

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**Dr. Daniel G. Sbarbaro H.**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:

**Ingeniero Civil Electrónico**

**Control Basado en Pasividad de un Sistema No  
Lineal de Estanques en Serie**

Concepción, Septiembre de 2010

Felipe A. Ossadey De La Guarda

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

# Control Basado en Pasividad de un Sistema No Lineal de Estanques en serie



Felipe Andrés Ossadey De La Guarda

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Septiembre 2010



## Resumen

En la presente Memoria de Título se estudia un sistema multivariable (MIMO) y no lineal el cual es un proceso serial, es decir, los estados en una unidad de proceso influye los estados de los procesos que le siguen hacia abajo o ‘río abajo’, y no al revés. Esta estructura es muy común en procesos de industria donde el flujo de salida de un proceso es la entrada en el proceso que le sigue. El proceso consiste de tres estanques dispuestos en serie y a la misma altura con respecto al suelo. El primer estanque es alimentado con un flujo de entrada de agua que se considerará medible para el caso más básico, mientras que para el caso de más interés se considerará no medible, esta es no modificable y será la perturbación del sistema, además posee dos salidas de agua, una de las cuales es un paso de agua que abandona el sistema y que se puede ajustar manualmente mediante una válvula que se encuentra en la base del estanque, mientras que la otra salida de agua se encuentra a un costado del estanque y es ajustada mediante una válvula de control. La válvula del costado entrega un paso de agua que será el flujo de entrada para el segundo estanque del sistema, produciéndose aquí un acoplamiento entre el primer y segundo estanque. El segundo estanque posee la entrada de agua que se mencionó recién, y posee dos salidas de agua similares a las que tiene el primer estanque. Así mismo el tercer estanque, que a estas alturas, recibe efectos de acoplo del primer y segundo estanque.

Se analiza el sistema utilizando ecuaciones de Bernoulli y se modela realizando algunas asunciones tales como asumir que los estanques son perfectamente cilíndricos y que las válvulas presentan características lineales. Para el diseño de la estrategia de control que propondremos, se realiza una representación del sistema en forma Hamiltoniana de Puerto Controlada, que permite una comprensión natural sobre el comportamiento del sistema y sus interacciones, lo que simplifica el procedimiento de diseño.

Luego de eso se proponen dos estrategias de control, cuyos principales objetivos son que los límites mínimo y máximo de nivel en los estanques no deben ser sobrepasados, lograr el desacoplo del sistema, y que la tasa de cambio de flujo de un estanque a otro sea razonablemente suave para evitar sobre-exigir los equipos que pueden resultar dañados. Otro objetivo de control competente es el caso cuando se tiene una perturbación muy ruidosa o que varía mucho en el tiempo, se desea que ese ruido del flujo de entrada sea absorbido por el primer estanque a modo de mantener un nivel de los estanques segundo y tercero lo más suave posible, en este caso el primer

estanque puede actuar como un ‘buffer’ y se le disminuirán algunas restricciones en sus estados para poder efectuar esta función.

Se propone el diseño de un control basado en pasividad y balance de masa llamado IDA-PBC, el cual aprovecha la estructura de interconexión de los sistemas y sus características de pasividad para asegurar la estabilidad en lazo cerrado. La gran fortaleza de este control es la libertad de modificar las interconexiones de un sistema con su ambiente y la disipación que se produce en el, de manera que al realimentar el sistema dichos cambios produzcan el efecto deseado por el diseñador. Con el fin de comparar el desempeño del control IDA-PBC se diseña una estrategia de control considerada una de las más clásicas en el control de nivel, esto es un controlador PI simple y sin desacopladores, la cual se sintoniza linealizando el sistema en torno a un punto de operación.

Todas las simulaciones, desde el sistema en lazo abierto hasta las estrategias diseñadas, serán efectuadas en Matlab Simulink.

Una parte importante del desarrollo de esta memoria de título en cuanto a tiempo, dedicación y aprendizaje es la implementación práctica del control diseñado en una planta piloto, la que es instalada y configurada como parte de este trabajo. Por esto se incluye en anexos una guía educativa que muestra lo realizado. Se explican fundamentos de FOUNDATION Fieldbus, que es la red de campo que se utilizará y que forma parte de las tecnologías más novedosas en el control de procesos, la cual posee instrumentación perteneciente a la nueva generación de ‘dispositivos inteligentes’, llamados así por sus capacidades de control en campo y su fácil integración con otros tipos de protocolos y tecnologías mediante un dispositivo de enlace. Se mencionan los elementos Software y Hardware utilizados a modo de familiarizarse con la planta de proceso, entregándose datos técnicos básicos y necesarios que se deben tomar en cuenta cuando se implementa una planta de estas características.

El control en planta se realiza mediante un PLC y un computador host, donde es posible programar las estrategias diseñadas y crear una interfaz de operación mediante softwares de Rockwell Automation. Esta implementación permite hacer los estudios prácticos para observar la efectividad de las estrategias diseñadas, lo que nos permite concluir más acabadamente sobre ellas.

*Este trabajo va dedicado a mi sobrinita Valentina Rocío,  
que tempranamente nos abandonó para convertirse en nuestro ángel,  
tu me has enseñado algo que no dictan en las aulas,  
a vivir feliz.*



## Agradecimientos

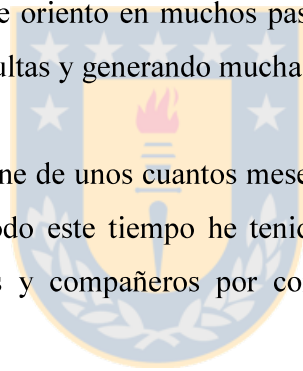
A mi familia y en especial a mis padres Isolde y Claudio, quienes son la razón de lo que hoy soy. Sé todo el sacrificio que han hecho por hacer posible mis estudios, espero de corazón darles gratificación y mucho orgullo con el gran paso que estoy dando, y con los que daré a futuro.

A mi profesor guía Dr. Daniel Sbarbaro, por su apoyo y guía a lo largo de esta memoria.

A la gente del Laboratorio de Control por su siempre buena disposición para ayudarme resolver mis problemas y dudas en lo concerniente al trabajo en planta. En especial al profesor J.P. Segovia, Don Pato Orellana, Edgardo y Alonso.

A Héctor Ramírez, quien me oriento en muchos pasajes de este proyecto, siempre con una gran disposición a atender mis consultas y generando mucha buena onda.

Este proyecto no es el cúlmine de unos cuantos meses de trabajo, sino que de todos los años que llevo en la Universidad. En todo este tiempo he tenido el agrado de compartir con grandes personas, agradezco a mis amigos y compañeros por compartir conmigo tantas alegrías como tristezas.



# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XIII</b>
<b>ABREVIACIONES.....</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS .....	2
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO .....	3
1.4. OBJETIVOS .....	4
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	4
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	4
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA .....	4
<b>CAPÍTULO 2. SISTEMA DE TRES ESTANQUES EN SERIE .....</b>	<b>6</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	6
2.2. PROCESO DE TRES ESTANQUES EN SERIE.....	6
2.2.1 <i>Obtención del Modelo Matemático</i> .....	6
2.2.2 <i>Puntos de Operación del Sistema</i> .....	10
2.2.3 <i>Estabilidad del Sistema</i> .....	10
2.3. SIMULACIÓN PARA LA RESPUESTA EN LAZO ABIERTO.....	12
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DE CONTROL USANDO IDA-PBC .....</b>	<b>15</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	15
3.2. CONTROL BASADO EN PASIVIDAD CON BALANCE DE ENERGÍA .....	15
3.2.1 <i>Pasividad</i> .....	15
3.2.2 <i>Sistemas Hamiltonianos Controlados Por Puertos</i> .....	16
3.2.3 <i>Balace de Energía y Estabilidad</i> .....	17
3.2.4 <i>Diseño del Controlador usando IDA-PBC</i> .....	18
3.3. APLICACIÓN AL SISTEMA DE LOS TRES ESTANQUES EN CASCADA.....	24
3.4. CONTROL PI.....	31
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>33</b>
4.1. CONTROL PI.....	33
4.1.1 <i>Perturbación Limpia</i> .....	33
4.1.2 <i>Perturbación Ruidosa</i> .....	34
4.2. IDA-PBC.....	35
4.2.1 <i>Escenario 1</i> .....	35
4.2.2 <i>Escenario 2</i> .....	37
4.2.3 <i>Escenario 3</i> .....	39
4.2.4 <i>Escenario 4</i> .....	40
<b>CAPÍTULO 5. IMPLMANTACIÓN DEL PROYECTO EN PLANTA .....</b>	<b>42</b>
5.1. INTRODUCCIÓN .....	42
5.2. SETUP DE LABORATORIO .....	42
5.2.1 <i>Arquitectura Integrada</i> .....	42
5.2.2 <i>Setup General</i> .....	44
<b>CAPÍTULO 6. PRUEBAS EN PLANTA.....</b>	<b>46</b>
6.1. CONTROL PI.....	46
6.1.1 <i>Perturbación Constante</i> .....	46

6.1.2	<i>Perturbación Ruidosa</i> .....	47
6.2.	IDA-PBC.....	48
6.2.1	<i>Escenario 1</i> .....	48
6.2.2	<i>Escenario 2</i> .....	51
6.2.3	<i>Escenario 3</i> .....	52
6.2.4	<i>Escenario 4</i> .....	53
6.3.	COMENTARIOS.....	55
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES</b> .....		<b>59</b>
7.1.	CONCLUSIONES.....	59
7.2.	TRABAJO FUTURO.....	60
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....		<b>61</b>
<b>ANEXO A. TEORÍA DE INTERÉS</b> .....		<b>63</b>
A.1.	METODO DIRECTO DE LYAPUNOV.....	63
A.2.	MATRIZ DEFINIDA POSITIVA.....	64
<b>ANEXO B. FOUNDATION FIELDBUS</b> .....		<b>65</b>
B.1.	FUNDAMENTOS DE FOUNDATION FIELDBUS.....	65
B.1.1	<i>¿Qué es FOUNDATION Fieldbus?</i> .....	65
B.1.2	<i>Comunicaciones Fieldbus</i> .....	68
B.1.3	<i>Programación de Lazo</i> .....	73
B.1.4	<i>Bloques Fieldbus</i> .....	75
B.1.5	<i>Fundamentos del Cableado de Red</i> .....	77
B.1.6	<i>Topologías de Cableado de Red</i> .....	81
B.1.7	<i>Hardware de Segmento</i> .....	83
<b>ANEXO C. DETALLE DE INSTRUMENTACIÓN EN PLANTA</b> .....		<b>87</b>
C.1.	COMPUTADOR.....	87
C.2.	PLC ALLEN BRADLEY CONTROL LOGIX 5561.....	87
C.3.	DISPOSITIVO ENLAZADOR ALLEN BRADLEY 1757 FFLD.....	88
C.4.	SENSORES DE NIVEL ENDRESS+HAUSER PROSONIC M FMU40.....	89
C.5.	FLUJÓMETRO MAGNÉTICO ENDRESS+HAUSSER PROLINE PROMAG53.....	91
C.6.	VÁLVULAS DE CONTROL FISHER DVC5010F.....	93
C.7.	VARIADOR DE FRECUENCIA DANFOSS VLT 2800.....	96
C.8.	BOMBA PEDROLLO PK 60.....	97
C.9.	VÁLVULAS MANUALES.....	98
C.10.	ESTANQUES PLÁSTICOS.....	98
C.11.	ACONDICIONADOR DE PODER MTL5995.....	99
C.12.	TERMINADOR MTL FBT-1.....	100
C.13.	RSLINX CLASSIC.....	102
C.14.	RSFIELDBUS.....	102
C.15.	RSLOGIX 5000.....	102
C.16.	FACTORY TALK.....	103
<b>ANEXO D. DIAGRAMAS DE CONEXIÓN</b> .....		<b>104</b>
D.1.	CONEXIONES DE CAMPO.....	104
<b>ANEXO E. CONFIGURACIÓN E INTEGRACIÓN DE LA RED</b> .....		<b>109</b>
<b>ANEXO F. INTERFAZ DE OPERACIÓN</b> .....		<b>114</b>
<b>ANEXO G. BLOQUES SIMULADORES</b> .....		<b>120</b>
<b>ANEXO H. PLANTA DE OPERACIÓN</b> .....		<b>123</b>

# LISTA DE TABLAS

Tabla B.1. Reglas del segmento Fieldbus ..... 79  
Tabla B.2. Tipos de cable y longitudes de segmento ..... 79  
Tabla B.3. Longitudes de spur ..... 80  
Tabla C.1. Especificaciones generales 1757 FFLD ..... 89  
Tabla C.2. Asignación de pines de un conector FF ..... 91  
Tabla C.3. Especificaciones generales Prosonic M FMU40 ..... 91  
Tabla C.4. Especificaciones generales PROline promag53 ..... 93  
Tabla C.5. Especificaciones generales DVC5000f ..... 95  
Tabla C.6. Especificaciones generales VLT 2800 ..... 97  
Tabla C.7. Especificaciones generales PK 60 ..... 97  
Tabla C.8. Dimensiones del tambor ..... 98  
Tabla C.9. Especificaciones generales MTL5995 ..... 100  
Tabla C.10. Especificaciones generales FBT-1 ..... 101



## Lista de Figuras

Fig. 2.1.	Sistema de tres estanques en serie .....	6
Fig. 2.2.	Perturbación del sistema .....	12
Fig. 2.3.	Entradas modificables del sistema.....	13
Fig. 2.4.	Flujos que ocurren en las válvulas de control.....	13
Fig. 2.5.	Nivel de agua en cada estanque .....	14
Fig. 3.1.	Funciones de masa total propuestas.....	21
Fig. 3.2.	Control PI para un sistema de primer orden .....	31
Fig. 4.1.	Perturbación constante .....	33
Fig. 4.2.	Respuesta del control PI .....	33
Fig. 4.3.	Perturbación periódica .....	34
Fig. 4.4.	Respuesta del control PI para perturbación periódica .....	34
Fig. 4.5.	Perturbación con y sin cambio escalón.....	35
Fig. 4.6.	Escenario 1, son cambio escalón .....	36
Fig. 4.7.	Escenario 1, con cambio escalón .....	36
Fig. 4.8.	Escenario 2, respuesta con cambio escalón .....	37
Fig. 4.9.	Efectos en la función de almacenamiento de masa limitada .....	38
Fig. 4.10.	Perturbación periódica .....	39
Fig. 4.11.	Escenario 3, respuestas .....	39
Fig. 4.12.	Escenario 3, respuestas sin estimación de perturbación .....	40
Fig. 4.13.	Escenario 4, respuestas .....	40
Fig. 5.1.	Arquitectura integrada de la planta.....	43
Fig. 5.2.	Setup de laboratorio .....	44
Fig. 5.3.	Ejemplo de control .....	45
Fig. 6.1.	Control PI con perturbación constante.....	46
Fig. 6.2.	Control PI con perturbación constante y cambio de set point .....	47
Fig. 6.3.	Control PI con perturbación periódica.....	48
Fig. 6.4.	Escenario 1, sin estimación de perturbación, sin cambio escalón .....	49
Fig. 6.5.	Escenario 1, con estimación de perturbación, sin cambio escalón .....	49
Fig. 6.6.	Escenario 1, sin estimación de perturbación, con cambio escalón .....	50
Fig. 6.7.	Escenario 1, con estimación de perturbación, con cambio escalón .....	50
Fig. 6.8.	Escenario 2, respuesta sin estimación de perturbación.....	51
Fig. 6.9.	Escenario 2, respuesta con estimación de perturbación.....	52
Fig. 6.10.	Escenario 3, respuestas .....	53
Fig. 6.11.	Escenario 4, respuestas .....	53
Fig. 6.12.	Suavización de las salidas.....	54
Fig. B.1.	Logo FOUNDATION Fieldbus.....	65
Fig. B.2.	Niveles de automatización en una planta.....	66
Fig. B.3.	Logotipo de aceptación FOUNDATION Fieldbus.....	68
Fig. B.4.	Modelo de las comunicaciones FF.....	68
Fig. B.5.	Calidad de parámetros .....	71
Fig. B.6.	Programa de lazo típico .....	73
Fig. B.7.	Programa de lazos múltiples .....	74
Fig. B.8.	Bloques Fieldbus.....	77
Fig. B.9.	Comparación de cableados .....	78
Fig. B.10.	Esquemas de conexión al segmento FF .....	78



Fig. B.11.	Longitud total de un segmento.....	80
Fig. B.12.	Longitud de derivaciones.....	81
Fig. B.13.	Topología de rama .....	81
Fig. B.14.	Topología de árbol .....	82
Fig. B.15.	Topología Daisy chain .....	83
Fig. B.16.	Hardware de un segmento Fieldbus.....	83
Fig. B.17.	Ejemplo de configuración de alimentación .....	84
Fig. B.18.	Acondicionador de poder.....	85
Fig. B.19.	Terminador Fieldbus.....	86
Fig. C.1.	PLC Control Logix .....	87
Fig. C.2.	Enlazador 1757-FFLD .....	88
Fig. C.3.	Conexión H1 .....	88
Fig. C.4.	Conexión de alimentación .....	89
Fig. C.5.	Sensor de nivel ultrasónico .....	90
Fig. C.6.	Compartimiento de terminales del sensor de nivel y asignación de terminales .....	90
Fig. C.7.	Flujómetro magnético PROline promag53 .....	92
Fig. C.8.	Terminales del transmisor de flujo .....	92
Fig. C.9.	Válvula de control FISHER DVC5010f.....	94
Fig. C.10.	Caja de terminals del controlador de válvula digital DVC5000f.....	95
Fig. C.11.	Variador de frecuencia Danfoss VLT 2800 .....	96
Fig. C.12.	Conexiones del VLT 2800.....	96
Fig. C.13.	Bomba Pedrollo PK60 .....	97
Fig. C.14.	Válvula PVC .....	98
Fig. C.15.	Estanque plástico .....	98
Fig. C.16.	Acondicionador de poder MTL5995 .....	99
Fig. C.17.	Conexiones del acondicionador .....	100
Fig. C.18.	Terminador MTL FBT-1 .....	101
Fig. C.19.	Conexiones del terminador .....	101
Fig. D.1.	Diagrama de conexión de campo.....	104
Fig. D.2.	Diagrama de conexión de campo.....	105
Fig. D.3.	Diagrama de conexión de campo.....	105
Fig. D.4.	Diagrama de conexión de campo.....	106
Fig. D.5.	Diagrama de conexión de campo.....	106
Fig. D.6.	Diagrama de conexión de campo.....	107
Fig. D.7.	Diagrama de conexión de campo.....	107
Fig. D.8.	Diagrama de conexión de campo.....	108
Fig. E.1.	RSFieldbus, ventana principal .....	111
Fig. E.2.	RS,Logix, ventana organizadora del proyecto.....	112
Fig. F.1.	Interfaz de operación, ventana principal / control PI.....	113
Fig. F.2.	Interfaz de operación, ventana principal / parada de emergencia.....	115
Fig. F.3.	Interfaz de operación, ventana de configuración de perturbación .....	116
Fig. F.4.	Interfaz de operación, ventana de gráficos .....	117
Fig. F.5.	Interfaz de operación, cajas de control PI.....	117
Fig. F.6.	Interfaz de operación, ventana principal / control IDA-PBC .....	118
Fig. F.7.	Interfaz de operación, caja de control IDA-PBC / estanque 1 .....	119
Fig. F.8.	Interfaz de operación, caja de control IDA-PBC / estanque 2 y 3.....	119
Fig. G.1.	Simulador en bloques simulink del modelo no-lineal del sistema con IDA-PBC.....	120
Fig. G.2.	Vista interna del estanque 1 en el modelo simulink .....	121

Fig. G.3.	Vista interna de la caja de control IDA-PBC del estanque 1 .....	122
Fig. H.1.	Sistema de los tres estanques en serie.....	123
Fig. H.2.	Gabinete del PLC.....	124
Fig. H.3.	Estación de control.....	125



# Nomenclatura

## Matrices

<b>M</b>	: matriz de parámetros de dimensión $n \cdot n$ .
<b>J</b>	: matriz de interconexión de un sistema PCH, de dimensión $n \cdot n$ .
<b>J<sub>d</sub></b>	: matriz de interconexión deseada.
<b>J<sub>a</sub></b>	: matriz de interconexión resultante del diseño.
<b>R</b>	: matriz de disipación de un sistema PCH, de dimensión $n \cdot n$ .
<b>R<sub>d</sub></b>	: matriz de disipación deseada.
<b>R<sub>a</sub></b>	: matriz de disipación resultante del diseño.
<b>g</b>	: matriz que captura la interconexión con el medio de un sistema PCH.

## Vectores

<b>x</b>	: vector de $n$ variables de estados, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$
<b>u</b>	: vector de $p$ variables de entrada, $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]^T$
<b>y</b>	: vector de $q$ variables de salida, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_q]^T$
<b>x<sub>i</sub></b>	: condición inicial del vector de estados.
<b>x<sup>0</sup></b>	: vector de estados en el punto de operación.
<b>u<sub>o</sub></b>	: vector de entradas en el punto de operación.
<b>y<sub>o</sub></b>	: vector de salidas en el punto de operación.

## Escalares

<b>A<sub>t</sub></b>	: area por la que circula el agua.
<b>g</b>	: aceleración de gravedad.
<b>A</b>	: area transversal de los estanques.
<b>h<sub>i</sub></b>	: altura de la columna de agua en el estanque i.
<b>f<sub>0</sub></b>	: flujo de alimentación independiente en el estanque 1 (perturbación).
<b>f<sub>(i-1)1</sub></b>	: flujo de entrada al estanque i proveniente del estanque i-1.
<b>f<sub>i1</sub></b>	: flujo de salida del estanque i hacia el estanque i+1.
<b>f<sub>i2</sub></b>	: flujo de salida de agua desde el estanque i por la válvula manual.
<b>f(t)</b>	: función en el tiempo continuo.
<b>k<sub>p</sub></b>	: ganancia proporcional del controlador PI.
<b>τ<sub>i</sub></b>	: ganancia integral del controlador PI.
<b>V(x)</b>	: función de Lyapunov.
<b>H(x)</b>	: función de energía (masa) total de un sistema PCH.
<b>H<sub>d</sub>(x)</b>	: función de energía (masa) deseada de un sistema PCH.
<b>x<sub>k</sub></b>	: $k$ -ésima variable de estado.
<b>dx<sub>k</sub>/dt = <math>\dot{x}_k</math></b>	: derivada de la $k$ -ésima variable de estado.
<b><math>\overline{x}_1</math></b>	: borde superior del nivel 1 en la función de almacenamiento de masa.
<b><math>\underline{x}_1</math></b>	: borde inferior del nivel 1 en la función de almacenamiento de masa.

$\hat{d}$	: estimación de la perturbación.
$\tilde{d}$	: error de estimación de la perturbación.
$\overline{d}$	: borde superior en la estimación de la perturbación.
$\underline{d}$	: borde inferior en la estimación de la perturbación.
$\ e\ $	: norma del elemento $e$ .
$f(t)$	: función en el tiempo continuo.
$f(k)$	: función en el tiempo discreto (también escrita $f(kT)$ , con $T$ el tiempo de muestreo).



## Abreviaciones

L.A.	: lazo abierto.
L.C.	: lazo cerrado.
S.S.	: estado estacionario.
MIMO	: sistema de varias entradas y varias salidas (multiple inputs multiple outputs).
PI	: controlador proporcional integral.
PID	: controlador proporcional integral derivativo.
PCH.	: Port Controlled Hamiltonian System.
IDA-PBC	: Interconnection and Damping Assignment – Passivity Based Control.
FF	: FOUNDATION Fieldbus.
HSE-H1	: High Speed Ethernet del tipo H1.



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción General

El control de nivel es hoy en día un objetivo fundamental en la mejora de diversos procesos del área de la ingeniería. El control de nivel de estanques acoplados es un interés en la industria de procesos petro-químicos, entre tantos otros.

Este proyecto consta de modelar y controlar un proceso multivariable (MIMO) y no-lineal consistente de tres estanques en serie. Al cual se le pretende hacer un control de nivel mediante actuadores que son válvulas de control que se encuentran a la salida de cada estanque.

Se diseña una estrategia clásica y otra más novedosa que permiten al sistema llevar sus niveles a una referencia predeterminada. Estas estrategias se pondrán a prueba para observar su capacidad de superar diversas dificultades que presenta el sistema en sí, como son el acoplo de sus variables de estado, y los efectos de una perturbación altamente ruidosa.

Existen trabajos recientes [7] donde se implementa una estrategia de control no lineal llamada “Interconnection and Damping Assignment Passivity Based Control” IDA-PBC, que resuelve el problema de control usando un enfoque basado en energía. Los trabajos enfocados a esta estrategia son variados en los últimos años [7], [8], [9], [10], por lo que resulta interesante adaptar el método IDA-PBC para diseñar controladores de nivel que tengan un buen desempeño en el sistema de estanques en cascada, moldeando la función de masa total. La función en IDA-PBC objetivo es lograda asignando al lazo cerrado una función de masa total deseada que capture un comportamiento deseado. En algunos casos para modificar la función de masa es necesario modificar las matrices de interconnection y/o damping, de ahí el nombre de IDA. Este método permite tratar con sistemas multi-tanques descritos por dinámicas no-lineales y establecer la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Para contrastar los resultados del control basado en pasividad se diseñará una estrategia clásica del control de nivel [1], la que es un controlador PI.

En adición al trabajo teórico que se realiza en este proyecto, se realiza una parte práctica que incluye la implementación del sistema real de tres estanques en un laboratorio, luego se realizan pruebas en planta que permiten contrastar los resultados teóricos con los prácticos.

## 1.2. Trabajos Previos

En muchas aplicaciones industriales el control de nivel juega un rol determinante, es por esto que durante mucho tiempo se han estudiado diversas estrategias cuyos objetivos principales son una operación dentro de un rango deseado y un flujo de descarga lo más suave posible. Así mismo los sistemas MIMO no lineales son los más comunes en la práctica, por eso es importante desarrollar e implementar nuevas estrategias de control que permitan mejorar las ya existentes.

Los primeros esfuerzos por lograr estos objetivos desembocan en las técnicas de control de nivel más clásicas y quizá más utilizadas, éstas son las estrategias P y PI [1], que muestran buenas respuestas al ser aplicados en un sistema de estanque SISO, pero cuando se aplica a un sistema MIMO de estanques en cascada muestra ciertos efectos inesperados como es que las fluctuaciones de flujo van aumentando conforme la perturbación va bajando en la cascada, para resolver esto se propone el uso de desacopladores [1] [2] [3]. Estudios posteriores [3] nos muestran que para sistemas MIMO se obtienen mejores respuestas utilizando estrategias de control multivariable en vez de estrategias SISO, incluso si estas utilizan desacopladores.

También son aplicados a este tipo de sistemas estrategias de control más complejas, como son por ejemplo el control predictivo y adaptativo-predictivo [4] [5] [6]. Las cuales presentan un buen desempeño, pero están basadas en una buena modelación del proceso y por ello necesitan considerar toda la información posible del sistema para llevar a cabo un control de calidad. También pueden resultar complejos de implementar debido a los esfuerzos de cálculo y computacionales que pueden implicar.

Una estrategia de control multivariable con un enfoque distinto es utilizada en este trabajo, esta se trata de un control pasivo basado en el balance de masa y en la asignación de interconexión y disipación (IDA-PBC). Este enfoque es presentado en [7], [8], [9] y [10], y propone encontrar una función de energía que proporcione un comportamiento deseado al sistema, además de lograr un desacoplo del sistema modelando la interconexión entre las variables de estado. Este control posee un amplio campo de aplicación ya que una condición suficiente para su implementación es que el sistema sea pasivo. En [9] se aplica exitosamente esta estrategia de control al mismo sistema de los tres estanques, pero su enfoque es diferente ya que busca encontrar una solución que permita inversión de flujo entre los primeros dos estanques. Para los fines de este estudio utilizaremos un enfoque como el utilizado en [7], en donde se aplica el control IDA-PBC a un sistema de tres estanques en serie que simula las líneas de flotación para la obtención del cobre, se desarrolla una

estrategia que permite al primer estanque utilizar su capacidad como buffer para amortiguar el ruido de la perturbación. Por la similitud en el sistema y en los objetivos planteados, [7] es el trabajo en que está basada esta memoria de título.

En cuanto a implementación práctica, [8] aplica entre otras técnicas al IDA-PBC y el control PI en una planta piloto que consta de un estanque simple al que se le realiza control en cascada de nivel y flujo, los resultados arrojan al control basado en pasividad como uno de los más satisfactorios. La actual memoria de título contempla la implementación de una tecnología más avanzada que la aplicada en [8], se implementa la planta de los tres estanques en un sistema FOUNDATION Fieldbus, que al ser una tecnología novedosa no cuenta con muchas publicaciones educativas para su montaje, por lo que [14], [15], [16], [17] y [18] serán de gran ayuda para este trabajo.

### 1.3. Hipótesis de Trabajo

Es posible llevar el nivel de tres estanques dispuestos en serie a una referencia dada independiente para cada uno de ellos mediante control de nivel.

- Se puede diseñar un control que permita obtener salidas desacopladas, y que sea una alternativa a las estrategias de control más utilizadas como PI.
- El control se realizará mediante variaciones de flujo que se producen producto de la variación de la apertura de una válvula de control existente a la salida de cada uno de los estanques, que controla el paso de agua de un estanque a otro.
- La solución de control será estable en lazo cerrado.
- Es posible estimar la perturbación no medible.
- Es posible un control que permita al primer estanque actuar como un buffer que absorba una perturbación altamente ruidosa, para que los niveles de los últimos dos estanques sigan la referencia dada de la manera más suave posible.
- Es posible utilizar para estos fines un controlador IDA-PBC.
- Se puede realizar una implementación del sistema en un laboratorio que permita poner a prueba las estrategias de control.



## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Modelar, diseñar, simular en computador, y probar en planta una estrategia de control de nivel IDA-PBC para un sistema de tres estanques en serie y comparar el desempeño con una estrategia más común.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Modelar el sistema de los tres estanques, obteniendo un sistema cercano a la realidad física.
- Mantener el nivel de cada estanque constante en una referencia independiente dada para cada uno de ellos, realizando control de nivel a través de válvulas de descarga, una por cada estanque.
- Eliminar el acoplo en las variables de estado del sistema.
- En caso de tener una perturbación altamente ruidosa, amortiguar el ruido por medio del primer estanque, a modo de que en los estanques dos y tres los niveles sean suaves.
- Diseñar, simular y probar en planta una estrategia de control PI.
- Diseñar, simular y probar en planta una estrategia de control IDA-PBC.
- Estimar para el control IDA-PBC la perturbación no medible.
- Comparar las capacidades de las estrategias diseñadas y mostrar las ventajas comparativas del algoritmo de control IDA-PBC con respecto a los algoritmos de control tradicionales.

## **1.5. Alcances y Limitaciones**

Los análisis que se realizan en este estudio son sobre el sistema específico de tres estanques en serie, y no serán generalizados.

La principal estrategia que se prueba es el control IDA-PBC, y se contrastará solo con una estrategia básica y común del control de procesos, como es el control PI.

La instrumentación con la que se pretende implementar el proceso real está dispuesta en planta, por lo que no se hará elección de ella ni del protocolo de comunicación que se utilizará.

## **1.6. Temario y Metodología**

Esta memoria de título se divide en 7 capítulos, los cuales se describirán generalmente a

continuación.

En el presente capítulo se introduce el tema trabajado, se presentan los trabajos previos, la hipótesis de trabajo, los objetivos generales y específicos, y por último los alcances y limitaciones considerados.

El capítulo 2 aborda todo lo concerniente a la modelación del sistema de tres estanques en serie. Se muestra la obtención del modelo matemático, los puntos de operación del sistema, se demuestra la estabilidad del sistema y se obtienen las simulaciones para las respuestas en L.A. mediante Matlab Simulink.

En el capítulo 3 se realiza una introducción al control basado en pasividad, desde los principios más básicos hasta aquellos que se utilizan para la obtención de la ley de control. Luego se aplica el control IDA-PBC al sistema de los tres estanques. Al final de éste capítulo se hace una introducción al control PI, se obtienen las leyes de control y se muestra la discretización que se utilizó para las pruebas en planta.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos mediante la aplicación de los controladores diseñados a nuestro modelo de simulación. Primero se muestran las respuestas del control PI, considerando dos casos de interés. Por último son mostradas las respuestas del control IDA-PBC, considerando 4 escenarios interesantes de analizar.

El capítulo 5 muestra el setup de laboratorio, éste incluye un diagrama de arquitectura y un diagrama de setup general, los detalles técnicos de la red y de conexión se muestran en anexos.

El capítulo 6 muestra los resultados obtenidos mediante la aplicación de los controladores diseñados al sistema real de estanques en serie. Siguiendo el mismo orden del capítulo 4.

El capítulo 7 presenta las conclusiones obtenidas de este estudio, y se plantean trabajos futuros que pueden ser desarrollados por futuros memoristas.

Finalmente se encuentran los anexos, el Anexo A muestra la teoría de interés que se utilizó en algunos capítulos para validar algunos pasos. El Anexo B se trata de una guía educativa donde se introducen los fundamentos necesarios de FOUNDATION Fieldbus que se deben tener en cuenta cuando se desea diseñar una red de este tipo. En el Anexo C se describe la instrumentación utilizada en planta, mostrando las respectivas tablas que deben considerarse para realizar un correcto montaje. El Anexo D muestra los diagramas de conexión de campo. El Anexo E muestra una guía que describe los pasos seguidos para configurar la red mediante software. El Anexo F muestra la interfaz de operación diseñada para el proceso. El Anexo G muestra el simulador realizado en Matlab Simulink. Por último el Anexo H muestra imágenes de la planta de operación.

## Capítulo 2. Sistema de Tres Estanques en Serie

### 2.1. Introducción

A continuación se abordan los tópicos concernientes a la modelación matemática del sistema estudiado, se analizará su estabilidad, y se realizarán simulaciones que ilustren como se comporta el proceso realmente.

### 2.2. Proceso de Tres Estanques en Serie

La Fig. 2.1 muestra el proceso de los tres estanques en serie. Se trata de un sistema multivariable (MIMO) no-lineal.

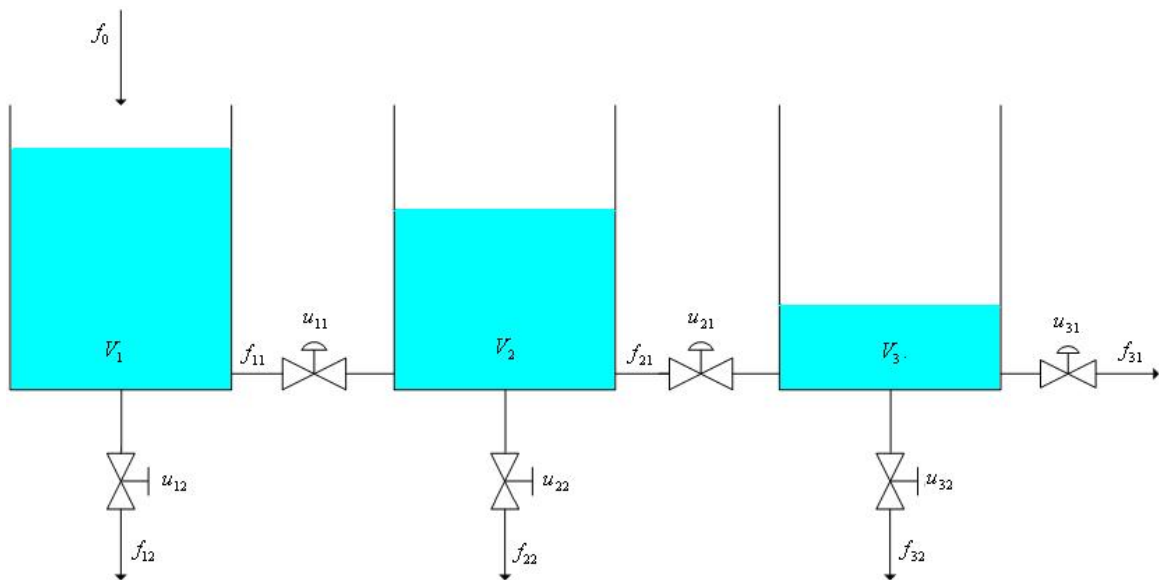


Fig. 2.1. Sistema de Tres Estanques en Serie.

#### 2.2.1 Obtención del Modelo Matemático

Para este sistema se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los tres estanques están dispuestos a la misma altura con respecto al suelo.
- El área transversal de los tres estanques es idéntica y constante.
- Sólo el primer estanque es alimentado de manera independiente por la entrada  $f_0$ . En principio se considerará como una entrada medible.

- Existen tres válvulas de control  $u_{11}, u_{21}$  y  $u_{31}$  que se encargan de controlar el nivel del estanque que le precede.
- Existen tres válvulas manuales  $u_{12}, u_{22}$  y  $u_{32}$  que descargan agua de su correspondiente estanque. Estas se fijarán en una apertura constante durante todo el proceso.
- Las salidas del sistema son los volúmenes de cada estanque  $V_1, V_2$  y  $V_3$ .

La ecuación de flujo que circula por un área es:

$$f = A_i \cdot v \quad (2.1)$$

Donde,

$A_i$  : Área por la que circula el agua

$v$  : Velocidad del agua

De la ecuación de Bernoulli, se obtiene que la velocidad del agua que entra al estanque  $i$  desde el estanque  $i-1$ , que está a la misma altura, y que contiene el mismo líquido (en este caso agua) está dada por:

$$v_i = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{i-1} - h_i)} \quad (2.2)$$

Donde,

$g$  : Aceleración de gravedad

$h_{i-1}$  : Altura de la columna de agua en el estanque precedente  $i-1$

$h_i$  : Altura de la columna de agua en el estanque  $i$

Luego, de (2.1) y tomando en cuenta que el área por la que circula el agua desde un estanque al otro está dada por la apertura de la válvula de control, se tiene lo siguiente:

$$f_{i1} = K_v(u_{i1}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_i - h_{i+1})} \quad (2.3)$$

Donde,

$K_v(u_{i1})$  : Función de apertura de la válvula  $u_{i1}$

$f_{i1}$  : Flujo de salida del estanque i

En adición, cada estanque cuenta con una salida de agua en el fondo, la cual está regulada por una válvula manual. Claramente, en este caso la presión sobre dicha válvula depende solo de la altura de la columna de agua del estanque al cual corresponde. Entonces el modelo del flujo que abandona el estanque a través de esta válvula queda dado por:

$$f_{i2} = K_v(u_{i2}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_i)} \quad (2.4)$$

Para el modelo del estanque, se plantea la ecuación de balance de masas siguiente:

$$\frac{dV_i(h_i)}{dt} = f_a + f_{(i-1)1} - f_{i1} - f_{i2} \quad (2.5)$$

Donde,

$V_i$  : Volumen de agua en el estanque i.

$f_a$  : Flujo de alimentación independiente al estanque (perturbación).

$f_{(i-1)1}$  : Flujo de entrada al estanque i proveniente del estanque anterior.

$f_{i1}$  : Flujo de salida del estanque i hacia el estanque i+1.

$f_{i2}$  Flujo de salida del estanque i por la válvula manual.

El volumen de agua en el estanque depende de la altura de la columna de agua de éste como muestra (2.5). Del mismo modo los flujos de entrada y salida dependen de las alturas en las columnas de agua de los estanques. Se desea expresar como salida del modelo el volumen del agua dentro de los estanques, por lo tanto las alturas de las columnas de agua deben dejarse en función de los volúmenes de estas, lo que no es problema ya que las áreas transversales de los estanques son constantes. Entonces las alturas de las columnas de agua quedarán expresadas como una división entre en volumen del agua y el área transversal de los estanques.

El sistema de ecuaciones del sistema según lo anterior es el siguiente:

$$\frac{dV_1}{dt} = f_0 - K_v(u_{11}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{V_1}{A} - \frac{V_2}{A} \right)} - K_v(u_{12}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{V_1}{A}} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_2}{dt} = & K_v(u_{11}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{V_1}{A} - \frac{V_2}{A} \right)} \dots \\ & \dots - K_v(u_{21}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{V_2}{A} - \frac{V_3}{A} \right)} - K_v(u_{22}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{V_2}{A}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\frac{dV_3}{dt} = K_v(u_{21}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{V_2}{A} - \frac{V_3}{A} \right)} - K_v(u_{31}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{V_3}{A}} - K_v(u_{32}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{V_3}{A}} \quad (2.8)$$

Donde,

$f_0$  : Flujo de entrada independiente al estanque 1.

