

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**“AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO EN
CONTROL DE PROCESOS CPTS-1 MEDIANTE LA TARJETA DE
ADQUISICIÓN DE DATOS USB PMD-1208LS”**

AUTOR:

ANDRES LEONARDO CUADRADO VACA

SANGOLQUÍ-ECUADOR

2005

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto fue realizado en su totalidad por el señor Andrés Leonardo Cuadrado Vaca, como requisito parcial para la obtención del título en INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

Ing. Hugo Ortiz.
DIRECTOR

Ing. Rodolfo Gordillo.
CODIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme la vida todos los días. A mis padres por nunca dudar en apoyarme y seguir juntos adelante. A mis amigos, por ser el bálsamo que aliviana las duras tareas de la vida. A mis maestros, que con paciencia me enseñaron el camino a lo largo de la carrera.

DEDICATORIA

A Dios, por darme espíritu para levantarme cada día.

PRÓLOGO

El objetivo de este proyecto se centra en controlar con una PC el funcionamiento del sistema de entrenamiento CPTS-1 a través de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS, un dispositivo tipo plug and play que se conecta a través de cualquier puerto USB, ofreciendo la posibilidad de hacer interfases con programas ampliamente conocidos como son LabVIEW, Matlab y C++, lo cual a su vez permite un fácil diseño de interfases y análisis de señales.

Con este proyecto se desarrolla un controlador dedicado para el funcionamiento del sistema de entrenamiento CPTS-1, dispositivo utilizado para la enseñanza de la materia de Control de Procesos en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Electrónica, con el cual el usuario puede aplicar técnicas de control manejando variables de flujo, nivel y temperatura. La tarjeta de adquisición de datos utilizada además cumple con la nueva tendencia de fácil conectividad a través de puertos USB que la mayoría de dispositivos actuales lo tienen y permite también explotar nuevas herramientas de software que antes con el uso exclusivo del PLC no era posible hacerlo.

Se realizó este proyecto debido a que en la actualidad existe la posibilidad de implementar procesos de control sin la necesidad de contar con dispositivos de

más complejidad y costo que la tarjeta PMD-1208LS, explotando toda la potencia de análisis y flexibilidad que se logra al poner un proceso bajo el control de un computador y con software como LabVIEW, Matlab y C++.

Este dispositivo al poder conectarse con software de tal capacidad, permite ejecutar técnicas de control diferentes a las establecidas en los PLC existentes en la facultad de Electrónica, y brinda herramientas de análisis más potentes y amigables. Como muestra de esto se implementará prácticas de control de los procesos que el sistema de entrenamiento CPTS-1 puede ejecutar, de tipo convencional (control PID) y de control difuso, siendo esta una herramienta didáctica adicional a las ya existentes.

INDICE

CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO	III
DEDICATORIA	IV
PRÓLOGO	V
INDICE	VII
CAPÍTULO I	
SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1.....	1
1.1 OBJETIVO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1	2
1.2.1 Tanque de acrílico.....	5
1.2.2 Paneles de funcionamiento.....	7
1.2.3 Bombas eléctricas.....	8
1.2.3.1 Acondicionamiento de la señal de salida del controlador hacia las bombas.....	9
1.2.4 Niquelinas eléctricas.....	10
1.2.4.1 Acondicionamiento de la señal de salida del controlador hacia la niquelina.....	10
1.2.5 Medidor de flujo.....	14
1.2.6 Sensor transmisor de nivel.....	17
1.2.7 Sensores de temperatura.....	19
1.3 CONEXIONES.....	24
1.3.1 Interruptores.....	24
1.3.2 Conexiones de sensores de flujo y nivel.....	26
1.3.3 Conexiones de sensores de temperatura.....	27
1.3.4 Conexiones para manejo de bombas.....	28
1.3.5 Conexiones para niquelinas.....	29
CAPÍTULO II	
TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS USB PMD-1208LS.....	31
2.1 INTRODUCCIÓN A LA PMD-1208LS.....	31
2.2 INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA PMD-1208LS.....	33
2.2.1 Componentes de Hardware.....	33
2.2.2 Componentes de Software.....	33
2.3 DETALLES DE FUNCIONAMIENTO DE LA PMD-1208LS.....	33
2.3.1 Tipos de adquisición de datos de las entradas analógicas.....	33

2.3.1.1	Adquisición de datos a velocidad establecida por software	34
2.3.1.2	Adquisición continua.....	34
2.3.1.3	Adquisición de datos forzada.....	34
2.3.2	LED.....	35
2.3.3	Borneras.....	35
2.3.3.1	Pines 1 – 20.....	36
2.3.3.2	PInes 21 – 40.....	36
2.3.4	Terminales de entradas analógicas (CH0 IN – CH7 IN).....	37
2.3.4.1	Configuración individual.....	38
2.3.4.2	Configuración diferencial.....	38
2.3.5	Pines de entrada/salida digitales (Port A0 a Port A7, y Port B0 a B7).....	40
2.3.6	Terminal VCC.....	41
2.3.7	Pines de tierra.....	42
2.3.8	Pin de calibración.....	42
2.3.9	Pin Contador.....	43
2.3.10	Precisión de la PMD-1208LS.....	43
2.4	USO DE LA PMD-1208LS.....	46
2.4.1	Calibración y prueba con el software InstaCal.....	46
2.4.2	Cómo usar la PMD-1208LS con LabVIEW.....	46
2.4.3	Instrumentos Virtuales básicos de LabVIEW para la PMD -1208LS	47
2.4.3.1	AInScFg.VI.....	48
2.4.3.2	AOutScFg.VI.....	49
2.4.3.3	ToEng.VI.....	50
2.4.3.4	OptAin.VI.....	50
2.4.3.5	ErrMsg.VI.....	51
2.5	ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DEL MODULO CPTS-1.....	52
2.5.1	Acondicionamiento de la señal de control de las bombas.....	52
2.5.2	Acondicionamiento de la señal de control de las niquelinas.....	54
2.5.3	Acondicionamiento de la salida del medidor de flujo.....	56

CAPÍTULO III

	DISEÑO DE PRÁCTICAS CONVENCIONALES DE CONTROL.....	57
3.1	CONTROL PID.....	58
3.1.1	Objetivo.....	58
3.1.2	Enunciado de la práctica.....	58
3.1.3	Fundamento teórico.....	60
3.1.4	Equipo necesario.....	62
3.1.5	Procedimiento.....	63
3.2	CONTROL EN CASCADA.....	64
3.2.1	Objetivo.....	64
3.2.2	Enunciado de la práctica.....	64

3.2.3 Fundamento teórico.....	66
3.2.4 Equipo necesario.....	68
3.2.5 Procedimiento.....	68
3.3 CONTROL ANTICIPATIVO.....	70
3.3.1 Objetivo.....	70
3.3.2 Enunciado de la práctica.....	70
3.3.3 Fundamento teórico.....	72
3.3.4 Equipo necesario.....	74
3.3.5 Procedimiento.....	74
3.4 CONTROL POR SUPERPOSICIÓN.....	75
3.4.1 Objetivo.....	75
3.4.2 Enunciado de la práctica.....	76
3.4.3 Fundamento teórico.....	77
3.4.4 Equipo necesario.....	79
3.4.5 Procedimiento.....	79
3.5 CONTROL SELECTIVO.....	81
3.5.1 Objetivo.....	81
3.5.2 Enunciado de la práctica.....	82
3.5.3 Fundamento teórico.....	83
3.5.4 Equipo necesario.....	84
3.5.5 Procedimiento.....	85
CAPÍTULO IV	
DISEÑO DE PRÁCTICAS DE CONTROL DIFUSO.....	87
4.1 CONTROL DIFUSO DE NIVEL.....	91
4.1.1 Objetivo.....	91
4.1.2 Enunciado de la práctica.....	91
4.1.3 Fundamento teórico.....	93
4.1.4 Equipo necesario.....	99
4.1.5 Procedimiento.....	99
4.2 CONTROL ANTICIPATIVO DIFUSO.....	101
4.2.1 Objetivo.....	101
4.2.2 Enunciado de la práctica.....	101
4.2.3 Fundamento teórico.....	103
4.2.4 Equipo necesario.....	104
4.2.5 Procedimiento.....	104
CAPÍTULO V	
IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS	107
5.1 PRÁCTICA #1: CONTROL PID.....	108
5.1.1 Enunciado.....	108
5.1.2 Implementación.....	108

5.1.2.1 Conexiones de Hardware.....	109
5.1.2.2 Configuración de software.....	111
5.1.3 Resultados.....	116
5.1.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	120
5.2 PRÁCTICA #2: CONTROL EN CASCADA	121
5.2.1 Enunciado.....	121
5.2.2 Implementación.....	122
5.2.2.1 Conexiones de Hardware.....	122
5.2.2.2 Conexiones de software.....	125
5.2.3 Resultados.....	131
5.2.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	133
5.3 PRÁCTICA #3: CONTROL ANTICIPATIVO.....	134
5.3.1 Enunciado.....	134
5.3.2 Implementación.....	135
5.3.2.1 Conexiones de Hardware.....	135
5.3.2.2 Conexiones de software.....	138
5.3.3 Resultados.....	144
5.3.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	147
5.4 PRÁCTICA #4: CONTROL POR SUPERPOSICIÓN.....	148
5.4.1 Enunciado.....	150
5.4.2 Implementación.....	149
5.4.2.1 Conexiones de Hardware.....	149
5.4.2.2 Conexiones de software.....	152
5.4.3 Resultados.....	159
5.4.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	164
5.5 PRÁCTICA #5: CONTROL SELECTIVO.....	165
5.5.1 Enunciado.....	165
5.5.2 Implementación.....	166
5.5.2.1 Conexiones de Hardware.....	166
5.5.2.2 Conexiones de software.....	168
5.5.3 Resultados.....	174
5.5.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	176
5.6 PRÁCTICA #6: CONTROL DIFUSO DE NIVEL.....	177
5.6.1 Enunciado.....	177
5.6.2 Implementación.....	177
5.6.2.1 Conexiones de Hardware.....	178
5.6.2.2 Configuración de software.....	180
5.6.3 Resultados.....	188
5.6.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	191
5.7 PRÁCTICA #7: CONTROL ANTICIPATIVO DIFUSO.....	191
5.7.1 Enunciado.....	191
5.7.2 Implementación.....	192

5.7.2.1 Conexiones de Hardware.....	192
5.7.2.2 Configuración de software.....	195
5.7.3 Resultados.....	203
5.7.4 Conclusiones y Recomendaciones.....	205

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	207
6.1 Conclusiones.....	207
6.2 Recomendaciones.....	208

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

- Anexo 1: Listado del Equipo del Sistema de Entrenamiento CPTS-1
- Anexo 2: Circuito de acondicionamiento Controlador-niquelina
- Anexo 3: Instalación del Hardware de la tarjeta PMD-1208LS
- Anexo 4: Instalación del Software de la tarjeta PMD-1208LS
- Anexo 5: Configuración de la tarjeta PMD-1208LS
- Anexo 6: Especificaciones técnicas de la PMD-1208LS

CAPÍTULO I

SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1

1.1 OBJETIVO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1

Los procesos industriales exigen control en la fabricación de diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos. En todos estos procesos es absolutamente necesario controlar algunas magnitudes, tales como la presión, el caudal, el nivel, la temperatura, velocidad, etc.

Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas variables en condiciones más idóneas de las que el propio operador podría realizar.

En los inicios de la era industrial, el operario llevaba a cabo un control manual de estas variables utilizando solo instrumentos simples como manómetros, termómetros, válvulas, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, en la actualidad se han desarrollado procesos que tienen una mayor complejidad que han exigido una automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control.

Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas magnitudes en mejor forma que el propio operador. De este modo el operador se ha liberado de una presencia permanente dentro del proceso a cambio de una labor de supervisión y análisis.

El sistema de entrenamiento CPTS-1 fue diseñado e implementado en los proyectos de grado “Sistema de Entrenamiento para Control de Procesos CPTS-1 Fase 1: Diseño”¹ y Fase 2: Implementación², para que el usuario aplique sus conocimientos en las prácticas de laboratorio de una manera cercana a los procesos desarrollados en la industria.

En la fase 1 de diseño, se decidió trabajar con agua, de tal manera que se empleen medidores de caudal, nivel y temperatura, después de haber analizado las necesidades de estudio para Control de Procesos, y la factibilidad de implementación de un sistema de entrenamiento para este fin. Se estableció los parámetros de funcionamiento de cada uno de sus actuadores y sensores, y las prácticas de laboratorio a implementar con el mismo. Todo esto se vio ejecutado en la fase 2, dedicada a la implementación del módulo y ejecución de prácticas con técnicas de control convencionales bajo el mando de un PLC.

Conociendo las características de los procesos, se diseñó un módulo con partes desmontables e intercambiables para la realización de todos los procesos antes mencionados midiendo nivel, caudal y temperatura. Los detalles de todos sus componentes se los describe en los capítulos siguientes.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1

Para poder asimilar completamente y con mayor destreza todas estas bondades del control automático aplicadas a dichas magnitudes se ha visto necesario el diseño de un sistema de entrenamiento para control de procesos, que relacione las mediciones, los instrumentos, y las técnicas de control asociadas a los procesos de producción.

El sistema de entrenamiento para control de procesos está basado en un módulo que abarca estructura física, parte eléctrica, y los requerimientos que la

¹ CUADRADO, Jorge R., *Sistema de Entrenamiento para Control de Procesos CPTS-1 – Fase 1: Diseño*, 2003

² LÓPEZ, Fausto, GUARICELA, Pablo, *Sistema de Entrenamiento para Control de Procesos CPTS-1 – Fase 2: Implementación*, 2003

instrumentación y los actuadores necesitan para que las prácticas de técnicas de control se implementen.

El sistema de entrenamiento CPTS-1 se compone de los siguientes elementos:

- 2 Tanques de acrílico
- Paneles de funcionamiento
- 2 Bombas Eléctricas
- 2 Niquelinas eléctricas
- 1 Medidor de flujo
- 3 Medidores de temperatura
- 1 Medidor de nivel
- Fuentes de poder
- Acondicionamiento de señales

La estructura del módulo mostrada en la figura 1.1, se compone de tres bandejas que albergan los tanques de acrílico, un panel principal que sirve de superficie para contener indicadores digitales que muestran las salidas de voltaje de los distintos sensores y tarjetas de acondicionamiento, además de los jacks de conexión de alimentación de sensores, entradas de control de los dispositivos actuadores, salidas de los dispositivos de sensamiento, una salida de voltaje regulable de 0 a 15 V_{DC}, jacks para la interconexión de tarjetas de acondicionamiento e interruptores de funcionamiento.



Figura 1.1. Sistema de entrenamiento CPTS-1

El panel principal como lo indica la figura 1.2 posee un soporte para las mangueras de conexión que se encuentran en la parte frontal y posterior, además de un soporte que sujeta el sensor de nivel que se encuentra a una altura de 50 cm, situado por encima del tanque izquierdo, acomodado en el centro.



Figura 1.2. Panel Frontal del Sistema de entrenamiento CPTS-1

La parte interna del panel principal aloja las conexiones internas de los sensores, las tarjetas de acondicionamiento, fuentes de alimentación, conexiones eléctricas y de protección.

La parte eléctrica constituye las fuentes de poder utilizadas, las tarjetas de acondicionamientos de las señales de entrada y salida, los indicadores, los diferentes interruptores, plugs y jacks.

La parte de instrumentos consta de los sensores (flujo, nivel y temperatura) a usarse para obtener mediciones y de los actuadores (bombas y niquelina).

Cabe anotar que el módulo del sistema de entrenamiento se complementaba con un controlador lógico programable (PLC), que es un microcomputador de propósito especial diseñado para controlar en tiempo real y en un medio industrial,

que realiza funciones lógicas, temporizaciones y cálculos, manejando señales de entrada y salida.

1.2.1 Tanques de acrílico

El sistema de entrenamiento CPTS-1 posee dos tanques de acrílico transparente para visualización de nivel de líquido, de una capacidad de 6 a 8 galones cada uno, cantidad de líquido suficiente para observar con detalle cómo se aplican las técnicas de control.

Debido a sus propiedades ya mencionadas, se puede ver el desalojo de agua por la bomba, el cambio de nivel de agua que se produce, el flujo entrante y saliente de agua, así como detalles originados por la aplicación de las técnicas de control.

La forma de los tanques es cúbica, de dimensiones de 40 centímetros de alto, 30 centímetros de ancho y 30 centímetros de profundidad. Se obtienen 6.75 galones con una columna de líquido en el tanque de 30 centímetros.

El tanque izquierdo (tanque 1) cuenta con una bomba eléctrica, conexiones plásticas de desalojo, un sensor de temperatura y dos calentadores de agua (niquelinas), como lo muestra la figura 1.3.

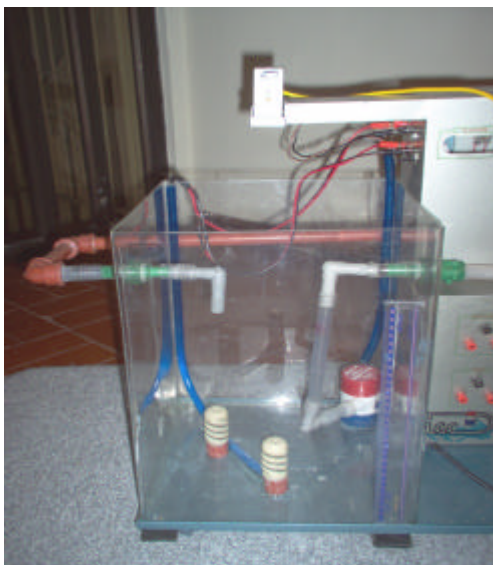


Figura 1.3. Tanque izquierdo del Sistema de entrenamiento CPTS-1

El tanque derecho (tanque 2) cuenta con otra bomba eléctrica, conexiones plásticas de desalojo y dos sensores de temperatura, como se puede ver en la figura 1.4.



Figura 1.4. Tanque derecho del Sistema de entrenamiento CPTS-1

Del tanque 2 hacia el tanque 1 existe una tubería de retorno, la cual es utilizada cuando se necesita que el nivel de los dos tanques sea constante, como se observa en la figura 1.5.



Figura 1.5. Tubería de retorno del Sistema de entrenamiento CPTS-1

En la tabla 1.1 se resume las características técnicas de los tanques.

Tabla 1.1. Características técnicas de los tanques

Material	Acrílico transparente
Espesor	4 mm.
Capacidad	8 galones
Dimensión de desfogue	½"

1.2.2 Paneles de funcionamiento

Para el alojamiento de los indicadores digitales, los plugs y jacks de entrada y salida de las diferentes tarjetas y sensores y switches de encendido y apagado, existe en el sistema de entrenamiento CPTS-1 un panel central y dos caras laterales.

El panel central como se muestra en la figura 1.6 esta constituido de 6 indicadores digitales: 2 para los sensores de temperatura, 2 para sensores de flujo, 1 para el sensor de nivel, y 1 para el voltaje de la fuente regulable; además de plugs y jacks de las 2 tarjetas de acondicionamiento de bombas, de las 2 tarjetas de acondicionamiento de niquelina, alimentación de sensores de flujo, nivel, y salidas de los sensores de flujo, temperatura y nivel hacia el controlador, además del interruptor master.

