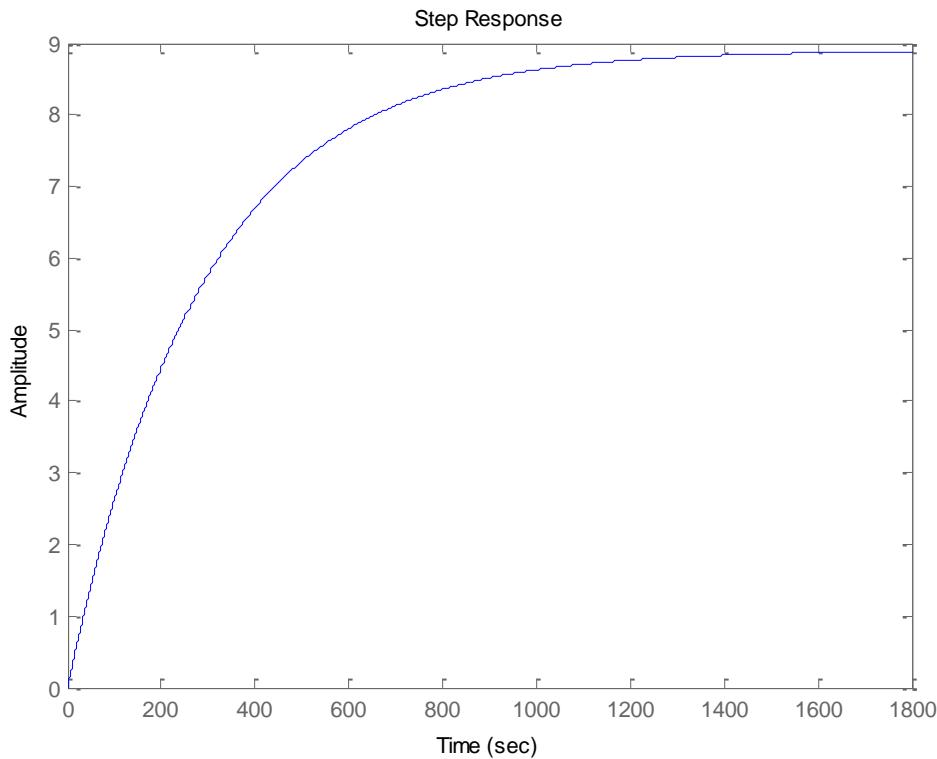
```
>> simulacion(0.252,0,0,2.243)
```

Transfer function:

0.01384 s

-----

$s^2 + 0.003488 s$



**Figura 2.9b - Respuesta en segundos**

Por tanto ahora el equilibrio va a obtenerse aproximadamente a partir de los 1500 segundos (25 min) y tanto el nivel del tanque como la dinámica del sistema será la misma ya que únicamente ha variado la forma de expresar las unidades temporales.

Así la función de transferencia del sistema en el que la entrada es el caudal y la salida es el nivel que alcanza el tanque bajo unas condiciones específicas dependientes de las distintas combinaciones entre las posiciones de las válvulas, para el caso en el que la válvula 1 este en la posición 2 (aproximadamente el 40 % de su apertura total) y las válvulas 2 y 3 ambas en la posición 0 es,

$$G(s) = \frac{0,01384}{s + 0,2093}$$

$$G(s) = \frac{0,0661}{4,778s + 1} \quad (2.40)$$

Cuya ganancia es  $g = 0,0661$  y la constante de tiempo  $\tau = 4,778$  min y cuya entrada viene expresada en  $\frac{cm^3}{min}$  y la salida de altura en cm.

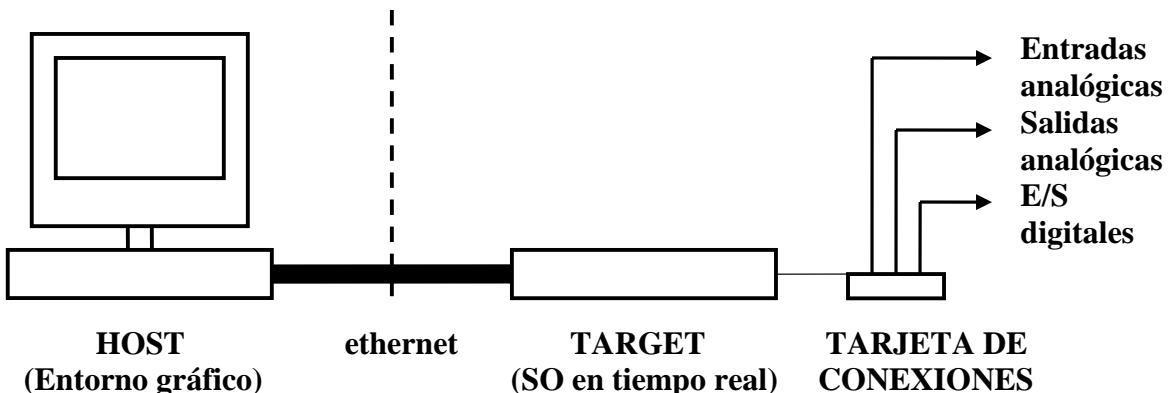
$$G(s) = \frac{0,01384}{s + 0,00348}$$

$$G(s) = \frac{3,968}{286,725s + 0,00348} \quad (2.41)$$

En este caso la ganancia es  $g = 3,968$  y la constante de tiempo  $\tau = 286,73s$  y cuya entrada viene expresada en  $\frac{cm^3}{s}$  y la salida de altura en cm.

## **Capítulo 3: Simulación del sistema**

Una vez se ha representado y obtenido el modelo matemático del comportamiento que tiene el sistema a estudiar, se cotejan estos datos obtenidos a partir de la ecuación del sistema la cual relaciona una entrada de caudal con una salida de nivel de líquido, esto es, a partir de la función de transferencia, con la respuesta del mismo en un ensayo físico, comprobando que ambas desarrollos son similares. Para realizar este ensayo se va a trabajar con el programa LabVIEW de nuevo, desarrollando un VI de tal forma que opere del modo que se deseé. El VI a crear realmente consta de dos partes, pues un VI va a trabajar en el propio host y el otro en el equipo en tiempo real, existiendo la debida comunicación entre ellos a través de las denominadas *shared variables* o variables compartidas. Estas se clasifican según su utilidad en variables de dos tipo: *single process* y de tipo *network*. La primera de ellas se caracteriza por efectuar una transmisión de un determinado parámetro dentro del propio equipo sin interactuar con el otro. Las variables de tipo *network* son las que comunican uno de los equipos con el otro, esto es el target con el host y viceversa. Además al caracterizar estas variables existe la posibilidad de dotarlas de una FIFO de forma que en el caso de que por un motivo cualquiera uno o varios valores de ese parámetro no pudieran ser enviados, este quedaría almacenado con el fin de que no existan perdidas de datos en la propia transferencia de variables.



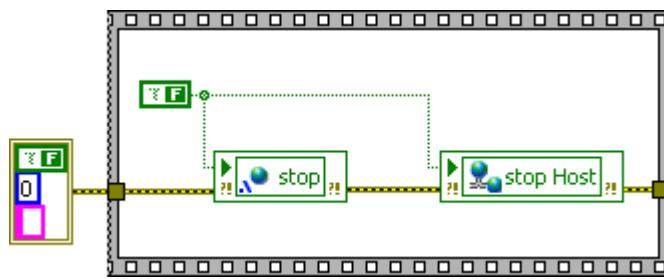
**Figura 3.1 - Entorno de programación**

Dentro del programa del PCRT van a existir tres subprogramas o subVIs diferenciados: el subVI encargado de la configuración de tareas, el subVI de alta prioridad y el de baja prioridad. Estos dos últimos se diferencian en la prioridad de trabajo que tiene cada uno. El de alta prioridad va a ser el dominante, esto es, su tarea va a ser la más importante y por tanto va a estar ejecutándose continuamente y por tanto obteniendo datos de forma ininterrumpida. Por otra parte el de prioridad normal trabajará siempre y cuando el de alta prioridad se lo permita, es decir, siempre que lo interrumpa ni altere la forma de trabajo del subVI de alta prioridad.

Esta prioridad se adjudica a través de las propiedades del subVI. En la categoría de *execution* existe una pestaña *priority* que permite seleccionar: *normal priority*, *high priority*. Para el subprograma de alta prioridad se escogerá la opción de *highest priority*. Las tareas incluidas en este subVI y por tanto de máxima prioridad, serán la obtención de los diferentes datos del ensayo como son el cálculo de la referencia (de tipo constante, cuadrada o cuadrada con offset), el tiempo y los datos obtenidos por los distintos sensores como son la medida del caudal (desde el caudalímetro) y la altura del líquido (desde los

sensores de ultrasonidos); así como el almacenamiento de dichos datos a través de la FIFO con la finalidad de que puedan manipulados desde un archivo de texto una vez finalizado el ensayo.

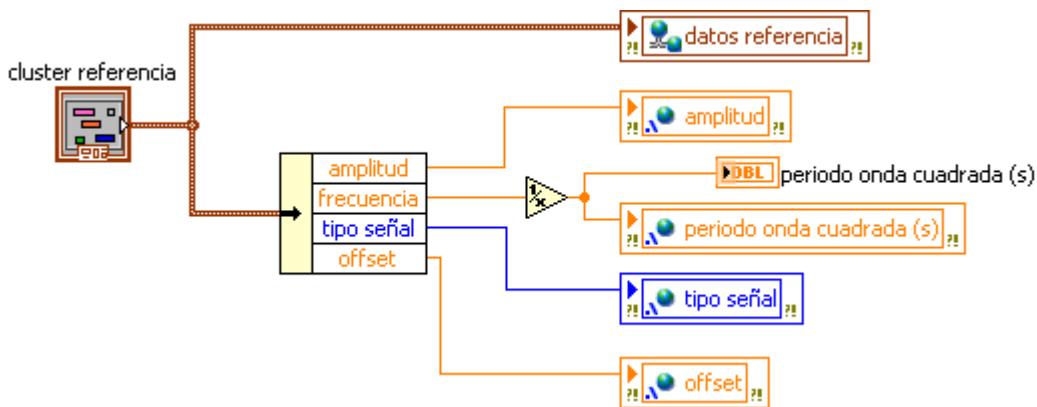
A continuación se desglosan los distintos elementos del VI ubicado en el host de forma que en el momento de la ejecución junto con el target se pueda visualizar y obtener los datos tanto del ensayo físico como de la simulación a partir de la función de transferencia. La primera tarea que hay que implantar es la asignación del estado *false* a las variables compartidas de parada asociadas con el botón de *stop* del panel frontal.



**Figura 3.2 - Secuencia inicial**

De este modo aseguramos que independientemente del valor que tuviera asignada esta variable, por ejemplo si tiene el último valor con el que finalizó un ensayo anterior, en el momento de ejecutar el VI del host lo primero que hará es tomar el valor F (*false*).

A continuación se planta un *timed loop*. Al igual que el *while loop* se encarga de repetir una serie de iteraciones bien introduciendo el número de veces que se desea iterar o bien mediante un botón de parada que aborte estas iteraciones. Sin embargo a diferencia del bucle *while* el bucle *timed* además de poder introducir el tiempo entre dos iteraciones consecutivas directamente permite otorgar una determinada prioridad respecto de otro bucle temporizado. Dentro del lazo se tomarán los datos definidos por el usuario en el panel frontal y estos serán asignados a una variable compartida que permita que estos mismos datos sean utilizados en el terminal del target y posteriormente sean devueltos. Así se asignara al clúster de referencia la variable “datos referencia” de tipo *network* y al mismo tiempo a través del comando *unbundle* se disgregaran los parámetros internos del clúster: offset, amplitud, frecuencia y tipo de señal para que estas al mismo tiempo sean independientemente asignadas al tipo de variable *single process* de forma que estas puedan ser directamente tratadas en el mismo terminal en el que se han creado.



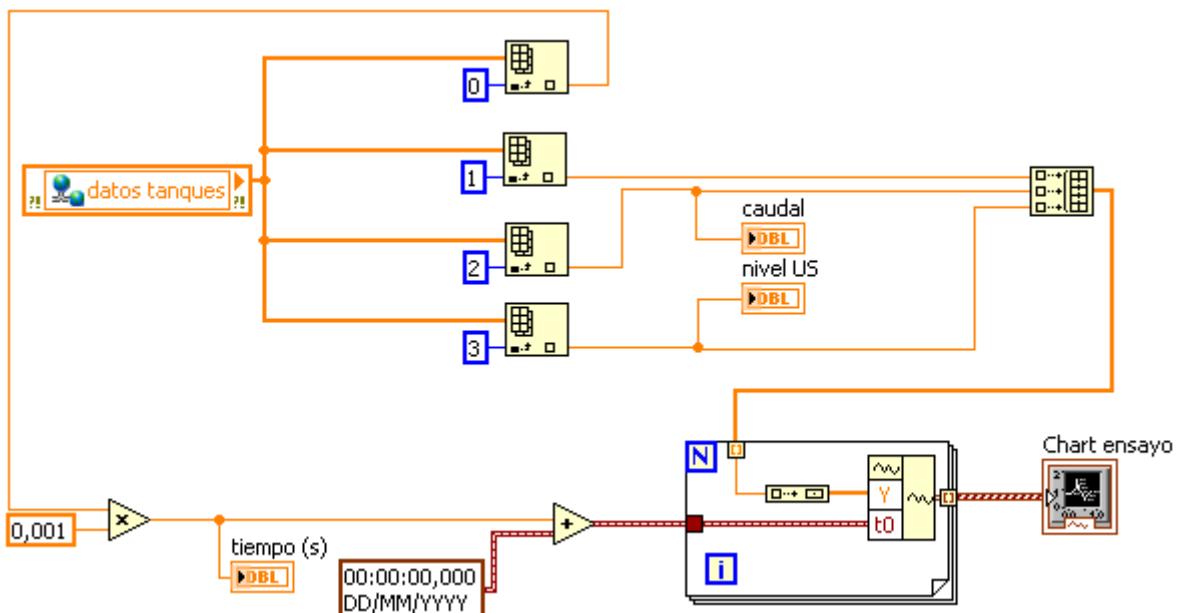
**Figura 3.3 - Asignación de los datos de referencia**

Exactamente lo mismo ocurre con los parámetros del programa tales como el tamaño del vector de datos de la FIFO y la frecuencia de muestreo. El clúster en el que están inmersos ambos parámetros es asignado a su variable compartida correspondiente de tipo *network*.



**Figura 3.4 - Variable compartida con los parámetros del programa**

Es interesante la observación de los distintos datos que se van obteniendo del caudal que aporta la bomba, del nivel que indica el sensor de ultrasonidos, y de la referencia que se ha determinado en función del tiempo. Para ello se inserta un *chart* dentro del *timed loop*. Al terminal del chart tendrá que ir la forma de onda que se desea representar, por lo que se utiliza el comando *build waveform* que permite asignar a cada dato o conjunto de datos un tiempo determinado. Para poder ajustar el tiempo a una escala real, por ejemplo para hacer la observación en el chart en segundos basta con tomar el dato correspondiente con el tiempo de la variable compartida “datos tanques” generada en el target y formada por los datos que van obteniéndose de tiempo, caudal, nivel de líquido y tensión de entrada a la bomba de referencia. Como los datos recogidos están expresados en milisegundos basta con dividir cada uno de ellos entre 100 y el resultado que se obtenga para cada dato asignarlo al terminal ‘t0’ del comando de generación de forma de onda. Por otro lado al terminal ‘Y’ de ese mismo comando se hace corresponder con las diferentes medidas a visualizar en forma de onda en el *chart*.

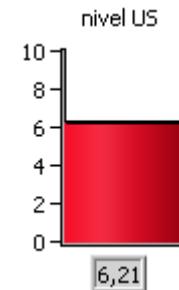


**Figura 3.5 - Generación del gráfico tipo *chart***

Se colocan además sendos indicadores para las medidas del caudalímetro a través de un manómetro y del sensor de nivel de líquido a partir de un tanque, de forma que puedan visualizarse sus datos también durante la ejecución del programa, tanto numéricamente como de forma física.



**Figura 3.6a - Indicador de caudal con display**



**Figura 3.6b - Indicador de nivel con display**

Continuando con el análisis del programa residente en el host y tras preparar las variables compartidas y adecuar los parámetros para que sean visualizados durante la ejecución del programa, es momento de centrarse en la parte de la simulación, desarrollada en forma de secuencias diferenciadas. La primera de las secuencias es la encargada de aportar el parámetro R de la válvula 1 en función de la posición que tenga en el ensayo: posición 2, 3 o 4. Para ello se genera un clúster en el que se permita seleccionar en el panel frontal del programa la posición con la que se está trabajando y que por consiguiente dependiendo de ella se modifiquen las constantes de la función de transferencia del sistema. Para la posición 2 se le asignará el valor 0, a la 3 el valor 1 y a la 4 el valor 5 (recuérdese que para las posiciones 1 y 5 no existe ningún valor de caudal ni por tanto de tensión de la bomba para el cual se alcance el nivel de equilibrio en el interior del tanque)

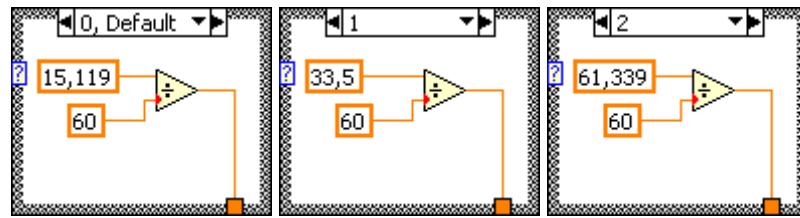


**Figura 3.7a - Clúster del panel frontal**

**Figura 3.7b - Obtención del valor numérico de la posición**

Como dependiendo de cada posición se tendrá un valor u otro es necesaria una estructura de tipo *case*, cuyos estados posibles serán los valores de salida del clúster de posición: 0, 1 y 2. Los valores de la pendiente de la recta que relaciona el caudal aportado por la bomba con la altura a la que se alcanza el nivel de equilibrio para la válvula 1 son,  $A_1 = 15,119 \frac{cm^2}{min}$  para la posición 2, para la posición 3  $A_1 = 35,5 \frac{cm^2}{min}$  y  $A_1 = 61,339 \frac{cm^2}{min}$  para la posición número 4. Las unidades de la función de transferencia van a ser

centímetros y segundos, luego se divide  $A_1$  entre 60 para que la pendiente venga dada en  $\frac{cm^2}{s}$ .



**Figura 3.8 - Diferentes casos en función de la posición de la válvula 1**

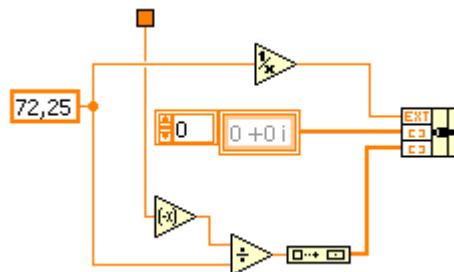
Una vez conocido el valor de  $A_1$  y de la sección del tanque,  $C_1 = 72,25 cm^2$  se define la función de transferencia mediante un *cluster* de tres elementos en el que el primer elemento sea la ganancia, el segundo sean los ceros y el tercero los polos. Para ello se crea una estructura de tipo *cluster* con el comando *bundle* o empaquetar con tres posiciones. La función de transferencia del sistema es,

$$G(s) = \frac{\frac{1}{C_1}}{s + \frac{A_1}{C_1}} \quad (3.1)$$

Por tanto el valor de la ganancia es  $g = \frac{1}{C_1}$  es decir el inverso de la sección del

tanque que es introducido en el primer terminal del comando *bundle*. El sistema carece de ceros luego en el segundo terminal se introduce el valor 0 en formato complejo  $c = 0 + 0j$ . Y finalmente en el terminal número 3 se introduce el polo del sistema de primer orden

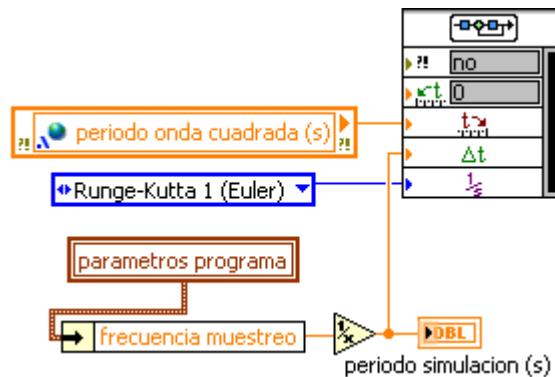
$$p = -\frac{C_1}{A_1}.$$



**Figura 3.9 - Ganancia, cero y polo de  $G(s)$**

La siguiente secuencia una vez definidos los parámetros de la función de transferencia contiene una secuencia de tipo *case* en función del tipo de señal de referencia. Como la simulación solo tiene sentido para el caso de variar entre un estado estacionario y otro, es decir entre pequeñas oscilaciones alrededor de un punto solo va a realizarse el programa de simulación para el caso en el que el tipo de señal sea cuadrada con offset. Así en el interior del caso 2, se coloca un *control & simulation loop* o lazo de

control y simulación que quedara definido introduciendo el valor final de la simulación (periodo de la onda cuadrada de la señal de entrada en segundos), el incremento de tiempo (igual al periodo de muestreo) y el número de datos por iteración del lazo (1 dato por ciclo).



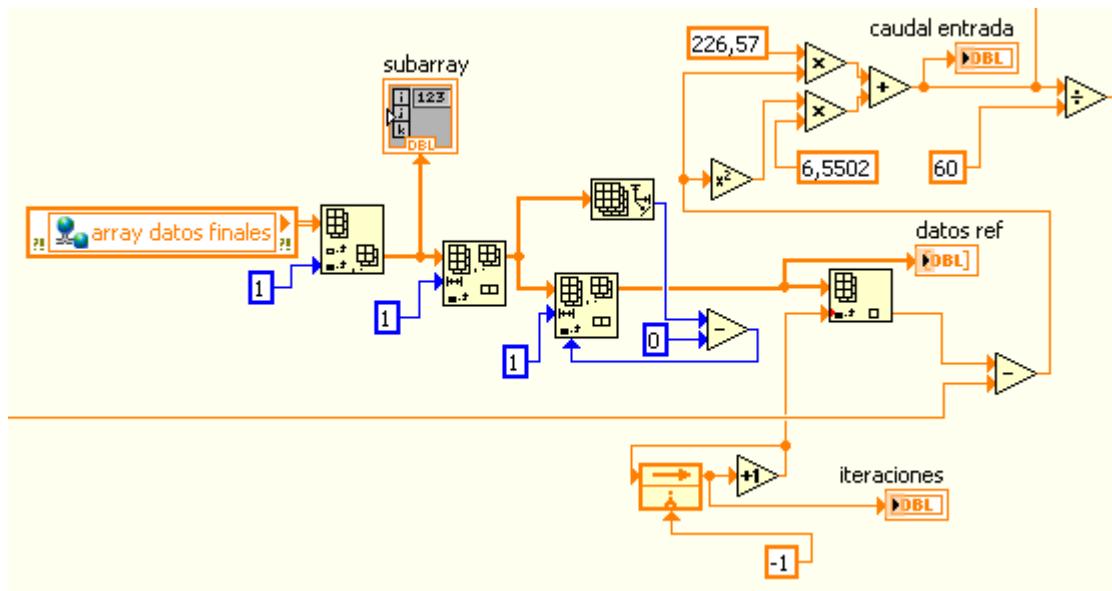
**Figura 3.10 - Configuración del lazo de control y simulación**

Ya en el propio lazo en el que va a realizarse la simulación es donde se ha de implantar el modelo del sistema en el que la entrada será el caudal en  $\frac{cm^3}{s}$  y la salida será la altura en  $cm$ , y que estará conectado con el clúster creado en la secuencia anterior y en el que se definía la función de transferencia.



**Figura 3.11 - Ajuste del modelo del sistema**

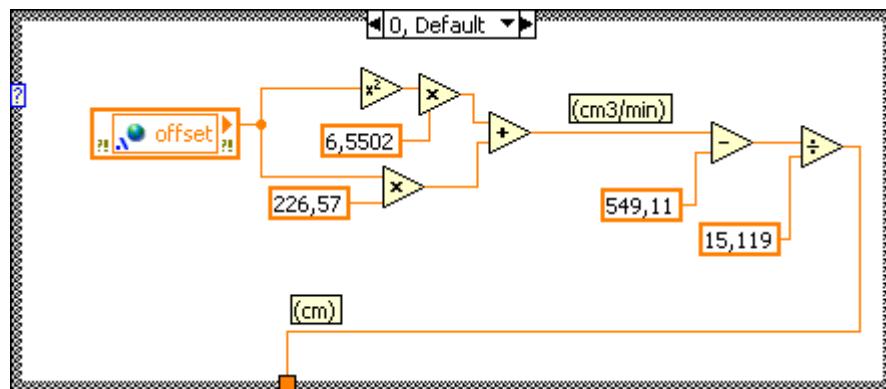
Como se viene comentando el sistema, su modelo y la simulación tienen sentido únicamente en pequeñas variaciones alrededor de un punto de equilibrio. Por tanto la entrada de caudal será aquella variación de volumen en función del tiempo que se produce entre un punto de equilibrio de altura y otro punto de equilibrio diferente. Como la entrada del sistema viene dada por la señal de referencia y su valor de offset y amplitud basta con adaptar la tensión de entrada de la bomba a su valor de caudal a través de la relación conocida de  $Q = 6,5502V_b^2 + 226.57V_b$ . Así si a la señal de referencia se le resta el offset se obtendrá la onda cuadrada de valor medio nulo y amplitud medida en Voltios. Del array de datos finales creado en la tarea de alta prioridad del target se toma la columna de datos de la referencia (columna 2) de forma que para cada iteración del bucle se extraiga un valor, en la siguiente iteración se extraiga el siguiente y así sucesivamente, no sin antes eliminar el primero de ellos pues este dato indica la frecuencia de muestreo.



**Figura 3.12 - Adaptación de la entrada en V a  $\text{cm}^3/\text{s}$**

Para ir observando la entrada al modelo se utiliza el comando *collector* que recoja todos los datos de caudal en  $\frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$  para que una vez finalizado el bucle de simulación se representen en un gráfico de tipo XY.

Por ultimo a la salida de la ecuación del modelo del sistema, es decir la variación de nivel que se ha producido con la variación de caudal a la entrada, es sumada al nivel de offset correspondiente, en función de la posición de la válvula.



**Figura 3.13 - Expresión del offset en forma de altura**

En la última secuencia del programa del host se hace la representación gráfica en dos *charts* diferenciados: uno de ellos con los valores de referencia, caudal, nivel del líquido y simulación expresados en Voltios y otro únicamente con el nivel y su correspondiente señal simulada en centímetros.

### 3.1 – SIMULACIÓN CON ENTRADA $Q_{\text{REFERENCIA}}$

Se hacen varias pruebas con diferentes tiempos para comparar los datos reales del ensayo dados por el sensor de ultrasonidos con los datos teóricos a través de la simulación del modelo matemático de la propia maqueta.

El ensayo trata de partir de un punto de equilibrio, en el que la tensión de entrada a la bomba es de 3,25 V y por tanto el caudal de entrada al tanque,

$$Q = 6,5502V_b^2 + 226,57V_b$$

$$Q = 6,5502 \cdot 3,25^2 + 226,57 \cdot 3,25 = 805,54 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \quad (3.2)$$

Una vez se conoce el caudal, a partir de la linearización entorno a un punto de equilibrio,

$$\text{POS 2: } H = \frac{Q - 549,11}{15,119} \quad (3.3a)$$

$$\text{POS 3: } H = \frac{Q - 1211,4}{33,5} \quad (3.3b)$$

$$\text{POS 4: } H = \frac{Q - 2058,2}{61,339} \quad (3.3c)$$

Luego para la posición número dos que es la que se trata en este caso,

$$H = \frac{757,74 - 549,11}{15,119} = 17 \text{ cm} \quad (3.4)$$

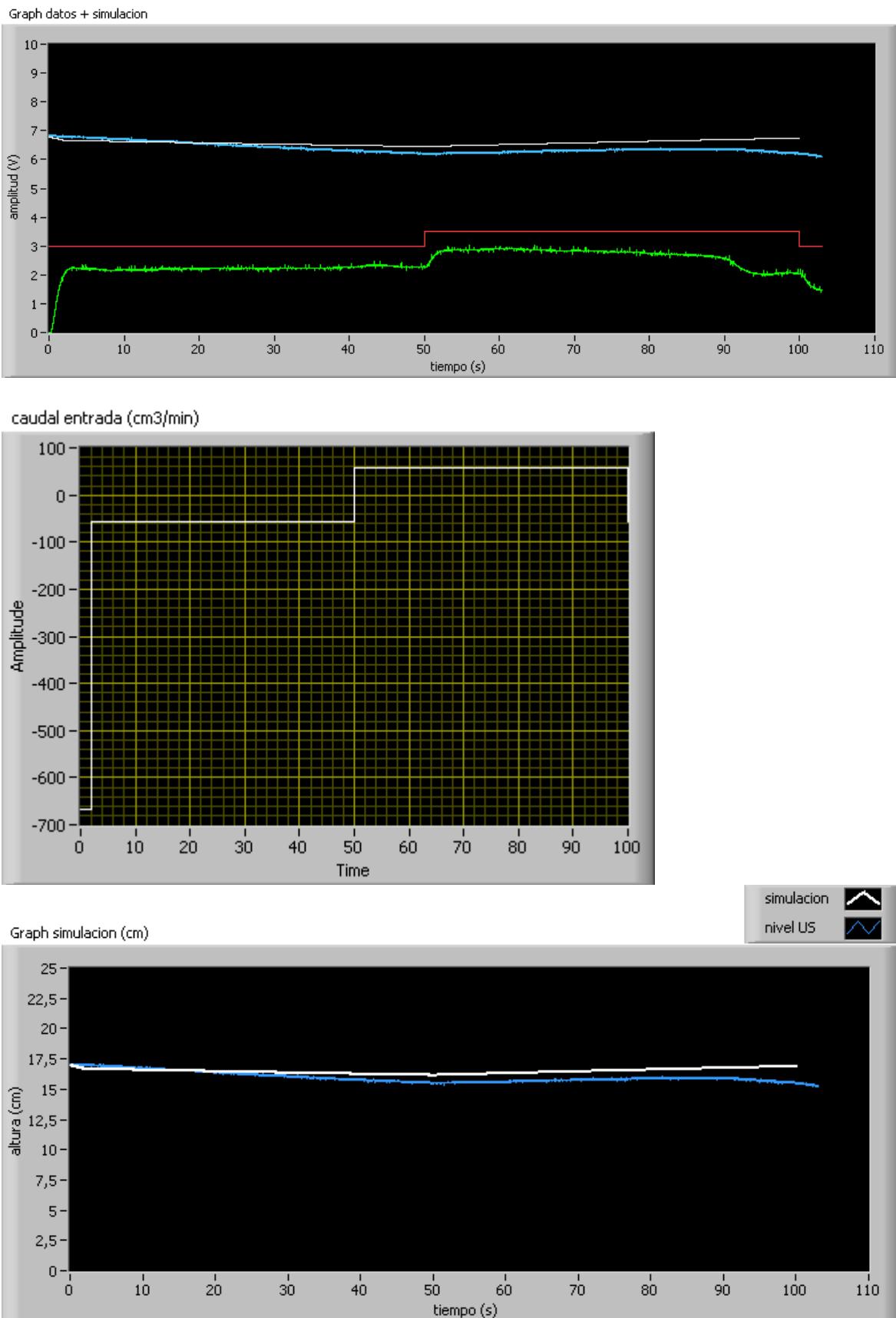
A partir de este punto se somete al sistema a pequeñas variaciones de tensión de +0,25V y -0,25V alrededor de este mismo punto, donde los nuevos niveles de equilibrio pasan a ser,

$$H_{3V} = 12,6 \text{ cm} \quad (3.5a)$$

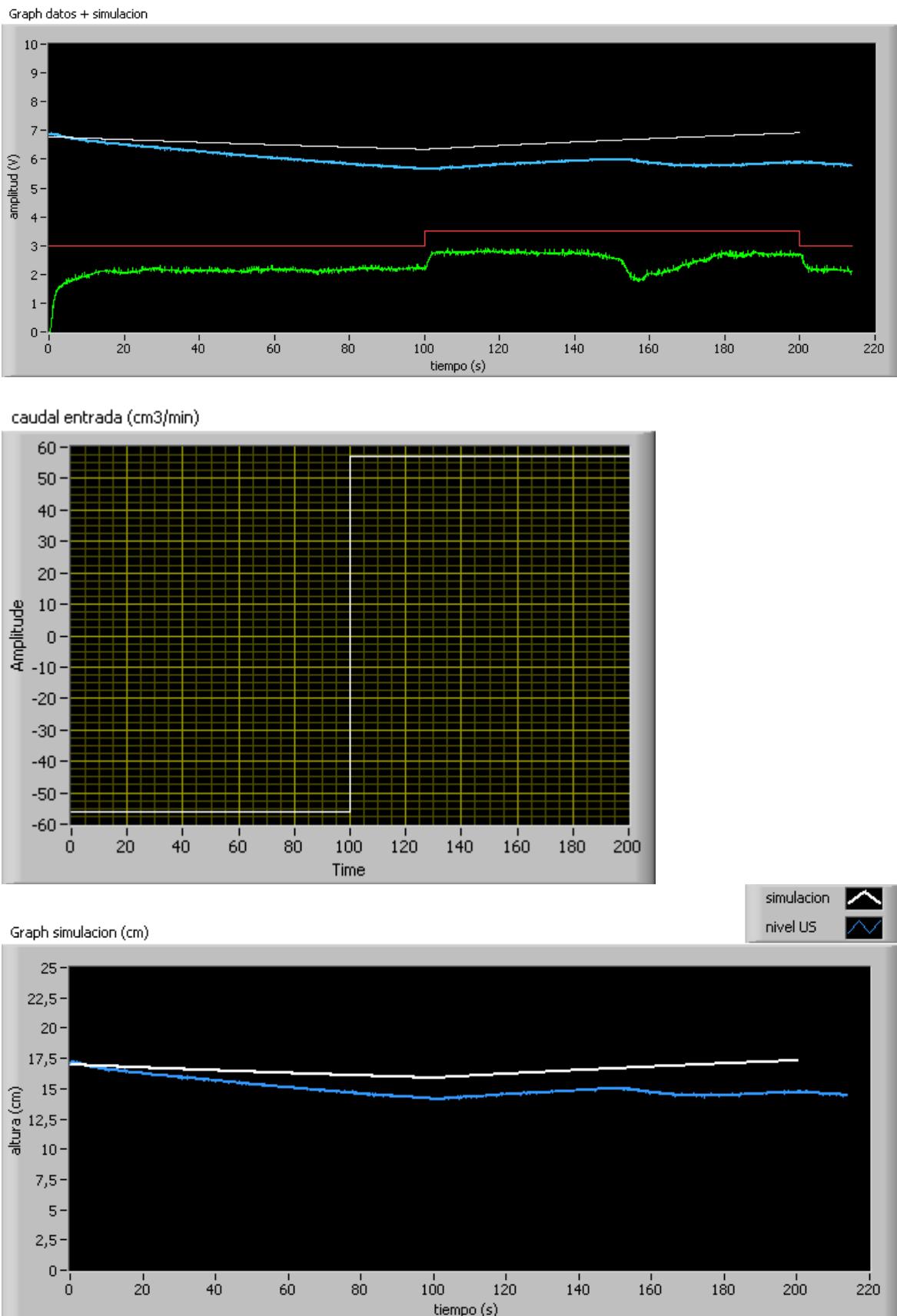
$$H_{3,5V} = 21,5 \text{ cm} \quad (3.5b)$$

A continuación se muestran las gráficas obtenidas para tiempos de simulación de 100, 200 y 500 segundos. La primera de ellas representa en Voltios la entrada de referencia en rojo, la salida de caudal de la bomba tomado por el caudalímetro en verde, el nivel de líquido por el sensor de ultrasonidos en azul y la simulación en color blanco. La segunda gráfica representa la entrada de caudal a la simulación en  $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$ . La tercera y última gráfica representa de forma aislada y ya en centímetros la salida del sensor de nivel (azul) y la simulación (blanco).

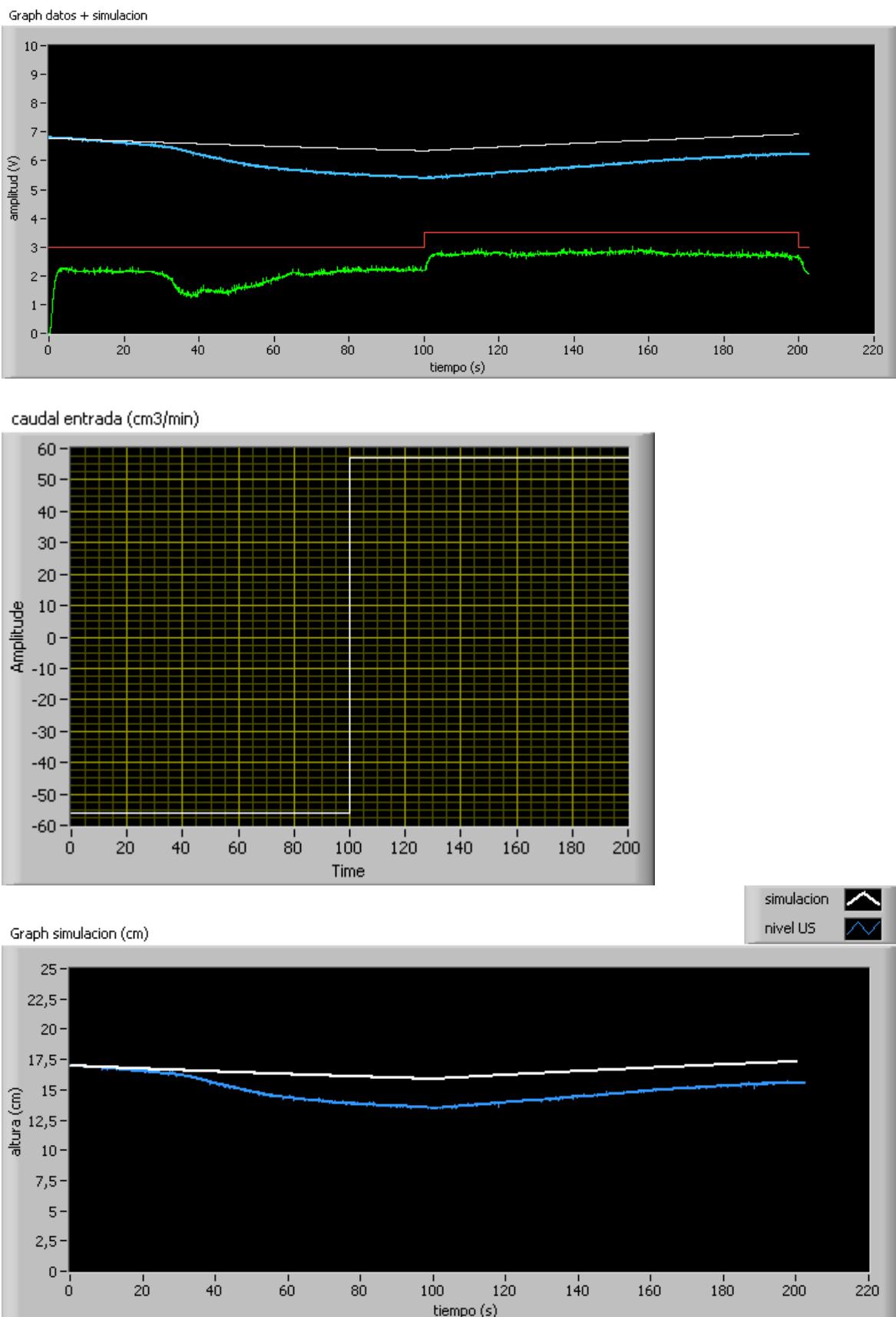
➤  $t_{SIM} = 100s$



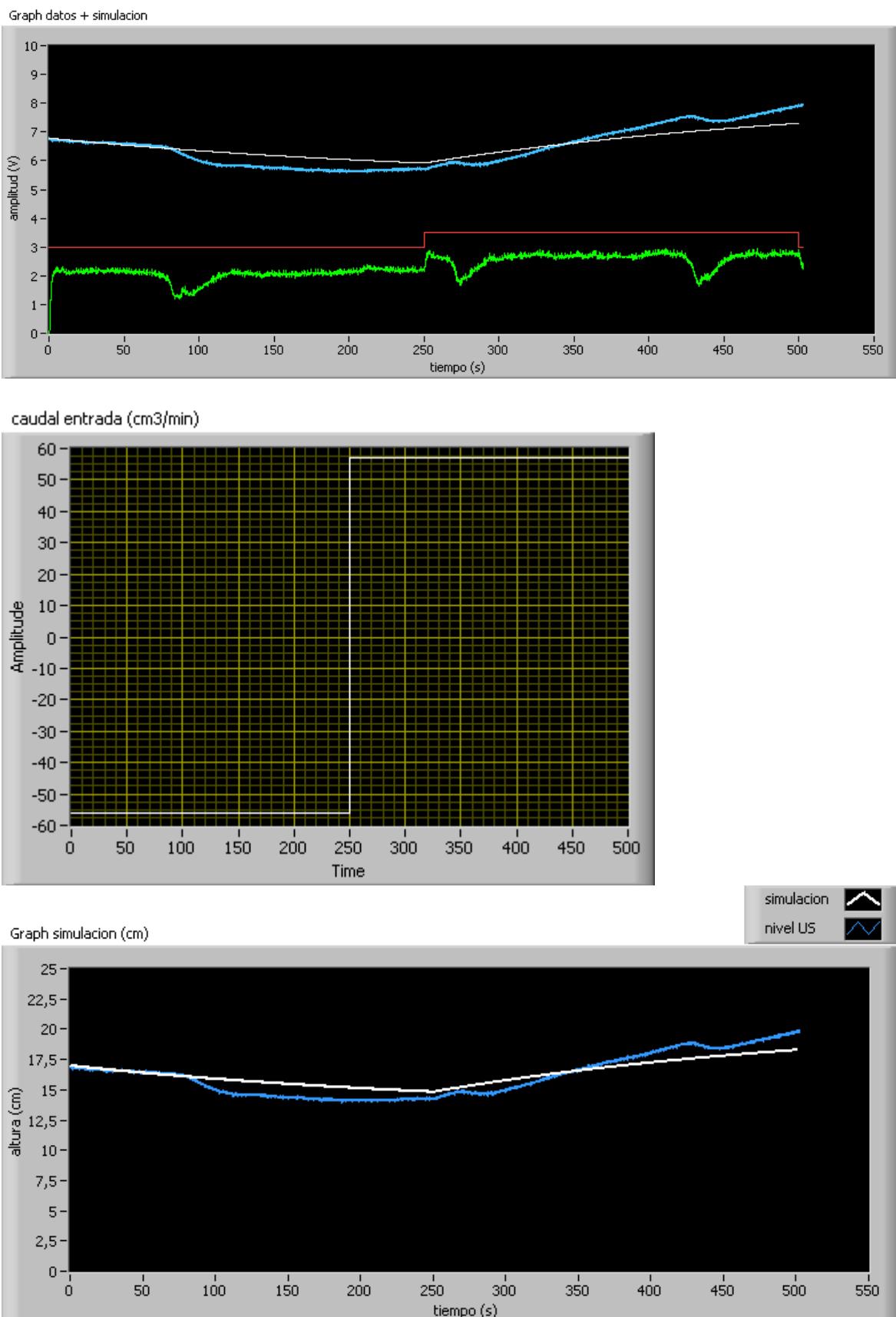
➤  $t_{SIM} = 200s$



➤  $t_{SIM} = 200s$



➤  $t_{SIM} = 500s$



Según se observa en los cuatro ensayos la simulación no sigue el mismo patrón que el sensor debido a las irregularidades del caudal de la bomba, es decir si a la entrada de la ecuación del modelo de la planta se introduce la el caudal a partir de la tensión de referencia el sistema simulado desconoce el comportamiento real de la bomba. Esto se solventa introduciendo el caudal real que está circulando por el sistema a partir de la señal del caudalímetro. Para ello basta con hacer una pequeña modificación en el VI del host, en los parámetros de entrada al modelo de la planta. En lugar de tomar los datos de la matriz de datos finales generados en el target correspondiente con la tensión de referencia se toman los datos del caudalímetro. Al venir expresados en Voltios hay que aplicar la relación que existe entre la tensión del caudalímetro y el caudal real de entrada al sistema,

$$Q = (249,204V_c + 195,396) - 805,945 \frac{cm^3}{min} \quad (3.6)$$

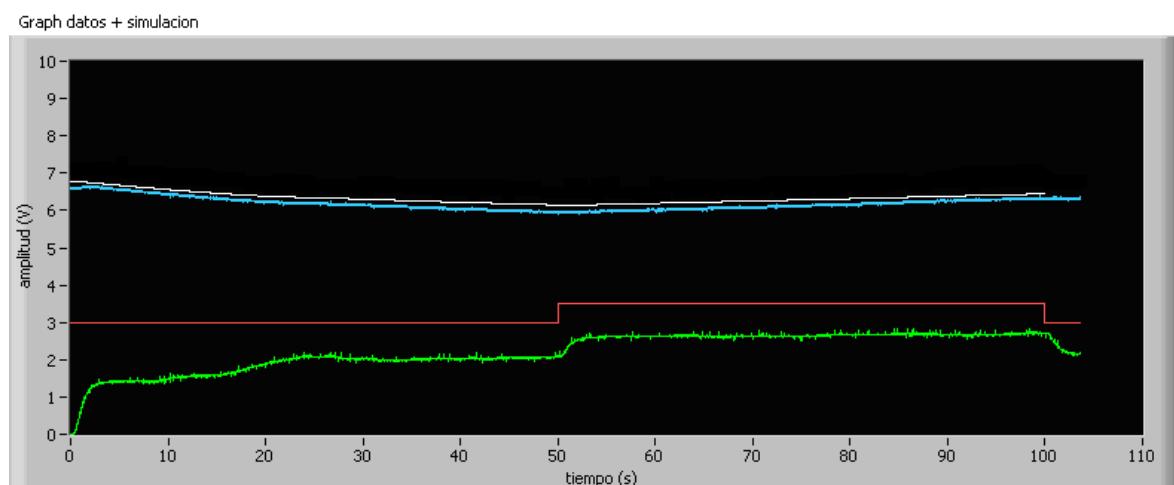
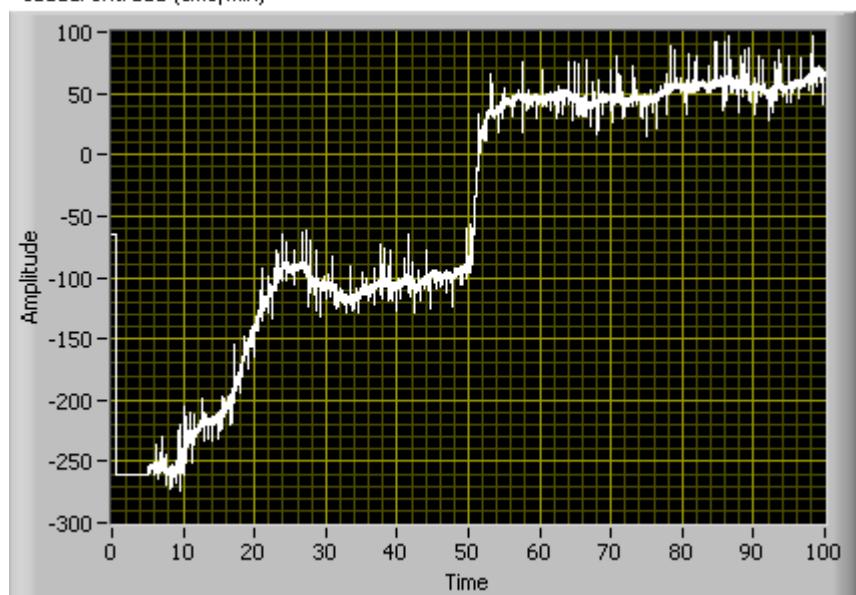
Que posteriormente es dividido entre 60 para que la entrada al modelo este expresada en  $\frac{cm^3}{s}$ :

$$Q = (4,1534V_c + 3,2566) - 13,4324 \frac{cm^3}{s} \quad (3.7)$$

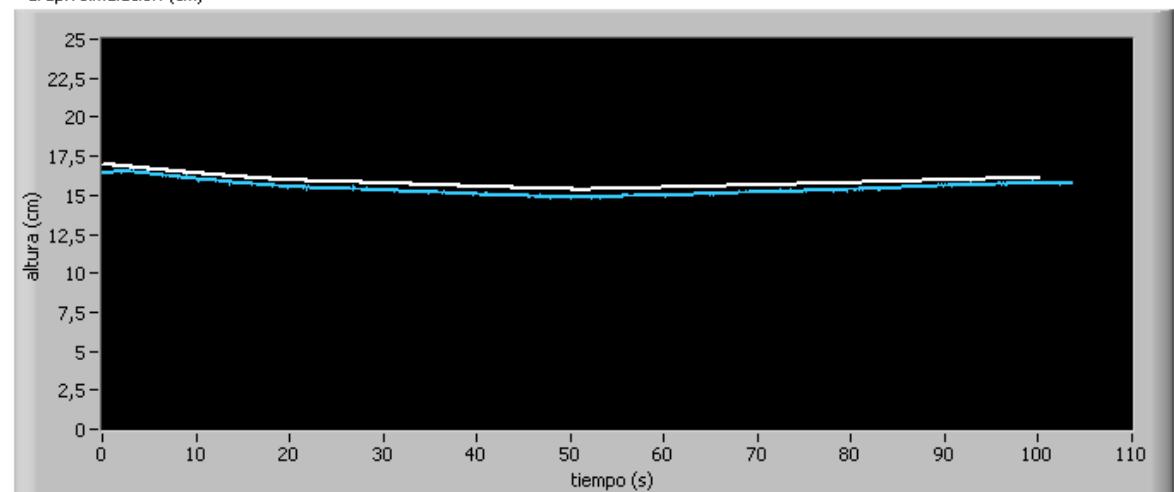
### 3.2 – SIMULACIÓN CON ENTRADA $Q_{\text{CAUDALÍMETRO}}$

Una vez que se trabaja con el valor real del caudal de la bomba, cuyo funcionamiento está afectado por las repentinhas disminuciones en el aporte de caudal, se repiten los ensayos de forma que se puedan contrastar las gráficas de la simulación y de la altura real del líquido dentro del tanque. Estos ensayos se realizaran del mismo modo que en el caso de la entrada de la señal de referencia entorno a variaciones en un punto de equilibrio, de 19 cm conseguido al introducir a la bomba una tensión de 3,25V . El valor mínimo de la tensión de entrada a la bomba durante el ensayo es de 3V y el valor máximo tras someterse a una entrada escalón es de 3,5V .