$K_v(u_{i1})$  : Función de la válvula de control, ubicada entre estanque  $i$  e  $i+1$ .

$K_v(u_{i2})$  : Función de la válvula manual, ubicada en el fondo del estanque  $i$ .

$V_i$  : Volumen de agua en el estanque  $i$ .

$A$  : Área transversal de los estanques, constante.

El sistema en general se puede representar de la forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(x, u, p) = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3]^T \quad (2.9)$$

$$\mathbf{y} = h(x, u, p) = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T \quad (2.10)$$

Donde,

$x_i = V_i$  : Variables de estado correspondiente a los volúmenes de los estanques.

$\dot{x}_i = \dot{V}_i$  : Derivada de las variables de estado.

### 2.2.2 Puntos de Operación del Sistema

Para obtener los puntos de operación se debe igualar las derivadas que describen al sistema a cero, y resolver para las variables de estado  $\mathbf{x}_o = [x_{o1} \ x_{o2} \ x_{o3}]^T$ , las entradas  $\mathbf{u}_o = [u_{o11} \ u_{o12} \ u_{o21} \ u_{o22} \ u_{o31} \ u_{o32}]^T$ , y la perturbación del sistema  $f_o$ .

Se tomará en cuenta lo siguiente. Para simplificar el análisis se considerará que las válvulas presentan características lineales, es decir  $K_v(u_{ij}) = k_{ij} \cdot u_{ij}$ , donde  $k_{ij}$  es la ganancia de la válvula y  $u_{ij}$  es la apertura de la válvula. El flujo de alimentación independiente es la perturbación del sistema y se considera constante. Ya que la apertura de las válvulas manuales se considerará constante a lo largo del proceso, conviene dejar los puntos de operación de las entradas  $u_{o11}$  en función de las variables de estado, de las perturbaciones, y de las entradas manipulables:

$$u_{o11} = \frac{f_o - k_{12} \cdot u_{o12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o1}}{A}}}{k_{11} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{x_{o1}}{A} - \frac{x_{o2}}{A} \right)}} \quad (2.11)$$

$$u_{o21} = \frac{f_o + f_1 - k_{12} \cdot u_{o12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o1}}{A}} - k_{22} \cdot u_{o22} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o2}}{A}}}{k_{21} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left( \frac{x_{o2}}{A} - \frac{x_{o3}}{A} \right)}} \quad (2.12)$$

$$u_{o31} = \frac{f_o + f_1 - k_{12} \cdot u_{o12} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o1}}{A}} - k_{22} \cdot u_{o22} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o2}}{A}} - k_{32} \cdot u_{o32} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o3}}{A}}}{k_{31} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{x_{o3}}{A}}} \quad (2.13)$$

### 2.2.3 Estabilidad del Sistema

El estudio de la estabilidad del sistema se basará en el *Método Directo de Lyapunov*, el cual es una extensión natural de la física fundamental: Si la energía es continuamente disipada, entonces el sistema (lineal o no) debe eventualmente llegar a un punto de equilibrio. Como la energía es un escalar, el análisis debe reducirse al análisis de una función escalar  $V(\mathbf{x})$  del tipo energía. Esto

puede extenderse al análisis de masa en un sistema, ya que esta tampoco debe crecer infinitamente como se espera con la energía.

En el caso estudiado, la variable analizada corresponde a la masa de agua dentro de cada estanque, por lo que la función de Lyapunov propuesta será la masa total almacenada dentro del sistema, es decir:

$$V(\mathbf{x}) = x_1 + x_2 + x_3 \quad (2.14)$$

La cual al ser de masa obviamente cumple con la definición de ser definida positiva (*Def. 1 Anexo A.1*).

Para conocer la estabilidad necesitamos analizar  $\dot{V}(x) = \dot{x}_1 + \dot{x}_2 + \dot{x}_3$ :

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = f_0 - K_v(u_{12}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1(x_1)} - K_v(u_{22}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2(x_2)} \dots \\ \dots - K_v(u_{31}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3(x_3)} - K_v(u_{32}) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_3(x_3)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Todos los términos de (2.15) serán negativos menos el flujo de alimentación. Esto debido a que las alturas y las aperturas de las válvulas tienen un valor mínimo cero. Si observamos los términos de la ecuación, estos corresponden a todas las entradas y salidas del sistema si lo tomáramos todo como un solo gran estanque.

Entonces  $\dot{V}(\mathbf{x})$  será definida negativa, y por lo tanto  $V(\mathbf{x})$  una función de Lyapunov para el sistema (*Def. 5 Anexo A.1*) siempre que la masa de agua que entre al sistema sea igual o menor que la masa de agua que está saliendo de este.

Agregando que se cumple  $V(\mathbf{x}) \rightarrow \infty$  cuando  $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ , se tiene que el sistema será *globalmente asintóticamente estable* siempre que se cumpla la condición de masa que hace de  $\dot{V}(\mathbf{x})$  una función definida negativa (*Teorema 2 Anexo A.1*).

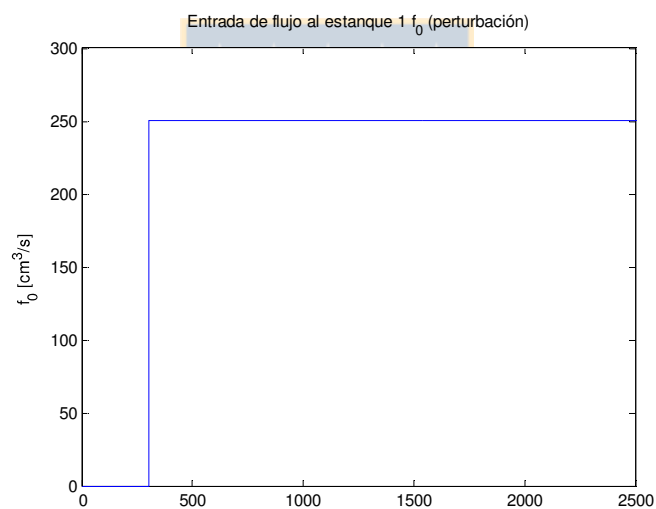
La condición de masa es bastante lógica dado que si entra más agua al sistema de la que está saliendo, esta crecería infinitamente provocando el rebalse de los estanques.



### 2.3. Simulación para la respuesta en Lazo Abierto

Para realizar estas simulaciones es necesario fijar algunos parámetros. El diámetro real de los estanques es de  $44[cm]$ , por lo que el área transversal de éstos será  $1520.53[cm^2]$  y se considera constante. La bomba de agua según especificaciones técnicas puede proporcionar un flujo máximo de  $666.667[cm^3 / s]$ , por lo que se trabajará con valores entre 0 y  $400[cm^3 / s]$  para no sobrecargar la bomba. Las ganancias de todas las válvulas se fijan en  $k_{ij} = 1$  para simplificar el análisis. Las aperturas de las válvulas manuales ubicadas en la base de cada estanque serán fijadas en 25% para efectos de esta simulación y se mantendrán fijas a lo largo de la operación del sistema.

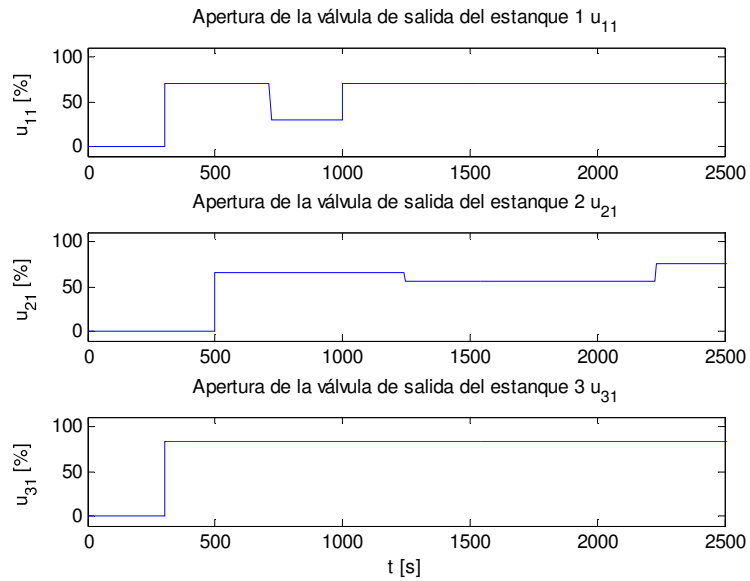
Para estas simulaciones, se utilizó el modelo no lineal implementado en bloques de Matlab Simulink, los cuales pueden encontrarse a modo demostrativo en el *Anexo G* de este informe.



**Fig. 2.2. Perturbación del sistema.**

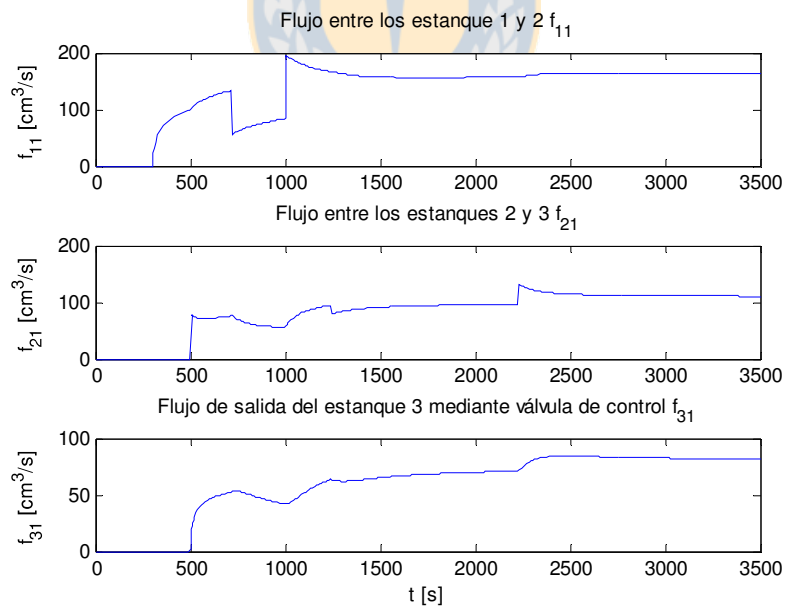
Donde se observa que desde el tiempo 0 a 300 segundos el estanque uno permanece sin alimentación, y pasados estos, se alimenta al estanque con una tasa de flujo de  $300[cm^3 / s]$ .

La siguiente figura muestra las entradas modificables del sistema, es decir, las válvulas de control. Se eligió el siguiente esquema de aperturas para que quede como evidencia en las variables de estado, que son los volúmenes o alturas, el fuerte acoplamiento que tiene este sistema serial.



**Fig. 2.3. Entradas modificables del sistema.**

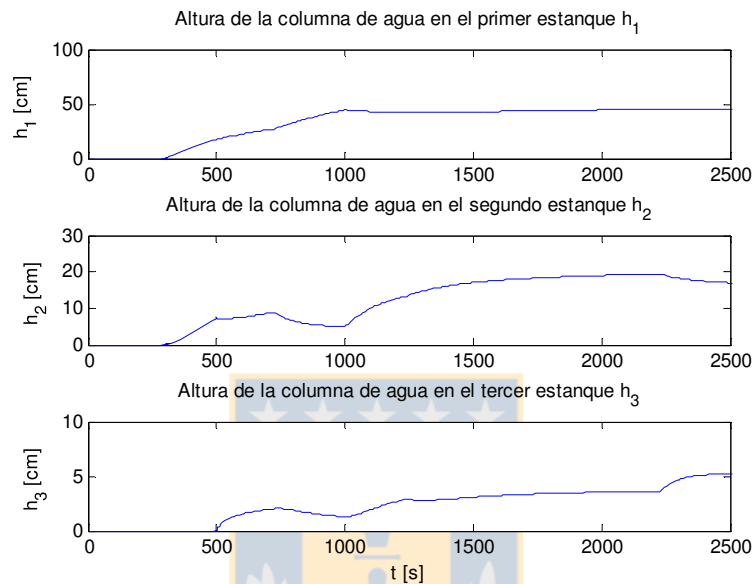
A continuación se ilustran los flujos que ocurren entre los estanques, y el flujo de salida del estanque tres.



**Fig. 2.4. Flujos que ocurren en las válvulas de control.**

En la **Fig. 2.4** se observa claramente el acoplamiento que tiene este sistema, dado que la modificación en la apertura de la primera válvula afecta todo el sistema río abajo, lo mismo pasa con la segunda válvula que afecta al tercer estanque.

Para continuar la observación de éste fenómeno, la **Fig. 2.5** ilustra los niveles dentro de cada estanque.



**Fig. 2.5. Nivel de agua en cada estanque.**

Cabe destacar que los tres estanques alcanzan un nivel fijo en estado estacionario. Lo que apoya la conclusión de que este sistema es estable. Es un objetivo del control eliminar o disminuir al máximo el acoplamiento de las variables de estado.

## Capítulo 3. Diseño de Control usando IDA-PBC

---

### 3.1. Introducción

Se trabaja con un controlador que no necesita la linealización del sistema. Se desarrollará un control basado en pasividad con balance de energía IDA-PBC.

### 3.2. Control Basado en Pasividad con Balance de Energía

La energía es uno de los conceptos fundamentales en ingeniería. El diseño de sistemas de control a través de funciones de energía es ampliamente difundido en sistemas no lineales tales como sistemas mecánicos y eléctricos, los cuales se pueden descomponer en simples subsistemas, que mediante interconexiones, suman sus energías para determinar el comportamiento del sistema. La acción del controlador puede ser vista en términos de energía como otro sistema dinámico interconectado con el proceso para modificar el comportamiento de éste. Entonces el problema de control recae en encontrar un sistema dinámico y una estructura de interconexión que haga a la función de energía (en nuestro caso ‘masa-volumen’) tomar una forma deseada. Este enfoque de amoldamiento de energía (masa-volumen), es la esencia del control pasivo (passivity-based control – PBC).

#### 3.2.1 Pasividad

Son de interés los sistemas de parámetros concentrados que se conectan al ambiente externo mediante variables de puerto de poder  $u \in \mathfrak{R}^m$  e  $y \in \mathfrak{R}^m$ , que multiplicadas resultan en unidades de energía. Se asume que los sistemas cumplen con la ecuación de balance de energía:

$$\underbrace{\int_0^t u^T(s)y(s)ds}_{\text{Entregada}} = \underbrace{H[x(t)] - H[x(0)]}_{\text{Almacenada}} + \underbrace{d(t)}_{\text{Disipada}} \quad (3.1)$$

Donde  $x \in \mathfrak{R}^n$  es el vector de estados,  $H(x)$  es la función de energía total del sistema y  $d(t)$  es una función no negativa que captura los efectos de la disipación.

*Def. 4.1:* El mapa  $u \mapsto y$  es pasivo, si existe alguna función de energía  $H(x)$ , con límite inferior definido, variables de estado  $x \in \mathfrak{R}^n$  y una función definida positiva  $d(t) > 0$  tal que satisfaga (3.1).

Dos importantes corolarios se obtienen de (3.1).

- La energía de un sistema no controlado, es decir con  $u = 0$ , es no creciente y tenderá eventualmente a decrecer en presencia de disipación. Si la función de energía está acotada por debajo, el sistema se detendrá en un punto de mínima energía. También, como es de esperar, la tasa de convergencia de la función de energía es incrementada si se extrae la energía del sistema.
- Dado que

$$-\int_0^t u^T(s)y(s)ds \leq H[x(0)] \leq \infty \quad (3.2)$$

La cantidad total de energía que se puede extraer de un sistema pasivo es acotada.

### 3.2.2 Sistemas Hamiltonianos Controlados Por Puertos

Para caracterizar una clase de sistema estabilizable mediante balance PBC, se requiere incorporar más estructuras dinámicas en los sistemas, en particular hacer explícitos los términos de amortiguamiento (damping) y la dependencia de la función de energía (masa). Esto lleva a modelos de la forma:

$$\sum \left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = [J(x) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x)u \\ y = g(x)^T \frac{\partial H}{\partial x}(x) \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Llamado Sistema Hamiltoniano Controlado por Puertos (PCH), donde  $x \in \mathfrak{R}^n$  son variables de energía,  $u \in \mathfrak{R}^m$  e  $y \in \mathfrak{R}^m$  son variables de puertos y la función  $H(x) : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  representa la energía total del sistema. La estructura de interconexión es capturada por la matriz  $n \times n$   $J(x) = -J^T(x)$  y la matriz  $n \times m$   $g(x)$ , la disipación es representada por la matriz  $R(x) = R^T(x) \geq 0$ . Todas estas matrices dependen de  $x$  formando funciones continuas y derivables.

También se desea estudiar sistemas en donde el control actúa a través de la estructura de interconexión. Usualmente se trata de sistemas con interruptores donde el controlador conmuta entre diferentes topologías. Si se asume una frecuencia de muestreo lo suficientemente rápida por parte del controlador, se puede aproximar el comportamiento del sistema por un sistema suave. Esta situación es común en dispositivos de electrónica de potencia, y lleva a considerar sistemas de la forma:

$$\dot{x} = [J(x, u) - R(x)] \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x, u) \quad (3.4)$$

### 3.2.3 Balance de Energía y Estabilidad

Al evaluar la tasa de cambio de energía total de un sistema PCH, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dH}{dt} = - \left[ \frac{\partial H}{\partial x}(x) \right]^T R(x) \left[ \frac{\partial H}{\partial x}(x) \right] + u^T y \quad (3.5)$$

Donde el primer término del lado derecho de la ecuación representa la disipación debido a los elementos resistivos del sistema. Integrando se puede obtener la ecuación de balance de energía del sistema como se muestra a continuación:

$$\underbrace{\int_0^t u^T(s) y(s) ds}_{\text{Entregada}} = \underbrace{H[x(t)] - H[x(0)]}_{\text{Almacenada}} + \underbrace{\int_0^t \left[ \frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] \right]^T R[x(s)] \left[ \frac{\partial H}{\partial x}[x(s)] \right] ds}_{\text{Disipada}} \quad (3.6)$$

El cual es válido para todo  $t \geq 0$ . La ecuación (3.6) representa el hecho de que un sistema pasivo no puede almacenar más energía que la suministrada desde el exterior, donde la diferencia es la energía disipada. Es importante destacar que en general el punto donde la energía en lazo abierto es mínima no es de interés práctico, y el control es introducido para operar el sistema alrededor de un punto de equilibrio distinto de cero.

En PBC el problema de estabilización se plantea en términos de:

*Objetivo de Pasividad:* Dado el sistema PCH (3.3) o (3.4) y un punto de equilibrio constante  $x^0$ , encontrar una acción de control  $u(x) = \beta(x) + v$  de manera que la dinámica en lazo cerrado sea un sistema PCH que satisface la nueva ecuación de balance de energía:

$$\underbrace{\int_0^t v^T(s) y'(s) ds}_{\text{Entregada}} = \underbrace{H_d[x(t)] - H_d[x(0)]}_{\text{Almacenada}} + \underbrace{d_d(t)}_{\text{Disipada}} \quad (3.7)$$

Donde  $H_d(x)$  es la función de energía deseada, que tiene un mínimo local estricto en  $x^0$ ,  $y'$  que puede ser igual a  $y$ , es la nueva salida pasiva, y se ha reemplazado el término de disipación natural por una función  $d_d(t) \geq 0$  para incrementar la tasa de convergencia.

Para resolver el problema de pasividad que se ha propuesto se presenta la metodología para el diseño de *Interconexión y Asignación de Amortiguamiento-Control Basado en Pasividad* o *Interconnection and Damping Assignment-Pasivity Based Control* o IDA-PBC. Se presenta a continuación la metodología para el caso general de un sistema PCH (3.4), la cual se puede adaptar al caso más simple (3.3) con unas pocas modificaciones de notación.

### 3.2.4 Diseño del Controlador usando IDA-PBC

Consideraremos un proceso descrito por un modelo Hamiltoniano de Puerto Controlado que es de la forma:

$$\dot{x} = [J(x, u) - R(x, u)] \frac{\partial H}{\partial x}(x) + g(x) d \quad (3.8)$$

Donde  $d \in \mathfrak{R}_+$  representa una perturbación,  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $u \in \mathfrak{R}^n$ , son las variables de masa (volumen) y de control respectivamente. La función  $H(x)$  típicamente representa la masa total almacenada; la matriz anti-simétrica  $J(x, u) = -J(x, u)^T$  representa la interconexión entre los distintos componentes del sistema,  $R(x, u) = R(x, u)^T$  es la matriz de disipación o amortiguamiento, y  $g(x)$  representa la interconexión del sistema con el ambiente.

Las transferencias de energía (masa) interna en un sistema PCH son capturadas por las matrices de interconexión y de amortiguamiento, es por esto que se modifican estas matrices a modo

que tomen una forma deseada, de ahí el término IDA. Luego, se deriva una Ecuación Diferencial Parcial parametrizada por las matrices escogidas cuyas soluciones representan todas las funciones de energía (masa) posibles de asignar. Finalmente, de esta familia de soluciones se escoge una que satisfaga los requerimientos mínimos y se implementa el control.

De forma más precisa, el objetivo de IDA-PBC es encontrar un control estático de realimentación de estados  $u(x) = \beta(x)$  de manera que la dinámica en lazo cerrado sea un sistema PCH de la forma:

$$\dot{x} = [J_d(x, u) - R_d(x, u)] \nabla H_d(x) \quad (3.9)$$

Donde  $H_d(x)$  es la función de masa total deseada,  $J_d(x) = -J_d^T(x)$  y  $R_d(x) = R_d^T(x) \geq 0$  son matrices deseadas de interconexión y amortiguamiento respectivamente.

Evaluando la derivada de tiempo de la función de masa en la dinámica de lazo cerrado:

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T \dot{x} \quad (3.10)$$

$$\dot{H}_d = \nabla H_d^T [J_d - R_d] \nabla H_d \quad (3.11)$$

$$\dot{H}_d = [\nabla H_d^T J_d \nabla H_d] - [\nabla H_d^T R_d \nabla H_d] \quad (3.12)$$

En la expresión (3.12), dado que la matriz  $J_d(x)$  es anti-simétrica, el término de la izquierda se hace cero. Y dado que la matriz de disipación es simétrica, siempre que  $R(x, u) \geq 0$ , se tendrá que:

$$\dot{H}_d = -(\nabla H_d)^T R_d(x, u) \nabla H_d \leq 0 \quad (3.13)$$

Por lo tanto, para estabilizar un punto de operación  $x^0$ , es suficiente con seleccionar  $H_d(x)$  con un mínimo aislado en  $x^0$ . Para esto las siguientes condiciones deben ser satisfechas:

- Condición necesaria de extremo asignado:

$$\nabla H_d(x^0) = 0 \quad (3.14)$$



- Condición suficiente de mínimo asignado:

$$\nabla^2 H_d(x^0) > 0 \quad (3.15)$$

Definiendo  $H_d(x) := H(x) + H_a(x)$ , y utilizando las ecuaciones (3.8) y (3.9) se obtiene la siguiente ecuación clave para el diseño:

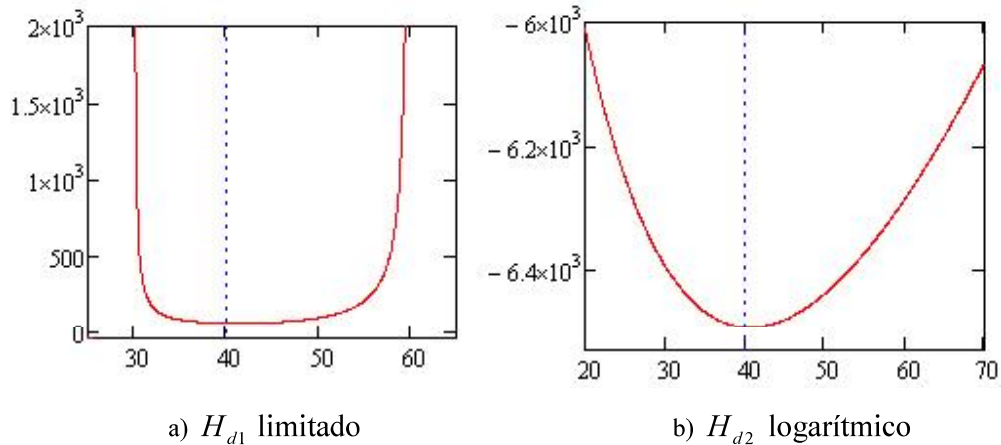
$$[J_d(x, u) - R_d(x, u)]\nabla H_d = -[J_a(x, u) - R_a(x, u)]\nabla H + g(x)d \quad (3.16)$$

Resolviendo la ecuación anterior para  $u$  con una dada función de almacenamiento de masa  $H_a(x)$ , se obtiene el controlador que logra el objetivo de encontrar la forma de masa deseada, y consecuentemente estabiliza  $x^0$ . Con el fin de diseñar el controlador para estabilizar un punto de equilibrio dado  $x^0$ , proponemos una función de masa total como en [7]:

$$H_d(x) := H(x) + H_a(x) = \sum_{i=1}^3 x_i + \sum_{i=1}^3 \phi_i(x_i, x_i^0) \quad (3.17)$$

Donde la función  $\phi_i(x_i, x_i^0)$  debe asignar el punto de equilibrio al sistema en L.C.

Con el fin de capturar los objetivos de control del nivel medio, será necesario dar forma a la función de masa total asignada al estanque. Como se mencionó anteriormente, una aplicación interesante en este trabajo es utilizar el primer estanque para amortiguar las perturbaciones del flujo de entrada, es decir, permitiremos que su nivel se mueva entre ciertos bordes, sin embargo los niveles de los estanques río abajo deben permanecer constantes. Para un flujo de salida suave y evitar que una perturbación ruidosa afecte el sistema río abajo, una función de masa plana como  $H_{d1}$  alrededor de un nivel nominal será requerida (Fig. 3.1a). Por otro lado, para mantener un control ajustado alrededor del set point, una función de masa como  $H_{d2}$  que penaliza grandes errores debe ser diseñada (Fig. 3.1b).



**Fig. 3.1. Funciones de Masa Total Propuestas.**

La función de masa asociada al primer estanque puede ser diseñada para limitar el volumen de éste para permanecer dentro de ciertos bordes  $[\underline{x}_1, \bar{x}_1]$ , mientras se mantiene un flujo de descarga suave. Ésta corresponde a  $H_{d1}$  y su ecuación es:

$$\phi_1(x_1, x_1^0, \underline{x}_1, \bar{x}_1) := -x_1 + \alpha \left[ \frac{(x_1^0 - \underline{x}_1)^2}{x_1 - \underline{x}_1} + \frac{(\bar{x}_1 - x_1^0)^2}{x_1 - \bar{x}_1} \right] \quad (3.18)$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro de sintonización. Luego, la función de masa total es como sigue:

$$H_d(x) := H(x) + H_a(x) = x_1 + \phi_1(x_1, x_1^0, \underline{x}_1, \bar{x}_1) + \sum_{i=2}^3 x_i + \phi_i(x_i, x_i^0) \quad (3.19)$$

Una elección simple de  $\phi_i(x_i, x_i^0)$  que no considera limitaciones y que corresponde a  $H_{d2}$  es:

$$\phi_i(x_i, x_i^0) := -(1 - k_i)x_i - k_i x_i^0 \cdot \ln(x_i) \quad (3.20)$$

Donde  $k_i$  corresponde a una constante para sintonizar y amoldar la función de masa. Si elegimos la función de masa (3.20) para los tres estanques, la función de masa total será:

$$H_d(x) := H(x) + H_a(x) = \sum_{i=1}^3 k_i (x_i - x_i^0 \ln(x_i)) \quad (3.21)$$

De la ecuación (3.16), es claro que el cálculo de control requiere el conocimiento de la perturbación  $d$ .

Cuando  $d$  es desconocida, la perturbación debe ser estimada por  $\hat{d}$ . Entonces el error de estimación  $\tilde{d}$  aparece en la dinámica del sistema y en la expresión de  $\dot{H}_d$ . Consecuentemente  $H_d$  ya no es una función de Lyapunov, debemos agregar un término de corrección para una nueva candidata a función de Lyapunov  $W$ .

Si reemplazamos (3.16) en (3.8) obtenemos:

$$\dot{x} = [J_d(x, u) - R_d(x, u)] \nabla H_d + g(x) \tilde{d} \quad (3.22)$$

Donde  $\tilde{d} = \hat{d} - d$ . Luego,

$$\dot{H}_d = -(\nabla H_d)^T R_d(x, u) \nabla H_d + (\nabla H_d)^T g(x) \tilde{d} \quad (3.23)$$

Ya que  $d$  es una tasa de flujo, tiene sentido limitar su estimación a ser positiva. Siguiendo el procedimiento de control adaptivo, definimos una función candidata de Lyapunov como en [7]:

$$W(x, \tilde{d}) = H_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \ln \left[ \frac{(\hat{d} - \bar{d})^\tau}{(\hat{d} - \underline{d})^{\tau+1}} \right] \quad (3.24)$$

Donde  $\gamma$  es una constante real positiva que define la velocidad de adaptación;  $\tau$  es definido como  $\tau = \frac{d - \bar{d}}{d - \underline{d}} < 0$ ,  $\tau + 1 = \frac{d - \underline{d}}{d - \underline{d}} > 0$ ; y las variables  $\bar{d}$  y  $\underline{d}$  definen los bordes superior e inferior de la estimación de la perturbación.

De (3.24):

$$W(x, \tilde{d}) = H_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \left[ \tau \ln(\hat{d} - \bar{d}) - (\tau + 1) \ln(\hat{d} - \underline{d}) \right] \quad (3.25)$$

$$\dot{W} = \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \left[ \frac{\dot{d}}{\bar{d} - \underline{d}} \ln(\hat{d} - \bar{d}) + \tau \frac{\dot{d}}{\hat{d} - \bar{d}} - \frac{\dot{d}}{\bar{d} - \underline{d}} \ln(\hat{d} - \underline{d}) - (\tau + 1) \frac{\dot{d}}{\hat{d} - \underline{d}} \right] \quad (3.26)$$

Asumiendo que la perturbación es constante ( $\dot{d} = 0; \dot{\hat{d}} = \dot{\tilde{d}}$ ), obtenemos:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \dot{\hat{d}} \left[ \tau \frac{1}{\hat{d} - \bar{d}} - (\tau + 1) \frac{1}{\hat{d} - \underline{d}} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \dot{\tilde{d}} \left[ \frac{(d - \bar{d})}{(\bar{d} - \underline{d})} \frac{1}{(\hat{d} - \bar{d})} - \frac{(d - \underline{d})}{(\bar{d} - \underline{d})} \frac{1}{(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma} \dot{\tilde{d}} \left[ \frac{(d - \bar{d})}{(\bar{d} - \underline{d})} \frac{1}{(\hat{d} - \bar{d})} - \frac{(d - \underline{d})}{(\bar{d} - \underline{d})} \frac{1}{(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma(\bar{d} - \underline{d})} \dot{\tilde{d}} \left[ \frac{(d - \bar{d})}{(\hat{d} - \bar{d})} - \frac{(d - \underline{d})}{(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma(\bar{d} - \underline{d})} \dot{\tilde{d}} \left[ \frac{(\hat{d} - \tilde{d} - \bar{d})}{(\hat{d} - \bar{d})} - \frac{(\hat{d} - \tilde{d} - \underline{d})}{(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) + \frac{1}{2\gamma(\bar{d} - \underline{d})} \dot{\tilde{d}} \left[ \frac{\tilde{d}(d - \bar{d})}{(\hat{d} - \bar{d})(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= \dot{H}_d(x) - \tilde{d} \left[ \frac{\dot{\tilde{d}}}{2\gamma(\hat{d} - \bar{d})(\hat{d} - \underline{d})} \right], \\ \dot{W} &= -(\nabla H_d)^T R_d(x, u) \nabla H_d + (\nabla H_d)^T g(x) \tilde{d} - \tilde{d} \left[ \frac{\dot{\tilde{d}}}{2\gamma(\hat{d} - \bar{d})(\hat{d} - \underline{d})} \right]. \quad (3.27) \end{aligned}$$

Eligiendo:

$$\dot{\tilde{d}} = 2\gamma(\hat{d} - \bar{d})(\hat{d} - \underline{d}) \nabla H_d^T g(x) \quad (3.28)$$

Obtenemos:

$$\dot{W} = -(\nabla H_d)^T R_d(x, u) \nabla H_d \leq 0 \quad (3.29)$$

Lo cual establece la estabilidad en el punto de equilibrio  $x^0$ .

### 3.3. Aplicación al Sistema de los Tres Estanques en Cascada

Recordemos el set de ecuaciones que modelan el sistema de tanques en cascada en términos del volumen:

$$\dot{x}_1 = f_0 - u_{11} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_1 - x_2)} - u_{12} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_1} \quad (3.30)$$

$$\dot{x}_2 = u_{11} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_1 - x_2)} - u_{21} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_2 - x_3)} - u_{22} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_2} \quad (3.31)$$

$$\dot{x}_3 = u_{21} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_2 - x_3)} - u_{31} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_3} - u_{32} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_3} \quad (3.32)$$

Por conveniencia notacional:

$$\hat{u}_1 := u_{11} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_1 - x_2)} \quad (3.33)$$

$$\hat{u}_2 := u_{21} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot (x_2 - x_3)} \quad (3.34)$$

$$\hat{u}_3 := u_{31} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_3} \quad (3.35)$$

$$b_1 := u_{12} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_1} \quad (3.36)$$

$$b_2 := u_{22} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_2} \quad (3.37)$$

$$b_3 := u_{32} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{A} \cdot x_3} \quad (3.38)$$

Entonces el sistema queda resumido como:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= f_0 - \hat{u}_1 - b_1 \\
 \dot{x}_2 &= \hat{u}_1 - \hat{u}_2 - b_2 \\
 \dot{x}_3 &= \hat{u}_2 - \hat{u}_3 - b_3
 \end{aligned}
 \tag{3.39}$$

Para aplicar IDA-PBC es conveniente representar el sistema en su forma Hamiltoniana de Puerto Controlado. Definimos la función de masa total (volumen) como:

$$H(x) := x_1 + x_2 + x_3 \geq 0 \tag{3.40}$$

Y escribiendo la dinámica del sistema como:

$$\dot{x} = [J(x,u) - R(x,u)]\nabla H(x) + gd \tag{3.41}$$

Donde  $x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ , la matriz anti-simétrica de interconexión  $J(x,u) = -J(x,u)^T$  es:

$$J(x,u) := \begin{bmatrix} 0 & -\hat{u}_1 & 0 \\ \hat{u}_1 & 0 & -\hat{u}_2 \\ 0 & \hat{u}_2 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

Las matrices de disipación o amortiguamiento y de entrada son:

$$R(x,u) := \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 + \hat{u}_3 \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

$$g := \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

***Diseño basado en moldeo de energía y asignación de interconexión:***

Con el fin de desacoplar el sistema, es necesario modificar la matriz de interconexiones. Para este fin, se definen nuevas variables  $z_1 = 3x_1$ ,  $z_2 = 2x_2$ ,  $z_3 = x_3$  y escribimos el siguiente modelo Hamiltoniano de Puerto Controlado para el sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{u}_1 - 3b_1 & -2\hat{u}_1 & 0 \\ 2\hat{u}_1 & -2b_2 - \hat{u}_2 & -\hat{u}_2 \\ 0 & \hat{u}_2 & -\hat{u}_3 - b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial z_1} \\ \frac{\partial H}{\partial z_2} \\ \frac{\partial H}{\partial z_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (3.45)$$

Donde  $H(z) := \frac{z_1}{3} + \frac{z_2}{2} + z_3$ , la matriz de interconexión es:

$$J(z, u) := \begin{bmatrix} 0 & -2\hat{u}_1 & 0 \\ 2\hat{u}_1 & 0 & -\hat{u}_2 \\ 0 & \hat{u}_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Las matrices de disipación o amortiguamiento y de entrada son:

$$R(z, u) := \begin{bmatrix} \hat{u}_1 + 3b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 2b_2 + \hat{u}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{u}_3 + b_3 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$g := \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Se requiere de salidas desacopladas, entonces deseamos una matriz de interconexión nula y una matriz de disipación diagonal:

$$J_d = 0 \Rightarrow J_a = -J \quad (3.49)$$

$$R_d = R \Rightarrow R_a = 0 \quad (3.50)$$

Utilizando la ecuación clave (3.16), obtenemos lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} 0 & -2\hat{u}_1 & 0 \\ 2\hat{u}_1 & 0 & -\hat{u}_2 \\ 0 & \hat{u}_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial z_1} \\ \frac{\partial H}{\partial z_2} \\ \frac{\partial H}{\partial z_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{d} = \begin{bmatrix} -\hat{u}_1 - 3b_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\hat{u}_2 - 2b_2 & 0 \\ 0 & 0 & -\hat{u}_3 - b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi_1}{\partial z_1} \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial z_2} \\ \frac{\partial \phi_3}{\partial z_3} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Y resolviendo se obtiene lo siguiente:

$$\hat{u}_1 = \frac{3 \left( d - b_1 \cdot \frac{\partial \phi_1}{\partial z_1} \right)}{1 - \frac{\partial \phi_1}{\partial z_1}} \quad (3.52)$$

$$\hat{u}_2 = \frac{\left( \frac{2}{3} \hat{u}_1 + 2b_2 \cdot \frac{\partial \phi_2}{\partial z_2} \right)}{1 - \frac{\partial \phi_2}{\partial z_2}} \quad (3.53)$$

$$\hat{u}_3 = \frac{- \left( \hat{u}_2 + b_3 \cdot \frac{\partial \phi_3}{\partial z_3} \right)}{\frac{\partial \phi_3}{\partial z_3}} \quad (3.54)$$



La ley que actualiza la perturbación estimada, es decir la ecuación (3.28), toma la forma:

$$\dot{\hat{d}} = \gamma(\hat{d} - \bar{d})(\hat{d} - \underline{d}) \left( 1 + \frac{\partial \phi_1}{\partial x_1} \right) \quad (3.55)$$

**Caso 1:** Función de Masa idéntica para los tres estanques.

Para este caso usamos la función de masa (3.20) para todos los estanques, entonces

$H_d(x) := H(x) + H_a(x)$  será:



$$\begin{aligned}
 H_d(x) &= k_1(x_1 - x_1^0 \ln(x_1)) + k_2(x_2 - x_2^0 \ln(x_2)) + k_3(x_3 - x_3^0 \ln(x_3)) \\
 \Rightarrow H_d(z) &= \frac{k_1}{3}(z_1 - z_1^0 \ln(\frac{z_1}{3})) + \frac{k_2}{2}(z_2 - z_2^0 \ln(\frac{z_2}{2})) + k_3(z_3 - z_3^0 \ln(z_3))
 \end{aligned} \tag{3.56}$$

Ahora validaremos las condiciones **(3.14)** y **(3.15)**:

$$\nabla H_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{3}(1 - \frac{z_1^0}{z_1}) \\ \frac{k_2}{2}(1 - \frac{z_2^0}{z_2}) \\ k_3(1 - \frac{z_3^0}{z_3}) \end{bmatrix} \Rightarrow \nabla H_d(z^0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.57}$$

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 H_d(z) &= \begin{bmatrix} \frac{k_1}{3} \frac{z_1^0}{z_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{z_2^0}{z_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{z_3^0}{z_3^2} \end{bmatrix} \\
 \Rightarrow \nabla^2 H_d(z^0) &= \begin{bmatrix} \frac{k_1}{3} \frac{1}{z_1^0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{1}{z_3^0} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.58}$$

Para efectos de estabilidad **(3.58)** debe ser definida positiva (*Def. 1 Anexo A.2*).

Luego:

$$\mathbf{z}^T \nabla^2 H_d(z^0) \mathbf{z} =$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{k_1}{3} \frac{1}{z_1^0} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{1}{z_3^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \\
& z_1^2 \frac{k_1}{3} \frac{1}{z_1^0} + z_2^2 \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} + z_3^2 k_3 \frac{1}{z_3^0} > 0 \tag{3.59}
\end{aligned}$$

Ya que  $k_{1,2,3} > 0$ ,  $\alpha > 0$ ,  $z_{1,2,3} > 0$  y  $z_{1,2,3}^0 > 0$ . Entonces (3.58) es definida positiva y el punto de operación será estable.