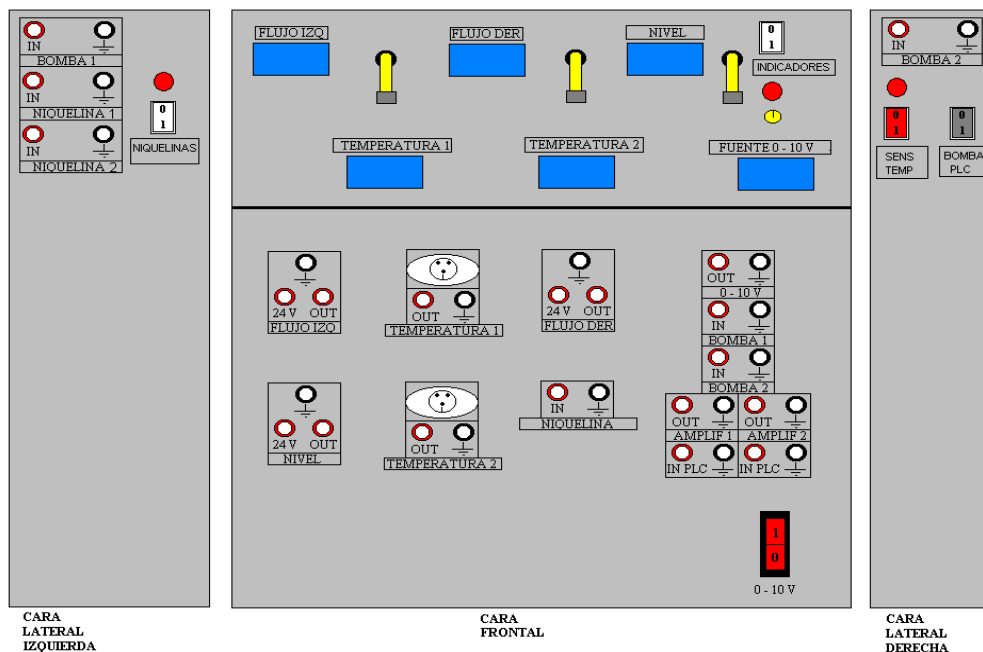


Figura 1.6. Paneles del Sistema de entrenamiento CPTS-1

Un listado del equipo que se encuentra en el Panel Central, Cara Lateral Izquierda y Cara Lateral Derecha con su respectiva referencia, se encuentra en el *Anexo 1*.

1.2.3 Bombas eléctricas

Como ya se mencionó en el punto 1.2.1, en los dos tanques están situadas dos bombas eléctricas que intervienen en el sistema como actuadores para controlar el flujo de agua de un tanque a otro.

Estos elementos actuadores son de marca ***Bilge Pump. Rule Industries. 360 GPH.***

Son de forma cilíndrica. Su altura es de 9 cm y su diámetro de 5.5 cm. En la figura 1.7 se muestra una fotografía de la misma.



Figura 1.7. Bomba Eléctrica

La salida de la bomba es de $\frac{3}{4}$ " de diámetro. Con esta salida la bomba entrega 360 GPH [galones por hora].

Su voltaje de funcionamiento es de 12 V DC. Pero como esta bomba funciona bajo el concepto de un motor universal, podrá ser manejada por valores inferiores a este.

1.2.3.1 Acondicionamiento de la señal de salida del controlador hacia las bombas

El acondicionamiento de la señal de salida del controlador hacia las bombas fue solucionado con la implementación de una tarjeta de amplificación de corriente que usa un circuito denominado seguidor de voltaje y amplificador de corriente, el cual está basado en transistores y el mismo se presenta en la figura 1.8.

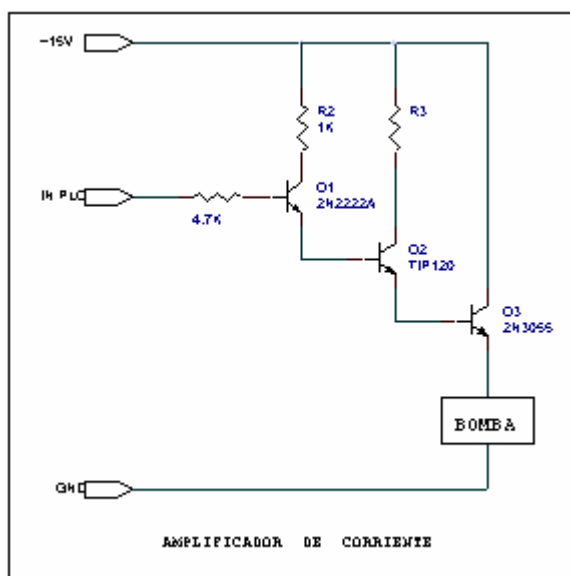


Figura 1.8. Acondicionamiento Controlador – Bomba

Por constitución propia de los transistores, en el circuito, a su salida, hay una pérdida de voltaje de aproximadamente $1.5 V_{DC}$.

El acondicionamiento comprende 2 tarjetas análogas, que están conectadas de cada bomba (CPTS-1-AB1), (CPTS-1-AB2), y utiliza los jacks de conexión descritos como:

Jack amplificación voltaje bomba 1 (CPTS-1-JAB1)

Jack amplificación voltaje bomba 2 (CPTS-1-JAB2)

Cada circuito utiliza una fuente de alimentación de $+15V_{DC}$.

1.2.4 Niquelinas eléctricas

Existen dos actuadores de este tipo en el tanque izquierdo (tanque 1), los cuales se utilizan para elevar la temperatura del agua contenida en el mismo. La potencia de las niquelinas es de aproximadamente 800 W a 120 V_{AC}, y estas están enrolladas en un cilindro aislante de cerámica.

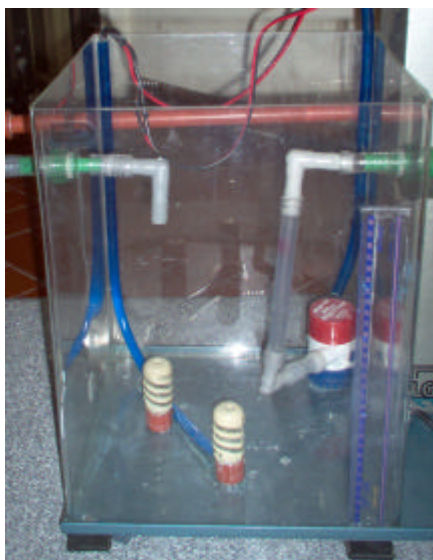


Figura 1.9. Niquelinas en el tanque izquierdo del CPTS-1

El rango de temperatura que se controla con este actuador varia de 20°C a 70°C, el valor más alto se alcanzará en un máximo de 20 minutos que es un valor prudente para el caso de realizar una práctica de control de temperatura.

Debido a que la cantidad aproximada de agua alojada en el tanque acrílico es de 8 galones, se justificó poner 2 niquelinas, para que el proceso y el control que se realice con este actuador sea ágil, por ello cada una dispone de una tarjeta de acondicionamiento.

1.2.4.1 Acondicionamiento de la señal de salida del controlador hacia la niquelina

La niquelina fue diseñada para ser manejada por una señal de 0 – 10 V_{DC} entregada por la salida analógica de un PLC. Debido a que la niquelina trabaja

con 110 V AC, se implementó una tarjeta de acondicionamiento para que el PLC la pudiera manejar.

Como en todo sistema de control, una vez que el elemento controlador recibe la señal del set point, modificará la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el valor del punto de control establecido por el operador que se encuentra monitoreando el proceso.

La técnica que se aplicará para realizar lo mencionado es el “Método de control de potencia AC por modulación de pulsos”, conocida también como “Control por períodos enteros”.

Esta técnica de control es implementada bajo la condición que solamente comprendan trenes de onda de ciclos completos que son medidos en la carga y que no produzcan armónicos. La figura 1.10 ilustra cierto control de potencia.

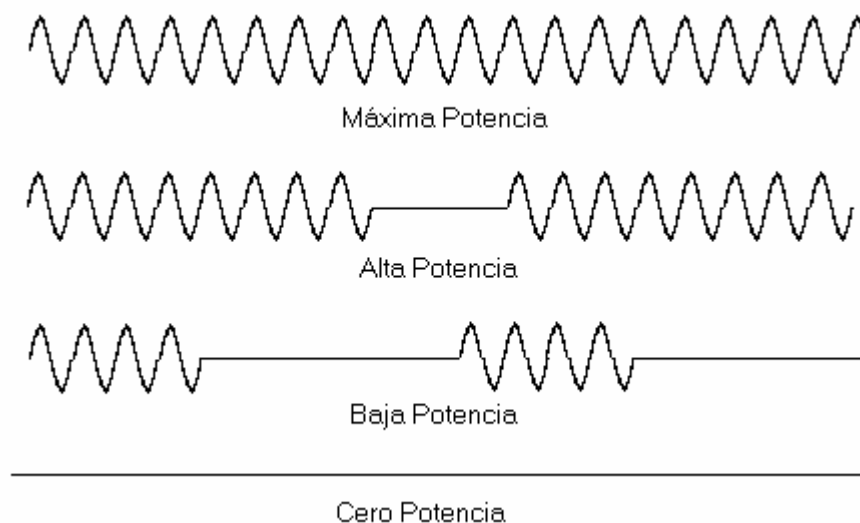


Figura 1.10. Formas de onda de voltaje en la carga

Para realizar este tipo de control de potencia AC se utiliza el circuito integrado CA3059 que es un interruptor de voltaje de cruce por cero, que emplea impulsos breves y positivos para el disparo de triacs (cuadrante I y IV) a tensión cero, que es quién maneja la conmutación para la carga, es decir la niquelina de 800 W, como se puede ver en la figura 1.11.

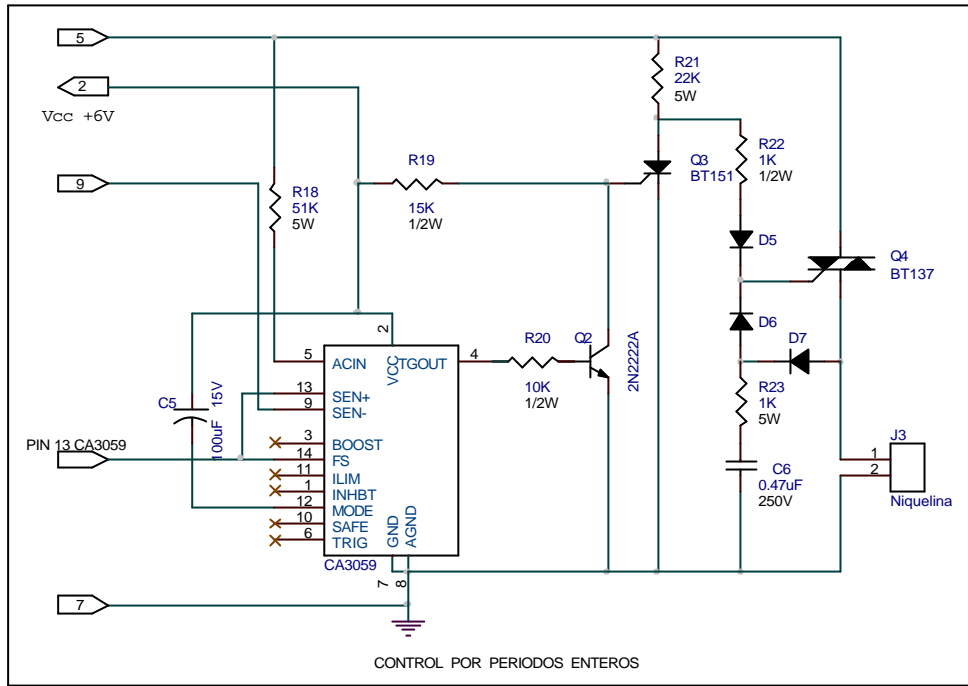
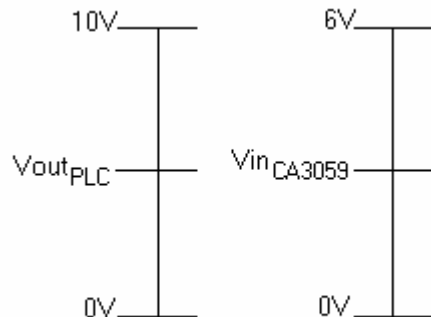


Figura 1.11. Control por períodos enteros

Este circuito integrado CA3059 solamente permite una variación de voltaje de entrada de 0 a 6 V DC. El control de este circuito integrado se realiza en el pin 13 el cual entrega máxima potencia a la carga cuando se suministra 6 V_{DC} en dicho pin y no entrega potencia a la carga cuando se suministra 0 V.

Por la razón citada anteriormente se acondicionó la señal de 0 a 6 V_{DC}, para que el CA3059 (en el pin 13) pueda trabajar correctamente.

Los siguientes cálculos justifican la función de transferencia utilizada en los amplificadores operacionales:



$$\frac{V_{in_{CA3059}}}{V_{out_{PLC}}} = \frac{6}{10} = 0.6$$

Como:

$$\frac{V_{in_{CA3059}}}{V_{out_{PLC}}} = \frac{R_f}{R_i} = 0.6 \Rightarrow R_f = 0.6R_i$$

Si:

$$R_i = 110 \text{ K}\Omega \quad R_f = 66 \text{ K}\Omega$$

Este acondicionamiento fue hecho mediante un amplificador diferencial, manteniendo la entrada inversora a tierra, es decir 0V; y en la entrada no inversora está un seguidor de voltaje para mantener el voltaje de salida del PLC. El circuito implementado se describe en la figura 1.12.

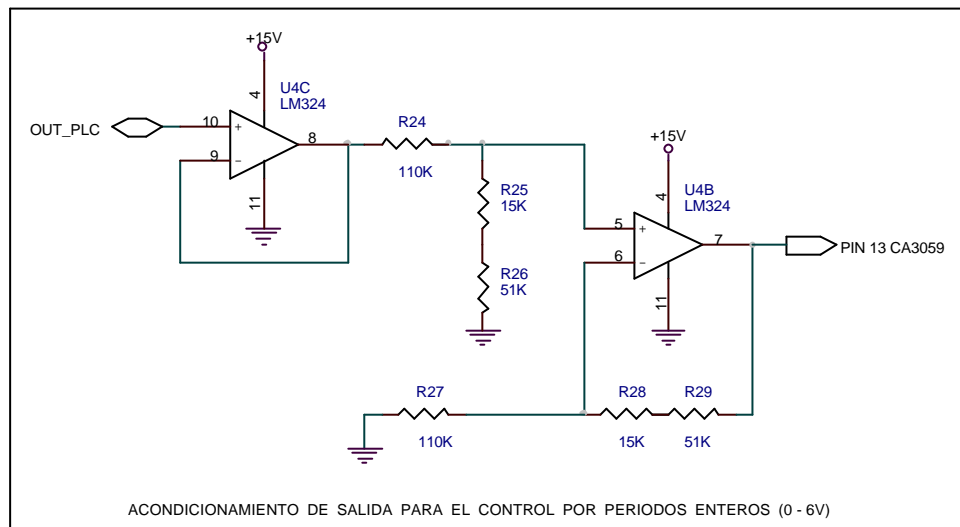


Figura 1.12. Acondicionamiento de salida del controlador para el CA3059

Para efectos de funcionamiento del circuito integrado CA3059, este utiliza una onda tipo diente de sierra para compararlo con el voltaje de control, y así ejercer su función de cruce por cero y generación de pulsos. El circuito generador de rampa es el siguiente:

En la figura 1.13 se muestra la etapa del generador de rampa para el propósito.

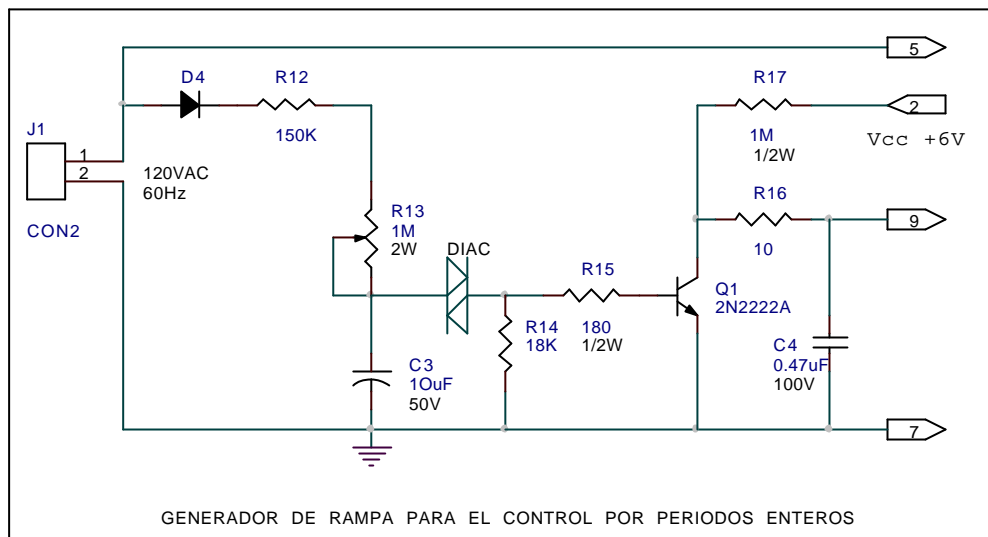


Figura 1.13. Generador de rampa para el control por períodos enteros

En el anexo 2 se muestra el circuito completo que realiza el acondicionamiento Controlador-niquelina.

1.2.5 Medidor de flujo

El sistema de entrenamiento CPTS-1 cuenta con un sensor SW-600-g1/2"/28-IL de la marca **Rechner Sensors**, el cual se muestra en la figura 1.14.



Figura 1.14. Sensor transmisor de caudal

Este sensor transmisor mide la velocidad con que se desplaza el fluido. El rango de medición es 0 – 150 centímetros por segundo, a modo estándar. El mismo necesita ser alimentado por un voltaje de 24 V DC, el cual es proveído desde una fuente externa y conectado a través de los conectores que se encuentran en la parte frontal del módulo.

El medidor de flujo tiene la posibilidad de ajustar el rango a medir mediante su programación, lo cual es ideal para esta aplicación, ya que se necesita medir de 0 a 105 centímetros por segundo aproximadamente.

El sensor cuenta con un LCD retroiluminado que permite la visualización del flujo en % sobre el fondo de escala. Tiene un tiempo de reacción muy corto y salida analógica 2 a 10 V_{DC} y salida digital.

Tiene dos puntos de conmutación programables y su programación es muy sencilla, girando el anillo se programa sin necesidad de teclas. Una vez programado el sensor de manera adecuada, se debe quitar o girar 180° el anillo programador, de esta manera, los parámetros de programación no se alterarán cada vez que el mismo sea utilizado.