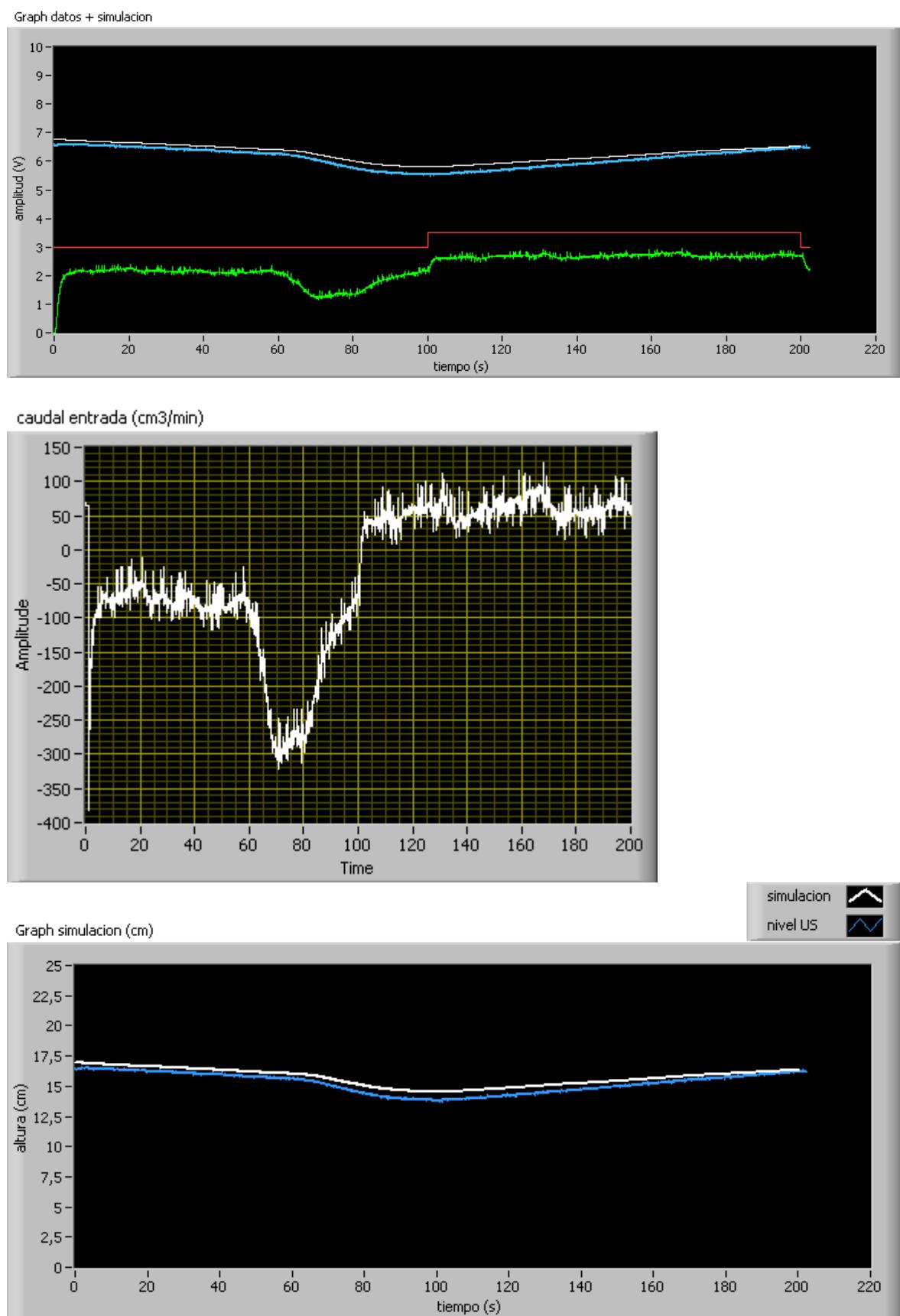
➤  $t = 100\text{s}$

caudal entrada (cm<sup>3</sup>/min)

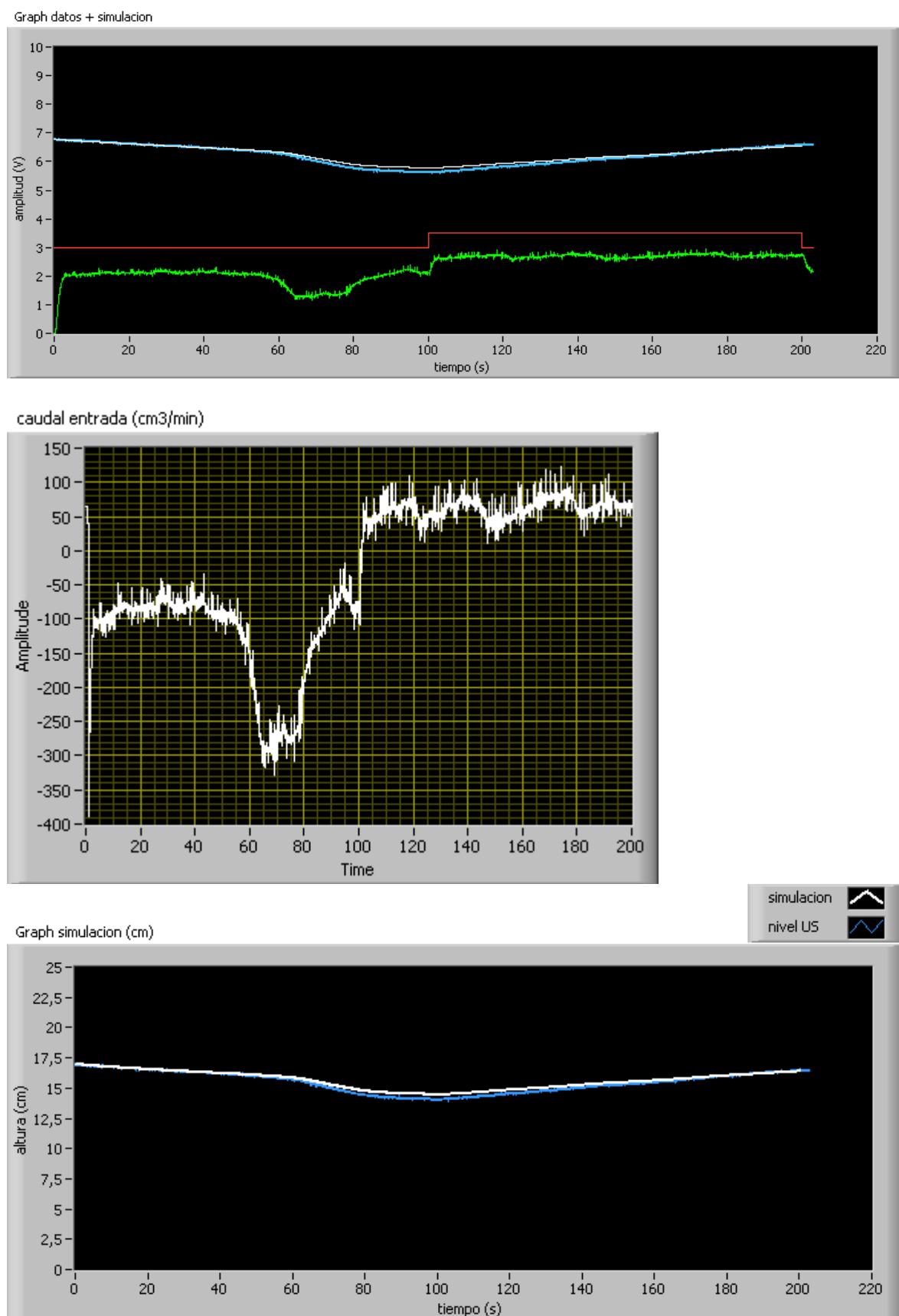
Graph simulacion (cm)



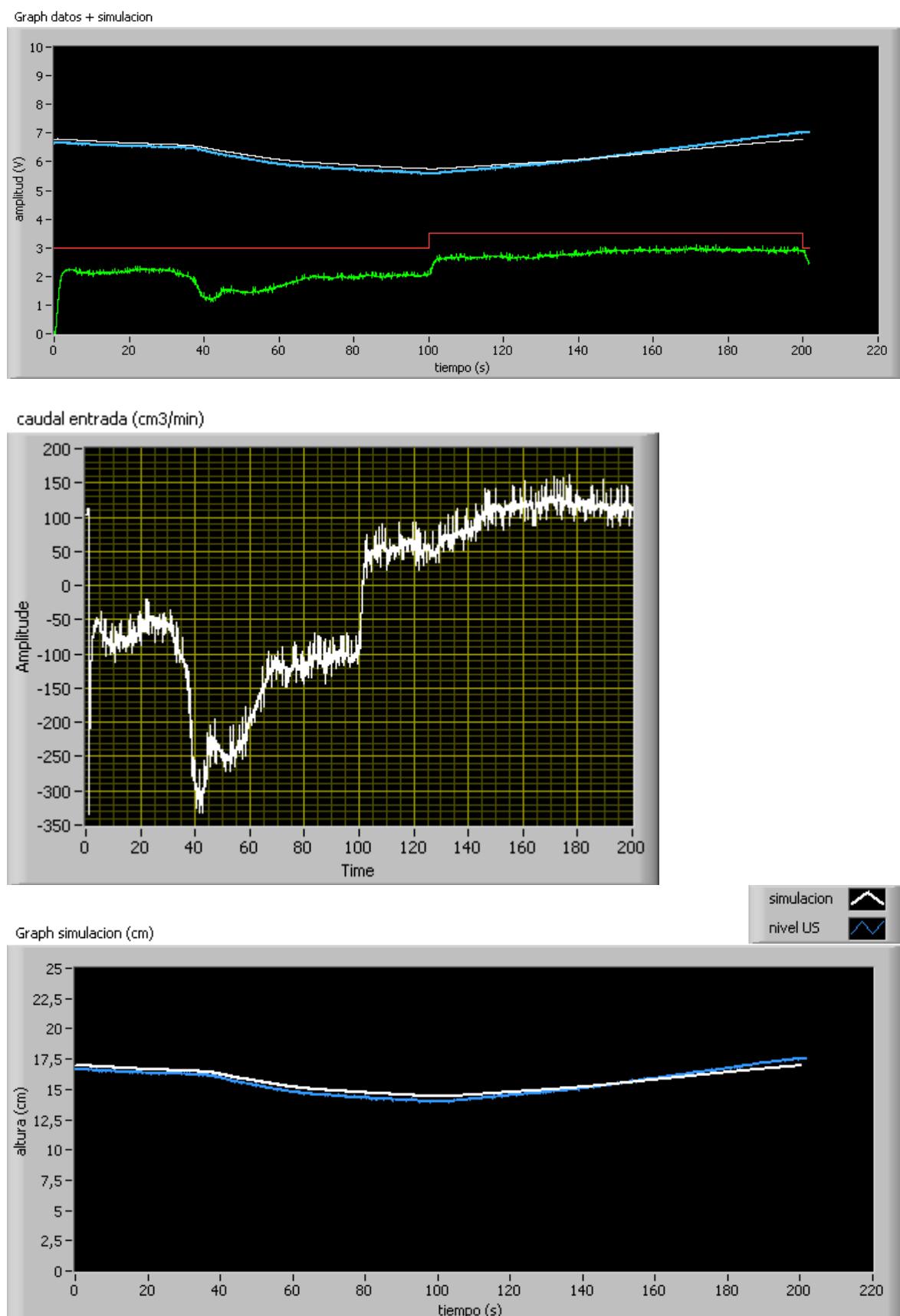
➤  $t = 200\text{s}$



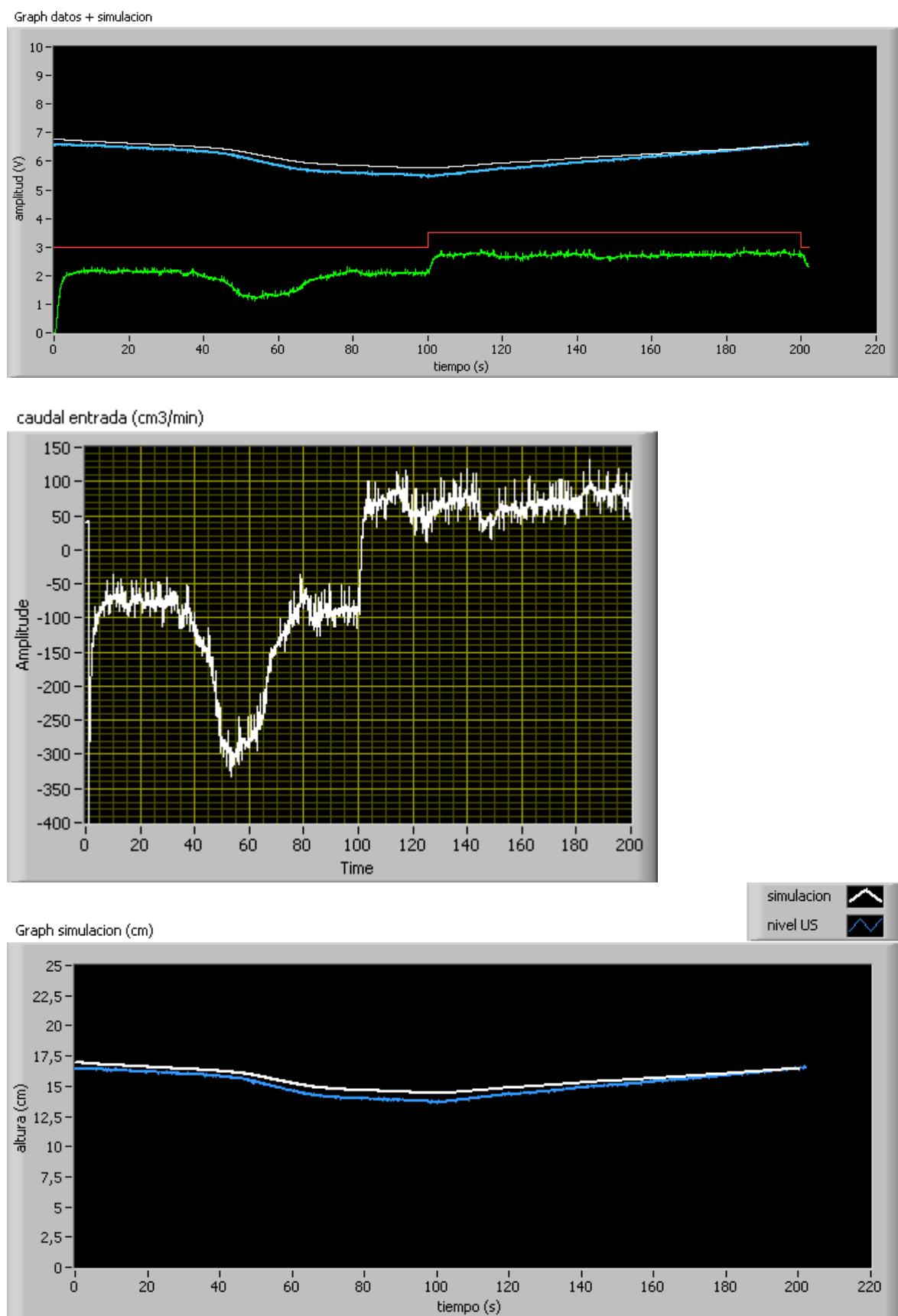
➤  $t = 200\text{s}$



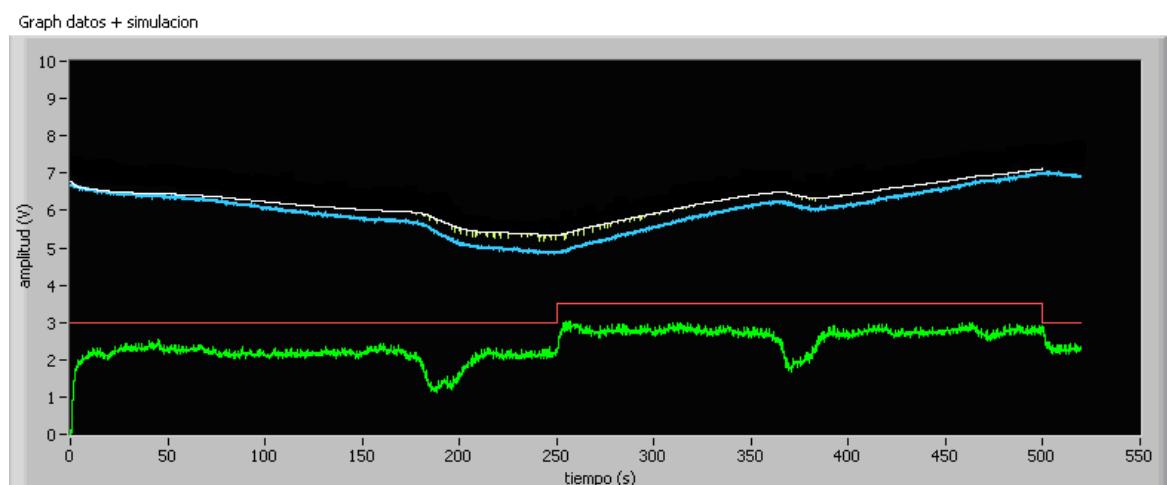
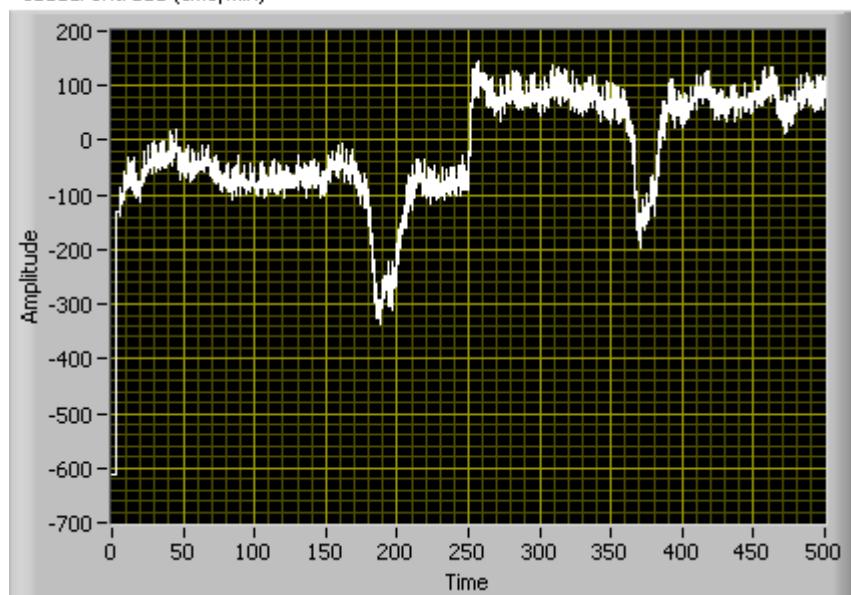
➤  $t = 200\text{s}$



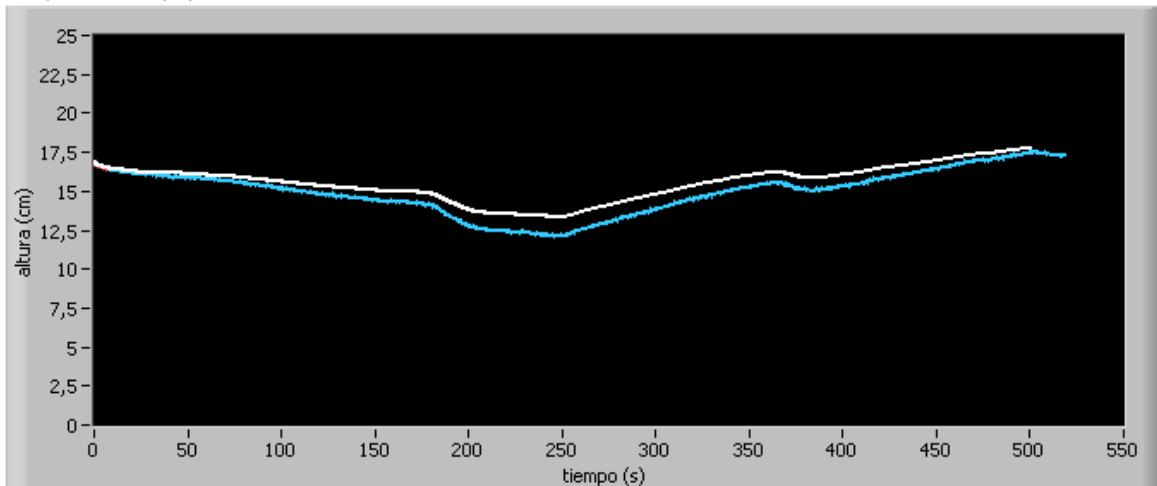
➤  $t = 200\text{s}$



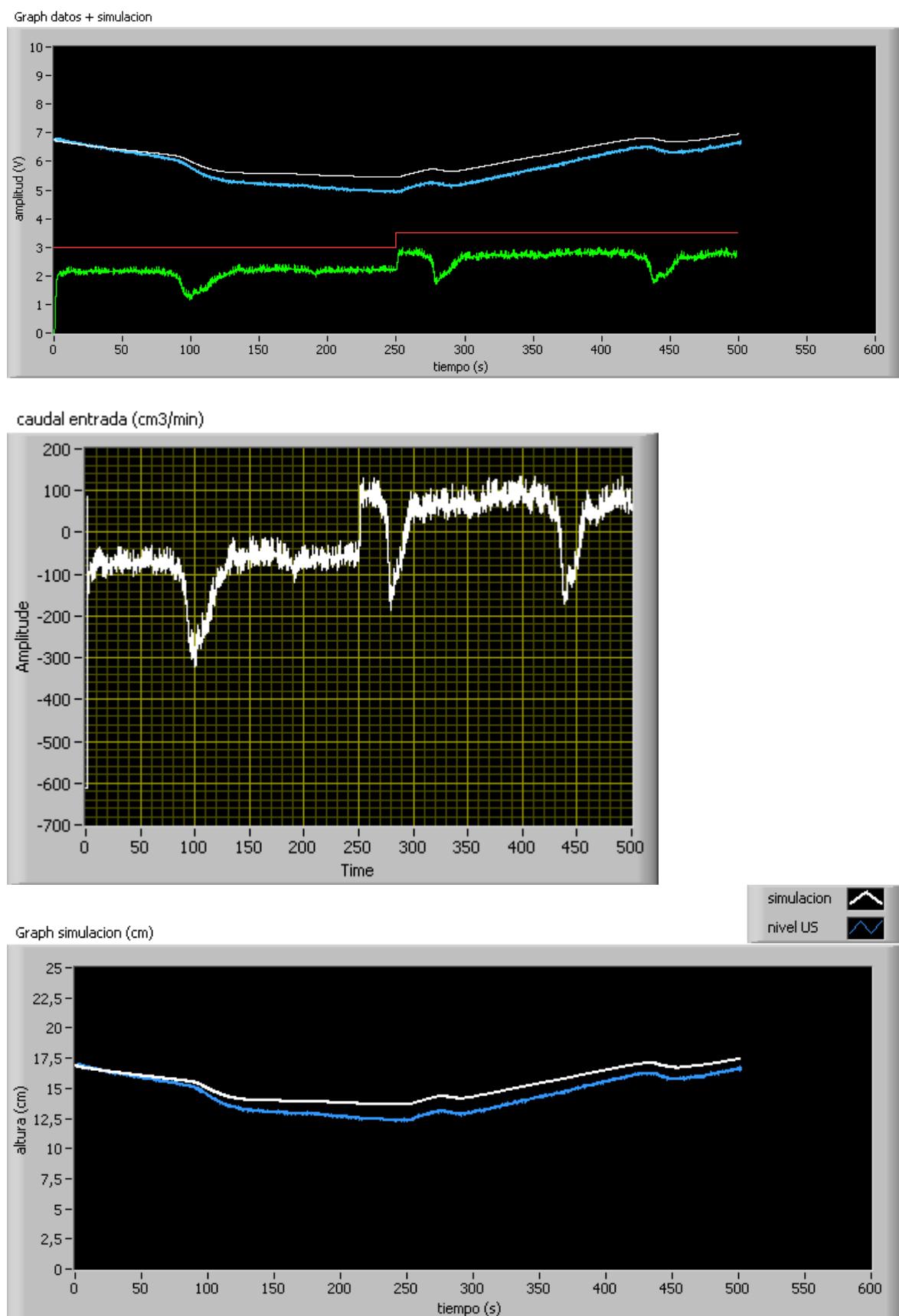
➤  $t = 500\text{s}$

caudal entrada ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

Graph simulacion (cm)



➤  $t = 500s$



Con la nueva señal de entrada la simulación se ajusta a la salida real de nivel del sistema. A pesar de ello la salida real dependerá de la posición exacta de la válvula 1. Aunque durante todo el ensayo esta válvula permanece en la posición 2 al tener que ser girada de forma manual la posición final que toma la válvula sí es aproximadamente la posición 2 pero es variable para cada ensayo inevitablemente. Además esta posición final de la posición de la válvula tiene que producirse en el instante del ensayo  $t = 0s$  y la duración del paso de la posición 0 a la posición 2 debe de ser instantánea, cosa que al efectuarse de forma manual es irrealizable físicamente.

## **Capítulo 4: Control del sistema**

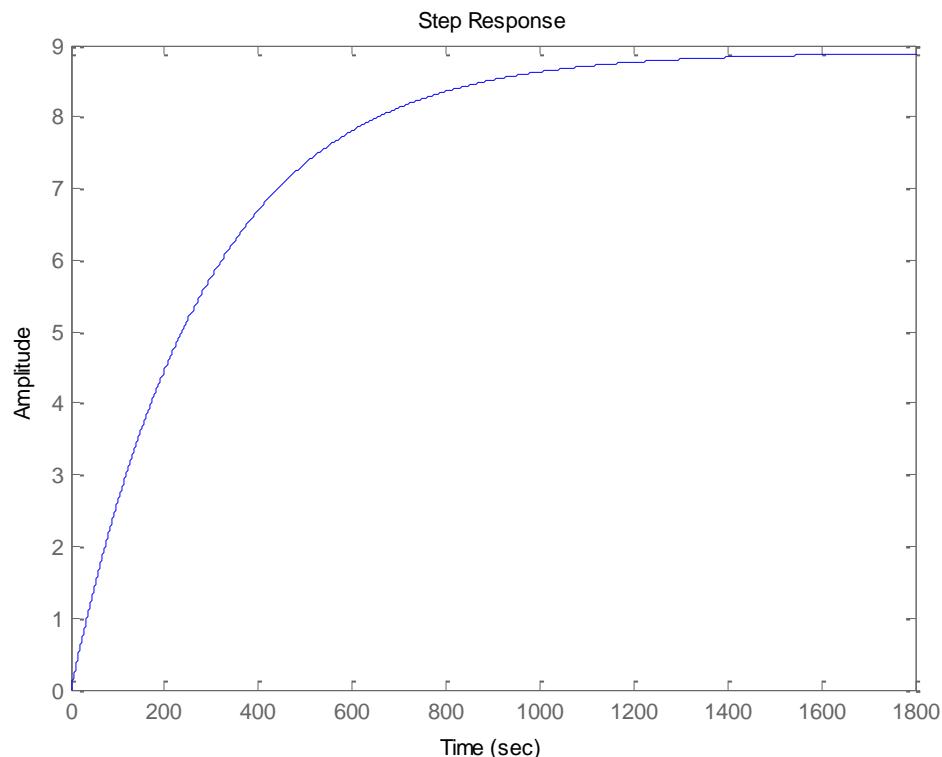
Se procede ahora a analizar en detalle la respuesta del modelo de la planta ante una entrada escalón para poder realizar el algoritmo de control más apropiado. El escalón supone una variación en la tensión de entrada de la planta de 3 a 3,5 V, es decir una variación de caudal correspondiente de  $738,66 \frac{cm^3}{min}$  a  $873,23 \frac{cm^3}{min}$ . Si se expresa esta variación de caudal en  $\frac{cm^3}{s}$  se tiene que  $\Delta Q = u = 2,243 \frac{cm^3}{s}$  para el comando *simulacion.m* entonces con la posición de estudio de la válvula 2:

```
>> simulacion (0.252, 0, 0, 2.243)
```

*Transfer function:*

$0.01384 s$

$s^2 + 0.003488$



**Figura 4.1 - Respuesta ante escalón de  $2,243 \text{ cm}^3/\text{s}$**

Para  $V_b = 3V$  la altura de equilibrio son  $12,6\text{cm}$  y para  $V_b = 3,5V$  la altura es  $21,5\text{cm}$ . Luego el incremento total de la variación de la altura es de  $8,9\text{cm}$ . El 63% de este valor,  $5,61\text{cm}$ , se alcanza aproximadamente en el rango de 250 a 300 segundos. Si se analiza más en detalle,

$$G(s) = \frac{0,01384s}{s^2 + 0,003488s}$$

$$G(s) = \frac{0,01384}{s + 0,003488}$$

$$G(s) = \frac{0,01384}{s + 0,003488} \quad (4.1)$$

Multiplicando por el inverso de 0,003488

$$G(s) = \frac{3,968}{286,725s + 1} \quad (4.2)$$

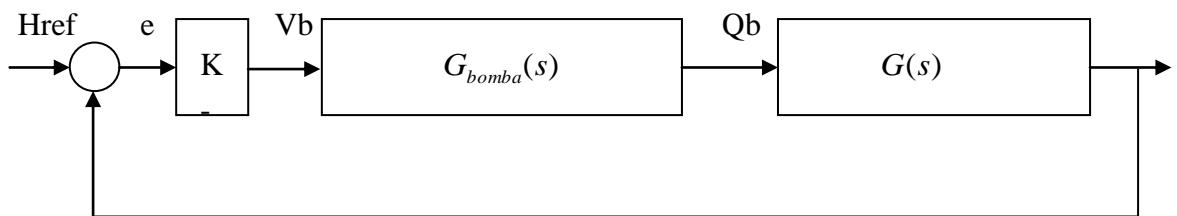
Luego la constante de tiempo  $\tau$  es de 287 segundos. Es un valor bastante elevado debido en gran parte a las caídas de tensión que sufre la bomba, luego se tratará de que la respuesta del sistema sea más rápida, a través de un lazo de control apropiado.

## 4.1 – CONTROL PROPORCIONAL

Características:

- Permite ajustar el error en estado estacionario ajustando el valor de la ganancia K.
- En algunos casos K permite mejorar la estabilidad

Primeramente para que la entrada del sistema sea la tensión de la bomba y la salida el nivel de líquido, habrá que introducir también la función de transferencia de la bomba. Si se representa esto con un esquema de diagrama de bloques,



**Figura 4.2 - Diagrama lazo de control**

### 4.1.1 – Algoritmo de control P teórico

Desconociendo los parámetros que definen el comportamiento teórico de la bomba, se toma su función de transferencia como constante e igual a la relación proporcional que existe en estado estacionario entre caudal y tensión. Si al sistema se añade un controlador proporcional, y por tanto se trabaja en lazo cerrado, la ecuación que ahora describe al sistema pasa a ser,

$$F(s) = \frac{KG_{bomba}(s)G(s)}{1 + KG_{bomba}(s)G(s)}$$

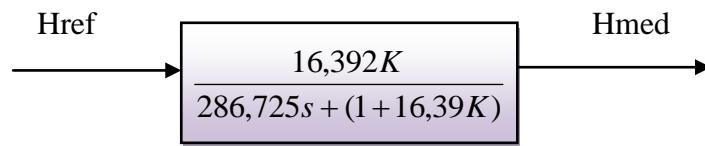
$$F(s) = \frac{\frac{K \cdot 4,1311}{(286,725s + 1)}}{1 + \frac{K \cdot 4,1311}{(286,725s + 1)}}$$

$$F(s) = \frac{\frac{16,392K}{(286,725s + 1)}}{(286,725s + 1) + 16,39K}$$

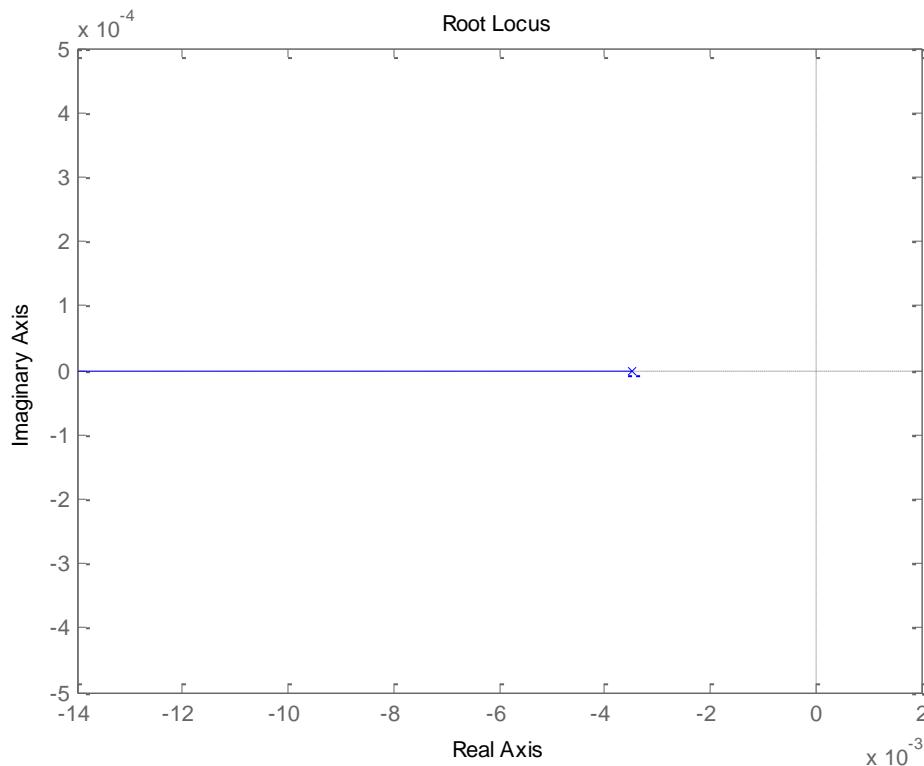
$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1+16,39K)}$$

$$F(s) = \frac{\frac{16,392K}{1+16,39K}}{\frac{286,725}{1+16,39K}s + 1} \quad (4.3)$$

Donde la constante de tiempo  $\tau$  pasa a ser  $\frac{286,725}{1+16,39K}$ , donde K es la constante proporcional del controlador variable siempre positiva, y que por lo tanto hace que la constante de tiempo disminuya cuanto mayor sea su valor. El esquema del sistema en lazo cerrado puede representarse mediante el siguiente diagrama de bloques,

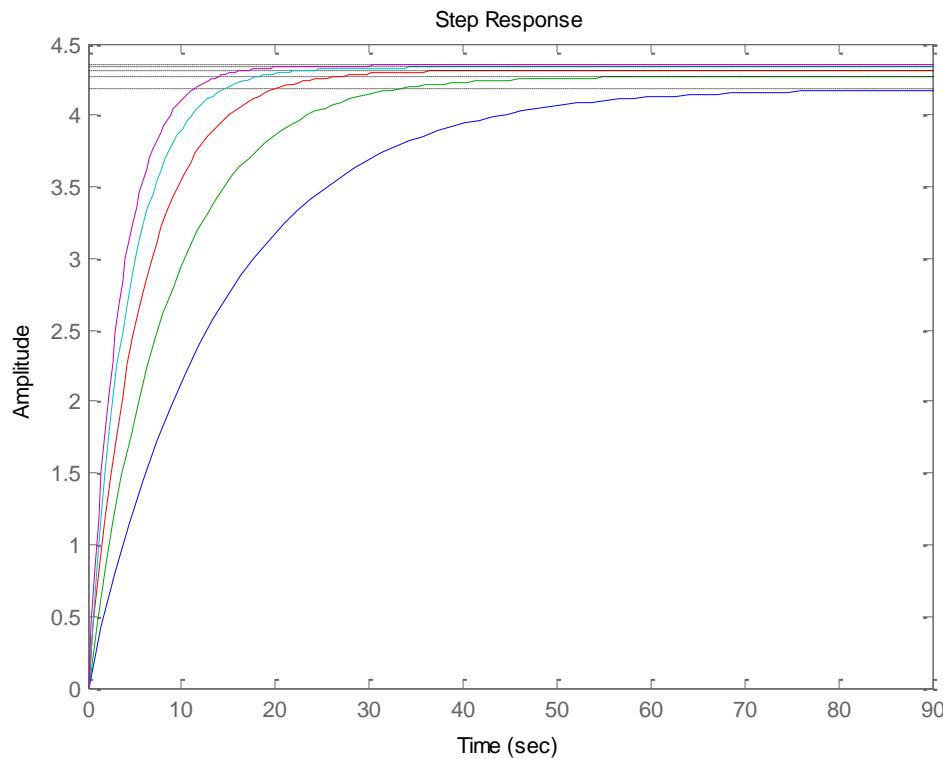


**Figura 4.3 - Diagrama lazo cerrado**



**Figura 4.4 – Lugar de las raíces**

Para  $K = 0$  el polo se encuentra en  $-0,0035$  por lo que al ir aumentando el valor de la ganancia este se irá alejando del eje imaginario y por tanto el sistema será más rápido. Además la respuesta nunca llegará a sobreoscilar ya que el polo nunca va a poseer componente imaginaria.



**Figura 4.5 - Respuesta controlador P**

De este ensayo se observa que conforme va aumentando el valor de la constante proporcional del controlador se va reduciendo el error en estado estacionario llegando a hacerse minúsculo pero nunca igual a cero. Además el sistema es cada vez más rápido siendo las constantes de tiempo  $\tau_1 = 16,5s$ ,  $\tau_2 = 8,5s$ ,  $\tau_3 = 5,7s$ ,  $\tau_4 = 4,3s$  y  $\tau_5 = 3,5s$  para los distintos valores de  $K$ .

En conclusión, el control del sistema mediante un regulador proporcional estudiado de forma teórica es un buen método ya que se consigue un error en estado estacionario reducido y mejora la rapidez del sistema.