**Caso 2:** *Función de Masa limitada solo para el primer estanque.*

Para este caso usamos la función de masa (3.18) para el primer estanque, y la función de masa (3.20) para los estanques 2 y 3, entonces  $H_d(x) := H(x) + H_a(x)$  será:

$$\begin{aligned}
H_d(x) &= \alpha \left[ \frac{(x_1^0 - \underline{x}_1)^2}{x_1 - \underline{x}_1} + \frac{(\bar{x}_1 - x_1^0)^2}{x_1 - \bar{x}_1} \right] + k_2 (x_2 - x_2^0 \ln(x_2)) + k_3 (x_3 - x_3^0 \ln(x_3)) \\
\Rightarrow H_d(z) &= \frac{\alpha}{3} \left[ \frac{(z_1^0 - \underline{z}_1)^2}{z_1 - \underline{z}_1} + \frac{(\bar{z}_1 - z_1^0)^2}{z_1 - \bar{z}_1} \right] + \frac{k_2}{2} (z_2 - z_2^0 \ln(\frac{z_2}{2})) + k_3 (z_3 - z_3^0 \ln(z_3)) \tag{3.60}
\end{aligned}$$

Ahora validaremos las condiciones (3.14) y (3.15):

$$\nabla H_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{3} \left[ \frac{(\bar{z}_1 - z_1^0)^2}{(\bar{z}_1 - z_1)^2} - \frac{(z_1^0 - \underline{z}_1)^2}{(z_1 - \underline{z}_1)^2} \right] \\ \frac{k_2}{2} \left(1 - \frac{z_2^0}{z_2}\right) \\ k_3 \left(1 - \frac{z_3^0}{z_3}\right) \end{bmatrix} \Rightarrow \nabla H_d(z^0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.61}$$

$$\nabla^2 H_d(z) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \alpha \left[ \frac{(\bar{z}_1 - z_1^0)^2}{(z_1 - z_1)^3} + \frac{(z_1^0 - \underline{z}_1)^2}{(z_1 - \underline{z}_1)^3} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{z_2^0}{z_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{z_3^0}{z_3^2} \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \nabla^2 H_d(z^0) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \alpha \left[ \frac{1}{(z_1 - z_1^0)} + \frac{1}{(z_1^0 - \underline{z}_1)} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{1}{z_3^0} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Para efectos de estabilidad (3.62) debe ser definida positiva (Def. 1 Anexo A.2).

Luego:

$$\mathbf{z}^T \nabla^2 H_d(z^0) \mathbf{z} =$$

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \alpha \left[ \frac{1}{(z_1 - z_1^0)} + \frac{1}{(z_1^0 - \underline{z}_1)} \right] & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \frac{1}{z_3^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} =$$

$$z_1^2 \frac{2}{3} \alpha \left[ \frac{1}{(z_1 - z_1^0)} + \frac{1}{(z_1^0 - \underline{z}_1)} \right] + z_2^2 \frac{k_2}{2} \frac{1}{z_2^0} + z_3^2 k_3 \frac{1}{z_3^0} > 0 \quad (3.63)$$

Ya que  $\underline{z}_1 < z_1, z_1^0 < \bar{z}_1$ ,  $\alpha > 0$ ,  $k_{2,3} > 0$ ,  $z_{1,2,3}^0 > 0$  y  $z_{1,2,3} > 0$ . Entonces (3.62) es definida positiva y el punto de operación será estable.

### 3.4. Control PI

Con el fin de comparar el desempeño de los controladores propuestos con un algoritmo de control de nivel estándar, utilizaremos el siguiente esquema.

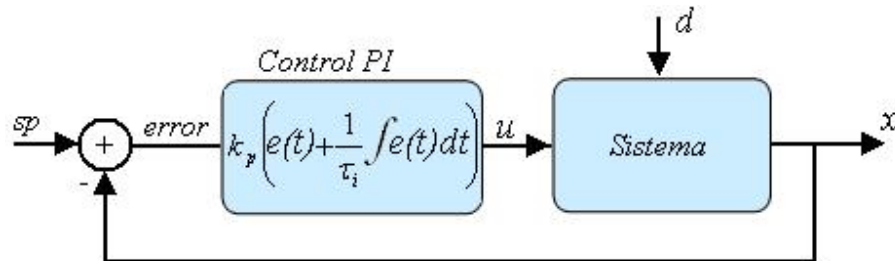


Fig. 3.2. Control PI para un sistema de primer orden.

Por lo que las entradas del sistema serán:

$$u_{11} = k_{p1} \left[ (x_1^0 - x_1) + \frac{1}{\tau_{i1}} \int (x_1^0 - x_1) dt \right] \quad (3.64)$$

$$u_{21} = k_{p2} \left[ (x_2^0 - x_2) + \frac{1}{\tau_{i2}} \int (x_2^0 - x_2) dt \right] \quad (3.65)$$

$$u_{31} = k_{p3} \left[ (x_3^0 - x_3) + \frac{1}{\tau_{i3}} \int (x_3^0 - x_3) dt \right] \quad (3.66)$$

Para las pruebas en planta se realizará un control PI discreto con aproximación trapezoidal.

#### **Discretización:**

Consideremos la siguiente entrada:

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (3.67)$$

Usaremos las siguientes aproximaciones

$$e(t) \rightarrow e_k, \quad u(t) \rightarrow u_k,$$

$$\int_0^t e(t) dt \approx \sum_{i=0}^{k-1} e_i T_0 \approx \sum_{i=0}^k e_i T_0 \approx \left[ \frac{(e_k + e_0)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e_i \right] T_0.$$

Entonces.

$$u_k = k_p \left[ e_k + \frac{T_0}{\tau_i} \left( \frac{(e_k + e_0)}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e_i \right) \right],$$

$$u_{k-1} = k_p \left[ e_{k-1} + \frac{T_0}{\tau_i} \left( \frac{(e_{k-1} + e_0)}{2} + \sum_{i=1}^{k-2} e_i \right) \right]$$

Luego.

$$u_k - u_{k-1} = k_p \left[ (e_k - e_{k-1}) + \frac{T_0}{\tau_i} \left( \frac{(e_k - e_{k-1})}{2} + e_{k-1} \right) \right]$$

$$u_k = e_k \left[ k_p \left( 1 + \frac{T_0}{2\tau_i} \right) \right] + e_{k-1} \left[ k_p \left( -1 + \frac{T_0}{2\tau_i} \right) \right] + u_{k-1}$$

Por lo que las entradas del sistema serán:

$$u_{11k} = (x_{1k}^0 - x_{1k}) \left[ k_{p1} \left( 1 + \frac{T_0}{2\tau_{i1}} \right) \right] + (x_{1k-1}^0 - x_{1k-1}) \left[ k_{p1} \left( -1 + \frac{T_0}{2\tau_{i1}} \right) \right] + u_{11k-1} \quad (3.68)$$

$$u_{21k} = (x_{2k}^0 - x_{2k}) \left[ k_{p2} \left( 1 + \frac{T_0}{2\tau_{i2}} \right) \right] + (x_{2k-1}^0 - x_{2k-1}) \left[ k_{p2} \left( -1 + \frac{T_0}{2\tau_{i2}} \right) \right] + u_{21k-1} \quad (3.69)$$

$$u_{31k} = (x_{3k}^0 - x_{3k}) \left[ k_{p3} \left( 1 + \frac{T_0}{2\tau_{i3}} \right) \right] + (x_{3k-1}^0 - x_{3k-1}) \left[ k_{p3} \left( -1 + \frac{T_0}{2\tau_{i3}} \right) \right] + u_{31k-1} \quad (3.70)$$

## Capítulo 4. Resultados de Simulación

### 4.1. Control PI

#### 4.1.1 Perturbación Limpia.

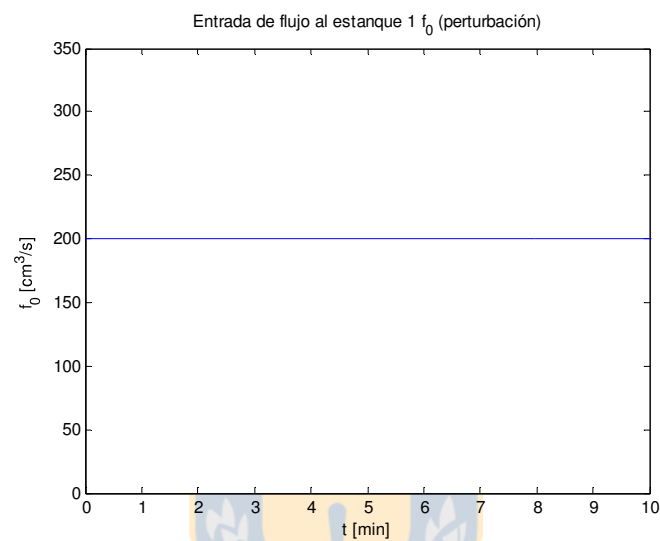


Fig. 4.1. Perturbación constante.

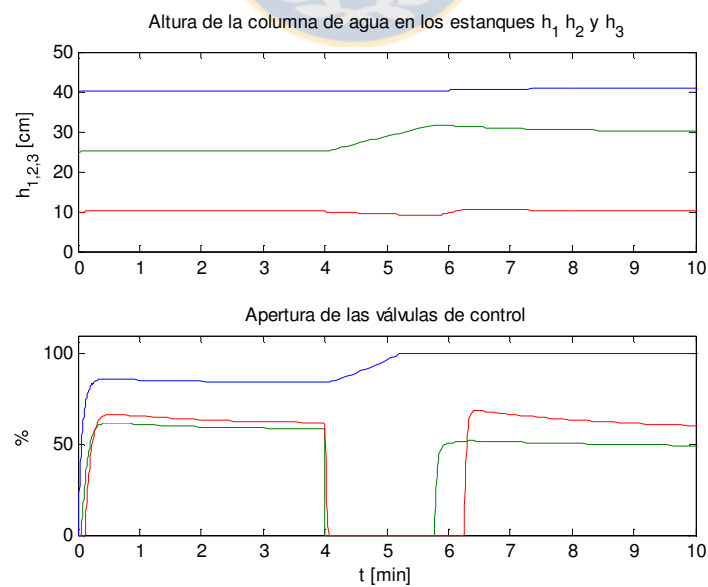
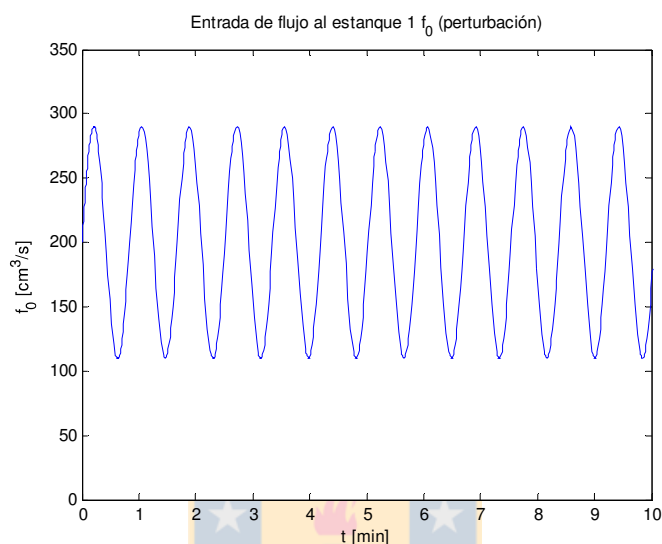


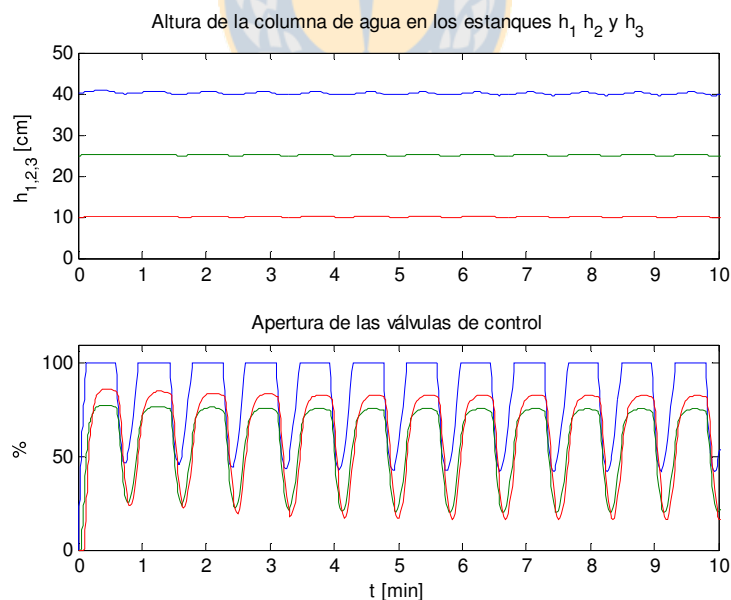
Fig. 4.2. Respuesta del control PI.

En este caso el control entrega una buena respuesta, resultando ser estables las variables de estado y las acciones de control. Sin embargo existen sobrepasos que son característicos de este tipo de estrategias de control.

#### 4.1.2 Perturbación Periódica.



**Fig. 4.3. Perturbación periódica.**



**Fig. 4.4. Respuesta del control PI para perturbación periódica.**

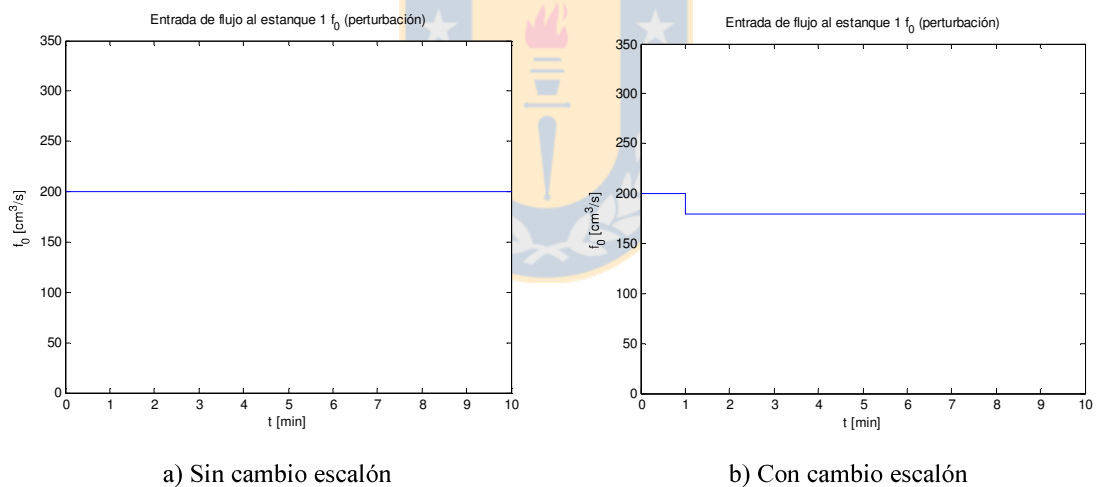
Ante una perturbación periódica el control PI no es capaz de evitar que este se propague río abajo, viéndose reflejado tanto en los niveles como ampliamente en las señales de control. En la

práctica esto significaría un esfuerzo muy grande por parte de las válvulas de control, lo que podría resultar dañino para estas.

## 4.2. IDA-PBC

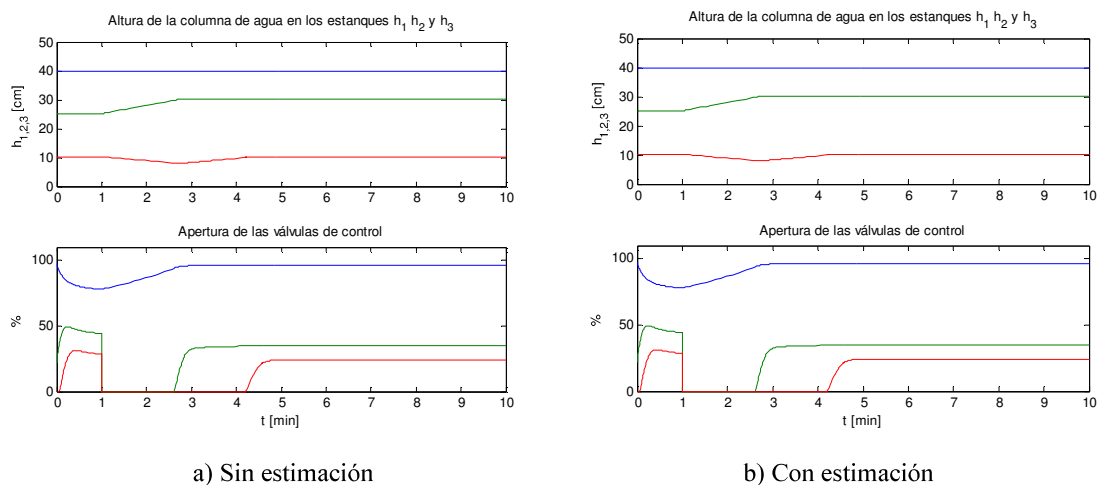
Es importante recordar que estamos controlando nivel mientras que las variables de estado son de volumen, entonces el programa se arregla usando la relación  $h_i = x_i / A$ , donde  $A$  es el área transversal de los estanques y se considera constante en este estudio. Las condiciones iniciales serán  $h_{i,1,2,3} = 40,25,10$  [cm]. En los escenarios 1 y 2 los valores de estado estacionario son  $h_{i,1,2,3}^0 = 40,30,10$  [cm], ya que habrá un cambio de set point para el estanque 2 en el minuto 1 de 25 a 30 [cm]. En los siguientes escenarios de perturbación periódica, los valores de estado estacionario son iguales a los valores iniciales. Todas las simulaciones serán de 10 [min].

### 4.2.1 Escenario 1: Misma función de almacenamiento masa para todos los estanques, cambio en el set point 2, perturbación limpia.

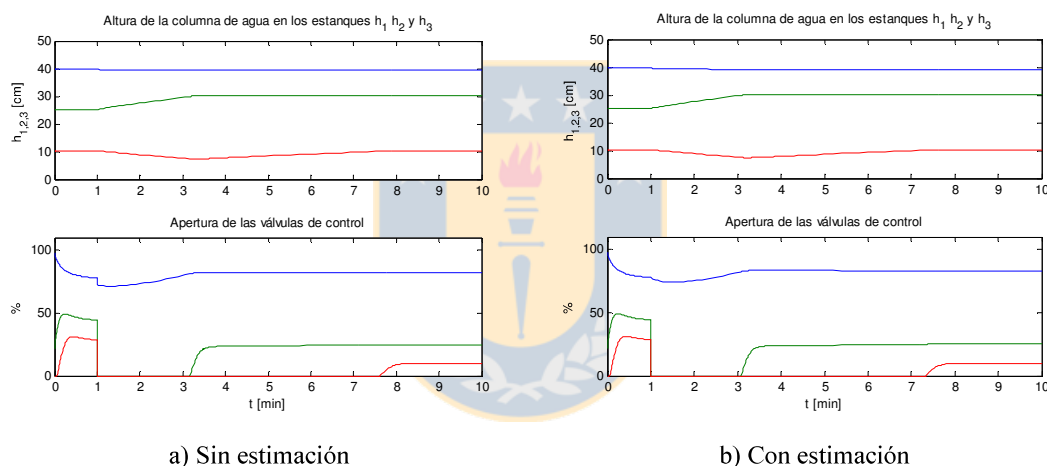


**Fig. 4.5. Perturbación con y sin cambio escalón.**





**Fig. 4.6. Escenario 1, respuesta sin cambio escalón.**



**Fig. 4.7. Escenario 1, respuesta con cambio escalón.**

Este escenario implica que se desea llevar un control ajustado en el nivel de los tres estanques, entonces se selecciona la función estándar de almacenamiento de masa (3.20) para todos los estanques, que penaliza grandes errores y como consecuencia, las válvulas de control trabajarán más fuerte para lograr su objetivo. Consideramos el caso de una perturbación constante (Fig. 4.6), y de un escalón en la perturbación (Fig. 4.7).

Cuando hay estimación, los cambios en las entradas del sistema son más suaves y el set point demora un poco menos en ser alcanzado, esto se debe a que existe un escalón negativo y la estimación demora en ajustarse a esta disminución. En todos los casos es posible observar la capacidad del primer estanque para filtrar la alteración en la perturbación, de este modo esta no se ve reflejada como una alteración en los niveles del sistema río abajo (Fig. 4.7), donde solo se

observa que los niveles demoran más en ser alcanzados como consecuencia obvia de la disminución en el flujo de agua que entra al sistema. Es inevitable el hecho de que el nivel 3 disminuya al subir el set point del nivel 2, ya que se cierra el paso de agua del estanque 2 hacia el estanque 3, que al igual que todos posee una salida de agua en su parte inferior mediante una válvula manual que tiene una apertura constante a lo largo del proceso.

#### 4.2.2 Escenario 2: Función de almacenamiento de masa nueva para el estanque 1, cambio en el set point 2, perturbación con cambio escalón.

La perturbación acá es la que muestra la figura Fig. 4.5 b).

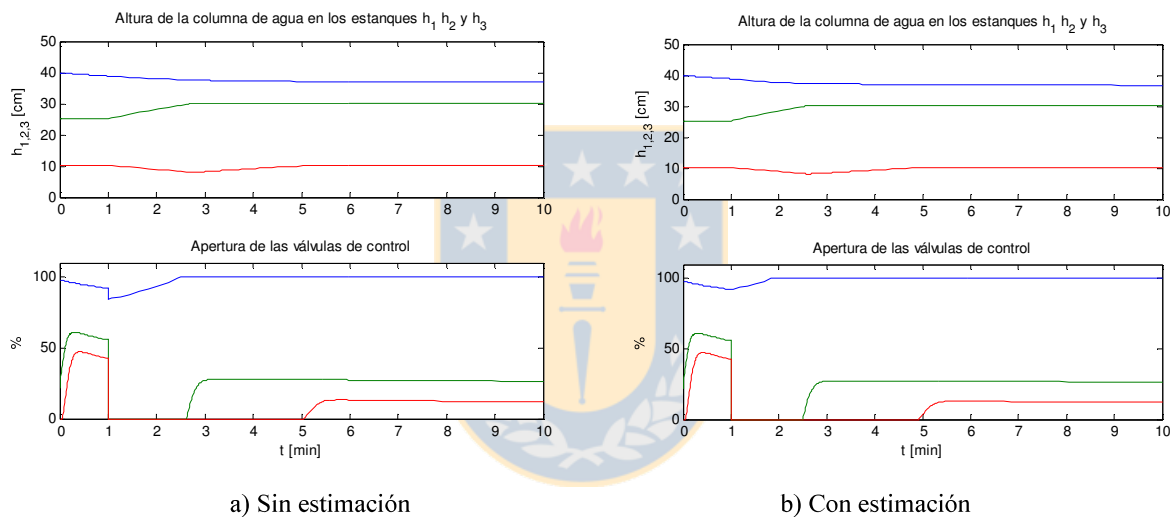


Fig. 4.8. Escenario 2, respuesta con cambio escalón.

Elegimos acá la función de almacenamiento de masa (3.20) para los estanques 2 y 3, y la función de almacenamiento de masa (3.18) para el estanque 1. Esto significa que se han eliminado las restricciones para mantener el nivel 1 en un set point fijo, y se ha liberado tal variable de estado para que el nivel pueda variar libremente entre  $30 - 60[cm]$ .

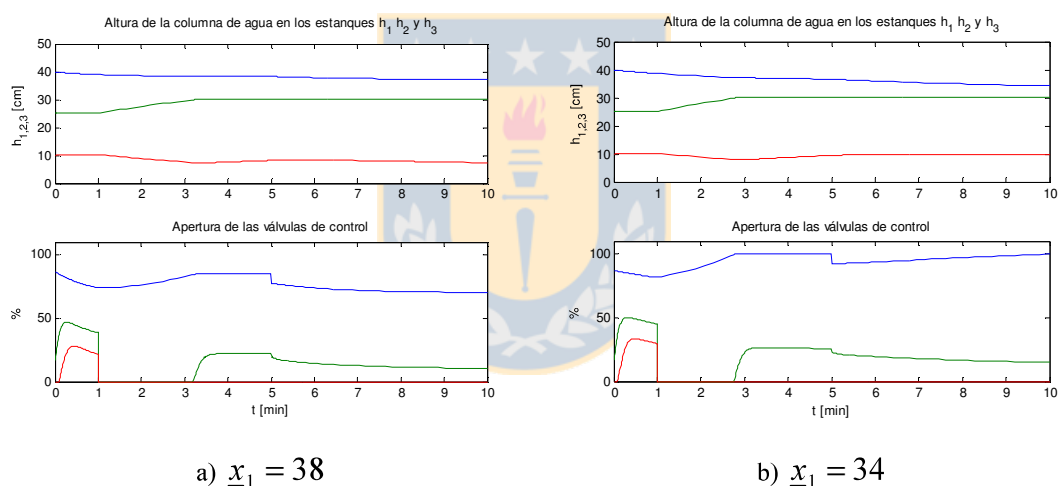
Es interesante notar que en el escenario 2 (Fig. 4.8) los tiempos de respuesta de los estanques 2 y 3 para alcanzar el set point son mas rápidos que en el escenario 1 (Fig. 4.7), esto es consecuencia de la liberación de restricciones en el nivel 1, lo que permite que la válvula 1 este completamente abierta mientras no se viole el límite inferior de nivel asignado de  $30[cm]$ , entregando una mayor tasa de flujo desde el primer estanque al sistema río abajo. Por otro lado, el efecto del cambio escalón en la perturbación fue filtrado, presentándose como un cambio muy suave en los actuadores y en el nivel

1. Al igual que en el escenario 1, las respuestas del control son más rápidas cuando existe estimación de la perturbación.

En las siguientes figuras (**Fig. 4.9 a)** y **b)**) veremos el efecto de elegir distintas limitaciones en la función de almacenamiento de masa. Se aplica una perturbación con un escalón negativo a los  $300[s]$ .

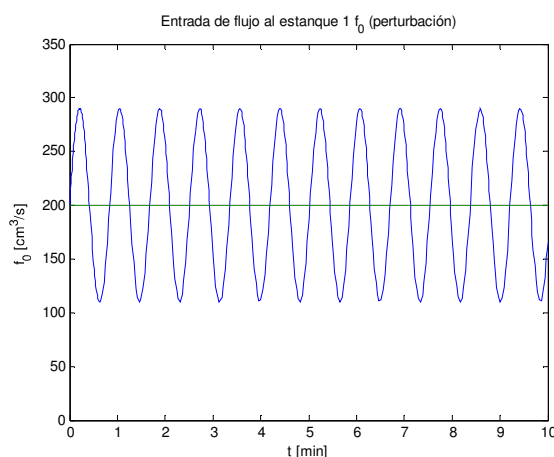
Si establecemos límites demasiado estrechos (**Fig. 4.9 a)**), se imponen fuertes restricciones para conservar el nivel en el estanque 1. En consecuencia la perturbación, que es el cambio escalón en la perturbación, se propaga a los estanques río abajo. Finalmente el nivel 3 no es capaz de mantenerse.

Si establecemos límites más amplios (**Fig. 4.9 b)**) aumentan las variaciones en el nivel 1, pero los niveles río abajo son más ajustados y el tiempo de respuesta disminuye.

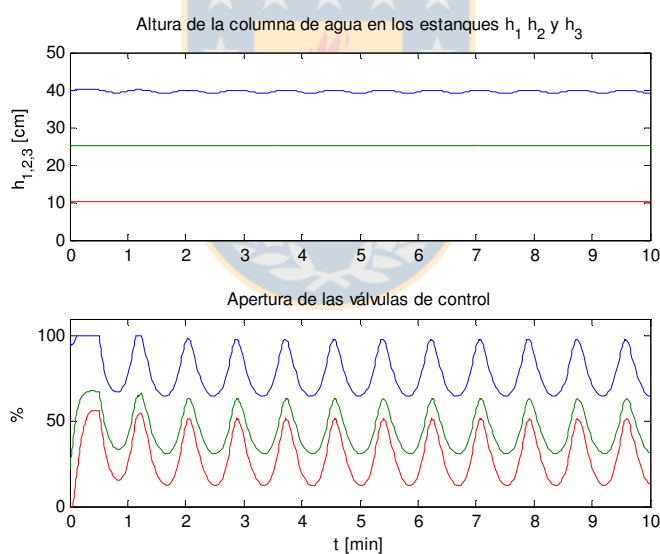


**Fig. 4.9. Efectos en la función de almacenamiento de masa limitada.**

### 4.2.3 Escenario 3: Funciones de almacenamiento de masa idénticas, perturbación periódica estimada.



**Fig. 4.10. Perturbación periódica.**



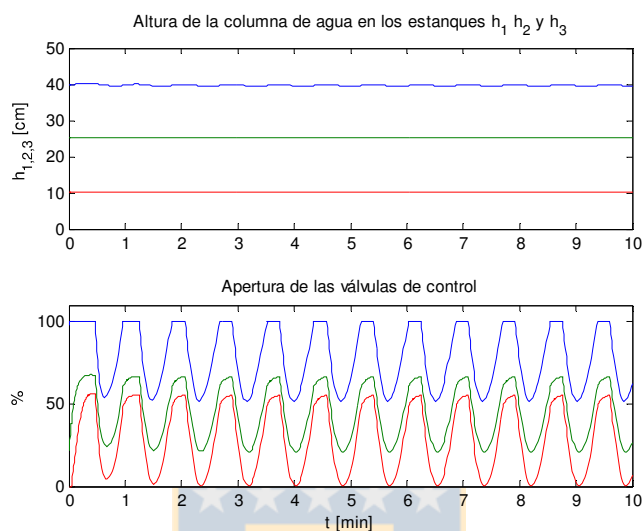
**Fig. 4.11. Escenario 3, respuestas.**

Elegimos la función de almacenamiento de masa (3.20) para todos los estanques. Se observa la eficacia del filtrado del estanque 1 hacia los niveles río abajo. Sin embargo aún hay ruido reflejado en el nivel 1, y este se debe a que la perturbación es estimada por su media. Es deseable que las válvulas de control no sean tan exigidas como muestra la figura anterior.

A modo de observación, la Fig. 4.12 nos muestra como es la respuesta cuando se lee la perturbación de entrada mediante un sensor de flujo. Se observa que el ruido reflejado en el nivel 1

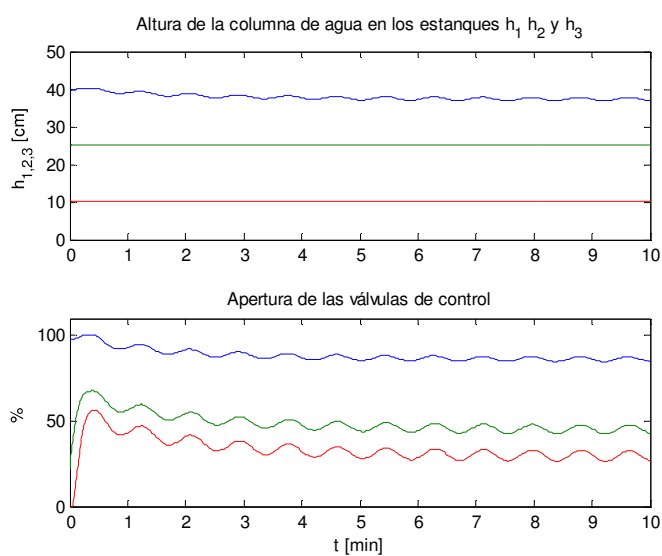
es menor, pero consecuencia de esto el esfuerzo en las válvulas aumenta, lo que resulta ser interesante para aplicaciones reales.

Sin embargo, los resultados obtenidos acá son mejores que los que nos entrega el control PI tradicional (**Fig. 4.4**).



**Fig. 4.12. Escenario 3, respuestas sin estimación de perturbación.**

#### 4.2.4 Escenario 4: Función de almacenamiento de masa nueva para el estanque 1, perturbación periódica estimada.



**Fig. 4.13. Escenario 4, respuestas.**

Ante el problema de propagación de ruido se opta por utilizar mejor la capacidad del estanque 1 como buffer. Acá elegimos la función de almacenamiento de masa **(3.18)** para el estanque 1 que permite al nivel moverse entre ciertos límites ( $30-60[cm]$ ), lo que libera a la válvula de control 1 y garantiza una salida de flujo más suave desde el estanque 1 al 2. La perturbación es la misma que en el escenario 3.

Es posible observar que el nivel 1 es liberado y que las oscilaciones disminuyen evidentemente río abajo, lo cual proporciona una mejor realización práctica de esta alternativa teniendo en cuenta que los actuadores son válvulas de control.

Es interesante dejar en claro que en casos reales, el ruido nunca tiene una amplitud tan grande, por lo que acá se considera un caso bastante extremo.



## **Capítulo 5. Implementación del Proyecto de Planta**

---

### **5.1. Introducción**

Mostraremos en éste capítulo de manera muy general la planta de operación que se configuró y utilizó para realizar las experiencias prácticas de los métodos de control diseñados.

En el *Anexo B* se encuentra una descripción resumida de lo que es el protocolo de comunicación que utilizan los instrumentos del proceso en planta “FOUNDATION Fieldbus”. A modo de familiarizarse con el sistema y de conocer algunas consideraciones importantes al momento de diseñar una red de este tipo.

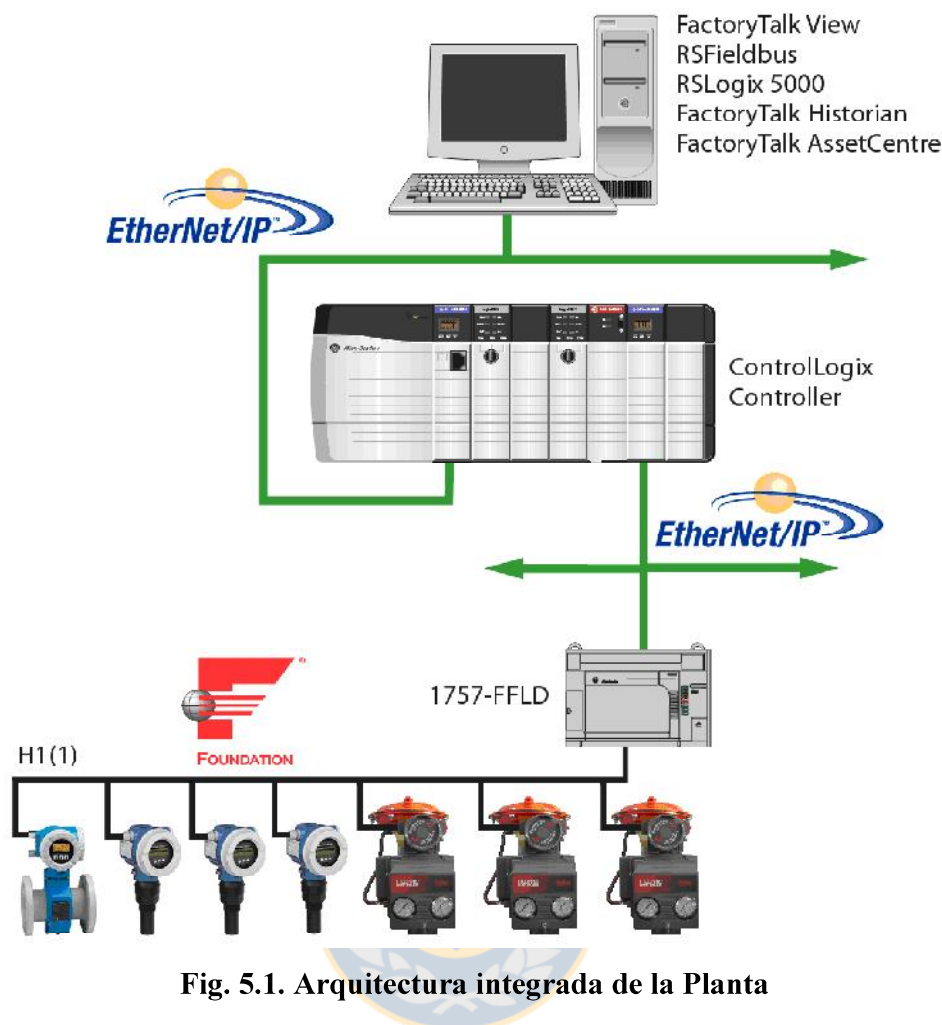
En el *Anexo C* se encuentra disponible una descripción de los elementos involucrados en el proceso de planta. Tabulando las especificaciones necesarias para un correcto montaje de la instrumentación e ilustrando de cómo deben ir conectados a la red de FOUNDATION Fieldbus.

### **5.2. Setup de Laboratorio**

#### **5.2.1 Arquitectura Integrada**

La arquitectura integrada en la planta de laboratorio se ve en sus distintos niveles a través de la siguiente figura.





**Fig. 5.1. Arquitectura integrada de la Planta**

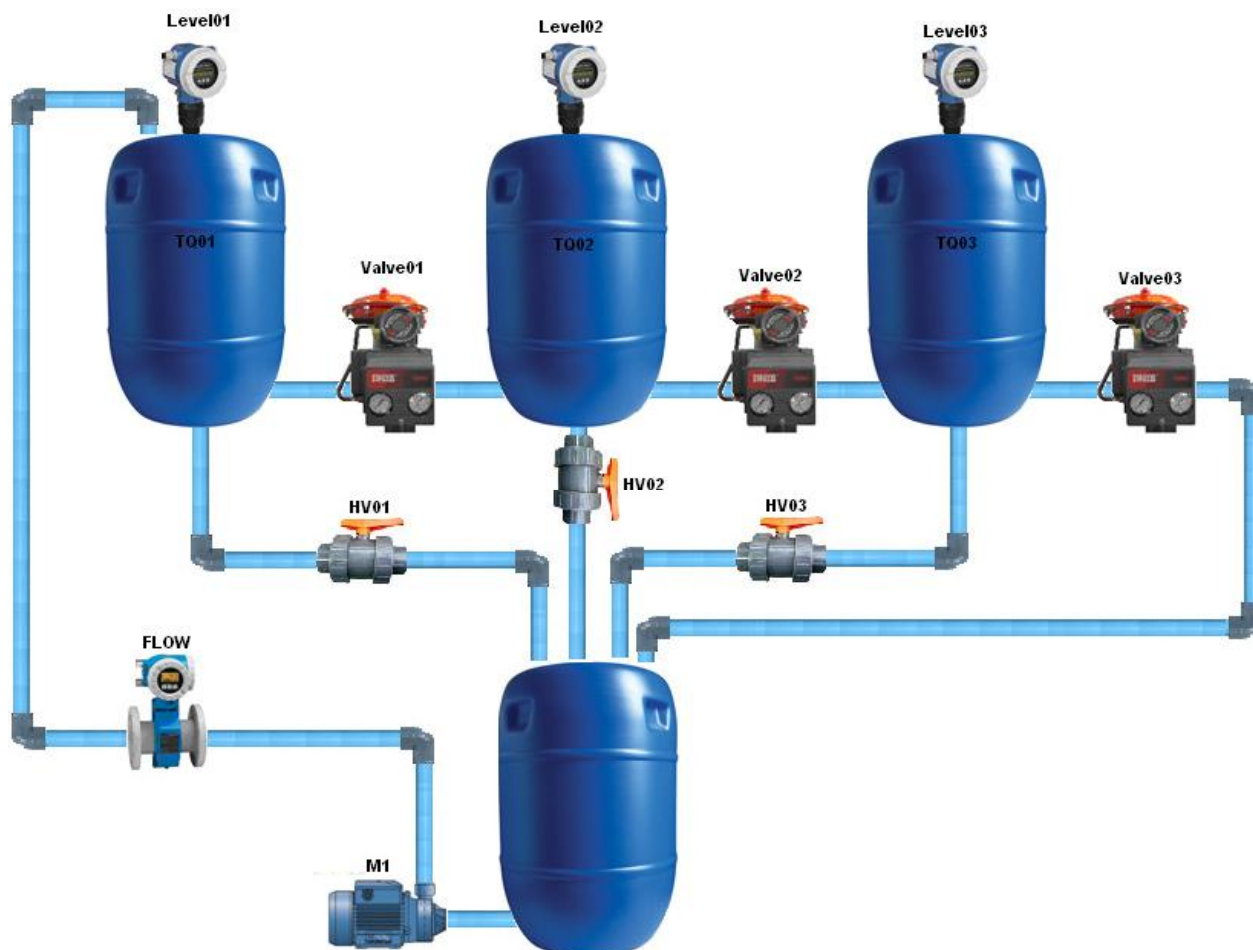
De esta imagen se puede apreciar el nivel inferior que es donde están todos los dispositivos de campo y pertenece a un protocolo de comunicaciones FOUNDATION Fieldbus H1. Más arriba a través del dispositivo enlazador 1757-FFLD se crea un enlace que comunica los protocolos FF-H1 y HSE (High Speed Ethernet), permitiéndose la conexión e integración de los dispositivos de campo con el controlador Rockwell ControlLogix 5561. Mediante Ethernet también se integra la estación de operación que se utiliza para configurar la red, calibrar los dispositivos, y la creación de rutinas de control con interfaces gráficas incluidas, todo esto mediante softwares de Rockwell Automation.