Este sensor transmisor mide la velocidad con que se desplaza el fluido. El rango de medición es 1 – 150 centímetros por segundo a su mayor sensibilidad. A continuación están los cálculos del rango de caudal que puede medir el sensor:

Con tubería cilíndrica :

$$d = \frac{1}{2} \text{ in} = 1.27 \text{ cm}$$

$$A = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 1.267 \text{ cm}^2$$

$$\text{Si } v = 1 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

$$Q = v * A = 1.267 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

$$\text{Si } v = 150 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

$$Q = v * A = 190.05 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

$$Q = 190.05 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$$

Basado en los cálculos hechos, se puede observar que el rango de medición es más grande de lo necesario, por lo que se lo calibró para que a $130 \text{ cm}^3/\text{seg}$ tenga una salida de 10 V_{DC} y en su límite inferior de $1,267 \text{ cm}^3/\text{seg}$ entregue 2 V_{DC} .

$$1 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \Rightarrow 2 \text{V}_{DC} \quad \text{y} \quad 102 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \Rightarrow 10 \text{V}_{DC}$$

es decir :

$$1,267 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \Rightarrow 2 \text{V}_{DC} \quad \text{y} \quad 130 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \Rightarrow 10 \text{V}_{DC}$$

Para conocer la respuesta que entrega el sensor se elaboró la tabla 1.2, partiendo de los datos entregados por el sensor y el voltaje de control de la bomba usada para la medición:

Tabla 1.2. Voltios_{dc} vs cm^3/seg

Bomba [V_{DC}]	cm^3 / seg	Salida del sensor [V_{DC}]
2,5	33,33	2,65
3	56,25	3,65
3,5	75	5,35
4	92,78	6,25
5	129	10

La gráfica correspondiente a esta tabla se presenta en la figura 1.15, con su correspondiente línea de tendencia y función de transferencia.

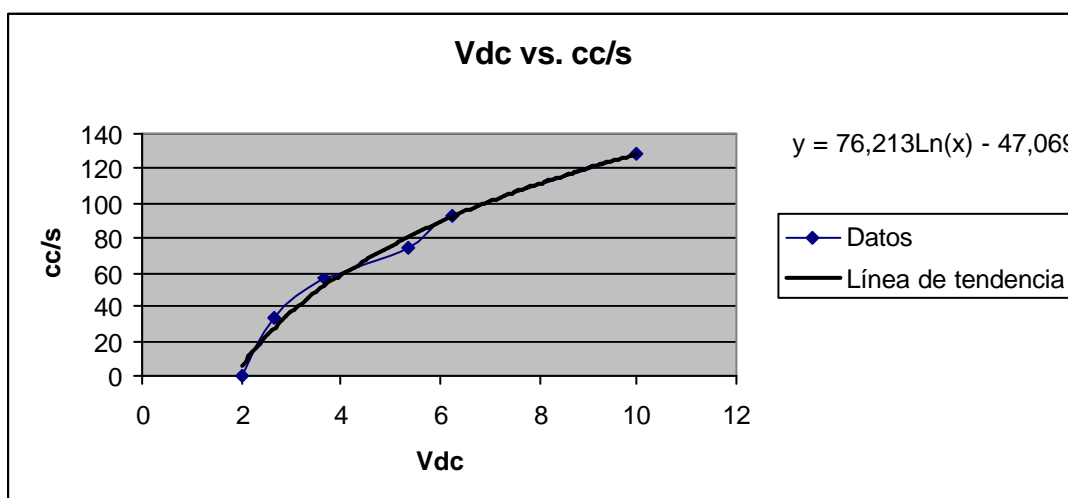


Figura 1.15. Voltios_{dc} vs cm^3/seg

1.2.6 Sensor transmisor de nivel

Ubicado sobre el tanque izquierdo, destinado para sensar el nivel de agua contenido por el tanque, el sensor transmisor de nivel utilizado en el sistema de entrenamiento CPTS-1 es el sensor ultrasónico Bero 3RG63 43-3JK00. El sensor se presenta en la figura 1.16.



Figura 1.16. Sensor ultrasónico Bero

Los sonar Bero de la serie compacta son aparatos completos y están listos para conectarse. Al igual que el sensor de flujo, este sensor necesita de un voltaje de 24 V DC, el cual es proveído desde una fuente externa y conectado a través de los conectores que se encuentran en la parte frontal del módulo.

Tienen una salida analógica de 0 – 10 V_{DC} sensando una distancia desde 20 hasta 100 cm. El que mida desde los 20 cm significa que existe una zona ciega de dicha longitud, dentro de la cual no se puede medir ningún objeto reflectante.

La presencia de un objeto en un ángulo de aproximadamente 5 grados se detecta en la zona de detección o analógica ajustada y se emite por la salida lógica o analógica.

Hay que mantener libre la zona ciega ya que los objetos originan en ella señales erróneas.

Este sensor transmisor tiene la opción de ajustar su sensibilidad. Es decir que se puede ajustar su salida con la distancia de operación del módulo, que a 30 cm de agua sobre la base entregue 0V y a 10 cm 5V_{DC}.

La tabla 1.3 muestra los diferentes voltajes entregados dependiendo de la columna de agua existente en el tanque.

Tabla 1.3 Voltaje vs. Altura de columna de agua

Altura de agua en el tanque [cm]	Salida del sensor [V]
30	0
29	0,08
28	0,28
27	0,54
26	0,77
25	1,05
24	1,31
23	1,55
22	1,82
21	2,09
20	2,36
19	2,60
18	2,88
17	3,12
16	3,39
15	3,66
14	3,90
13	4,18
12	4,45
11	4,73
10	4,96

La gráfica que representa esta tabla se muestra en al figura 1.17.

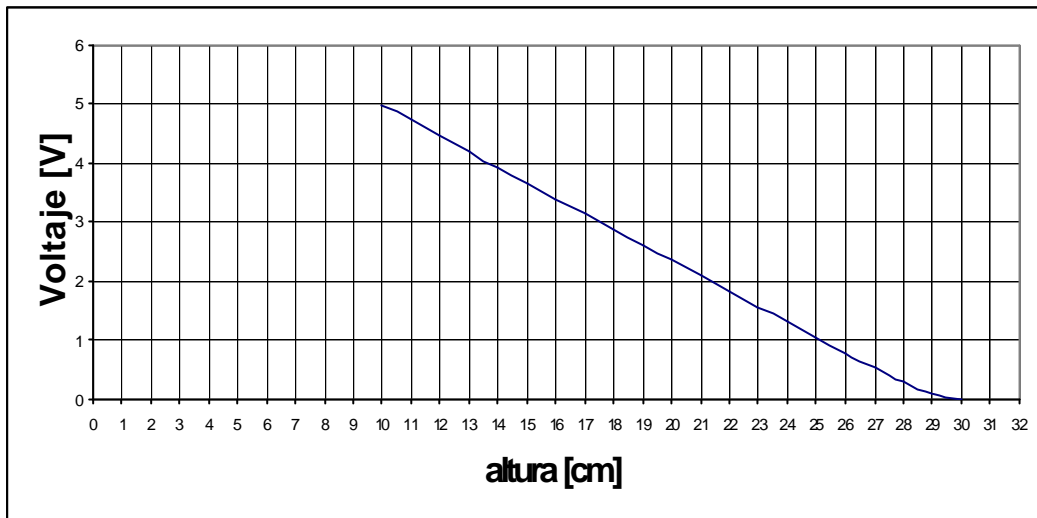


Figura 1.17. Voltaje vs altura de columna de líquido

Haciendo una regresión lineal, se puede observar que la gráfica *voltaje vs altura* tiende a ser una línea de la forma $y = -ax + b$, como se observa en la figura 1.18.

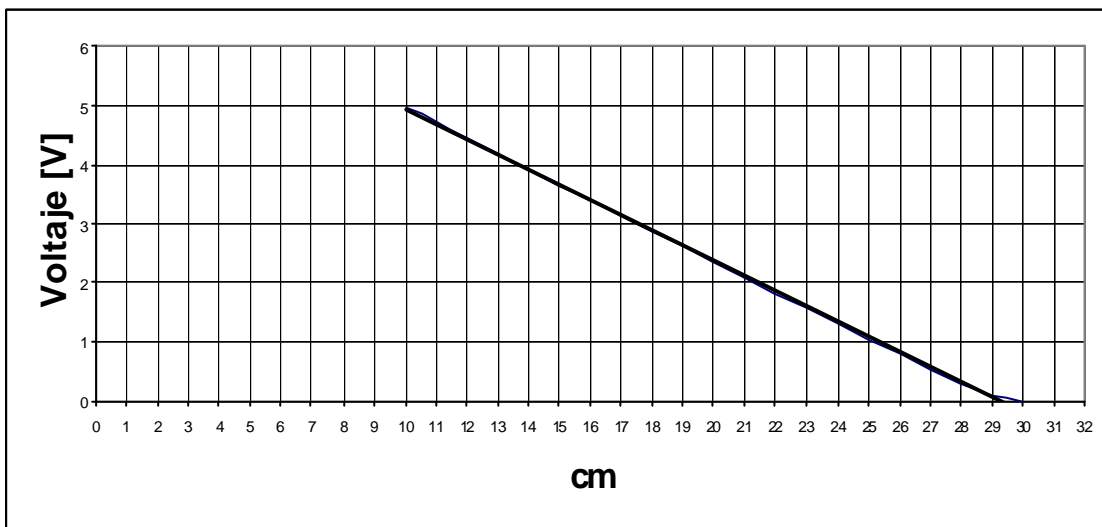


Figura 1.18. Voltaje vs altura de columna de líquido con recta de tendencia

Y con esto se puede ver que el sensor de nivel es de respuesta lineal.

1.2.7 Sensores de temperatura

Estos son los sensores que se encuentran dentro de los tanques, que tienen contacto con el agua alojada, conectados con cable blindado a la tarjeta de

acondicionamiento de su señal de salida ya antes descrita. Debido a que la temperatura que se quiere controlar no es elevada ($20^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$) y el cambio de la misma se produce lentamente, se usa el sensor de estado sólido LM335, que tiene una variación de voltaje de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

Este opera como un diodo zener cuyo voltaje de salida crece linealmente con la temperatura en rangos de -40° a 100°C con un error de 1°C en el rango indicado, es de calibración sencilla, tiene bajo costo, ya viene calibrado directamente en grados kelvin, opera desde $400\ \mu\text{A}$ a 5mA y tiene menos de un ohmio de impedancia dinámica con tres terminales V+, V- y adj (ver figura 1.19).

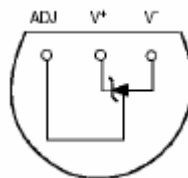


Figura 1.19. Configuración de sensor de temperatura LM335

En función de trabajar con las entradas y salidas analógicas del PLC, estos sensores acondicionaron la señal de entrada que es la del sensor de temperatura. Esto se lo realiza mediante un amplificador diferencial con ganancia igual a 15: ($R_f = 330\ \text{K}\Omega$ y $R_i = 22\ \text{K}\Omega$; $R_f/R_i = 15$).

En los procesos a implementar, mediante la niquelina, como ya se explicó anteriormente, se puede calentar el agua de los tanques hasta 70°C .

Entonces, la tarjeta de acondicionamiento fue implementada y calibrada para que se midan temperaturas desde los 10°C hasta los 70°C (ver figura 1.20).

Si por cada 1°C el sensor entrega $10\ \text{mV}$, entonces se tiene que:

$$\text{A } 10^{\circ}\text{C} \rightarrow 0.1\ \text{V}$$

$$\text{A } 70^{\circ}\text{C} \rightarrow 0.7\ \text{V}$$

Estos voltajes, mediante la tarjeta de acondicionamiento, con la ganancia de 15, se tendrá a la salida de la misma:

A 10°C → 1.5 V

A 70°C → 10.5 V

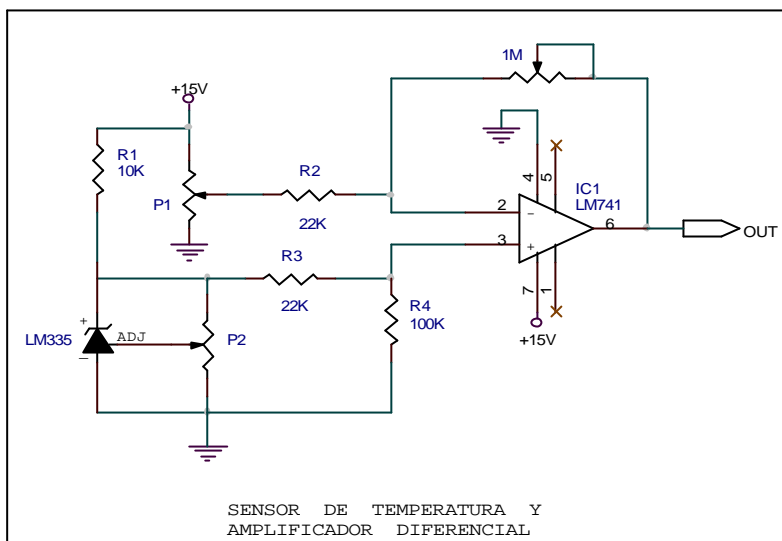


Figura 1.20. Circuito sensor de temperatura

Se emplea una tarjeta acondicionamiento para cada sensor de temperatura, (CPTS-1-TT1), (CPTS-1-TT2), (CPTS-1-TT3) las mismas que emplean la fuente de alimentación fija de +15 V DC, y dos indicadores.

El acondicionamiento comprende 2 tarjetas análogas, que están conectadas a los jacks de cada bomba (CPTS-1-AB1), (CPTS-1-AB2).

Esta señal luego de ser ajustada mediante el acondicionamiento explicado con anterioridad, se envía al panel central para que sea tomada por el controlador para ser usada en los distintos procesos.

En total son 3 sensores de temperatura: sensor de temperatura tanque izquierdo (CPTS-1-ST1), sensor de temperatura tanque derecho inferior (CPTS-1-ST2), sensor de temperatura tanque derecho superior (CPTS-1-ST3).

Para saber los voltajes que se obtendrán a la salida de la tarjeta de acondicionamiento, a diferentes temperaturas, se hizo una calibración de las

tarjetas de acondicionamiento de los sensores en conjunto con un sensor de temperatura externo, y se obtuvo la tabla 1.4 que se presenta a continuación:

Tabla 1.4 Voltaje vs. Temperatura de los tres sensores

Temperatura (C°)	Voltaje (V)		
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
70	10.09	10.12	10.02
60	8.64	8.86	8.59
50	6.46	6.66	6.39
40	4.98	5.01	4.94
30	3.47	3.45	3.42
20	0.56	0.56	0.54
10	0.23	0.21	0.19

Estas mediciones se obtuvieron mediante el calentamiento y enfriamiento del agua, por esta razón, quizás estas mediciones no sean tan exactas, ya que el agua no se calienta ni se enfría homogéneamente, debido a que existe transferencia del medio ambiente.

Las gráficas que describen la tabla expuesta son las siguientes:

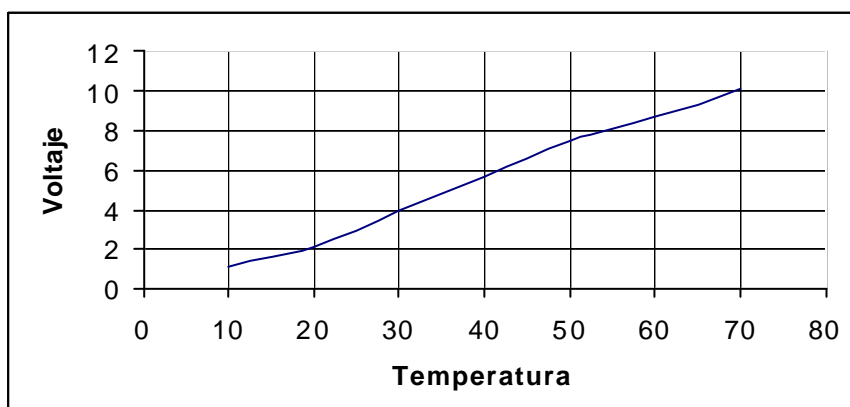


Figura 1.21. Voltaje vs temperatura del sensor 1

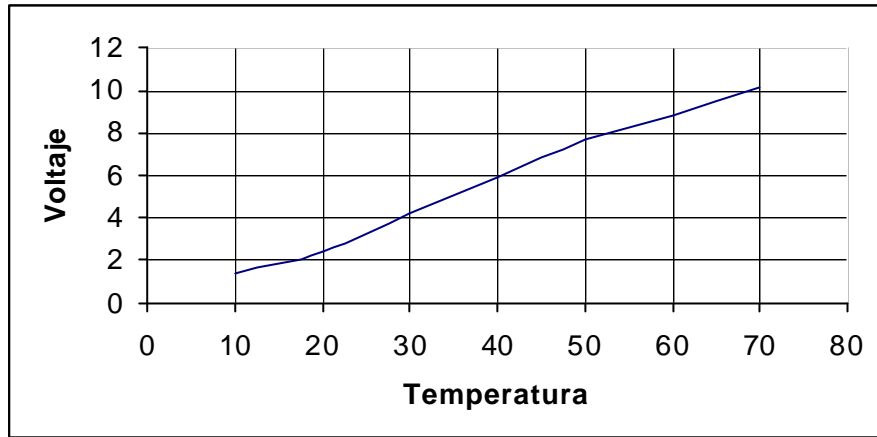


Figura 1.22. Voltaje vs temperatura del sensor 2

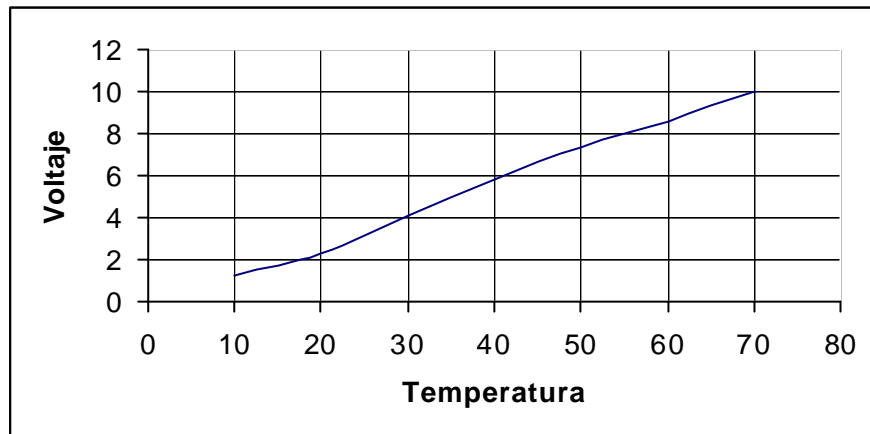


Figura 1.23. Voltaje vs temperatura del sensor 3

Haciendo una regresión lineal, se puede observar que las tres gráficas *voltaje vs temperatura* tienden a ser una recta de la forma $y = ax + b$:

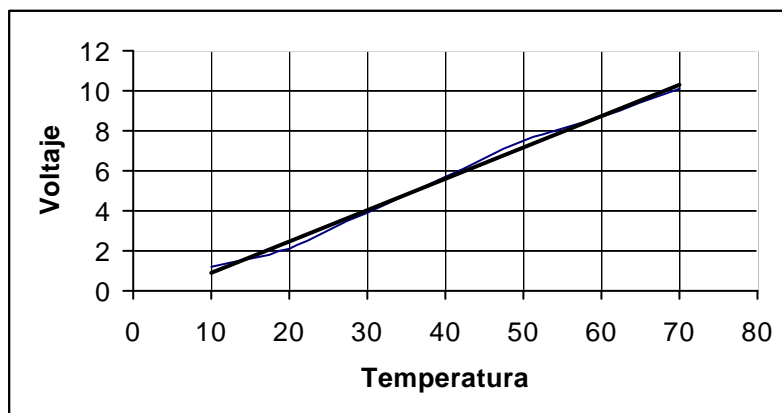


Figura 1.24. Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 1

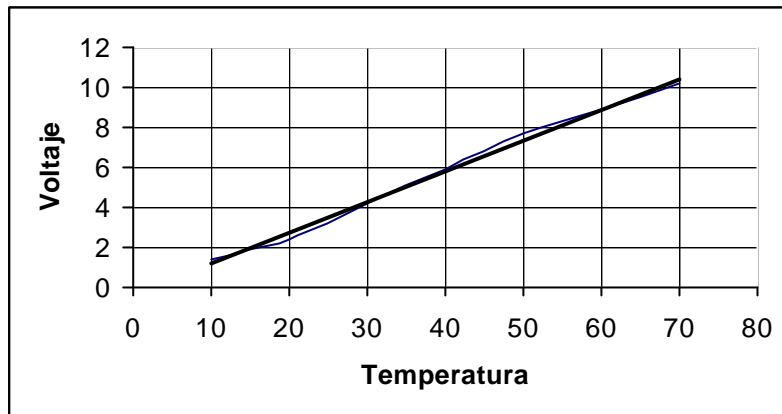


Figura 1.25. Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 2

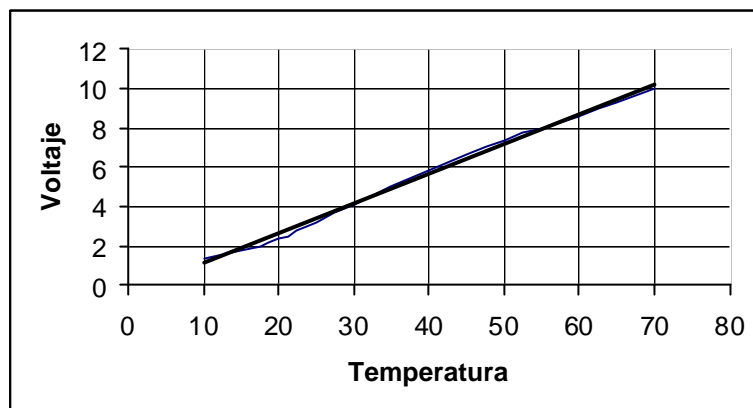


Figura 1.26. Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 3

Analizando las figuras 1.24, 1.25 y 1.26 se puede observar que con el sensor IC LM335 la respuesta es prácticamente lineal.