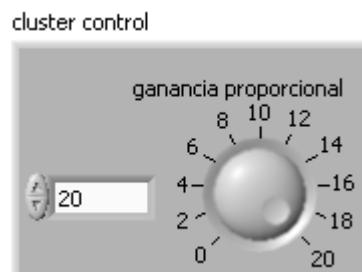
#### 4.1.2 – Ensayo en la maqueta con control proporcional

Una vez conocida la estructura del sistema a controlar, es momento de aplicar esto a la propia maqueta mediante la creación de un Virtual Instrument en LabVIEW encargado de llevar a cabo la maniobra de control proporcional. Para ello se va a hacer uso de los dos

equipos disponibles: el host y el target. Cada uno de ellos tendrá su programa propio pero dependiente el uno del otro.

En primer lugar se va a crear un control en el que se disponga de un *cluster* o grupo en el que introducir la referencia de altura que se desea mantener constante siguiendo el patrón de una señal constante, el mismo valor de la amplitud para todo el ensayo; una señal cuadrada, tomando los valores 0 y la amplitud deseada; o bien el patrón de una señal cuadrada con offset. Por tanto dicho cluster de control constará de los parámetros necesarios para definir esta señal de referencia, es decir del tipo de señal, de la amplitud, del offset y de la frecuencia.

Además se crearán las consecuentes *shared variables* o variables compartidas que permitan que las muestras se creen en un terminal, previsiblemente en el target, y sean recogidas en el *host* donde desde ahí serán manipuladas para poder trabajar con ellas y sacar conclusiones a posteriori.



**Figura 4.6a - Ganancia**

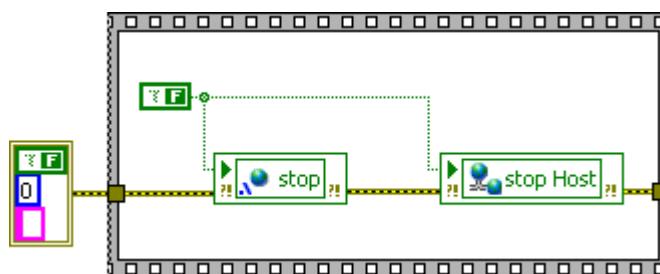
A continuación y del mismo modo se crea otro control en el que se represente la ganancia proporcional K variable, y asociado a este control las pertinentes *shared variables* o variables compartidas,



**Figura 4.6b - Variable compartida de la ganancia**

Dichas variables operan de modo idéntico a las variables referentes al cluster de referencia de altura.

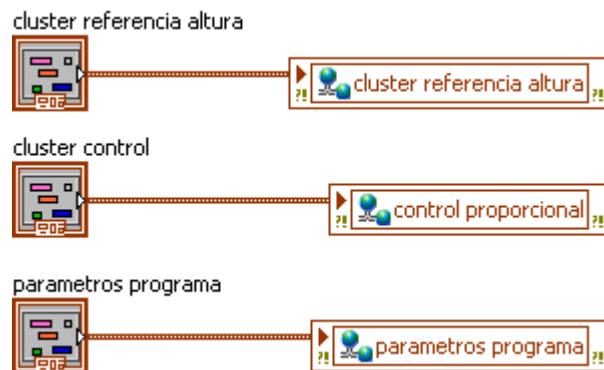
Una vez creados estos controles, se procede a la composición del diagrama de bloques. El primer comando que ha de aparecer en el mismo será la inicialización de las variables con las que se va a trabajar para que tanto las constantes como las variables booleanas de parada partan en cada ejecución de las mismas condiciones,



**Figura 4.7 - Inicialización de variables**

Una vez que las variables están inicializadas se inserta un bucle *while* en el que se llevarán a cabo dos acciones diferenciadas. Una de ellas es la asignación de los *clusters* de

referencia de altura, de control y de los parámetros del programa a sus respectivas variables compartidas,



**Figura 4.8 - Variables a usar en el target**

La otra actividad que va a ser llevada a cabo en el bucle, además de la asignación del valor *false* a las variables compartidas de parada al pulsar el botón de Stop, va a ser la representación gráfica de los datos de la referencia, el caudal, el nivel de líquido y la acción de control en función del tiempo en un *chart*, de modo que puedan observarse los datos mientras se está ejecutando el programa.

Para poder trabajar con el tiempo en segundos, nótese que los datos recogidos han de ser divididos por 1000, ya que estos estaban expresados en milisegundos. Además se ubican sendos indicadores para los datos de caudal y nivel, de forma que puedan apreciarse de una forma más física y de forma aislada del resto de datos.

Tras el bucle *while* es necesaria una secuenciación en la que en primer lugar se tomen los datos del *array* de datos finales, generado en la tarea de alta prioridad, a partir de los datos de cada columna, y se muestren en un *graph* en función del tiempo, que a su vez es uno de los datos de dicho *array*.

La ultima de las secuencias se va a encargar de que la variable booleana de parada, como es la variable compartida asociadas al botón de Stop, tome el valor final de *false* (véase anexo 12).

Pasando ya al programa del target, mencionar que al igual que en VIs anteriores dentro de este van a tener cabida tres tareas importantes. Una de ellas será la configuración de tareas, similar a las configuraciones anteriores con el subVI creado para dicho fin, bajo la representación del icono



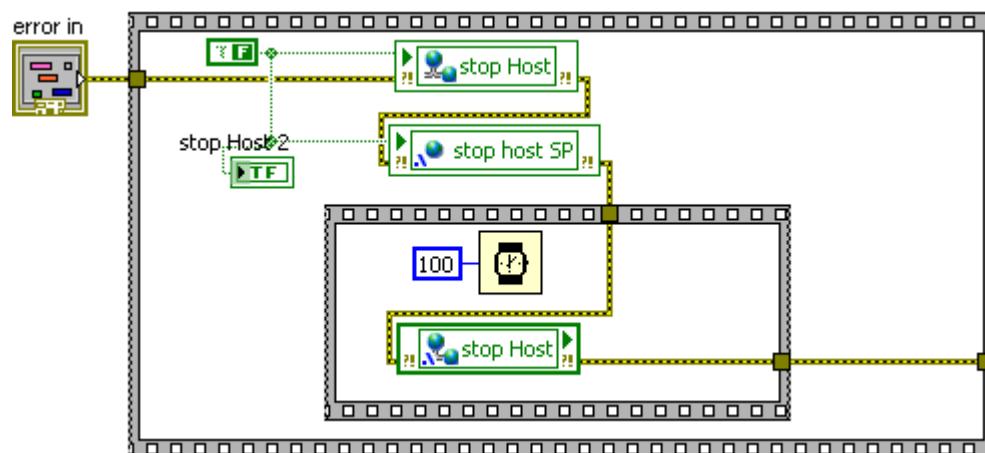
Otra de las tareas que se efectúan en el target es la de prioridad normal, representada por



Este tipo de configuración es ajustable desde el menú de propiedades del propio subVI, asignando el parámetro de *normal priority*. Esto va a permitir que la tarea de alta prioridad transcurra sin alteraciones ni intromisiones de la tarea de prioridad normal. En

esta tarea se van a producir las transmisiones de datos entre el host y el target y al mismo tiempo entre la tarea de prioridad normal del target y la de alta prioridad, además de la inicialización de las paradas con la variable referida al botón de Stop. Las variables que van a participar en esta transferencia de datos son los parámetros del programa en el que vienen definidos en tamaño del fichero de datos y la frecuencia de muestreo; el valor de la ganancia proporcional a través de la variable de control; el cluster de referencia de altura con los valores del tipo de señal, amplitud, offset y frecuencia de la señal de referencia; así como los datos de los tanques de tiempo, referencia, caudal, altura del líquido en el interior del tanque y la acción de control.

Además de este bucle en la tarea de prioridad normal van a existir dos secuenciaciones. La primera en cuanto a orden de ejecución es la inicialización de las variables compartidas respecto de las paradas, ordenadas por el usuario desde el panel frontal del programa del host,



**Figura 4.9 - Inicialización de paradas**

Y finalmente la última tarea, tras la parada del bucle *while* consiste en la transmisión de la totalidad de los datos provenientes de la tarea de alta prioridad relativos al tiempo, caudal, referencia, nivel y la acción de control,



**Figura 4.10 - Matriz de datos finales**

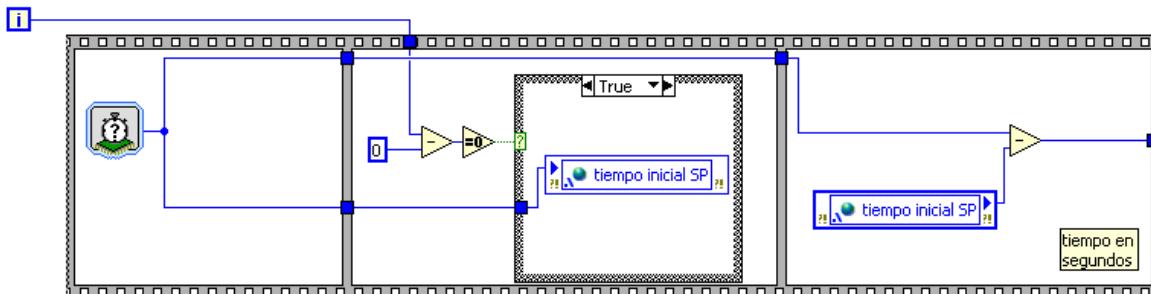
Como puede apreciarse se ha colocado un indicador de los datos que se transfieren de la tarea de alta prioridad para comprobar que ambas matrices tienen las mismas dimensiones.

Para concluir con el subVI de prioridad normal se enlazan las tareas con las líneas de error pertinentemente (*véase anexo 13a*).

Para concluir con las tareas que se desarrollan en el target, hay disponerse a comentar la tarea de alta prioridad, representada por



La alta prioridad de este subVI es ajustada desde el comando de propiedades del subVI, mediante la opción *time critical priority (highest)*. Esto permite que la tarea que se está llevando a cabo durante la ejecución dentro de este subVI, prime sobre todas las demás que tienen también órdenes de estar ejecutándose. Cuando este subVI no tenga ninguna acción a llevar a cabo, entonces las demás podrán llevar a cabo sus respectivas acciones. En subVI de alta prioridad se va a llevar a cabo la auténtica toma de datos ajustado a un eje de tiempos correspondiente exactamente con el demandado por el usuario, debido a su estricta prioridad sobre cualquier otro comando. Así pues dentro del bucle *while* se va a crear esta temporización en la que pueden eliminarse las primeras muestras que puedan producir distorsión en los tiempos, o simplemente anulando esto tomar todas las muestras de tiempo para que no haya desfases entre la muestra tomada en un instante de tiempo y el propio tiempo,



**Figura 4.11 - Temporización**

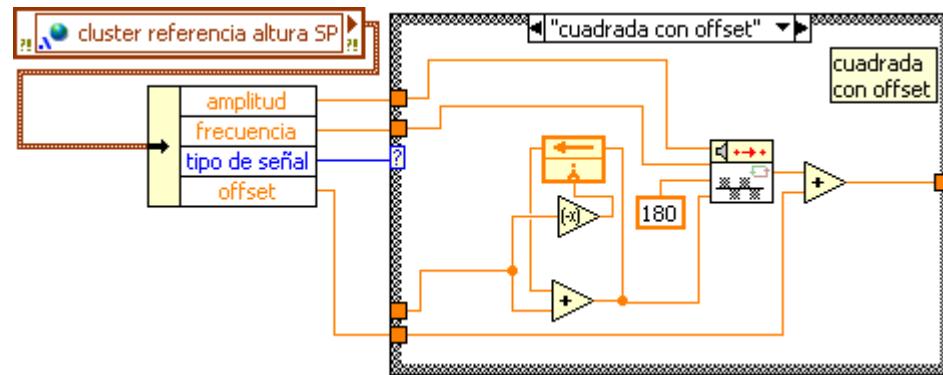
Además en el subVI de alta prioridad se va a crear la señal de referencia de la altura deseada en función del tipo de señal escogida en el cluster de referencia de altura del host, es por ello que se hace uso de la estructura *case*, puesto que para cada tipo de señal (constante, cuadrada o cuadrada con offset) ha de crearse un tipo de onda en concreto. Así para la señal de tipo constante, esta se corresponde sencillamente con el valor de la amplitud introducida.

Para el caso en el que la señal de referencia sea de tipo cuadrada, hay que crear este tipo de onda con el comando *signal generation>Square wave*,

Para definir esta onda cuadrada es necesario introducir el valor de la onda en su valor máximo y la frecuencia de la onda, ambos parámetros estipulados en el cluster de referencia de altura, así como el conteo del tiempo introduciéndolo a partir del dato de la frecuencia de muestreo. A la salida de la función *square wave* se obtiene una onda cuadrada de valor medio cero y valores máximo y mínimo de +amplitud y -amplitud respectivamente. Como no tiene sentido hablar de referencia de alturas negativas se hace una modificación en la onda de forma que cuando a la salida de la función de generación de la onda cuadrada se tenga un valor negativo, este se transforme en 0, y cuando sea

positivo a la salida se tenga dicho valor. Con ello se ha creado una onda cuadrada de valor mínimo nulo y valor máximo equivalente a la amplitud de referencia.

Finalmente para el tipo de señal cuadrada con offset la forma de proceder es idéntica a la creación de la onda cuadrada, solo que a la onda resultante resta añadirle el valor del offset,



**Figura 4.12 - Generación de la onda cuadrada con offset**

Para el caso de que la señal de entrada sea una onda cuadrada con un cierto offset, se quiere que la onda comience con su valor mínimo, es decir que parte del valor,

$$V_{ref} = offset - \frac{1}{2} amplitud , \text{ es por ello que se añade un desfase de } 180^\circ.$$

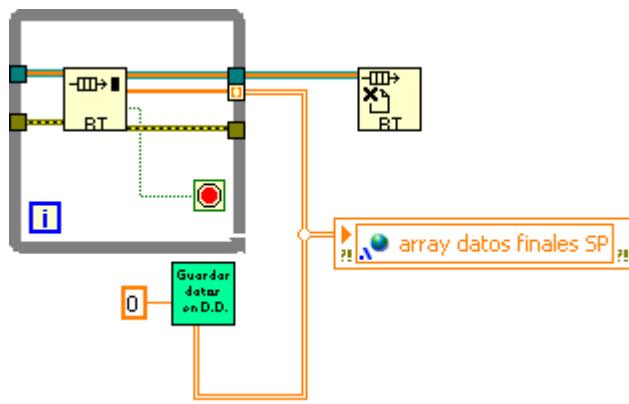
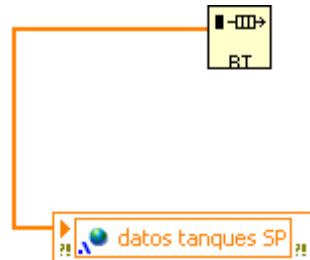
Ahora bien, una vez creados los distintos tipos de señales de entrada se procede al propio esquema de control proporcional. Para ello basta con hallar la diferencia entre la altura requerida al sistema y la altura real del líquido en el tanque. Cuando este diferencia sea negativa, es decir cuando la referencia sea mayor que el nivel que indica el sensor de ultrasonidos, en el caso en el que la bomba operara en el rango de  $-10 \leq V_b \leq +10$  o de forma general de  $-x \leq V_b \leq +x$  bastaría con aplicar una tensión negativa de forma que en lugar de aportar líquido al sistema este fuera absorbido por la propia bomba. Sin embargo el rango de operación real de la bomba es  $0 \leq V_b \leq +10$  por lo que esta únicamente puede aportar volumen de líquido. Es por eso que cuando la diferencia entre la altura de referencia y la altura real sea negativa la tensión de entrada a la bomba será la mínima, es decir de 0 Voltios. De este modo el volumen de agua irá disminuyendo paulatinamente al ir evacuándose libremente por la válvula de salida. Si la diferencia entre el nivel de líquido deseado y el nivel real del tanque es positiva (nivel de referencia > nivel real) la entrada a la bomba será esta diferencia multiplicada por el valor de la ganancia proporcional. Para que este valor en caso de ser muy grande no sobrecargue la bomba se implanta una limitación para el rango de 0 a 10 Voltios de forma que si el valor que se pretende introducir a la bomba es menor que 0, la entrada efectiva a la misma será de 0 V y del mismo modo para el caso en el que la tensión resultante de entrada a la bomba sea mayor que 10 V, el valor que realmente se introducirá a la bomba será de 10 V.

Para concluir y tras aplicar estas premisas, se genera la tarea para almacenar los datos en una matriz con la que se podrá trabajar en el host, y por tanto que sea una variable compartida tanto de tipo *single process* como de tipo *network*, y además un fichero de texto con estos datos. Los pasos a realizar para ello son los que ahora se muestran:



Generación de la tarea de encolar los sucesivos datos.

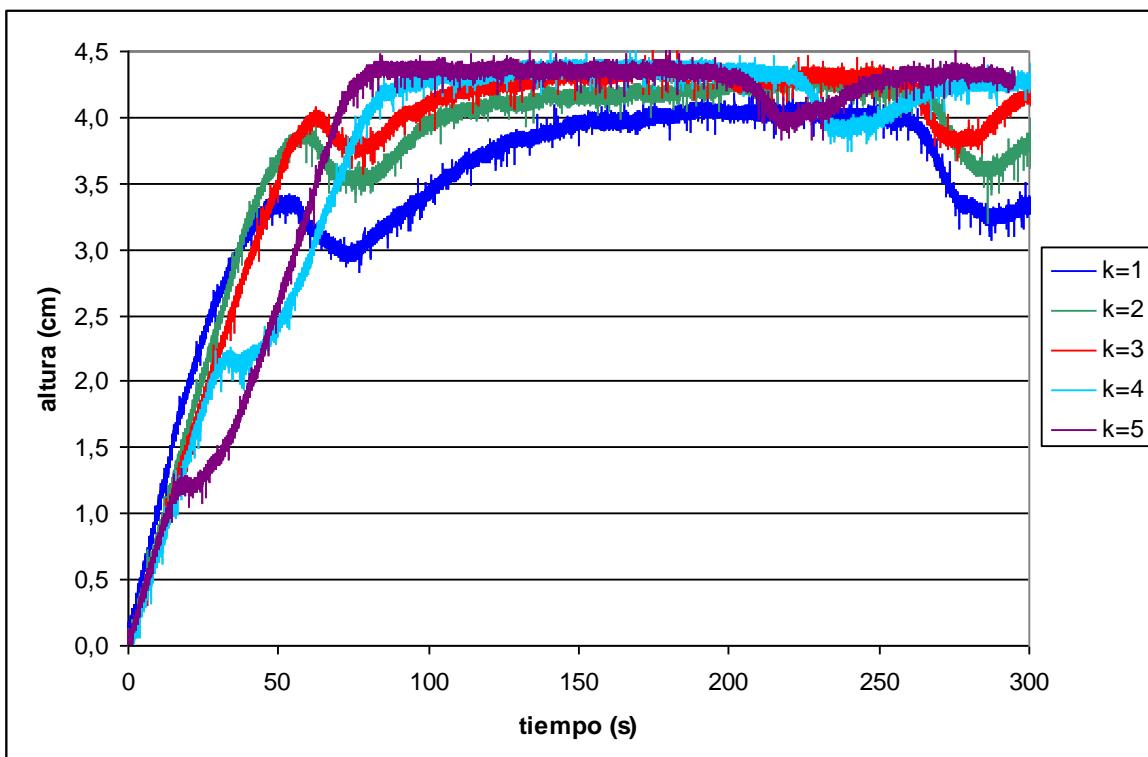
Apilamiento de datos consecutivos.



Almacenamiento sucesivo de cada dato de forma que cuando el paquete de datos estimado por el usuario este completo, el primer dato que haya entrado será también el primero en salir (*first input, first output*). De este modo se almacenan siempre las últimas muestras. Además estos datos en forma de matriz de  $m$  filas (con  $m$  igual al tamaño de la FIFO) y  $n$  columnas (con  $n$  igual al número de variables a almacenar, en este caso  $n = 5$ ).

De este modo quedan definidos por completo el subVI de prioridad normal y consecuentemente el VI del target (véase anexos 10 y 14a).

Una vez creado el programa de control tanto en el host como en el target, es momento de hacer los ensayos pertinentes y tomar los resultados con el fin de sacar conclusiones acerca del funcionamiento real sobre la maqueta del control proporcional. Los ensayos que van a efectuarse estarán basados en distintos valores de K similares a los estudiados teóricamente para poder hacer luego una comparativa entre ambos y poder sacar las debidas conclusiones. De este modo si partiendo de un nivel de equilibrio de 12,6cm ( $V_b = 3V$ ) se somete al sistema a un escalón de 4,4cm ( $V_b = 3,25V$ ), su respuesta hasta que se alcanza de nuevo el estado estacionario es la siguiente:



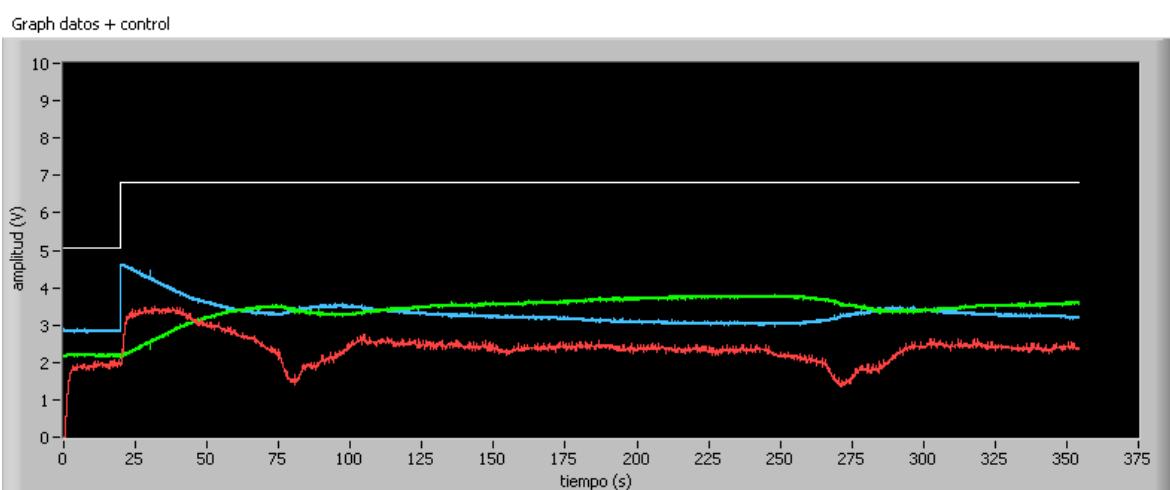
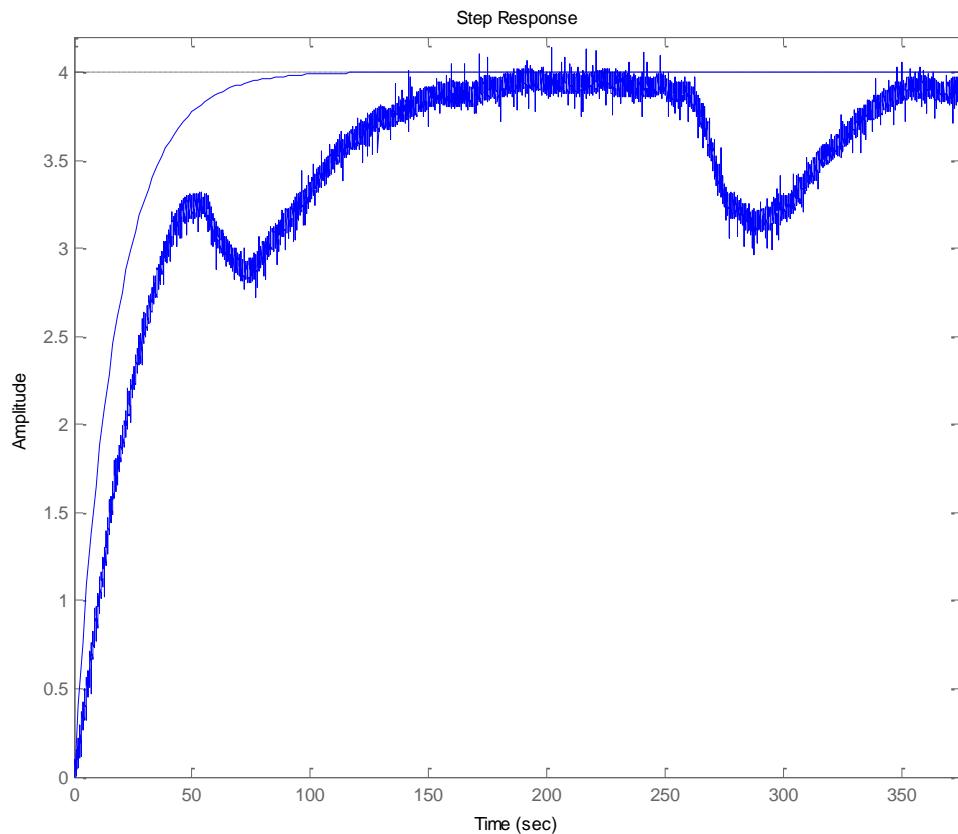
**Figura 4.13 - Respuesta a entrada escalón**

Del ensayo real de la maqueta se observa que para los valores de K en el que la señal de acción de control se encuentra entre los límites de operación de la bomba (0 y 10V) el valor final se va aproximando paulatinamente al valor de la entrada de la referencia. Por otra parte en cuanto a la rapidez no se consigue que el sistema sea lo suficientemente rápido ya que la constante temporal  $\tau$  está entorno a los 40 segundos para todo K.

Una vez conocido el comportamiento real del sistema y analizado su comportamiento teórico se tratará de hacer una comparativa que muestre las diferencias entre ambos, debidas en parte a la asunción de la función de transferencia de la bomba como constante.

**K=1**

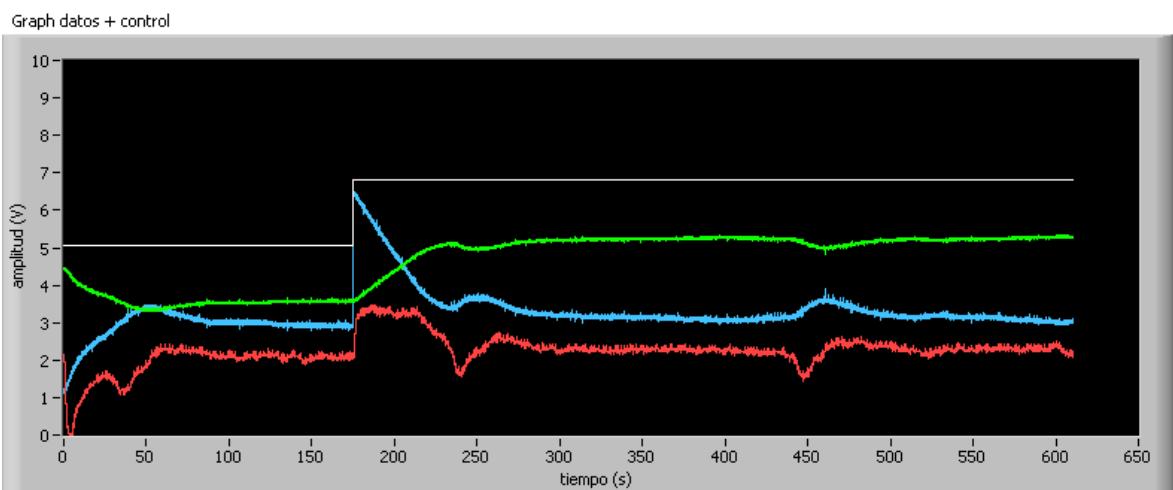
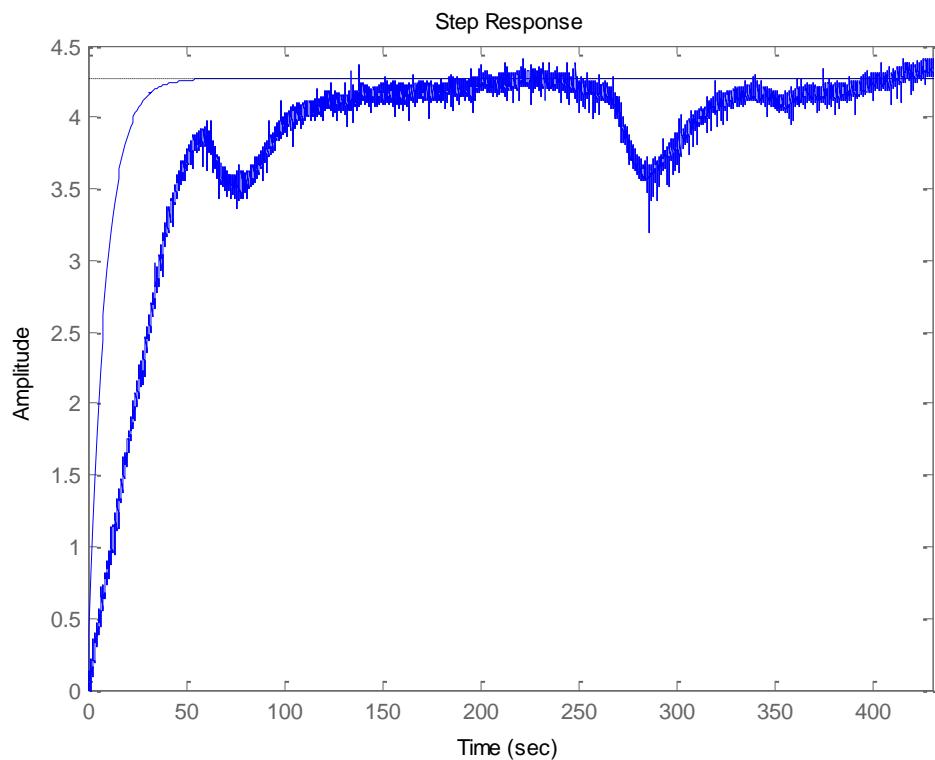
$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1+16,392K)} = \frac{16,392}{286,725s + 17,392} \quad (4.4)$$



El valor de pico de la acción es de unos 4,5V, lo que hace que no se tenga un valor de entrada a la bomba demasiado elevado. Además el valor final alcanzado es cerca de 0,5V inferior al valor de referencia. El sistema sigue siendo muy lento ya que el valor final se alcanza alrededor del minuto de tiempo desde la entrada del escalón.

**K=2**

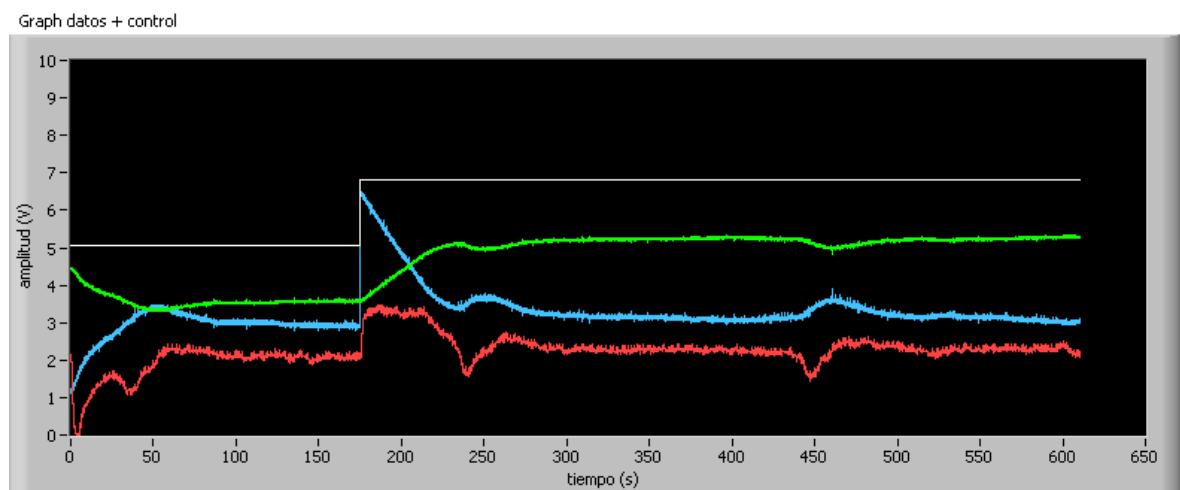
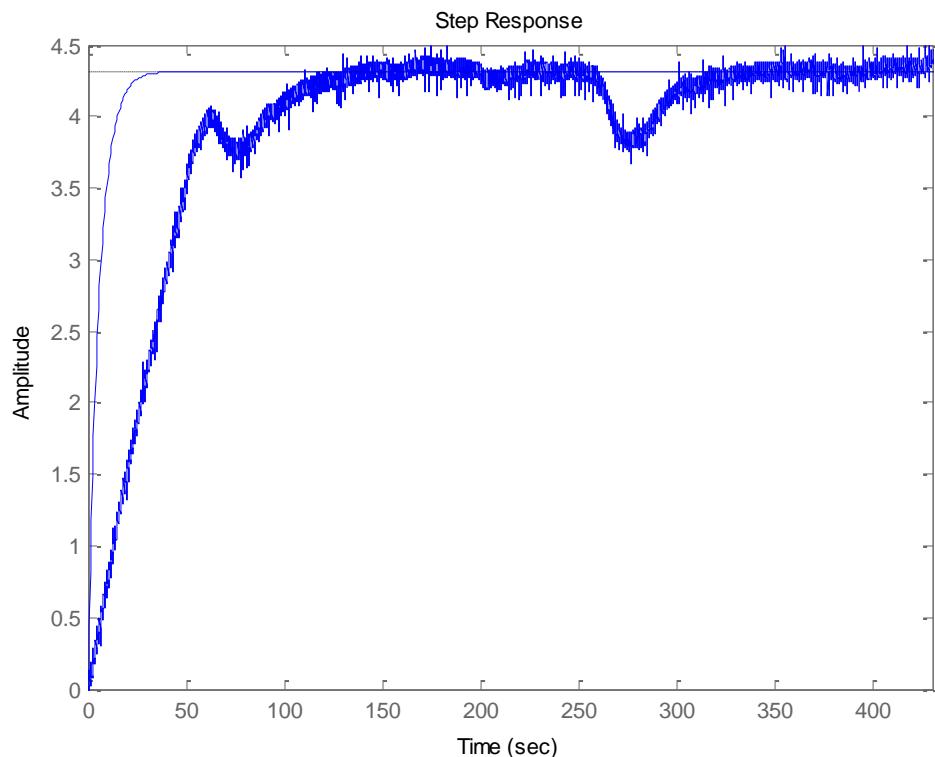
$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1+16,392K)} = \frac{32,784}{286,725s + 33,784} \quad (4.5)$$



El valor máximo de entrada a la bomba con este controlador es de unos 6,5V lo que hace que el valor final, en este caso más próximo al valor de referencia que en el caso anterior, se alcance con mayor rapidez. No obstante esta respuesta es bastante mejorable.

**K=3**

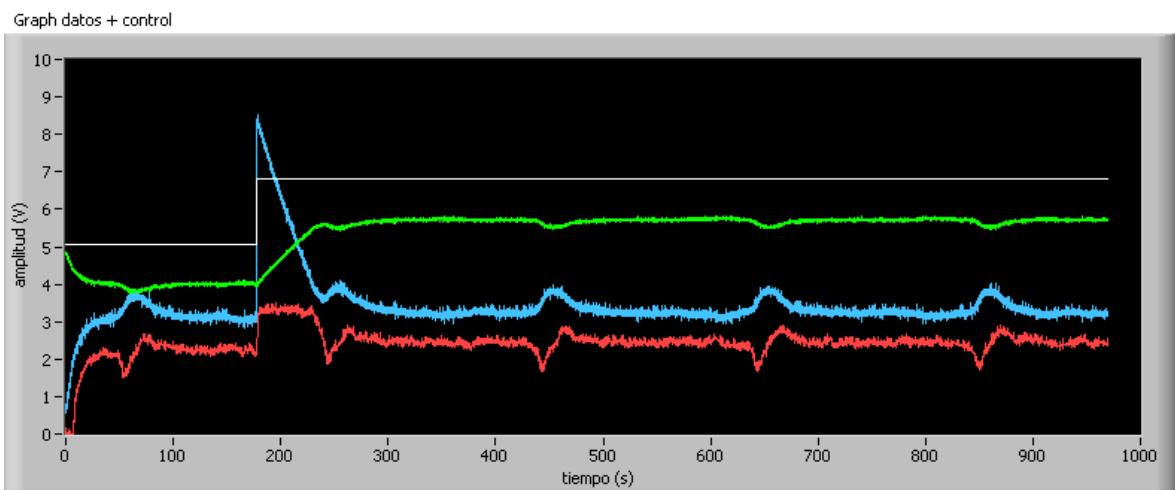
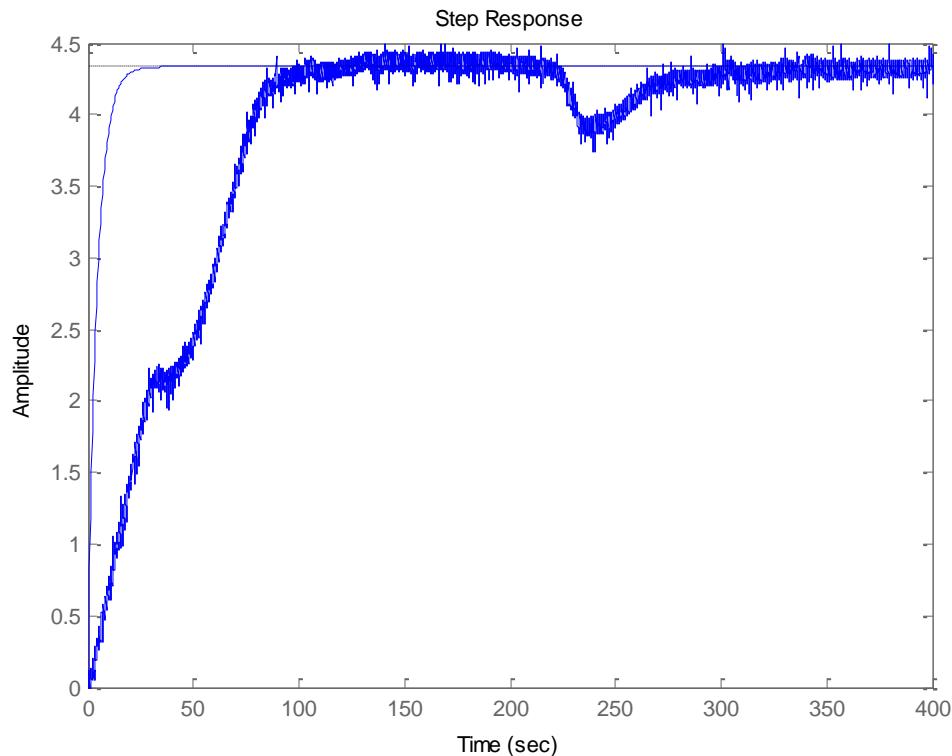
$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1+16,392K)} = \frac{49,176}{286,725s + 50,176} \quad (4.6)$$



Ahora el pico de entrada a la bomba es cercano a los 7V en el instante inicial. El valor final de la salida del nivel de líquido se aproxima progresivamente al valor de referencia conforme se aumenta el valor de la ganancia.

**K=4**

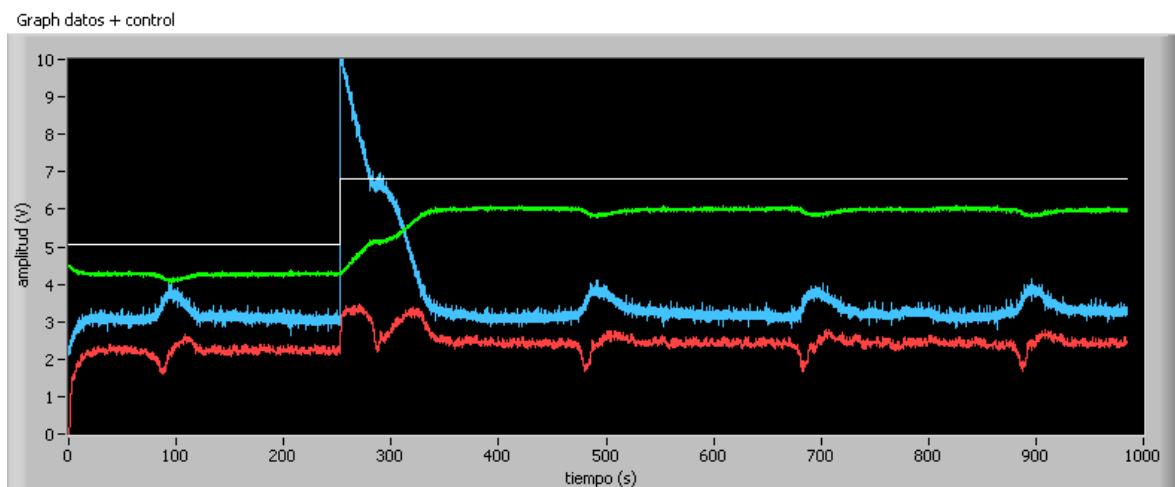
$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1+16,392K)} = \frac{65,568}{286,725s + 66,568} \quad (4.7)$$



Para K=4 el valor de la señal  $u$  alcanza ya los 8,5V, cercano al valor límite de la bomba y por tanto próximo a su límite de operación.

**K=5**

$$F(s) = \frac{16,392K}{286,725s + (1 + 16,392K)} = \frac{81,96}{286,725s + 82,96} \quad (4.8)$$



La señal de la acción de control toma su valor máximo permitido por la bomba por lo que se ha llegado al umbral de trabajo. La respuesta para este caso es bastante más rápida y el valor final del nivel de líquido es prácticamente el valor referenciado y por tanto perfectamente admisible para este sistema al no tener que cumplir ningún requisito en cuanto a la desviación del valor real del valor exigido en la referencia. No obstante el sistema sigue siendo muy lento por lo que es necesario hallar el modo de controlar el nivel del líquido del tanque siguiendo otro procedimiento.

Para valores de K mayores a 5 la acción de control tomará tensiones superiores a los 10V límite de la bomba, sin embargo con el empleo de un limitador cuando la señal  $u$  sea mayor que 10 la entrada a la bomba será de 10V consiguiendo así sistemas mucho más rápidos pero con parámetros de tiempos perturbados por esta limitación..

Del estudio teórico del control proporcional sobre la maqueta se concluye diciendo que el regulador cuya constante K es 5 aporta un valor final bueno aunque la respuesta será lenta siempre y cuando no se haga uso del limitador de tensión a la entrada de la bomba.