El detalle de la instrumentación en planta se encuentra en el *Anexo C*, donde se encuentran las especificaciones generales para su correcto montaje.



## 5.2.2 Setup General

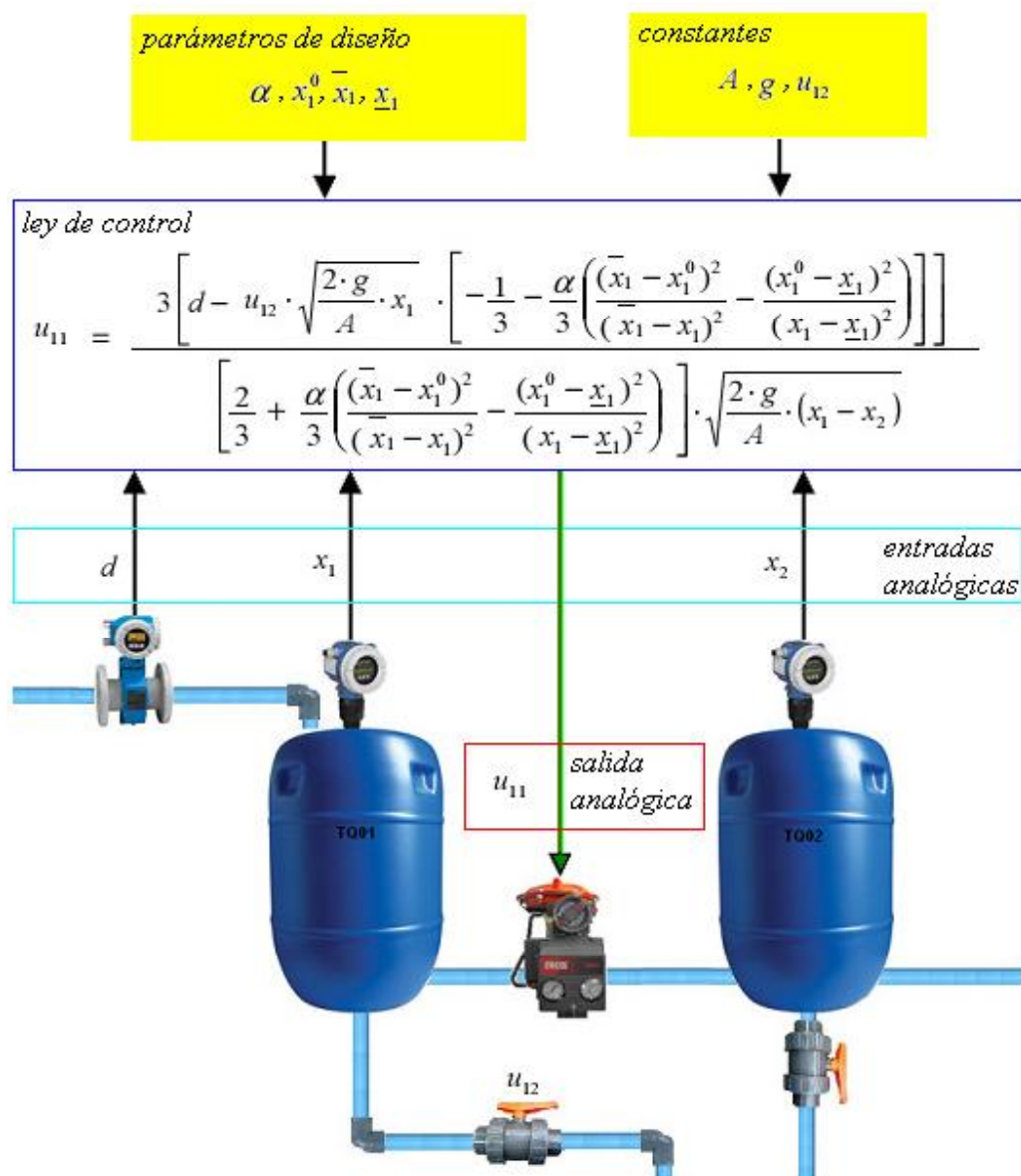
El setup general de la planta se puede apreciar en la siguiente imagen.



**Fig. 5.2. Setup de Laboratorio**

Los diagramas de conexión de la red Fieldbus se encuentran disponibles en el *Anexo D*. En el *Anexo E* se encuentra un resumen de los pasos seguidos para la configuración e integración de la red Fieldbus, en el *Anexo F* se muestra la interfaz de operación que se creó para el proceso. Por último el *Anexo H* muestra imágenes de la planta real.

A modo de ejemplo, la siguiente figura nos muestra más allá de las ecuaciones, como se controla el sistema. La **Fig. 5.3** hace referencia al control del primer estanque con una ley IDA-PBC con bordes.



**Fig. 5.3. Ejemplo de control**

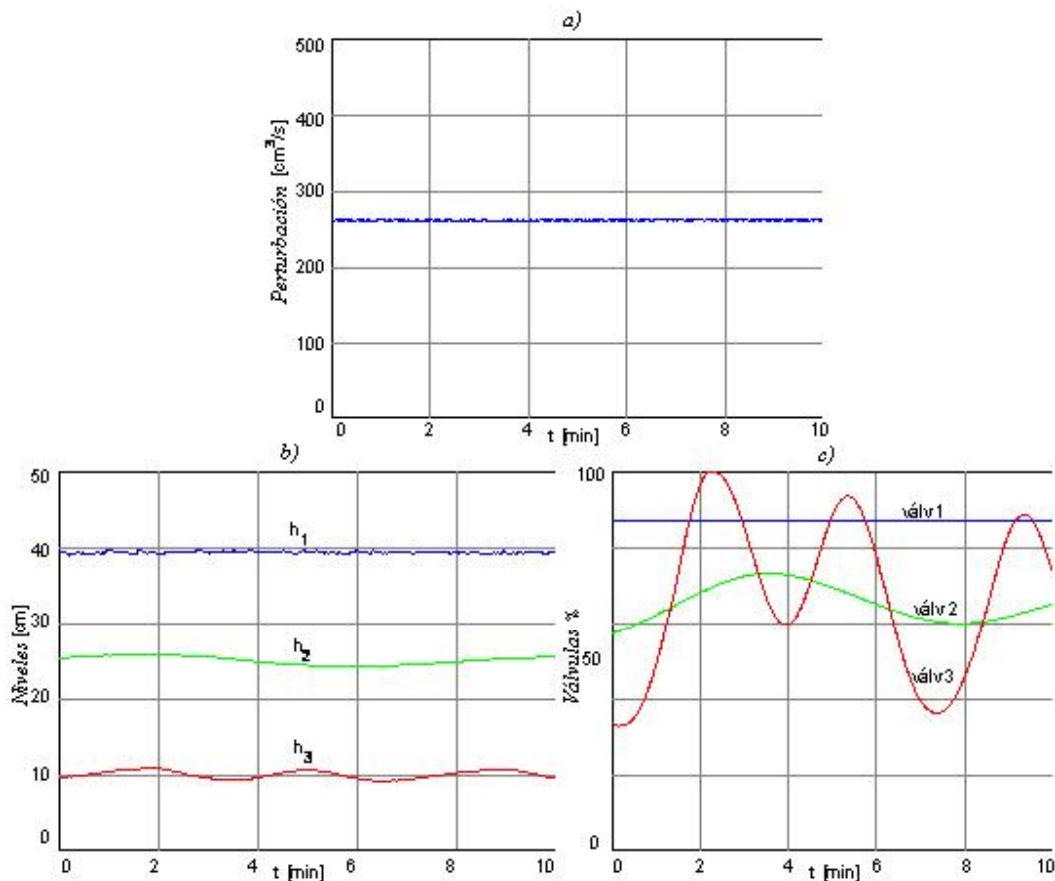
A través de este diagrama podemos ver de donde salen todas las variables necesarias para el control del proceso. Están por un lado las variables que el operador ingresa por medio de los dispositivos de entrada del computador host, que son las constantes y los parámetros de diseño. Luego se observa todo lo que son las entradas analógicas que recibe el controlador, correspondientes a los sensores que monitorean el proceso. Cuando el controlador recibe todas las variables necesarias, puede calcular la ley de control y realiza una salida analógica hacia el actuador que en éste caso es la válvula de control 1.

## Capítulo 6. Pruebas en Planta

### 6.1. Control PI

Para las siguientes pruebas (**Fig. 6.1** y **Fig. 6.2**) las condiciones iniciales son  $h_{1,2,3} = 40,25,10$  [cm]. Los valores de estado estacionario son  $h_{1,2,3}^0 = 40,25,10$  [cm] para **Fig. 6.1**, y  $h_{1,2,3}^0 = 40,30,10$  [cm] para **Fig. 6.2**. Se considera una perturbación constante de  $270$  [cm<sup>3</sup>/s]. Todas las pruebas durarán 10 [min].

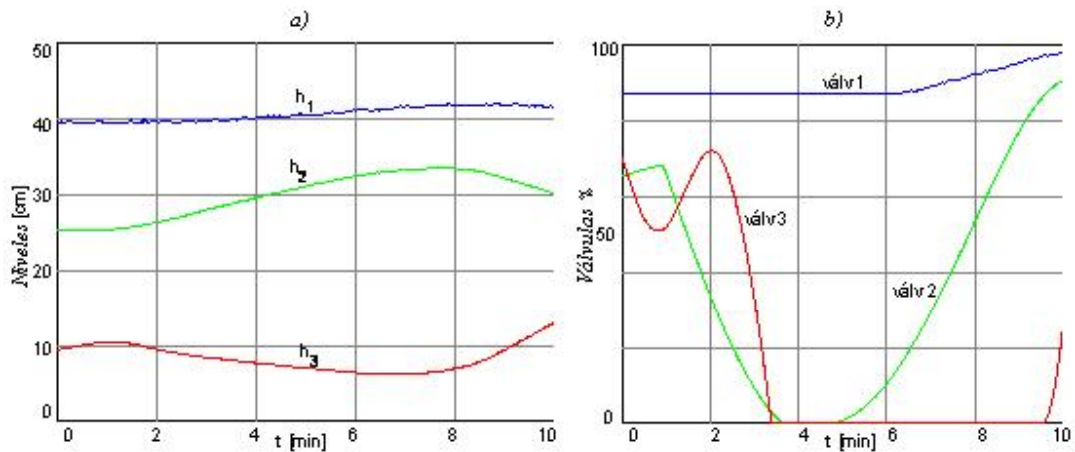
#### 6.1.1 Perturbación Constante.



**Fig. 6.1. Control PI con perturbación constante.**

El sistema es afectado por una perturbación constante pero independiente de eso el hecho de ser un proceso serial hace que pequeñas acciones en el primer estanque se vean amplificadas en los estanques río abajo, la figura **Fig. 6.1** que el nivel 1 es alcanzado con estabilidad, ya en el nivel 2

vemos presente una oscilación muy lenta, la cual en el nivel 3 ya es notoria. Se observa que las fluctuaciones de flujo van aumentando conforme la perturbación va bajando en la cascada, tal y como se mencionó en [1].



**Fig. 6.2. Control PI con perturbación constante y cambio de set point.**

La **Fig. 6.2** nos muestra que ocurre cuando se aplica un cambio de set point en el nivel 2 de 25 a 30 [cm]. Es posible observar que el control sintonizado actúa lentamente y aparecen efectos característicos del control PI, como son el sobrepaso y el acoplo. Para superar el sobrepaso y lograr nuevamente a una respuesta como **Fig. 6.1**, este control demoró cerca de 20 minutos.

### 6.1.2 Perturbación Periódica.

Esta prueba se hizo inmediatamente después de que la prueba de la **Fig. 6.2** llegue a su estado estable, se cambió la perturbación por una periódica cuyos Peak son 140 y 375  $\left[ \frac{cm^3}{s} \right]$ . La **Fig. 6.3** muestra la respuesta sin cambios de set point en los niveles, y es posible observar de a) el momento preciso en que se cambia la perturbación, de una constante a una periódica.

Se observa la capacidad del primer estanque para absorber casi la totalidad de la perturbación, y sorprende la robustez con que este control responde, teniéndose una respuesta similar a la de la **Fig. 6.1**, pero con un claro efecto de la perturbación en el nivel 1. Cabe destacar que se ha utilizado un controlador PI común y corriente sin desacopladores, sintonizado mediante linealización del sistema alrededor de un punto de operación.

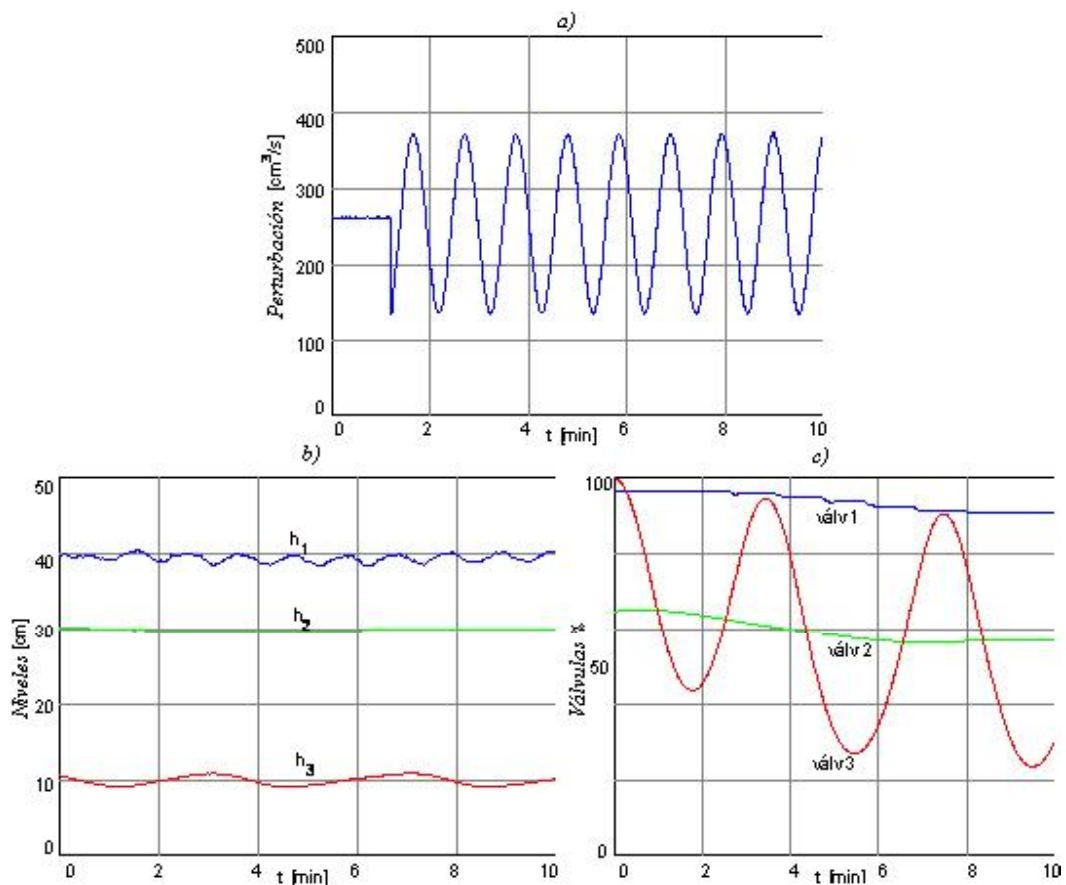
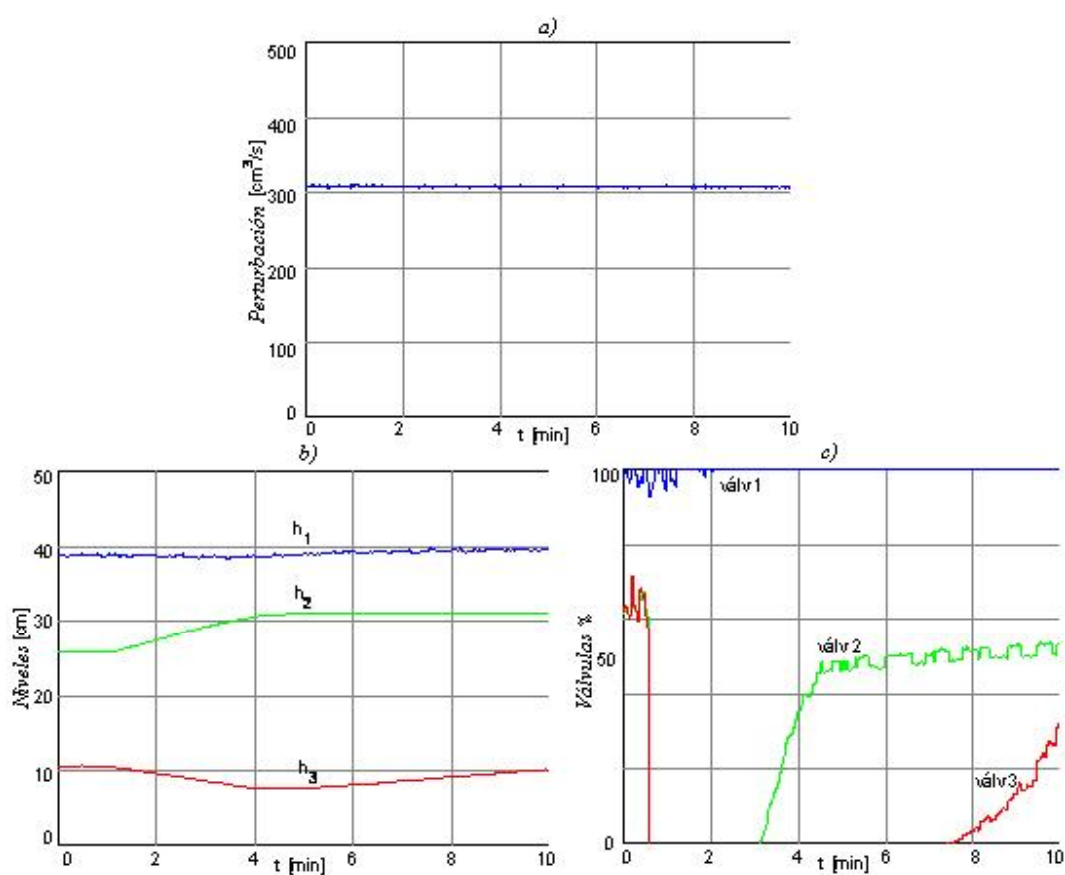


Fig. 6.3. Control PI con perturbación periódica.

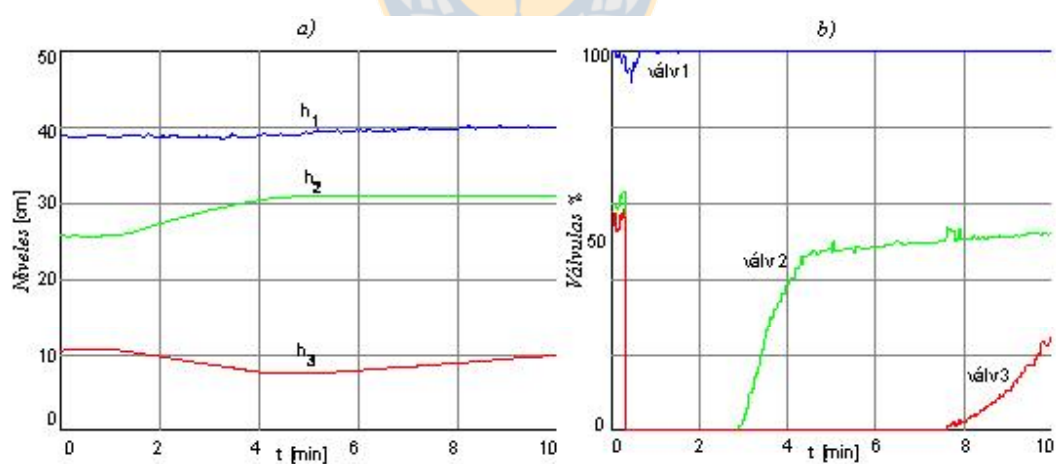
## 6.2. IDA-PBC

### 6.2.1 Escenario 1: Misma función de almacenamiento de masa para todos los estanques, cambio en el set point 2, perturbación limpia.

Para las siguientes dos pruebas (Fig. 6.4 y Fig. 6.5) las condiciones iniciales son  $h_{1,2,3} = 40,25,10$  [cm]. Los valores de estado estacionario son  $h_{1,2,3}^0 = 40,30,10$  [cm], ya que habrá un cambio de set point para el estanque 2 de 25 a 30 [cm]. Se considera una perturbación constante de  $307$   $\left[ \frac{cm^3}{s} \right]$ . Todas las pruebas igual que en las simulaciones durarán 10 [min].



**Fig. 6.4. Escenario 1, sin estimación de perturbación, sin cambio escalón.**



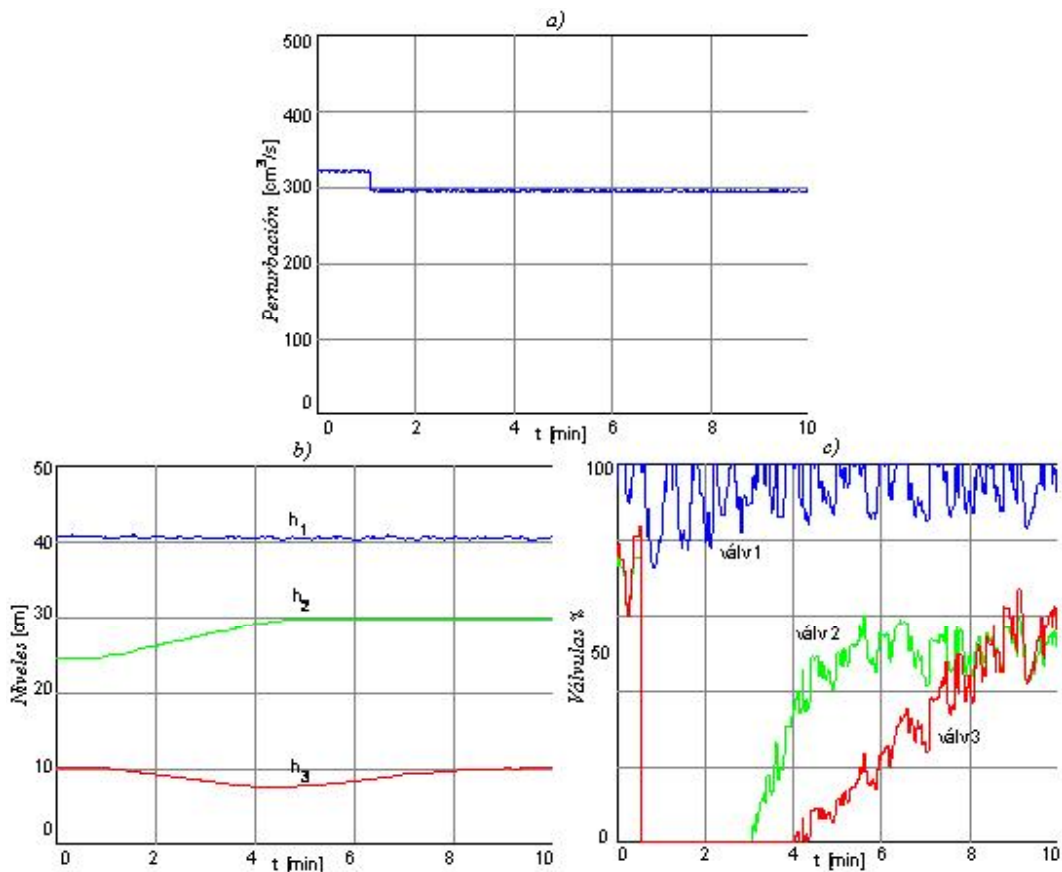
**Fig. 6.5. Escenario 1, con estimación de perturbación, sin cambio escalón.**

De los dos resultados anteriores; se observa que en cuanto a tiempo, ambas respuestas son casi idénticas. Es inevitable que el nivel tres descienda cuando sube el set point del estanque dos, dado que su entrada de agua se cierra completamente y su descarga inferior de agua mediante válvula manual está siempre abierta. En estas pruebas la principal diferencia es que al estimar la

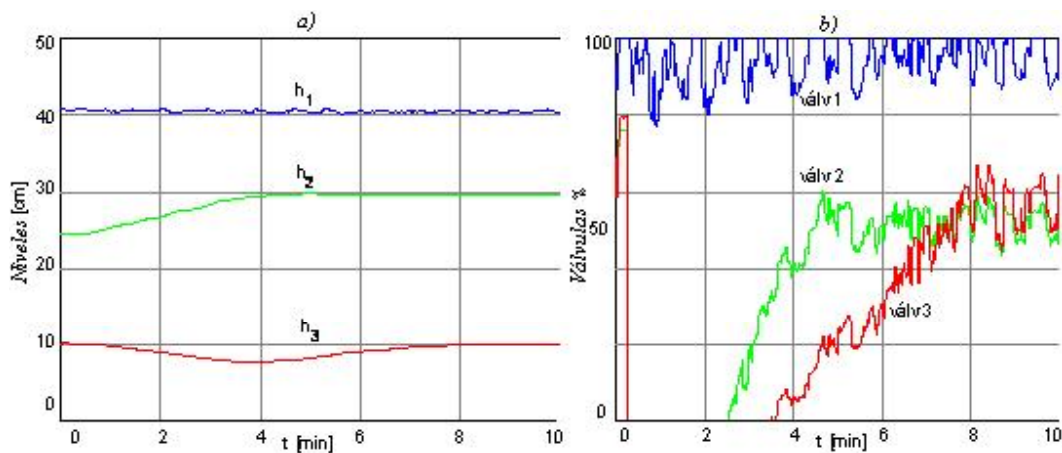


perturbación, la acción de las válvulas es más suave, lo que puede ser un resultado interesante cuando se desea cuidar de ellas.

Para las dos siguientes pruebas es similar a lo anterior, pero la perturbación de entrada cambia de  $320$  a  $295 \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right]$ .



**Fig. 6.6. Escenario 1, sin estimación de perturbación, con cambio escalón.**



**Fig. 6.7. Escenario 1, con estimación de perturbación, con cambio escalón.**

En las dos pruebas anteriores es un poco más evidente que cuando se estima la perturbación, las respuestas son más rápidas. Es importante notar que en comparación a las dos primeras pruebas de ésta sección (Fig. 6.4 y Fig. 6.5) el esfuerzo de las válvulas es mayor y el control es más exacto, esto debido a que se amplificaron las ganancias en las funciones de almacenamiento de masa. En una planta real de la industria se deberá hacer un balance de que es lo que más importa, si el control ajustado de nivel o un relajo en el esfuerzo de las válvulas.

### 6.2.2 Escenario 2: Función de almacenamiento de masa nueva para el estanque 1, cambio en el set point 2, perturbación con cambio escalón.

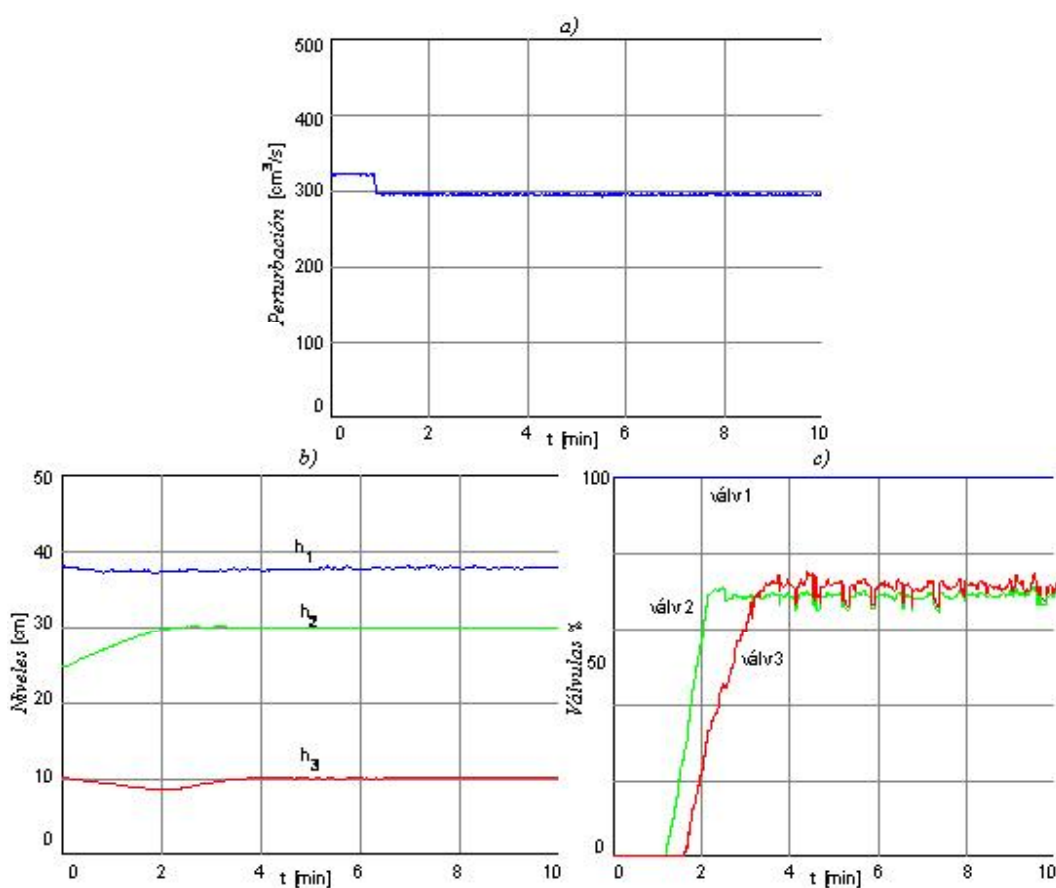
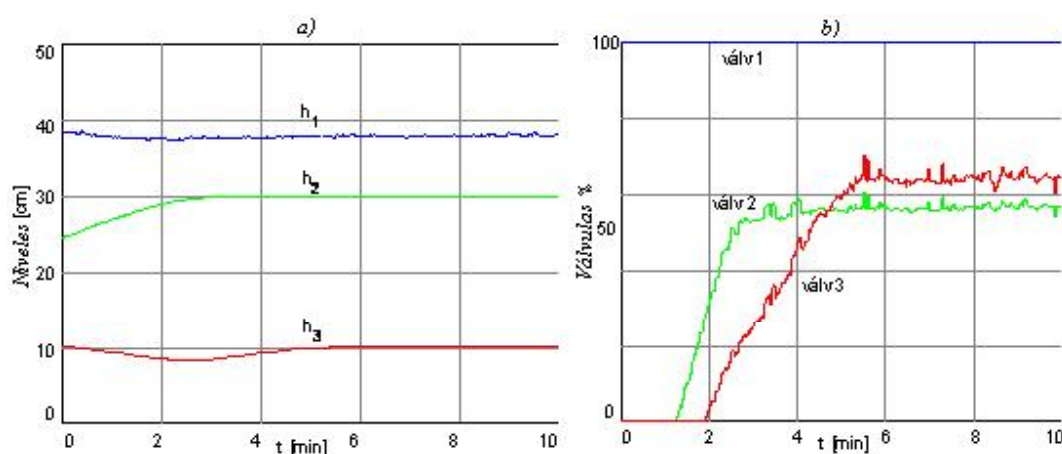


Fig. 6.8. Escenario 2, respuesta sin estimación de perturbación.





**Fig. 6.9. Escenario 2, respuesta con estimación de perturbación.**

Cuando se tiene una función de almacenamiento limitada en el primer estanque, debe haber una condición muy extrema para que la válvula 1 se mueva, por lo tanto conocer o no la perturbación llega a ser casi intrascendente en las últimas dos pruebas realizadas (ambas con función limitada para el estanque 1), por este motivo los tiempos de respuesta son casi idénticos. Un resultado interesante de elegir una función de almacenamiento especial para el primer estanque es el aprovechamiento de su capacidad como buffer, en las últimas dos pruebas queda como evidencia que el escalón en la perturbación prácticamente lo absorbe el primer estanque, y al liberarse el sistema de llevar un control ajustado en el nivel 1, se relaja la válvula 1, y por consiguiente las válvulas río abajo, eliminando todo esfuerzo observado en pruebas pasadas cuando se deseaba un control ajustado de los tres niveles. Otro resultado interesante de liberar al estanque 1, es que los tiempos de respuesta en los niveles río abajo son casi dos veces más rápidos que cuando se usaba un control ajustado en los tres estanques.

Para los siguientes dos escenarios (3 y 4) las condiciones iniciales son  $h_{i,1,2,3} = 40,25,10 [cm]$ . Los valores de estado estacionario son  $h_{1,2,3}^0 = 40,25,10 [cm]$ . Se considera una perturbación periódica cuyos Peak son 140 y 375  $[cm^3/s]$ .

### **6.2.3 Escenario 3: Funciones de almacenamiento de masa idénticas, perturbación periódica estimada.**

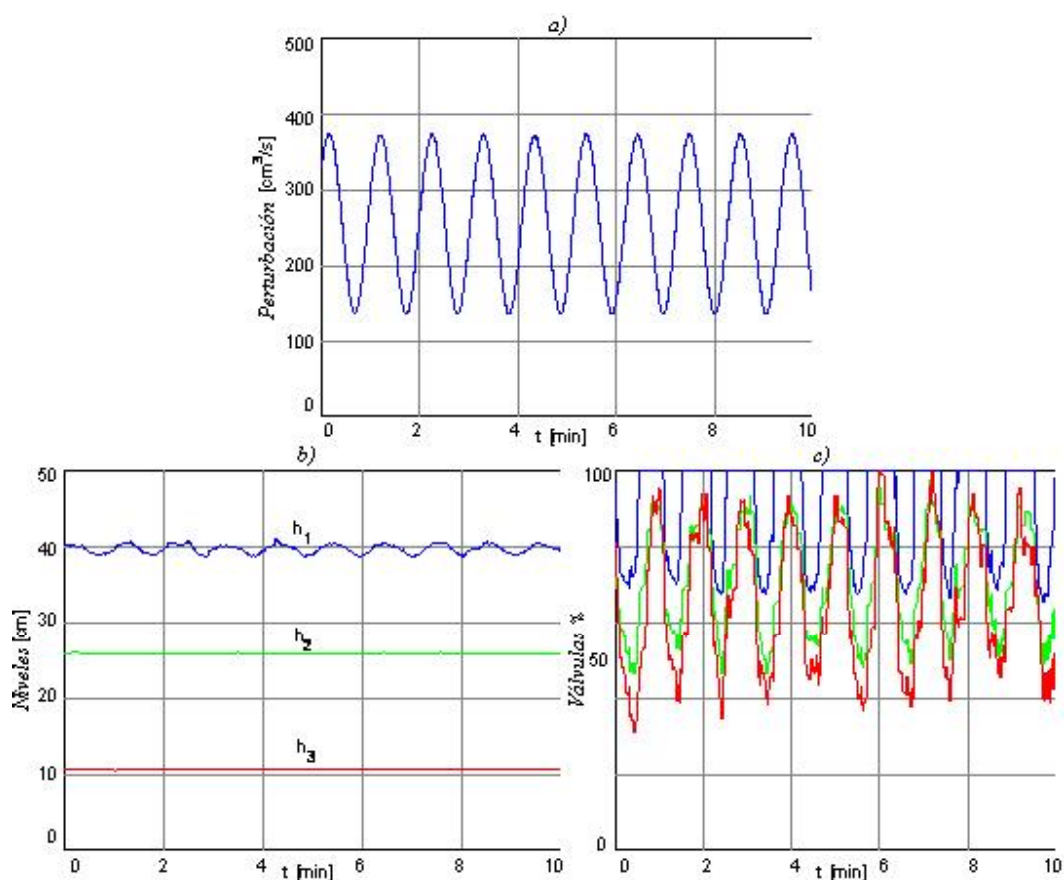


Fig. 6.10. Escenario 3, respuestas.

#### 6.2.4 Escenario 4: Función de almacenamiento de masa nueva para el estanque 1, perturbación ruidosa estimada.

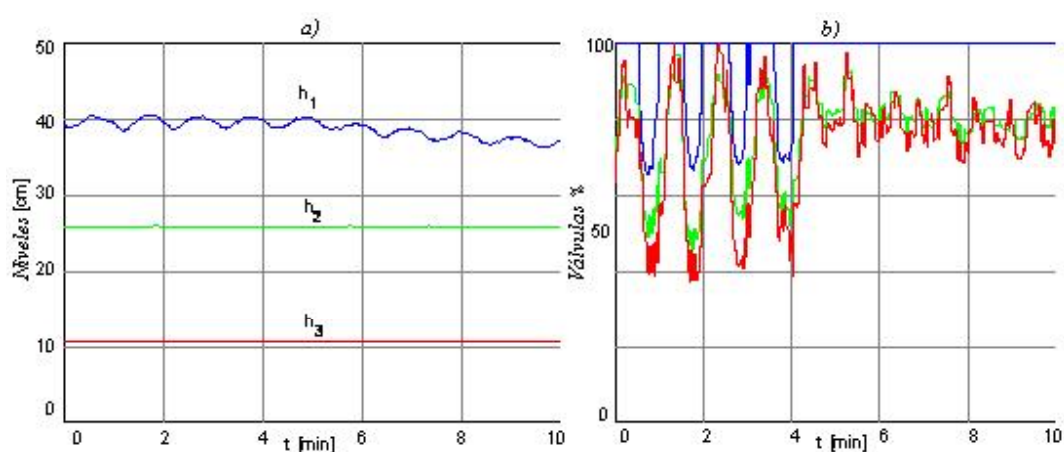


Fig. 6.11. Escenario 4, respuestas.

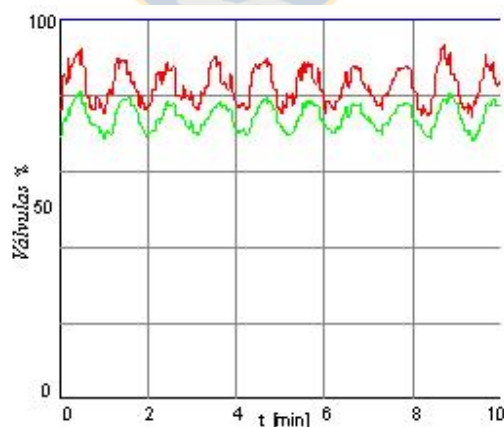
El escenario 3 muestra que a pesar de buscarse el control ajustado, el estanque uno tiene la capacidad de absorber parte de la perturbación ruidosa limpiando los niveles río abajo, sin embargo, ésta aparece fuertemente reflejada en las válvulas de control.

Ante el problema de propagación de ruido, en el escenario 4 se opta por utilizar mejor la capacidad del estanque 1 como buffer. Acá elegimos una función de almacenamiento de masa limitada para el estanque 1 que permite al nivel moverse entre ciertos límites, lo que libera a la válvula de control 1 y garantiza una salida de flujo más suave desde el estanque 1 al 2. La perturbación es la misma que en el escenario 3.

Es posible observar que en el preciso instante en que el nivel 1 es liberado al cambiar su función de almacenamiento de masa, las oscilaciones disminuyen evidentemente río abajo, lo cual proporciona una mejor realización práctica de esta alternativa teniendo en cuenta que los actuadores son válvulas de control. En la última prueba se fijó que el nivel 1 puede moverse entre 30 y 60 [cm].

Es interesante dejar en claro que en casos reales, el ruido nunca tiene una amplitud tan grande, por lo que acá se considera un caso bastante extremo.