1.3 CONEXIONES

Para un correcto funcionamiento del sistema de entrenamiento CPTS-1 y evitar daños en el mismo, en los siguientes puntos se describe la forma de operación de cada una de las funciones del módulo.

1.3.1 Interruptores

A lo largo del panel central y laterales como lo muestra la figura 1.27 existen cinco interruptores para el funcionamiento del módulo CPTS-1. El interruptor rojo

(0 – 10V_{DC}), ubicado en la cara frontal, parte inferior derecha de la caja central enciende la fuente variable de 0 – 10V_{DC} (manejo de bombas o niquelinas manualmente). Cuando este interruptor está en 1 (encendido) se iluminará el led ubicado debajo del interruptor “INDICADORES”.

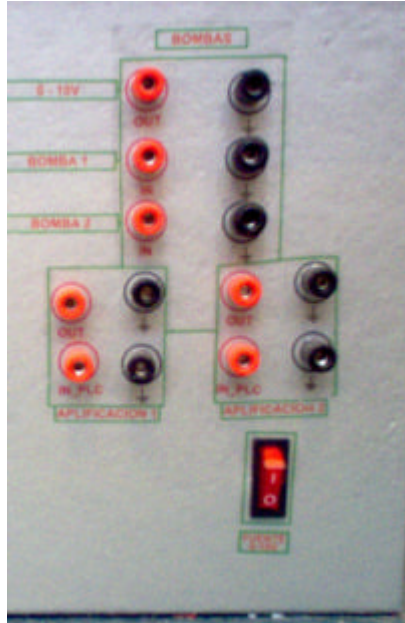


Figura 1.27. Interruptor de encendido de fuente variable 0 - 10 V_{DC}

El interruptor rojo “SENS TEMP”, ubicado en la cara lateral derecha debajo del led rojo (el cual se iluminará con su encendido) como lo muestra la figura 1.28 enciende la fuente de 15 V_{DC}, la cual energiza las tarjetas utilizadas en los procesos de temperatura. Es decir, al encender este interruptor, las tarjetas de temperatura estarán listas para realizar su función.



Figura 1.28. Interruptores de Sensores de Temperatura y Tarjeta de Acondicionamiento de las Bombas

El tercer interruptor “BOMBA PLC” está ubicado en la cara lateral derecha al lado derecho del interruptor “SENS TEMP”, como lo muestra la figura 1.28. Con este interruptor se energiza las 2 fuentes de 14 V_{DC} que alimentan las tarjetas de acondicionamiento controlador - bomba, dejándolas listas para su funcionamiento.

El cuarto interruptor “NIQUELINAS” ubicado en la cara lateral izquierda como lo muestra la figura 1.29, energiza la fuente que alimenta las tarjetas de acondicionamiento controlador – niquelinas. Con su encendido se energiza el led color rojo que se encuentra encima del mismo.

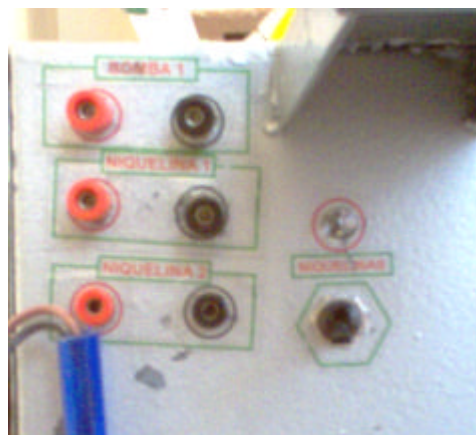


Figura 1.29. Interruptor de niquelinas

Finalmente existe un interruptor “INDICADORES” que enciende los 6 indicadores digitales. Este está ubicado en la cara frontal al lado derecho del indicador “NIVEL”.

1.3.2 Conexiones de sensores de flujo y nivel

Para los sensores de flujo hay dos cables M12, de izquierda a derecha el primero y el segundo. El cable M12 utilizado es de 4 hilos; marrón, azul, blanco y negro. El sensor de flujo del módulo utiliza solo tres. Mediante el marrón y el azul se alimenta al sensor con 24V, y con el blanco y azul se obtiene los 0 – 10 V_{DC} entregados por el mismo. Como se observó en la figura 1.6, estos dos cables están ubicados en la parte superior de la torre central de la estructura del módulo.

En la figura 1.30 se muestra como son las conexiones para los sensores de flujo. También se ilustra como van conectados los indicadores.

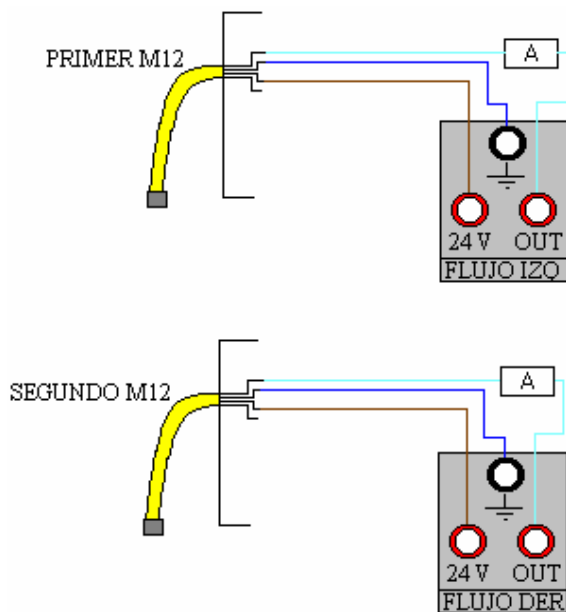


Figura 1.30. Conexiones de flujo

Para nivel está el tercer M12. Para este se utilizan los hilos marrón, azul y negro. Marrón y azul para alimentar con 24 V_{DC} al sensor, y negro con azul para los $0 - 5\text{ V}_{\text{DC}}$ que entrega el sensor.

En la figura 1.31 se muestra su conexión interna con su indicador.

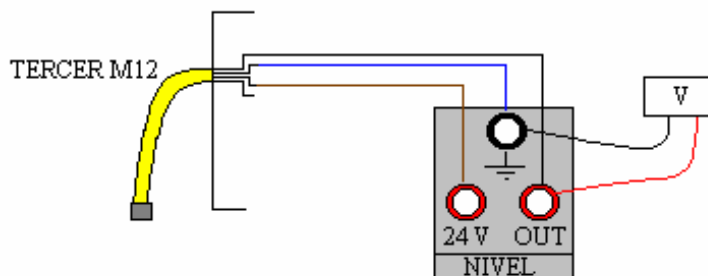


Figura 1.31. Conexiones de nivel

El usuario mediante cables conectores llevará 24 V_{DC} a los jacks +24 y tierra del módulo. Y de igual manera llevará la salida del sensor, jacks OUT y tierra, al controlador.

1.3.3 Conexiones de temperatura

Los sensores de temperatura siempre están conectados en los tanques. El usuario tiene que conectar al módulo los sensores de temperatura que se vayan a

utilizar dependiendo del proceso. Para la conexión de los sensores ubicados en el tanque hacia el módulo, se utilizó un cable estéreo de tres hilos. En la figura 1.32 se observa las conexiones.

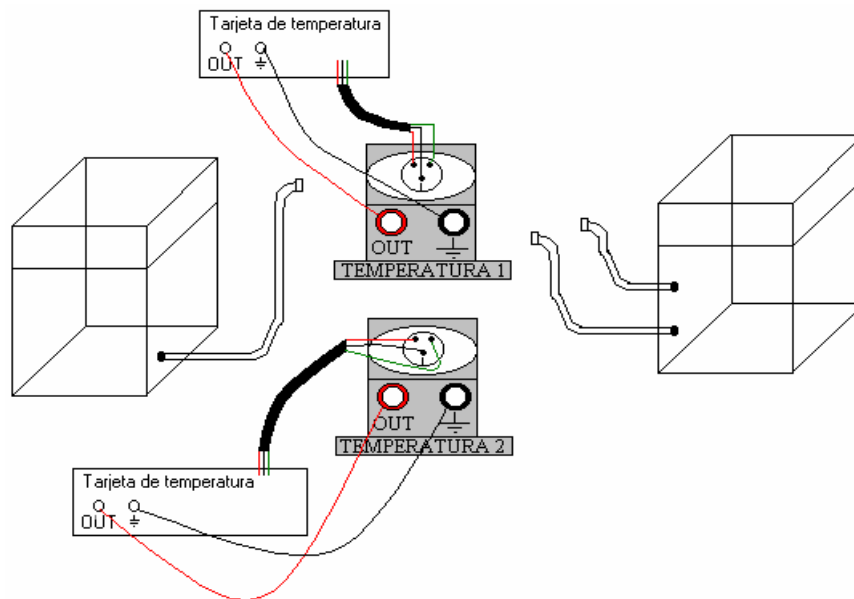


Figura 1.32. Conexiones de temperatura

El cable de tres hilos estéreo lleva los tres pines (+, - y ADJ) del sensor LM335 a la tarjeta. El usuario tiene que llevar mediante cables conectores el jack OUT y tierra del módulo (salida de la tarjeta de temperatura) al controlador.

1.3.4 Conexión para manejo de bombas

Las bombas en algunos procesos son manejadas por el controlador, y en otros por la fuente variable (0 – 10V_{DC}) del módulo; en algunos casos una sola y en otros las dos juntas. Para este fin, las conexiones se muestran en la figura 1.33.

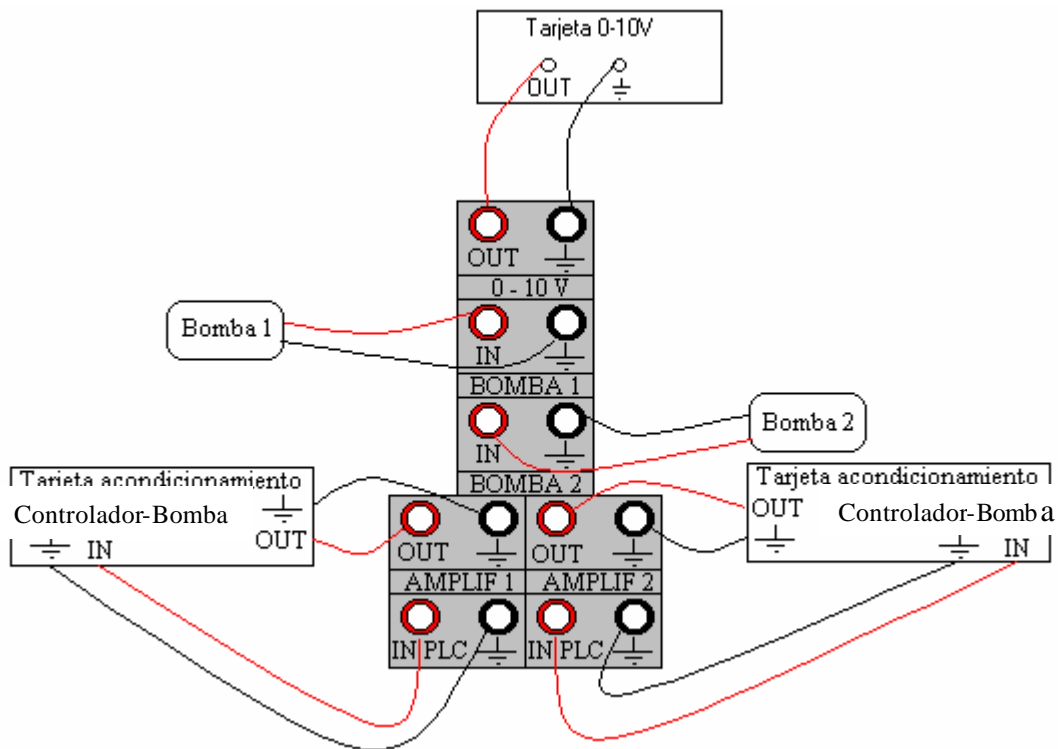


Figura 1.33. Conexiones para manejo de bombas

Si se requiere manejar la bomba 1 o bomba 2 o las dos juntas con la fuente 0 – 10V_{DC}, el usuario debe cortocircuitar mediante alambres conectores los jacks 0 - 10 V_{DC} y tierra con los jacks IN y tierra de la bomba o bombas a utilizar. De igual manera, si se desea manejarlas con el controlador, el usuario llevará la salida del controlador mediante alambres conectores a los jacks IN PLC y tierra; y luego desde los jacks OUT y tierra a los jacks IN y tierra de la bomba(s).

1.3.5 Conexión para niquelinas

Las niquelinas del tanque izquierdo están diseñadas para ser controladas por un controlador o por la fuente 0 – 10V_{DC}, dependiendo del proceso. La conexión para que el controlador o la fuente las maneje se muestra en la figura 1.34.

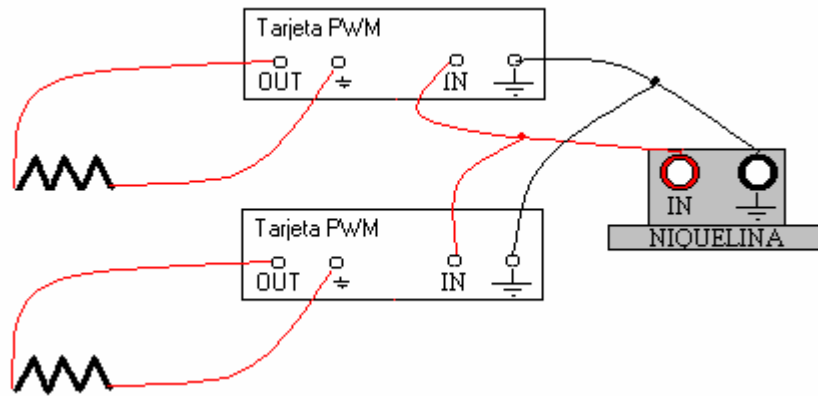


Figura 1.34. Conexiones para niquelinas

El usuario, mediante cables conectores, tiene que llevar la señal de salida del controlador o de la fuente hacia los jacks IN y tierra del módulo.

CAPÍTULO II

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS USB PMD-1208LS

2.1 INTRODUCCIÓN A LA PMD-1208LS

La PMD-1208LS es un dispositivo USB 1.1 de baja velocidad¹ que es utilizado para adquisición de datos y control. La misma es diseñada para puertos USB 1.1, y ha sido probada para total compatibilidad con puertos USB 1.1 y USB 2.0. La tarjeta PMD-1208LS es soportada bajo Microsoft Windows 98SE/ME/2000 y XP.

La PMD-1208LS cuenta con ocho entradas analógicas, 2 salidas analógicas de 10-bits, 16 entradas/salidas digitales y un contador de eventos externos de 32 bits. El dispositivo es alimentado por el suministro de +5Voltios del puerto USB. No se requiere ningún tipo de alimentación externa.

Las entradas analógicas de la PMD-1208LS son configurables a través de software para ocho entradas de 11-bits individuales, o cuatro entradas de 12-bits diferenciales. Un circuito integrado de interfase programable 82C55 provee las 16 entradas/salidas digitales discretas. Cada entrada digital puede ser configurada ya sea como entrada o salida.

La tarjeta USB PMD-1208LS se muestra en la figura 2.1. Todas las conexiones de entradas/salidas son realizadas en las borneras localizadas a lo largo de cada lado del dispositivo.

¹ MEASUREMENT COMPUTING; *PMD-1208LS Personal Measurement Device for Analog and Digital I/O User's Guide*, 2004



Figura 2.1. Tarjeta USB PMD-1208LS

La PMD-1208LS es un dispositivo de clase interfase humana HID (Human Interface Device). La arquitectura USB ofrece las siguientes ventajas sobre otros tipos de conexiones:

- Se puede conectar la aplicación a varios dispositivos usando un cable estándar de 4 hilos. El conector USB reemplaza a los conectores de los puertos seriales y paralelos con una combinación de conector y puerto estandarizado en uno solo.
- Un dispositivo USB HID utiliza drivers de clase Microsoft USB HID como interfase con el dispositivo. Ningún driver adicional es requerido.
- La USB HID es un dispositivo tipo plug-and-play. No existe ningún dispositivo que añadir, DIP switches que activar o interrupciones a configurar.
- Se puede conectar la HID antes o después de instalar su software, y sin la necesidad de encender la computadora primero. Cuando se conecta una HID al sistema, la PC automáticamente la detecta y configura el software necesario. Se puede conectar y alimentar varios periféricos HID al sistema usando un hub USB.
- No se necesita un módulo de alimentación separado. El puerto USB automáticamente entrega la alimentación eléctrica requerida para cada periférico conectado al sistema.
- Los datos pueden fluir en ambos sentidos entre una PC y periféricos bajo conexiones USB.