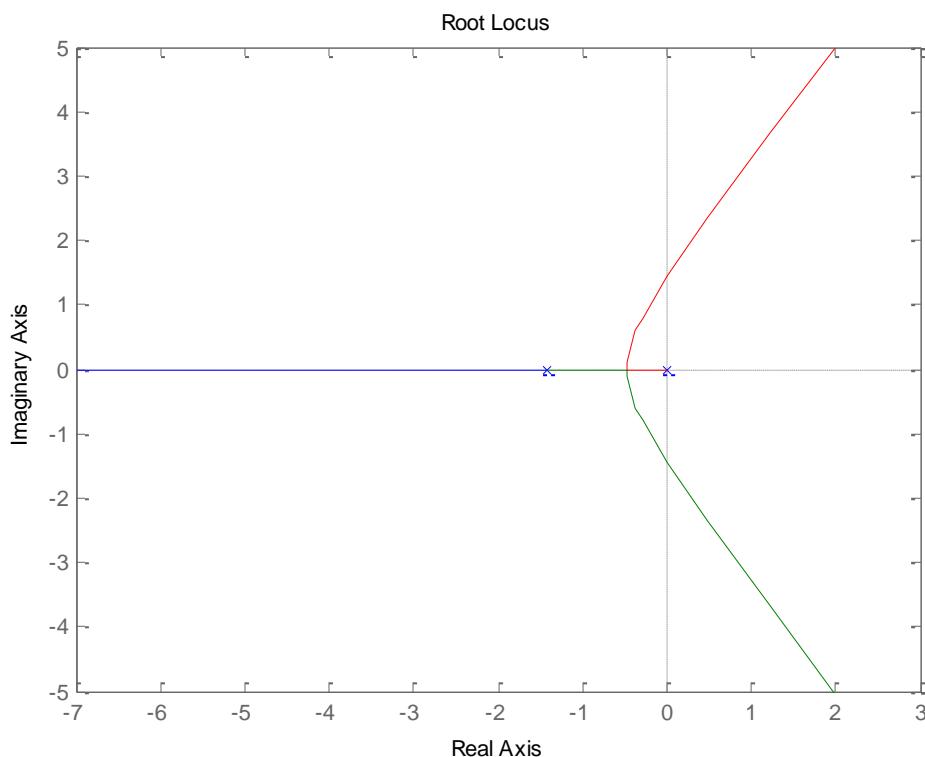
#### **4.1.3 – Influencia del funcionamiento real de la bomba**

El control proporcional teórico se ha llevado a cabo gracias a la simplificación del modelo de la bomba de diafragma tomando a este como constante alrededor de un punto de trabajo. No obstante si se tiene en cuenta el comportamiento dinámico de la bomba se ha visto en el capítulo 1 que su función de transferencia tiene como mínimo dos polos. Así el comportamiento real que tendrá el sistema formado por la bomba y el sistema puramente hidráulico será de la forma, gracias a las funciones de transferencia obtenidas:

```

>> gb=tf([4.13],[0.49 1.4 1])
Transfer function:
4.13
-----
0.49 s^2 + 1.4 s + 1
>> gs=tf([3.968],[286.725 1])
Transfer function:
3.968
-----
286.7 s + 1
>> rlocus(gs*gb)

```



**Figura 4.14 - Lugar de las raíces**

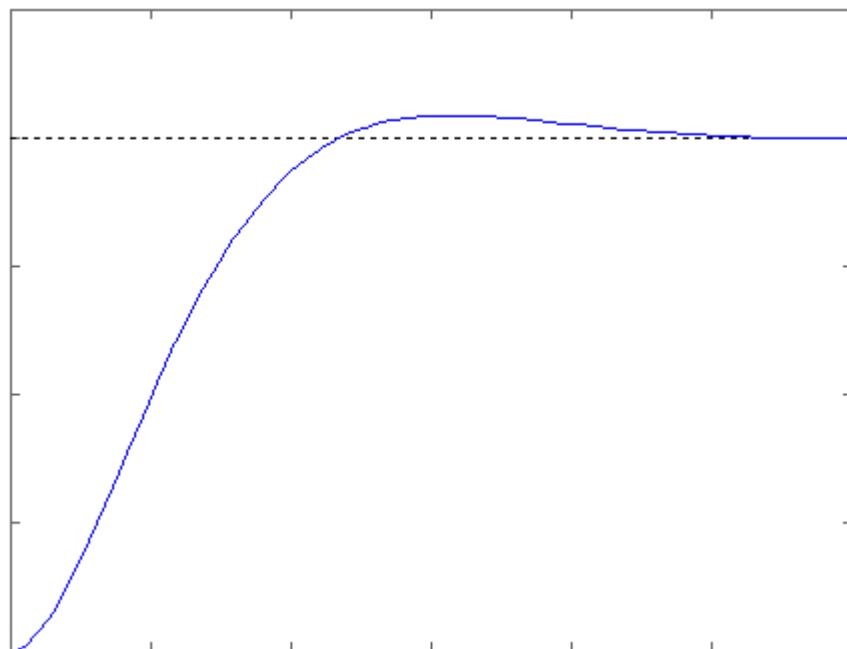
```

>> rlocfind(gs*gb)
Select a point in the graphics window
selected_point =
-0.4716 - 0.0155i
ans =
3.6782

```

Es decir para valores de K menores que 3,6782 los polos se desplazan sobre el eje de abscisas, luego solo tienen componente real sin embargo a partir del momento en el que se alcanza el punto de ruptura en  $K = 3,6782$  para valores superiores los polos tienen tanto

parte real como parte imaginaria. Esto quiere decir que al hacer una observación del comportamiento del sistema va a haber un pequeño sobrepasamiento del tipo:

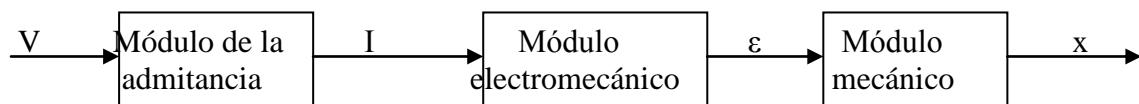


**Figura 4.15 – Sobrepasamiento característico**

Al llevar a cabo este ensayo para valores inferiores al valor de ruptura calculado el comportamiento es el esperado, sin embargo al tomar valores de  $K$  superiores al valor de ruptura se observa en el funcionamiento del sistema que nunca llega a darse ese sobrepasamiento típico de la función de transferencia utilizada. Este comportamiento demuestra que por mucho que aumente el valor de  $K$ , los polos se estarán desplazando siempre a lo largo del eje real.

La función de transferencia del sistema es la conjunción de la función de la bomba y el sistema hidráulico. La función de transferencia que habíamos obtenido tras una serie de ensayos poseía un par de polos dobles pero se desconocía la presencia o ausencia de ceros. Ahora pues tras este ensayo se puede deducir que la función de transferencia de la bomba tiene además de un par de polos un cero lo que hace que, en la representación del lugar de las raíces por mucho que aumente  $K$  los polos se encuentren siempre en la recta real tendiendo a aproximarse al cero. Además este cero debería de encontrarse adyacente al polo del sistema hidráulico ( $Re = -0,0035$ ).

Para saber la estructura general de la función de transferencia de la bomba de diafragma es necesario desglosar dicho funcionamiento [5].



Donde el módulo de la admitancia relaciona los parámetros eléctricos de corriente y tensión, el módulo electromecánico relaciona el esfuerzo mecánico con la corriente eléctrica de la bomba y el módulo mecánico relaciona el parámetro mecánico deseado, en este caso el caudal de entrada al sistema con ese esfuerzo mecánico de la bomba. Así se tiene que:

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{s[\frac{\sqrt{D}}{\delta} \tanh\left(h\sqrt{\frac{s}{D}}\right) + \sqrt{s}]}{\frac{\sqrt{s}}{C} + R \cdot s^{\frac{3}{2}} + R \cdot \frac{\sqrt{D}}{\delta} \cdot s \cdot \tanh\left(h\sqrt{\frac{s}{D}}\right)}$$

$$\frac{\varepsilon(s)}{I(s)} = \frac{k}{sAh}$$

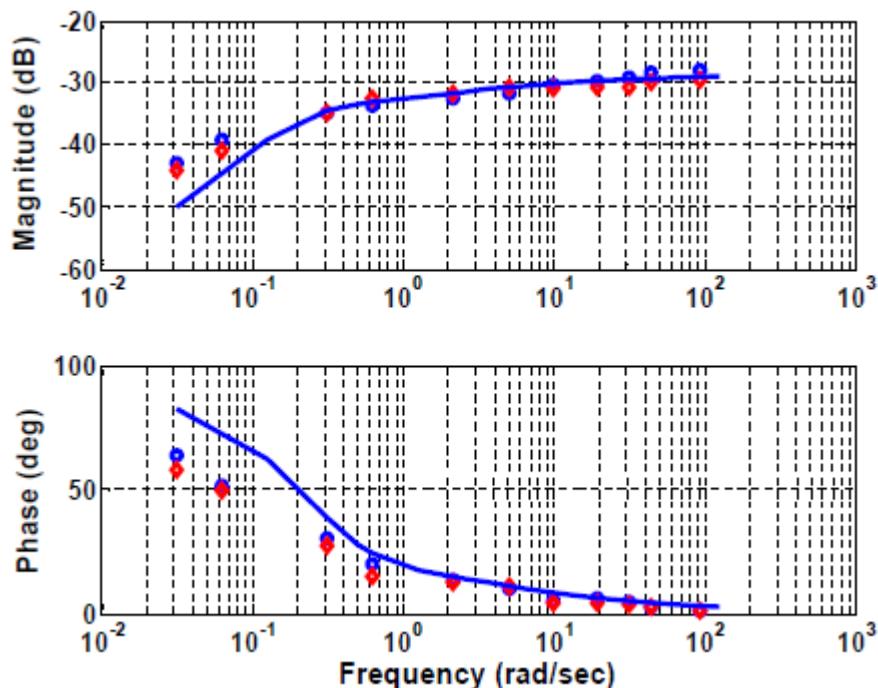
$$\frac{Q(s)}{\varepsilon(s)} = H(s) \quad (4.9)$$

Donde  $\delta$ , D, R, y h son parámetros constantes relacionados con la composición de cada bomba de diafragma y H(s) es la relación que existe entre el caudal de la bomba y el esfuerzo mecánico que realiza, tomándose esta relación como directamente proporcional. Así de forma simplificada se sabe que la función de transferencia para una entrada de tensión y una salida de caudal de la bomba tiene la forma,

$$\frac{Q(s)}{V(s)} = \frac{K(s + z_1)k}{(s + p_1)(s + p_2)sAh}$$

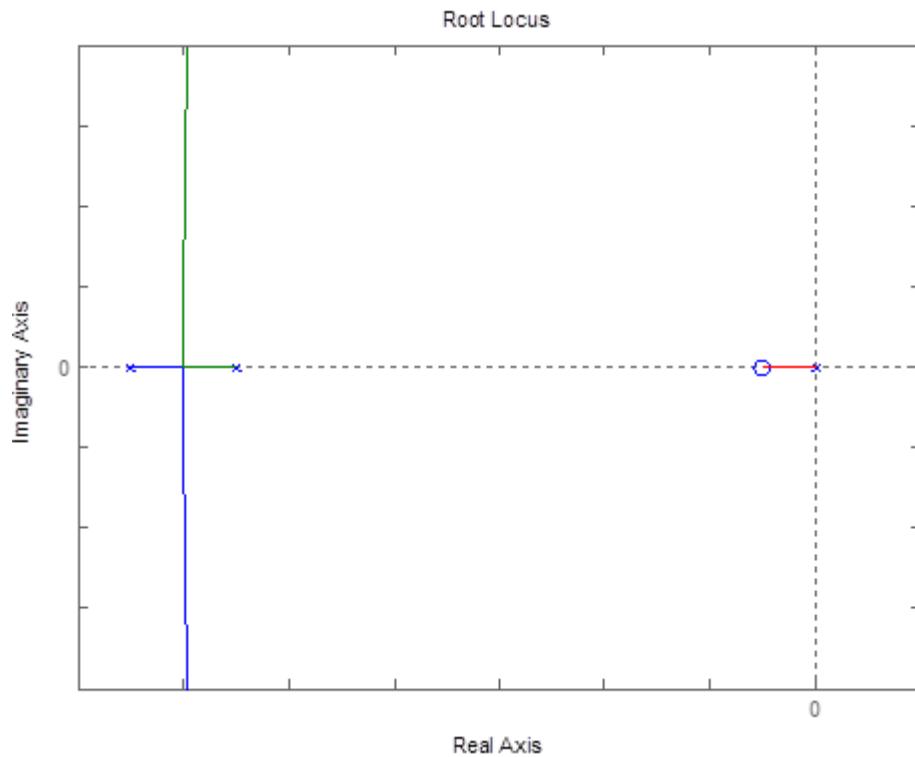
$$G_b(s) \rightarrow \frac{(s + z_1)}{(s + p_1)(s + p_2)} \quad (4.10)$$

Con lo cual la función de transferencia de la bomba tiene dos polos y un cero. Solamente resta observar el diagrama de Bode del sistema para ver en qué frecuencias se dan estos elementos,



**Figura 4.16 – Respuesta frecuencial simulada y obtenida mediante ensayo**

Del ensayo se deduce que a bajas frecuencias existe un cero que aporta una pendiente de +20dB, y a mayores frecuencias aparecen los polos. Así tras conocer el número de polos y ceros de la función de transferencia de la bomba de diafragma, la función de transferencia del sistema global incluida la maqueta será un sistema de tercer orden con un polo. Además el polo del sistema hidráulico está muy próximo al origen, a continuación se encontrará el cero de la bomba y más alejado del origen los otros dos polos, que pueden despreciarse debido a la dominancia del polo próximo al origen y del cero.



**Figura 4.17 - Lugar de las raíces**

Los polos más a la izquierda del eje estarán dominados por el polo y el cero más lentos así que por mucho que aumente la ganancia K los polos del sistema siempre se van a encontrar a lo largo del eje real, y por tanto queda demostrado que nunca se llegará a dar sobrepasamiento.

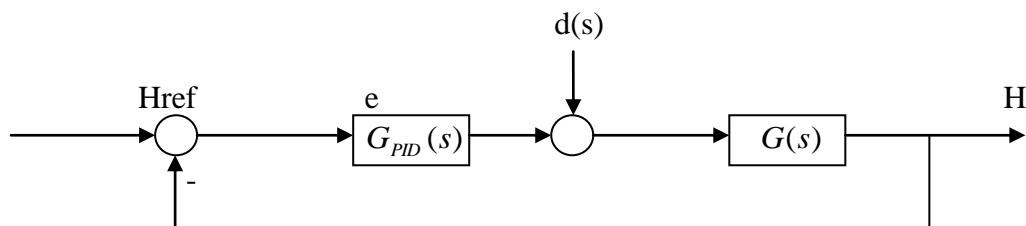
## 4.2 – CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

El controlador proporcional disminuye el error en estado estacionario; el controlador proporcional integral mejora el permanente pero no presenta buenos resultados en el transitorio; el controlador derivativo mejora el transitorio pero no el permanente pues no aumenta el tipo de sistema. Así el controlador proporcional integral derivativo puede mejorar tanto el permanente como el transitorio.

### 4.2.1 – Algoritmo de control PID teórico

Dada la planta formada por la bomba de función de transferencia de segundo orden con un cero a bajas frecuencias y el sistema hidráulico de primer orden, de desea ahora controlar mediante un regulador de tipo proporcional-integral-derivativo. Como los polos y el cero de la bomba no están identificados y no se puede disponer de su valor numérico se deducirá el algoritmo de control de forma puramente experimental.

Al sistema de tanques además de la entrada de referencia pueden existir otras entradas que actúan como meras perturbaciones que pueden ser puntuales y por tanto aleatorias o incluso de tipo periódico. En cualquier caso este comportamiento es indeseable en el estudio puesto que no se puede calcular matemáticamente, así que se tratará de hallar el controlador de forma que estas perturbaciones sean despreciables.



**Figura 4.18 - Diagrama con perturbación**

Así la salida de altura tendrá la expresión:

$$H(s) = F_1(s)H_{REF}(s) + F_2(s)d(s)$$

Donde  $F_1(s) = \frac{G_{PID}(s)G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)}$  y  $F_2(s) = \frac{G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)}$  por tanto:

$$H(s) = \frac{G_{PID}(s)G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)}H_{REF} + \frac{G(s)}{1 + G_{PID}(s)G(s)}d(s) \quad (4.11)$$

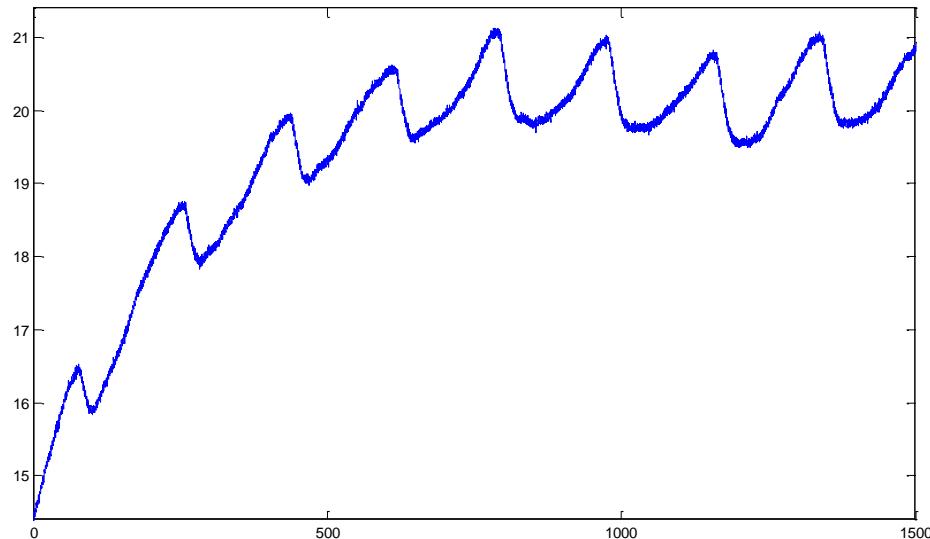
Con esta expresión se observa que cuanto mayor sea el valor de la ganancia  $K_C$  mayor es el denominador en el término de la entrada variable de  $d(s)$  mientras que el término de la referencia permanece invariante debido a la presencia de esta ganancia tanto en el numerador como en el denominador. Así el método por el que se va a obtener este máximo valor de la ganancia del compensador será el de Ziegler-Nichols en lazo abierto. Su ajuste parte del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón. Para ajustar el controlador la respuesta en S del sistema es caracterizada por dos parámetros: es tiempo de atraso (L) y la constante de tiempo (T). Estos parámetros se determinan de la siguiente manera: se traza la tangente a la curva de la respuesta en su punto de inflexión, el corte de esta recta con el eje de tiempo da el parámetro L y el corte con la línea del valor estable de la salida da un valor temporal, T se calcula restando a ese valor el parámetro L.

El ajuste del controlador se hace según la siguiente tabla:

Tipo de controlador	<b>K</b>	<b><math>\tau_i</math></b>	<b><math>\tau_d</math></b>
<b>P</b>	$T/L$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
<b>PID</b>	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

**Figura 4.19 - Tabla Ziegler-Nichols**

Ante una entrada escalón de amplitud 0,5V el nivel de líquido tiene una respuesta de la forma:

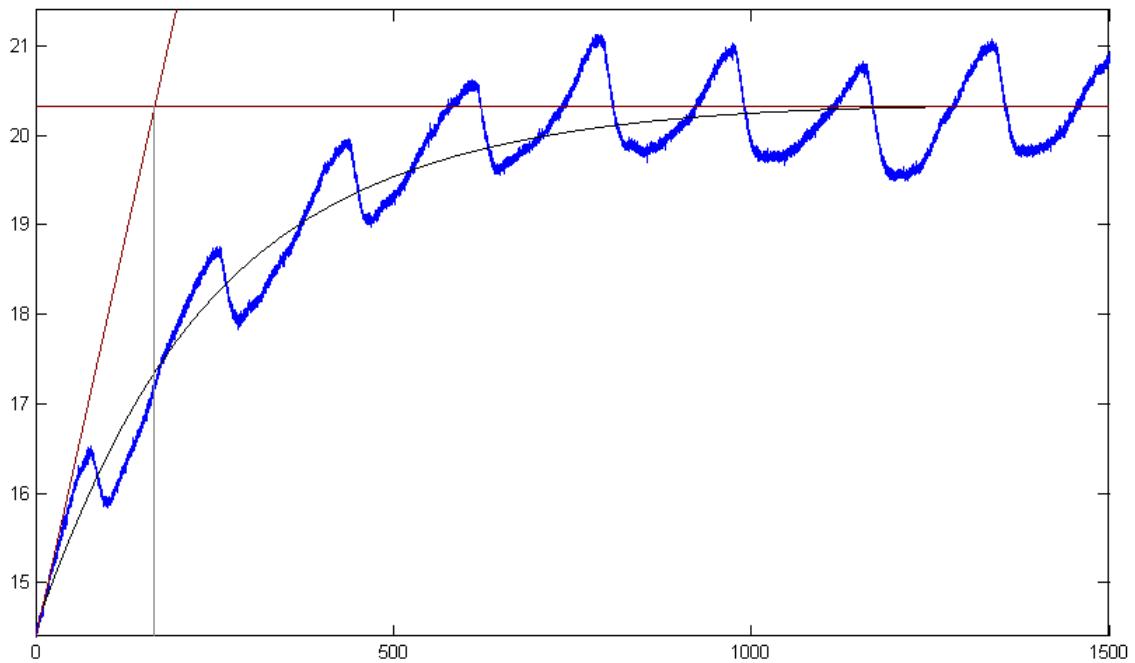


**Figura 4.20 - Respuesta ante entrada escalón**

El nivel de líquido sufre constantes oscilaciones no debido al ruido en la medida del sensor de ultrasonidos sino debido a las caídas de tensión que sufre la propia bomba. Para calcular los parámetros L y T es necesario tomar como origen de tiempos el momento en el

que se ordena el escalón, y como origen de altura el nivel en estado estacionario antes de que el sistema sea sometido a una entrada de tipo escalón.

Para saber con mayor exactitud los parámetros que definirán al controlador se trazan la recta tangente al punto de inflexión de la curva y la recta correspondiente al valor final de la altura del líquido.



**Figura 4.21 - Parámetros del método de Ziegler-Nichols**

De esta forma se tiene que  $L = 2s$  y  $T = 200 - 2 = 198s$  y puesto que el controlador que se desea implementar es del tipo PID este será de la forma,

$$G_{PID}(s) = K \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (4.12)$$

De forma particular entonces el controlador PID así ajustado según los parámetros de Ziegler-Nichols,

$$G_{PID}(s) = \frac{1,2T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{1,2T}{L} \left( 1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{1,2T}{L} \frac{(2Ls + 1 + L^2s^2)}{2Ls}$$

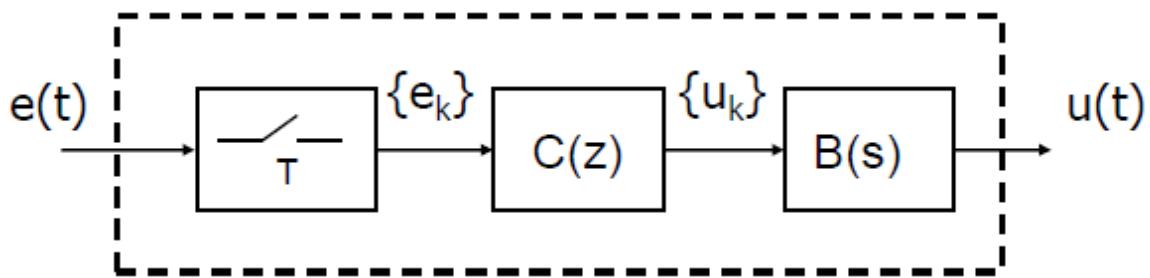
$$G_{PID}(s) = 0,6 \frac{T}{L^2} \frac{(Ls+1)^2}{s}$$

Que para  $L = 2s$  y  $T = 198s$ ,

$$\begin{aligned} G_{PID}(s) &= 0,6 \frac{198}{2^2} \frac{(2s+1)^2}{s} \\ G_{PID}(s) &= 29,7 \frac{(2s+1)^2}{s} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Cuya ganancia es  $k_{PID} = 29,7$ , tiene un polo en el origen (integrador) y un par de ceros en -0,5.

Una vez diseñado un regulador continuo para el proceso se trata de obtener un regulador discreto que aproxime su funcionamiento.

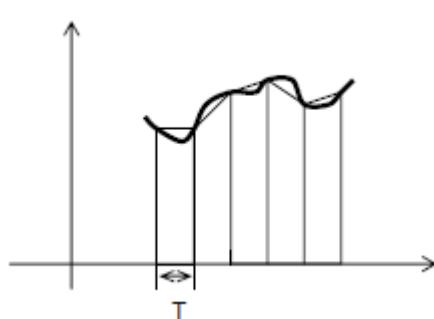


**Figura 4.22 - Modelo del regulador discreto**

Existen varias maneras para el mapeo del plano s al plano z tales como las aproximaciones en diferencias hacia adelante o hacia atrás. La transformación bilineal es otro método que mapea todo el semiplano izquierdo del plano s en el círculo unitario en el plano z. La transformación bilineal mapea del plano s al plano z mediante la relación

$$s = \frac{2(z-1)}{Ts(z+1)} \text{ donde } Ts \text{ es el tiempo de muestreo del sistema de tiempo discreto. En Matlab}$$

el comando *c2d* puede convertir un controlador PID de tiempo continuo a un controlador PID de tiempo discreto sin pasar por una sustitución algebraica o mapeo. Este comando requiere el numerador y denominador de la función de transferencia continua, el tiempo de muestreo y el método que se utilizará. Para la aproximación bilineal debe usarse el método “Tustin”. El método trapezoidal o método de Tustin aproxima el operador integral  $\frac{1}{s}$  por el sistema discreto obtenido sumando trapecios.



$$u_k = u_{k-1} + \frac{T}{2}(e_k + e_{k-1})$$

$$2(1 - z^{-1})U(z) = T(1 + z^{-1})E(z)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{T(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})} = \frac{T(z + 1)}{2(z - 1)} \approx \frac{1}{s} \quad (4.14)$$

**Figura 4.23 - Método de Tustin**

Basta con sustituir esta aproximación en el modelo del controlador para calcular matemáticamente la función de transferencia del controlador discreto:

$$G_{PID}(s) = \frac{118,8s^2 + 118,8s + 29,7}{s}$$

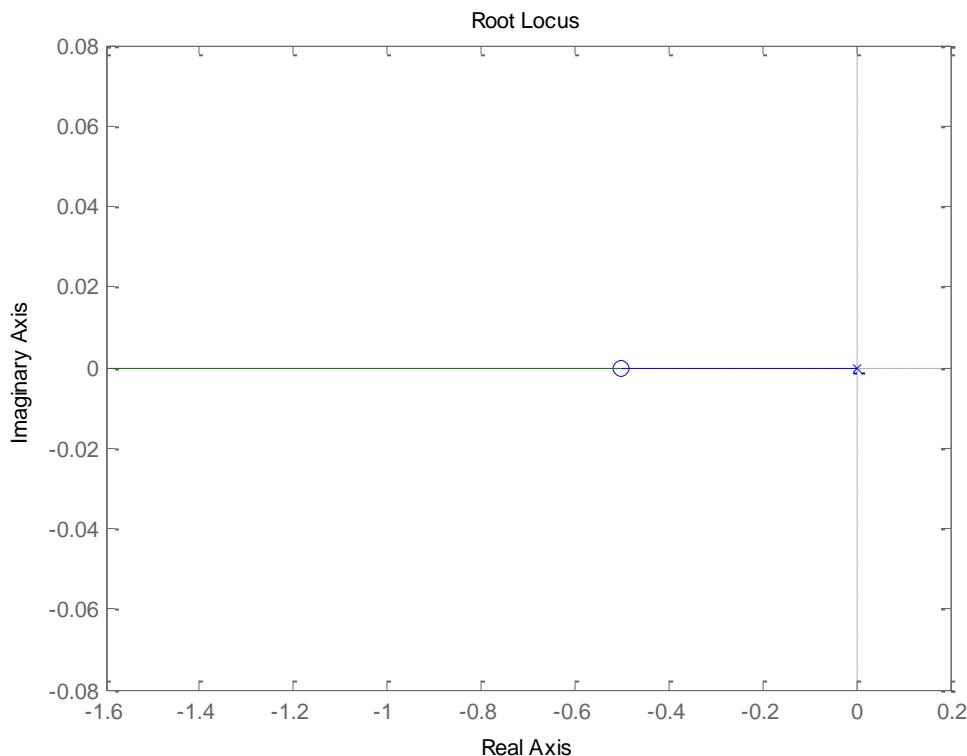
$$G_{PID}(z) = \frac{\frac{4752000(z-1)^2}{(z+1)^2} + \frac{23760(z-1)}{(z+1)} + 29,7}{\frac{200(z-1)}{(z+1)}}$$

$$G_{PID}(z) = \frac{4752000(z^2 - 2z + 1) + 23760(z^2 - 1) + 29,7(z^2 + 2z + 1)}{200(z^2 - 1)}$$

$$G_{PID}(z) = \frac{23878,9485z^2 - 47519,703z + 23641,3485}{z^2 - 1} \quad (4.15)$$

Para simplificar este análisis se emplea el comando de Matlab *c2d* (*continuous to discrete*) a partir de la función de transferencia continua y el periodo de muestreo correspondiente con:

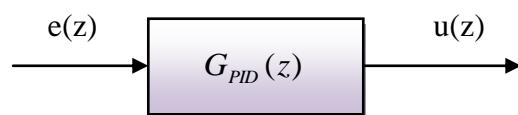
```
>> s=tf('s')
Transfer function:
s
>> pid=(118.8*s^2+118.8*s+29.7)/s
Transfer function:
118.8 s^2 + 118.8 s + 29.7
-----
s
```



**Figura 4.24 – Lugar de las raíces**

```
>> c2d(pid,0.01,'tustin')
Transfer function:
2.388e004 z^2 - 4.752e004 z + 2.364e004
-----
z^2 - 1
Sampling time: 0.01
```

Los métodos de retenedor de orden cero (ZOH), de interpolación lineal (FOH) y de discretización de impulso invariante (IMP) no pueden ser empleados en modelos en los que el número de ceros es mayor que el número de polos, es decir en modelos no causales. Como el modelo que se está estudiando es de tipo no causal los únicos métodos que pueden emplearse son o el método de aproximación Tustin bilineal, el de aproximación Tustin con deformación frecuencial (definiendo la frecuencia crítica  $W_c$ ), o el método de emparejamiento de polos y ceros (sólo válido para sistema de una sola entrada y una sola salida).



**Figura 4.25 - Regulador discreto**

$$\frac{u(z)}{e(z)} = \frac{23878,9485z^2 - 47519,703z + 23641,3485}{z^2 - 1} \quad (4.16)$$

Partiendo de las dos muestras anteriores,

$$\begin{aligned} \frac{u(z)}{e(z)} &= \frac{23878,9485 - 47519,703z^{-1} + 23641,3485z^{-2}}{1 - z^{-2}} \\ u(z)(1 - z^{-2}) &= e(z)(23878,9485 - 47519,703z^{-1} + 23641,3485z^{-2}) \\ u(k) - u(k-2) &= 23878,9485e(k) - 47519,703e(k-1) + 23641,3485e(k-2) \\ u(k) &= u(k-2) + 23878,9485e(k) - 47519,703e(k-1) + 23641,3485e(k-2) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Una vez sometido a todo el sistema al método de Ziegler-Nichols y obtenidos los parámetros T y L (198 y 2 segundos respectivamente) se implementa el controlador de forma teórica, es decir tomando la función de transferencia de la bomba como constante e igual a  $4,13 \frac{cm^3}{sV}$ . Para observar el comportamiento teórico que va a tener el sistema de primer orden controlado por un PID se hace la simulación pertinente con *Simulink*. Este programa nos va a permitir conocer la respuesta del sistema ante una entrada de tipo escalón conocidas tanto la función de transferencia del controlador como la de la planta. Puesto que la función de transferencia en  $z$  ha sido calculada anteriormente (ecuación tal basta con discretizar la función de transferencia de la planta siguiendo el mismo método que el empleado para discretizar el PID, el método Tustin mediante el cual el elemento integrador de  $s$  se transforma en  $\frac{T(z+1)}{2(z-1)}$  donde T es el periodo de muestreo igual a 0,01.

$$G(s) = \frac{16,388}{286,725s + 1}$$

$$G(z) = \frac{16,388}{\frac{286,725 \cdot 2(z-1)}{0,01(z+1)} + 1}$$

$$G(z) = \frac{\frac{16,388(z+1)}{(z+1)}}{\frac{57345(z-1)+(z+1)}{(z+1)}}$$

$$G(z) = \frac{16,388(z+1)}{57346z - 57344}$$

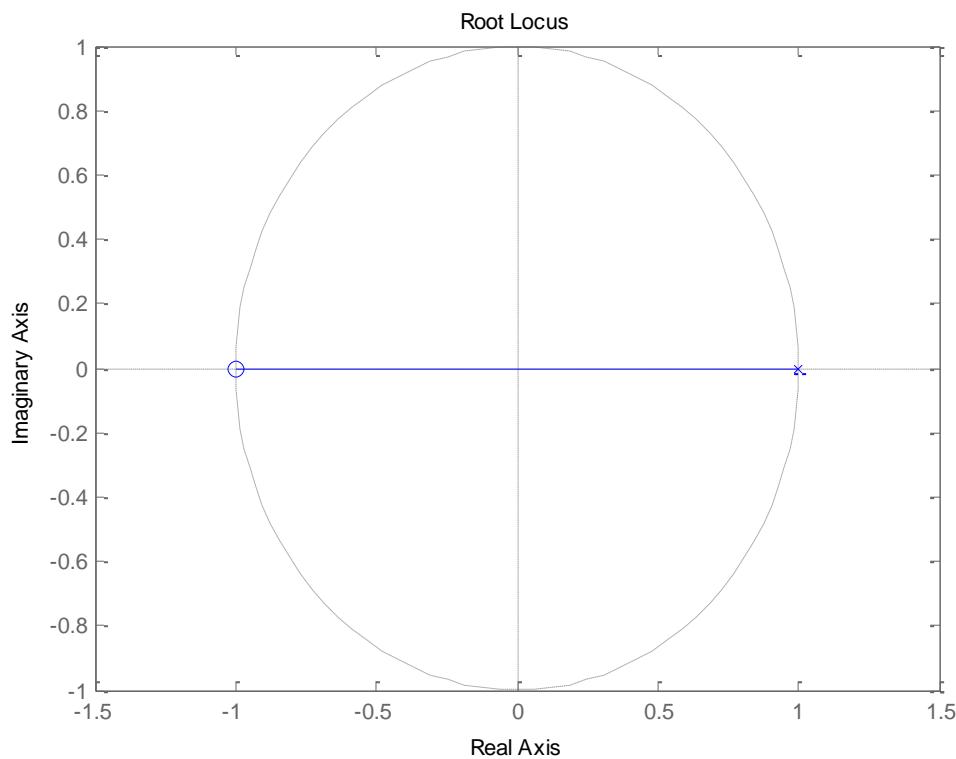
$$G(z) = \frac{0,000285774z + 0,000285774}{z - 0,999965124} \quad (4.18)$$

Cuyo resultado en Matlab,

```
>> gz=c2d(g,0.1,'tustin')
Transfer function:
0.0002857 z + 0.0002857
-----
z - 0.9997
Sampling time: 0.01
```

Se desea conocer la ubicación exacta de los polos y ceros de la planta por lo que se emplea el siguiente comando de Matlab:

```
>> rlocus(gz)
```



**Figura 4.26 - Polo y cero de la planta**

Se comprueba la presencia de un polo en 0,99982 y un cero en -1. Por otro lado para el regulador de tipo PID cuya función de transferencia es la que sigue, con Matlab se localizan los polos y ceros.

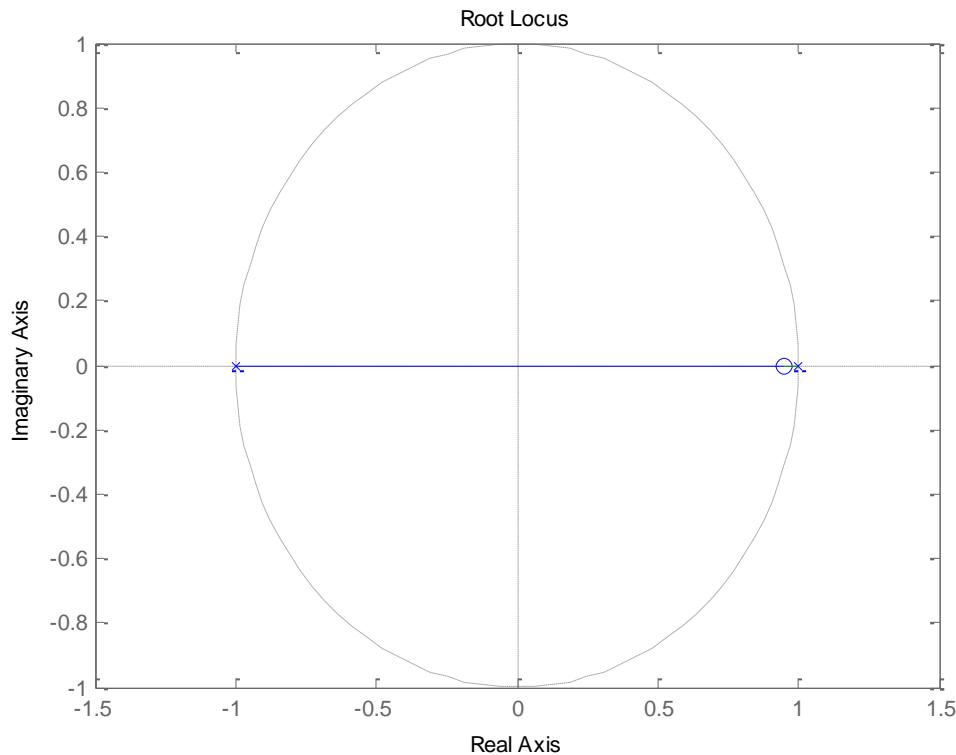
$$G_{PID}(z) = \frac{23878,9485z^2 - 47519,703z + 23641,3485}{z^2 - 1} \quad (4.19)$$

```
>> pid01=c2d(pid,0.1,'tustin')
```

Transfer function:  

$$\frac{2496 z^2 - 4749 z + 2259}{z^2 - 1}$$

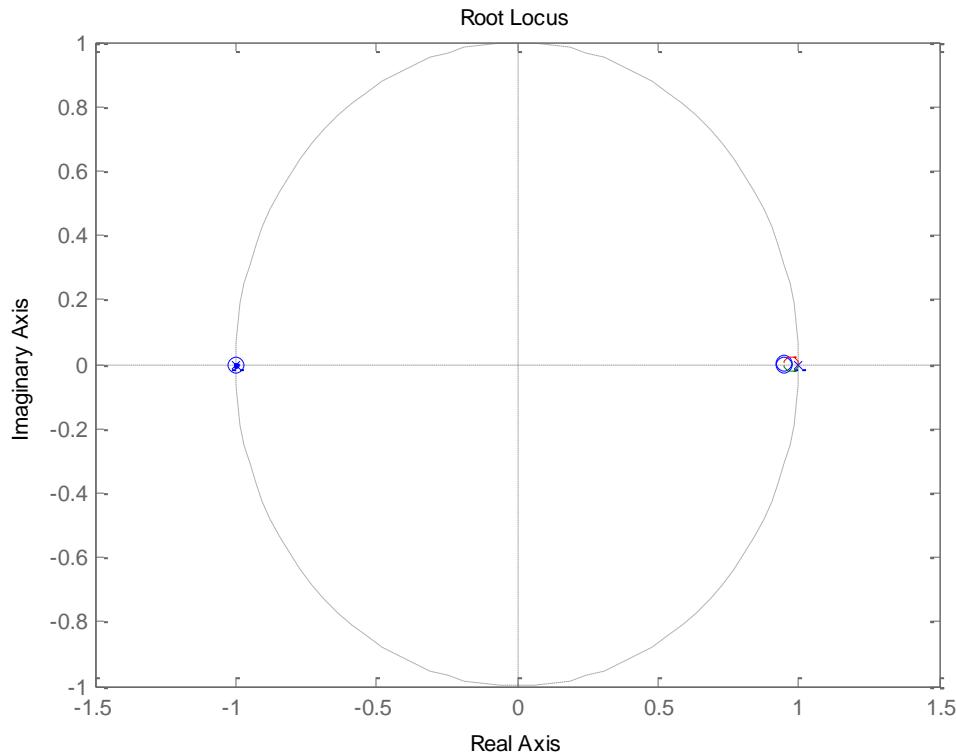
Sampling time: 0.1  
>> rlocus(pid01)



**Figura 4.27 - Polos y ceros del PID**

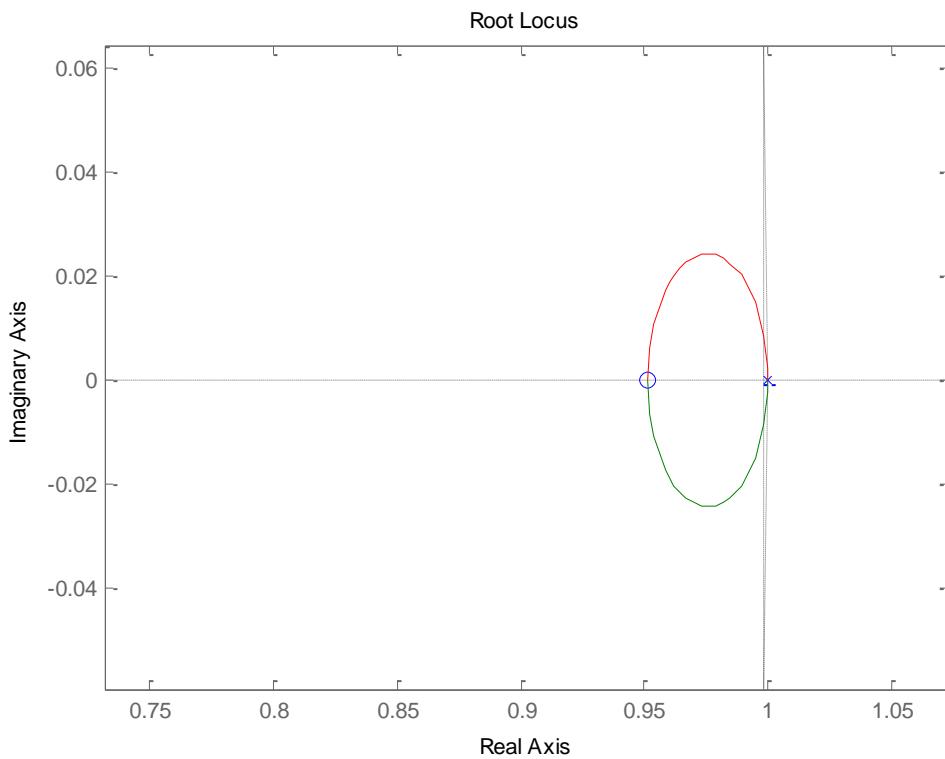
Se demuestra de forma gráfica la presencia de un polo en 1 y otro en -1, así como la presencia de un par de ceros en 0,95. Si se pretende conocer el comportamiento de ambos sistemas trabajando de forma conjunta el resultado de la colocación de los polos y ceros en el disco unitario será el siguiente:

```
>> rlocus(pid01*gz)
```



**Figura 4.28 - Polos y ceros del conjunto**

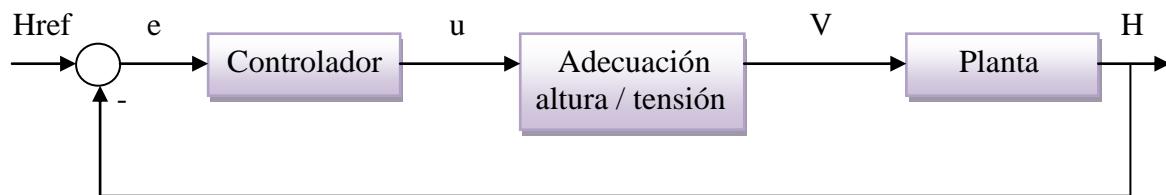
En la región negativa el polo del PID se anula con el cero de la planta en -1, dominando entonces los polos y ceros de la región positiva que se observa con más detalle a continuación:



**Figura 4.29 - Polos y ceros dominantes**

Con ello se deduce que la planta controlada a través de un regulador proporcional integral derivativo es estable.

Los parámetros de este controlador van a ser simulados mediante *Simulink* y observando la respuesta que sigue el sistema. El diagrama de bloques del que se parte y que habrá que implantar en *Simulink* es el siguiente:

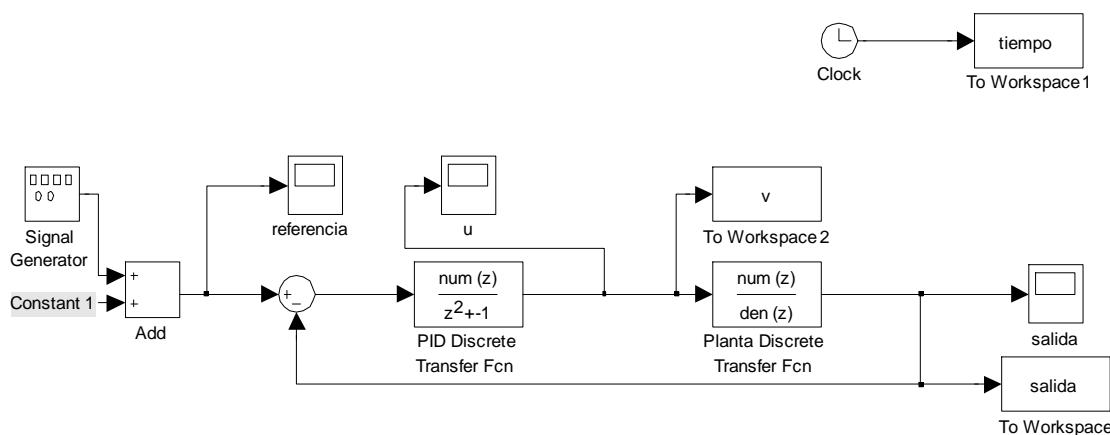


**Figura 4.30 - Diagrama de bloques del sistema controlado**

El bloque referente a la adecuación de unidades de altura (cm) a unidades de tensión (V) se trata de una constante de valor  $\frac{1}{2,5}$ . Así a la hora de hacer la simulación este bloque se incluirá en el del controlador dividiendo su función de transferencia entre 2,5. Tanto la función de transferencia del PID como la de la planta estarán en el dominio Z, y sus expresiones han sido calculadas con anterioridad, por lo que tras aplicar la pertinente adecuación en la expresión del PID se realiza la pertinente simulación.