Otra observación es que se fijaron grandes ganancias a las últimas dos funciones de almacenamiento de masa para que el control sea muy ajustado, si el operador decide que un error de 1 [cm] no es problema, puede bajar las ganancias y así las válvulas de control operarán mucho más suaves como muestra la siguiente figura.



**Fig. 6.12. Suavización de las salidas.**

Las pruebas obtenidas en planta son bastante satisfactorias y reflejan fielmente lo que nos entregó las simulaciones y el estudio teórico.

### 6.3. Comentarios

#### *Control PI:*

- La Similitud entre **Fig. 4.2** con **Fig. 6.1** y **6.2** no es del todo satisfactoria.
- Al comparar **Fig. 4.2** con **Fig. 6.1**, nos damos cuenta que la simulación logró estabilizar todos los niveles, mientras que en la prueba real solo logró estabilizarse el nivel 1. Río abajo el sistema se torna inestable, y esta inestabilidad crece conforme la perturbación baja en la cascada, tal y como se mencionó en [1]. Esta discrepancia puede deberse a las simplificaciones que se hicieron en la modelación, también puede deberse a que la linealización que se utilizó para sintonizar el control PI no entrega una aproximación exacta del sistema. A pesar de todo, el cambio en las salidas es lento y aceptable para no dañar los equipos. También el error es mínimo.
- Al comparar **Fig. 4.2** con **Fig. 6.2**, se observa que no se tiene concordancia en los tiempos de respuesta del control. La simulación logró estabilizar el cambio de set point en 4 minutos, mientras que la prueba en planta demoró cerca de 20 minutos en alcanzar la condición aceptable de estabilizar nuevamente al nivel 1, y de mantener los niveles siguientes con pequeñas oscilaciones.
- Comparando **Fig. 4.4** con **Fig. 6.3**, se observa discrepancias en la rapidez de la acción de los actuadores. Todas estas diferencias son atribuibles a simplificaciones de modelación. En cuanto a los niveles, es posible observar en ambas figuras la capacidad de filtrado que tiene el estanque 1, haciendo que aguas abajo los niveles no se vean afectados por la perturbación periódica. En la prueba de planta se tiene una acción de las válvulas más deseable que en la simulación, ya que es suave y no dañará a las válvulas. Sin embargo se observa que la oscilación de la válvula 3 va creciendo en el tiempo. Resulta interesante que un control tan simple como el PI logre llevar los set point deseados en un sistema multivariable y acoplado como el presentado.
- El control PI demostró robustez, y entregó respuestas bastante aceptables tomando en cuenta que es una estrategia sumamente fácil de implementar y que se utilizó sin desacopladores. También debe considerarse que este sistema es bastante complicado y sensible, entre otras cosas, a las salidas de agua mediante las válvulas manuales.

***IDA-PBC Escenario 1:***

- Es satisfactoria la similitud entre **Fig. 4.6** con **Fig. 6.4** y **6.5**, por que significa que se ha realizado una buena modelación del sistema, además de la coherencia entre el control teórico y práctico. La principal diferencia es la demora del nivel 3 en recuperar su set point, lo que solo es consecuencia de la apertura de una válvula manual.
- Estas imágenes nos demuestran que es posible llevar un buen control del proceso estimando la perturbación del sistema, llevándose incluso una acción más limpia de los actuadores ya que la estimación de la perturbación no considera pequeños ruidos presentes en la perturbación original. El control no es sensible en cuanto a tiempos de respuesta a la estimación de la perturbación. Entonces tenemos dos beneficios con esta estimación; uno de ellos es que se elimina la necesidad de un sensor de flujo, y el otro es que se resguardan las válvulas de control, ambos beneficios económicos que aportan a la factibilidad de un proyecto.
- En las pruebas en planta, en este escenario (**Fig. 6.4** y **6.5**) no se han sintonizado ganancias demasiado grandes en las funciones de almacenamiento de masa, y consecuencia de esto son que las válvulas operen de una manera más suave, pero también se tiene un pequeño error de estado estable cercano al 4%. En las pruebas en planta del escenario 1 cuando se tiene una perturbación con un cambio escalón (**Fig. 6.6** y **Fig. 6.7**) se han aumentado las ganancias de las funciones de almacenamiento de masa a modo de mostrar que este error de estado estacionario desaparece a cambio de un mayor esfuerzo de los actuadores a cada instante. En aplicaciones industriales el operador en planta puede hacer un balance entre control-ajustado/resguardo-de-los-instrumentos y elegir la alternativa que le convenga.
- Existe también igual una gran similitud de respuestas entre teoría y práctica cuando se tiene un cambio escalón en la perturbación, tal como muestra **Fig. 4.7** comparada con **Fig. 6.6** y **6.7**. En donde es posible observar la capacidad del estanque 1 de absorber el escalón y evitar que este sea reflejado en los niveles del sistema.

***IDA-PBC Escenario 2:***

- Similitud entre **Fig. 4.8** con **Fig. 6.8** y **6.9** satisfactoria.
- Es claro observar de la experiencia de laboratorio (**Fig. 6.8, 6.9**). Que se tienen dos beneficios que en el escenario anterior no era posible obtener juntos. Estos son un control ajustado con una respuesta suave de los actuadores. Y dado que las ganancias de las

funciones de almacenamiento de masa son las mismas que en **Fig. 6.6** y **6.7**, es obvio que estos beneficios son consecuencia de la liberación del nivel 1 y respectivamente de la válvula 1, por que al tener diseñado un sistema desacoplado en cuanto a nivel, la apertura de las válvulas 2 y 3 son funciones dependientes de la apertura de la válvula 1.

- Otro gran beneficio que muestran tanto las simulaciones como las pruebas reales, es que al liberar el nivel 1 es que los tiempos de respuesta en los niveles 2 y 3 son mucho más rápidos, específicamente comparando las respuestas de **Fig. 6.6** y **6.8** se tiene que esta última tarda un 42.8% menos de tiempo en responder. Esto es consecuencia de que la válvula 1 libera todo el flujo que puede entregar y se tiene una mejor alimentación para todo el sistema aguas abajo.
- Nuevamente se observa que la estimación de la perturbación (**Fig. 6.9**) no afecta en consideración los tiempos de respuesta y nuevamente muestra el beneficio de una acción de las válvulas más suave.
- Otra comparación con el escenario 1, es que ahora el estanque 1 es el que amortigua la totalidad del efecto del escalón en la perturbación, mientras que en el escenario 1 la válvula 1 debía soportar el efecto de este cambio para mantener el nivel 1 en su set point.

### ***IDA-PBC Escenario 3:***

- Como nuestro objetivo fue controlar estimando la perturbación y por tanto se diseñó el control considerando esto, los últimos dos escenarios se realizaron en estas condiciones.
- Similitud entre **Fig. 4.11** y **6.10** es satisfactoria.
- Tanto en los resultados de simulación como prácticos, se observa la capacidad del estanque 1 para absorber parte de la perturbación ruidosa, la cual no se traspasa a los niveles aguas abajo, pero se ve reflejada fuertemente en las válvulas de control.
- El ruido reflejado en el nivel 1 es consecuencia de que la perturbación es estimada por su media, y por lo tanto esta estimación no lleva al actuador a tomar una respuesta más fuerte. Sin embargo esto en cierto modo es positivo ya que se están resguardando las válvulas de control. Si el usuario desea un control limpio a cada instante ante una perturbación ruidosa de este tipo, la alternativa es buscar otro método de control o bien adquirir un sensor de flujo para obtener una respuesta como muestra **Fig. 4.12**, pero a cambio sus válvulas de control se sobre-exigirán aún más.

**IDA-PBC Escenario 4:**

- Similitud entre **Fig. 4.13** y **6.11** es satisfactoria.
- En la **Fig. 6.11** se observa el preciso instante en que se cambia la función de almacenamiento de energía del estanque 1, es aquí cuando las oscilaciones disminuyen evidentemente aguas abajo. Los niveles 2 y 3 son más limpios que los instantes antes del cambio, y las válvulas de control dejan de oscilar a gran magnitud.
- Los resultados de simulación y pruebas en planta han dejado en claro la total factibilidad de este método de control, por que se protegen los instrumentos de campo y se tiene un control bastante limpio ante una perturbación con tal magnitud de ruido.
- Es siempre recomendable dejar al primer estanque como buffer para lograr estos cometidos.
- Si se disminuye las ganancias en las funciones de almacenamiento de energía, es posible resguardar aun más las válvulas de control como muestra **Fig. 6.12**. Pero esto trae como consecuencia de que hay pequeños reflejos del ruido en los niveles, que son casi imperceptibles. Sin duda que dependiendo del proceso que se requiera controlar se tomará una decisión al respecto.





## Capítulo 7. Conclusiones

---

### 7.1. Conclusiones

- Se ha propuesto e implementado con éxito un nuevo enfoque basado en el moldeo de la función de masa total de un sistema pasivo.
- El controlador IDA-PBC estabiliza exitosamente el sistema no-lineal de tres estanques en serie, y es capaz de minimizar el acoplo en sus variables de estado modificando la matriz de interconexión deseada.
- En la etapa de diseño del controlador se demuestra la estabilidad del sistema en lazo cerrado.
- Ha sido posible diseñar el controlador del sistema exitosamente sin considerar en su modelación las no linealidades en los actuadores y considerando los tres estanques con un área transversal constante.
- Ha sido posible realizar un control exitoso del sistema estimando la perturbación considerándose no medible, entregándose nuevos beneficios de factibilidad al eliminarse la necesidad de un sensor de flujo y al suavizarse la acción de los actuadores.
- La asignación de una distinta función de almacenamiento de masa al estanque 1 permite aprovechar ampliamente sus capacidades de filtrado, minimizando el efecto de la perturbación en el sistema aguas abajo, disminuyendo la amplitud en las oscilación de los actuadores en un 76% y acelerando considerablemente la respuesta de los niveles en un 42.8%. La primera de estas cifras corresponde al estudio considerando una perturbación ampliamente ruidosa, la segunda se aplica a la perturbación con y sin este ruido. Entonces es siempre recomendable aprovechar al máximo la capacidad del primer estanque para filtrar la perturbación, ya que se obtienen los beneficios de un control ajustado en los niveles aguas abajo, velocidad de respuesta, y de una mayor factibilidad en la implementación al resguardarse aun más los actuadores.
- En cuanto al IDA-PBC, los resultados de las pruebas en planta son satisfactorios y reflejan fielmente lo obtenido mediante estudios teóricos y simulaciones.
- El control PI ha demostrado un buen esfuerzo para controlar este sistema serial, pero esto no es suficiente ya que no logra desacoplarlo y se observa una amplificación gradual del efecto



de la perturbación aguas abajo, reflejado en la acción de las válvulas y en los niveles. A pesar de esto, ésta estrategia demuestra un desempeño bastante aceptable en el caso que se desee llevar set points fijos, es importante considerar su fácil desarrollo e implementación.

- El control IDA-PBC ha demostrado ser mejor que el control PI. Las principales ventajas del control basado en pasividad son la rapidez de sus respuestas, la no existencia de sobrepasos, y la eliminación del acoplo excesivo característico de este sistema.
- La tecnología FOUNDATION Fieldbus ha demostrado un gran desempeño en el control de este proceso, brindándonos una gran interoperabilidad con el sistema host, el PLC, y otros dispositivos de campo que no son de este protocolo.

## 7.2. Trabajo Futuro

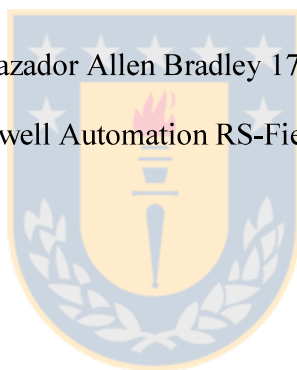
A partir de lo realizado en esta memoria de título, quedan abiertos los siguientes temas.

- Desarrollar un modelo del sistema más exacto, caracterizando las válvulas de control y considerando que los estanques no tienen un área transversal constante.
- Extender el control IDA-PBC propuesto a otros tipos de sistemas multivariables.
- Desarrollar otras alternativas de control tanto lineales como no lineales para este sistema, a modo de hacer un estudio comparativo de desempeño.
- Dado que se ha instalado y configurado la planta piloto, es posible implementar los estudios [6] y [9], ya realizados sobre este sistema en particular, y finalmente comparar con los resultados de este trabajo.
- Generalizar los resultados de este estudio a un sistema de  $n$  estanques.
- Utilizar las capacidades Fieldbus, como el control en campo.

## Bibliografía

- [1] Tak-Fai Cheung, William L. Luybden. “Liquid-Level Control in Single Tanks and Cascades of Tanks with Proportional-Only and Proportional-Integral Feedback Controllers”, in *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, vol. 18, No. 1, pp. 16-21, Nov. 1977/Sept. 1978.
- [2] Pedro F. Carrasco. “Modelación y Control de Nivel de Espuma en Celdas de Flotación”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Enero 2007, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [3] B. Stenlund, A. Medvedev. “Level Control of Cascade Coupled Flotation Tanks”, in *Control Engineering Practice*, vol. 10, pp. 443-448, Mar./Jun. 2001.
- [4] Audun Faanes, Sigurd Skogestad. “Controller design for serial processes”, in *Journal of Process Control*, vol. 15, pp. 259-271, Jun./Jul. 2004.
- [5] J. R. Llata, J. P. Oria, J. Arce, A. Robles. “Control predictivo de tanques acoplados” *Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática. E. T. S. Ingenieros Industriales y Telecomunicación. Universidad de Cantabria.*
- [6] Francisco J. Sánchez. “Control Adaptativo Predictivo aplicado a Planta Multivariable”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Junio 2009, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [7] Daniel Sbarbaro, Romeo Ortega. “Averaging level control: An approach based on mass balance”, *Journal of Process Control*, vol. 17, pp. 621-629, Jan. 12 – 16 2007.
- [8] Víctor O. Fernández. “Análisis e Implementación de Controladores No-Lineales de Nivel”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Abril 2006, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [9] Pablo A. Zúñiga. “IDA-PBC Robusto con Solución a Singularidades Aplicado a Sistema No-Lineal de Estanques en Serie”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Diciembre 2008, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [10] Héctor M. Ramírez. “Control de Sistema Multivariable No-Mínimo de Fase”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Agosto 2006, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

- [11] José. R. Espinoza “Apuntes – Control Automático”, *6ta edición*, Mayo 2006.
- [12] José. R. Espinoza “Apuntes – Síntesis de Sistemas de Control”, *8va edición*, Febrero 2008.
- [13] José. R. Espinoza “Apuntes – Introducción al Análisis de Sistemas No-Lineales”, *8va edición*, Agosto 2008.
- [14] “Curso de FOUNDATION Fieldbus” PlantWeb University.  
<http://plantweb.emersonprocess.com/university> .
- [15] Sitio Rockwell Automation Chile <http://cl.rockwellautomation.com/>.
- [16] Manuales de Instrumentación *PROline promag 53 FOUNDATION Fieldbus Electromagnetic Flow Measuring System*. Endress+Hauser, *Prosonic M FMU40 Ultrasonic Level Measurement*. Endress+Hauser, *FIELDVUE DVC5000f Series Digital Valve Controllers*. Emerson, Fisher.
- [17] Manuales del dispositivo enlazador Allen Bradley 1757-FFLD *1757-in021, 1757-um010*.
- [18] Manuales del Software Rockwell Automation RS-Fieldbus *rsfbus-um001, rsfbus-at001*.



## Anexo A. Teoría de Interés

---

### A.1. Método Directo de Lyapunov

*Def. 1:* Una función escalar continua  $V(x)$  se dice definida positiva localmente si  $V(0) = 0$  y en una bola  $B_{R_0}$  se cumple que  $x \neq 0 \Rightarrow V(x) > 0$ . Si lo anterior se cumple para todo el espacio de estados, entonces  $V(x)$  se dice definida positiva globalmente.

*Def. 2:* Una función  $V(x)$  es definida negativa si  $-V(x)$  es definida positiva.

*Def. 3:* Una función  $V(x)$  es semi-definida positiva si  $V(0) = 0$  y  $V(x) \geq 0$  para  $x \neq 0$ .

*Def. 4:* Una función  $V(x)$  es semi-definida negativa si  $-V(x)$  es semi-definida positiva.

Algunos aspectos importantes son:

- El prefijo “semi” es usado para reflejar la posibilidad de que  $V(x)$  puede ser cero para  $x \neq 0$ .
- $\dot{V}(x) = \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\partial V(x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial V(x)}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) = \nabla V(x) f(x)$ ; es decir, los puntos de equilibrio también satisfacen  $\dot{V}(0) = 0$ .
- Estamos analizando un sistema autónomo, entonces  $\dot{V}(x)$  depende solo de  $x$ . La función escalar  $\dot{V}(x)$  se conoce como “la derivada de a lo largo de la trayectoria del sistema”.

*Def. 5:* Si en una bola  $B_{R_0}$  la función  $V(x)$  es definida positiva y tiene derivadas parciales continuas, y su derivada respecto del tiempo a lo largo de las trayectorias de todos los estados del sistema es semi-definida negativa, es decir,  $\dot{V}(x) \leq 0$ , entonces  $V(x)$  es una *Función de Lyapunov* para el sistema.

**Teorema 1. Lyapunov para Estabilidad Local:** Si en una bola  $B_{R_0}$ , existe una función escalar  $V(x)$  con primeras derivadas parciales continuas tal que,

- $V(x)$  es definida positiva (localmente en  $B_{R_0}$ ).
- $\dot{V}(x)$  es semi-definida negativa (localmente en  $B_{R_0}$ ).

Entonces el punto de equilibrio  $x_0$  es estable. Si la derivada  $\dot{V}(x)$  es localmente definida negativa en  $B_{R_0}$ , entonces la estabilidad es asintótica.

**Teorema 2. Lyapunov para Estabilidad Global:** Asumir que existe una función escalar, con derivadas de primer orden continuas tal que:

- $V(x)$  es definida positiva
- $\dot{V}(x)$  es definida negativa
- $V(x) \rightarrow \infty$  cuando  $\|x\| \rightarrow \infty$ .

Entonces el punto de equilibrio  $x_0$  es globalmente asintóticamente estable.



## A.2. Matriz definida positiva

*Def. 1:* Una matriz  $\mathbf{M}$  cuadrada de  $n \cdot n$  es definida positiva si  $\forall \mathbf{x} \neq 0$  entonces se cumple que  $\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x} > 0$ .

## **Anexo B. FOUNDATION Fieldbus**

---

Se hará una descripción resumida de lo que es el protocolo de comunicación que utilizan los instrumentos del proceso en planta “FOUNDATION Fieldbus”. A modo de familiarizarse con el sistema y de conocer algunas consideraciones importantes al momento de diseñar una red de este tipo.

### **B.1. Fundamentos de FOUNDATION Fieldbus**

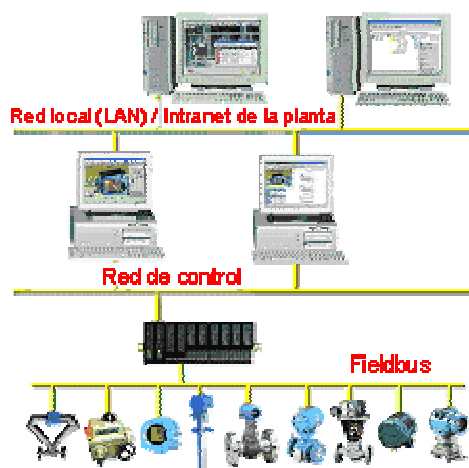
Los instrumentos en planta son conectados mediante el protocolo FOUNDATION Fieldbus. Por lo tanto, se hará una descripción breve de lo que éste sistema de comunicación significa. Se mostrarán algunas fichas técnicas de interés a considerar en la instalación y conexión de dispositivos a una red de este tipo.

#### **B.1.1 ¿Qué es FOUNDATION Fieldbus?**



**Fig. B.1. Logo FOUNDATION Fieldbus**

FOUNDATION Fieldbus (FF) es un sistema de comunicación serial bidireccional completamente digital que sirve como la red de nivel base en el ambiente de automatización de una planta o fábrica.



**Fig. B.2. Niveles de automatización en una planta**

Se han introducido dos implementaciones relacionadas de FOUNDATION fieldbus para satisfacer diferentes necesidades dentro del ambiente de automatización del proceso. Estas dos implementaciones usan diferentes medios físicos y velocidades de comunicación.

La que se usará en planta es la implementación más común, es decir, la implementación H1. Esta trabaja a  $31.25 \text{ [Kbits/s]}$  y generalmente se conecta a dispositivos de campo. Proporciona comunicación y alimentación sobre cableado estándar en par torcido.

***La ventaja del bus digital.***

Los instrumentos de campo analógicos y discretos convencionales usan cableado punto a punto (un par por dispositivo), también se limitan a llevar solo un elemento de información sobre esos hilos, generalmente una variable de proceso o salida de control. Como bus digital, FOUNDATION Fieldbus no tiene esas limitaciones.

***Cableado multipunto.***

FF soportará hasta 32 dispositivos en un solo par de hilos (llamado segmento), o más si se usan repetidores. En la práctica real, lo más típico es de 4 a 16 dispositivos por segmento H1 después de considerar aspectos tales como alimentación, modularidad del proceso y la velocidad de ejecución del lazo.

### ***Instrumentos multivariables.***

Ese mismo par de hilos puede manejar múltiples variables provenientes de un dispositivo de campo. Por ejemplo un transmisor que comunique las entradas de ocho sensores.

### ***Comunicación de dos vías.***

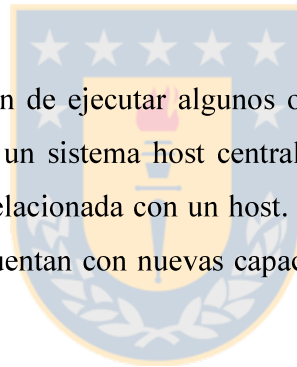
El flujo de información es en dos sentidos. En un mundo analógico esto requería de otro par de hilos.

### ***Nuevos tipos de información.***

Los dispositivos FF pueden decir si están funcionando correctamente, y si la información que están enviando es buena, mala, o incierta. Lo que elimina la necesidad de revisiones de rutina, y ayuda a detectar condiciones de falla antes de que provoquen un problema mayor.

### ***Control en campo.***

FF también ofrece la opción de ejecutar algunos o todos los algoritmos de control en los dispositivos de campo en lugar de un sistema host central. Lo que permite al control automático continuar incluso si hay una falla relacionada con un host. Esto forma parte de la nueva tecnología de ‘dispositivos inteligentes’ que cuentan con nuevas capacidades que los hacen independientes de otros dispositivos y sistemas.



### ***Control de procesos seguro y efectivo.***

FF H1 fue desarrollado específicamente para satisfacer las necesidades de la industria de procesos.

- Puede soportar ambientes severos y peligrosos de las plantas.
- Proporciona alimentación y comunicación sobre el mismo par de hilos.
- Puede usar cableado existente en planta.
- Soporta seguridad intrínseca.

### ***Un estándar establecido.***

FOUNDATION Fieldbus está respaldado por estándares de tres organizaciones importantes.

- ANSI/ISA 50.02
- IEC 61158



- CENELEC EN50170:1996/A1

La tecnología es administrada por Fieldbus Foundation.

### ***Interoperabilidad.***

Interoperabilidad significa que los dispositivos y sistemas host FF pueden trabajar juntos mientras proporcionan toda la funcionalidad de cada componente.



**Fig. B.3. Logotipo de aceptación FOUNDATION Fieldbus**

Los instrumentos pueden obtener el estado “registrado” y el derecho de portar el logotipo de aceptación de FF (**Fig. B.3**) al pasar por rigurosas pruebas para demostrar que cumplen con los requerimientos de interoperabilidad.

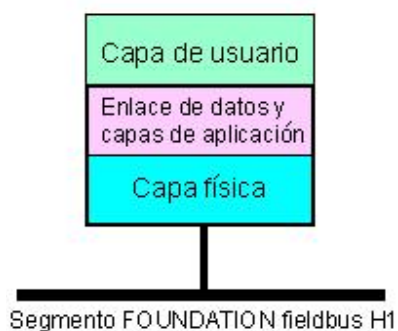
La instrumentación de planta que se utilizará cuenta con este registro, más específicamente, las válvulas de control, los sensores de nivel, y el sensor de flujo.

## **B.1.2 Comunicaciones Fieldbus**

### ***El modelo de las comunicaciones***

El modelo de las comunicaciones FF consta de tres partes.

- La capa física.
- Las capas de enlace de datos y aplicaciones.
- La capa de usuario



**Fig. B.4. Modelo de las comunicaciones FF**

La capa física y las capas de enlace de datos y aplicación componen el stack de comunicaciones. La capa de usuario se asienta en la cima del stack y permite interactuar con las otras capas, y con otras aplicaciones en el sistema.

### ***Capa física.***

La primera capa funcional del modelo de comunicaciones FF es la capa física, que tiene que ver con la traducción de mensajes en señales físicas sobre el hilo y viceversa.

La capa física también proporciona la interfaz eléctrica común para todos los dispositivos FF. Los segmentos FF H1 requieren alimentación de 9 a 32 [Vdc] y aproximadamente 15 a 20 [mA] de corriente por dispositivo, operan a una velocidad de comunicación de 31.25 [KBits/s].

La capa física FF está definida por los estándares aprobados IEC 1158-2 y ANSI/ISA 50.02. Puede correr en el cableado de campo existente sobre grandes distancias, soporta dispositivos de dos hilos y ofrece seguridad intrínseca como una opción.

### ***Capa de enlace de datos y aplicación.***

La segunda parte del modelo de comunicación combina varias tecnologías que juntas controlan la transmisión de datos en el Fieldbus.

Las capas de enlace de datos y aplicación proporcionan una manera estándar de “empaquetar” los datos, así como de manejar el programa para la comunicación y ejecución de bloques de funciones. Estas capas permiten el control del proceso al mismo tiempo que proporcionan estandarización e interoperabilidad.

### ***Capa de usuario.***

La capa de usuario se asienta en la cima del stack de comunicaciones, donde le permite a usted interactuar con las otras capas y con otras aplicaciones.

La capa de usuario contiene bloques de recursos, bloques transductores y bloques de funciones que describen y ejecutan las capacidades del dispositivo tales como control y diagnósticos. Las descripciones de dispositivo (Device Descriptions, DD) permiten al sistema host interactuar y comprender estos bloques sin programación personalizada.

### ***Comunicaciones programadas.***

Todos los dispositivos y bloques de funciones del segmento FOUNDATION ejecutan y comunican información de control del proceso en un ciclo regular repetitivo.

El tiempo para este tipo de comunicación está determinado por un programa maestro en el Link Active Scheduler, que es una función que reside en el sistema host o en uno de los dispositivos del segmento.

Estas comunicaciones programadas (o cíclicas) usan un método “Publisher/Subscriber”. Esto significa que los datos se envían en el bus o se “publican” una vez, y todos los demás dispositivos que necesitan los datos, escuchan o se “suscriben” a la misma transmisión. Por lo tanto, un parámetro específico puede ser usado por tantos dispositivos o funciones diferentes como se desee, sin incrementar el tráfico en el bus o afectar el rendimiento de control.

Estas comunicaciones son determinísticas. Esto significa que siempre ocurren sobre un programa predeterminado, así que es seguro que la información se transmitirá y recibirá precisamente cuando se necesita.

### ***Comunicaciones no programadas.***

FOUNDATION Fieldbus soporta muchos tipos de información aparte de los datos de control de lazos de procesos. Estos otros tipos de información incluyen.

- Información de configuración enviada a dispositivos o a una base de datos central.
- Datos de alarma, eventos y tendencias.
- Información para los displays de los operadores.
- Información de diagnóstico y de estado.

Esta información es importante, pero no tan crítica en el tiempo como la información de control de lazo. Si se transmite 1/8 de segundo antes de un ciclo de comunicación y 1/8 de segundo después en el siguiente ciclo, no hay impacto sobre el control del proceso u operación de la planta.

### ***Tiempo flexible.***

FF le da a esta información una menor prioridad en el segmento que a las comunicaciones programadas relacionadas con el lazo de control. Sin embargo, se reserva una cierta cantidad de tiempo en el ciclo de comunicación para estas comunicaciones no programadas, a modo de garantizar que el segmento no se cargue tanto.

Durante este tiempo, un método “token-passing” le da a cada dispositivo del segmento la oportunidad de transmitir mensajes hasta que termine o hasta que se agote el tiempo asignado.

### ***Estado de parámetro.***

FOUNDATION Fieldbus soporta una variedad de revisiones de redundancia de datos para evitar errores de bits o mensajes. Dos características adicionales que ayudan a garantizar la fiabilidad de los datos son el “reloj de aplicación” y un estado asociado con cada parámetro.

Cada dispositivo está diseñado para revisar si hay problemas y etiquetar los datos que envía según el resultado de la revisión. Esta etiqueta de estado muestra si la calidad de los datos es “good” (buena), “bad” (mala) o “uncertain” (incierto).



**Fig. B.5. Calidad de parámetros.**

Una señal de estado “bad” podría indicar una falla de dispositivo. Un estado “uncertain” indica que la calidad de los datos es desconocida y puede ser consecuencia de un dispositivo que se ha saturado.

Se debe revisar si el sistema host considerado tiene la funcionalidad de usar esta información, ya que no todos la tienen.

### ***Reloj de aplicación.***

Cada dispositivo de un segmento FOUNDATION Fieldbus comparte el mismo tiempo.

Una función de gestión del sistema llamada “application clock” (reloj de aplicación) emite periódicamente la hora – ya sea en tiempo local o en tiempo coordinado universal – a todos los dispositivos. Cada dispositivo usa un reloj interno para mantener la hora entre estas emisiones de sincronización.

Se asigna hora y fecha a las alarmas y eventos en el dispositivo donde ocurren, y cuando ocurren.

Debido a este enfoque FF proporciona precisión y resolución de tiempo superiores para actividades tales como registro de secuencias de eventos y análisis.

### ***Programador activo de enlace (LAS).***

La función programador activo de enlace mantiene el programa determinístico central para comunicación entre los dispositivos de un segmento. Mejora la fiabilidad general de comunicación al hacer que cada dispositivo transmita datos cíclicos cuando se le programa para que lo haga.

Los “reintentos de mensajes” también incrementan la fiabilidad de la comunicación. Si un dispositivo no responde al mensaje “compel data” (forzar datos) de LAS, entonces la función LAS volverá a enviar el mensaje para forzar al dispositivo a publicar su información.

La función LAS reside en un dispositivo o componente del sistema host en el segmento. Si LAS falla, entonces un LAS de respaldo ubicado en otro dispositivo o componente del sistema host toma el control como el programado maestro. Puede haber más de un LAS de respaldo en un segmento, esto significa que FF está diseñado para una degradación natural, incrementando más la fiabilidad.

### ***Asignación de dirección de dispositivo.***

Como bus digital multipunto, FOUNDATION Fieldbus lleva señales desde y hacia varios dispositivos sobre el mismo cable. Para identificar cuál información está asociada con cuál dispositivo, se asigna una dirección a cada dispositivo.

Dependiendo del protocolo de comunicación, se pueden asignar las direcciones en varias maneras, desde dip switches (o direccionamiento offline, fuera de línea) a asignación automática online (en línea). Es mucho más recomendable el direccionamiento online para evitar problemas de errores humanos, como dispositivos duplicados con la misma dirección.

### ***Servicio de encontrar etiqueta.***

Muchos protocolos de comunicación requieren que el usuario identifique los dispositivos y los parámetros, vinculándolos por medio de asignación de dirección y/o registro. Lo que puede ser un proceso propenso a errores.

FF por el contrario, es un bus basado en etiquetas (Tags). En lugar de requerir una dirección de registro o de hardware, puede encontrar dispositivos o variables por etiqueta.

Para encontrar una etiqueta específica, se envía una interrogación de búsqueda de etiqueta “find tag query” en el bus. A medida que cada dispositivo recibe la interrogación, busca en sí mismo la etiqueta solicitada.

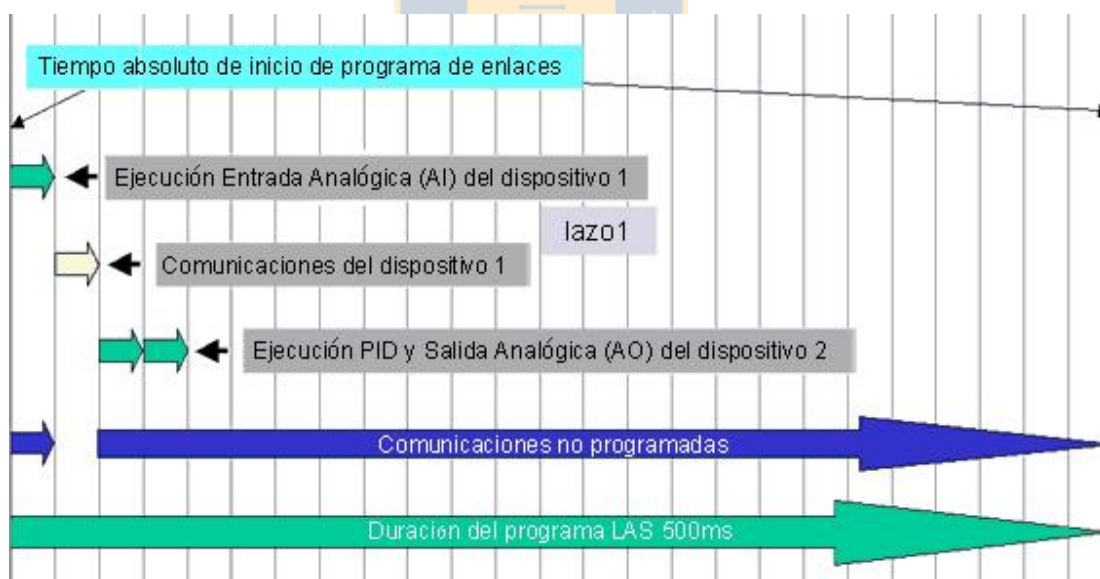
Cuando el dispositivo encuentra la etiqueta, regresa información de la ruta completa y todos los parámetros necesarios y descriptores asociados con la etiqueta. Luego el host o herramienta de mantenimiento puede usar la ruta para tener acceso a los datos en ese dispositivo. Esta característica evita la duplicación de asignaciones de etiqueta.

### B.1.3 Programación de lazo

En FOUNDATION Fieldbus, las comunicaciones relacionadas con el control y los bloques de funciones se ejecutan a intervalos definidos con precisión, y en el orden programado adecuado para obtener un control de procesos correcto.

El programa general se llama un ‘macrociclo’. Los macrociclos para todos los dispositivos de un segmento se programan con precisión y todos usan el mismo tiempo absoluto de inicio. Los bloques de funciones y las comunicaciones se ejecutan a offsets especificados con respecto a ese tiempo absoluto.

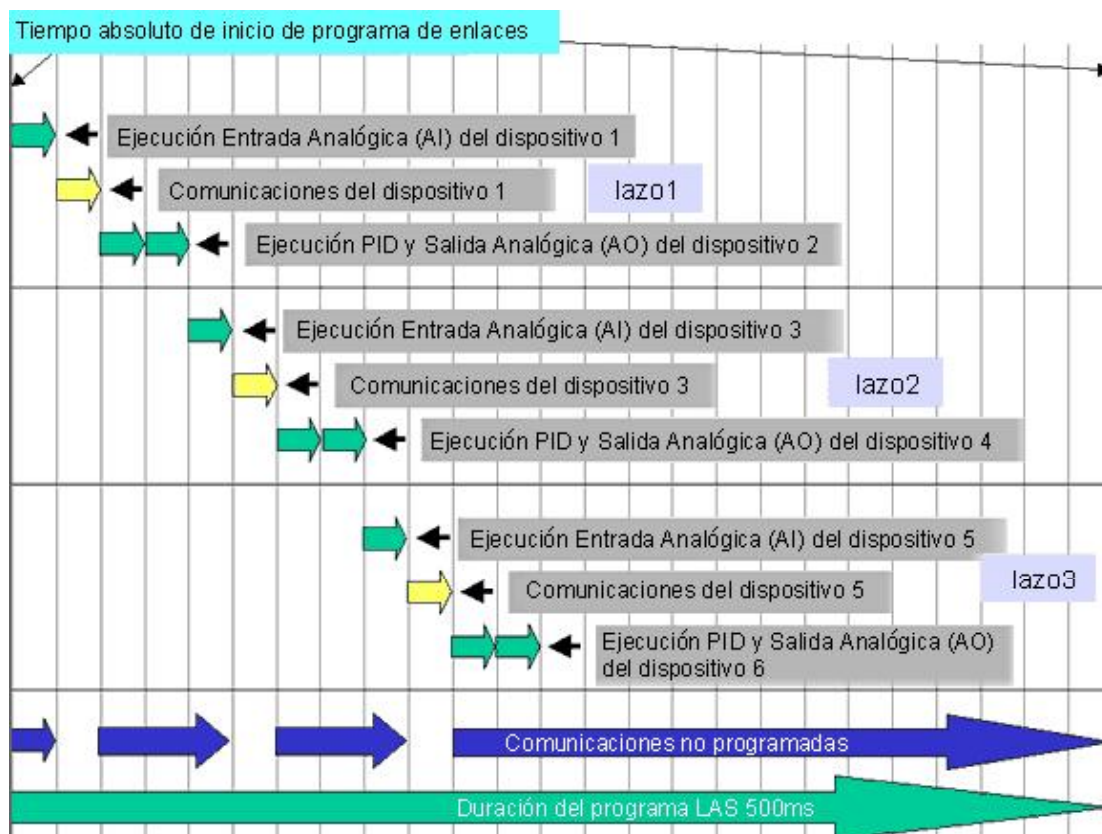
El diagrama siguiente muestra el programa para un lazo típico donde la función PID está en el controlador de la válvula (Device 2). Cada actividad ocurre a un offset definido con respecto al tiempo absoluto de inicio.



**Fig. B.6. Programa de lazo típico.**

Este ciclo se repite bajo un programa exacto de ejecución. Los mensajes no programados (acíclicos) se pueden comunicar en cualquier momento en que no se estén enviando mensajes programados (cíclicos).

Como muestra el siguiente ejemplo, se puede tener varios bloques de funciones ejecutándose al mismo tiempo en el mismo segmento, siempre y cuando estén en diferentes dispositivos y tengan tiempos de inicio diferentes. El ejemplo tiene tres lazos con el PID en el controlador de válvula.



**Fig. B.7. Programa de lazos múltiples.**

No se puede tener más de un dispositivo comunicándose en el bus al mismo tiempo. El programa del ejemplo evita que la comunicación se trasape. Esto se logra distribuyendo los tiempos de inicio de comunicación de los bloques de funciones de manera que un bloque no inicie hasta que el anterior haya terminado.

Por simplicidad el diagrama anterior muestra bloques ejecutándose en secuencia sin trasape de procesamiento. En realidad múltiples bloques pueden ejecutarse al mismo tiempo siempre y cuando estén en diferentes dispositivos, y los datos pueden comunicar tan pronto como se complete el procesamiento. Múltiples dispositivos no se pueden comunicar al mismo tiempo.



### B.1.4 Bloques Fieldbus

Los bloques Fieldbus son como pequeños módulos de software sellados. Cada bloque tiene un conjunto definidos de entradas y/o salidas para una función específica o tipo de información. El usuario no tiene que manejar el procesamiento interno que activa las entradas y salidas, de eso se encarga el fabricante que proporciona el bloque como parte de un dispositivo o sistema host Fieldbus.

FOUNDATION Fieldbus usa tres tipos de bloques:

- Bloques de recursos
- Bloques transductores
- Bloques de funciones

Los bloques de recursos y transductor proporcionan información valiosa acerca de los dispositivos, sensores, actuadores, y acerca de su rendimiento. Los bloques de funciones son los motores del control abierto, interoperable y dependiente del dispositivo.

#### ***Bloque de Recursos.***

Tiene que ver con el dispositivo en general. Contiene información tal como el fabricante, tipo de dispositivo y número de serie. Cada dispositivo tiene un bloque de recursos.

El bloque de recursos proporciona a menudo información acerca de la condición operativa o estado del dispositivo en general. El acceso a esta información adicional puede ser una de las características más importantes de FF porque permite al usuario detectar problemas potenciales del dispositivo antes que éstos afecten al proceso.