2.2 INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA PMD-1208LS

2.2.1 Componentes de Hardware

El hardware necesario para poner en funcionamiento la PMD-1208LS consiste en:

- Tarjeta PMD-1208LS
- Cable USB

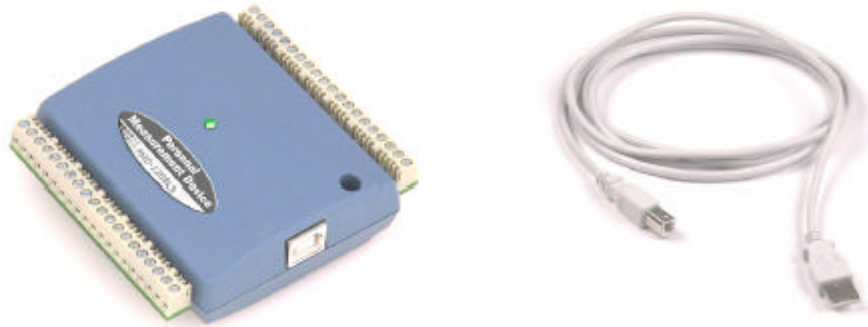


Figura 2.2. Hardware de la PMD-1208LS

2.2.2 Componentes de Software

La PMD-1208LS viene con un CD de instalación, que contiene el programa *InstaCal*, herramientas de adquisición de datos y control, controles SoftWIRE MCC DAQ para uso en Visual Basic 6, y librerías UL para uso en LabVIEW.



Figura 2.3. Disco de software de la PMD-1208LS

2.3 DETALLES DE FUNCIONAMIENTO DE LA PMD-1208LS

2.3.1 Tipos de adquisición de datos de las entradas analógicas

La PMD-1208LS puede adquirir datos analógicos en tres diferentes formas: escaneo a velocidad determinada por software, escaneo continuo y escaneo forzado.

2.3.1.1 Adquisición de datos a velocidad determinada por software

Al adquirir datos a velocidad determinada por software, la PMD-1208LS lo hace en una única adquisición o en grupos de únicas adquisiciones. La conversión análoga-digital es iniciada con un comando de software, y el único dato resultante es retornado a la PC. Esta operación puede ser repetida hasta que el número necesario de muestras sea obtenido por el canal (o los canales) en uso. La velocidad máxima cuando se trabaja en este modo es de 50 muestras por segundo.

2.3.1.2 Adquisición continua

Al adquirir datos continuamente, la PMD-1208LS lo hace en un único canal o en una secuencia de múltiples canales. Esta secuencia convierte, transfiere, y almacena datos en un buffer hasta que la adquisición de datos sea detenida. En este modo, los datos digitalizados son continuamente escritos a un buffer FIFO localizado en la tarjeta.

Cabe resaltar que la máxima tasa acumulada de adquisición de datos es de 1200 muestras por segundo. Esto es, que la tasa total de la misma para todos los canales no puede exceder de 1200 muestras por segundo. Basado en este requerimiento, una PMD-1208LS puede adquirir en un canal a 1200 muestras por segundo, dos canales a 600 muestras por segundo y cuatro canales a 300 muestras por segundo. Se puede iniciar una adquisición continua de datos ya sea por comando de software o por un evento disparado por hardware externamente.

2.3.1.3 Adquisición de datos forzada

En adquisición de datos forzada, la PMD-1208LS lo hace usando la capacidad total de su buffer FIFO de 4000 muestras. Se puede iniciar una única adquisición de una, dos, o cuatro canales ya sea por comando de software o por un evento disparado por hardware externamente. Los datos capturados son después leídos desde la FIFO y transferidos a un buffer en la PC.

Debido a que los datos son adquiridos a una tasa más rápida que lo que puede ser transferido a la PC, la adquisición de datos forzada es limitada a la capacidad de memoria de la tarjeta. Al igual que en la adquisición de datos continua, la tasa máxima de muestreo es una medida acumulada. Consecuentemente, la tasa máxima de adquisición de datos forzada es de 8000, 4000 y 2000 muestras por segundo para uno, dos, y cuatro canales, respectivamente.

2.3.2 LED

El LED localizado en la parte superior de la tarjeta indica el estado de la comunicación de la PMD-1208LS. El mismo consume hasta 5 mA de corriente y no puede ser deshabilitado. La tabla 2 define las funciones del LED de la PMD-1208LS.

Tabla 2.1. Estados del LED de la tarjeta PMD-1208LS

Estado del LED	Indicación
Verde continuamente	La PMD-1208LS está conectada a un computador o un hub USB externo.
Parpadea continuamente	Los datos están siendo transferidos.
Parpadea tres veces	La comunicación inicial se ha establecido entre la PMD-1208LS y el PC.
Parpadea lentamente	La entrada analógica está configurada para ser disparada externamente. El LED deja de parpadear y se ilumina verde continuamente cuando el disparo es recibido.

2.3.3 Borneras

La PMD-1208LS tiene dos bancos de borneras – un banco en la parte superior y otra en la parte inferior. Cada banco está provisto de 20 pines. La numeración de pines está descrita en la figura 2.4.



Figura 2.4. Numeración de pines en la PMD-1208LS

2.3.3.1 Pines 1 – 20

La bornera superior en la PMD-1208LS (pines 1 – 20) tiene las siguientes características:

- Ocho entradas analógicas (CH0 IN a CH7 IN)
- Dos salidas analógicas (D/A OUT 0 a D/A OUT 1)
- Una disparador externo (TRIG_IN)
- Un contador de eventos externo (CTR)
- Siete pines de tierra (GND)
- Un pin de calibración (CAL)

2.3.3.2 Pines 21 – 40

La bornera inferior en la PMD-1208LS (pines 21 – 40) tiene las siguientes características:

- 16 entradas/salidas digitales (Port A0 a Port A7, y Port B0 a Port B7)
- Un pin de Vcc (PC +5V)
- Tres pines de tierra (GND)

4 canales modo diferencial

8 canales modo individual



Figura 2.5. Diagrama de pines

2.3.4 Pines de entradas analógicas (CH0 IN – CH7 IN)

Aquí se puede conectar hasta un máximo de ocho entradas analógicas a la bornera que contiene los pines 1 al 20 (CH0 IN hasta CH7 IN). Refiérase a la figura 2.8 para la localización de estos pines.

Se puede configurar las entradas analógicas como 8 entradas de tipo individual o 4 entradas diferenciales. Si está configurada para entradas diferenciales, cada

entrada analógica tiene 12 bits de resolución. Si esta configurada para entradas individuales, cada entrada analógica tiene 11 bits de resolución, debido a restricciones impuestas por el convertidor A/D.

2.3.4.1 Configuración individual

Si todas las entradas analógicas son configuradas como tipo individual, ocho entradas de las mismas están disponibles. La señal entrante tiene como señal de referencia a tierra (GND), y es entregada a través de dos cables:

- El cable que transporta la señal a ser medida conecta a CH# IN.
- El segundo cable conecta a GND.

El rango de entrada en configuración individual es de $\pm 10V$. No existen otros rangos con los que la tarjeta pueda trabajar. La figura 2.6 ilustra una típica conexión de tipo individual.

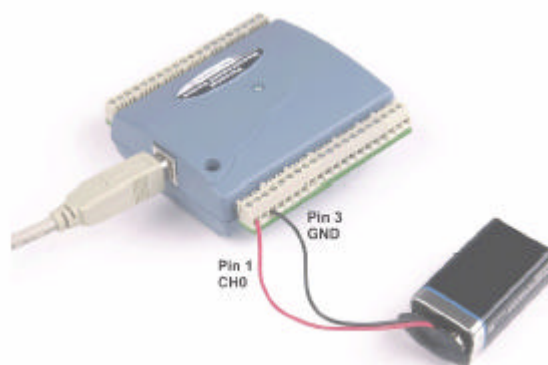


Figura 2.6. Conexión de tipo individual

2.3.4.2 Configuración diferencial

Si todas las entradas analógicas son configuradas como tipo diferencial, cuatro entradas analógicas están disponibles. En configuración diferencial, la señal de entrada es medida con respecto a la ingresada al pin Low Input.

La señal entrante es entregada a través de 3 cables:

- El cable que lleva la señal a ser medida conecta a CH0 IN HI CH1 IN HI, CH2 IN HI, o CH3 IN HI.
- El cable que lleva la señal de referencia conecta a CH0 IN LO, CH1 IN LO, CH2 IN LO, o CH3 IN LO.
- El tercer cable conecta a GND.

En configuración diferencial, un amplificador de ganancia de precisión programable (PGA) está disponible para proveer ganancias de hasta 20 veces y un rango de hasta 16 bits. En configuración diferencial, los rangos de voltajes son de $\pm 20V_{DC}$, $\pm 10V_{DC}$, $\pm 5V_{DC}$, $\pm 4V_{DC}$, $\pm 2.5V_{DC}$, $\pm 2.0V_{DC}$, $\pm 1.25V_{DC}$, y $\pm 1.0V_{DC}$.

En configuración diferencial, los siguientes dos parámetros deben cumplirse para lograr la linealización:

- Cualquier entrada analógica debe mantenerse en el rango -10V a +20V con respecto a tierra todo el tiempo.
- El voltaje diferencial máximo en cualquier par de entradas analógicas debe mantenerse en los rangos de voltaje seleccionados.

La entrada (voltaje del común + señal) de la entrada diferencial debe mantenerse en el rango de $-10V_{DC}$ a $+20V_{DC}$, para obtener los resultados deseados.

Por ejemplo, se ingresa una señal senoidal de 4Vpp al CH HI, y se aplica la misma señal senoidal desfasada 180° al CH LO. El voltaje del común es 0V. El voltaje diferencial de entrada va desde $4V_{DC} - (-4V_{DC}) = 8V_{DC}$ a $-4V_{DC} - 4V_{DC} = -8V_{DC}$. Ambas entradas satisfacen el rango de entrada dispuesto de $-10V_{DC}$ a $+20V_{DC}$, y el voltaje diferencial es apropiado para el rango de entrada de $\pm 10V_{DC}$ (ver figura 2.7).

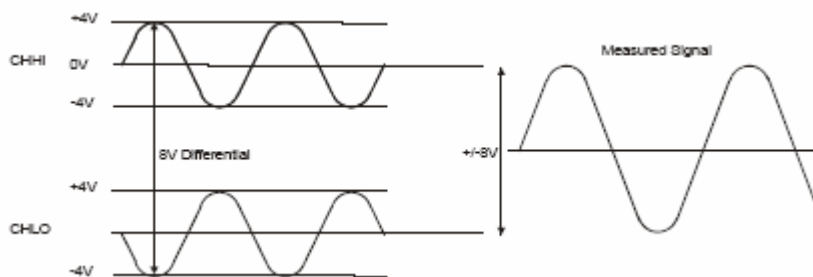


Figura 2.7. Ejemplo de voltaje diferencial

La siguiente tabla muestra algunas posibles entradas y los resultados esperados.

Tabla 2.2. Ejemplos de entradas y resultados de la tarjeta PMD-1208LS

CH HI	CH LO	Resultado
-20 V _{DC}	0 V _{DC}	No válido
-15 V _{DC}	+5 V _{DC}	No válido
-10 V _{DC}	0 V _{DC}	-10 V _{DC}
-10 V _{DC}	+10 V _{DC}	-20 V _{DC}
0 V _{DC}	+10 V _{DC}	-10 V _{DC}
0 V _{DC}	+20 V _{DC}	-20 V _{DC}
+10 V _{DC}	-10 V _{DC}	+20 V _{DC}
+10 V _{DC}	0 V _{DC}	+10 V _{DC}
+15 V _{DC}	-5 V _{DC}	+20 V _{DC}
+20 V _{DC}	0 V _{DC}	+20 V _{DC}

2.3.5 Pines de entrada/salida digitales (Port A0 a Port A7, y Port B0 a B7)

Se puede conectar hasta 16 entradas/salidas digitales a la bornera que contiene los pines 21 al 40 (Port A0 a Port A7, y Port B0 a B7). Se puede configurar cada pin digital sea ya para entrada o salida.

Cuando se configura para entrada, se puede usar los pines de entrada/salida digitales para detectar el estado de una entrada TTL. Refiérase al switch mostrado en la figura 2.8 y el esquemático en la figura 2.9. Si el switch es puesto en +5V_{DC}, Port A0 lee Verdadero (1). Si el switch es conmutado a GND, Port A0 lee Falso (0).

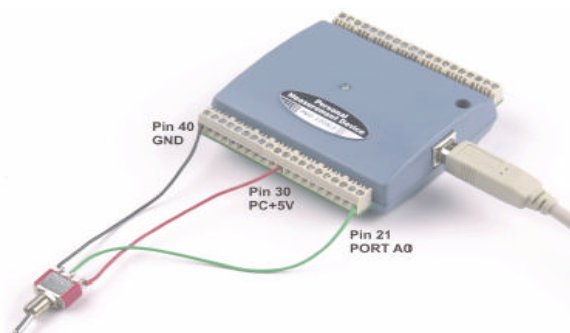


Figura 2.8. La conexión digital Port A0 detecta el estado del switch

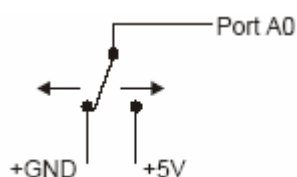


Figura 2.9. Esquemático switch conectado al Port A0

2.3.6 Terminal VCC

El terminal PC +5V_{DC} está localizado en el pin 30 en la bornera inferior de la tarjeta. El terminal entrega el voltaje originado desde el puerto USB. El terminal de Vcc es una salida de 5V_{DC} que es suministrada desde el PC.

La corriente máxima total de salida que puede ser entregada desde todas las conexiones de la PMD-1208LS (Vcc, salidas analógicas y digitales) es 500 mA. Este máximo aplica a la mayoría de PCs y hubs USB auto-alimentados. Las computadoras portátiles pueden estar limitadas a una corriente de salida de 100 mA.

El simple hecho de conectar la PMD-1208LS a la computadora utiliza 20 mA de corriente desde la alimentación de +5V_{DC} USB. Una vez que las aplicaciones empiezan a funcionar con la tarjeta, cada entrada/salida digital puede entregar hasta 2.5 mA, y cada salida analógica puede entregar hasta 30 mA. La cantidad máxima de corriente disponible al usuario es la diferencia entre *el total de corriente requerida* de la PMD-1208LS (dependiendo de la aplicación), y la *corriente permitida* por la PC (así 500 mA para PCs de escritorio y hubs alimentados autónomamente, o 100 mA para computadoras portátiles).

Con todas las salidas a su máxima corriente de salida, se puede calcular la corriente total requerida por los +5V_{DC} USB de la PMD-1208LS de la siguiente manera:

$$(PMD-1208LS @ 20 \text{ mA})+(16 \text{ DIO @ } 2.5 \text{ mA c/u})+(2 \text{ AO @ } 30 \text{ mA c/u})=120\text{mA}$$

Para que una aplicación sea ejecutada en una PC o en un hub, este valor proporciona un valor máximo de corriente de 500 mA – 120 mA = 380 mA. Este valor es la corriente total máxima disponible en los terminales de PC+5V_{DC}. Measurement Computing recomienda que se trabaje con un factor de 20% bajo este valor de carga máxima de corriente para sus aplicaciones. Un rango seguro y conservador en este caso sería de máximo 300 a 320 mA.

Debido a que las computadoras portátiles típicamente permiten hasta 100 mA, la PMD-1208LS funcionando a toda su carga debería estar sobre lo permitido por la computadora. En este caso, se debe determinar la carga existente por terminal en la aplicación para asegurar que no se rebase un criterio de carga máxima. La carga por Terminal es calculada simplemente al dividir los +5V_{DC} para la impedancia de la carga del terminal en cuestión.

2.3.7 Pines de tierra

Existen 10 pines idénticos de tierra que proveen una tierra común para todas las funciones de la PMD-1208LS. Refiérase al diagrama de pines en la figura 2.5 para la ubicación de los pines de GND.

2.3.8 Pin de calibración

El pin CAL está localizado en el pin 16 de la bornera inferior de la tarjeta. Este pin es usado solamente para propósitos de calibración. La calibración de la PMD-1208LS es controlada vía software a través de *InstaCal*.

2.3.9 Pin Contador

La entrada al contador externo de eventos de 32 bits es hecha a través del pin 20 (CTR) en la bornera superior de la tarjeta.

El contador interno se incrementa cuando la entrada de voltaje CTR cambia de menos de un voltio a más de cuatro voltios. El contador puede contar en frecuencias de hasta 1 MHz.

2.3.10 Precisión de la PMD-1208LS

La precisión en general de cualquier instrumento está limitada por el error de los componentes dentro de un sistema. Muy a menudo, la resolución es incorrectamente usada para cuantificar el rendimiento de un equipo de medición. Mientras que “12 bits” o “1 parte en 4096” no indica qué puede ser determinado, este provee una pequeña indicación acerca de la calidad de la medición absoluta. Las especificaciones de precisión describen los resultados actuales que pueden ser realizados por un dispositivo de medición.

Existen tres clases de tipos de error, los cuales afectan la precisión de un sistema de medición:

- Offset
- Ganancia
- No linealidad

Las fuentes primordiales de error en la PMD-1208LS son el offset y la ganancia. La no linealidad es pequeña en la PMD-1208LS, y no es una fuente significativa de error comparada con el offset y la ganancia.

La figura 2.10 muestra una función de transferencia ideal, sin errores, de la PMD-1208LS. La precisión de la calibración de la PMD-1208LS es dependiente del rango. Se usa un rango de $\pm 10V_{DC}$ como ejemplo de qué se puede esperar cuando se realiza una medición en este rango.

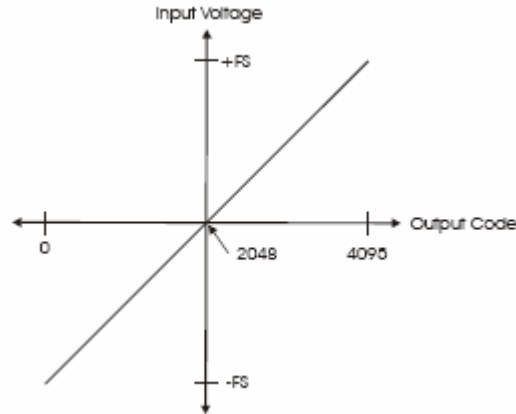


Figura 2.10. Función de transferencia ideal del ADC

El error de offset en la PMD-1208LS es medida a media escala. Idealmente, una entrada de cero voltios debería producir un código de salida de 2048. Cualquier desviación de esto es un error de offset. La figura 2.11 muestra la función de transferencia de la PMD-1208LS con un error de offset. Un típico error de offset en el rango de $\pm 10V_{DC}$ va en el orden de $\pm 9.77 mV_{DC}$. El error de offset afecta todos los códigos por igual al desviar toda la función de transferencia hacia arriba o abajo a lo largo del eje de entrada de voltaje.