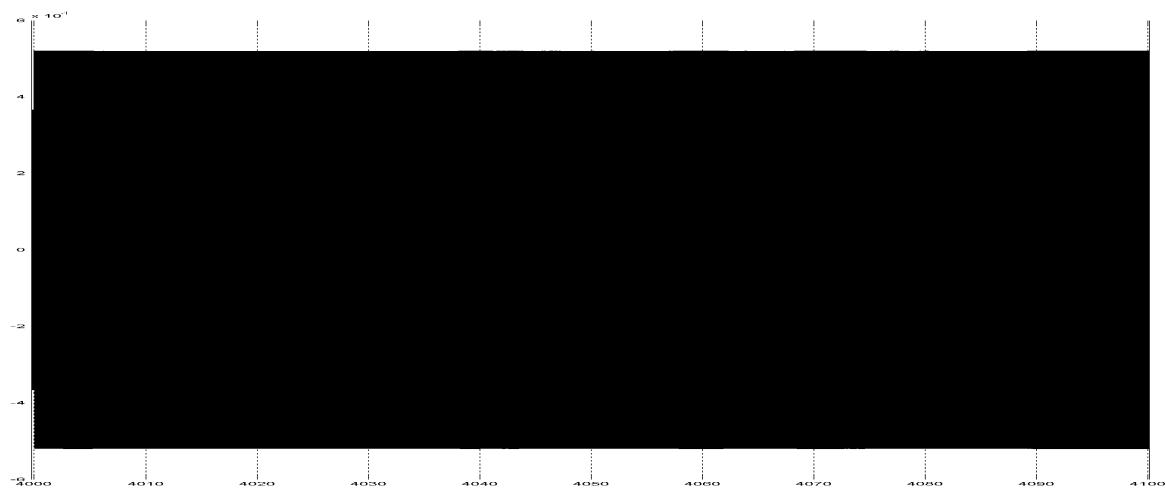
$$G(z) = \frac{0,00285774z + 0,00285774}{z - 0,999965124}$$

$$G_{PID}(z) = \frac{9551,5794z^2 - 19007,8812z + 9456,5394}{z^2 - 1} \quad (4.20)$$

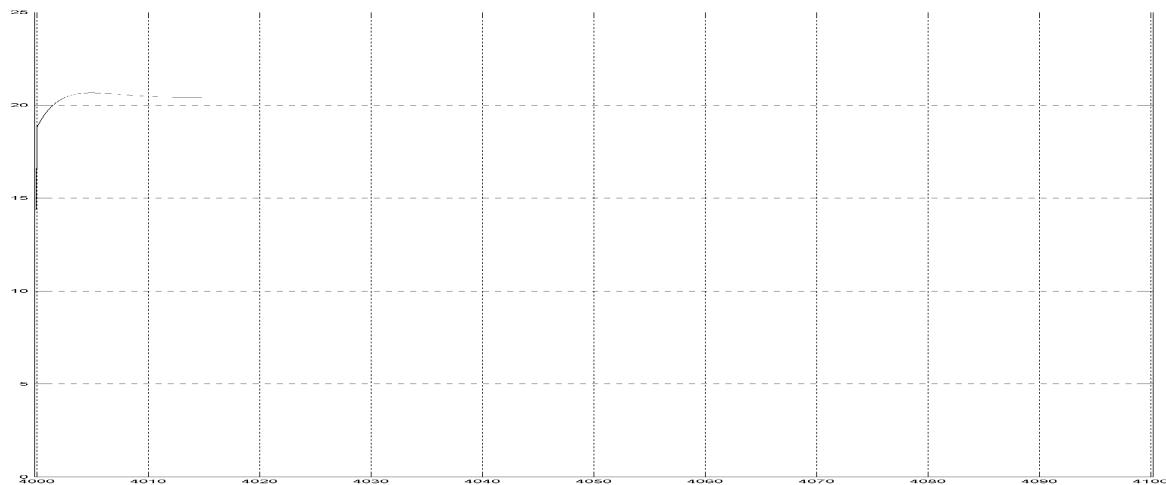


**Figura 4.31 - Diagrama de bloques en *Simulink***

De la simulación se consigue la forma de onda de la referencia, la de la acción de control y la de la salida:

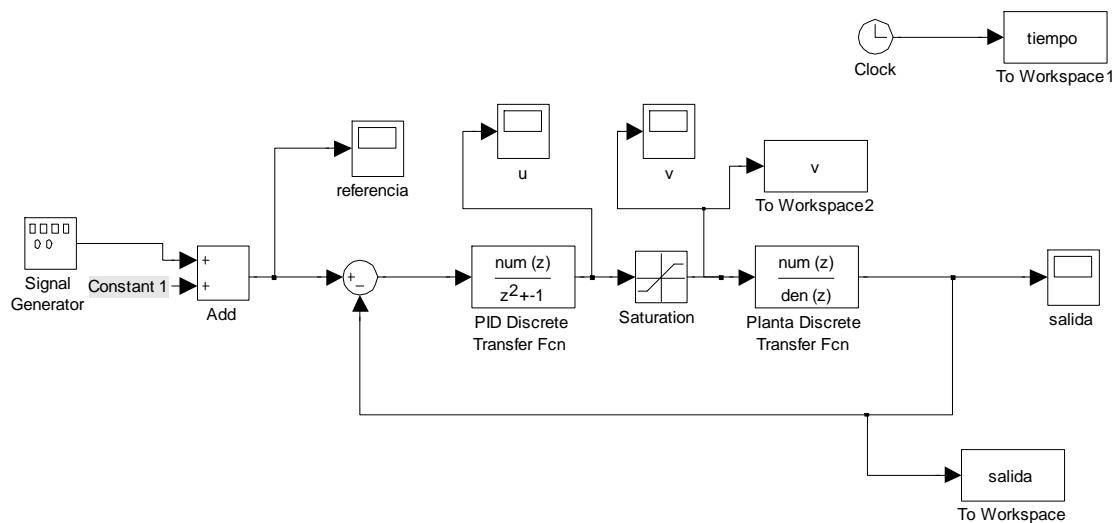
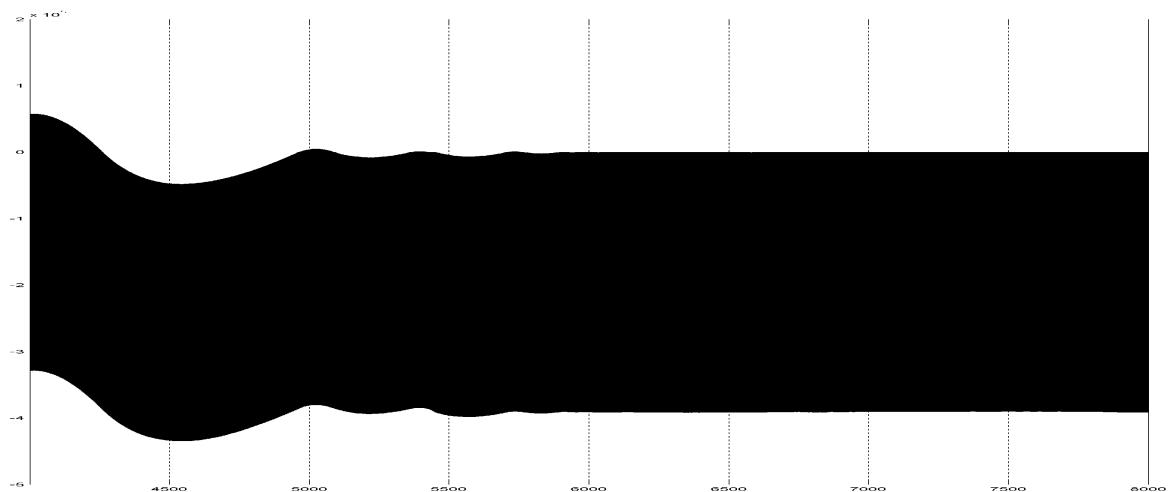
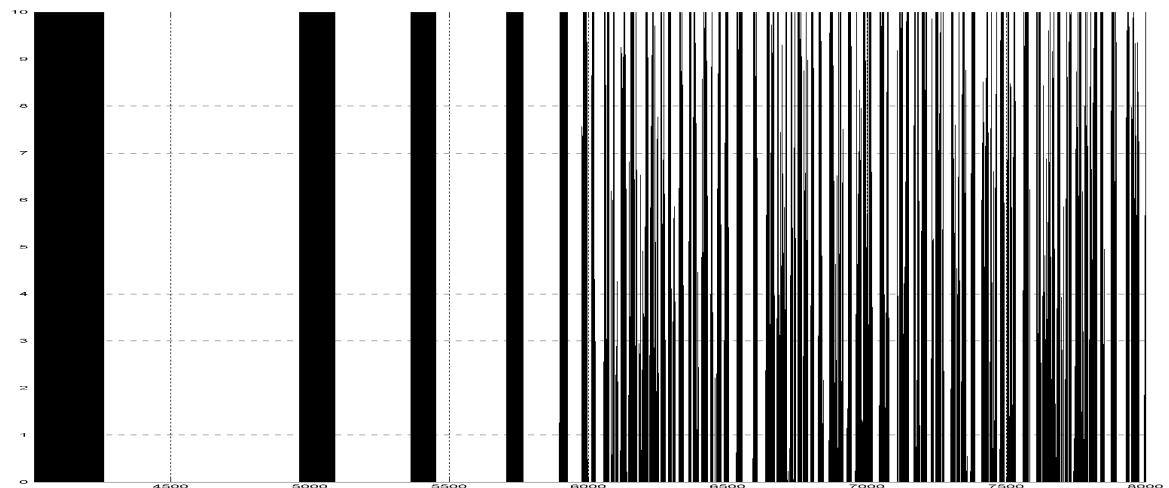


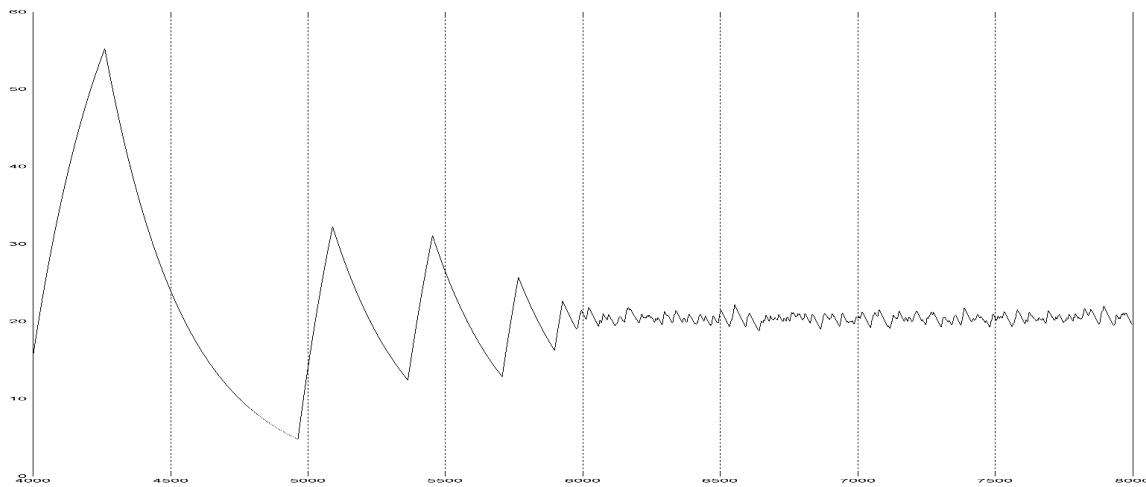
**Figura 4.32a - Acción de control**



**Figura 4.32b - Nivel de líquido de salida**

Como se aprecia la acción de control de entrada a la planta alcanza unos niveles de tensión elevadísimos, del orden de los  $\pm 50000$  V, por lo que es indispensable limitar esta entrada al rango admisible por la bomba, es decir al rango  $0 \leq V \leq 10$ V. Tras introducir este cambio los gráficos obtenidos son diferentes.

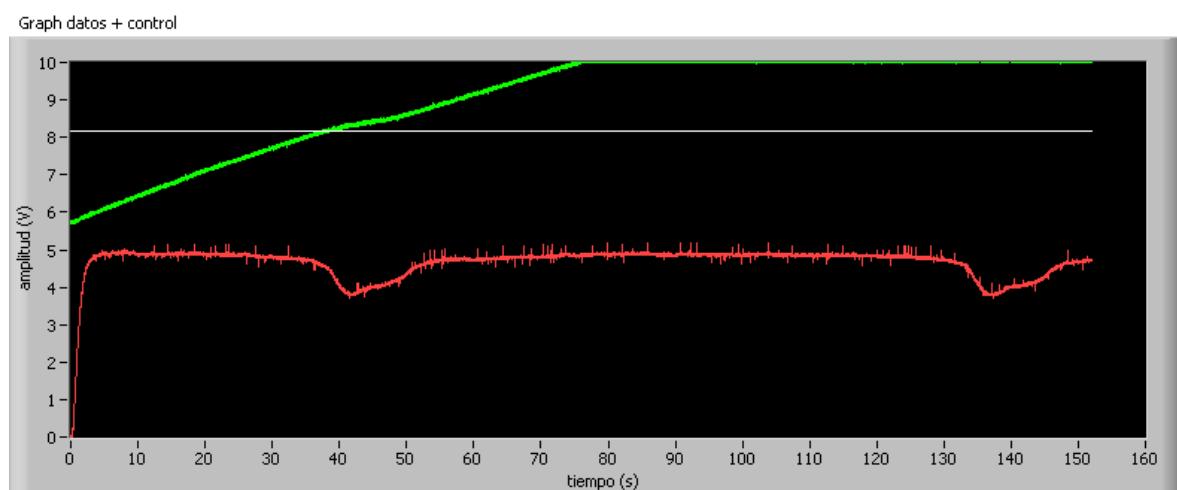
**Figura 4.33 - Diagrama de bloques con saturación****Figura 4.34a - Acción de control****Figura 4.34b - Entrada de tensión de la planta limitada**



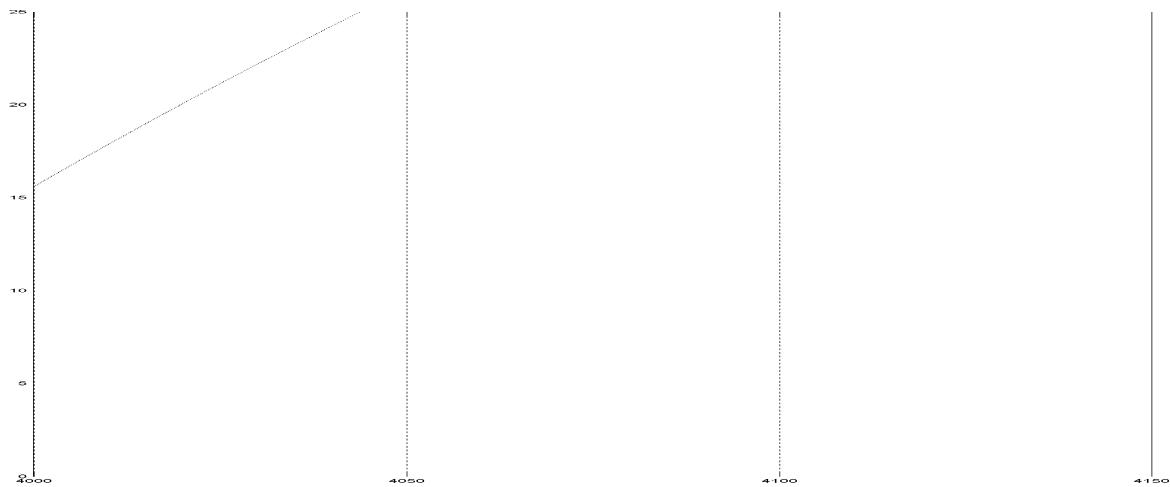
**Figura 4.34c - Salida del nivel del tanque**

#### **4.2.2 - Ensayo en la maqueta con control proporcional-integral-derivativo**

Tras ver el comportamiento teórico del conjunto se traslada el estudio ahora a la maqueta. Para ello se parte de un nivel de referencia de 14,4 cm y se somete a un nuevo valor referencial de 20,4 cm de altura de líquido en el interior del tanque. Con el PID calculado y simulado con *Simulink* las señales obtenidas son las que siguen:



**Figura 4.35a - Referencia, altura y caudal**



**Figura 4.35b - Respuesta ante el escalón**

Con el regulador de esas características se tiene un sistema subamortiguado pues existen oscilaciones en régimen transitorio entre 14,4 y 25 cm (nivel máximo) y esta amplitud disminuye entorno al valor final de 20,4 cm.

#### 4.2.3 – Modificación de los parámetros del método de Ziegler-Nichols

##### ➤ Reducción de la ganancia

Si ahora la ganancia del controlador es reducida a la mitad de su valor, es decir si ahora pasa a valer 59,4 en lugar de 118,8 el PID tiene la nueva forma:

$$G_{PID}(s) = 59,4 \left( 1 + \frac{1}{4s} + s \right)$$

$$G_{PID}(s) = 59,4 \left( 1 + \frac{1}{4s} + s \right)$$

$$G_{PID}(s) = 14,85 \left( \frac{4s + 1 + 4s^2}{s} \right)$$

$$G_{PID}(s) = \frac{59,4s + 14,85 + 59,4s^2}{s} \quad (4.21)$$

Discretizando con el método de Tustin,

$$\begin{aligned}
 G_{PID}(z) &= \frac{59,4 \frac{200^2(z-1)^2}{(z+1)^2} + 59,4 \frac{200(z-1)}{(z+1)} + 14,85}{\frac{200(z-1)}{(z+1)}} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{2376000 \frac{(z-1)^2}{(z+1)^2} + 11880 \frac{(z-1)(z+1)}{(z+1)^2} + 14,85 \frac{(z+1)^2}{(z+1)^2}}{\frac{200(z-1)(z+1)}{(z+1)^2}} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{2376000(z^2 - 2z + 1) + 11880(z^2 - 1) + 14,85(z^2 + 2z + 1)}{200(z^2 - 1)} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{11939,47425z^2 - 23759,8515z + 11820,67425}{z^2 - 1} \tag{4.22}
 \end{aligned}$$

Efectuando la comprobación en Matlab,

```

>> pidk=(59.4*s^2+59.4*s+14.85)/s
Transfer function:
59.4 s^2 + 59.4 s + 14.85
-----
s
>> c2d(pidk,0.01,'tustin')
Transfer function:
1.194e004 z^2 - 2.376e004 z + 1.182e004
-----
z^2 - 1
Sampling time: 0.01

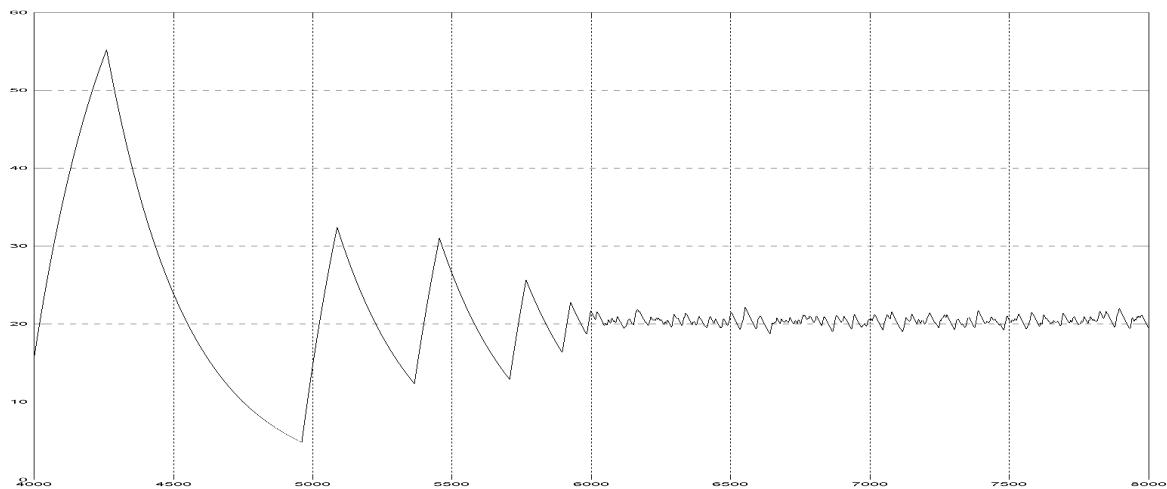
```

Por ultimo dividiendo esta expresión entre 2,5 para adaptar la salida del PID de centímetros a Voltios,

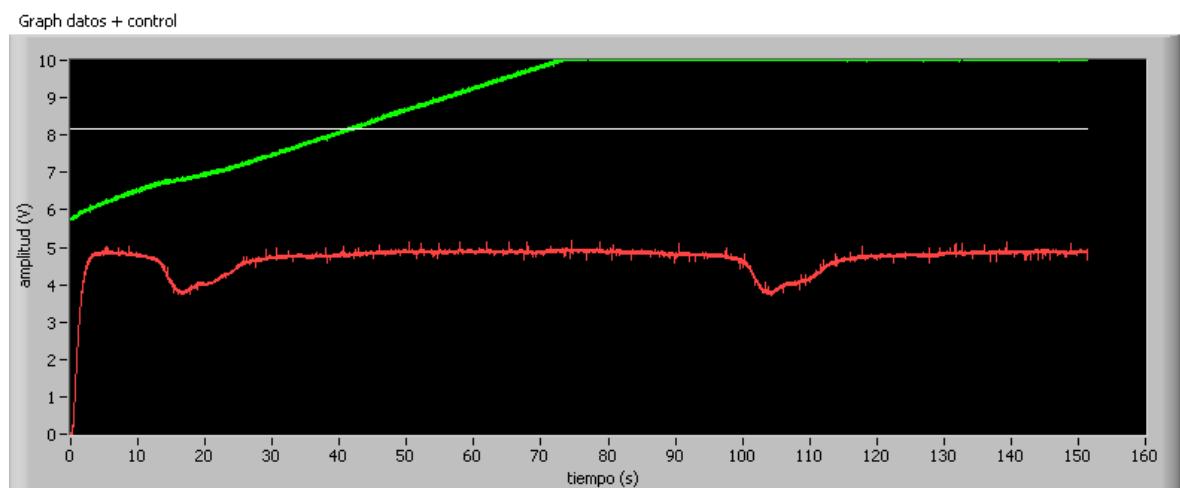
$$G_{PID}(z) = \frac{4775,7897z^2 - 9503,9406z + 4728,2697}{z^2 - 1} \tag{4.23}$$

Implementando en el VI en LabVIEW la expresión referente a la muestra de error actual, la anterior y la inmediatamente anterior a ella, así como la penúltima muestra de acción de control,

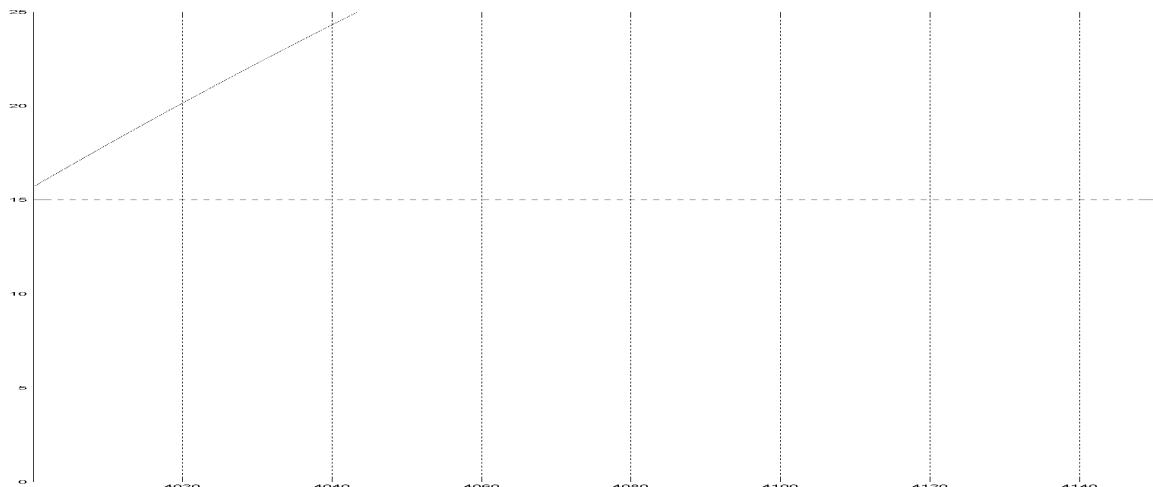
$$u(k) = u(k-2) + 4775,7897e(k) - 9503,9406e(k-1) + 4728,2697e(k-2) \tag{4.24}$$



**Figura 4.36a - Simulación con la mitad de ganancia**



**Figura 4.36b - Referencia, altura y caudal**



**Figura 4.36c - Simulación con la mitad de ganancia**

Reduciendo a la mitad el valor de la ganancia el sistema sigue siendo subamortiguado. La acción de control se reduce con ello a la mitad sin embargo como esta señal está limitada igualmente entre 0 y 10 la señal de entrada a la bomba es exactamente la misma y por ello la curva del nivel de líquido de salida ante el escalón es la misma para ambas ganancias.

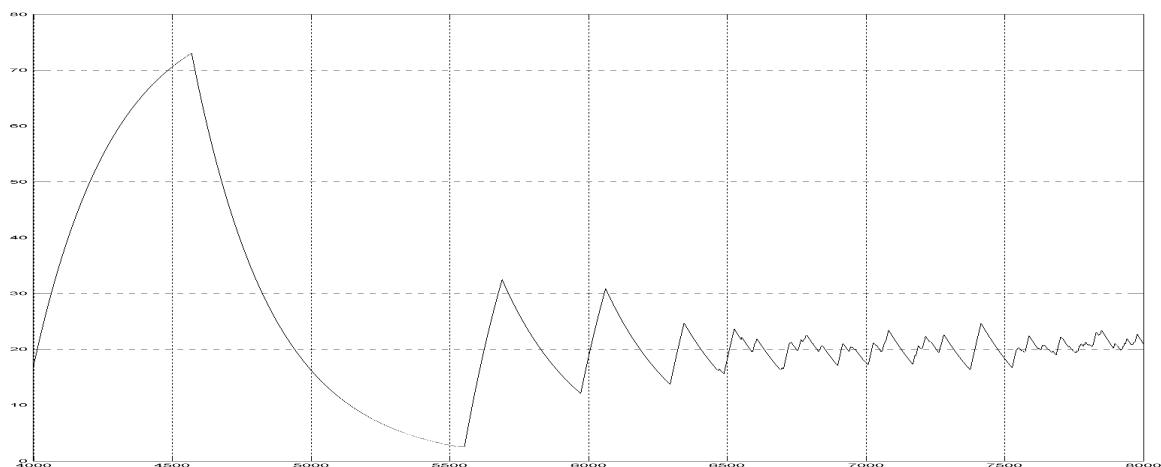
### ➤ Desplazamiento de los ceros del controlador hacia el origen

En lugar de variar el valor de la ganancia de forma aislada se desea ahora modificar todos los parámetros del controlador acercando el par de ceros al origen y así dotándolos de más importancia en el conjunto del sistema. Para esto se va a aumentar valor del parámetro del ensayo de Ziegler-Nichols L, cuyo valor era de 2s y ahora va a pasar a valer 4s. La nueva expresión en Z del controlador es:

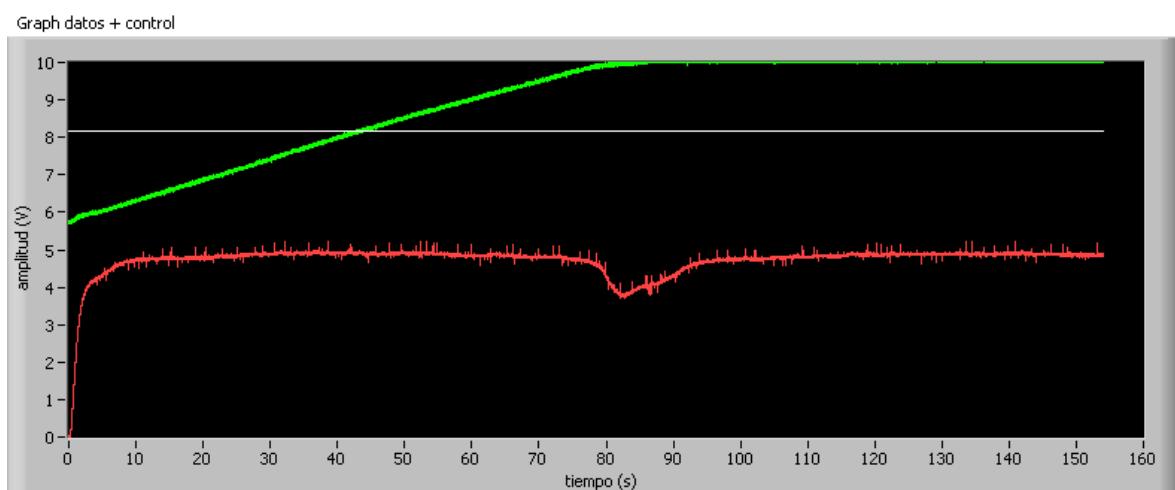
$$\begin{aligned}
 G_{PID}(s) &= \frac{118,8s^2 + 59,4s + 7,425}{s} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{118,8 \frac{200^2(z-1)^2}{(z+1)^2} + 59,4 \frac{200(z^2-1)}{(z+1)^2} + 7,425 \frac{(z+1)^2}{(z+1)^2}}{200 \frac{(z^2-1)}{(z+1)^2}} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{4752000(z^2 - 2z + 1) + 11880(z^2 - 1) + 7,425(z^2 + 2z + 1)}{200(z^2 - 1)} \\
 G_{PID}(z) &= \frac{23819,437125z^2 - 47519,92575z + 23700,637125}{z^2 - 1} \tag{4.25}
 \end{aligned}$$

Y para que la salida del controlador este expresada en Voltios:

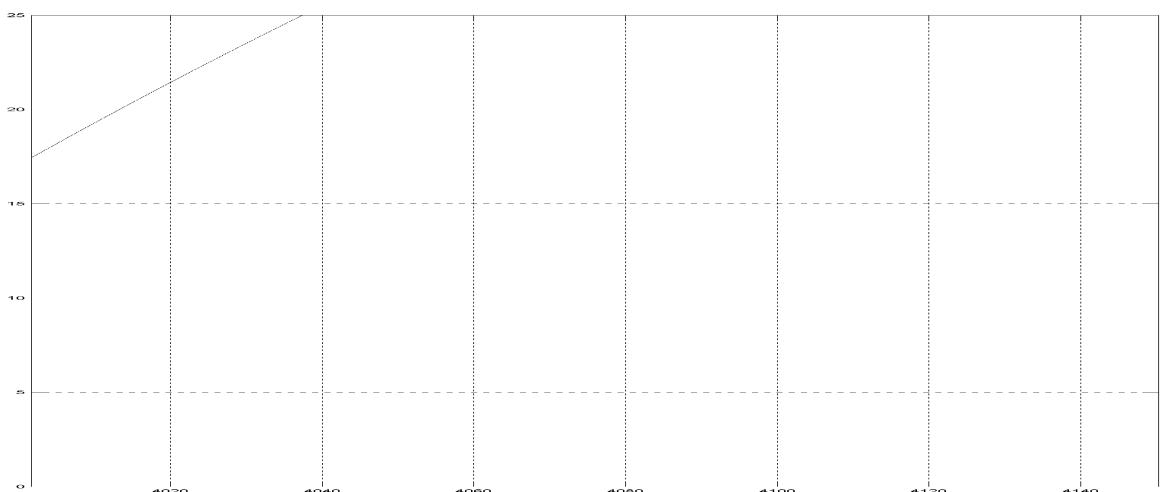
$$G_{PID}(z) = \frac{9527,77485z^2 - 19007,9703z + 9480,25485}{z^2 - 1} \tag{4.26}$$



**Figura 4.37a - Simulación para el nuevo valor del parámetro L**



**Figura 4.37b - Referencia, nivel de líquido y caudal**



**Figura 4.37c - Simulación del nivel**

Aumentando el valor de L la señal de salida de la altura del líquido deja de ser tan oscilante en régimen transitorio y pasa a ser un tránsito más suavizado. Sin embargo la señal de la acción de control es muy ruidosa debido a la parte derivativa del controlador, lo que hace que la entrada a la bomba sea muy irregular y por tanto que su funcionamiento no sea el idóneo.

### ➤ Método de Ziegler-Nichols por respuesta frecuencial

El alto valor de la ganancia obtenido por el método de Ziegler-Nichols de entrada escalón en lazo abierto puede ser adecuado cuando el principal objetivo es el de rechazar las perturbaciones que puedan afectar al sistema. El método de sintonía por respuesta frecuencial caracteriza los parámetros  $K_u$  y  $T_u$  (ganancia ultima y periodo ultimo). La respuesta es similar a la obtenida mediante el método en escalón salvo que el rebalse es algo menor. Supone un buen rechazo a las perturbaciones pero mal seguimiento de la referencia.

Para conocer los parámetros del PID del método frecuencial en lazo cerrado en función de los parámetros T y L del ensayo de escalón en lazo abierto se considera para ello un modelo de proceso similar al utilizado en lazo abierto

$$(G(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL} = \frac{(20,3 - 14,4)}{198s} e^{-sL}) \text{ dado por } G(s) = \frac{b}{s} e^{-sL} \text{ donde } a = bL \text{ y por tanto}$$

$$b = \frac{a}{L} = 0,02979.$$

Finalmente se tiene que []:

$$\tau_u = 4L = 4 \cdot 2 = 8 \quad (4.27)$$

Y los parámetros del controlador:

$$K = \frac{K_{inicial}}{1,25} = 95,04 \text{ de donde } K_u = \frac{K}{0,6} = 158,4$$

$$\tau_i = 0,5\tau_u = 4$$

$$\tau_d = 0,125\tau_u = 1 \quad (4.28)$$

Luego,

$$G_{PID}(s) = 95,04 \left( 1 + \frac{1}{4s} + s \right) \quad (4.29)$$

Que en el dominio de Z según el método Tustin equivale a:

$$G_{PID}(s) = \frac{95,04s + 23,76 + 95,04s^2}{s}$$

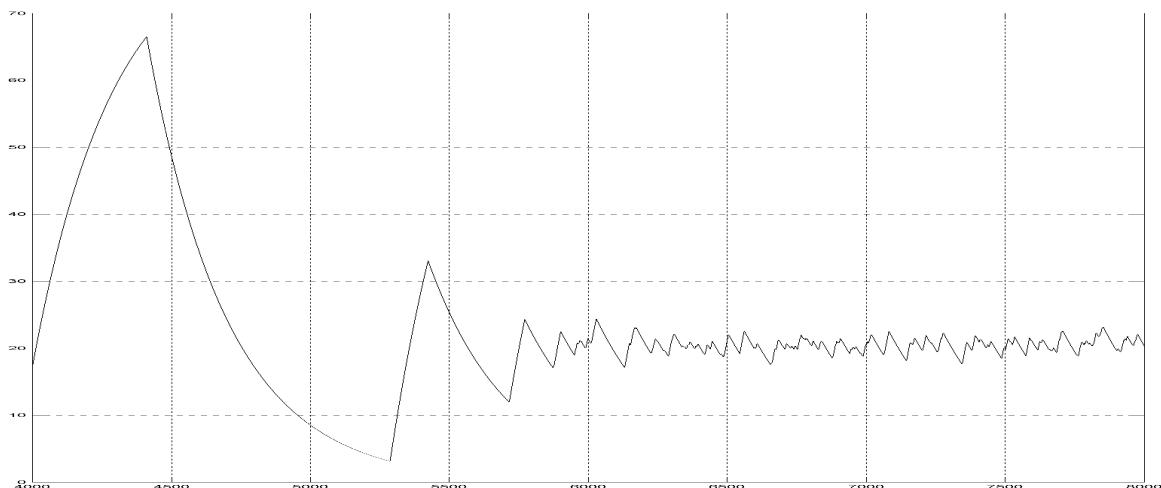
$$G_{PID}(z) = \frac{95,04 \frac{200(z-1)}{(z+1)} + 23,76 + 95,04 \frac{200^2(z-1)^2}{(z+1)^2}}{200 \frac{(z-1)}{(z+1)}}$$

$$G_{PID}(z) = \frac{3801600(z^2 - 2z + 1) + 19008(z^2 - 1) + 23,76(z^2 + 2z + 1)}{200(z^2 - 1)}$$

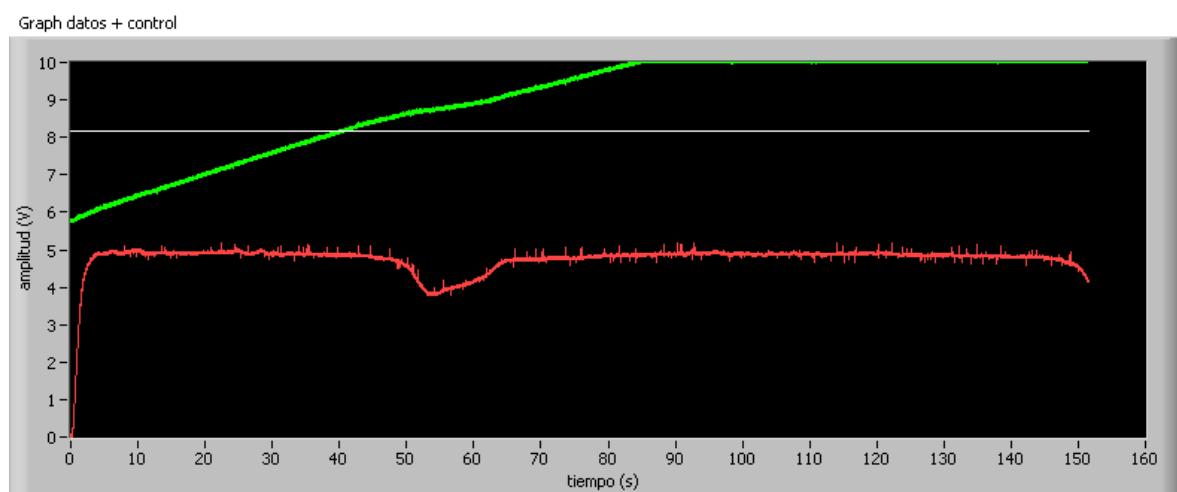
$$G_{PID}(z) = \frac{19103,1588z^2 - 38015,7624z + 18913,0788}{z^2 - 1} \quad (4.30)$$

Que expresado en voltios para modelizar la simulación:

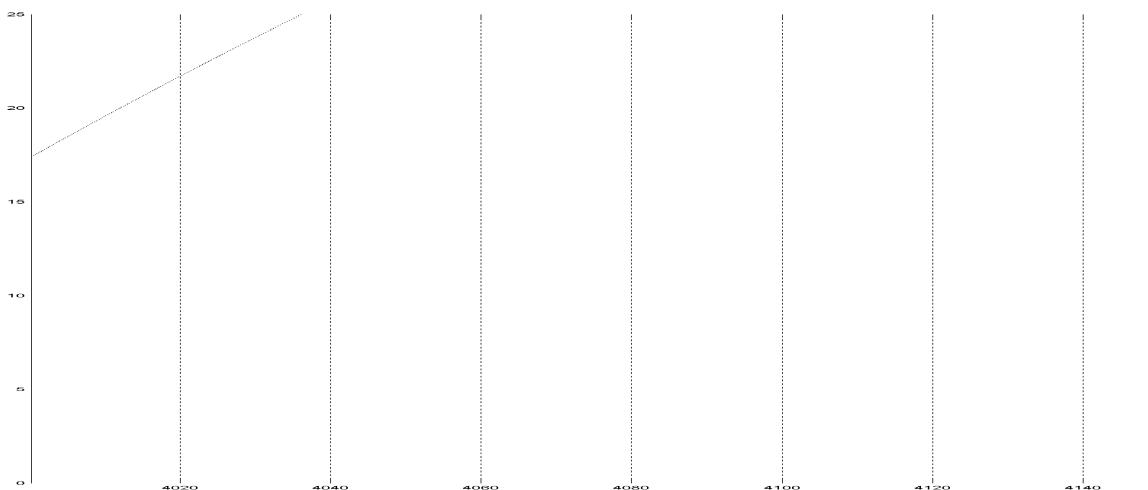
$$G_{PID}(z) = \frac{7641,26352z^2 - 15206,30496z + 7565,23152}{z^2 - 1} \quad (4.31)$$



**Figura 4.38a - Simulación con el método frecuencial de Ziegler-Nichols**



**Figura 4.38b - Referencia, nivel de líquido y caudal**



**Figura 4.38c - Simulación para el nivel de líquido**

➤ **Ajuste del margen de ganancia y el margen de fase**

Puede ajustarse ahora el amortiguamiento garantizando un margen de ganancia de al menos 2 y un margen de fase se al menos  $45^\circ$  ( $\zeta \geq 0,7$ ) con estas consignas los parámetros del controlador son:

$$K = 0,35K_u = 55,44$$

$$\tau_i = 0,7685\tau_u = 6,148$$

$$\tau_d = 0,1921\tau_u = 1,5368 \quad (4.32)$$

Por lo que el controlador quedará definido por la función de transferencia:

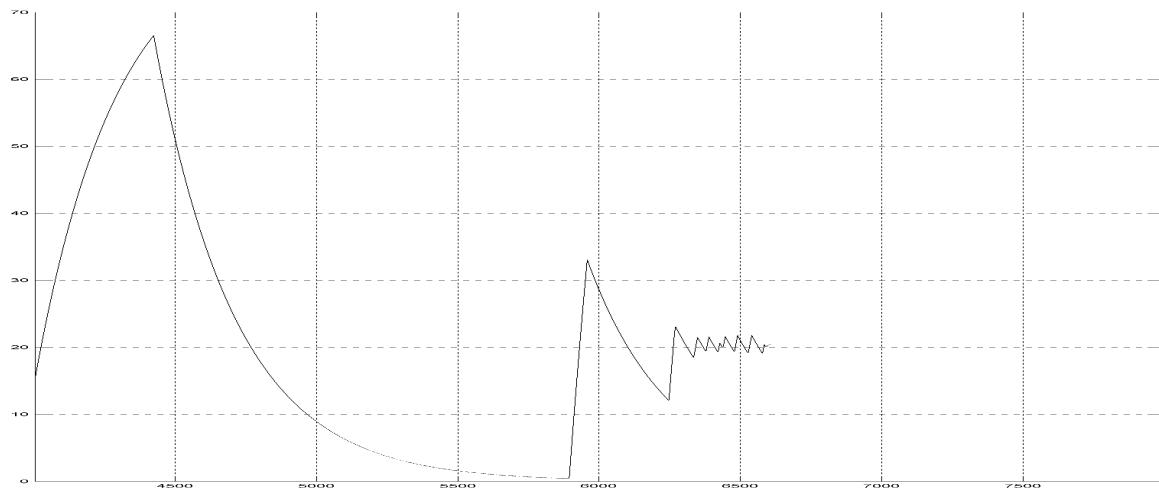
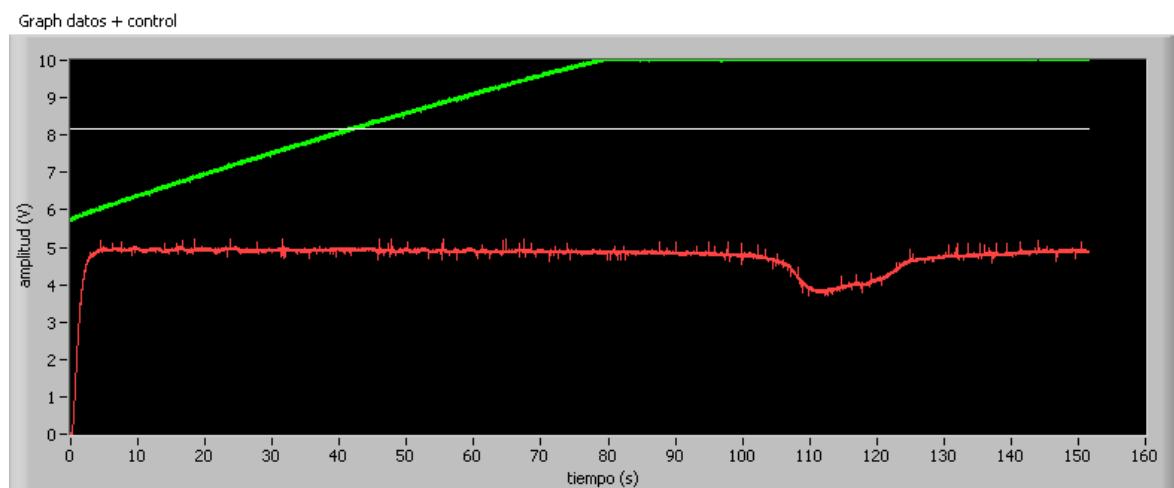
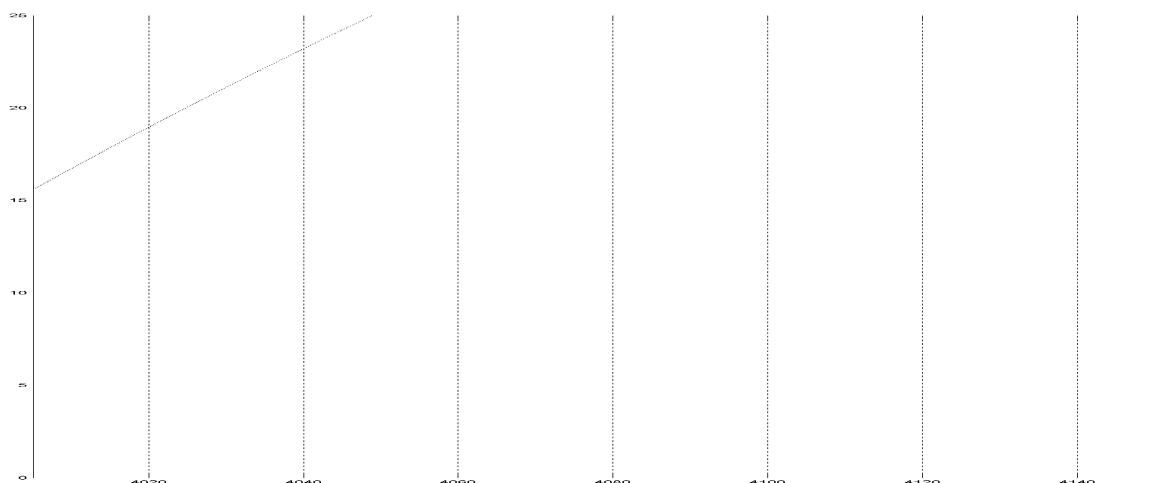
$$G_{PID}(s) = 55,44 \left( 1 + \frac{1}{6,148s} + 1,5368s \right) \quad (4.33)$$

Cuya expresión discretizada por el método Tustin es,

$$G_{PID}(z) = \frac{17095,485z^2 - 34079,91z + 16984,6051}{z^2 - 1} \quad (4.34)$$

Y traduciendo esta expresión a su salida en voltios en lugar de en centímetros:

$$G_{PID}(z) = \frac{6838,194z^2 - 13631,964z + 6793,842}{z^2 - 1} \quad (4.35)$$

**Figura 4.39a - Simulación****Figura 4.39b - Referencia, nivel de líquido y caudal para los nuevos márgenes****Figura 4.39c - Simulacion del nivel**

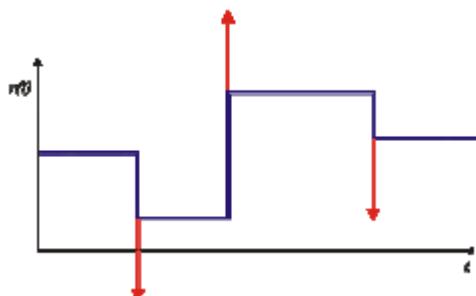
#### 4.2.4 - Modificación de la acción derivativa del PID

La estructura de PID típica genera diversos problemas enunciados a continuación en relación a la acción que los ocasiona. En cuanto a la parte derivativa el derivador puro  $\tau_d s$  es irrealizable, amplifica los ruidos en el sensor y genera picos ante cambios bruscos en la referencia (*derivative-kick*). Por parte de la acción integral las limitaciones de los actuadores (saturación) pueden generar valores muy altos del integrador. Referente a la parte proporcional del controlador el alto rechazo a las perturbaciones puede causar sobreoscilaciones en el seguimiento de la referencia, especialmente ante cambios bruscos en la misma.