Durante la ejecución del proyecto, el bloque de recursos se usa para identificar un dispositivo, ponerle etiqueta y comisionarlo. Durante las operaciones continuas, se usa para obtener información de estado y configuración del dispositivo en general, y para correr algunos tipos de diagnósticos del dispositivo.

#### ***Bloque Transductor.***

Tiene que ver con las partes internas de un dispositivo. Proporciona las funciones de entrada/salida locales necesarias para leer los sensores y para comandar los actuadores, displays u otro hardware de salida. Es el enlace entre el mundo físico de los sensores y actuadores y el mundo de datos del control de procesos.



El bloque transductor contiene información tal como datos de calibración, tipo de sensor, materiales de construcción, y en muchos casos la condición operativa y el estado de los actuadores y sensores.

Durante la ejecución del proyecto, los bloques transductores se usan para calibrar el dispositivo, establecer las unidades, y para otras tareas relacionadas con la provisión de una entrada o salida precisa y confiable. Durante las operaciones continuas, se usan para solucionar problemas y calibrar dispositivos, realizar revisiones de diagnóstico, y para llevar a cabo otras tareas para mantener la condición operativa y el rendimiento de los dispositivos.

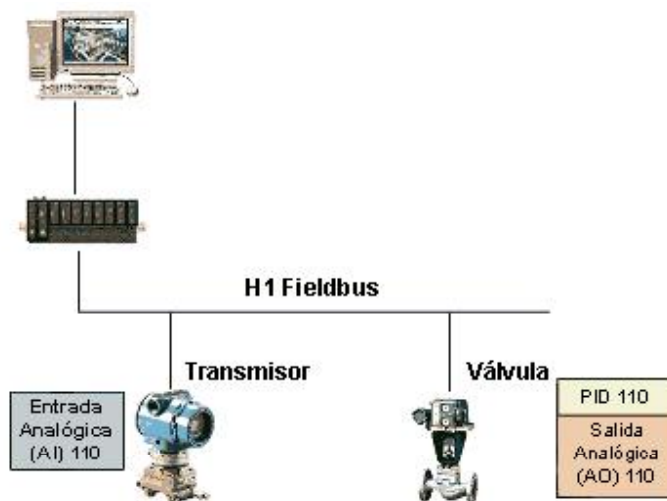
Se pueden tener varios bloques transductores en un solo dispositivo. Por ejemplo, un bloque transductor puede trabajar sobre el sensor o actuador, otro puede trabajar con el display local, y un tercer bloque puede trabajar con diagnósticos.

### ***Bloque de Funciones.***

Proporcionan el comportamiento del sistema de control dentro del ambiente Fieldbus. Bloques de entrada y salida analógicas y discretas, y una amplia variedad de algoritmos de control tales como caracterizador, divisor, o PID, se pueden ligar a través del Fieldbus para realizar el control del proceso. Incluso es posible en muchos casos, correr un lazo de control completamente en los dispositivos de campo sin involucrar al sistema host, esto puede traer grandes beneficios.

Durante la ejecución del proyecto, se usan estos bloques para implementar la estrategia de control. Durante las operaciones continuas, estos bloques proporcionan información del control del proceso y las funciones que los operadores usan para correr la planta.

Un dispositivo simple puede tener sólo un bloque de funciones de entrada o salida. Los dispositivos más complejos pueden tener varios bloques de entrada y salida, así como bloques para supervisión y control. La siguiente figura muestra un ejemplo de lo anterior.



**Fig. B.8. Bloques Fieldbus.**

### ***Bloques de Funciones FOUNDATION Fieldbus.***

FOUNDATION Fieldbus ha definido conjuntos estándar de bloques de funciones básicos y avanzados. Los fabricantes deciden cuáles de estos bloques estándar -así como otros bloques no estándar- serán soportados en cada dispositivo de campo.

*Interoperabilidad Integrada:* Si un dispositivo cumple con la especificación de FF para un bloque de funciones, ese bloque de funciones será interoperable, es decir, las entradas y salidas permitirán al bloque trabajar junto con otros bloques de acuerdo a la especificación FF sin importar que fabricante sea el dispositivo o el host.

*Espacio para innovación:* Los fabricantes de dispositivos también pueden proporcionar bloques o funciones que no son especificados por la FF.

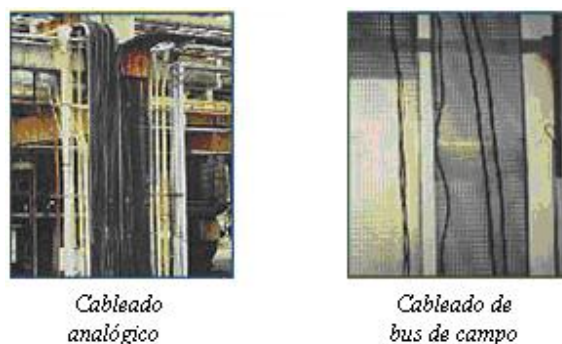
### **B.1.5 Fundamentos del Cableado de Red**

Muchos aspectos de una red FOUNDATION Fieldbus son similares a una red de control tradicional analógica. Aun se necesita cableado, alimentación, dispositivos de campo, tarjetas de E/S, y posiblemente barreras de seguridad intrínseca. Hay algunos nuevos componentes, como son los terminadores. Y hay diferencias en la manera en que se juntan todas las piezas. Pero “diferente” no quiere decir difícil, sino que quiere decir mejor.

Algunas ventajas del cableado de bus de campo son.

- La comunicación digital permite que varios dispositivos compartan el mismo cableado.
- FF H1 puede trabajar en cableado estándar de la planta.

La siguiente imagen compara una imagen de un cableado analógico con un cableado de bus de campo. Notándose claramente la disminución del cableado en esta ultima configuración.

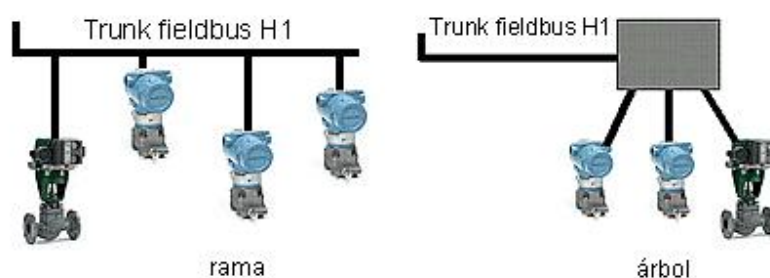


**Fig. B.9. Comparación de cableados.**

#### ***Diseño básico de segmento.***

Las instalaciones analógicas convencionales tienen un par de hilos dedicados que conectan cada dispositivo de campo al sistema host. Las instalaciones FOUNDATION Fieldbus usan un solo cable en par torcido - también llamado bus o trunk - para conectar múltiples dispositivos. El cable, dispositivos conectados y los componentes de soporte componen un segmento.

Los dispositivos se conectan a Fieldbus individualmente o en grupos. Si se conectan a través de “spurs” (derivaciones) individuales que se ramifican desde el trunk principal, el resultado se llama esquema de rama. Mientras que un bus con derivaciones conectadas al trunk en grupos se llama esquema de árbol.



**Fig. B.10. Esquemas de conexión al segmento FF**

Un solo segmento puede tener tanto ramas como árboles, siempre que se siga con reglas de longitud total del segmento, longitud de los puntos, número de dispositivos y demanda de corriente del segmento.

**Tabla B.1. Reglas del segmento Fieldbus**

Límites clave del segmento	Valores típicos
Máximo de 32 dispositivos por segmento sin un repetidor Máximo de 240 dispositivos por segmento con un repetidor	4 a 16 dispositivos por segmento
Cada dispositivo debe tomar al menos 8[mA] del segmento	Consumo de 15 a 25[mA] para un dispositivo de dos hilos 8.5[mA] para un dispositivo de 4 hilos 400[mA], límite típico de segmento
Rango de voltaje 9 a 32 [Vdc]	24[Vdc]

***Tipos de cable y longitudes de segmento.***

La longitud de un segmento Fieldbus depende del cable que se use. La siguiente tabla proporciona ejemplos de tipos de cable y longitudes de segmento permitidos.

**Tabla B.2. Tipos de cable y longitudes de segmento.**

Tipo	Descripción	Calibre	Longitud máxima
<b>A</b>	Par torcido blindado individualmente	#18 AWG (0.8 mm <sup>2</sup> )	1900 m
<b>B</b>	Par torcido múltiple con blindaje general	#22 AWG (0.32 mm <sup>2</sup> )	1200 m
<b>C</b>	Par torcido múltiple sin blindaje	#26 AWG (0.13 mm <sup>2</sup> )	400 m
<b>D</b>	Dos hilos no torcidos y sin blindaje	#16 AWG (1.25 mm <sup>2</sup> )	200 m

La longitud total de un segmento se determina sumando la longitud de todas las secciones del segmento. La longitud del segmento debe estar dentro del valor máximo permitido para el tipo de cable usado. La siguiente figura muestra un ejemplo, en éste la longitud total del segmento es la suma de todas las derivaciones o spurs (S1 a S7), más la longitud de los cables principales o trunks (T1 y T2). Viendo la tabla anterior se puede saber el límite para un cable de tipo A.

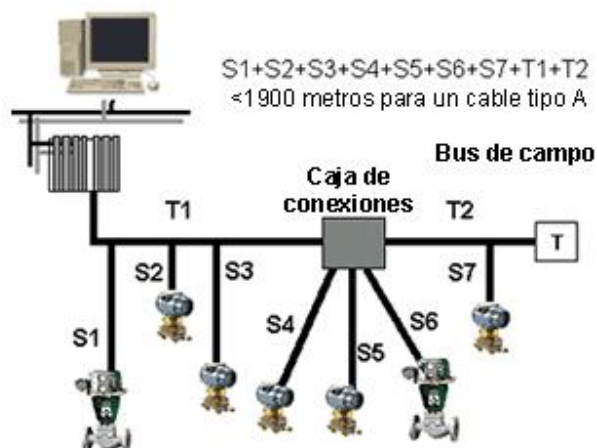


Fig. B.11. Longitud total de un segmento.

Es posible utilizar diferentes tipos de cable en un segmento FF, siempre y cuando se sigan las reglas sobre cuanto de cada tipo de cable puede coexistir en el segmento.

Para encontrar la longitud máxima de cada tipo de cable en un segmento, primero se debe calcular la siguiente relación para cada cable:

$$\frac{\text{Longitud.de.cable.individual}}{\text{Máxima.longitud.para.el.tipo.de.cable}}$$

Las longitudes máximas se ven en la **Tabla B.2**. Luego se debe sumar las relaciones para todos los cables individuales del segmento. Si la suma de las relaciones es menor que 1 (100%), las combinaciones de cable y longitudes son aceptables.

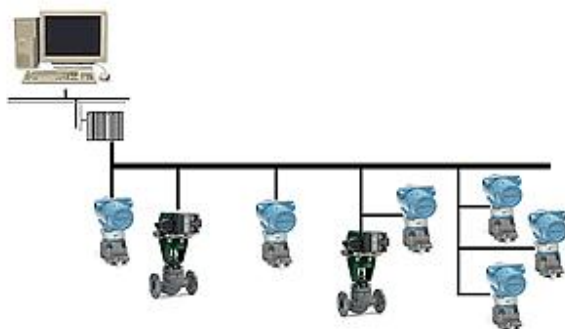
La longitud máxima de una derivación o spur depende del número total de dispositivos en la derivación, y del número total de dispositivos en el segmento. La siguiente tabla muestra algunas longitudes máximas.

Tabla B.3. Longitudes de spur

Dispositivos totales del segmento	Dispositivos por derivación		
	1	2	3
1-12	120 m	90 m	60 m
13-14	90 m	60 m	30 m
15-18	60 m	30 m	1 m

Por ejemplo la siguiente figura muestra un segmento de 8 dispositivos. Leyendo la fila 1-12 de la tabla anterior, significa que las derivaciones con un dispositivo pueden ser de 120 metros cada

una, la con dos dispositivos puede tener desviaciones de de 90 metros cada una, y la de tres dispositivos puede tener desviaciones de 60 metros cada una.



**Fig. B.12. Longitud de derivaciones**

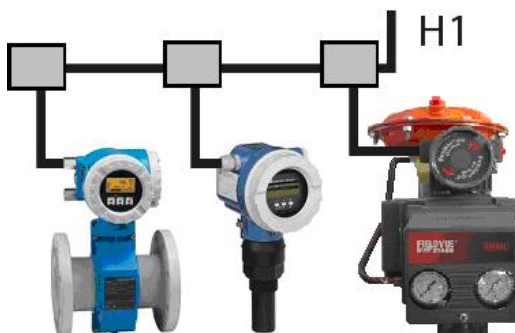
### B.1.6 Topologías de Cableado de Red

FOUNDATION Fieldbus ofrece un amplio rango de opciones para construir una red que satisfaga las necesidades del usuario. Las elecciones que se hagan dependen de la ubicación de cada dispositivo, cantidad de cableado existente que se desee usar en la nueva red, y de las prácticas de cableado más adecuadas para la planta.

A continuación se explicarán las topologías más usadas en una red Fieldbus.

#### *Topología de Red con Derivaciones (spurs) o de Rama.*

Una rama es solo una derivación (spur) del Trunk (tronco o línea principal) de un segmento Fieldbus. Un esquema de rama es adecuado cuando los dispositivos de un segmento están separados geográficamente entre sí. Se puede tener varios dispositivos en un spur.



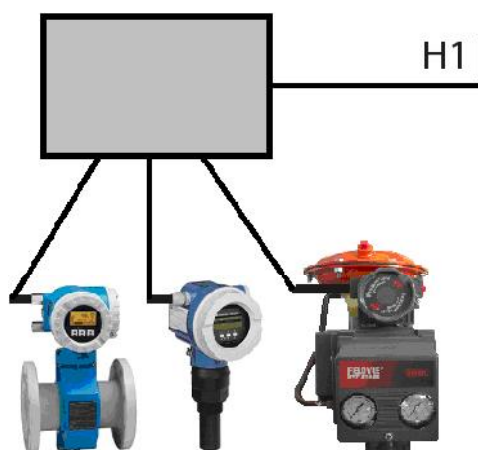
**Fig. B.13. Topología de Rama.**

### ***Topología de Árbol.***

Para esta topología, se concentra la conexión en acopladores o cajas de conexión llamadas ‘superblock’ que se ubican en el campo y que permiten la conexión de varios dispositivos. Debido a su distribución, esta topología se conoce también como "pata de gallina"; esta topología trabaja bien cuando los dispositivos están cercanos entre sí.

Generalmente esta topología resulta ser un poco más económica que la red con derivaciones, puesto que el superblock trae incluidas más salidas para dispositivos y el terminador.

Dependiendo de la distribución planta se deben evaluar económicamente las alternativas, debido a que si se tiene que los instrumentos están físicamente muy separados, un esquema de árbol puede significar altas cantidades de cableado fieldbus.



**Fig. B.14. Topología de Árbol.**

### ***Topología Daisy Chain.***

En esta topología conecta en serie todos los equipos utilizados en una aplicación.

El bus Fieldbus es conectado de equipo a equipo de forma secuencial, conectando en los mismos terminales del equipo.

Una ventaja es el ahorro económico que significa no utilizar bloques derivadores, sin embargo, el acondicionador de poder y los terminadores siguen siendo necesarios, estos hardwares de segmento serán explicados más adelante.

La principal desventaja es que la desconexión de un dispositivo desde la red significará detener la operación de la planta. Las instalaciones que utilizan esta topología y que no quieren dejar



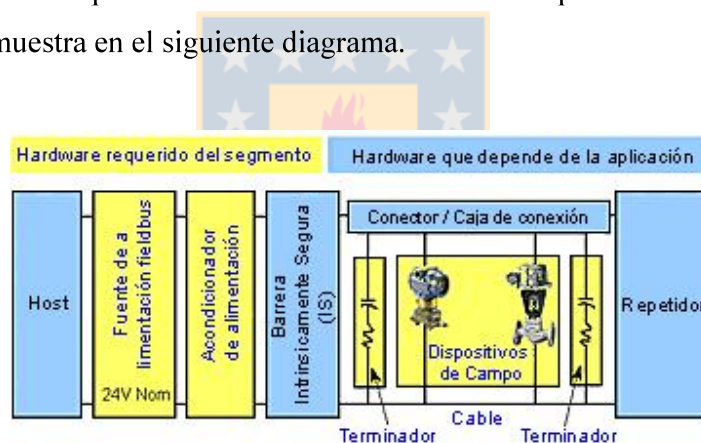
de operar deberán usar conectores de forma que la desconexión de uno de los equipos no interrumpa la continuidad del segmento.



**Fig. B.15. Topología Daisy Chain.**

### B.1.7 Hardware de Segmento

Un segmento FF típico consta de hardware tanto requerido como dependiente de la aplicación, como se muestra en el siguiente diagrama.



**Fig. B.16. Hardware de un segmento Fieldbus.**

Los dispositivos Fieldbus son nodos inteligentes de la red, los cuales proporcionan detección, actuación, control del proceso e información de diagnóstico. En este sentido, un sistema host (generalmente una herramienta de ingeniería Fieldbus o un sistema de control tal como un DCS, PLC o PC) es un tipo de dispositivo Fieldbus. El resto de la red Fieldbus enlaza y soporta estos dispositivos.



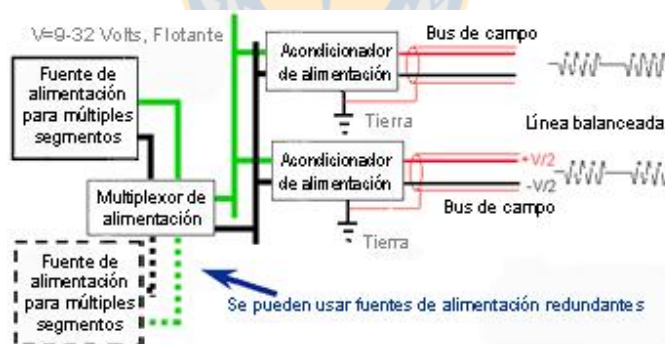
### ***Fuente de alimentación.***

La alimentación es una de las áreas en la que FF es muy similar a las redes analógicas convencionales. La fuente de alimentación Fieldbus normalmente es una unidad de 24 volts redundante que proporciona alimentación para múltiples segmentos Fieldbus.

En general, la alimentación FOUNDATION Fieldbus:

- Se comparte a través de muchos dispositivos y segmentos.
- A menudo es redundante.
- Se multiplexa a través de un multiplexor de alimentación separado o a través de multiplexores integrados con las fuentes.
- Se lista como alimentación flotante de 9-32 Vdc (24 Vdc es más común).

La mayoría de las fuentes de alimentación analógicas existentes trabajarán con FF y son muy adecuadas. A algunas plantas les gusta tener una UPS o respaldo de batería como una de las fuentes de alimentación, ya que se pueden usar fuentes de alimentación redundantes como muestra el siguiente diagrama de un ejemplo para configuración de fuente de alimentación para múltiples segmentos.



**Fig. B.17. Ejemplo de Configuración de Alimentación.**

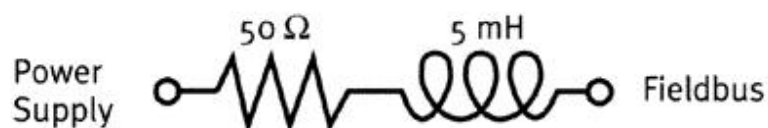
### ***Acondicionador de alimentación.***

Es muy importante que la comunicación de un segmento no cruce a otros segmentos a través de las fuentes de alimentación. Los acondicionadores de alimentación evitan este 'cross-talk' entre múltiples segmentos que usen la misma fuente de alimentación.

El acondicionamiento de alimentación limita la alimentación máxima del segmento. Un valor típico es 400 mA. Si un dispositivo típico toma 15-20 mA, un acondicionador de alimentación podría alimentar unos 20 dispositivos y todavía tendría alguna capacidad de reserva.

La **Fig. B.17**, muestra que se requieren acondicionadores de alimentación entre la fuente de alimentación y el segmento Fieldbus.

Si una fuente de alimentación común se utiliza para alimentar el bus de campo, el suministro de energía podría absorber las señales en el cable, ya que se tratan de mantener un nivel de tensión constante. Por esta razón, una fuente de alimentación común ha de ser acondicionado para bus de campo. Esto se hace poniendo un inductor entre la fuente de alimentación y el cableado de bus de campo. El inductor permite la alimentación de CC en el cableado, pero impide que las señales entren en la fuente de alimentación. La constitución de un acondicionador de poder se muestra en la siguiente figura.

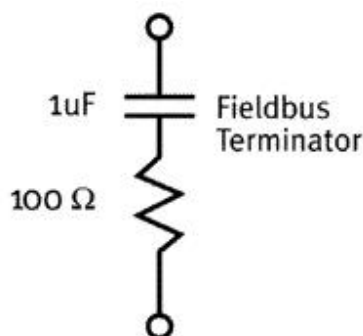


**Fig. B.18. Acondicionador de Poder.**

### ***Terminadores.***

Los terminadores son simples circuitos de resistencia-capacitor que se usan para evitar problemas como reflexión de señal desde el extremo de los hilos. Se instalan en pares, con un terminador tan cerca como sea práctico a cada extremo de un segmento Fieldbus.

Cuando una señal viaja por un cable y se encuentra con una discontinuidad, como un cable corto o abierto, que produce una reflexión. Esta porción de la señal que se hace eco de la discontinuidad viaja en la dirección opuesta. La reflexión es una forma de ruido que distorsiona la señal. Un terminador se utiliza para evitar el reflejo en los extremos de un cable de bus de campo. En la mayoría de las redes, el terminador es simplemente una resistencia cuyo valor es el mismo que la impedancia característica del cable. Dado que el cable de bus de campo también tiene el poder, una resistencia de simple no se puede utilizar debido a que usaría el poder destinados a los dispositivos. Un terminador de bus de campo tiene un capacitor en serie con la resistencia para bloquear el voltaje de CC, pero permite la señal a través de la resistencia. La constitución de un terminador se muestra en la siguiente figura.



**Fig. B.19. Terminador Fieldbus.**

Los acondicionadores de alimentación incluyen frecuentemente un terminador, eliminando la necesidad de un terminador externo separado en ese extremo del segmento.

### ***Repetidores.***

Son componentes opcionales para extender la longitud de un segmento Fieldbus o para incrementar el número de dispositivos de un segmento. Proporcionan alimentación y una señal de comunicación limpia para las partes extendidas del segmento.

Un segmento puede tener cuatro repetidores dividiendo el segmento en cinco partes. Eléctricamente, cada parte actúa como un segmento separado, pero los dispositivos se pueden comunicar entre sí como si estuvieran en el mismo segmento.

Aunque un segmento Fieldbus puede tener hasta 32 dispositivos sin repetidores, los segmentos H1 normalmente no tienen más de 12-16 dispositivos aun cuando se usan repetidores.

### ***Barreras de seguridad intrínseca.***

FF fue diseñado para soportar seguridad intrínseca, con más flexibilidad y menor costo que la seguridad intrínseca analógica tradicional.

En el mundo analógico, cada entrada y salida tiene una barrera dedicada. Pero en el mundo Fieldbus, con su cable que soporta múltiples dispositivos, una barrera puede servir para varios dispositivos. Esto es un gran ahorro en costos de barrera e instalación.

Dependiendo de las necesidades del usuario, se tiene la opción de poner varias barreras en un solo segmento Fieldbus.

Se ha explicado algunos tópicos importantes para estudiar y entender como funciona una red FOUNDATION Fieldbus. Para estudiar temas más técnicos, se recomienda consultar el curso sobre FF mencionado en la bibliografía.

## **Anexo C. Detalle de Instrumentación en Planta**

---

A continuación mencionaremos los principales instrumentos utilizados en la implementación de la planta de laboratorio. Se mencionarán datos técnicos generales y de conexión de los dispositivos recientemente adquiridos para la construcción de la planta, es decir, aquellos que se encuentren desde el dispositivo enlazador hacia abajo en la arquitectura integrada de la planta.

### **C.1. Computador.**

Se utilizará un computador disponible en planta que será la estación de control. Este cuenta con Windows XP, que soporta los softwares necesarios para configurar la red, programar las estrategias de control, y diseñar una interfaz de operación.

### **C.2. PLC Allen Bradley Control Logix 5561.**

Se utilizará un PLC disponible en planta Allen Bradley Control Logix 5561 de 7 slots como el que se muestra en la siguiente figura. Gracias a este PLC se puede realizar una integración entre dispositivos Fieldbus y otros que no lo son como por ejemplo el variador de frecuencia que activa la bomba que alimenta al sistema. Todos los dispositivos de planta acá pueden compartir un código común de programación vía RSLogix, y una interfaz de operación común vía FactoryTalk SE.



**Fig. C.1. PLC Control Logix**

### C.3. Dispositivo Enlazador Allen Bradley 1757-FFLD.

El dispositivo de vínculo (Linking Device) al igual que los dispositivos de campo fue recientemente adquirido, y crea una conexión en puente entre Ethernet y H1. Acepta HSE (High Speed Ethernet) o mensajes Ethernet/IP y los convierte al protocolo FOUNDATION Fieldbus H1. Cabe destacar que usaremos un 1757-FFLD2, lo que significa que es un dispositivo que soporta hasta 2 redes H1.

Este dispositivo enlazará el PLC y el PC con nuestros dispositivos de campo.



Fig. C.2. Enlazador 1757-FFLD

#### Conexiones.

Las conexiones H1 y de alimentación del dispositivo se pueden ver en las siguientes figuras. El terminal Ethernet se encuentra debajo del dispositivo.

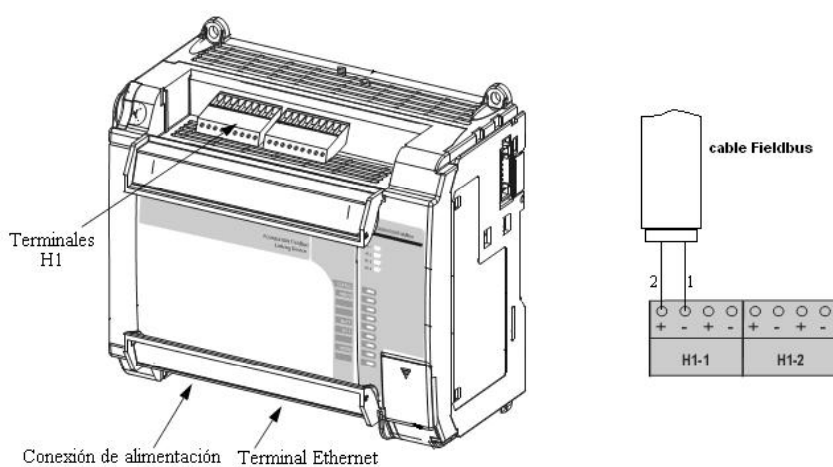
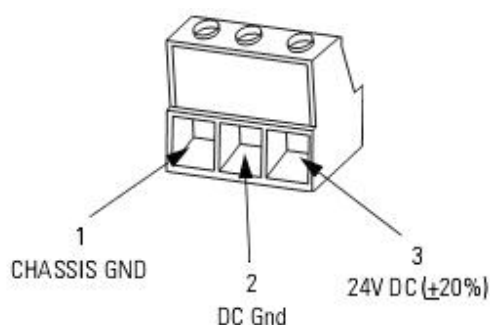


Fig. C.3. Conexión H1



**Fig. C.4. Conexión de Alimentación**

*Especificaciones Generales.*

**Tabla C.1. Especificaciones generales**

<b>Numero de segmentos H1</b>	2
<b>Máximo de dispositivos por segmento H1</b>	16 (8-10 recomendado)
<b>Máximo de dispositivos por Enlazador</b>	32
<b>Requerimientos de alimentación</b>	300 mA 24Vdc (±20%)
<b>Temperatura de proceso</b>	0° C a 60° C

#### **C.4. Sensores de Nivel Endress+Hauser Prosonic M FMU40.**

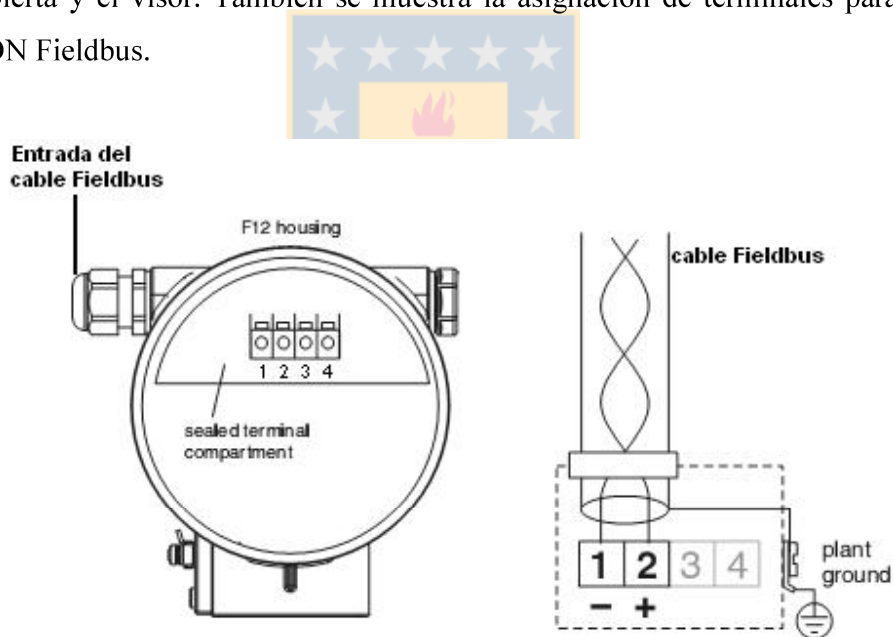
Sensor de nivel por ultrasonido. Gracias a su aplicación asistida por menús y su indicador gráfico de cuatro líneas, el equipo garantiza una puesta en marcha sencilla y un funcionamiento seguro. El transmisor compacto ultrasónico es adecuado para la medición continua de nivel de fluidos y material a granel. Está configurado para trabajar con interfaz de integración FOUNDATION Fieldbus.



**Fig. C.5. Sensor de nivel ultrasónico**

***Conexiones.***

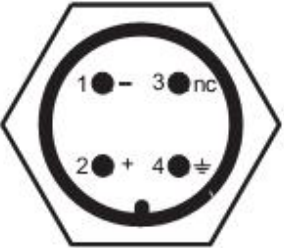
La siguiente figura muestra el compartimiento de terminales tal y como se vería luego de retirar la cubierta y el visor. También se muestra la asignación de terminales para una conexión FOUNDATION Fieldbus.



**Fig. C.6. Compartimiento de terminales del sensor de nivel y asignación de terminales**

La siguiente tabla muestra la asignación de los pines de un conector 7/8" FOUNDATION Fieldbus (FF)

**Tabla C.2. Asignación de pines de un conector FF**

	<b>Pin</b>	<b>Significado</b>
	1	FF-
	2	FF+
	3	No conectado
	4	Tierra

*Especificaciones Generales.*

**Tabla C.3. Especificaciones generales**

<b>Entradas</b>	Variable medida	La distancia D entre la membrana del sensor y la superficie del fluido es medida
	Rango máximo en líquidos	5 [m]
	Distancia de bloqueo	0.25 [m]
<b>Salidas</b>	Señal de salida	Foundation Fieldbus
	Código de señal	Manchester Bus Powered
	Velocidad de transmisión	31.25 [KBit/s]
<b>Terminales</b>	Cable de secc. transversal 0.5 a 2.5 [mm] (20 a 14 AWG)	
<b>Entrada de cable</b>	7/8" Conector Foundation Fieldbus	
<b>Voltaje</b>	9 a 32 [Vdc]	
<b>Voltaje de despegue</b>	9 [Vdc]	
<b>Corriente básica</b>	15 [mA]	
<b>Corriente de carrera</b>	≤ 15 [mA]	
<b>Corriente de error</b>	0 [mA]	
<b>Sensibilidad a polaridad</b>	No	
<b>Temperatura ambiental</b>	-40° C a 80° C	
<b>Temperatura de proceso</b>	-40° C a 80° C	
<b>Temperatura recomendada</b>	+20 ° C	
<b>Presión recomendada</b>	1013 [mbar]	

### C.5. Flujómetro Magnético Endress+Hauser PROline promag53.

La imagen siguiente muestra el flujómetro magnético a usar en planta.

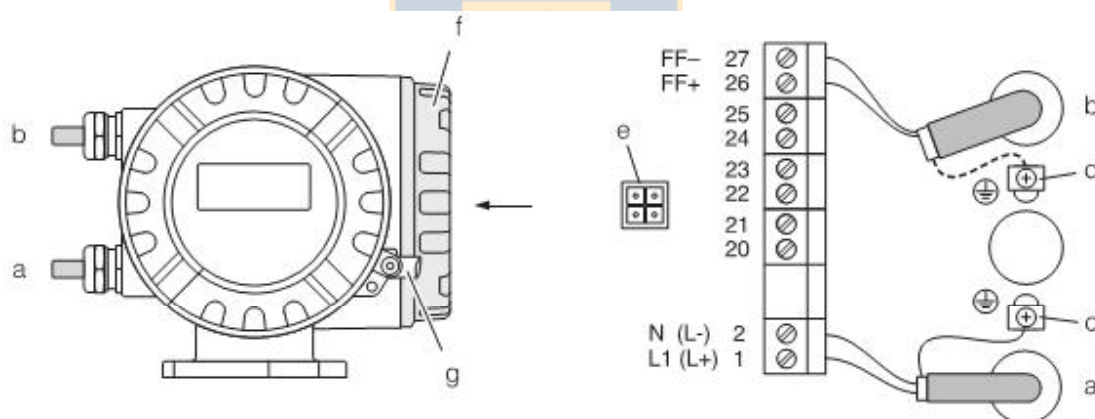




**Fig. C.7. Flujómetro magnético PROline promag 53**

**Conexiones.**

Acá se utilizará la misma **Tabla C.2** que nos muestra los pines de un conector de Foundation Fieldbus (FF). Mientras que la siguiente figura nos muestra como conectar el transmisor de flujo a FF.



**Fig. C.8. Terminales del transmisor de flujo**

El cable Foundation Fieldbus entra por (b). Se debe desatornillar la tapa (f) y se podrán ver los terminales que muestra la parte derecha de la figura anterior. Haciendo alusión a la **Tabla C.2**. El pin número uno del conector FF se conecta al terminal 27, el pin número dos se conecta al terminal 26, el pin número tres no va conectado, y el pin cuatro va a tierra. Como se observa, este dispositivo necesita alimentación independiente, la cual entra por (a) y se conecta a los terminales 1 y 2. Finalmente se debe atornillar firmemente la tapa para cerrar el transmisor.

*Especificaciones generales.***Tabla C.4. Especificaciones generales**

<b>Entradas</b>	Variable medida	Tasa de flujo (proporcional al voltaje inducido)
	Rango de medición	Típicamente $v = 0.01$ a $10$ [m/s]
	Rango de flujo operable	Sobre 1000:1
<b>Salidas</b>	Tipo de capa física	Interfaz Fieldbus IEC 61158-2
	Corresponde a un dispositivo del tipo 112 FF: -tipo 112: estándar de transferencia de datos ( $\pm 9$ [mA]) Con protección de polaridad integral	
	Señal de alarma	Mensajes de estado por especificación FF
	Corriente de inicio	Menos que la corriente básica
	Corriente básica	12 [mA]
	Corriente de falla	0 [mA]
	Voltaje de suministro FF permisible	9 a 32[Vdc]
	Velocidad de transmisión de datos	31.25 [KBit/s]
	Código de la señal	Manchester II
	<b>Alimentación</b>	Voltaje de alimentación
<b>Condiciones Operación</b>	Temperatura Ambiente	-20 a 60 [°C]

**C.6. Válvulas de Control FISHER DVC5010f.**

Los controladores digitales de válvula FIELDVUE de las series DVC5000 son instrumentos neumáticos accionados por corriente, para establecer una comunicación, y que operan a base de un microprocesador. El controlador digital de válvula de la serie DVC5000f que utiliza el protocolo para buses de campo FOUNDATION Fieldbus facilita el acceso a datos críticos para la operación del proceso. La comunicación es hecha a través de un computador personal. El controlador que se utilizará es del tipo DVC 5010f, utilizado para el montaje en actuadores con vástago corredizo. Cabe mencionar que el controlador ya se encuentra conectado al actuador, como muestra la figura siguiente.

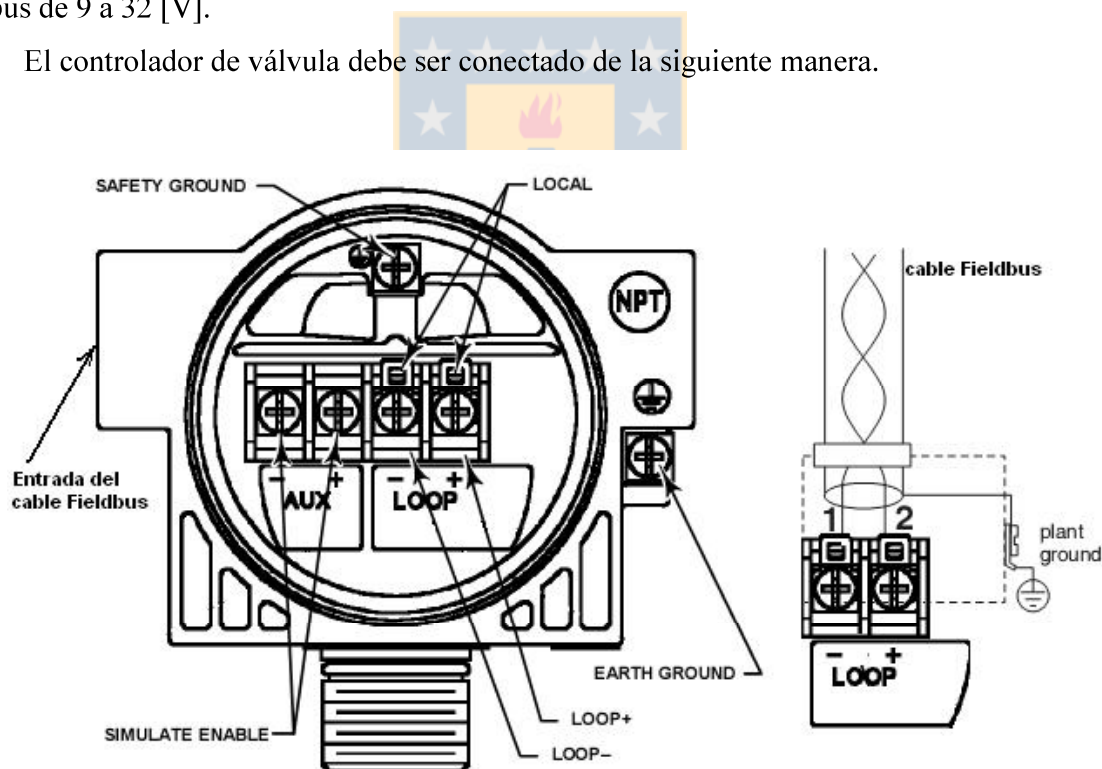


**Fig. C.9. Válvula de Control FISHER DVC5010f**

**Conexiones.**

El controlador digital de válvula es alimentado sobre el bus desde una fuente de poder fieldbus de 9 a 32 [V].

El controlador de válvula debe ser conectado de la siguiente manera.



**Fig. C.10. Caja de Terminales del controlador de válvulas digital DVC5000f**

1. Remover la tapa de la caja de terminales.
2. Llevar el cableado Fieldbus dentro de la caja de terminales.

3. El instrumento no es sensible a polaridad. Conectar un cable desde el sistema de control de salida de la tarjeta a uno de los terminales de tornillo LOOP en la caja de terminales. Conectar el otro cable desde el sistema de control de salida de la tarjeta en el otro terminal de tornillo LOOP en la caja de terminales.
4. Como se muestra en la **Fig. C.10**, dos terminales de tierra están disponibles para conectar una tierra de seguridad, una tierra, o drenar el cable. Estos terminales de tierra son eléctricamente idénticos.
5. Tapar la caja de terminales.