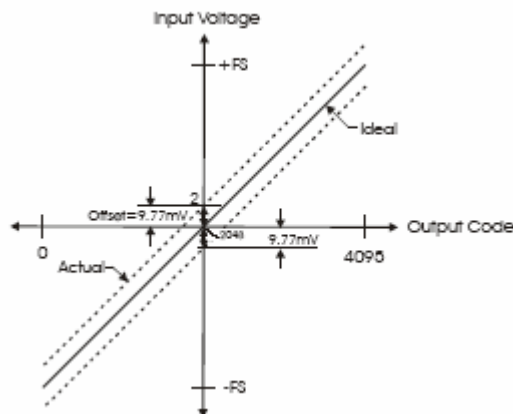


Figura 2.11. Función de transferencia del ADC con error de offset

El error de ganancia es un cambio en la pendiente de la función de transferencia desde lo ideal, y es típicamente expresado como un porcentaje de toda la escala. La figura 2.12 muestra una función de transferencia de la PMD-1208LS con un error de ganancia. El error de ganancia es fácilmente convertido a voltaje al multiplicar la escala total de entrada por el error.

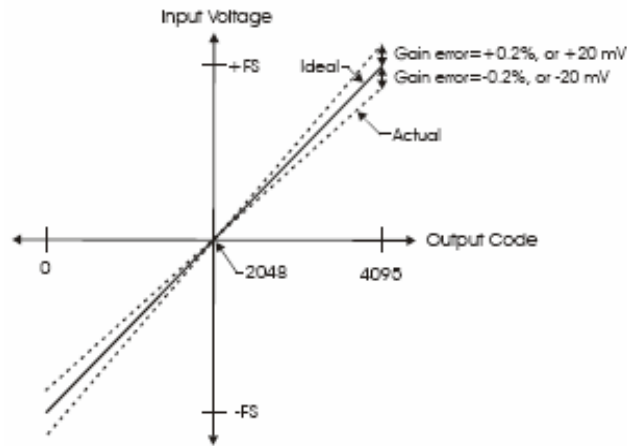


Figura 2.12. Función de transferencia del ADC con error de ganancia

Por ejemplo, la PMD-1208LS exhibe un típico error de ganancia de $\pm 0.2\%$ en todos sus rangos. Para el rango de $\pm 10V_{DC}$, esto resultaría en $10V_{DC} \times \pm 0.002 = \pm 20mV_{DC}$. Esto significa que, a escala total, olvidando el efecto de offset por el momento, la medición sería de hasta $20mV_{DC}$ del valor actual. Nótese que el error de ganancia es expresado como una proporción. Los valores cercanos a \pm la escala total son más afectados desde un voltaje absoluto que lo que son los valores cercanos a media escala, los cuales tienen poco o nada de error de voltaje.

Combinando estas dos fuentes de error, en la figura 2.13 abajo, se tiene un gráfico de la banda de error de la PMD-1208LS para el rango de $\pm 10V_{DC}$. Esta es una versión gráfica de la típica precisión de este producto.

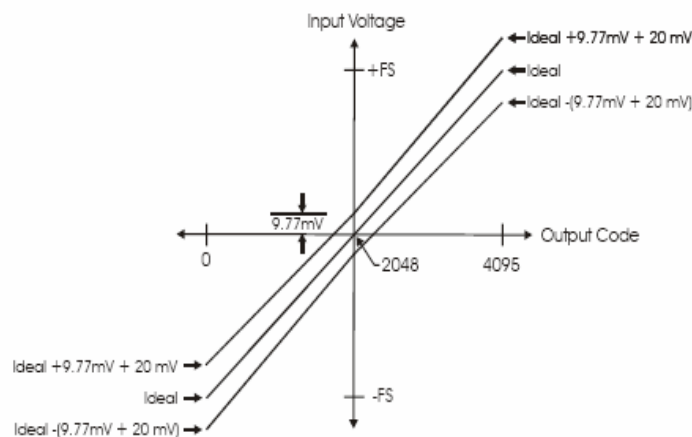


Figura 2.13. Gráfico de la banda de error

2.4 USO DE LA PMD-1208LS

2.4.1 Calibración y prueba con el software InstaCal

Con el procedimiento de calibración del software InstaCal se hacen las debidas correcciones de los errores de offset y ganancia que tienen las entradas de la PMD-1208LS. Estas correcciones se recomiendan hacer cada seis meses.

Para calibrar la PMD-1208LS, se debe hacer lo siguiente:

1. Ejecutar el programa InstaCal después de haber sido instalado.
2. En la ventana principal del programa, abrir el menú **Calibrate** y seleccionar A/D. Un dialogo de calibración de la tarjeta aparece, el cual guía paso a paso al usuario en la conexión de las entradas existentes con respecto a tierra y con el pin de calibración existente en el dispositivo.
3. Al terminar todos los pasos señalados en el dialogo de calibración, una ventana indicando que la calibración se ha completado, dando por terminado el procedimiento de calibración.

Para probar el funcionamiento correcto de la tarjeta PMD-1208LS, el programa mencionado contiene algunas rutinas, las cuales ayudarán al usuario paso a paso a verificarlo. En la ventana principal del programa, desplegar el menú **Test** y seleccionar ya sea **Digital** o **Analog**, para poder verificar la operación de entrada y salida en las entradas digitales o analógicas. Al dar concluidas con estas rutinas del programa, se podrá saber a ciencia cierta que la tarjeta está funcionando correctamente.

2.4.2 Cómo usar la PMD-1208LS con LabVIEW

Con la Librería Universal para LabVIEW que se incluye en el CD de instalación, se provee un set completo de instrumentos virtuales (VIs) para comunicarse con todo el hardware de la marca Measurement Computing. La forma más sencilla en comenzar a usar el software mencionado es utilizando y modificando los ejemplos incluidos en el disco de instalación. Los ejemplos contienen los requerimientos básicos que se necesitan para controlar y transferir

datos desde y hacia la tarjeta PMD-1208LS. Algunas características adicionales pueden ser añadidas al seleccionar nuevas funciones y ubicarlas en el diagrama de bloques de LabVIEW.

Pero si se necesita comenzar una aplicación desde cero, para encontrar los instrumentos virtuales instalados referentes a la PMD-1208LS, una vez inicializada un nuevo documento en LabVIEW, se necesitará hacer lo siguiente:

1. Ubicarse en el diagrama de bloques del nuevo documento, y seleccionar la paleta de funciones.
2. Deslizar el cursor hacia botón llamado **User Libraries**.
3. Una vez ejecutado el paso anterior, un set completo de funciones destinados para el uso de la tarjeta PMD-1208LS bajo el icono del fabricante de la tarjeta (Measurement Computing).
4. Hacer uso de las funciones mencionadas como cualquier otra función de LabVIEW.

Se recomienda utilizar los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, los cuales tienen la capacidad de adquirir y enviar datos analógicos a través de varios canales y con frecuencia de muestreo regulable, lo cual cubre las necesidades para la comunicación con el módulo CPTS-1.

Hay que tomar en cuenta que para su correcto funcionamiento la tarjeta PMD-1208LS debió haber sido conectada a la PC antes de abrir LabVIEW ya sea una aplicación nueva o anterior. Una descripción detallada del funcionamiento de todas las capacidades de la Librería Universal para LabVIEW está incluida en el documento *The Universal Library for LabVIEW User's Guide*, el cual es copiado a la PC al ser ejecutado el CD de instalación.

2.4.3 Instrumentos Virtuales básicos de LabVIEW para la PMD-1208LS

Con el fin de comunicar el sistema de entrenamiento CPTS-1 a la PC a través de la tarjeta PMD-1208LS, se debe utilizar las entradas y salidas de tipo analógico que la tarjeta dispone. Ningún dato de entrada/salida desde y hacia el sistema de

entrenamiento CPTS-1 es de tipo digital, por lo que se mostrará únicamente en la utilización de los terminales analógicos de la PMD-1208LS, los cuales nos servirán para cumplir el objetivo del proyecto. Una descripción detallada del funcionamiento de todas las capacidades de la Librería Universal para LabVIEW está incluida en el documento *The Universal Library for LabVIEW User's Guide*, el cual es copiado a la PC al ser ejecutado el CD de instalación.

Son cinco instrumentos virtuales básicos de la tarjeta PMD-1208LS los usados para ejecutar el objetivo del proyecto: AInScFg, AOutScFg, ToEng, OptAin y ErrMsg.

2.4.3.1 AInScFg.VI

Lee un rango de canales A/D y los almacena en un arreglo². Esta VI lee el especificado número de muestras A/D a una tasa de muestreo definida desde el rango de canales A/D de la tarjeta establecida. Si la tarjeta tiene alguna ganancia programada, establece la ganancia a su rango especificado. Los datos recibidos son retornados al arreglo de datos.

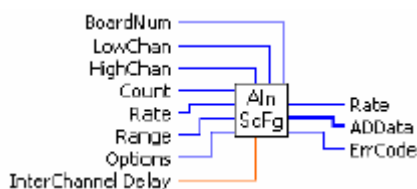


Figura 2.14. Función AInScFg y sus argumentos

Los argumentos de la VI AInScFg son los siguientes:

BoardNum: Es un argumento de entrada, en el cual se debe indicar el número de tarjeta establecido al ser instalado la misma en el programa InstaCal. Puede ser del 0 a 100.

LowChan: Primer canal A/D a leer.

HighChan: Último canal A/D a leer.

² MEASUREMENT COMPUTING, *Universal Library User's Guide*, 2004

Count: Especifica el total de muestras A/D que serán leídos. Si más de un canal está siendo muestreado, entonces el número de muestras leídas por canal equivale a $\text{Count}/(\text{HighChan} - \text{LowChan} + 1)$.

Rate: Esta es la tasa a la que la lectura es activada. Si se está muestreando 4 canales, 0 -3, entonces al especificar una tasa de 10000 muestras por segundo (10 kS/s) resultará en una tasa de conversión A/D de 40 kS/s. (4 canales a 10000 muestras por canal por segundo).

Range: Rango a utilizar en el terminal de lectura.

Options: Opciones adicionales configurables desde OptAin.vi.

InterChannelDelay: Retardo en segundos entre canales en una muestra.

Rate(salida): Tasa actual a la que la tarjeta es muestreada.

AddData: Arreglo de datos donde se almacena los valores A/D. Este valor está en unidades crudas.

ErrCode: Señal de salida que presenta el estado actual de funcionamiento de la tarjeta.

2.4.3.2 AOutScFg.VI

Establece el valor de salida analógico en un rango de canales, desde la tarjeta especificada.

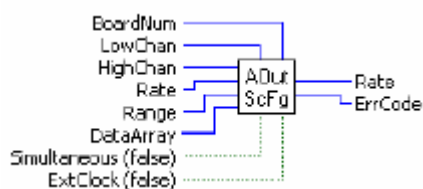


Figura 2.15. Función AOutScFg y sus argumentos

Los argumentos de la VIAOutScFg son los siguientes:

BoardNum: Es un argumento de entrada, el cual debe indicar el número de tarjeta establecido al ser instalado la misma en el programa InstaCal. Puede ser del 0 a 100.

LowChan: Primer canal A/D a leer.

HighChan: Último canal A/D a leer.

Rate: Tasa de muestreo en muestras por segundo.

Data Array: Arreglo de datos desde donde salen los valores D/A.

Simultaneous: Modo de actualización simultánea (no disponible para el modelo de tarjeta PMD-1208LS).

Range: Rango a utilizar en el terminal de escritura. Puede ser de máximo de 0 a 5 Voltios.

ExtClock: Velocidad de conversión establecida desde la señal de pin de disparo en vez de un reloj interno.

ErrCode: Señal de salida que presenta el estado actual de funcionamiento de la tarjeta.

Rate (salida): Tasa de salida actual en muestras por segundo.

2.4.3.3 ToEng.VI

Convierte una muestra de la entrada analógica de unidades crudas a su equivalente en voltaje.

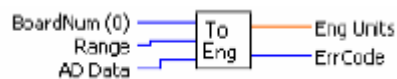


Figura 2.16. Función ToEng y sus argumentos

Los argumentos de la VI ToEng son los siguientes:

BoardNum: Es un argumento de entrada, el cual debe indicar el número de tarjeta establecido al ser instalado la misma en el programa InstaCal. Puede ser del 0 a 100.

Range: Rango a utilizar en el terminal lectura.

AD Data: Valor crudo de entrada retornado por la tarjeta a ser transformado.

EngUnits: Valor de salida equivalente en voltaje. El valor estará en el rango especificado.

ErrCode: Señal de salida que muestra el estado de la conversión.

2.4.3.4 OptAin.VI

Genera la entrada *option* para AInScFg.vi.

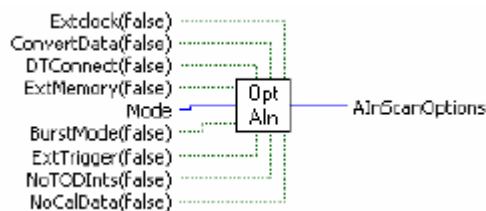


Figura 2.17. Función OptAin y sus argumentos

Los argumentos de la VI OptAin son los siguientes:

ExtClock: Establece si es verdadero, el reloj externo, o reloj interno si es falso.

ConvertData: Si es verdadero, separa los datos y nombres de los canales.

DTConnect: Usada para activar la opción DT Connect.

ExtMemory: Los datos son retornados a un buffer de datos.

BurstMode: Habilita opción de modo forzado (burst mode).

ExtTrigger: Si esta opción es especificada, el muestreo no comenzará hasta que la condición de disparo no se cumpla (alto o bajo).

NoToDints: Si la opción es activada, la interrupción system's time-of-day son deshabilitadas por la duración del muestreo.

NoCalData: Deshabilita la calibración por software para las tarjetas que son calibradas al aplicar factores a los datos. Necesario para altas velocidades de muestreo en procesadores menores a 150MGz Pentium.

AinScanOptions: Todas las entradas son juntadas y el resultado es pasado a este parámetro para ser entrada en AInScFg.VI.

2.4.3.5 ErrMsg.VI

Retorna el mensaje de error asociado con un código de error. Cada VI retorna un código de error. Si el código de error no es igual a cero, indica que un error ha ocurrido. Usar esta VI para convertir un código de error en un mensaje descriptivo del error.

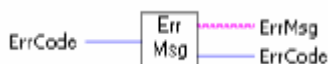


Figura 2.18. Función ErrMsg y sus argumentos

Los argumentos de la VI ErrMsg son los siguientes:

ErrCode: Señal de entrada retornada por alguna VI.

ErrMsg: Mensaje de error retornado aquí.

ErrCode: Código de error o 0 si no lo hubiera.

2.5 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DEL MODULO CPTS-1

En función de que el sistema de entrenamiento CPTS-1 pueda comunicarse eficientemente con la tarjeta PMD-1208LS, se procedió a revisar los rangos de voltaje y corriente con los que los actuadores y sensores del módulo funcionan y con los que se comunicaban con su anterior controlador, un PLC. Se encontró que estas señales fueron acondicionadas para trabajar en los rangos de 0 a 5 V_{DC} para el sensor de nivel, de 0 V a 10 V_{DC} para los sensores de temperatura, de 4 a 20 mA para su sensor de flujo, y con señales de control que provenían del PLC en los rangos de 0 a 10 V_{DC} para las bombas y las niquelinas.

Tomando en cuenta que la tarjeta PMD-1208LS tienen los rangos de trabajo máximo en sus terminales analógicos de 0 a 5 V_{DC} en sus dos salidas, y de -10 a 20 V_{DC} en sus entradas, y que esta además no está preparada para medir señales de corriente directamente, es necesario hacer un acondicionamiento previo en las señales de control de los actuadores (bombas y niquelinas) y en la señal de corriente emitida por el sensor de flujo.

Se analiza a continuación una por una las necesidades cambio de los actuadores y sensor de flujo del sistema de entrenamiento CPTS-1 para su funcionamiento, y se indica la solución tomada para que la tarjeta PMD-1208LS pueda ejercer la función de nuevo controlador del sistema de entrenamiento CPTS-1 y comunicarse eficientemente con el mismo.

2.5.1 Acondicionamiento de la señal de control de las bombas

Como ya fue expuesto en el anterior capítulo, las bombas del sistema de entrenamiento CPTS-1 fueron diseñadas para que fueran controladas con un rango de voltaje de 0 a 10 V_{DC} por un PLC. Partiendo de que la PMD-1208LS puede tener una salida de 0 a 5 V_{DC} máximo, se realizó una pequeña tarjeta extra

de acondicionamiento que transforme del rango de funcionamiento de la tarjeta, al rango de funcionamiento de la bomba. Esto se lo hizo con un amplificador operacional, un LM324, el cual tiene 4 amplificadores, suficiente para amplificar las dos señales de control de las dos bombas existentes, en los cuales se duplica el voltaje que la PMD-1208LS puede conceder, y entregar este voltaje a las tarjetas de acondicionamiento de corriente ya existentes que controlan las bombas (ver figura 1.5). A continuación, en la figura 2.19 se describe el circuito realizado:

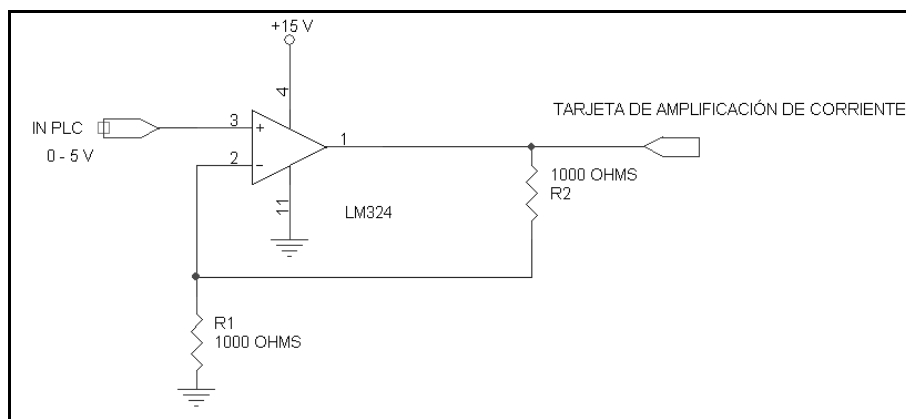


Figura 2.19. Circuito de acondicionamiento de voltaje de bomba

La ganancia en este circuito esta dada por:

$$\text{Ganancia} = 1 + (R2 / R1),$$

Y debido a que se necesita una ganancia igual a dos, se utiliza 2 resistencias de 1000 ohmios en R2 y R1, entonces:

$$\text{Ganancia} = 1 + (1000/1000)$$

$$\text{Ganancia} = 2$$

Obteniendo el resultado deseado.

2.5.2 Acondicionamiento de la señal de control de las niquelinas

Partiendo otra vez del diseño anterior del sistema de entrenamiento CPTS-1, se encuentra que las niquelinas están acondicionadas para que funcione bajo el mando de un voltaje de 0 a 10 V_{DC}, el cual es transformado a un rango de 0 a 6 V_{DC}, debido a que las tarjetas de control de las niquelinas trabajan en función del circuito integrado CA3059 (ver anexo 2), el cual tiene un rango de trabajo de 0 a 6 V_{DC}, como ya fue señalado en el capítulo uno.