La estructura típica es un sistema basado en el error de realimentación, siendo la acción derivativa:

$$D(t) = K T_d \frac{de(t)}{dt} = K T_d \left( \frac{dH_{REF}(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} \right) \quad (4.36)$$

La referencia de entrada al sistema es constante y es sometida a cambios bruscos (“*derivative kick*”) por lo que  $\frac{dH_{REF}(t)}{dt} \rightarrow \pm\infty$



**Figura 4.40 - Picos en la referencia**

Estos cambios bruscos producen desgaste y pueden llevar a la planta a una región no lineal. Para evitarlo se alimenta el derivador directamente con la salida:

$$D(t) = K T_d \frac{dh(t)}{dt}$$

$$u(s) = e(s) \left( 118,8 + \frac{29,7}{s} \right) + 118,8 h(s) \quad (4.37)$$

Discretizando por el método de Tustin:

$$u(z) = e(z) \left( 118,8 + \frac{0,1485(z+1)}{z-1} \right) + \frac{23760(z-1)}{z+1} h(z)$$

$$u(z) = e(z) \frac{118,8(z^2 - 1) + 0,1485(z+1)^2}{(z-1)(z+1)} + \frac{23760(z-1)^2}{(z-1)(z+1)} h(z)$$

$$u(z) = \frac{e(z)[118,8(z^2 - 1) + 0,1485(z^2 + 2z + 1)] + h(z)23760(z^2 - 2z + 1)}{z^2 - 1} \quad (4.38)$$

Multiplicando por  $z^{-2}$ :

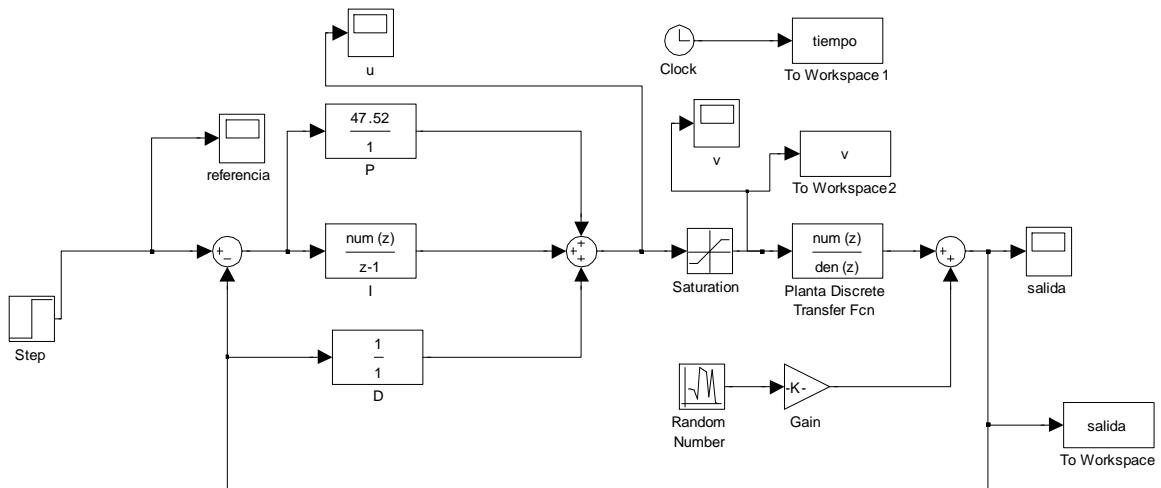
$$u(z) = \frac{e(z)[118,8(1 - z^{-2}) + 0,1485(1 + 2z^{-1} + z^{-2})] + h(z)23760(1 - 2z^{-1} + z^{-2})}{1 - z^{-2}}$$

$$u(z) = \frac{e(z)(118,8 - 118,8z^{-2} + 0,1485 + 0,297z^{-1} + 0,1485z^{-2}) + h(z)(23760 - 47520z^{-1} + 23760z^{-2})}{(1 - z^{-2})} \quad (4.39)$$

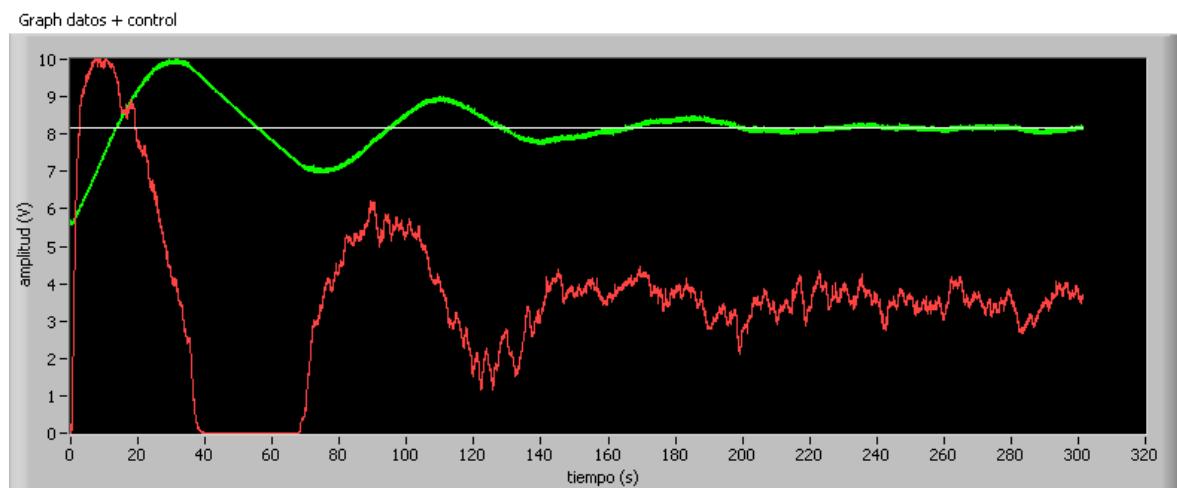
Y expresado en función de las muestras tomadas en LabVIEW se la modificación en la alimentación de la acción derivativa podrá ser llevada a cabo en el ensayo real de la maqueta:

$$u(k) - u(k-2) = 118,9485e(k) + 0,297e(k-1) - 118,503e(k-2) + 23760h(k) - 47520h(k-1) + 23760h(k-2)$$

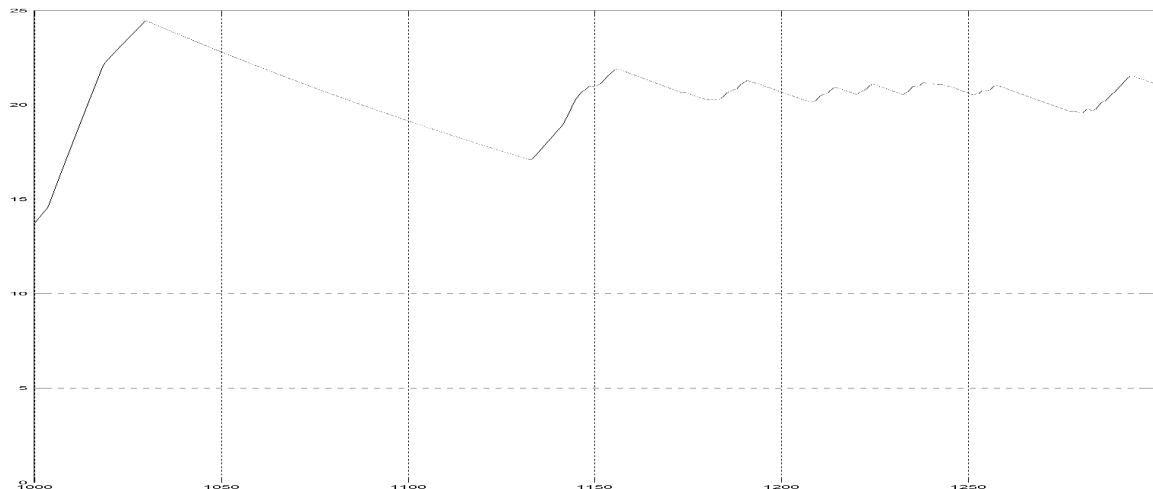
$$u(k) = u(k-2) + 118,9485e(k) + 0,297e(k-1) - 118,503e(k-2) + 23760h(k) - 47520h(k-1) + 23760h(k-2) \quad (4.40)$$



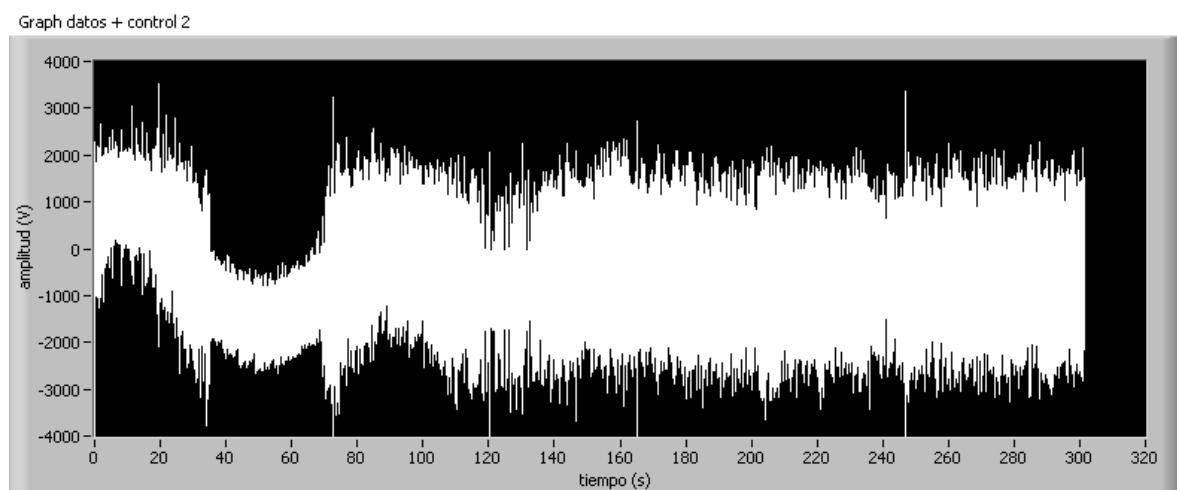
**Figura 4.41a - Alimentación de la acción derivativa con la señal de altura**



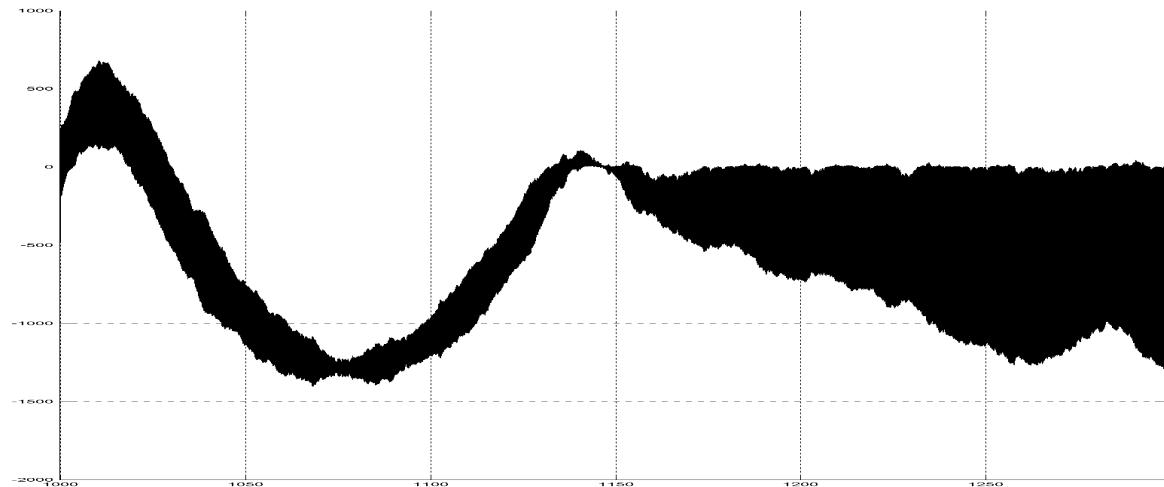
**Figura 4.41b - Referencia, nivel de líquido y caudal para la nueva realimentación**



**Figura 4.41c - Simulación**



**Figura 4.41d - Acción de control**



**Figura 4.41e - Simulación de la acción de control**

El pico de salida ha pasado a estar en el rango de 60 a 70 cm a ser inferior a 25 cm y por tanto dentro del rango de estudio de la maqueta. Los niveles que se alcanzan ahora entonces se han reducido de forma considerable luego se ha vencido el efecto del “*derivative kick*”.

Por otro lado, la derivación amplifica los ruidos, suponiendo una señal w

$$n(t) = a \sin wt \rightarrow d/dt \rightarrow \frac{dn(t)}{dt} = aw \cos wt \quad (4.41)$$

El factor de amplificación es proporcional a la frecuencia, con lo cual para limitarlo se agrega al derivador un filtro paso-bajo añadiendo un polo al controlador.

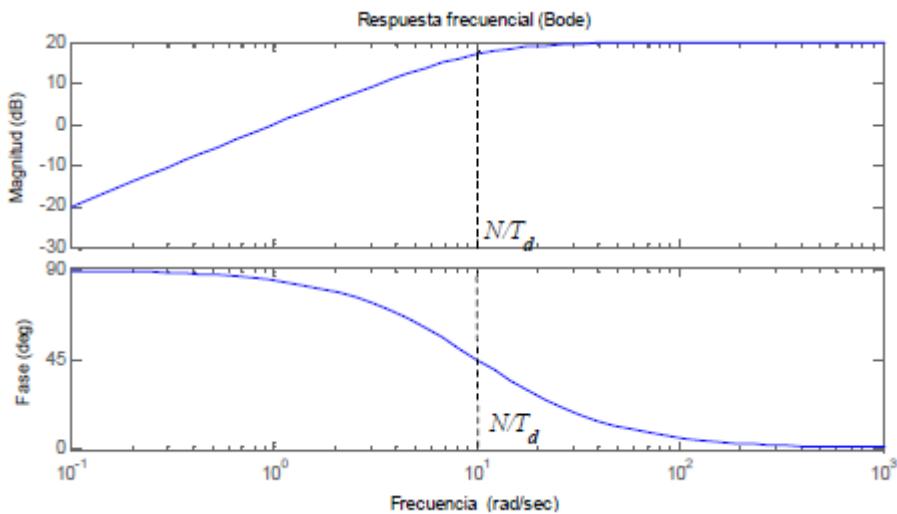
$$\frac{\tau_d}{N} \frac{dD(t)}{dt} + D = -K \tau_d \frac{dh(t)}{dt} \quad (4.42)$$

Haciendo la transformada de Laplace de esta expresión,

$$\frac{\tau_d}{N} sD(s) + D(s) = -K \tau_d sh(s)$$

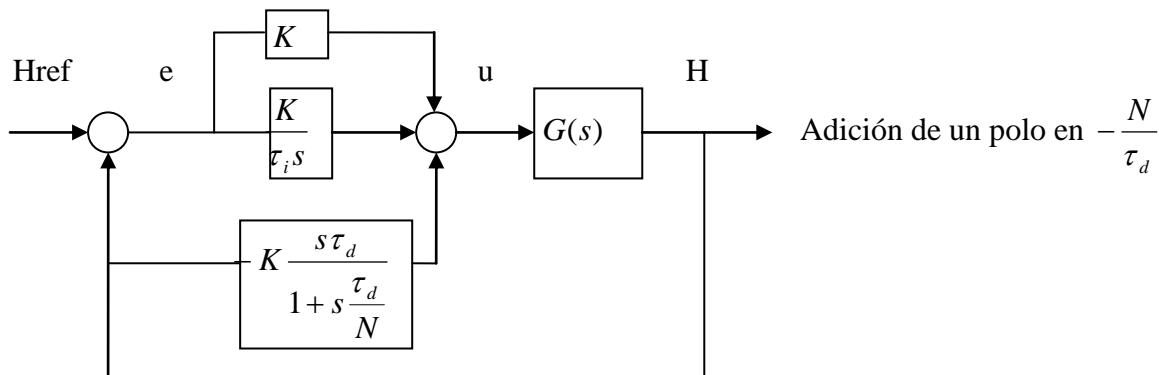
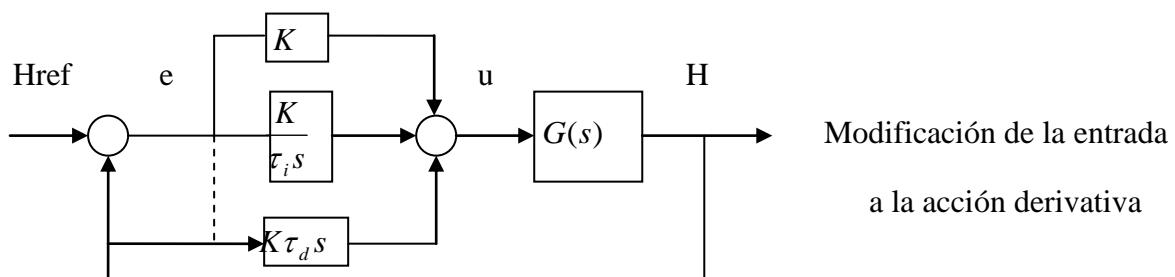
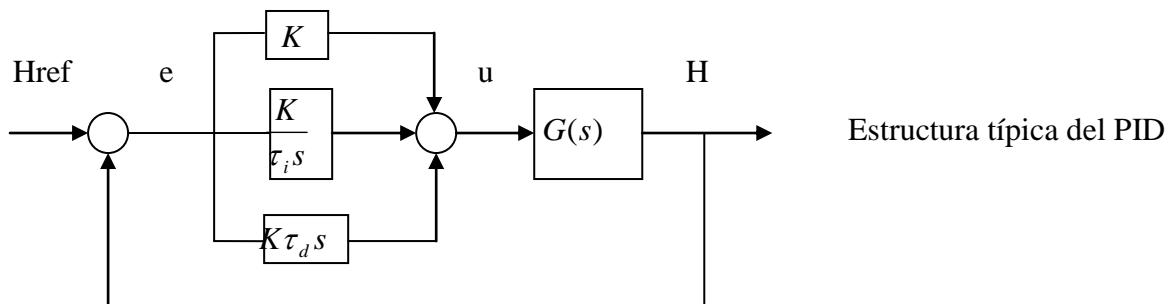
$$D(s) \left( 1 + s \frac{\tau_d}{N} \right) = -K \tau_d sh(s)$$

$$D(s) = -K \frac{s \tau_d}{1 + s \frac{\tau_d}{N}} h(s) \quad (4.43)$$



**Figura 4.42 - Diagrama de Bode con un nuevo polo**

Típicamente  $8 < N < 20$  luego para  $N=10$  el polo añadido se encuentra en -10 por lo que va a estar totalmente dominado y su comportamiento no va a influir prácticamente en la dinámica del sistema. Con todo esto la nueva estructura del controlador será la siguiente:



Por tanto una vez implementado el esquema de la simulación basta con calcular la relación entre el error y la altura con la señal de control correspondiente. La relación en el dominio de  $S$  es la que sigue:

$$u(s) = e(s) \left( K + \frac{K}{\tau_i s} \right) - h(s) \left( \frac{K \tau_d s}{1 + s \frac{\tau_d}{N}} \right) \quad (4.44)$$

Donde  $K = 118,8$   $\tau_i = 4$   $\tau_d = 1$  y  $N = 10$ . Si ahora se discretiza con un periodo de  $T = 0,01\text{seg}$  y mediante el método de Tustin por el cual  $\frac{1}{s} \approx \frac{z+1}{T(z-1)}$ :

$$\begin{aligned} u(z) &= e(z) \left( 118,8 + \frac{0,1485(z+1)}{(z-1)} \right) - h(z) \left( \frac{\frac{23760(z-1)}{(z+1)}}{\frac{(z+1)}{(z+1)} + \frac{20(z-1)}{(z+1)}} \right) \\ u(z) &= e(z) \left( 118,8 + \frac{0,1485(z+1)}{(z-1)} \right) - h(z) \left( \frac{23760(z-1)}{(21z-19)} \right) \\ u(z) &= \frac{e(z)[118,8(21z^2 - 40z + 19) + 0,1485(21z^2 + 2z - 19)] - h(z)(23760z^2 - 47520z + 23760)}{(z-1)(21z-19)} \\ u(z) &= \frac{e(z)(2497,9185z^2 - 4751,703z + 2260,0215) - h(z)(23760z^2 - 47520z + 23760)}{(21z^2 + 2z - 19)} \end{aligned} \quad (4.45)$$

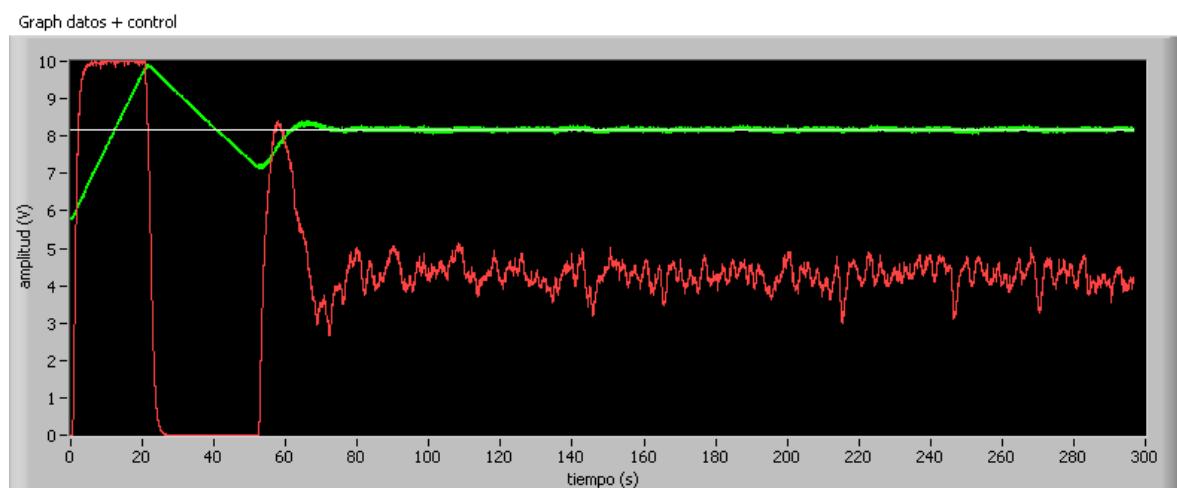
Retrasando un par de muestras:

$$u(z) = \frac{e(z)(2497,9185 - 4751,703z^{-1} + 2260,0215z^{-2}) - h(z)(23760 - 47520z^{-1} + 23760z^{-2})}{(21 + 2z^{-1} - 19z^{-2})}$$

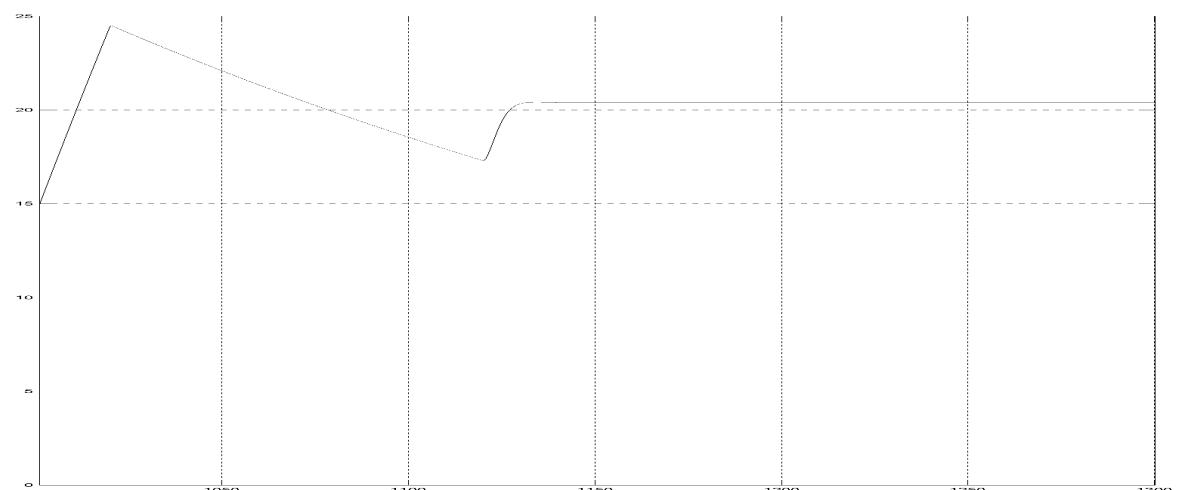
$$21u(kt) + 2u(kt-1) - 19u(kt-2) = 2497,9185e(kt) - 4751,703e(kt-1) + 2260,0215e(kt-2) - 23760h(kt) + 47520h(kt-1) - 23760h(kt-2)$$

$$u(k) = \frac{19u(k-2) - 2u(k-1) + 2497,9185e(k) - 4751,703e(k-1) + 2260,0215e(k-2) - 23760h(k) + 47520h(k-1) - 23760h(k-2)}{21} \quad (4.46)$$

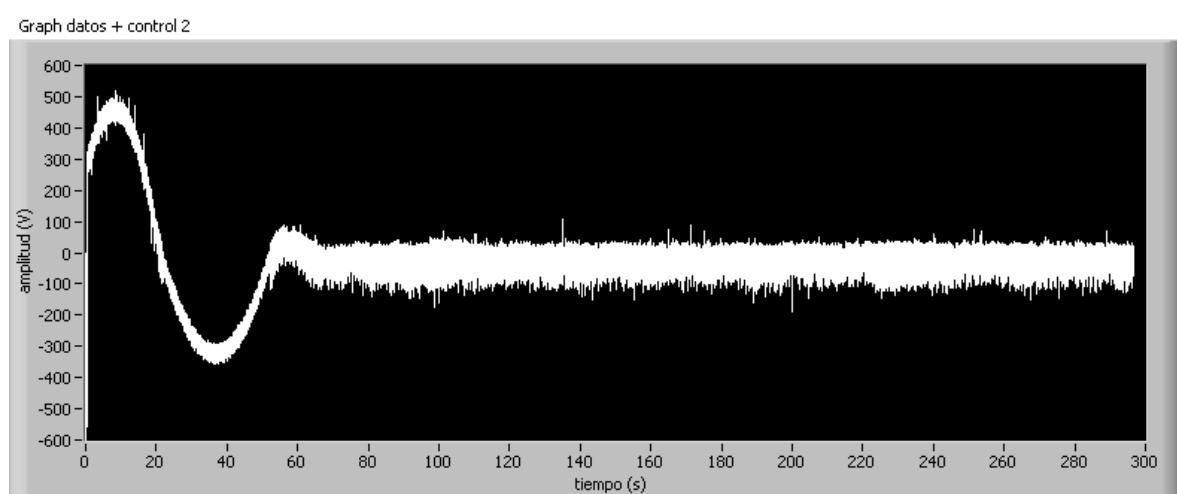
Por tanto si se implementan estos parámetros en el SubVI de alta prioridad en LabVIEW podrá observarse la dinámica del sistema tras colocar un polo en -10.



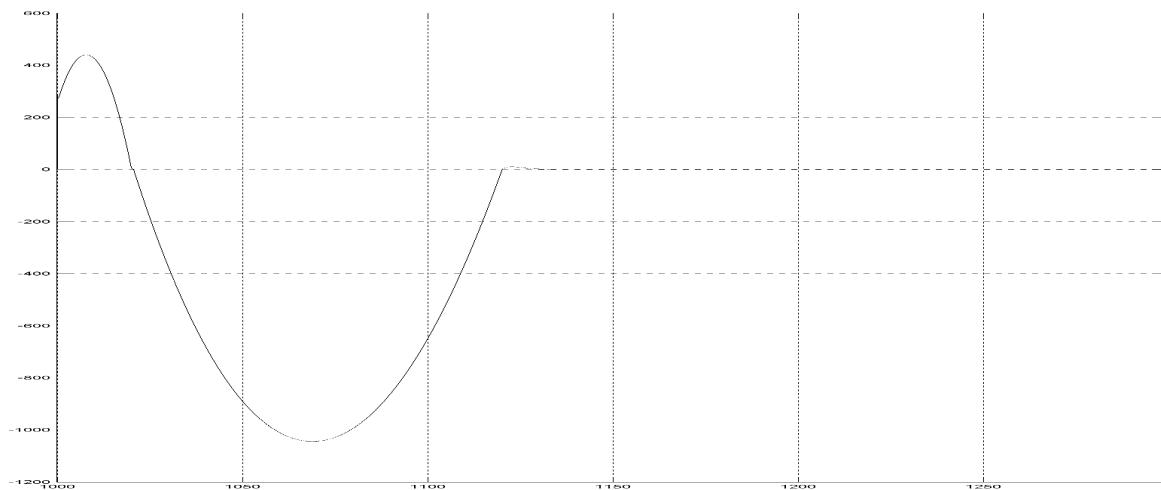
**Figura 4.43a - Referencia, altura y caudal para la introducción del polo**



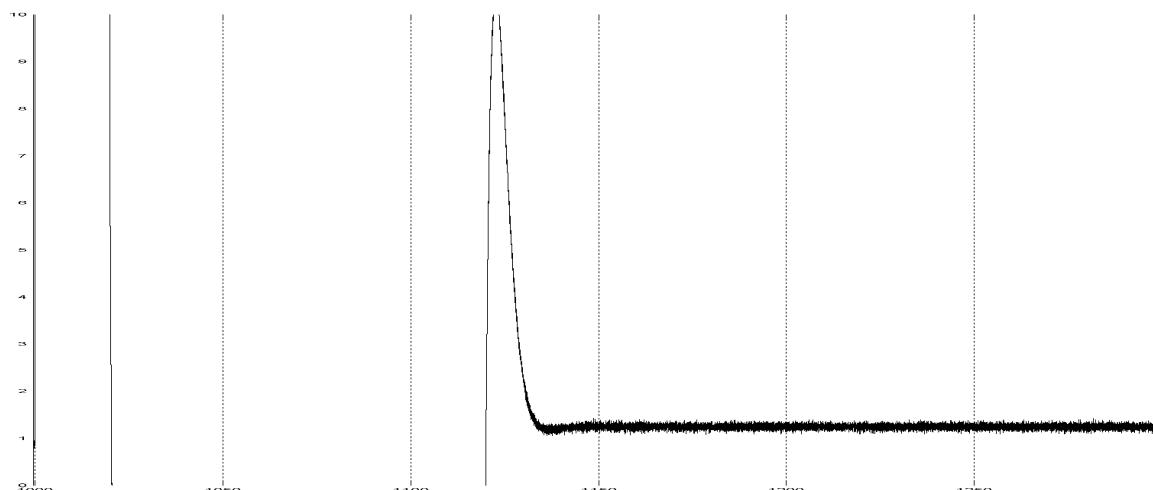
**Figura 4.43b - Simulación**



**Figura 4.43c - Acción de control**



**Figura 4.43d - Simulación de la acción de control**



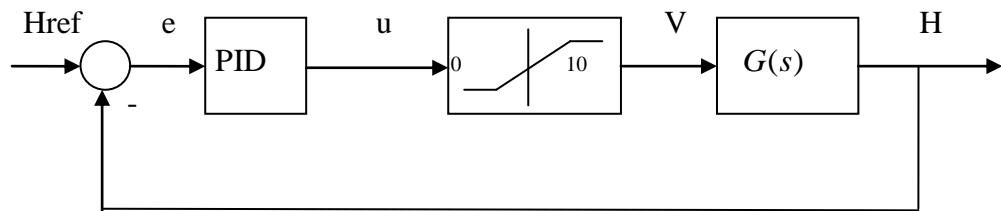
**Figura 4.43e - Tensión de entrada a la bomba**

Con la inserción de un nuevo polo lo suficientemente alejado del origen como para que no influya en el verdadero comportamiento del sistema se consigue que las variaciones bruscas en la señal de la acción de control queden suavizadas y por tanto esta señal limitada entre los 0 y los 10 Voltios este mucho menos truncada y por tanto sea menos agresiva en cuanto al funcionamiento real de la misma. No obstante a pesar de estas modificaciones en la acción derivativa del PID no se consigue que la respuesta del sistema sea todo lo buena que cabría esperar. Es por ello que ahora el estudio se va a centrar en la acción integradora del controlador.

#### **4.2.5 - Modificación de la acción integradora del PID**

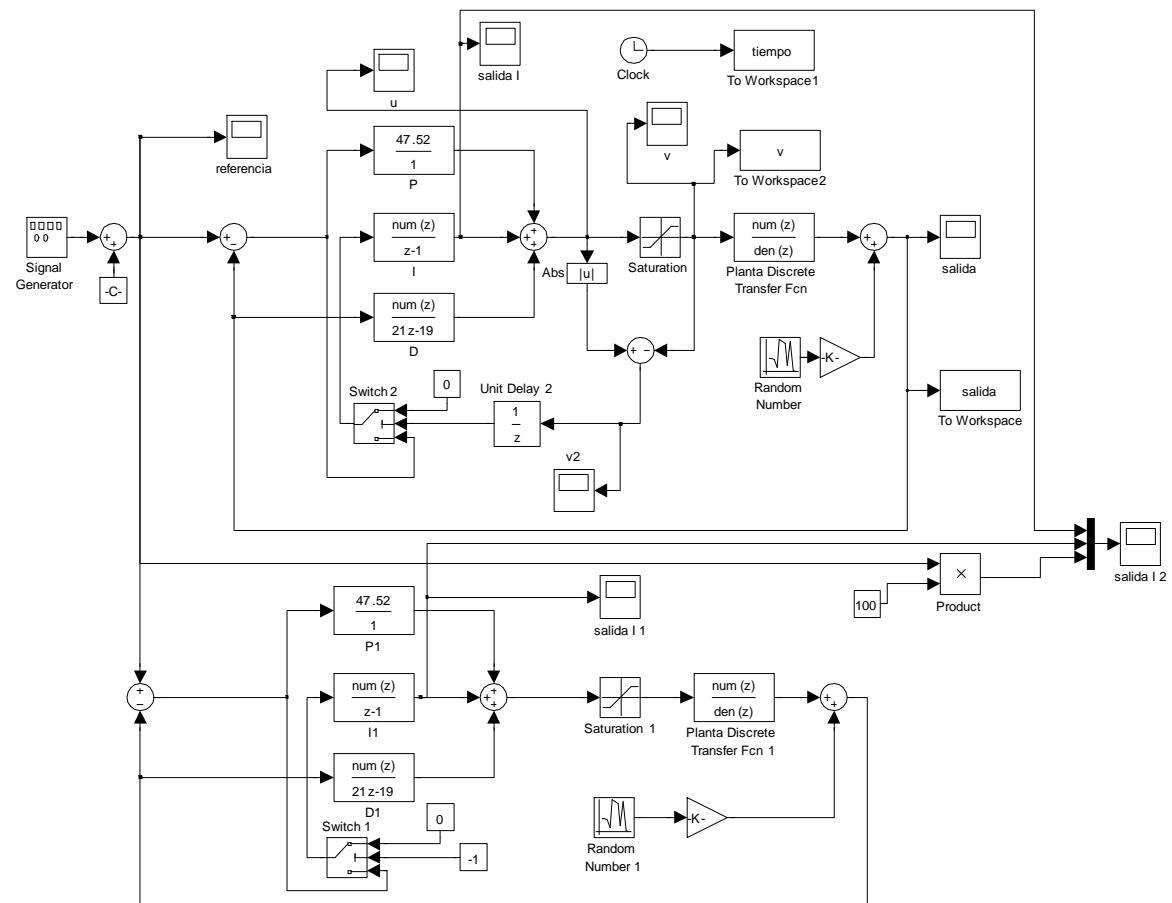
El principal problema de los integradores se debe a la limitación del actuador que controla la variable de entrada a la planta, en este caso la limitación del rango de operación

de la bomba entre 0 y 10 V. Así cuando la bomba satura el sistema funciona en lazo abierto puesto que mantiene un nivel de tensión fijo independientemente de la variable de salida.



**Figura 4.44 - Diagrama de bloques incluido el limitador de la bomba**

Así el error generado por la saturación si es prolongado hará que la acción integral siga integrando y que el término integral pueda alcanzar valores muy altos. A este efecto se le conoce como “*wind up*”. Para volver a valores normales es preciso que el error se haga negativo. Asimismo el *wind up* se puede generar por grandes cambios bruscos de la referencia o fuertes perturbaciones. Este efecto sin embargo se puede corregir, y para ello hay que evitar que el integrador se “sobrecargue” cuando la bomba se encuentra en saturación. Existen diferentes métodos como el método realimentado o el método anti-windup forzado. Este último trata de mantener  $I_{\min} < I(t) < I_{\max}$  con  $I_{\min} = u_{\min}$  y  $I_{\max} = u_{\max}$ . En el caso en el que  $|I(t)| > I_{\min}$  se desconecta el error y se introduce un cero en la entrada del integrado.