*Especificaciones generales.*

**Tabla C.5. Especificaciones Generales**

<b>Presión de Alimentación</b>	Mínima y recomendada	0.3 bar superior a las exigencias máximas del actuador
	Máximo	6.9 bar
<b>Señal de salida</b>	Señal neumática	Hasta 95% de la presión de alimentación
	Variación mínima	0.4 bar
	Variación máxima	6.2 bar
	Acción	Directa
<b>Carrera de la válvula</b>	Válvulas de vástago corredizo	Hasta 102 mm
<b>Consumo estable de aire</b>	Con 1.4 bar de presión de alimentación: menos de $0.3 m^3$ (normal)/h	
	Con 4.1 bar de presión de alimentación: menos de $0.6 m^3$ (normal)/h	
<b>Capacidad máxima de salida</b>	Con 1.4 bar de presión de alimentación: menos de $7.6 m^3$ (normal)/h	
	Con 4.1 bar de presión de alimentación: menos de $17.6 m^3$ (normal)/h	
<b>Linearidad independiente</b>	0.5% de la variación de salida	
<b>Temperatura ambiente</b>	Desde $-40^{\circ} C$ hasta $80^{\circ} C$	
<b>Corriente necesaria</b>	Voltaje mínimo	9 [Vdc]
	Voltaje máximo	32 [Vdc]
	Intensidad necesaria	26 [mA]
	Protección en caso de inversión de polaridad	Dispositivo no sensible a polaridad.
<b>Protocolo de comunicación</b>	Código Manchester conforme a las especificaciones IEC 1158-2 e ISA 50.02	

## C.7. Variador de Frecuencia Danfoss VLT 2800.

Se utilizará este variador disponible en planta para que reciba señales del controlador a modo de ir variando la velocidad de la bomba que alimenta el sistema, su configuración es simple y se realiza en el mismo instrumento a través de un menú.



Fig. C.11. Variador de Frecuencia Danfoss VLT 2800

### Conexiones.

A continuación vemos las conexiones tanto eléctricas como de control que se realizan.

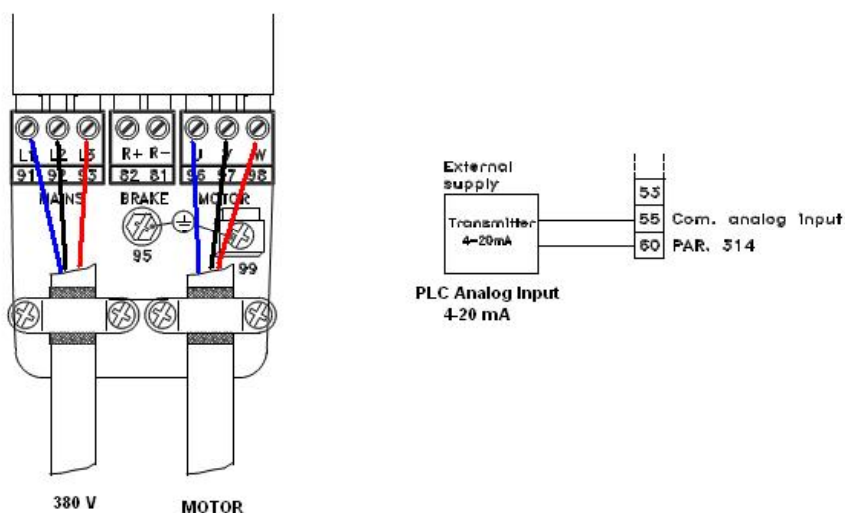


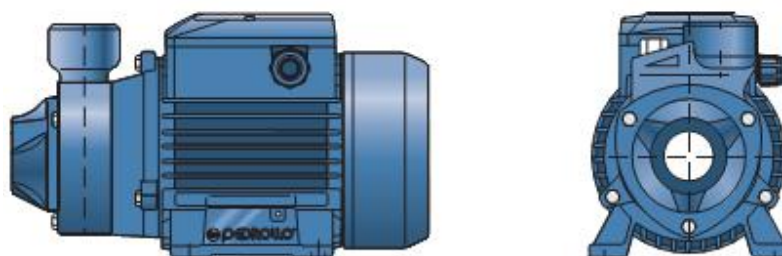
Fig. C.12. Conexiones del VLT 2800

*Especificaciones generales.***Tabla C.6. Especificaciones Generales**

<b>Tensión de alimentación (L1 L2 L3)</b>	3 x 380/480 [Vac] $\pm$ 10%
<b>Frecuencia de alimentaci3n</b>	50/60 [Hz]
<b>M3ximo valor de corto circuito</b>	100,000 [A]
<b>Salida de Voltaje (U V W)</b>	0 a 100% de la tensi3n de alimentaci3n
<b>Salida de frecuencia</b>	1-1000 [Hz]
<b>Tensi3n nominal del motor</b>	380/480 [Vac]
<b>Frecuencia nominal del motor</b>	50/60 [Hz]
<b>Numero de Entradas An3logas de Corriente</b>	1, terminal 60
<b>Nivel de corriente (AI)</b>	4-20 [mA], m3x 30mA

**C.8. Bomba PEDROLLO PK 60.**

Es una bomba con rodete perif3rico que est3 directamente acoplada a un motor el3ctrico PEDROLLO. Esta bomba ir3 conectada directamente a la red el3ctrica de 380 [V]. Esta bomba se utilizar3 para llevar el flujo de alimentaci3n a los estanques uno y dos, es decir, las perturbaciones.

**Fig. C.13. Bomba PEDROLLO PK 60***Especificaciones generales.***Tabla C.7. Especificaciones t3cnicas**

<b>Tipo de alimentaci3n</b>	Trif3sica 230/400 [V]-50[Hz]
<b>Potencia</b>	0.37 [kW]
<b>Caudal</b>	0 – 2.4 [ $m^3 / h$ ]
<b>Altura manom3trica total</b>	40 – 5 [m]
<b>Peso</b>	5.3 [kg]

### C.9. Válvulas manuales.

Se usarán válvulas manuales de tipo PVC como muestra la siguiente figura.



**Fig. C.14. Válvula PVC**

### C.10. Estanques Plásticos.

Se utilizarán estanques plásticos como el que se muestra a continuación.



**Fig. C.15. Estanque plástico**

Las dimensiones de este tambor son las siguientes.

**Tabla C.8. Dimensiones del tambor**

<b>Alto</b>	90 [cm]
<b>Diámetro</b>	45 [cm]
<b>Capacidad</b>	143139 [cc]

A continuación se especifica el Hardware de red que se utilizó en la planta.

## C.11. Acondicionador de Poder MTL5995.

Es una unidad acondicionadora diseñada para usarse en sistemas FOUNDATION Fieldbus H1. Para cumplir con los estándares Fieldbus, este acondicionador trae integrado un terminador switcheable, el cual al ser activado, elimina la necesidad de instalar un terminador en este extremo de la red.

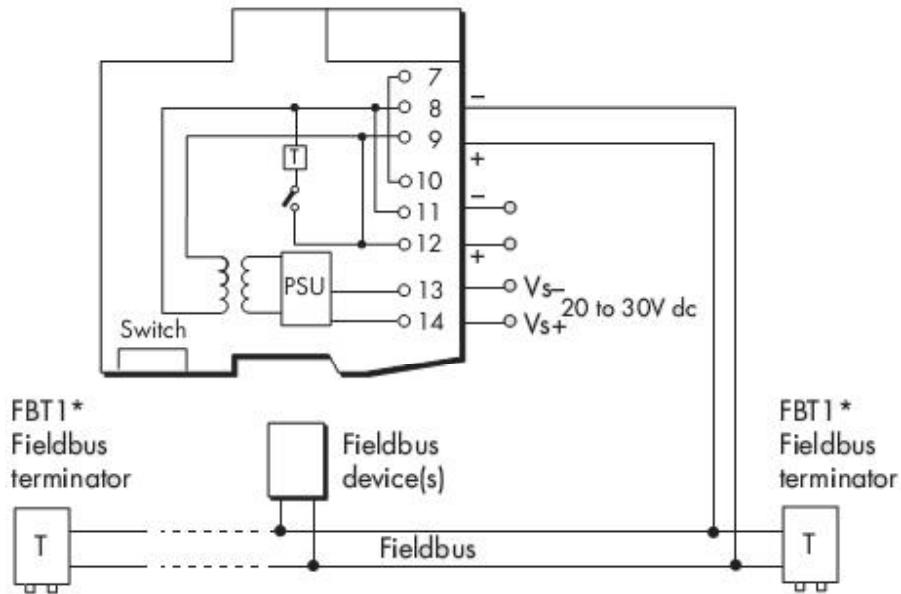
Su instalación es muy simple en un riel DIN.



Fig. C.16. Acondicionador de Poder MTL5995

Las conexiones del acondicionador de poder se muestran a continuación.





**Fig. C.17. Conexiones del Acondicionador**

La siguiente tabla muestra algunas especificaciones.

**Tabla C.9. Especificaciones generales**

<b>Entradas</b>	Voltaje de alimentación	20-30 Vdc
	Requerimiento de poder	420 mA a 24V
	Temperatura ambiente	-20-60 °C operando
<b>Salidas</b>	Voltaje	19 V $\pm$ 2%
	Corriente	0-350 mA
	Límite de corriente	>370 mA
	Terminador interno	Seleccionado por switch

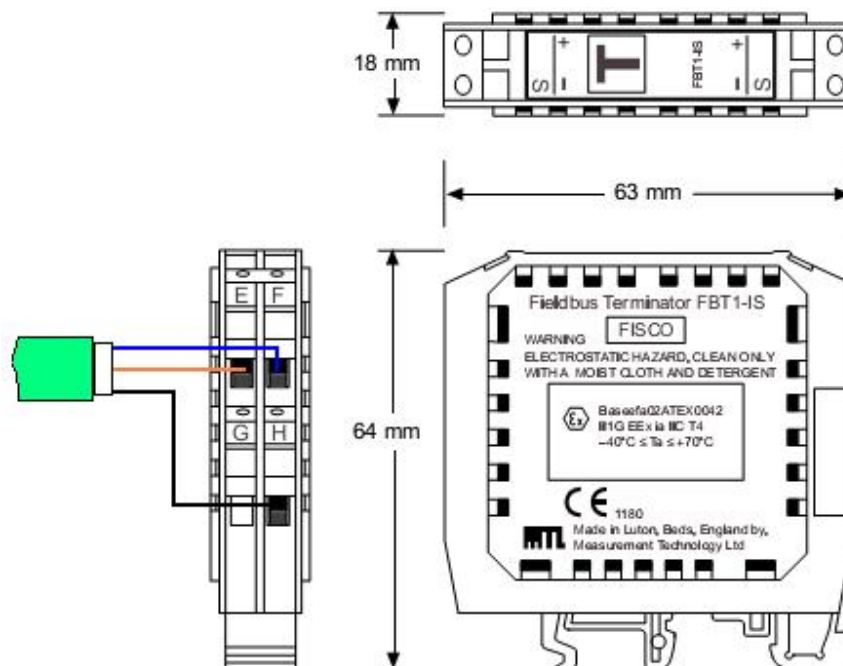
## C.12. Terminador MTL FBT-1.

Para cumplir con el estándar Fieldbus, la red debe ser terminada en ambos extremos. Como se mencionó, en un extremo se tiene un terminador que viene integrado en al acondicionador de poder, entonces en el otro extremo de la red, un FBT-1 se utilizará como terminador



**Fig. C.18. Terminador MTL FBT-1**

Las conexiones del terminador se muestran a continuación.



**Fig. C.19. Conexiones del Terminador**

La siguiente tabla muestra algunas especificaciones.

**Tabla C.10. Especificaciones generales**

<b>Temperatura ambiente</b>	-40-70 °C operando	
<b>Características Electricas</b>	R mínima	99Ω
	C máxima	1.1μF

Para configurar la red, programar estrategias de control, y diseñar interfaces de operación, varios software son utilizados. A continuación se mencionan los aplicados en este proyecto.

### **C.13. RSLinx Classic.**

RSLinx Classic <sup>TM</sup> es un servidor de comunicación completo que proporciona conectividad de dispositivos de planta para una amplia variedad de aplicaciones Rockwell Software, tales como RSLogix <sup>TM</sup> 5/500/5000, RSView32, FactoryTalk <sup>®</sup> View Site Edition y FactoryTalk Transaction Manager. Además, varios interfaces abiertas se proporcionan para HMI terceros, recopilación de datos, paquetes de análisis, y software cliente-aplicación personalizados. RSLinx Classic puede soportar múltiples aplicaciones de software simultáneamente, comunicando a una variedad de dispositivos en muchas redes diferentes.

### **C.14. RSFieldbus.**

El Software RSFieldbus es utilizado para configurar los dispositivos y la red FOUNDATION Fieldbus. En éste software se definen los bloques lógicos que utilizará RSLogix para programar las estrategias de control.

Algunas características de este software son:

- Configuración de red Fieldbus con dispositivos
- Creación y edición de estrategias de control vía bloques de función
- Integración de datos Fieldbus en softwares ControlLogix vía bloques lógicos.
- Descarga de configuración.
- Monitoreo y edición de parámetros Fieldbus Online.
- Monitoreo de enlaces de estrategia de control Online.
- Hace disponibles los datos Fieldbus vía servidor OPC.

### **C.15. RSLogix 5000.**

El Software RSlogix 5000 está diseñado para trabajar con las plataformas de Control Logix5000. Este software es compatible con IEC 61131-3, e incluye: editor ladder, editor de texto estructurado, diagramas de bloques de función, y editores de gráficos de funciones secuenciales para poder desarrollar programas de aplicación. Este producto ha sido desarrollado para operar en sistema Windows.

## C.16. Factory Talk.

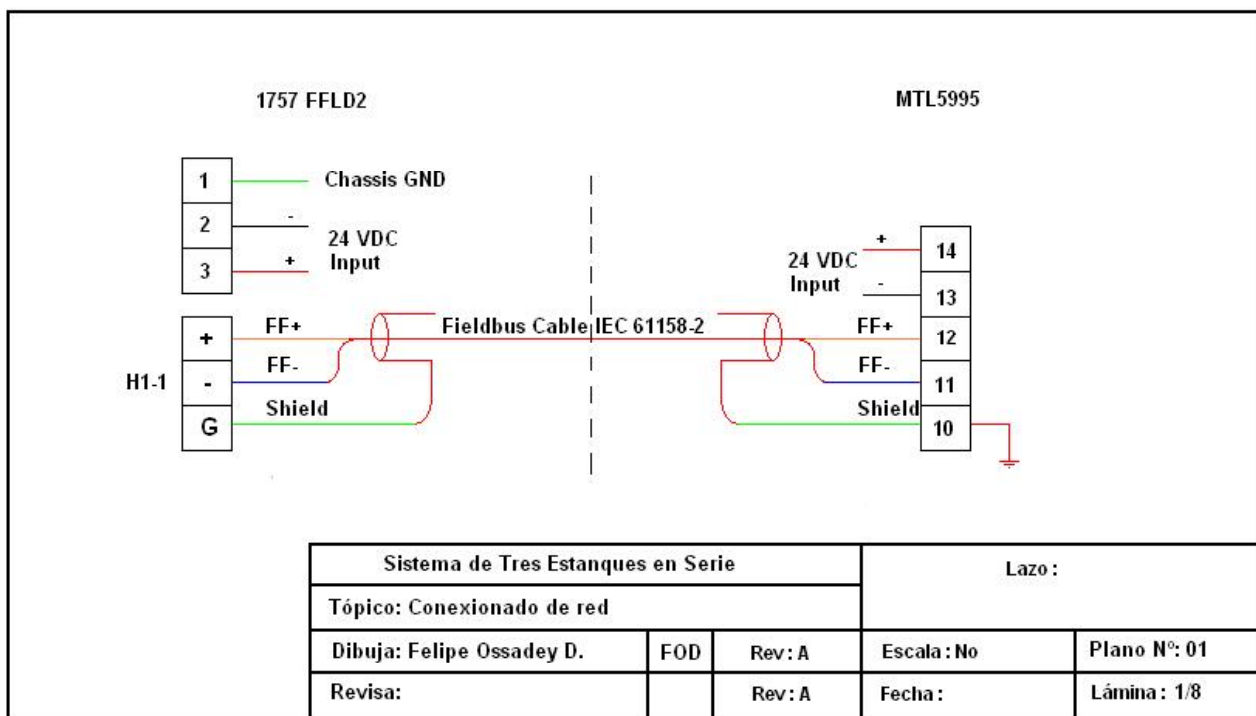
Para diseñar la Interfaz de operación se utilizará el software FactoryTalk. El cual es un conjunto de producción que consta de seis disciplinas de producción diferentes, cada una con su propio juego completo de aplicaciones. La principal de éstas que se utilizará es Factory Talk View Studio.

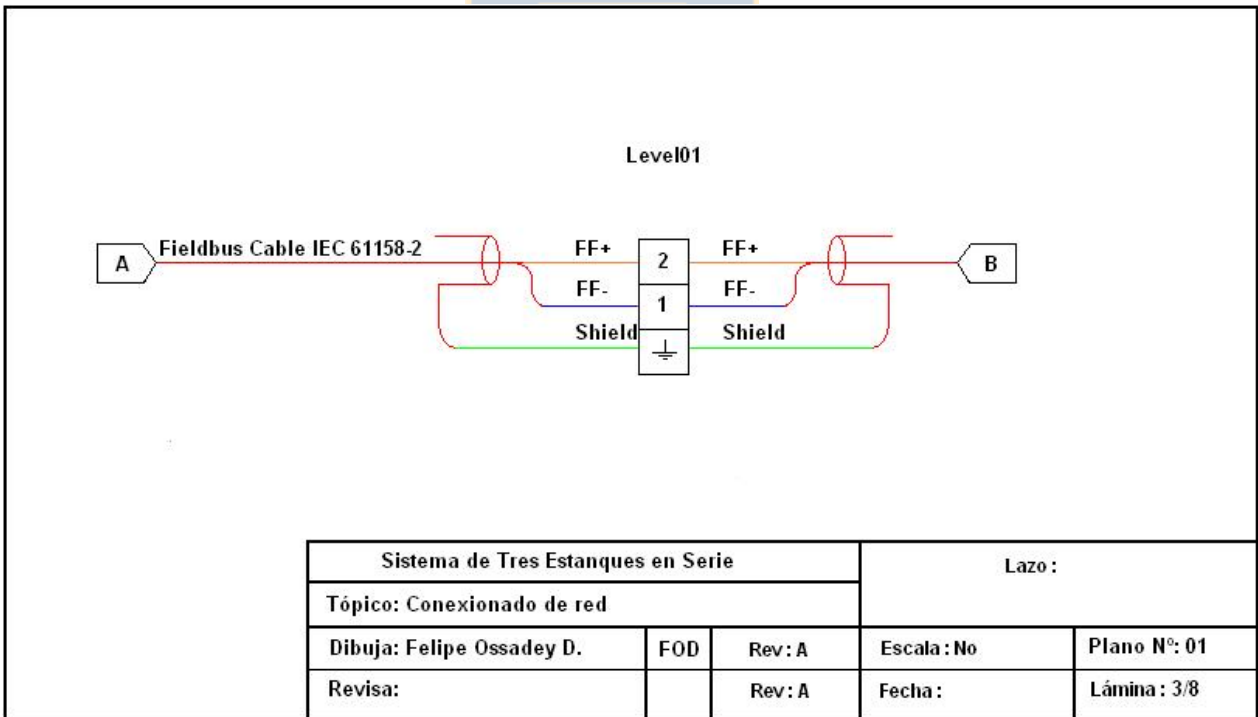
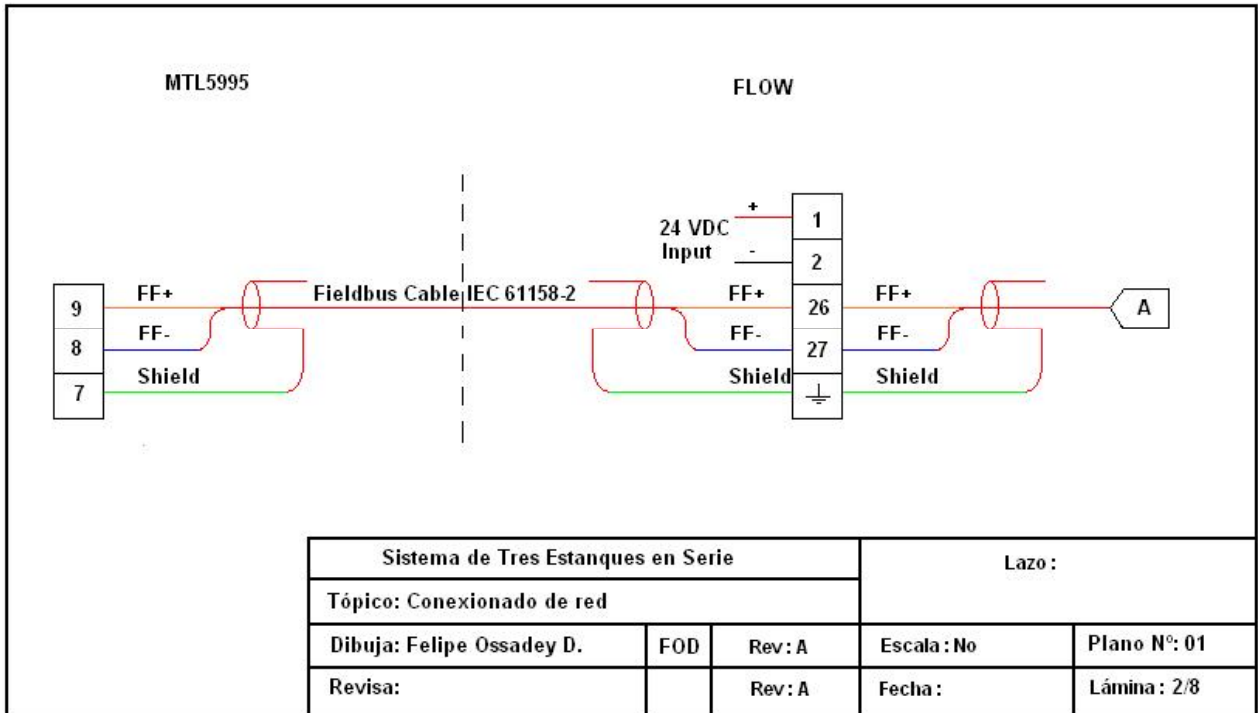


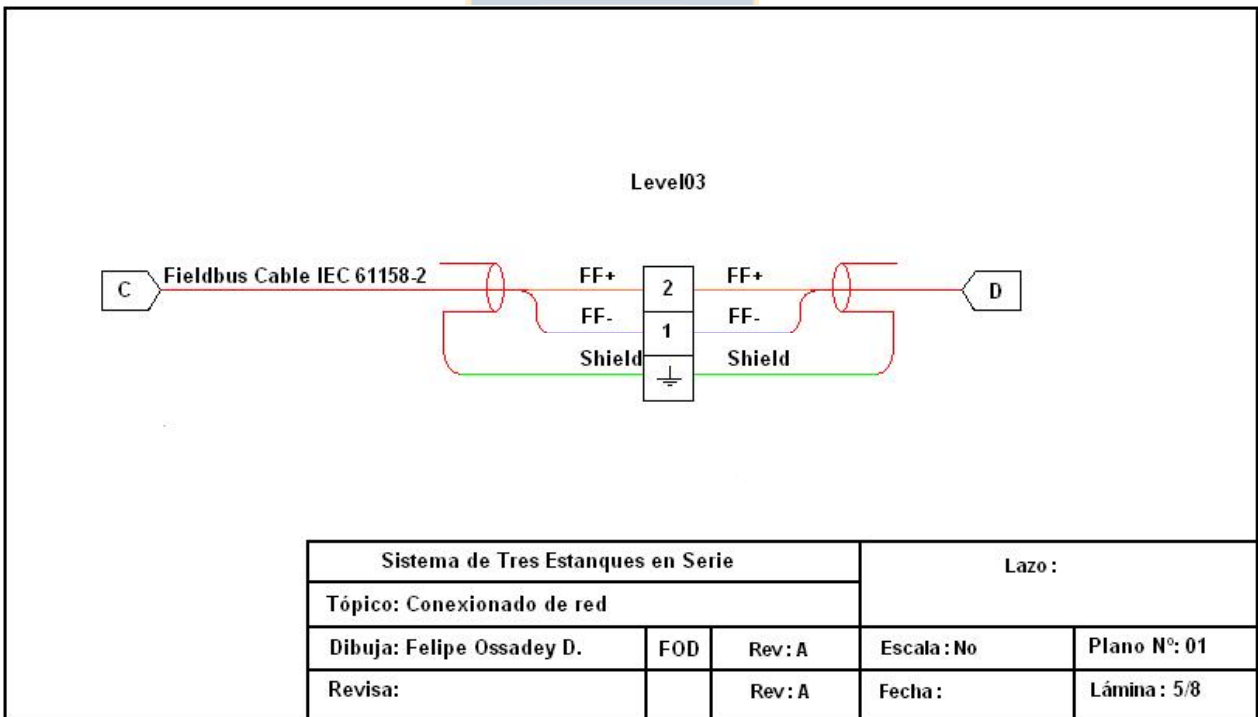
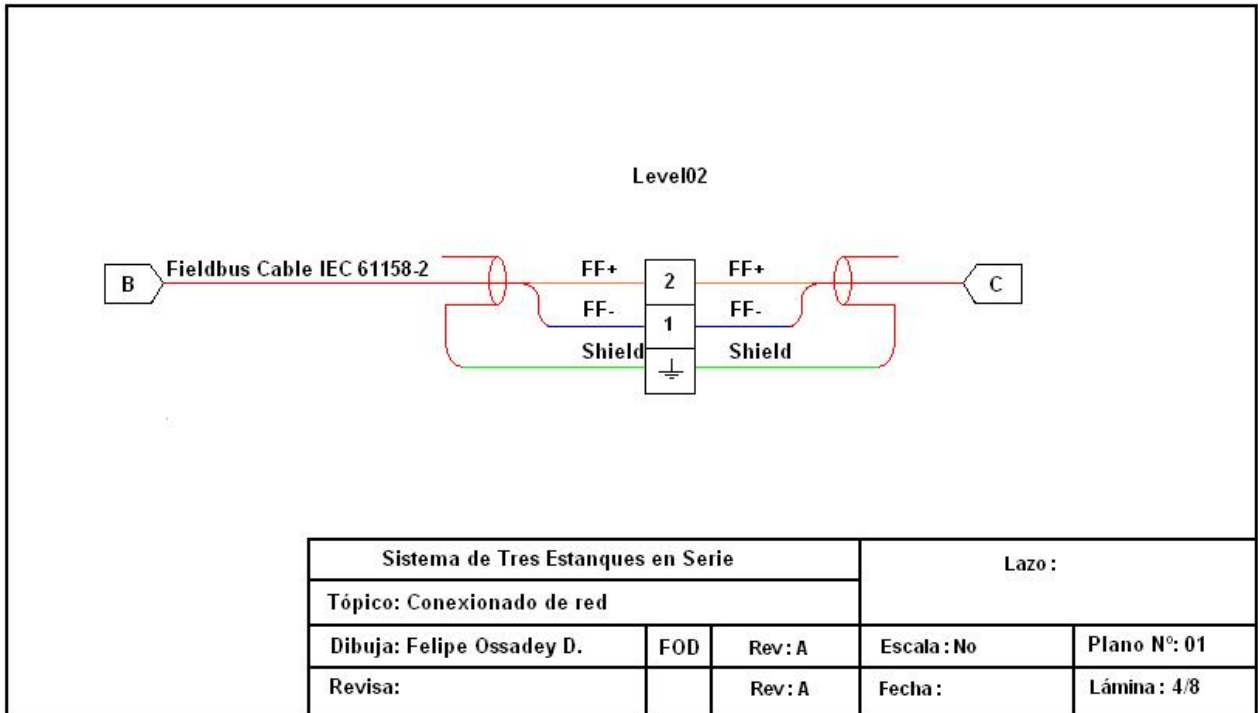
## Anexo D. Diagramas de Conexión

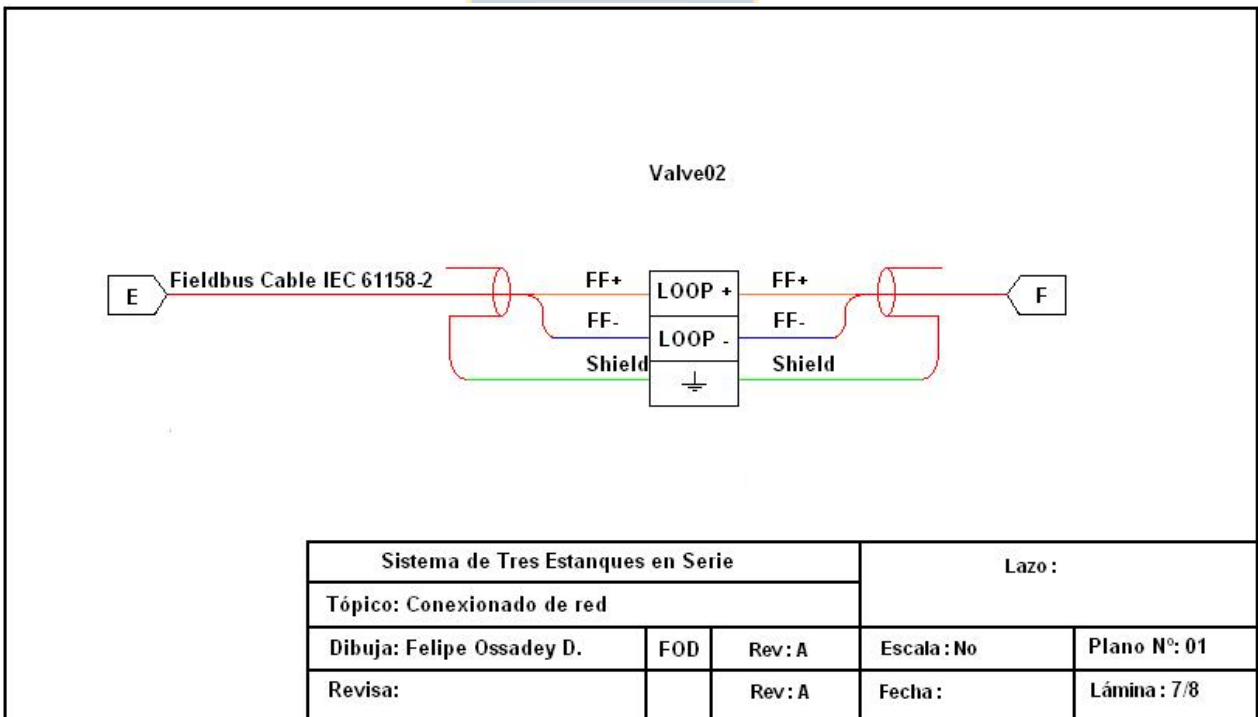
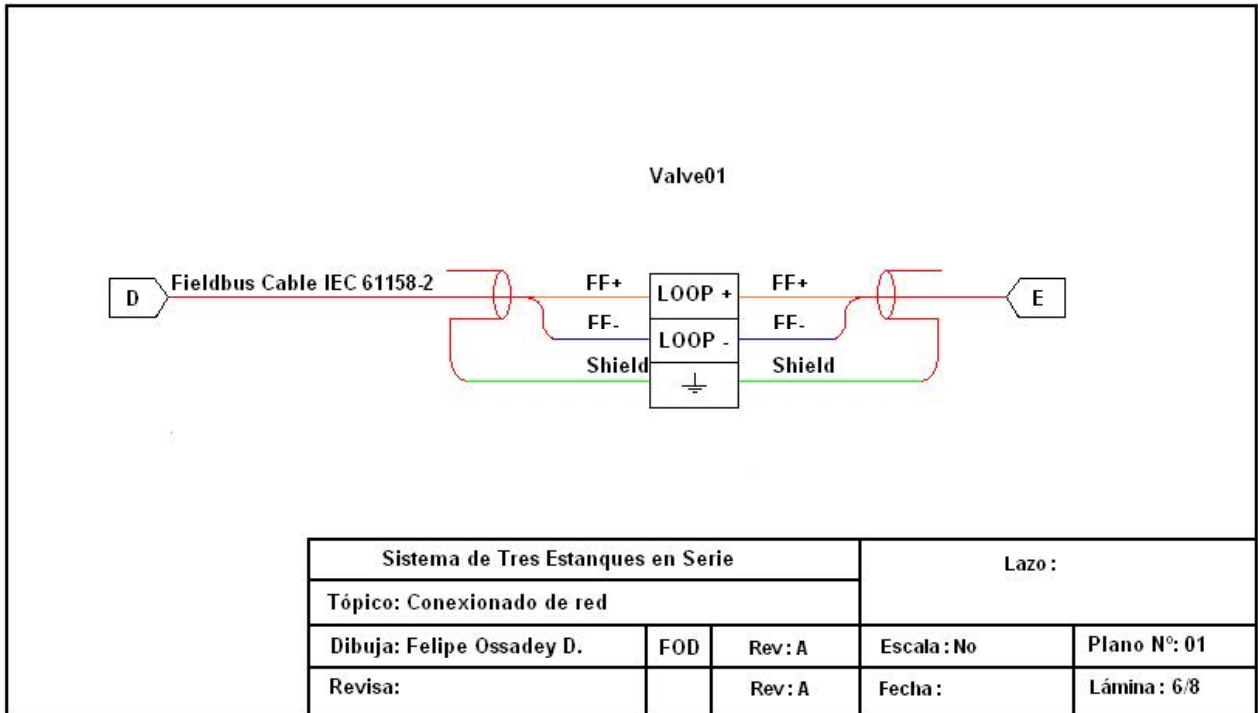
### D.1. Conexiones de campo.

A continuación se muestran los diagramas de conexión para toda la parte Fieldbus de la planta, ya que desde el dispositivo enlazador hacia arriba en la arquitectura, las conexiones ya se encontraban hechas.











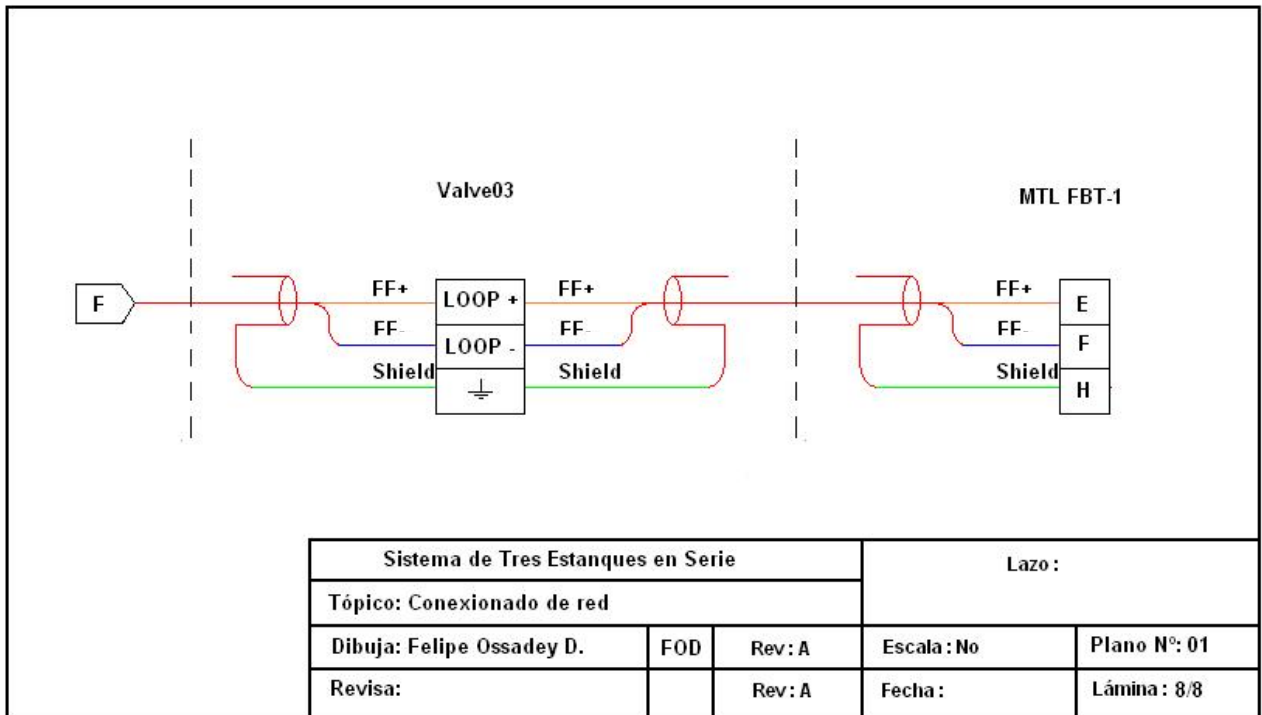
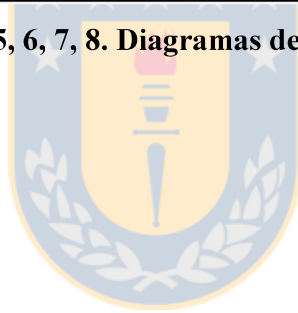


Fig. D. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Diagramas de Conexión de Campo



## **Anexo E. Configuración e Integración de la Red**

---

En esta sección se hará un resumen de los pasos seguidos en la configuración de nuestra red Fieldbus una vez que toda la parte Hardware ya ha sido conectada.

Como el PLC ControlLogix ya se encuentra instalado y configurado, nos queda por configurar desde nuestro dispositivo enlazador 1757-FFLD hasta nuestros dispositivos de campo.

En primer lugar se consulta el manual *1757-in021* de Rockwell para configurar el dispositivo enlazador 1757-FFLD, primero se le asigna una dirección IP, luego se instala el archivo EDS (Electronic Data Sheet) los cuales pueden ser cargados desde RSLinx para configurar los parámetros de la red.

Luego se consultaron el *rsfbus-um001* y *rsfbus-at001* de Rockwell que son manual de usuario y de aplicaciones respectivamente. Específicamente se siguió de ambos manuales el capítulo 4, que nos muestra cómo crear un nuevo proyecto de RSFieldbus que funcione integrado con un nuevo proyecto de RSLogix 5000.

Primero hay que crear un nuevo proyecto en RSFieldbus, los pasos son:

- Definir el servidor OPC y su ubicación.
- Crear una nueva red HSE.
- Definir el host HSE (PC), y definirlo como maestro de enlace.
- Crear un nuevo bridge (1757-FFLD).
- Crear una nueva red Fieldbus H1.
- Agregar los dispositivos de campo.

Después se configura la comunicación:

- Iniciar la comunicación y asociar el enlazador con su 'device ID'.
- Chequear la 'Live List'.
- Asociar los dispositivos con sus 'device ID'.
- Asignar los Tags.

Después se añaden los bloques de función:

- Añadir un Bloque de recursos y un bloque lógico al FFLD.

- Añadir los bloques de función a los dispositivos de campo.

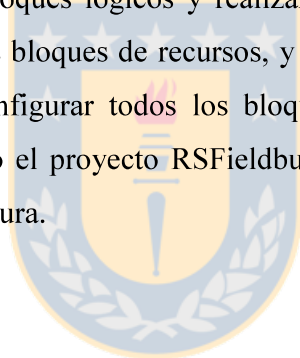
Luego se crea una estrategia de Control:

- Crear una nueva área de trabajo; añadiendo una nueva 'Process Cell', un nuevo 'Control Module' y una nueva 'Strategy'.
- Añadir los bloques de función a la ventana de la nueva estrategia.
- Crear los enlaces entre los bloques.

Luego se debe hacer el 'Download' de nuestra nueva configuración:

- Exportar los tags.
- Realizar el 'Download'.

Luego de tener todos los bloques lógicos y realizar el download, se puede configurar los dispositivos de campo mediante sus bloques de recursos, y en el caso de las válvulas en su bloque transductor. También se deben configurar todos los bloques AI (Analog Input) y AO (Analog Output). Una vez que se tiene todo el proyecto RSFieldbus configurado y en línea, se tiene algo como lo que muestra la siguiente figura.