Es por esto que, en este caso, si existe un acondicionamiento del rango de voltaje del controlador, el cual va en el orden de 10/6, como está expuesto extensamente en el punto 1.2.4.1. El circuito empleado en este caso es el siguiente:

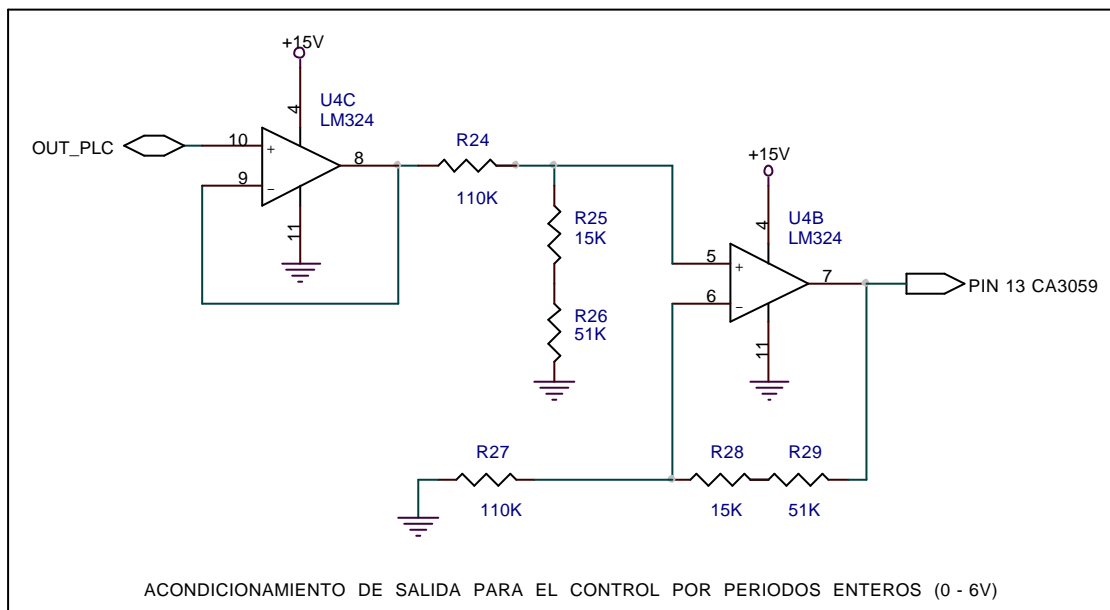


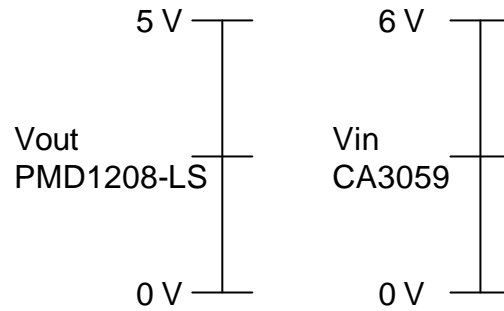
Figura 2.20. Circuito anterior de acondicionamiento para el CA3059

Se utilizó este circuito porque:

$$\frac{V_{in_{CA3059}}}{V_{out_{PLC}}} = \frac{R_f}{R_i} = 0.6 \quad \Rightarrow \quad R_f = 0.6R_i$$

$$\text{Y } R_i = 110 \text{ K}\Omega \quad R_f = 66 \text{ K}\Omega$$

Ahora, se necesita que la función de transferencia sea de la siguiente forma:



$$\frac{V_{in_{CA3059}}}{V_{out_{PMD1208-LS}}} = \frac{6}{5} = 1.2$$

Como:

$$\frac{V_{in_{CA3059}}}{V_{out_{PMD1208-LS}}} = \frac{R_f}{R_i} = 1.2 \Rightarrow R_f = 1.2R_i$$

Entonces se tiene que:

$$R_i = 1K\Omega \text{ y } R_f = 1.2K\Omega$$

Por lo que el circuito de la tarjeta será modificado únicamente en sus resistencias y quedará como se indica en la figura 2.21 a continuación:

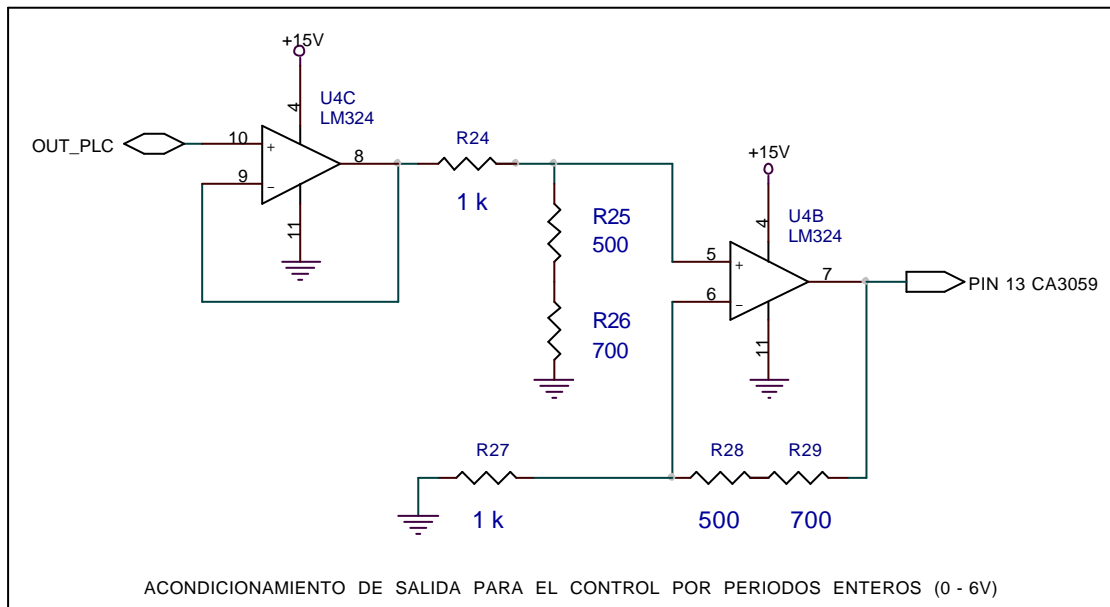


Figura 2.21. Cambios propuestos para el circuito de acondicionamiento para el CA3059

El funcionamiento del circuito está descrito más ampliamente en el punto 1.2.4.1.

2.5.3 Acondicionamiento de la salida del medidor de flujo

Como ya se expuso en el capítulo uno, el sistema de entrenamiento CPTS-1 utiliza un medidor de flujo alimentado por un voltaje de 24 V_{DC}, de rango de medición de 1 – 150 cm/seg, la cual se expresa en su salida analógica de 0(4) – 20 mA. Como ya se sabe, la tarjeta PMD-1208LS no está preparada para leer directamente señales de corriente, por lo que se tiene que transformar esta señal en voltaje, tomando en cuenta los rangos de medición aceptables para la PMD-1208LS. Para esto simplemente se necesita hacer pasar la señal de corriente a través de una carga, una resistencia en este caso, y de cuyo valor dependerá el rango de voltaje resultante.

Se ha optado por transformar el rango de corriente de 0 a 20 mA, a un rango de 0 a 10 V_{DC}, y tomando en cuenta que:

$$\text{Resistencia [O]} = \text{Voltaje [V]} / \text{Corriente[A]},$$

$$\text{Resistencia [O]} = 10 \text{ [V]} / 0.02 \text{ [A]},$$

$$\text{Resistencia} = 500 \text{ [O]}$$

Por lo que se coloca una resistencia de 500 ohmios entre el terminal de salida del sensor de flujo y tierra, específicamente entre el jack del sensor de flujo derecho y su correspondiente tierra.

CAPÍTULO III

DISEÑO DE PRÁCTICAS CONVENCIONALES DE CONTROL

En muchos procesos industriales es inevitable controlar magnitudes como presión, flujo, temperatura, nivel, velocidad, conductividad, ph, etc; y emplear una técnica a dichos controles para que la aplicación cumpla con un ciclo de trabajo preestablecido.

En la actualidad se han desarrollado procesos que tienen una mayor complejidad y que exigen una automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control.

Los instrumentos de medición y control permiten el mantenimiento y la regulación de estas magnitudes en mejor forma que el propio operador, y que le liberan de una presencia permanente dentro del proceso a cambio de una labor de supervisión y análisis.

Hoy en día se ha conseguido una alta sofisticación en las tareas de producción y esto es debido a que en todos los procesos de la industria se han aplicado técnicas específicas de control.

La finalidad del usuario del sistema de entrenamiento es que se relacione de una manera más directa con las técnicas de control aplicadas en la industria y con las mediciones mediante los instrumentos adecuados, realizadas en las mismas.

Este sistema está basado en un módulo, su diseño debe tomar como punto de partida la determinación de las necesidades que este debe satisfacer.

Los requerimientos del módulo, están enfocados en razón de las técnicas de control que serán aplicadas a dicho equipo.

Las técnicas de control han sido seleccionadas por su importancia e influencia en los procesos industriales.

Por tanto, el propósito del módulo de entrenamiento CPTS-1 está encaminado para que se puedan realizar las prácticas que envuelven las siguientes técnicas de control:

- Control PID
- Control en cascada
- Control anticipativo
- Control de superposición
- Control Selectivo.

3.1 CONTROL PID

3.1.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control proporcional integral derivativo.

3.1.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 3.1.

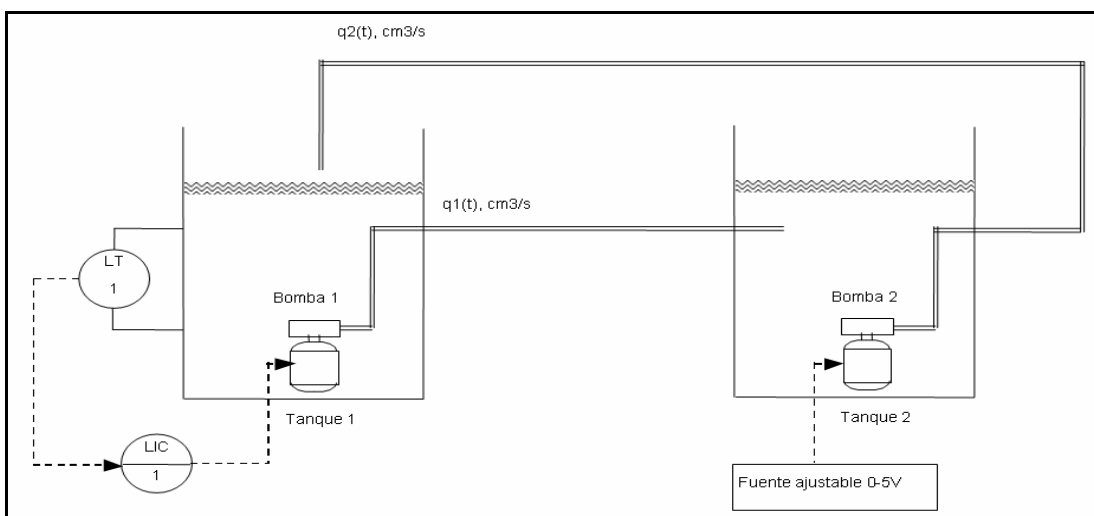


Figura 3.1. Diagrama P&ID del control PID

Emplear los componentes en la forma que el diagrama P&ID muestra en la figura 3.1.

Implementar un controlador PID de nivel, de manera que se pueda ajustar el punto de control del nivel de líquido del tanque 1 dentro del rango especificado del equipo (10 cm a 30 cm). El sistema deberá ser sintonizado adecuadamente utilizando un criterio de ingeniería apropiado basándose en los métodos existentes.

En este proceso se medirá el nivel existente en el tanque 1 y se actuará sobre la transferencia de líquido de un tanque al otro. Los tanques tendrán un nivel de agua de 30 cm, aproximadamente 7,13 galones cada uno.

La bomba eléctrica 1 debe ser manejada por la salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS, la bomba eléctrica 2 será manejada por una entrada offset de 0-5V_{DC} procedente de la fuente ajustable, para añadir perturbaciones al proceso y mantener una recirculación del líquido.

El medidor de nivel entregará una señal analógica de 0-5V_{DC}, que representará el nivel existente del tanque 1, la cual será recibida por el LIC1. Dicha señal se comparará con el punto de control y se enviará una señal analógica de 0-5V_{DC} que irá hacia el actuador (bomba eléctrica 1) para mantener el nivel del primer tanque en el punto de control. El LIC1 constituirá un controlador PID con parámetros K_c , T_i y T_D , que se deberán ajustar para obtener un control satisfactorio.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores de alarmas de nivel alto y bajo, del valor del punto de control (SP), en cm, el valor en línea del nivel (PV) y el estado de la variable manipulada (MV); incluir también la gráfica de las variables controladas y un acceso a la sintonización, con controles de ajuste de la constantes PID, que deberán encontrarse en forma digital.

3.1.3 Fundamento teórico

Control proporcional¹

Matemáticamente, la ecuación que define este tipo de control viene dada por:

$$m(t) = m_o + K_c (r(t) - c(t)) \quad (1)$$

$$m(t) = m_o + K_c e(t) \quad (2)$$

En donde:

$m(t)$ = salida del controlador

$r(t)$ = punto de control

$c(t)$ = variable que se controla, esta señal es la que llega del transmisor.

$e(t)$ = señal de error

K_c = ganancia del controlador

m_o = valor base o bias. Es la salida del controlador cuando el error es cero.

La ecuación 1 es para un controlador de acción inversa, si la variable que se controla, $c(t)$, se incrementa en un valor superior al punto de control, $r(t)$, el error se vuelve negativo y, como se ve en la ecuación, la salida del controlador, $m(t)$, decrece. La manera común con que se designa matemáticamente un controlador de acción directa es haciendo negativa la ganancia del controlador K_c . La ganancia negativa se utiliza cuando se hace el análisis matemático de un sistema de control en la que se requiere un controlador de acción directa.

En las ecuaciones 1 y 2 se ve que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla; la proporcionalidad la da la ganancia del controlador K_c ; con esta ganancia se determina cuanto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error.

Cuanto mayor es la ganancia, tanto menor es la desviación, sin embargo, arriba de cierto K_c , la mayoría de los procesos se vuelven inestables. La cantidad de alejamiento del punto de operación, o desviación, depende de la ganancia del controlador.

¹ ORTIZ, Hugo R., *Instrumentación y Sistemas de Control*, 1998

Por lo general, en la industria no se usa el término de ganancia para designar la sensibilidad del controlador, sino que se utiliza el término Banda proporcional PB, y su relación con K_c es la siguiente:

$$PB = \frac{100}{K_c}$$

Los controladores que son únicamente proporcionales tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste, K_c , sin embargo adolecen de una gran desventaja, operan con una desviación, o error de estado estacionario en la variable que se controla.

Control proporcional integral

La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una sola desviación, es decir, se debe aplicar un reajuste de valores en el momento que se alcanza el punto de control, y para esto se debe añadir inteligencia al controlador proporcional.

Esta nueva inteligencia o modo de control es la acción integral o de reajuste, convirtiéndose en un controlador proporcional integral. La siguiente es la ecuación descriptiva:

$$m(t) = m_o + K_c (r(t) - c(t)) + \left(\frac{K_c}{T_i} \right) \int (r(t) - c(t)) \quad (3)$$

$$m(t) = m_o + K_c e(t) + \left(\frac{K_c}{T_i} \right) \int (e(t)) \quad (4)$$

Donde T_i es el tiempo de integración o reajuste (minutos/repetición), frecuentemente *reset time*. Por lo tanto el controlador tiene dos parámetros, K_c y T_i que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio.

T_i es el tiempo que le toma al controlador repetir la acción proporcional. Tanto menor es el valor de T_i , cuanto más pronunciada es la curva de respuesta, lo cual hace que la respuesta del controlador se haga más rápida.

Observando la ecuación 4, tanto menor es el valor de T_i , cuanto mayor es K_c/T_i , mayor peso tiene la acción integral o de reajuste, entonces, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta, es decir integrando el error, para eliminarlo.

Control proporcional integral derivativo

A veces se añade al controlador proporcional integral la parte derivativa, que también se conoce como rapidez de derivación. Tiene como propósito anticipar hacia donde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación descriptiva es:

$$m(t) = m_o + K_c e(t) + \left(\frac{K_c}{T_i} \right) \int (e(t)) + K_c T_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (5)$$

En donde T_D es la rapidez de derivación en minutos.

La cantidad de anticipación se decide mediante el valor del parámetro de ajuste T_D . Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas.

3.1.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de nivel
6. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
7. Tubería de retorno de agua
8. Manguera A1

9. Tarjeta PMD-1208LS
10. Fuente externa de 24V_{DC}
11. Cables de conexión.

3.1.5 Procedimiento

1. Conectar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques, el uno a una altura de 20cm, y el otro a 15cm.
4. Colocar en su posición al sensor de nivel y conectar el cable M12 asignado al mismo.

Estos pasos se resumen en la gráfica 3.2.

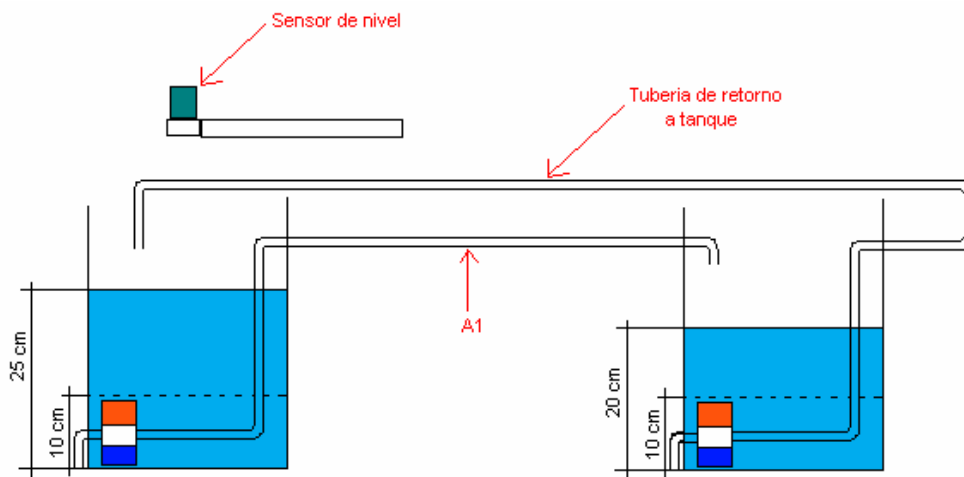


Figura 3.2. Conexiones del módulo para el Control PID de Nivel

5. Conectar la salida del sensor de nivel LT1 a una entrada analógica de la tarjeta PMD-1208LS.
6. La bomba de desalojo (bomba 1) será manejada a través de la tarjeta PMD-1208LS por la PC. Se utilizará una salida analógica de la misma para que con cables conectores, la PC controle el desalojo de agua.
7. La bomba de abastecimiento (bomba 2) será manejada con la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo. Con cables conectores, realizar las conexiones adecuadas para que la fuente variable maneje las bomba 2.