**Figura 4.45a - Simulación de la nueva alimentación en Simulink**

Una vez generado el diagrama a simular hay que implementar este mismo esquema la propia maqueta de tanques acoplados por lo que será necesario crear un subVI que genere el adecuado algoritmo de control. Para ello se crea una estructura de tipo *case* de forma que en el caso de que la acción de control se encuentre en la zona de saturación ( $0 \leq u \leq 10$ ) se aplique exactamente la misma norma que para el caso anterior, es decir se tiene que cumplir que:

$$u(k) = \frac{19u(k-2) - 2u(k-1) + 2497,9185e(k) - 4751,703e(k-1) + 2260,0215e(k-2) - 23760h(k) + 47520h(k-1) - 23760h(k-2)}{21} \quad (4.47)$$

No obstante en el caso de que la señal de control  $u$  se encuentre fuera de los límites de operación de la bomba la alimentación a la parte integral será nula luego:

$$u(z) = e(z)118,8 - h(z) \left( \frac{23760(z-1)}{(21z-19)} \right)$$

$$u(z) = \frac{e(z)(2494,8z - 2257,2) - h(z)(23760z - 23760)}{(21z-19)} \quad (4.48)$$

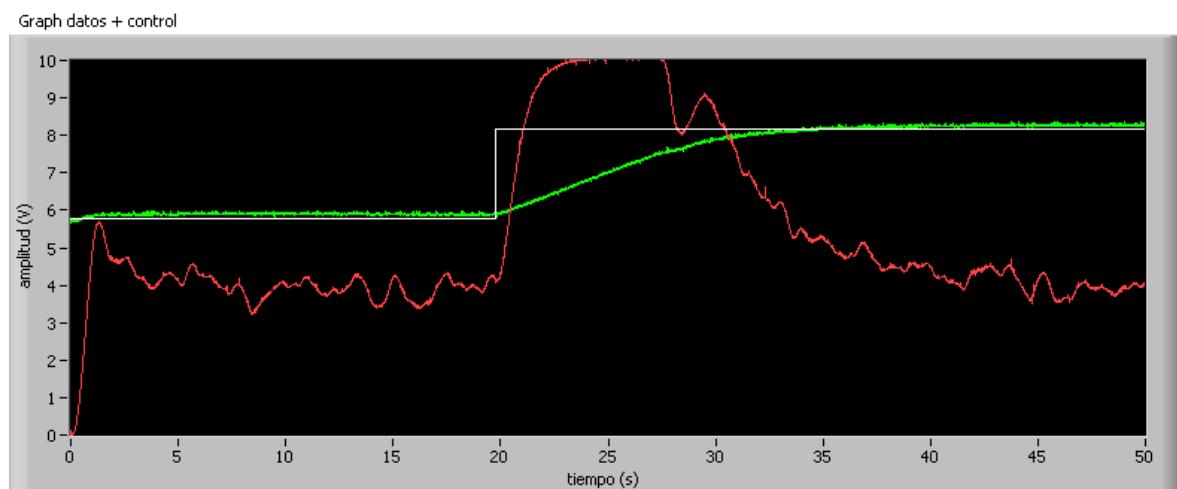
Retrasando una muestra:

$$u(z) = \frac{e(z)(2494,8 - 2257,2z^{-1}) - h(z)(23760 - 23760z^{-1})}{(21 - 19z^{-1})}$$

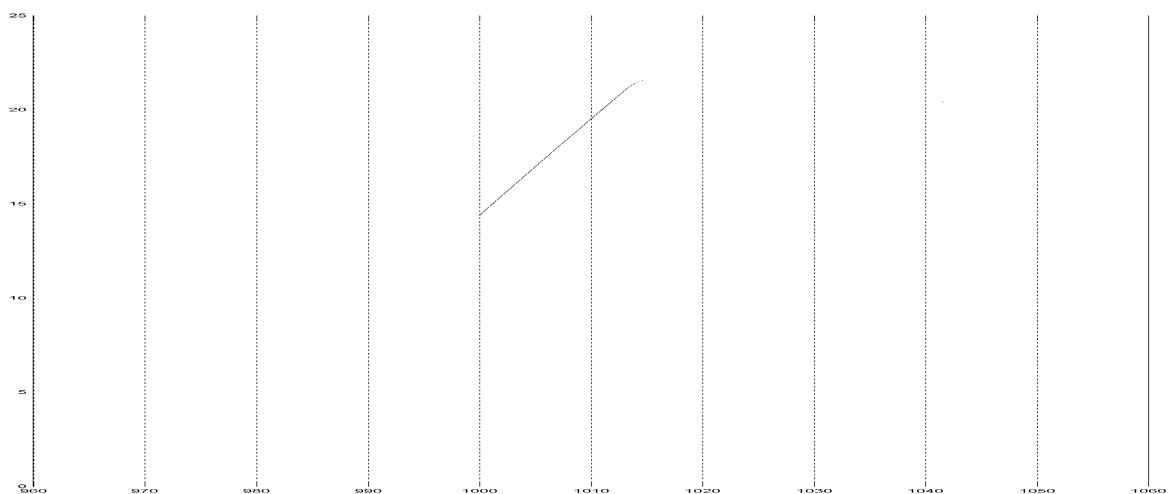
$$21u(kt) - 19u(kt-1) = 2494,8e(kt) - 2257,2e(kt-1) - 23760h(kt) + 23760h(kt-1)$$

$$u(kt) = \frac{19u(kt-1) + 2494,8e(kt) - 2257,2e(kt-1) - 23760h(kt) + 23760h(kt-1)}{21} \quad (4.49)$$

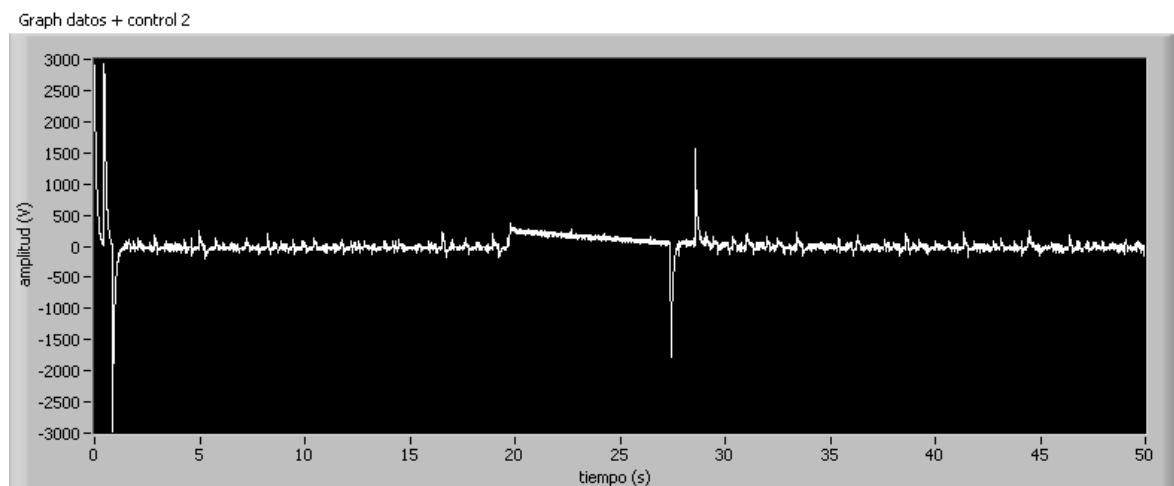
Luego la nueva respuesta del sistema con la supresión del fenómeno del *wind up* es la siguiente:



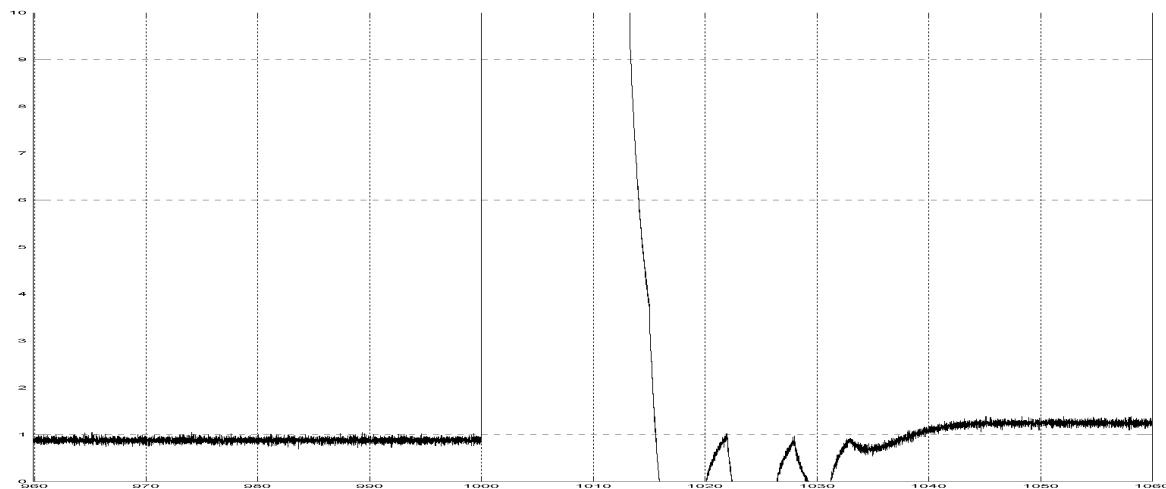
**Figura 4.45b - Referencia, altura y caudal tras suprimir el efecto antiwindup**



**Figura 4.45c - Simulación de la salida**



**Figura 4.45d - Acción de control**



**Figura 4.45e - Simulación de la tensión de entrada (acción de control en saturación)**

Se observa en definitiva que si se elimina el efecto *windup* la señal de la acción de control es mucho más moderada ya que la acción integral queda deshabilitada en el momento en que se produce una brusca variación en la referencia, es decir cuando es aplicado el escalón. Gracias a ello la respuesta del nivel de líquido es más rápida ya que el nuevo nivel de equilibrio se alcanza apenas 15 segundos después de la entrada en escalón. Además al ser menos abrupta la señal de la acción de control también lo será la entrada a la bomba y por tanto hará que se encuentre en buenas condiciones de trabajo.

Se consigue de este modo un buen control del sistema obteniendo un buen equilibrio entre rapidez de la respuesta y estabilidad en el punto de equilibrio.

## **Capítulo 5: Conclusiones**

El último apartado del proyecto centrado en el control de tanques acoplador versará acerca de los posibles estudios y trabajos que pueden ser realizados a partir de este estadio. Relativo al control, el algoritmo hallado tras las modificaciones en la acción derivativa y en la acción integral consigue una buena respuesta, pero esta puede ser mejorable. Véase en el momento en el que se produce el escalón el caudal pasa a su valor máximo en unos 5 segundos. La rapidez de la respuesta aumentaría entonces con un nuevo algoritmo de control que disminuyera este tiempo. Otro aspecto corregible es la caída, subida y posterior recaída del valor del caudal. El sistema estudiado alcanzaría su nuevo nivel de equilibrio más rápidamente si únicamente disminuyera en una ocasión.

Sin lugar a dudas un aspecto que mejoraría de forma considerable este estudio es la permutación de la actual bomba de la maqueta por una nueva. Durante los diferentes ensayos que han sido llevados a cabo en la maqueta ha influido de forma negativa la variabilidad en el aporte de caudal de la bomba.

En el apartado de la simulación ha influido profusamente la necesidad de colocar las válvulas inferiores en una posición concreta de forma únicamente manual. A pesar de estar calibradas cada una de estas posiciones numéricamente una pequeña variación, por minúscula que sea hace que el tanque se vacíe más rápidamente o más lentamente y que por tanto la recta de vaciado tenga una pendiente mayor o menor en cada caso. Es por esto que podría implantarse una válvula motorizada, o de forma más sencilla acoplar un servomotor que haga que la válvula de paso variable tome cada una de las posiciones de forma precisa y exacta independientemente de los ensayos que se hagan sobre la maqueta. Este grado de apertura para cada caso podría ser controlado al mismo tiempo con un algoritmo que controle la apertura de la válvula ante una consigna introducida por el propio usuario siendo esta un valor entre 0 (completamente cerrada) y 5 (completamente abierta).

Una vez fue comprado el sensor de ultrasonidos de Carlo Gavazzi y comprobado su correcto funcionamiento en esta aplicación se optó por adquirir otro sensor idéntico a este a fin de ser colocado esta vez sobre el tanque derecho. Para ello al tiempo que se practicó el agujero en la estructura de policarbonato donde está alojado el sensor del tanque izquierdo se realizó simétricamente el agujero donde iría ubicado el otro sensor, de forma que el trabajo quedara simplificado.

Para que el control de los tanques acoplados ofrezca el máximo abanico de posibilidades sería idóneo implantar una segunda bomba de iguales características que la bomba que aporta líquido al tanque izquierdo pero para el segundo tanque. De este modo con dos aportes diferentes de líquido pueden obtenerse distintos niveles de equilibrio y al mismo tiempo pueden manipularse las válvulas para conseguir diferentes combinaciones.

Teniendo en cuenta la experiencia adquirida con la realización del proyecto si ahora se tratara de volver a realizarlo la perspectiva sería muy diferente. Para empezar el tiempo dedicado al mismo se vería reducido considerablemente. Además desde este punto se tiene una perspectiva mucho más global y general del proyecto de control de los tanques acoplados que en el momento en el que se realizó la propuesta del proyecto planteando el esquema de tareas que iban a realizarse. Igualmente partir de los conocimientos ya adquiridos facilitaría en gran medida la labor a diferencia de en etapas de desarrollo del proyecto en las que estos conocimientos iban adquiriéndose a medida que se iba avanzando en la realización del mismo.

En lo referente al programa de LabVIEW en el inicio del proyecto se desconocía por completo la metodología y funcionamiento de este programa sin embargo con la finalización del mismo cabría decir que se ha llegado a comprender y manejar con gran soltura, al menos los aspectos vinculados con la temática desarrollada. A diferencia de LabVIEW, el programa Matlab (del mismo modo que Simulink) sí que había sido utilizado con anterioridad pero la gran dedicación de tiempo y su uso como herramienta de trabajo habitual durante todo el desarrollo del proyecto ha permitido mejorar de forma considerable la habilidad de manejo del mismo.

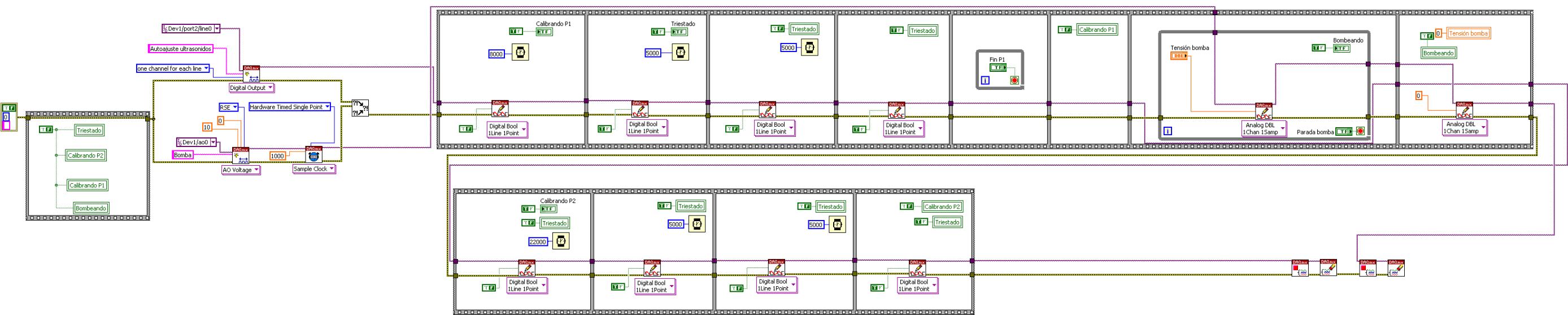
La búsqueda del nuevo sensor de nivel del líquido habría sido mucho más precisa una vez se conoce la variedad y tipos de sensores que existen en el mercado por lo que su compra habría sido más rápida, a pesar de que el sensor adquirido habría sido el mismo ya que se ha comprobado que su ajuste a la aplicación de medida del nivel del tanque ha sido óptima.

Los problemas de funcionamiento que han ido surgiendo con el RT a lo largo de todo el proyecto, si ocurrieran actualmente serían subsanados con mucha más brevedad y efectividad que en su momento ya que los mismos fallos han hecho tener que profundizar en aspectos más relacionados con la propia informática permitiendo así conocer los entresijos del funcionamiento del target.

En definitiva si con los conocimientos adquiridos hasta este momento se tuviera que realizar de nuevo el proyecto de control de los tanques acoplados, su desarrollo se vería simplificado de forma considerable y por tanto podría realizarse en un periodo de tiempo mucho más corto.

## **Bibliografía**

- [1] TecQuipment Ltd, *catálogo CE105 Coupled Tanks Apparatus*
- [2] Karemlyg Marin, Benjamin Alayon and Diego Quintero, *Bombas de Diafragma*
- [3] RS Online, *catálogo transductor de caudal*
- [4] Mathworks, *tutorial Matlab y Simulink*
- [5] Yang Fang and Xiaobo Tan, 2008, *Design and Modeling of a petal-Shape conjugated polymer-actuated micropump*
- [6] Katsuhiko Ogata, 1987, *Discrete-Time Control Systems*, Prentice-Hall Inc, NJ.
- [7] National Instruments, *LabVIEW User Manual*
- [8] Carlo Gavazzi, *Catálogo de productos*
- [9] Yang Fang and Xiaobo Tan, 2009, *Conjugated Polymer Petals: Fabrication, Modeling and Experimental Results*
- [10] Ecfa Sensores, *catálogo sensors de presión*
- [11] Elke Laubwald and Marco Antonio Pérez de Cisneros, *Coupled Tanks Systems*
- [12] DIAdem, *Tutorial*



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

CALIBRADO SENSOR ULTRASONIDOS

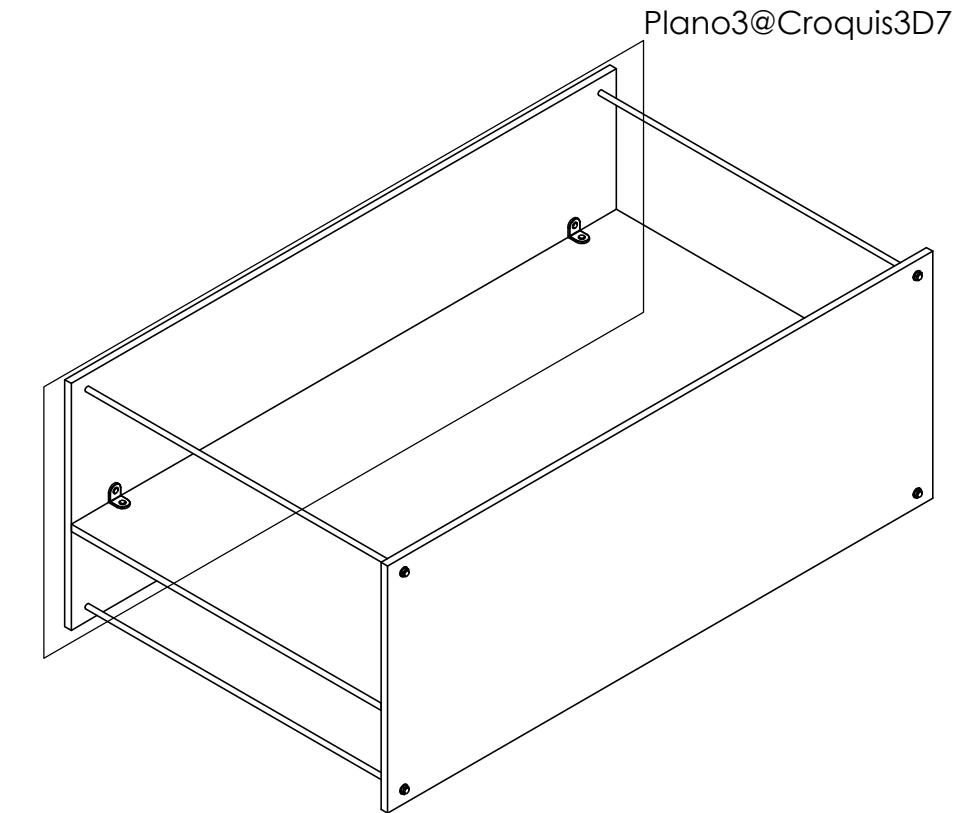
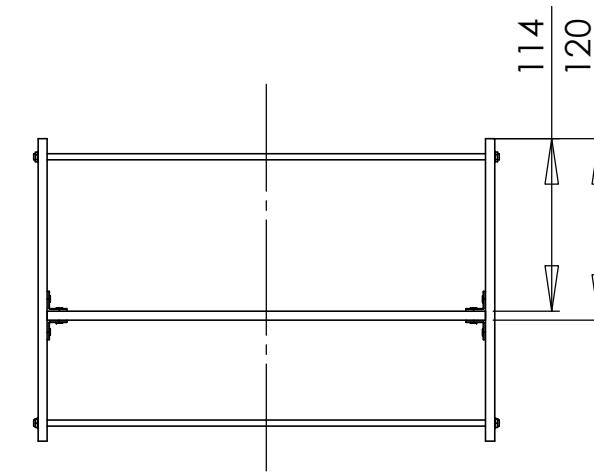
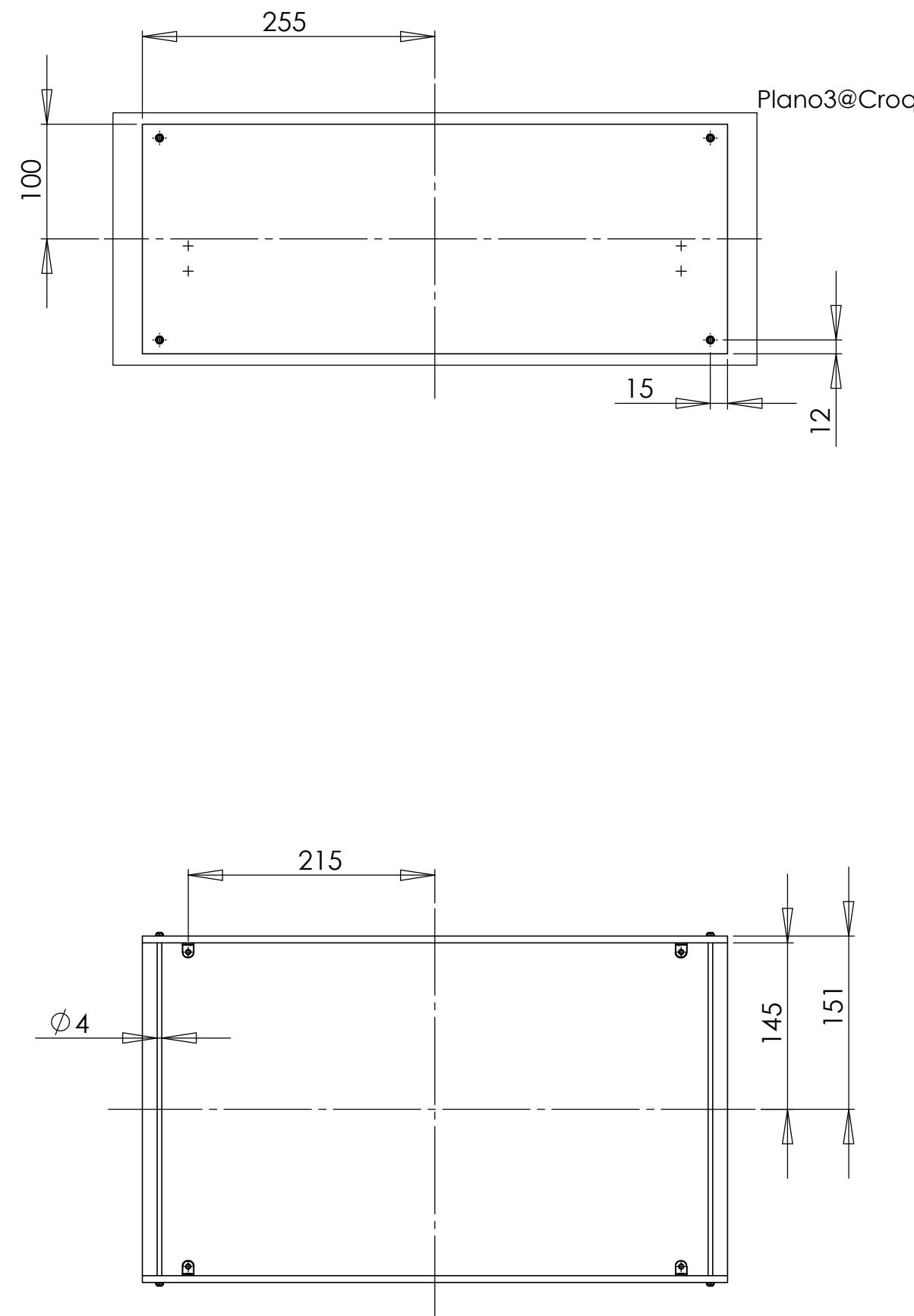
**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO  
DE AUTOMATICA  
Y COMPUTACION**

REALIZADO:  
**PEREZ IZQUIETA,SARA**

FIRMA:

FECHA: **06 / 11** ESCALA: **Nº PLANO:**  
**1**



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Universitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO  
DE AUTOMATICA  
Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA,SARA**

FIRMA:

PLANO:

**ESTRUCTURA SENSOR ULTRASONIDOS**

FECHA:	06 / 11	ESCALA:	1:5	Nº PLANO:	2
--------	---------	---------	-----	-----------	---

A3a – DATOS DEL ENSAYO DE LA VALVULA 1, POSICION 1

POS 1					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
17	0,00	3.451	8,63	623,34	
10.000	0,17	3.414	8,54	616,65	40,17
19.999	0,33	3.386	8,47	611,60	30,35
29.999	0,50	3.357	8,39	606,36	31,43
39.998	0,67	3.309	8,27	597,69	52,03
49.997	0,83	3.275	8,19	591,55	36,85
59.996	1,00	3.270	8,18	590,64	5,42
69.996	1,17	3.217	8,04	581,07	57,44
79.995	1,33	3.160	7,90	570,78	61,78
89.994	1,50	3.142	7,86	567,52	19,51
99.994	1,67	3.124	7,81	564,27	19,51
109.993	1,83	3.072	7,68	554,88	56,36
119.992	2,00	3.041	7,60	549,28	33,60
129.992	2,17	2.984	7,46	538,99	61,77
149.990	2,50	2.953	7,38	533,39	16,80
159.990	2,67	2.921	7,30	527,61	34,68
169.989	2,83	2.847	7,12	514,24	80,21
179.988	3,00	2.835	7,09	512,07	13,01
189.988	3,17	2.788	6,97	503,58	50,94
199.987	3,33	2.765	6,91	499,43	24,93
209.986	3,50	2.741	6,85	495,09	26,01
219.985	3,67	2.716	6,79	490,58	27,10
229.985	3,83	2.674	6,69	482,99	45,52
239.984	4,00	2.660	6,65	480,46	15,17
249.983	4,17	2.594	6,49	468,54	71,53
259.983	4,33	2.553	6,38	461,14	44,43
269.982	4,50	2.529	6,32	456,80	26,01
279.981	4,67	2.495	6,24	450,66	36,85
289.981	4,83	2.471	6,18	446,32	26,01
299.980	5,00	2.447	6,12	441,99	26,01
309.979	5,17	2.391	5,98	431,87	60,70
319.979	5,33	2.346	5,87	423,75	48,77
329.978	5,50	2.322	5,81	419,41	26,01
339.977	5,67	2.304	5,76	416,16	19,51
349.977	5,83	2.264	5,66	408,94	43,35
359.976	6,00	2.232	5,58	403,16	34,68
369.975	6,17	2.200	5,50	397,38	34,68
379.974	6,33	2.166	5,42	391,23	36,85
389.974	6,50	2.146	5,37	387,62	21,67
399.973	6,67	2.114	5,29	381,84	34,68
409.972	6,83	2.135	5,34	385,63	-22,76
419.972	7,00	2.034	5,09	367,39	109,46
429.971	7,17	2.020	5,05	364,86	15,17

A3b – DATOS ENSAYO VALVULA 1, POSICION 2

POS 2					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	ΔCAUDAL (cm <sup>3</sup> /min)
9.999	0,17	9.480	23,70	1712,33	
10.999	0,18	9.373	23,43	1693,00	1159,61
11.999	0,20	9.296	23,24	1679,09	834,49
12.999	0,22	9.219	23,05	1665,18	834,49
13.999	0,23	9.134	22,84	1649,83	921,19
14.999	0,25	9.050	22,63	1634,66	910,35
15.999	0,27	8.965	22,41	1619,30	921,19
16.999	0,28	8.878	22,20	1603,59	942,86
17.999	0,30	8.797	21,99	1588,96	877,84
18.999	0,32	8.728	21,82	1576,50	747,79
19.999	0,33	8.663	21,66	1564,75	704,44
20.998	0,35	8.585	21,46	1550,67	846,17
21.998	0,37	8.494	21,24	1534,23	986,21
22.998	0,38	8.408	21,02	1518,70	932,03
23.998	0,40	8.329	20,82	1504,43	856,16
24.998	0,42	8.247	20,62	1489,61	888,68
25.998	0,43	8.172	20,43	1476,07	812,81
26.998	0,45	8.108	20,27	1464,51	693,60
27.998	0,47	8.039	20,10	1452,04	747,79
28.998	0,48	7.960	19,90	1437,78	856,16
29.998	0,50	7.872	19,68	1421,88	953,70
30.998	0,52	7.784	19,46	1405,99	953,70
31.998	0,53	7.710	19,28	1392,62	801,98
32.998	0,55	7.638	19,10	1379,61	780,30
33.998	0,57	7.559	18,90	1365,34	856,16
34.997	0,58	7.484	18,71	1351,80	813,63
35.997	0,60	7.405	18,51	1337,53	856,16
36.997	0,62	7.320	18,30	1322,18	921,19
37.997	0,63	7.239	18,10	1307,54	877,84
38.997	0,65	7.165	17,91	1294,18	801,97
39.997	0,67	7.098	17,75	1282,08	726,11
40.997	0,68	7.024	17,56	1268,71	801,98
41.997	0,70	6.947	17,37	1254,80	834,49
42.997	0,72	6.883	17,21	1243,24	693,60
43.997	0,73	6.817	17,04	1231,32	715,27
44.997	0,75	6.742	16,86	1217,77	812,81
45.997	0,77	6.675	16,69	1205,67	726,11
46.997	0,78	6.608	16,52	1193,57	726,11
47.997	0,80	6.525	16,31	1178,58	899,51
48.996	0,82	6.439	16,10	1163,04	932,96
49.996	0,83	6.371	15,93	1150,76	736,95
50.996	0,85	6.309	15,77	1139,56	671,92
51.996	0,87	6.223	15,56	1124,03	932,03

A3c – DATOS ENSAYO VALVULA 1, POSICION 3

POS 3					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	ΔCAUDAL (cm <sup>3</sup> /min)
11.000	0,18	8.522	21,31	1539,29	
12.000	0,20	8.337	20,84	1505,87	2004,94
13.000	0,22	8.155	20,39	1473,00	1972,43
14.000	0,23	7.981	19,95	1441,57	1885,73
15.000	0,25	7.816	19,54	1411,77	1788,19
16.000	0,27	7.650	19,13	1381,78	1799,02
17.000	0,28	7.480	18,70	1351,08	1842,38
17.999	0,30	7.317	18,29	1321,63	1768,28
18.999	0,32	7.164	17,91	1294,00	1658,14
19.999	0,33	7.000	17,50	1264,38	1777,35
20.999	0,35	6.820	17,05	1231,86	1950,75
21.999	0,37	6.655	16,64	1202,06	1788,19
22.999	0,38	6.511	16,28	1176,05	1560,60
23.999	0,40	6.359	15,90	1148,59	1647,30
24.999	0,42	6.188	15,47	1117,71	1853,21
25.999	0,43	6.017	15,04	1086,82	1853,21
26.999	0,45	5.858	14,65	1058,10	1723,16
27.999	0,47	5.707	14,27	1030,83	1636,46
28.999	0,48	5.550	13,88	1002,47	1701,49
29.999	0,50	5.397	13,49	974,83	1658,14
30.999	0,52	5.259	13,15	949,91	1495,57
31.999	0,53	5.122	12,81	925,16	1484,74
32.998	0,55	4.958	12,40	895,54	1779,13
33.998	0,57	4.788	11,97	864,83	1842,38
34.998	0,58	4.640	11,60	838,10	1603,95
35.998	0,60	4.495	11,24	811,91	1571,44
36.998	0,62	4.340	10,85	783,91	1679,81
37.998	0,63	4.192	10,48	757,18	1603,95
38.998	0,65	4.047	10,12	730,99	1571,44
39.998	0,67	3.898	9,75	704,08	1614,79
40.998	0,68	3.754	9,39	678,07	1560,60
41.998	0,70	3.617	9,04	653,32	1484,74
42.998	0,72	3.496	8,74	631,47	1311,34
43.998	0,73	3.382	8,46	610,87	1235,48
44.998	0,75	3.251	8,13	587,21	1419,71
45.998	0,77	3.106	7,77	561,02	1571,44
46.997	0,78	2.963	7,41	535,19	1551,31
47.997	0,80	2.829	7,07	510,99	1452,23
48.997	0,82	2.713	6,78	490,04	1257,15
49.997	0,83	2.590	6,48	467,82	1333,01
50.997	0,85	2.444	6,11	441,45	1582,28
51.997	0,87	2.300	5,75	415,44	1560,60
52.997	0,88	2.170	5,43	391,96	1408,88

A3d – DATOS ENSAYO VALVULA 1, POSICION 4

POS 4					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	ΔCAUDAL (cm <sup>3</sup> /min)
5.000	0,08	9.581	23,95	1730,57	
5.499	0,09	9.414	23,54	1700,40	3626,98
5.999	0,10	9.268	23,17	1674,03	3164,55
6.499	0,11	9.113	22,78	1646,04	3359,63
6.999	0,12	8.960	22,40	1618,40	3316,28
7.499	0,12	8.811	22,03	1591,49	3229,57
7.999	0,13	8.656	21,64	1563,49	3359,63
8.499	0,14	8.500	21,25	1535,31	3381,30
8.999	0,15	8.330	20,83	1504,61	3684,75
9.499	0,16	8.162	20,41	1474,26	3641,40
9.999	0,17	8.015	20,04	1447,71	3186,22
10.499	0,17	7.864	19,66	1420,44	3272,93
10.999	0,18	7.707	19,27	1392,08	3402,98
11.499	0,19	7.565	18,91	1366,43	3077,85
11.999	0,20	7.419	18,55	1340,06	3164,55
12.499	0,21	7.264	18,16	1312,06	3359,63
12.999	0,22	7.130	17,83	1287,86	2904,45
13.499	0,22	7.008	17,52	1265,82	2644,35
13.999	0,23	6.864	17,16	1239,81	3121,20
14.499	0,24	6.710	16,78	1211,99	3337,95
14.999	0,25	6.570	16,43	1186,71	3034,50
15.499	0,26	6.441	16,10	1163,41	2796,08
15.999	0,27	6.313	15,78	1140,29	2774,40
16.499	0,27	6.171	15,43	1114,64	3077,85
16.999	0,28	6.015	15,04	1086,46	3381,30
17.499	0,29	5.870	14,68	1060,27	3142,87
17.999	0,30	5.744	14,36	1037,51	2731,05
18.499	0,31	5.619	14,05	1014,93	2709,37
18.999	0,32	5.480	13,70	989,83	3012,83
19.499	0,32	5.339	13,35	964,36	3056,17
19.998	0,33	5.203	13,01	939,79	2953,71
20.498	0,34	5.075	12,69	916,67	2774,40
20.998	0,35	4.954	12,39	894,82	2622,68
21.498	0,36	4.825	12,06	871,52	2796,07
21.998	0,37	4.679	11,70	845,14	3164,55
22.498	0,37	4.539	11,35	819,86	3034,50
22.998	0,38	4.415	11,04	797,46	2687,70
23.498	0,39	4.294	10,74	775,60	2622,68
23.998	0,40	4.162	10,41	751,76	2861,10
24.498	0,41	4.028	10,07	727,56	2904,45
24.998	0,42	3.909	9,77	706,06	2579,32
25.498	0,42	3.799	9,50	686,19	2384,25
25.998	0,43	3.682	9,21	665,06	2535,98

A3e – DATOS ENSAYO VALVULA 1, POSICION 5

POS 5					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
4.500	0,08	9559,00	23,90	1726,59	
5.000	0,08	9288,00	23,22	1677,65	5873,93
5.500	0,09	9044,00	22,61	1633,57	5288,70
5.999	0,10	8824,00	22,06	1593,84	4778,06
6.499	0,11	8589,00	21,47	1551,39	5093,62
6.999	0,12	8352,00	20,88	1508,58	5136,98
7.499	0,12	8124,00	20,31	1467,40	4941,90
7.999	0,13	7899,00	19,75	1426,76	4876,88
8.499	0,14	7673,00	19,18	1385,94	4898,55
8.999	0,15	7451,00	18,63	1345,84	4811,85
9.499	0,16	7235,00	18,09	1306,82	4681,80
9.999	0,17	7019,00	17,55	1267,81	4681,80
10.499	0,17	6801,00	17,00	1228,43	4725,15
10.999	0,18	6579,00	16,45	1188,33	4811,85
11.499	0,19	6360,00	15,90	1148,78	4746,83
11.999	0,20	6153,00	15,38	1111,39	4486,72
12.499	0,21	5944,00	14,86	1073,64	4530,08
12.999	0,22	5728,00	14,32	1034,62	4681,80
13.499	0,22	5514,00	13,79	995,97	4638,45
13.999	0,23	5311,00	13,28	959,30	4400,03
14.499	0,24	5116,00	12,79	924,08	4226,63
14.999	0,25	4924,00	12,31	889,40	4161,60
15.499	0,26	4726,00	11,82	853,63	4291,65
15.999	0,27	4521,00	11,30	816,61	4443,38
16.499	0,27	4318,00	10,80	779,94	4400,02
16.999	0,28	4121,00	10,30	744,36	4269,98
17.499	0,29	3929,00	9,82	709,68	4161,60
17.999	0,30	3743,00	9,36	676,08	4031,55
18.499	0,31	3567,00	8,92	644,29	3814,80
18.999	0,32	3409,00	8,52	615,75	3424,65
19.499	0,32	3254,00	8,14	587,75	3359,62
19.998	0,33	3081,00	7,70	556,51	3757,29
20.498	0,34	2897,00	7,24	523,27	3988,20
20.998	0,35	2721,00	6,80	491,48	3814,80
21.498	0,36	2551,00	6,38	460,77	3684,75
21.998	0,37	2378,00	5,95	429,53	3749,78
22.498	0,37	2198,00	5,50	397,01	3901,50
22.998	0,38	2016,00	5,04	364,14	3944,85
23.498	0,39	1848,00	4,62	333,80	3641,40
23.998	0,40	1693,00	4,23	305,80	3359,62
24.498	0,41	1537,00	3,84	277,62	3381,30
24.998	0,42	1379,00	3,45	249,08	3424,65
25.498	0,42	1231,00	3,08	222,35	3207,90

A4a – VALVULA 3, POSICION 1

POS 1					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
24000	0,40	9666	24	1.746	
26000	0,43	9652	24	1.743	75,86
28000	0,47	9644	24	1.742	43,35
30000	0,50	9625	24	1.739	102,96
32000	0,53	9611	24	1.736	75,86
34000	0,57	9611	24	1.736	0,00
36000	0,60	9590	24	1.732	113,79
38000	0,63	9581	24	1.731	48,77
40000	0,67	9564	24	1.727	92,12
42000	0,70	9550	24	1.725	75,86
44000	0,73	9536	24	1.722	75,86
46000	0,77	9532	24	1.722	21,68
48000	0,80	9506	24	1.717	140,89
50000	0,83	9511	24	1.718	-27,09
52000	0,87	9484	24	1.713	146,31
54000	0,90	9471	24	1.711	70,44
56000	0,93	9455	24	1.708	86,70
58000	0,97	9445	24	1.706	54,19
59999	1,00	9431	24	1.703	75,90
61999	1,03	9427	24	1.703	21,68
63999	1,07	9403	24	1.698	130,05
65999	1,10	9394	23	1.697	48,77
67999	1,13	9389	23	1.696	27,09
69999	1,17	9368	23	1.692	113,79
71999	1,20	9356	23	1.690	65,03
73999	1,23	9343	23	1.688	70,44
75999	1,27	9331	23	1.685	65,03
77999	1,30	9331	23	1.685	0,00
79999	1,33	9302	23	1.680	157,14
81999	1,37	9304	23	1.681	-10,84
83999	1,40	9278	23	1.676	140,89
85999	1,43	9270	23	1.674	43,35
87999	1,47	9251	23	1.671	102,96
89999	1,50	9237	23	1.668	75,86
91999	1,53	9244	23	1.670	-37,93
93999	1,57	9218	23	1.665	140,89
95999	1,60	9202	23	1.662	86,70
97999	1,63	9190	23	1.660	65,02
99999	1,67	9180	23	1.658	54,19
101999	1,70	9166	23	1.656	75,86
103999	1,73	9161	23	1.655	27,09
105999	1,77	9139	23	1.651	119,21
107999	1,80	9125	23	1.648	75,86

A4b – DATOS ENSAYO VALVULA 3, POSICION 2

POS 2					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
10001	0,17	9674	23	1.651	
20000	0,33	9119	21	1.551	601,54
30000	0,50	8604	20	1.457	558,13
40000	0,67	8111	19	1.368	534,29
50000	0,83	7629	18	1.281	522,37
60000	1,00	7148	17	1.194	521,28
70000	1,17	6684	15	1.111	502,86
80000	1,33	6255	14	1.033	464,93
90000	1,50	5821	13	955	470,35
100000	1,67	5418	12	882	436,75
110000	1,83	5029	11	812	421,58
120000	2,00	4655	10	744	405,32
130000	2,17	4299	9	680	385,82
140000	2,33	3956	9	618	371,73
150000	2,50	3637	8	560	345,72
160000	2,67	3328	7	505	334,88
170000	2,83	3037	6	452	315,37
180000	3,00	2770	6	404	289,36
190000	3,17	2525	5	359	265,52
200000	3,33	2291	4	317	253,60
210000	3,50	2043	4	272	268,77
220000	3,67	1832	3	234	228,67
230000	3,83	1639	3	199	209,16
240000	4,00	1472	2	169	180,99
250000	4,17	1292	2	137	195,08
260000	4,33	1159	2	113	144,14
269999	4,50	1033	1	90	136,57
279999	4,67	924	1	70	118,13

A4c – DATOS ENSAYO VALVULA 3, POSICION 3

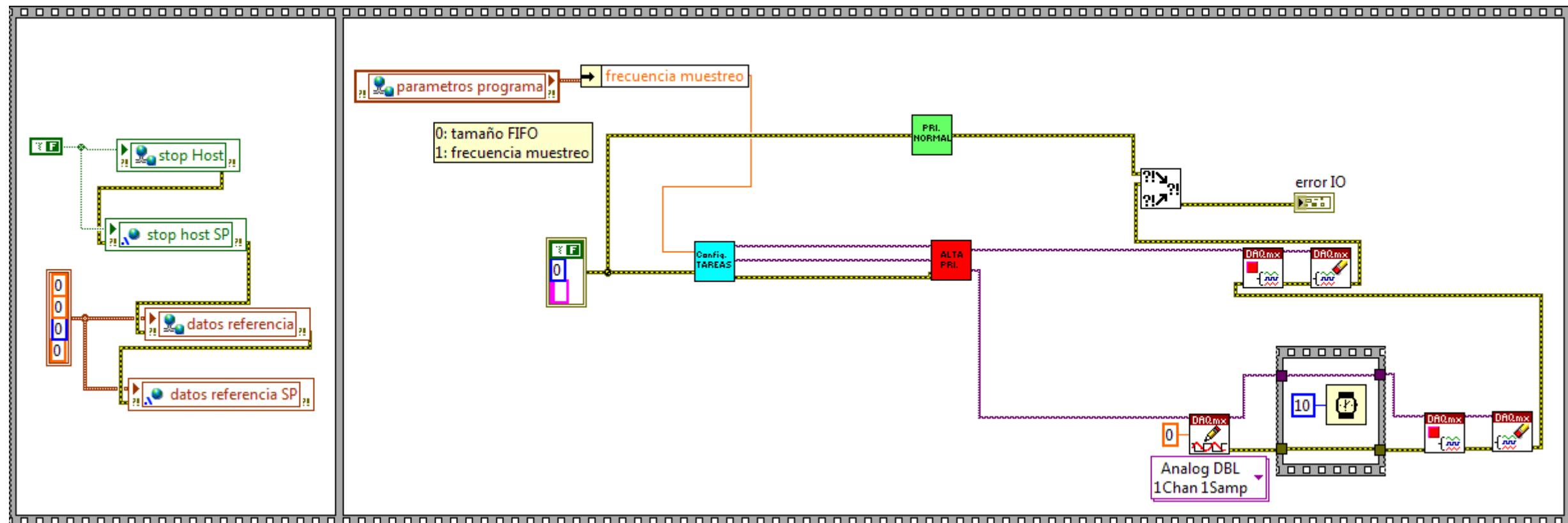
POS 3					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
4000	0,07	9871	23,34	1686,34	
6000	0,10	9618	22,71	1640,64	1370,94
8000	0,13	9353	22,05	1592,77	1435,97
10000	0,17	9089	21,39	1545,09	1430,55
12000	0,20	8842	20,77	1500,47	1338,43
14000	0,23	8588	20,13	1454,59	1376,36
16000	0,27	8338	19,51	1409,44	1354,69
18000	0,30	8110	18,94	1368,26	1235,48
20000	0,33	7856	18,30	1322,38	1376,36
22000	0,37	7618	17,71	1279,39	1289,66
24000	0,40	7392	17,14	1238,57	1224,64
26000	0,43	7162	16,57	1197,02	1246,31
28000	0,47	6933	16,00	1155,66	1240,89
30000	0,50	6715	15,45	1116,28	1181,29
32000	0,53	6503	14,92	1077,99	1148,78
34000	0,57	6282	14,37	1038,07	1197,54
36000	0,60	6070	13,84	999,78	1148,78
38000	0,63	5859	13,31	961,67	1143,36
40000	0,67	5656	12,80	925,00	1100,01
42000	0,70	5477	12,36	892,67	969,96
44000	0,73	5273	11,85	855,82	1105,43
46000	0,77	5083	11,37	821,50	1029,56
48000	0,80	4880	10,86	784,84	1100,01
50000	0,83	4695	10,40	751,42	1002,47
52000	0,87	4525	9,98	720,72	921,19
54000	0,90	4338	9,51	686,94	1013,31
55999	0,93	4162	9,07	655,15	954,18
57999	0,97	3993	8,65	624,62	915,77
59999	1,00	3825	8,23	594,28	910,35
61999	1,03	3665	7,83	565,38	867,00
63999	1,07	3509	7,44	537,20	845,33
65999	1,10	3366	7,08	511,37	774,88
67999	1,13	3204	6,67	482,11	877,84
69999	1,17	3058	6,31	455,74	791,14
71999	1,20	2928	5,98	432,26	704,44
73999	1,23	2783	5,62	406,07	785,72
75999	1,27	2653	5,30	382,59	704,44
77999	1,30	2523	4,97	359,10	704,44
79999	1,33	2402	4,67	337,25	655,67
81999	1,37	2304	4,42	319,55	531,04
83999	1,40	2189	4,14	298,78	623,16
85999	1,43	2074	3,85	278,00	623,16
87999	1,47	1964	3,57	258,13	596,06