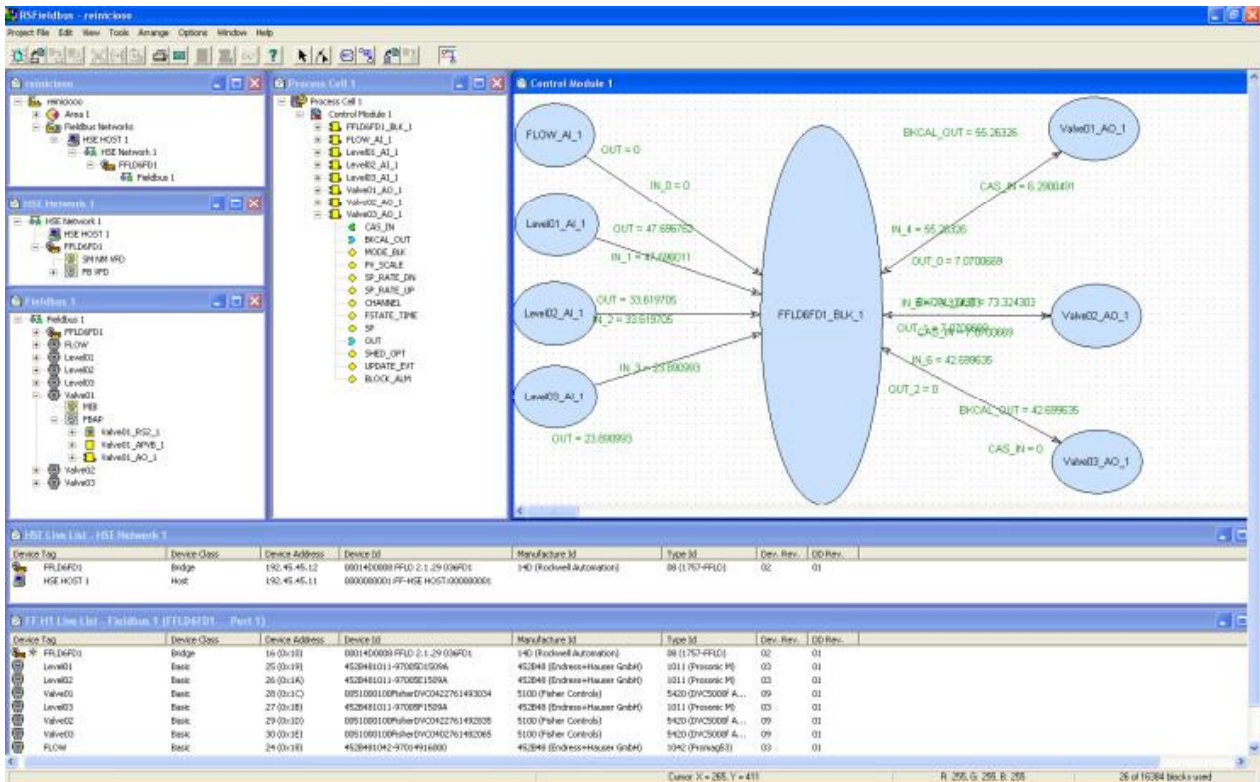


Fig. E.1. RSFieldbus, ventana principal

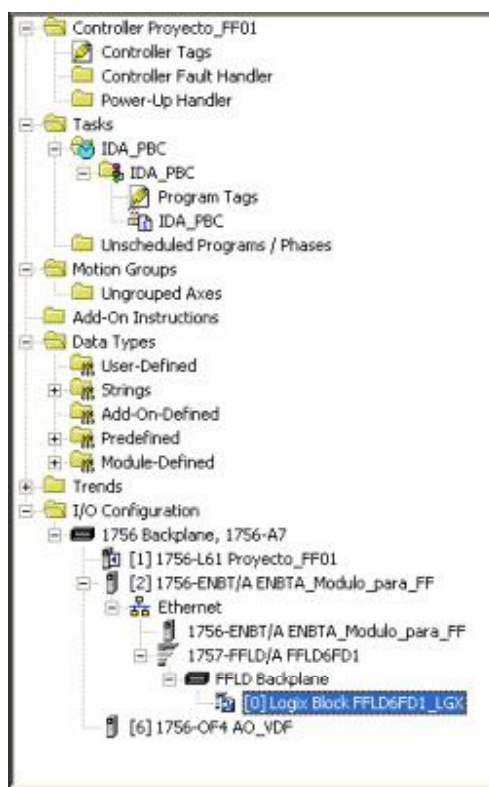
La ventana superior de la derecha muestra la estrategia que hemos llamado ‘Control Module 1’, en ella se ve un bloque lógico grande que corresponde al dispositivo enlazador que funciona como nexo entre los dispositivos de campo y el programa RSLogix 5000, los demás bloques mas pequeños corresponden a los AI’s y AO’s de los siete dispositivos de campo los cuales mediante el bloque lógico del 1757-FFLD reciben y envían señales al programa creado en RSLogix 5000.

Cuando ya hemos configurado la parte Fieldbus, hemos de crear un proyecto en RSLogix 5000. Para esto se consultó además el manual *1757-um010 Capítulo 1* de Rockwell.

Primero, para crear una estrategia de control en ControlLogix se realizan los siguientes pasos:

- Correr RSLogix 5000 y crear un nuevo proyecto identificando al controlador apropiado.
- Crear un programa.
- Crear una rutina, que en nuestro caso será del tipo texto estructurado.

Luego se añade el Módulo de Ethernet (bridge) en la configuración I/O seleccionando el tipo de módulo apropiado. Una vez agregado el puente Ethernet, se puede agregar desde éste el dispositivo enlazador 1757-FFLD. Una vez agregado el FFLD se puede añadir el bloque lógico que nos comunicará con la red Fieldbus, hay que tener en cuenta que deben ser compatibles los valores de slot para el bloque lógico en el RSLogix y en el RSFieldbus. Una vez realizado esto, uno puede encontrar fácilmente las entradas y salidas de nuestros dispositivos de campo desde el programa creado mediante la opción 'browse tags'. Cuando el proyecto en RSLogix está listo, la pantalla organizadora del controlador ubicada a la izquierda se ve como sigue.



**Fig. E.2. RSLogix, ventana organizadora del proyecto**

En la figura anterior se observa la configuración I/O, el bridge Ethernet, el dispositivo enlazador 1757-FFLD, y el bloque lógico que nos comunica con los dispositivos de campo. También se observa que se ha agregado aparte un módulo AO para el variador de frecuencia que no es Fieldbus, lo que es evidencia de la interoperabilidad que nos entregan los softwares de Rockwell Automation y los dispositivos de campo.

Es importante aclarar que en este proyecto no se configuraron estrategias de control distribuidas utilizando capacidades Fieldbus. Todas las lógicas de control residen en el procesador principal de Control Logix.



## Anexo F. Interfaz de Operación

Después de programar el control de nuestro sistema mediante RSLogix5000, diseñamos una interfaz de operación que nos permita llevar el control a nivel de usuario y de manera más fácil. Ésta se diseña mediante el software FactoryTalk SiteEdition, y utilizando las herramientas de RSLinx como es el servidor OPC.

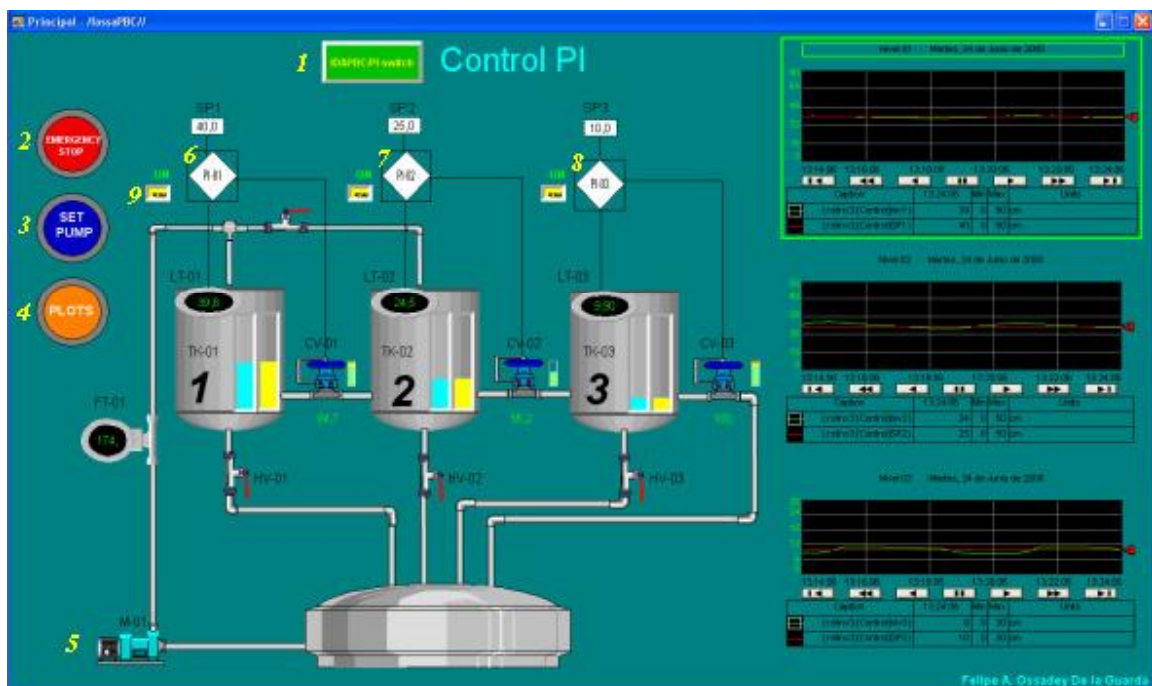


Fig. F. 1. Interfaz de operación, ventana principal /Control PI

La Fig. F. 1 nos muestra la pantalla principal de la interfaz, esta cuenta con una serie de opciones:

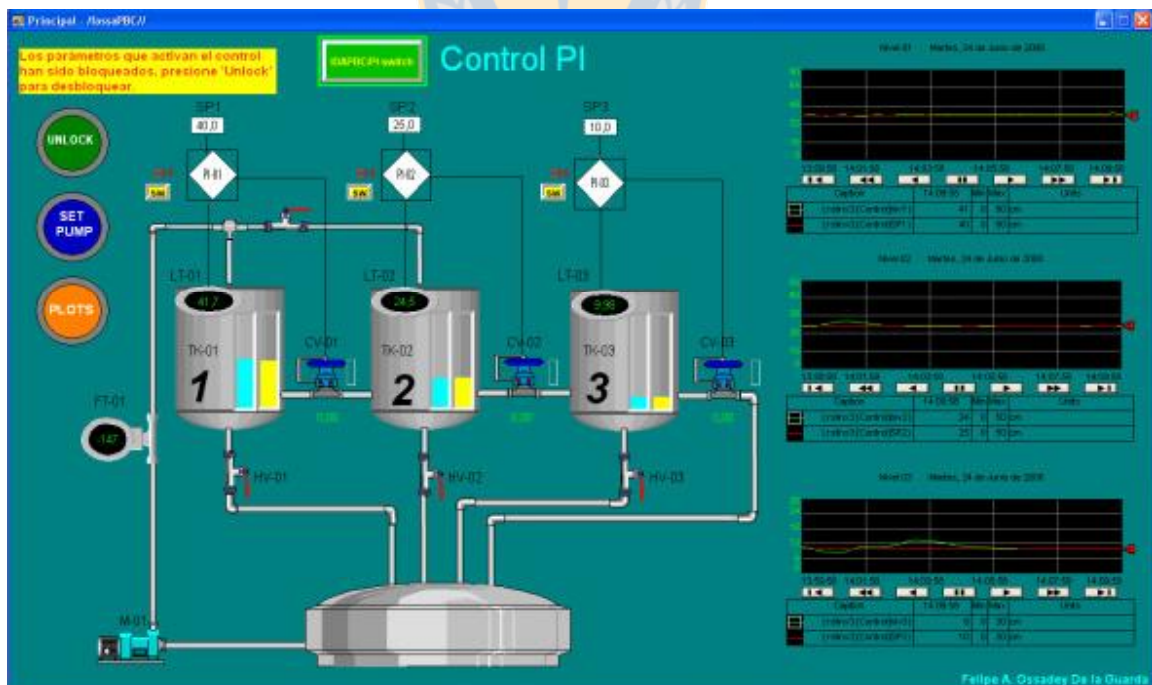
1. Botón para seleccionar el control PI o el IDA-PBC.
2. Botón para parada de emergencia.
3. Botón que muestra la pantalla de configuración de la bomba.
4. Botón que muestra la pantalla de gráficos del sistema.
5. Figura de la bomba, que al presionarse toma la misma acción de 3.
6. Caja de control que muestra la pantalla para configurar el control del primer estanque.
7. Caja de control que muestra la pantalla para configurar el control del segundo estanque.



8. Caja de control que muestra la pantalla para configurar el control del tercer estanque.
9. Botón que permite inicializar la válvula de control correspondiente a la respectiva caja de control, para las válvulas 2 y 3 existe el mismo botón.

Además esta pantalla muestra las lecturas de los sensores de nivel, la lectura del sensor de flujo, la apertura de las válvulas, los set point y su respectiva variable de proceso mediante barras puestas sobre cada uno de los estanques de la pantalla. También permite cambiar el set point directamente en un enlace que se encuentra encima de las cajas de control. A la derecha de la pantalla están los gráficos de las principales variables de proceso, las que son los 3 niveles y su set point, si se desea ver más gráficos hay que presionar el botón 'PLOTS'.

La **Fig. F. 2** nos muestra que es lo que sucede cuando se presiona el botón de parada de emergencia. Se interrumpe en seguida el control del proceso, se apaga la bomba, se cierran las válvulas y se bloquean a modo que no reciban ninguna señal tal y como se ve a la izquierda de cada caja de control ('OFF'). Aparece un mensaje en la esquina superior izquierda que indica que para reestablecer un control en el proceso se debe presionar el botón 'UNLOCK' que en este escenario reemplaza al botón de parada de emergencia.



**Fig. F. 2. Interfaz de operación, ventana principal /parada de emergencia**



Cuando se presiona el botón ‘SET PUMP’ se despliega la pantalla que muestra la **Fig F. 3**. Esta pantalla permite configurar la perturbación del sistema que es la entrada de agua, está la opción de hacerla constante y la opción de añadirle una componente senoidal configurándole frecuencia y amplitud deseadas. En esta misma pantalla se sintonizan los parámetros ocupados para predecir la perturbación, y por último esta pantalla permite escoger entre llevar a cabo el control mediante la lectura del sensor de flujo de entrada, o de llevarlo a cabo mediante la predicción de la perturbación. Además la pantalla muestra el gráfico de la perturbación leída y la perturbación predicha en el tiempo.



**Fig. F. 3. Interfaz de operación, ventana de configuración de perturbación**

Cuando se presiona el botón ‘PLOTS’ se despliega la pantalla que muestra la **Fig F. 4**. Acá es posible hacer un seguimiento de los tres niveles, de la perturbación, de las aperturas de las válvulas, y de una estimación del flujo que ocurre entre estanques.

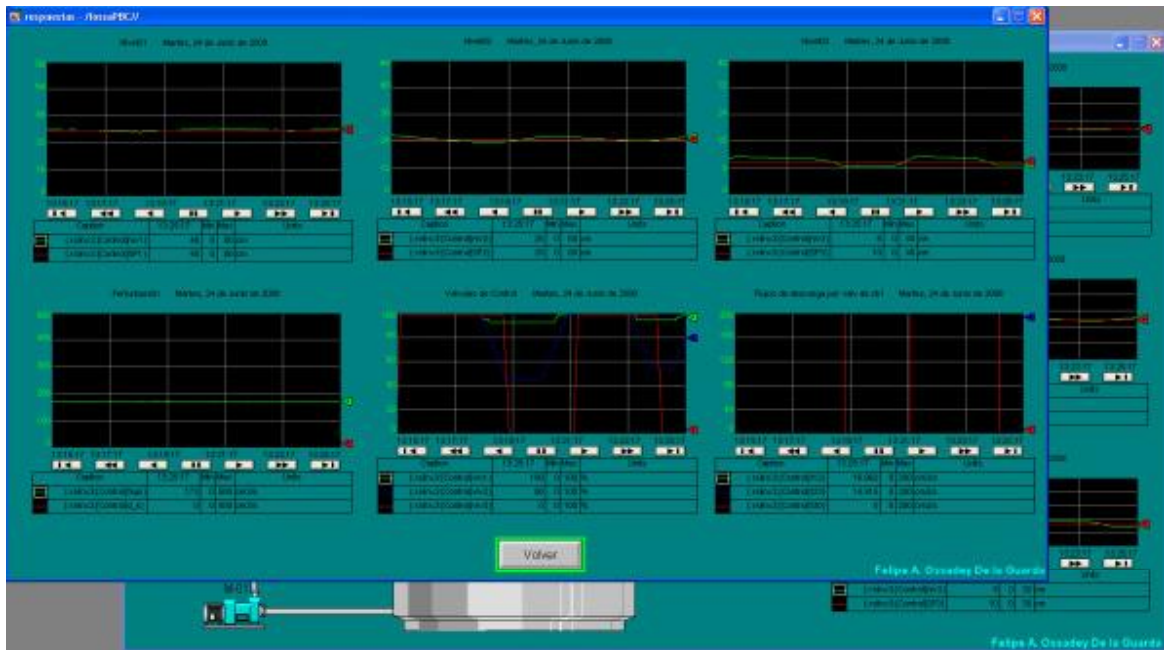


Fig. F. 4. Interfaz de operación, ventana de gráficos

En el control PI, si se presionan las cajas de control lo que aparece son las siguientes minipantallas. Cada una de éstas muestra la variable de proceso y su set point, también muestra la salida de control. Además permite sintonizar el control PI y ajustar otros parámetros opcionales.

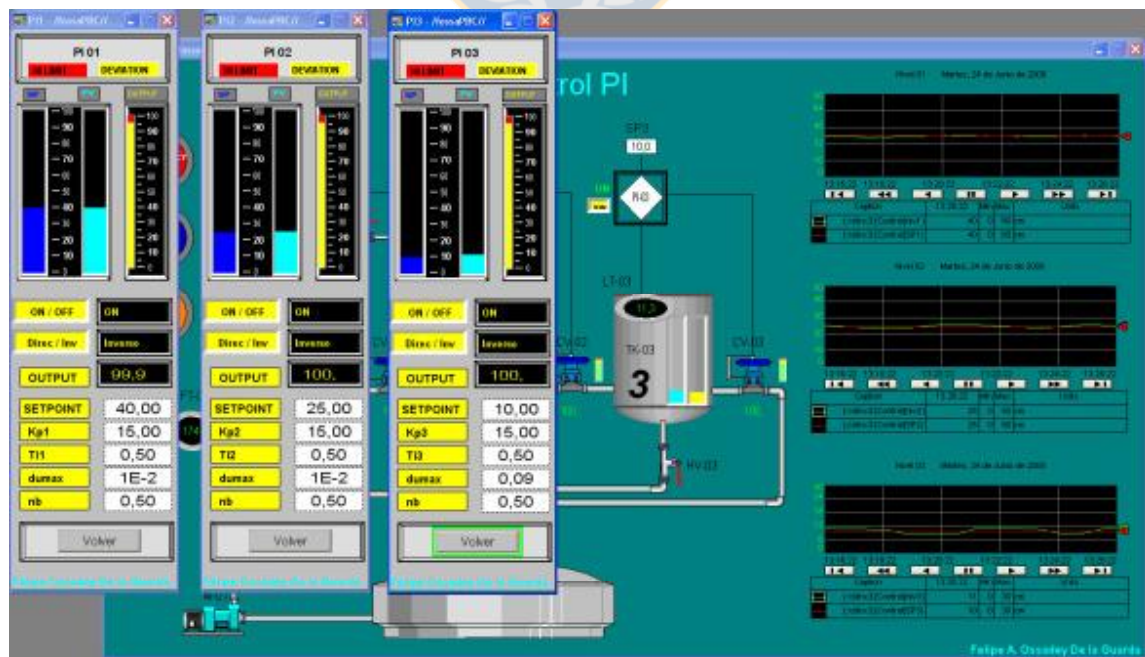
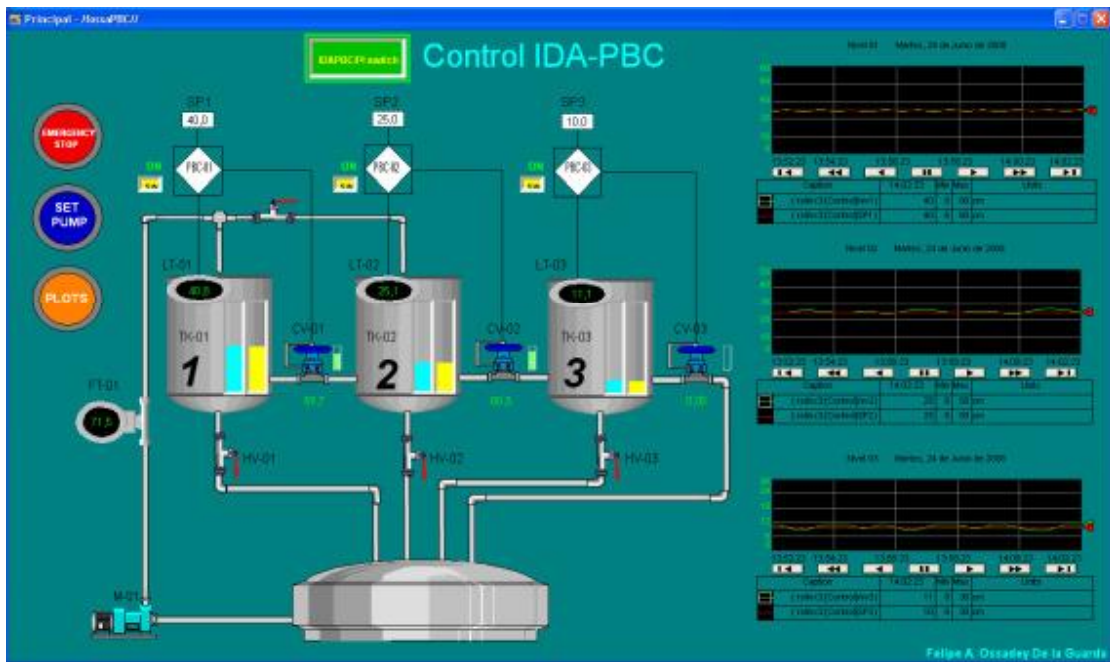


Fig. F. 5. Interfaz de operación, Cajas de control PI

Al presionar el botón ‘IDAPBC/PI switch’ se cambia la técnica de control y lo que aparece ahora en la pantalla principal es algo similar a la Fig. F. 1. La Fig. F. 6 muestra que básicamente cambian las cajas de control y el nombre de la pantalla principal.



**Fig. F. 6. Interfaz de operación, ventana principal /Control IDA-PBC**

Al presionar ahora la caja de control del estanque uno aparece la pantalla que muestra la Fig. F. 7. Como se ha mencionado anteriormente se tiene para este estanque la opción de utilizar al máximo su capacidad como buffer mediante la elección de una función de energía de tipo limitada en vez de la logarítmica estándar que estamos usando, por esto tiene un switch que permite elegir que tipo de función de energía se desea utilizar y debajo de este switch hay una flecha verde que nos indica que parámetros corresponde sintonizar para la función de energía elegida.



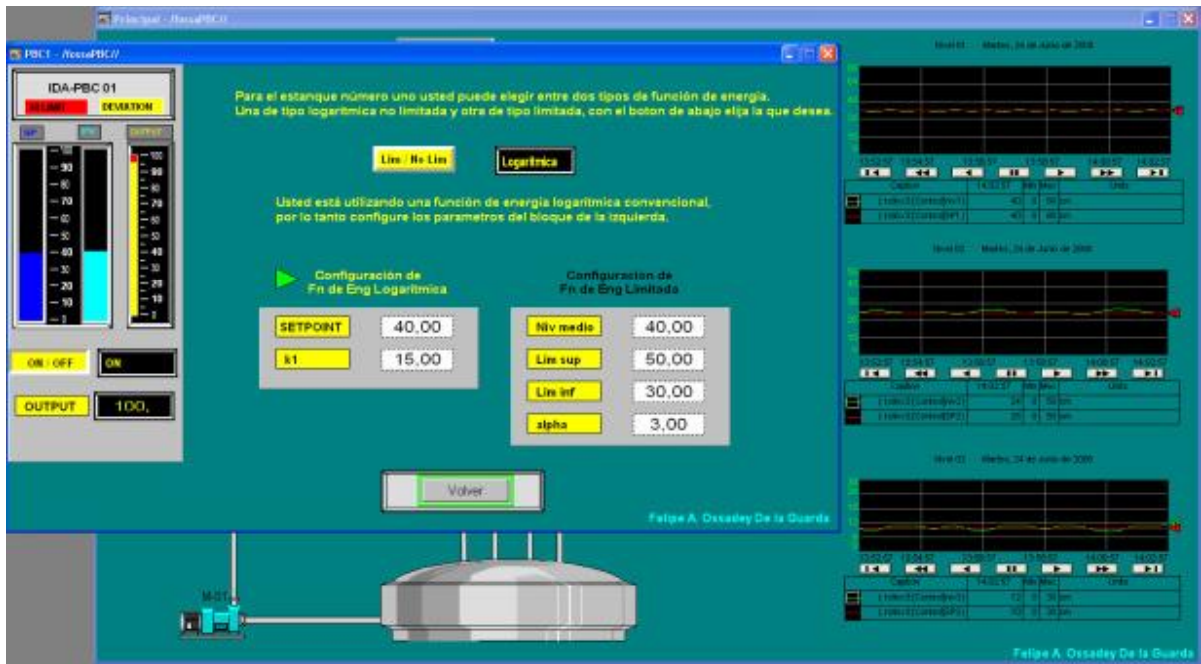


Fig. F. 7. Interfaz de operación, Caja de control IDA-PBC /estanque 1

Al presionar las cajas de control de los estanques dos y tres aparecen las minipantallas que muestra la Fig. F. 8. En diferencia con el estanque uno acá solo se utiliza funciones de energía logarítmicas para llevar un control más ajustado, entonces se tienen a disposición los parámetros a sintonizar pertinentes.

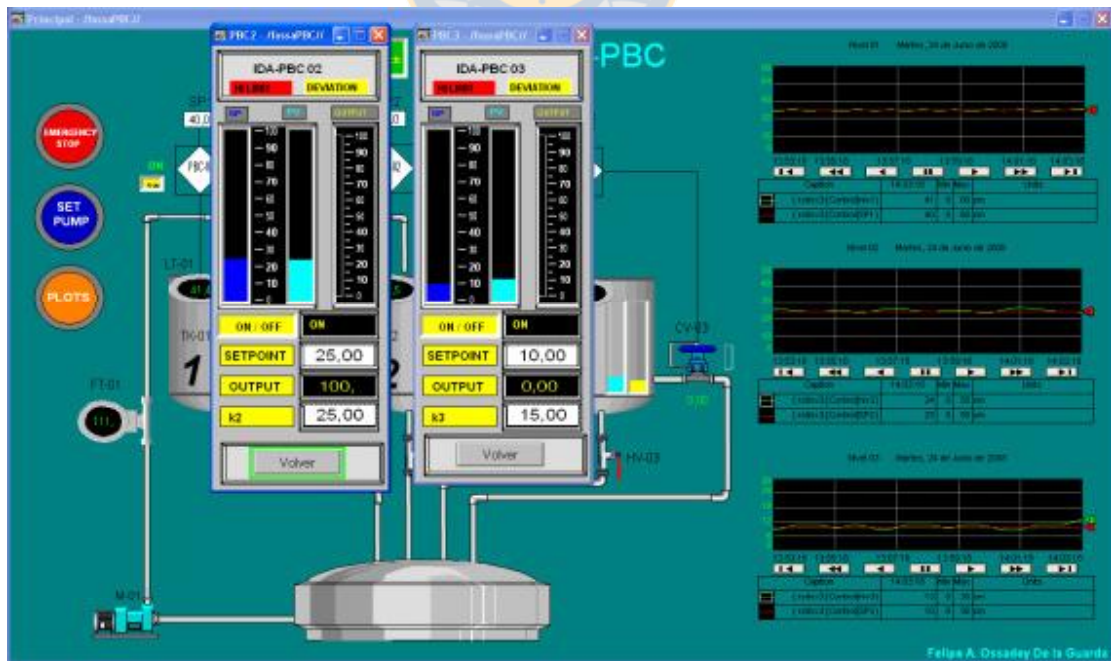
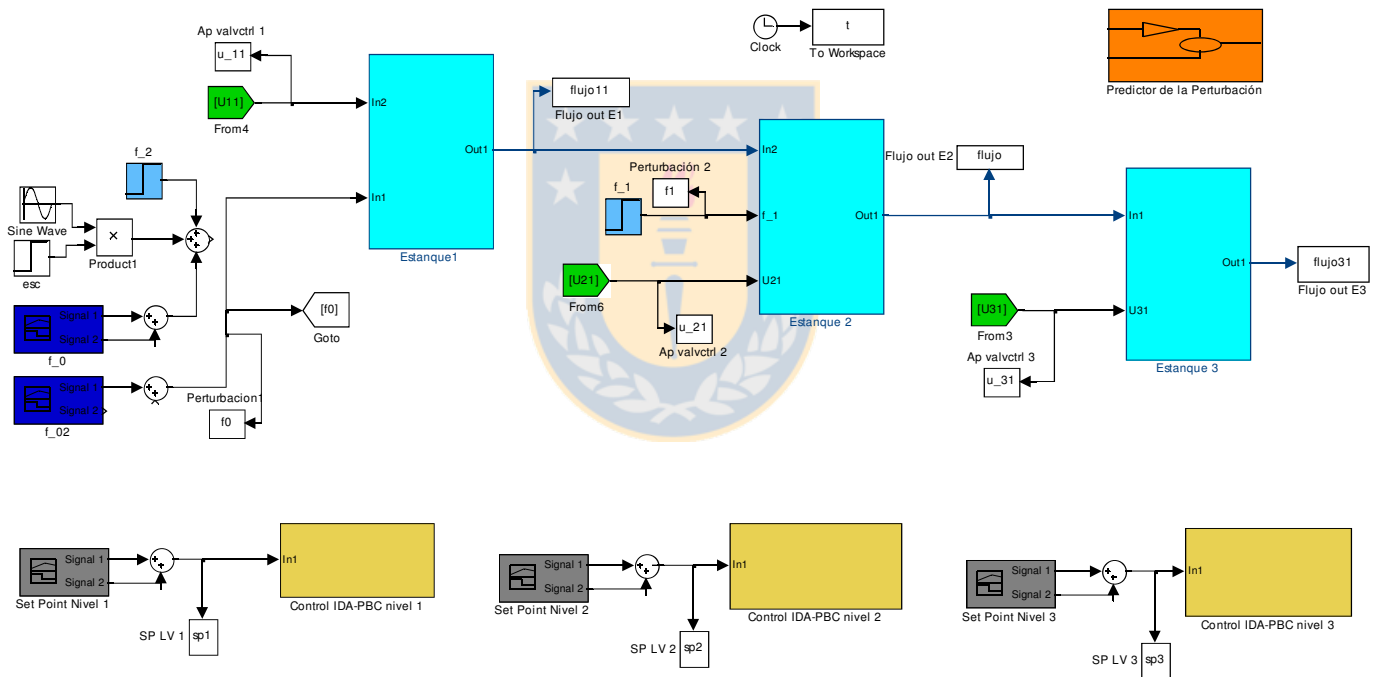


Fig. F. 8. Interfaz de operación, Caja de control IDA-PBC /estanque 2 y 3

## Anexo G. Bloques Simuladores

### G.1. Modelo del Control IDA-PBC.

Matlab Simulink® permite implementar todo tipo de ecuaciones dinámicas no lineales a través de bloques. Para el modelo no lineal de la planta se utilizaron muchos bloques de funciones, y fue posible a través de la integración de bloques obtener un modelo final amigablemente visible, es decir, se ocultan todos aquellos bloques que no sean necesarios de modificar dentro de un solo gran bloque, dejando visibles aquellos bloques necesarios de modificar para realizar distintas pruebas. Es posible seguir mejorando la apariencia de este modelo en bloques.

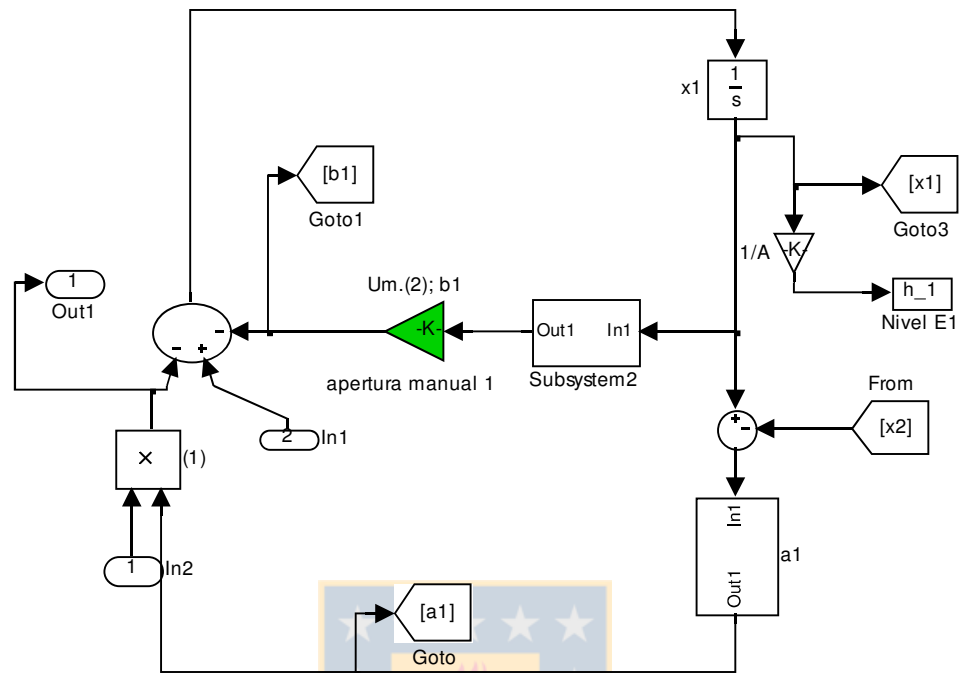


**Fig. G.1. Simulador en Bloques Simulink del Modelo No-Lineal del sistema incluyendo control IDA-PBC**

La figura anterior nos muestra la pantalla principal del simulador del proceso con la inclusión del control IDA-PBC. Se observan diversos bloques, los que se encuentran a la vista son los más importantes, para que el usuario pueda abrirlos y modificar parámetros de interés. Se observa el bloque ‘To Workspace’ que se incluye como una manera de obtener las gráficas de control a través de un programa en texto estructurado de Matlab.

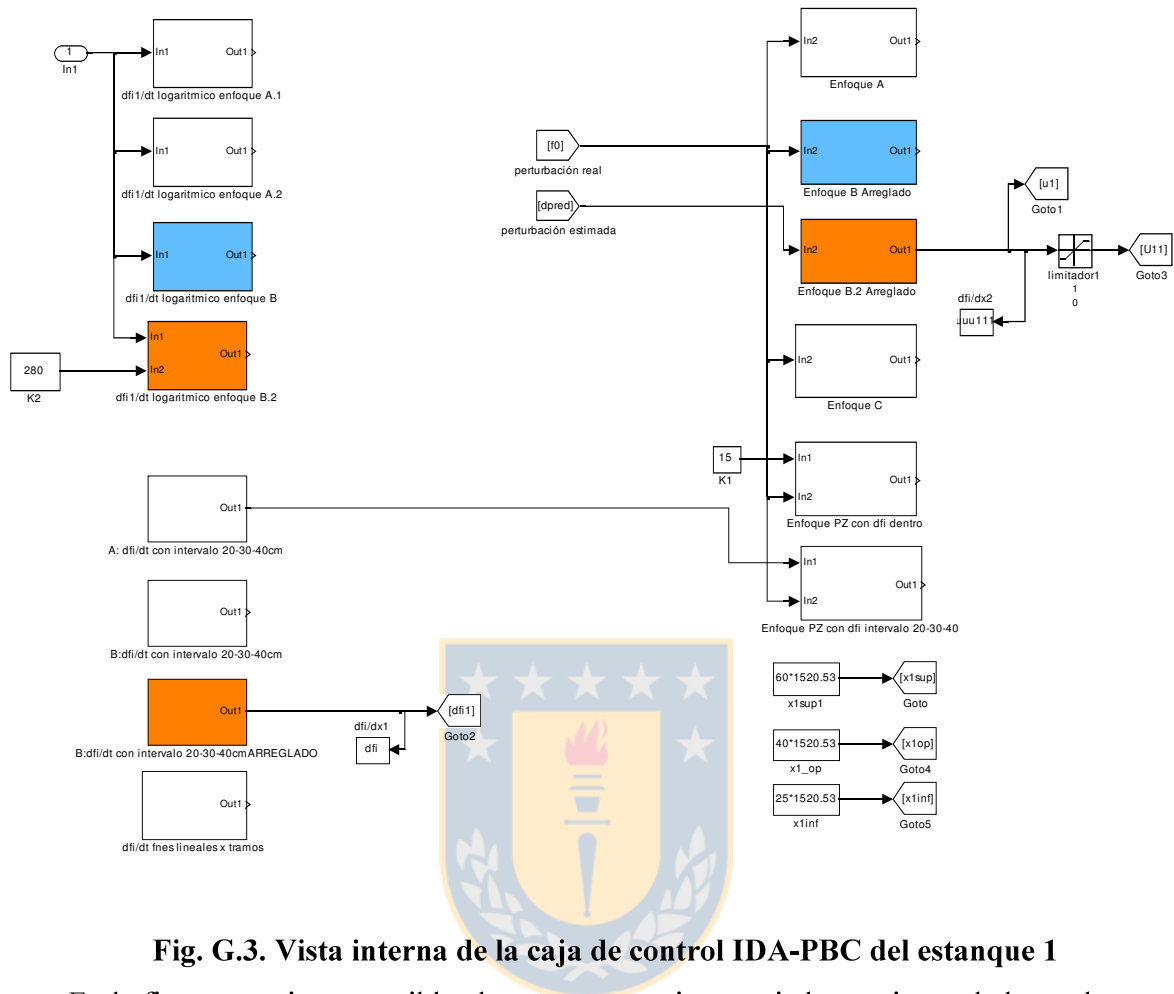
Las imágenes siguientes nos muestran una vista interna del estanque 1, y la vista interna de la

caja de control IDA-PBC del estanque 1.



**Fig. G.2. Vista interna del estanque 1 en el modelo Simulink**

Dentro del estanque 1 se observa el bloque para modificar la apertura de la válvula manual que se encuentra en el fondo del estanque, al ser un bloque importante se le ha dado un color que lo haga resaltar.



**Fig. G.3. Vista interna de la caja de control IDA-PBC del estanco 1**

En la figura anterior es posible observar que se tiene variadas opciones de leyes de control, y de funciones de almacenamiento de masa. Esto debido a que se trabajó en principio con distintos enfoques seleccionándose aquel que entregó mejores respuestas. Se observa que se puede elegir entre usar la perturbación estimada o real, y entre utilizar funciones de almacenamiento de masa logarítmicas o limitadas con intervalos.

Solo se muestran estos bloques a modo de demostración, existen muchos bloques internos más. El modelo del control PI es gráficamente idéntico a **Fig. G.1**, solo cambia la estructura de los bloques internos.

## Anexo H. Planta de Operación

---

Las siguientes imágenes nos muestran la planta de operación, donde se realizaron pruebas de las estrategias diseñadas.



**Fig. H.1. Sistema de los tres estanques en serie**

En la imagen anterior se puede observar el sistema de los tres estanques en serie, el cuarto estanque azul que se encuentra debajo es el que contiene el agua que va circulando por el sistema, esta ingresa al sistema cuando es extraída del estanque azul por la bomba, y abandona el sistema mediante las válvulas manuales que se encuentran debajo de cada estanque blanco y mediante la válvula de control que controla al tercer estanque.





**Fig. H.2. Gabinete del PLC**

La **Fig. H.2** muestra el gabinete principal que contiene principalmente al PLC, al dispositivo enlazador, el switch Ethernet, el acondicionador de alimentación Fieldbus, el terminador Fieldbus, y una fuente de poder de 24V. En un gabinete secundario se instaló el variador de frecuencia.



**Fig. H.3. Estación de Control**

La **Fig. H.3** muestra la estación de control, es posible observar que aparece disponible la interfaz de operación del proceso, la cual es de fácil accesibilidad mediante los dispositivos de entrada del PC.