A4d – DATOS ENSAYO VALVULA 3, POSICION 4

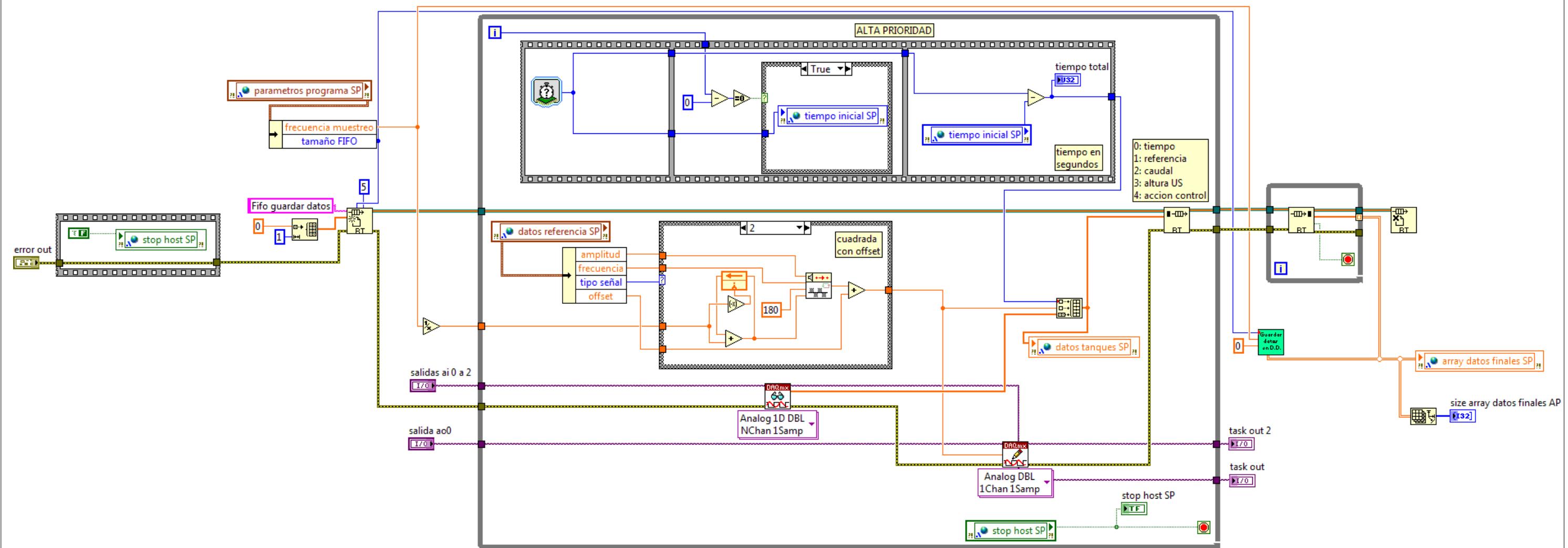
POS 4					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
14.000	0,23	9017	21	1.532	
15.000	0,25	8995	21	1.528	238,43
16.000	0,27	8801	21	1.493	2102,48
17.000	0,28	8566	20	1.451	2546,81
18.000	0,30	8345	20	1.411	2395,09
19.000	0,32	8107	19	1.368	2579,33
20.000	0,33	7859	18	1.323	2687,70
21.000	0,35	7605	18	1.277	2752,72
22.000	0,37	7353	17	1.232	2731,05
23.000	0,38	7120	16	1.189	2525,14
24.000	0,40	6894	16	1.149	2449,27
25.000	0,42	6644	15	1.103	2709,38
26.000	0,43	6413	15	1.062	2503,46
27.000	0,45	6195	14	1.022	2362,58
28.000	0,47	5975	14	983	2384,25
29.000	0,48	5755	13	943	2384,25
30.000	0,50	5546	13	905	2265,04
31.000	0,52	5338	12	868	2254,20
32.000	0,53	5140	12	832	2145,83
33.000	0,55	4952	11	798	2037,45
34.000	0,57	4746	11	761	2232,53
35.000	0,58	4559	10	727	2026,61
36.000	0,60	4365	10	692	2102,48
37.000	0,62	4185	9	659	1950,75
38.000	0,63	4005	9	627	1950,75
39.000	0,65	3841	8	597	1777,35
40.000	0,67	3665	8	565	1907,40
41.000	0,68	3498	7	535	1809,86
42.000	0,70	3343	7	507	1679,81
43.000	0,72	3183	7	478	1734,00
44.000	0,73	3048	6	454	1463,06
45.000	0,75	2902	6	428	1582,28
46.000	0,77	2749	6	400	1658,14
47.000	0,78	2612	5	375	1484,74
48.000	0,80	2476	5	351	1473,90
49.000	0,82	2351	5	328	1354,69
50.000	0,83	2227	4	306	1343,85
51.000	0,85	2107	4	284	1300,50
52.000	0,87	2008	4	266	1072,91
53.000	0,88	1881	3	243	1376,36
54.000	0,90	1779	3	225	1105,43
55.000	0,92	1677	3	206	1105,43
56.000	0,93	1579	3	189	1062,08

A4e – DATOS ENSAYO VALVULA 3, POSICION 5

POS 5					
TIEMPO (ms)	TIEMPO (min)	ALTURA (mV)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm3)	ΔCAUDAL (cm3/min)
1.000	0,02	3.655	8	564	
1.500	0,03	3.590	8	552	1408,87
2.000	0,03	3.466	7	529	2687,70
2.500	0,04	3.310	7	501	3381,30
3.000	0,05	3.184	7	478	2731,05
3.500	0,06	3.041	6	453	3099,53
4.000	0,07	2.892	6	426	3229,58
4.500	0,08	2.758	6	402	2904,45
5.000	0,08	2.628	5	378	2817,75
5.500	0,09	2.504	5	356	2687,70
6.000	0,10	2.380	5	333	2687,70
6.500	0,11	2.262	4	312	2557,65
7.000	0,12	2.146	4	291	2514,30
7.500	0,13	2.052	4	274	2037,45
8.000	0,13	1.932	3	252	2601,00
8.500	0,14	1.841	3	236	1972,43
9.000	0,15	1.723	3	215	2557,65
9.500	0,16	1.636	3	199	1885,73
10.000	0,17	1.556	3	184	1734,00
10.500	0,18	1.460	2	167	2080,80
11.000	0,18	1.376	2	152	1820,70
11.500	0,19	1.301	2	138	1625,62
12.000	0,20	1.222	2	124	1712,33
12.500	0,21	1.156	2	112	1430,55
13.000	0,22	1.105	1	103	1105,43
13.500	0,23	1.033	1	90	1560,60
14.000	0,23	976	1	80	1235,48
14.500	0,24	934	1	72	910,35
15.000	0,25	865	1	60	1495,58
15.500	0,26	817	1	51	1040,40
16.000	0,27	771	1	43	997,05
16.500	0,28	731	0	35	867,00
17.000	0,28	698	0	29	715,28
17.500	0,29	666	0	24	693,60
18.000	0,30	637	0	18	628,58
18.500	0,31	615	0	14	476,85



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	<b>E.T.S.I.I.T.</b> INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL E.	DEPARTAMENTO:
		<b>DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y COMPUTACION</b>
PROYECTO:	REALIZADO:	
<b>CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS</b>	<b>PEREZ IZQUIETA, SARA</b>	
FIRMA:		
PLANO:	FECHA:	ESCALA:
<b>SIMULACION (target)</b>	06 / 11	5



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

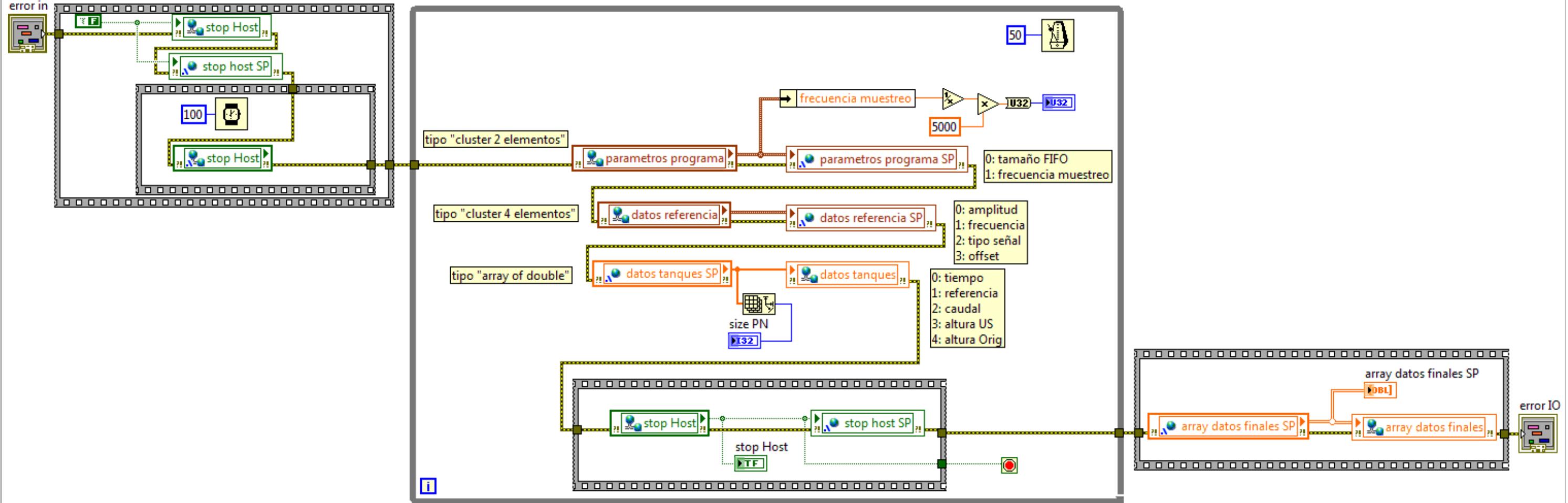
**SIMULACION (subVI alta prioridad)**

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11    ESCALA:    N° PLANO: 6



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

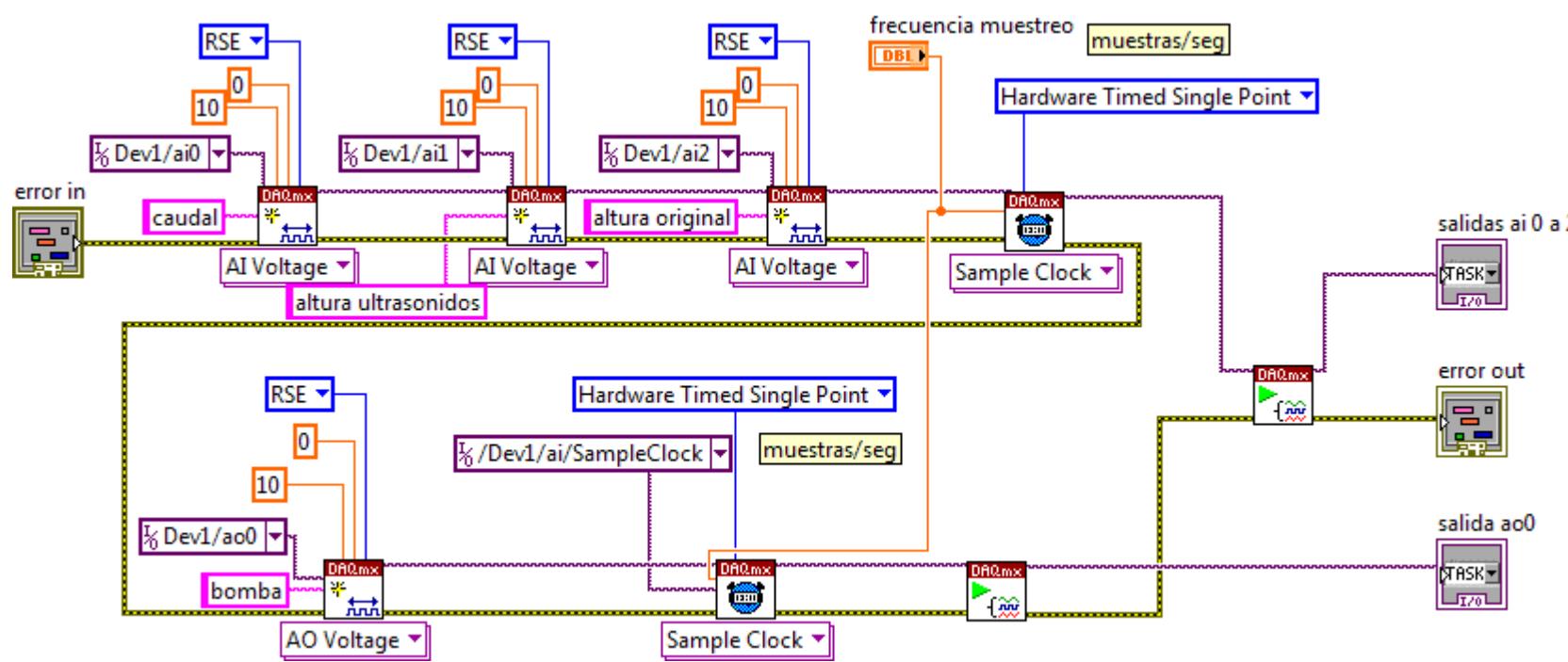
SIMULACION (subVI prioridad normal)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11    ESCALA:    N° PLANO: 7



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

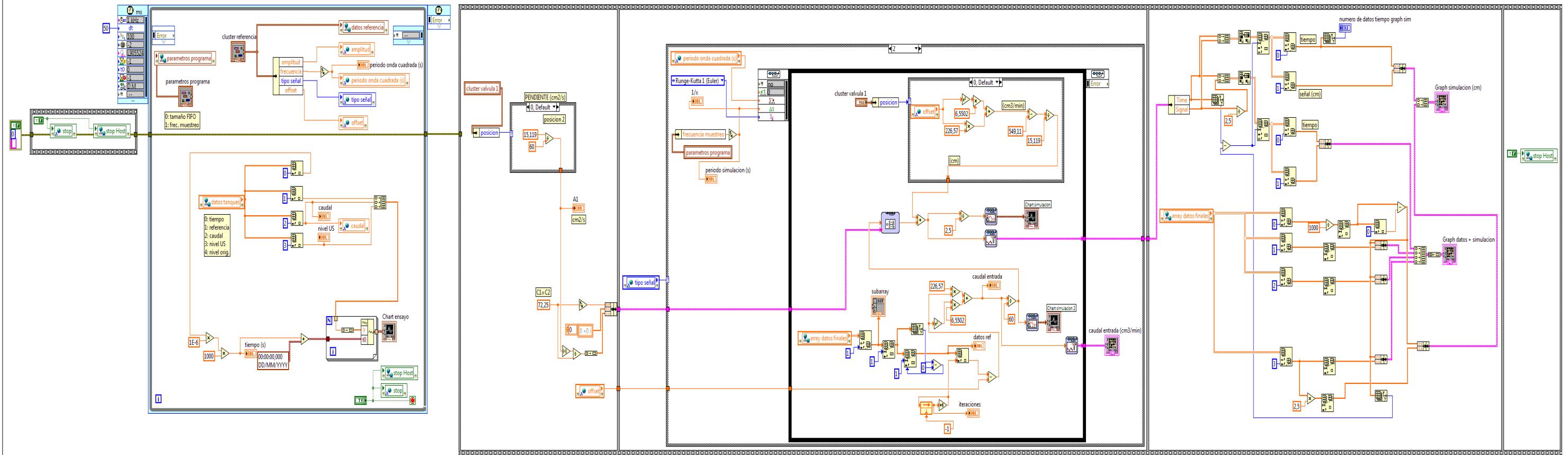
**SIMULACION** (subVI configuración de tareas)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA:	ESCALA:	Nº PLANO:
06 / 11		8



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

REALIZADO:

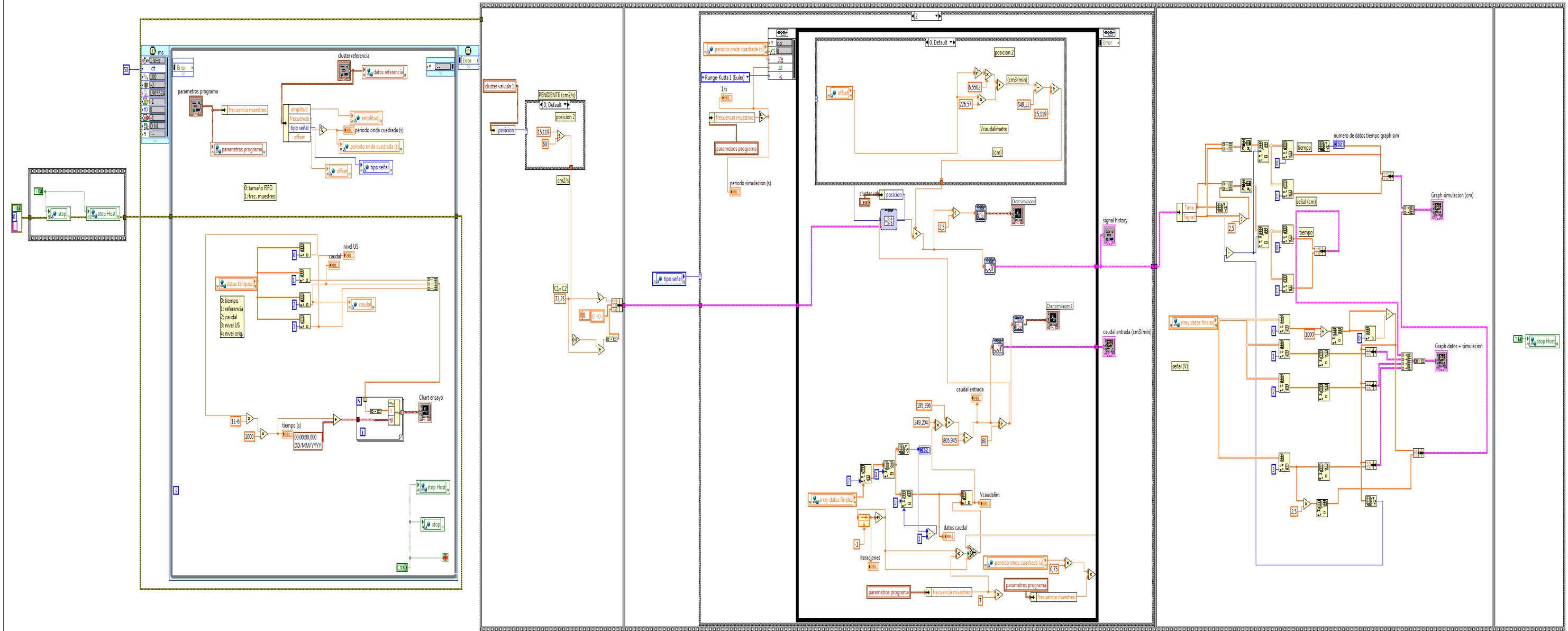
**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

PLANO:

**SIMULACION, ENTRADA CAUDAL REFERENCIA (host)**

FECHA:	06 / 11	ESCALA:	Nº PLANO:
			9a



 Universidad Pública  
de Navarra  
*Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa*

**E.T.S.I.I.T.  
INGENIERO  
TÉCNICO INDUSTRIAL**

**DEPARTAMENTO:  
DEPARTAMENTO DE  
AUTOMATICA  
Y COMPUTACION**

PROYECTO

## **CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS**

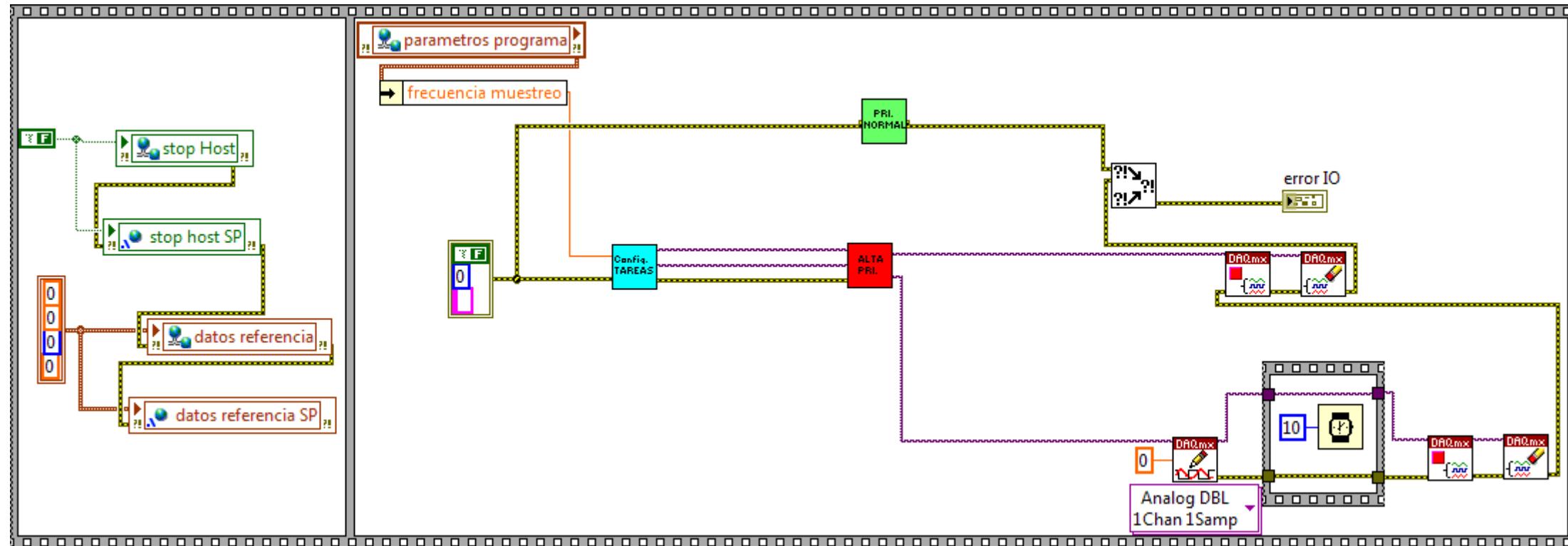
PLANO

SIMULACION, ENTRADA CAUDAL REAL (host)

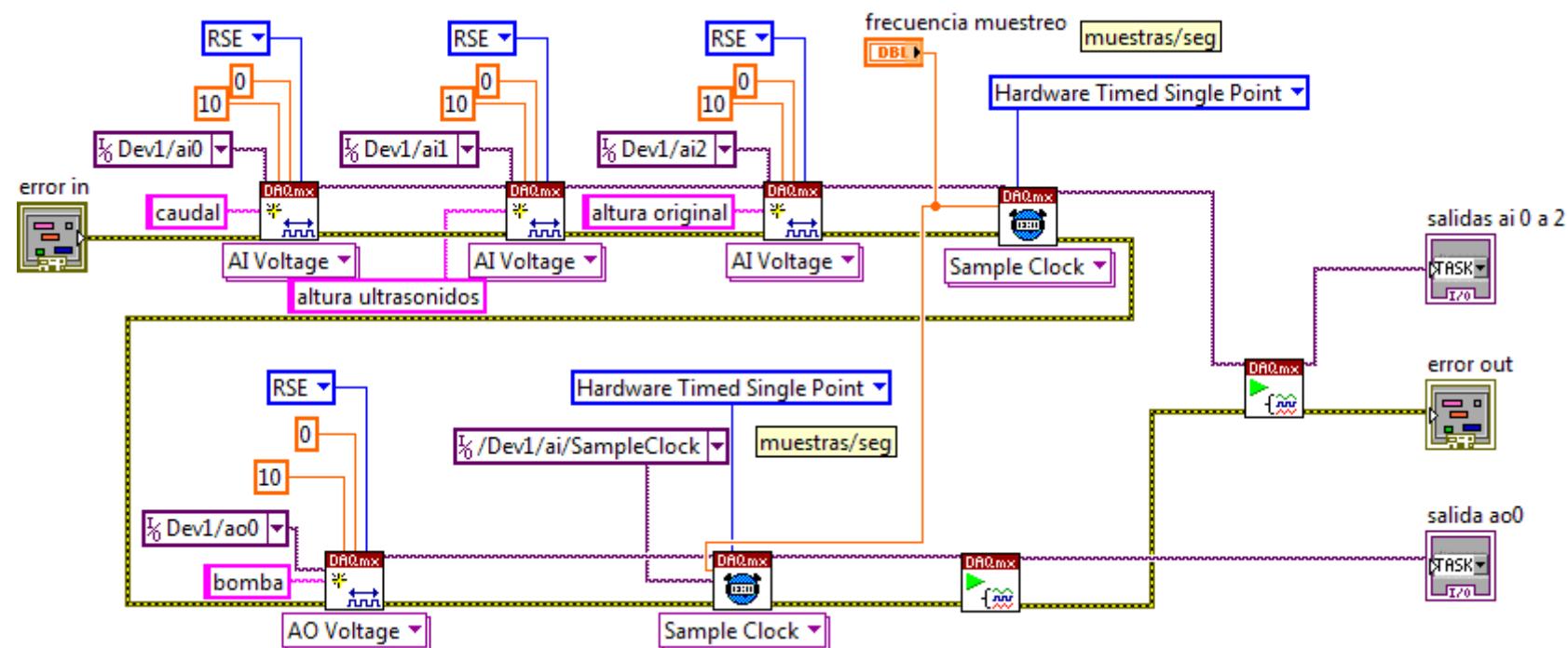
REALIZADO:

**FIRMA:**

FECHA: 06 / 11	ESCALA:	Nº PLANO: 9b
-------------------	---------	-----------------



 Universidad Pública de Navarra <i>Nafarroako Unibertsitate Publikoa</i>	<b>E.T.S.I.I.T.</b>  <b>INGENIERO</b> <b>TECNICO INDUSTRIAL E.</b>	DEPARTAMENTO:
		<b>DEPARTAMENTO DE</b> <b>AUTOMATICA</b> <b>Y COMPUTACION</b>
PROYECTO:	REALIZADO:	
<b>CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS</b>	<b>PEREZ IZQUIETA, SARA</b>	
FIRMA:		
PLANO:	FECHA:	ESCALA:
<b>CONTROL (target)</b>	06 / 11	Nº PLANO: 10



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

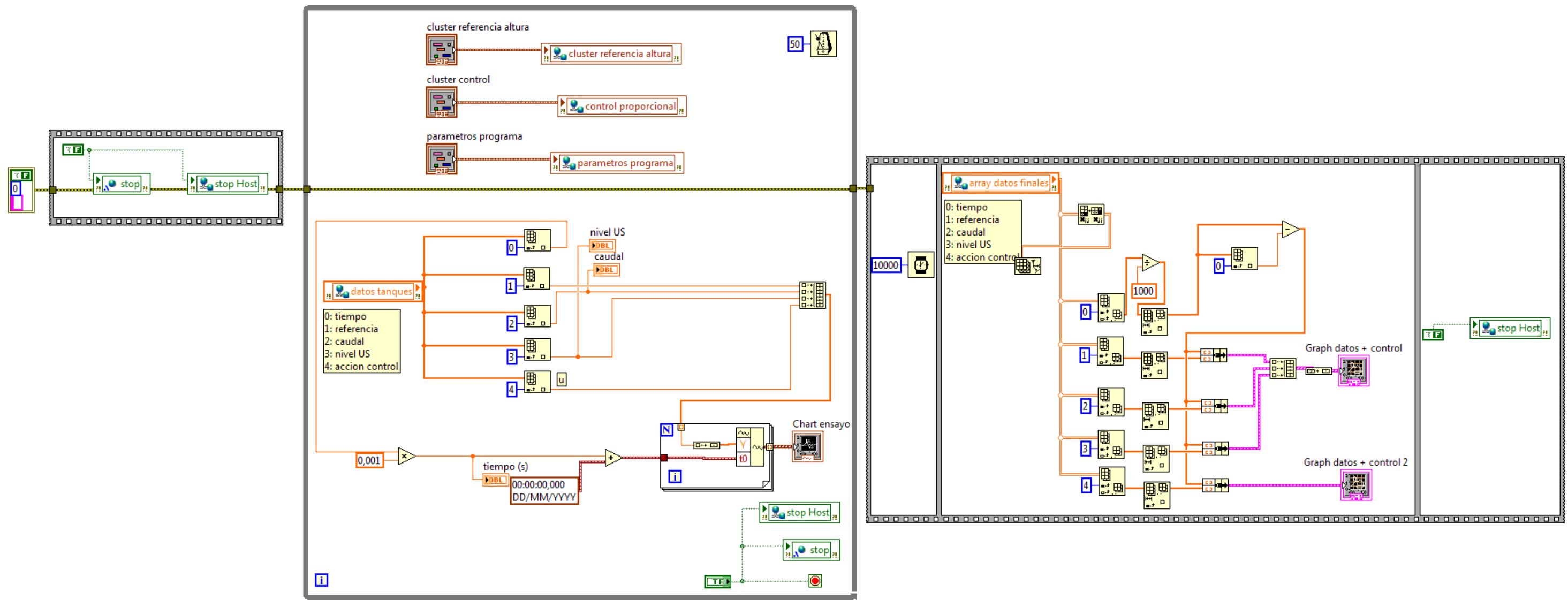
PLANO:

CONTROL (subVI configuración de tareas)

REALIZADO:  
**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: **06 / 11** ESCALA: **11** Nº PLANO: **11**



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

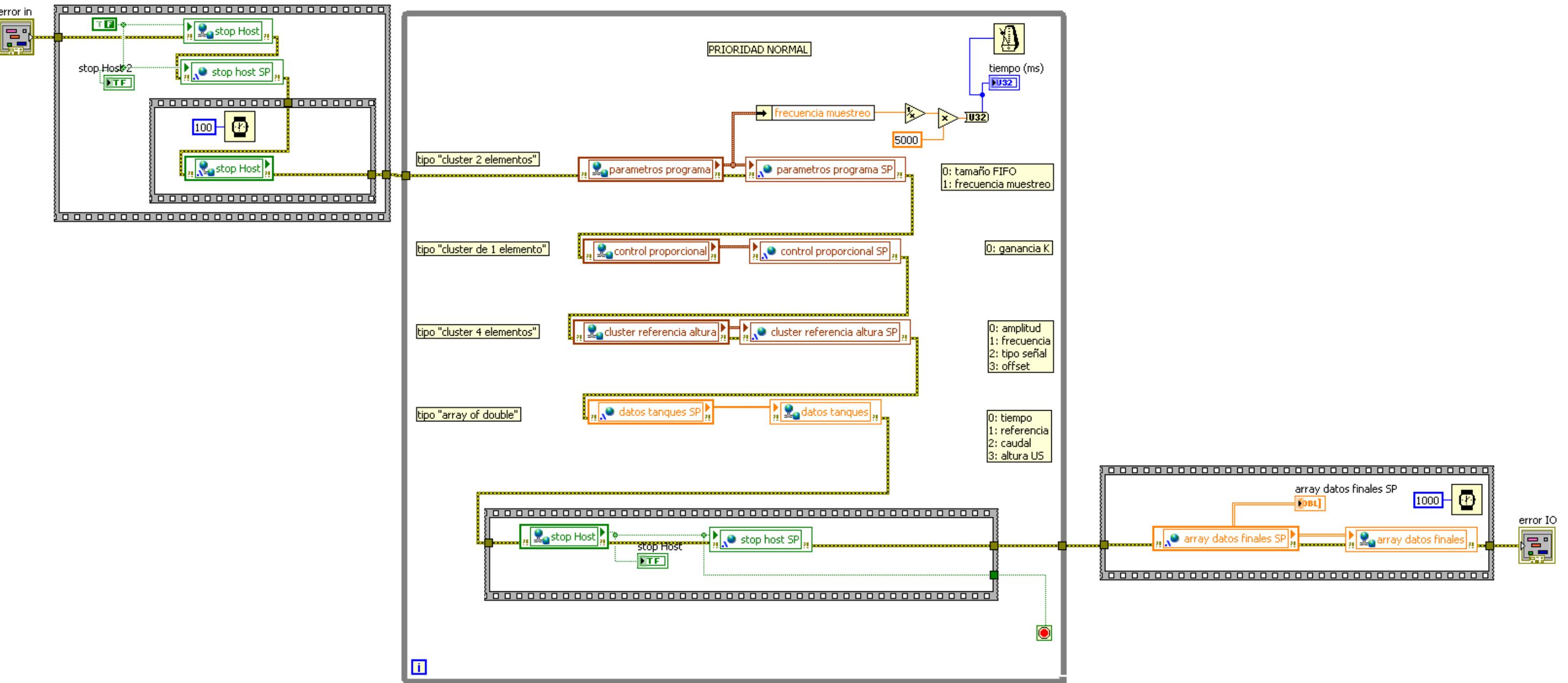
CONTROL (host)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11    ESCALA:    N° PLANO: 12



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

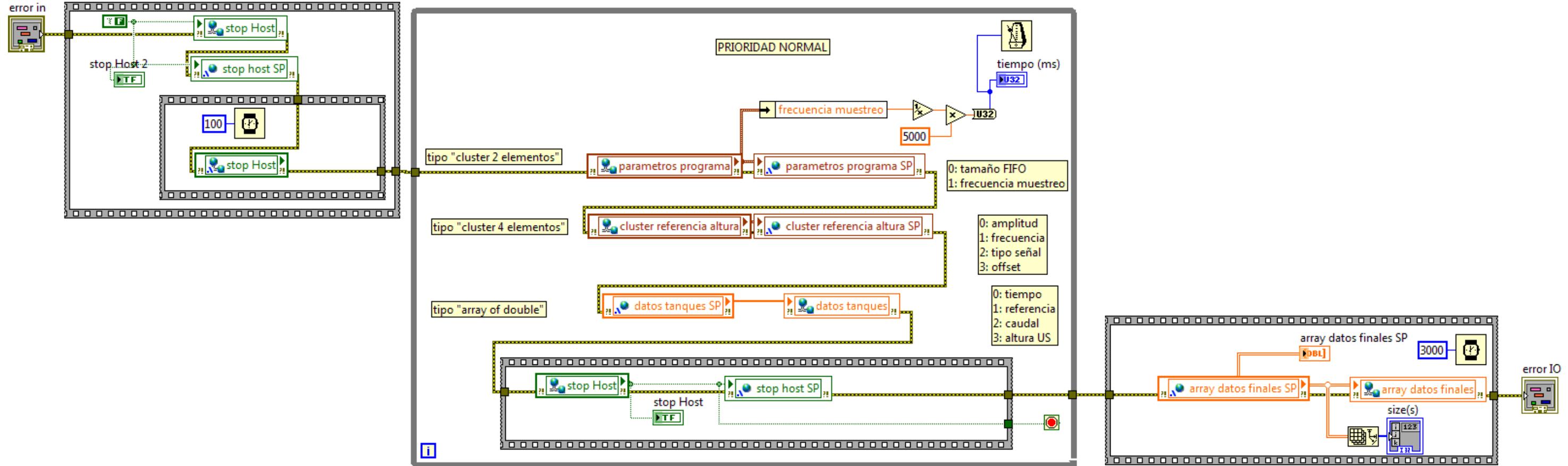
CONTROL P (subVI prioridad normal)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11 ESCALA: N° PLANO: 13a



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

CONTROL PID (subVI prioridad normal)

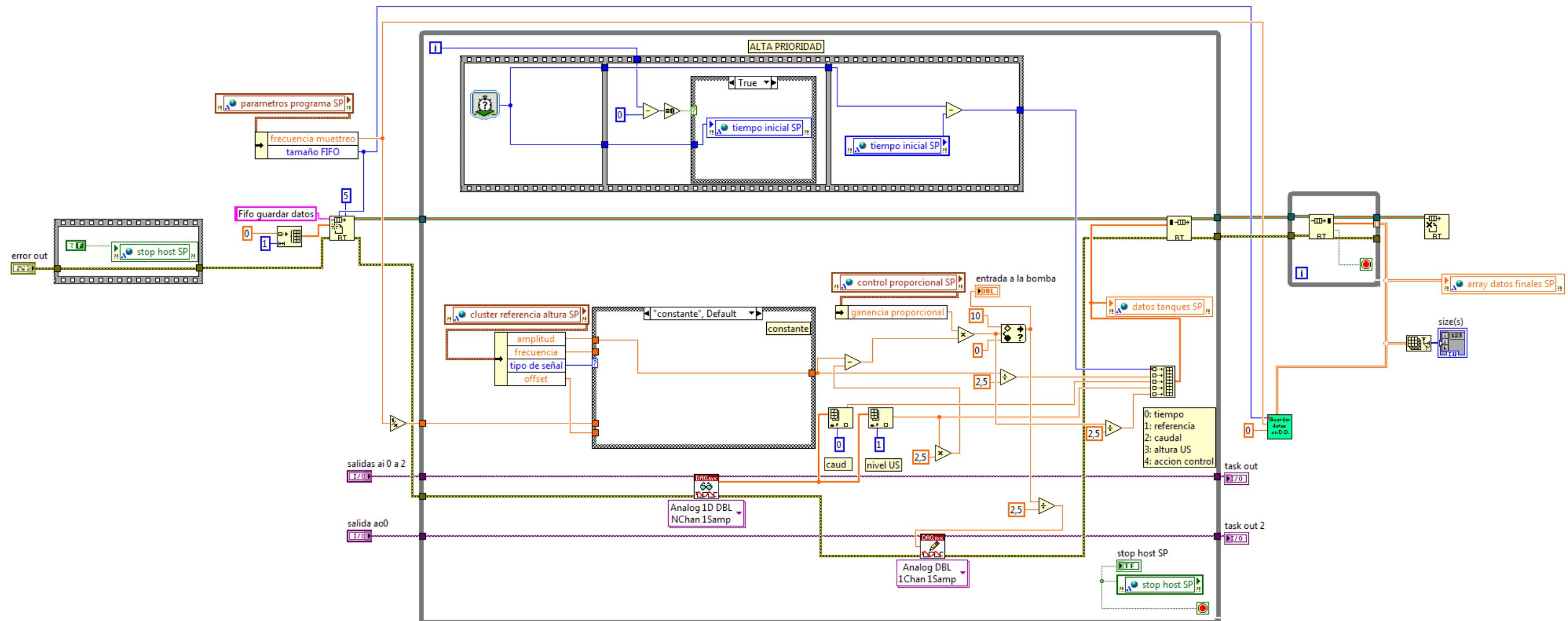
**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

REALIZADO:  
**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11 | ESCALA: | N° PLANO: 13b



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

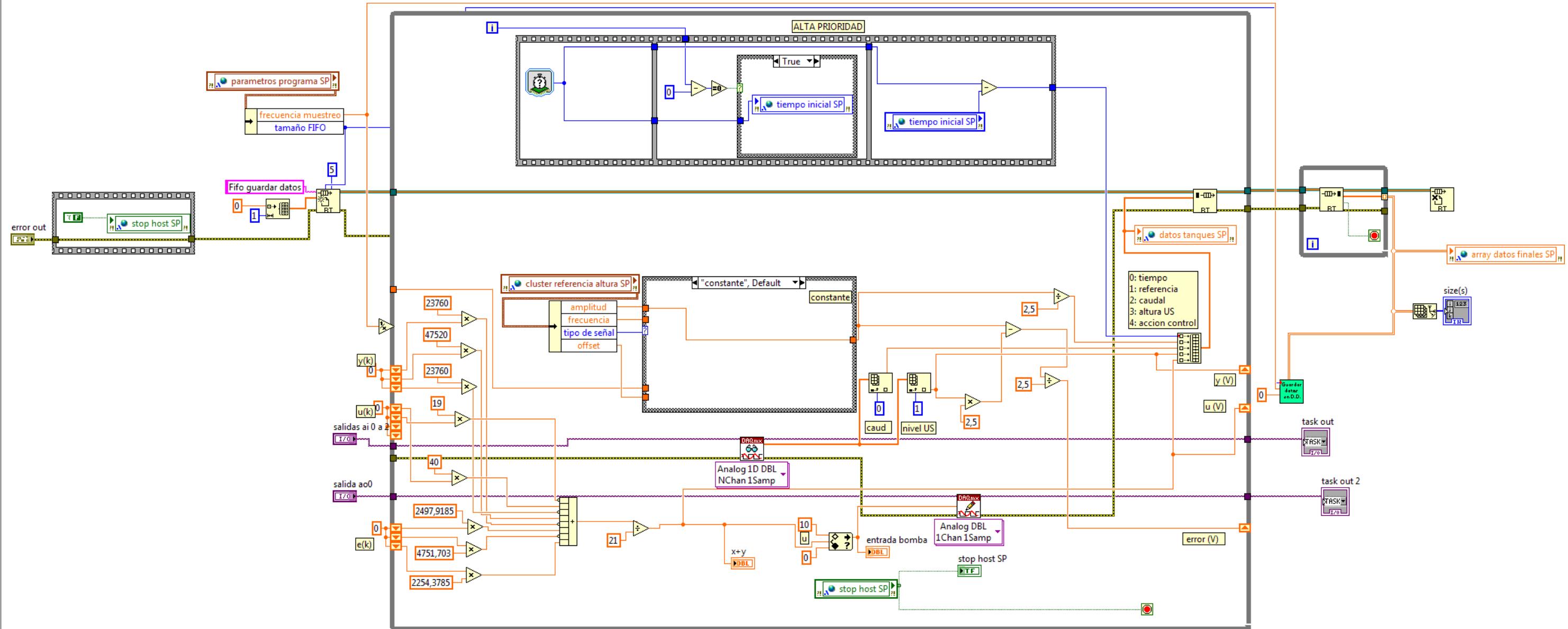
PLANO:

CONTROL P (subVI alta prioridad)

REALIZADO:  
**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA: 06 / 11 ESCALA: N° PLANO: 14a



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

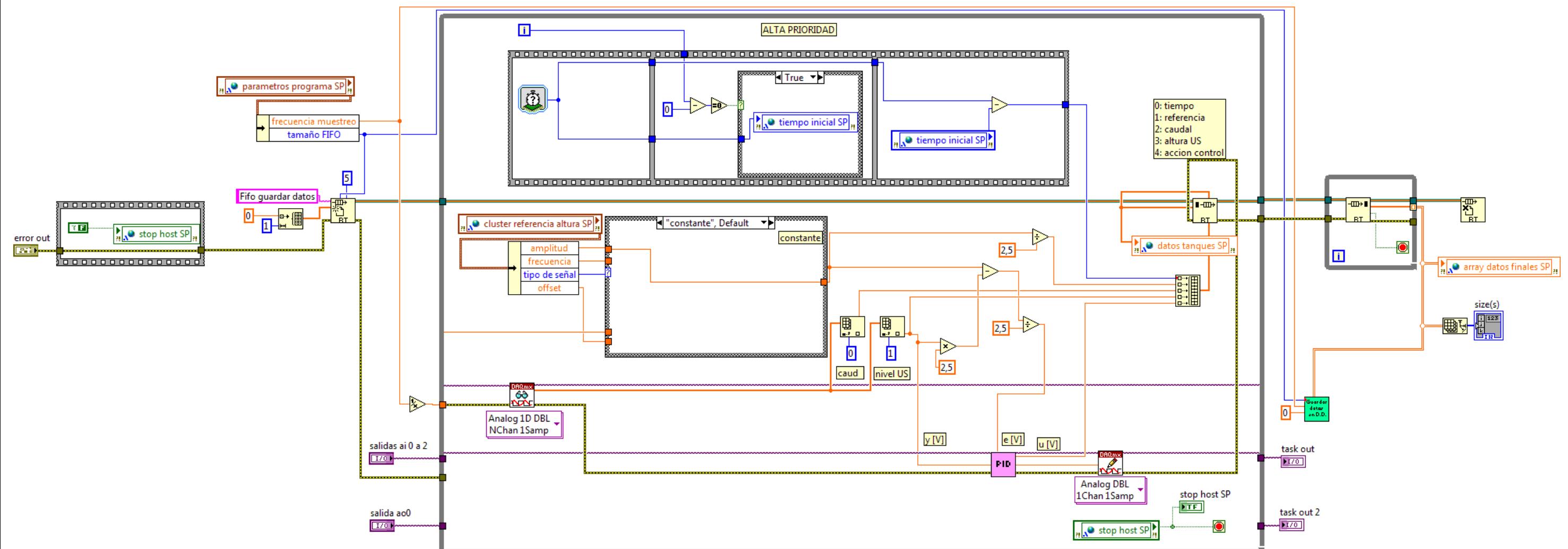
CONTROL PID, modificación D (subVI alta prioridad)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA:	06 / 11	ESCALA:	Nº PLANO:
			14b



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

**E.T.S.I.I.T.**  
**INGENIERO**  
**TECNICO INDUSTRIAL E.**

DEPARTAMENTO:  
**DEPARTAMENTO DE**  
**AUTOMATICA**  
**Y COMPUTACION**

PROYECTO:

## CONTROL DE TANQUES ACOPLADOS

PLANO:

CONTROL PID, modificación D-I (subVI alta prioridad)

REALIZADO:

**PEREZ IZQUIETA, SARA**

FIRMA:

FECHA:	06 / 11	ESCALA:	Nº PLANO:
			14c