8. Elaborar el programa para la visualización y control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1, y además el algoritmo de control PID que gobernará el sistema.
9. Establezca una tasa de 8000 muestras por segundo para la adquisición de la señal de nivel y los valores de $K_p=100$, $K_i=0$ y $K_d=0$, límite bajo 349 y límite 1023, para las constantes del controlador PID.
10. Ejecute un cambio de set point de 20 cm a 10 cm y obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 0 a 90%), T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP) y e_{ss} (error estacionario).
11. Repita el paso anterior con $K_p = 200$
12. Repita el paso 10 con $K_p = 180$, $K_i = 3000$ y $K_d = 0$.
13. Repita el paso 10 con $K_p = 200$, $K_i = 6000$ y $K_d = 0$.
14. Repita el paso 10 con $K_p = 200$, $K_i = 3000$ y $K_d = 1$.
15. Haga que el sistema alcance un set point de 15 cm, y una estabilizado, provoque una perturbación al establecer un flujo de retorno con $3 V_{DC}$ en la bomba del tanque derecho y obtenga gráficamente la variable del proceso y la variable manipulada del sistema.

3.2 CONTROL EN CASCADA

3.2.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control en cascada.

3.2.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 3.3.

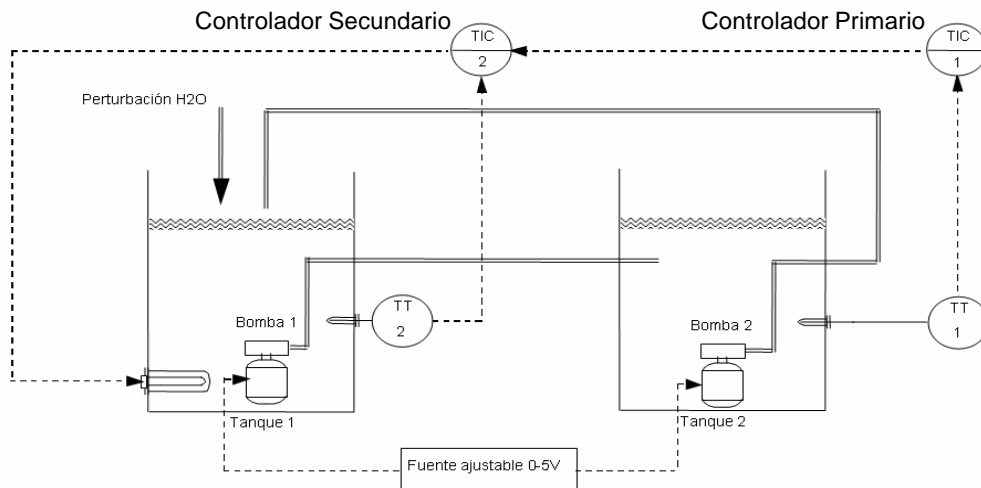


Figura 3.3. Diagrama P&ID del Control en Cascada

Emplear el tanque 1, tanque 2, sus bombas eléctricas correspondientes y los sensores de temperatura en la configuración mostrada por el diagrama P&ID de la figura 3.3.

Implementar un control en cascada, de manera que se pueda ajustar el punto de control de la temperatura del tanque 2 (primario) dentro del rango especificado del equipo (20°C a 70°C), controlando la temperatura a la que se halla el líquido en el tanque 1 (secundario).

En este proceso se realizará la medición de temperatura existente en el tanque 1 y en el tanque 2, y se actuará variando la temperatura del líquido contenido por el tanque 1 mediante las niquelinas situadas en la mitad del tanque 1.

Las bombas que hacen circular el agua de uno a otro tanque, estarán impulsadas por la fuente ajustable $0-5\text{V}_{\text{DC}}$, para mantener un mismo nivel de agua y la autonomía del proceso.

Los tanques tendrán un nivel de agua de 15 cm, aproximadamente 3,56 galones cada uno.

El punto de control se asignará al controlador de temperatura del tanque primario TIC1, el cual enviará una señal de control que reajustará el set point del

controlador secundario TIC2, que también dispondrá de una señal analógica de 0-10V_{DC} proveniente del sensor de temperatura del tanque secundario, y actuará sobre las niquelinas para mantener la temperatura del líquido del tanque 2 (primario) en el punto de control requerido al estar circulando constantemente el agua de un tanque hacia otro.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores del valor del punto de control (SP), en °C, el valor en línea de las temperaturas de los tanques y el estado de la variable manipulada (MV); incluir también la gráfica de las variables controladas y un acceso a la sintonización de los dos controladores PID, con controles de ajuste de las constantes PID, que deberán encontrarse en forma digital.

3.2.3 Fundamento teórico

El objetivo del control en cascada es mejorar la estabilidad de una variable del proceso aún con una óptima sintonización del controlador en lazo retroalimentado.

Esta técnica de control es aconsejable cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- El bucle simple no da una respuesta satisfactoria (proceso de dinámica lenta, tiempo muerto grande en relación a la constante de tiempo, sometido a perturbaciones significativas).
- Existe una variable secundaria, medible a costo razonable, cuya dinámica es más rápida que la de la variable primaria. De esta forma, el bucle interno controla la variable secundaria antes de que el efecto de la perturbación se propague a la variable primaria (variable controlada) de forma significativa.

La estructura de **control en cascada** se caracteriza por dos controladores realimentados anidados, siendo la salida del primario (maestro) el punto de consigna del controlador secundario (esclavo). La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso.

Considerando el sistema de control planteado en esta práctica, cuyo diagrama de bloques es el de la figura 3.4, en este sistema la temperatura del líquido del tanque B se controla mediante la manipulación de la temperatura del tanque A.

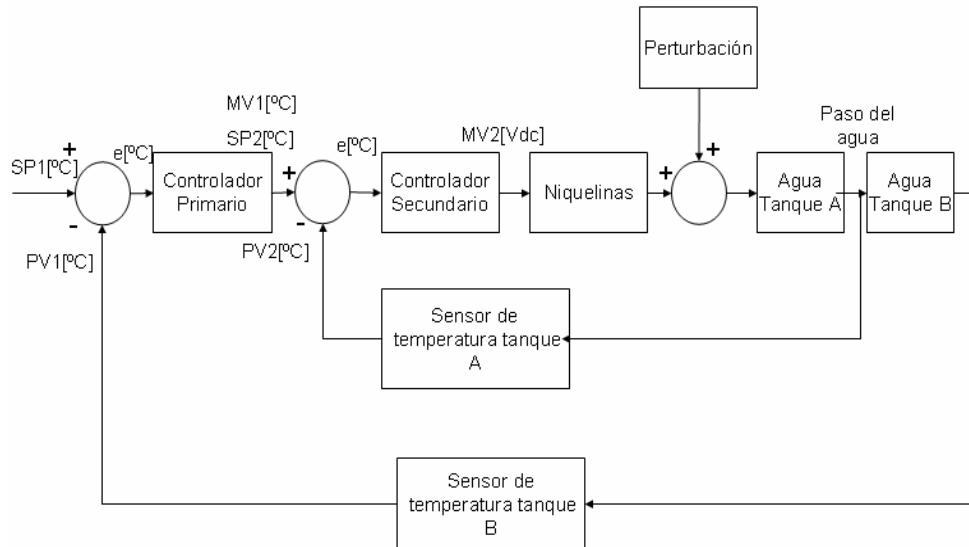


Figura 3.4. Diagrama de bloques del control en cascada

El controlador primario fija la consigna del controlador secundario, cuyo objetivo es corregir el efecto de las niquelinas y de cualquier perturbación sobre la temperatura del tanque A antes de que estos valores afecten de forma significativa a la temperatura del tanque B al circular el agua de un tanque al otro.

En la presente práctica, se dispone del sensor de temperatura tanque A, cuya dinámica es más rápida que la de la temperatura B al tener el actuador de temperatura (niquelinas) ubicado localmente. La ventaja aquí radica en que se puede controlar el bucle interno del tanque A antes que el efecto de la perturbación de las niquelinas se traslade a la temperatura del tanque B y la afecte significativamente.

Resumiendo y generalizando para cualquier proceso, para que un sistema de control en cascada esté bien aplicado en cualquier proceso, es necesario lo siguiente:

1. Localizar las variables más importantes del proceso.
2. Localizar la variable básica a controlar.

3. Localizar la variable que introduce la inestabilidad.
4. Determinar la velocidad de cambio de ambas señales.
5. Hacer un arreglo en cascada, de tal forma que el lazo mayor sea más lento y el controlador también (control principal).
6. El lazo menor deberá contener la variable más rápida y el controlador debe ser de respuesta con retardos mínimos (control secundario).
7. El controlador del lazo menor deberá sintonizarse con la ganancia más alta posible.

3.2.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de temperatura 1
6. Sensor de temperatura 2
7. Niquelina
8. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
9. Tarjeta PMD-1208LS
10. Tubería de retorno
11. Manguera A1
12. Cables de conexión.

3.2.5 Procedimiento

1. Comunicar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques a 15cm.
4. Se usarán dos sensores de temperatura, el del tanque 1 irá a la tarjeta "TEMPERATURA 1", y el sensor parte inferior del tanque 2 irá en la tarjeta "TEMPERATURA 2".
5. Se usarán las dos niquelinas posicionadas en el tanque izquierdo que serán manejadas por el controlador (PC). Hacer las conexiones necesarias para que

la PC maneje las niquelinas a través de una salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS.

Estos pasos se resumen en la figura 3.5.

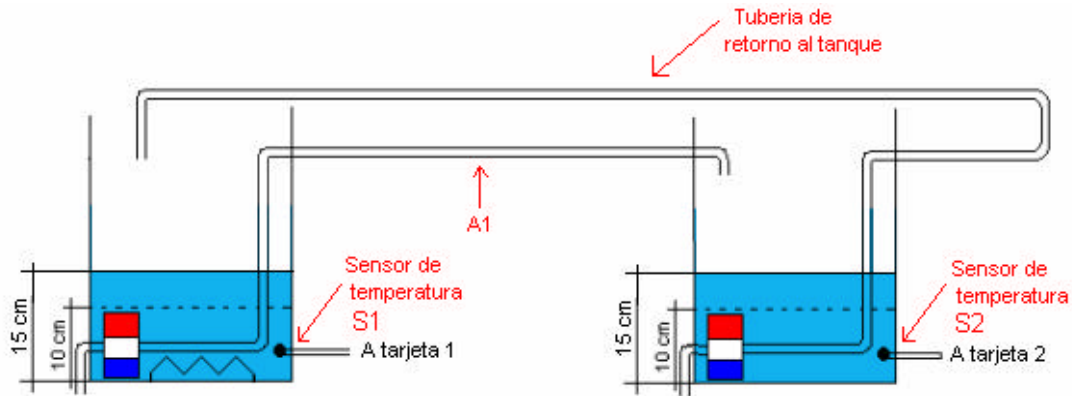


Figura 3.5. Conexiones del módulo para control en cascada

6. Conectar las salidas de los sensores de temperatura TT1 y TT2 a las entradas analógicas de la tarjeta PMD-12080LS.
7. Las bombas serán manejadas con la fuente 0–10V_{DC} del módulo. Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la fuente del módulo maneje las bombas.
8. Elaborar el programa para la visualización y el control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comuniqué satisfactoriamente con el módulo CPTS-1, y además los algoritmos de control PID (TIC1 y TIC2) que gobernará el sistema.
9. Establezca una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 200$, $K_i = 50$, $K_d = 1$, límite alto = 1023 y límite bajo = 660, para las constantes del controlador TIC2, y los valores. $K_p = 5000$, $K_i = 1000$, $K_d = 0$, límite alto = 32 y límite bajo = 15, para las constantes del controlador TIC1.
10. Ejecute un cambio de set point de 20 °C a 30 °C.
11. Cuando el sistema alcance el punto de consigna, introduzca una perturbación al sistema ingresando 3 litros de agua fría en el tanque A.

12. Obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 10 al 90%), T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP) y e_{ss} (error estacionario).
13. Modificar el diagrama de bloques del programa en LabVIEW dejando de lado el lazo interno de control (controlador secundario y la señal de temperatura del tanque A), y controlar la temperatura del tanque B al manipular la acción de las niquelinas únicamente con el controlador TIC1, como lo ilustra la figura 3.6.

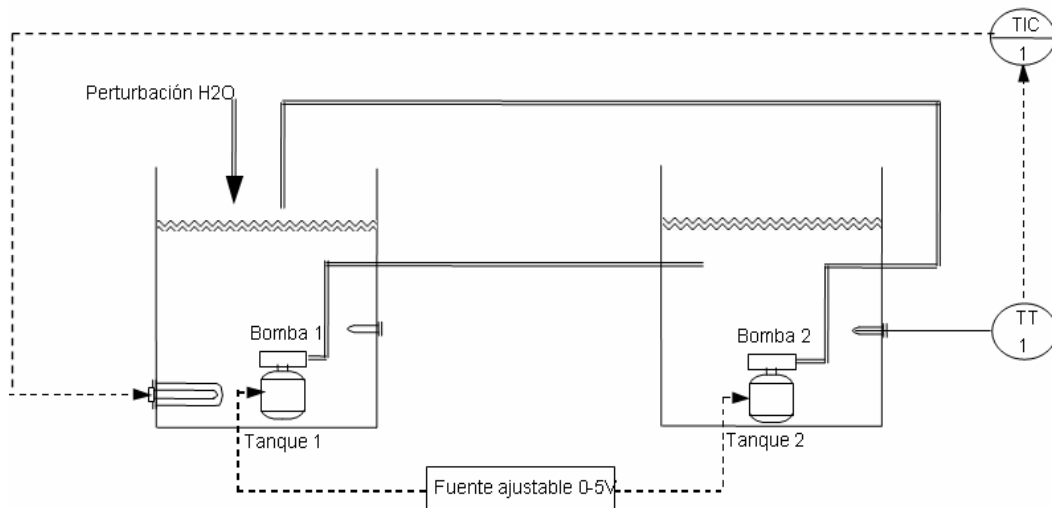


Figura 3.6. Diagrama P&ID de Control con un único lazo

14. Establezca una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 50$, $K_i = 3000$, $K_d = 1$, límite alto = 1023 y límite bajo = 660, para las constantes del controlador TIC1.
15. Repetir los pasos 10, 11 y 12 con la nueva configuración del sistema.

3.3 CONTROL ANTICIPATIVO

3.3.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control anticipativo.

3.3.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 3.7.

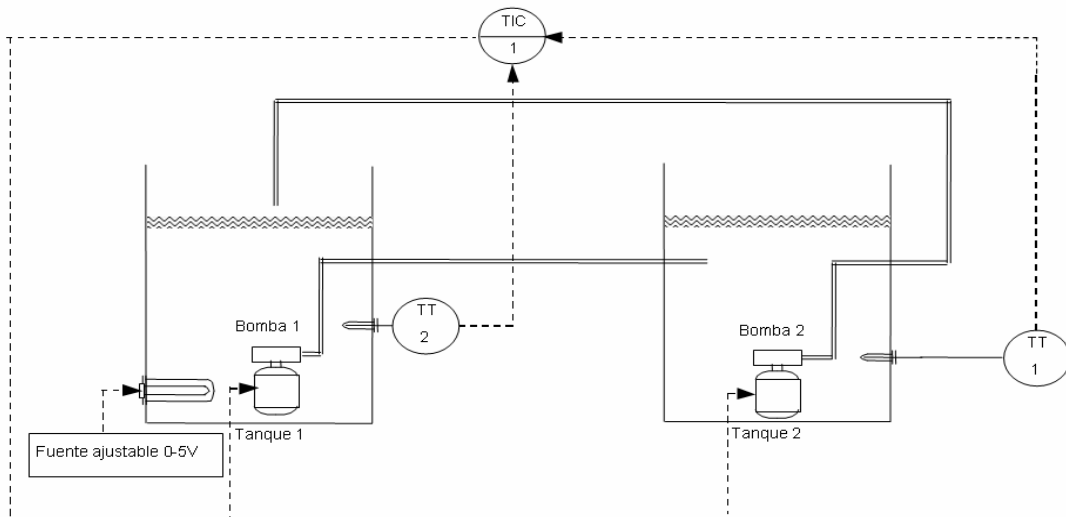


Figura 3.7. Diagrama P&ID del Control Anticipativo

Emplear el tanque 1, el tanque 2, sus bombas eléctricas correspondientes y dos sensores de temperatura en la configuración mostrada por el diagrama P&ID de la figura 3.7.

Implementar un control anticipativo, de manera que se ajuste el punto de control de la temperatura del tanque 2 dentro del rango especificado del equipo (20°C a 70°C). El sistema deberá ser sintonizado adecuadamente utilizando un criterio de ingeniería apropiado basándose en los métodos existentes.

Este proceso realizará la medición de temperatura existente en el tanque 1 y en el tanque 2, y tomando en cuenta tales valores, el controlador TIC1 actuará variando el flujo de los dos tanques de acuerdo al algoritmo de control anticipativo para eliminar significativamente las perturbaciones que pudieren existir en la temperatura del líquido del tanque 1.

La variación de temperatura en el tanque 1 se realizará mediante una niquelina situada en la mitad del tanque, unidad que usará el voltaje offset dado por la fuente de voltaje ajustable.

Las bombas que hacen circular el agua de uno a otro tanque, usarán la señal de salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS, con lo que se tendrá una variación

de acuerdo a la salida del controlador, un mismo nivel de agua y la autonomía del proceso.

Los tanques tendrán un nivel de agua de 15 cm, aproximadamente 3.56 galones cada uno.

El sensor de temperatura 1 entregará una señal analógica 0-10V_{DC}, la cual en conjunto con la señal analógica 0-10V_{DC} proveniente del sensor de temperatura 2 intervendrán en el algoritmo de control anticipativo TIC1 para controlar la temperatura en el tanque 2.

El algoritmo de control anticipativo consistirá en que si la temperatura del tanque izquierdo es menor con 2°C que la temperatura que se desea en el tanque derecho, el controlador incrementará su salida en un 25%, aumentando de esta manera el desalojo de líquido mediante las bombas; de igual manera si la temperatura en el tanque izquierdo es mayor con 2°C, el controlador disminuirá su salida en el porcentaje mencionado, disminuyendo así el desalojo de líquido.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores del valor del punto de control (SP), en °C, el valor en línea de las temperaturas en los dos tanques y el estado de la variable manipulada (MV); incluir también la gráfica de las variables controladas de temperatura y un acceso a la sintonización de los valores de ajuste del PID, que deberán encontrarse en forma digital.

3.3.3 Fundamento teórico

El objetivo del control anticipativo² es sensor la perturbación de una variable medible antes de afectar al proceso y se calcula el valor que se requiere de la variable manipulada para mantener la variable controlada en el valor que se desea o punto de control.

² ORTIZ, Hugo R., *Instrumentación y Sistemas de Control*, 1998

Si los cálculos se realizan de manera correcta, la variable controlada debe permanecer sin perturbaciones. En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques de la presente práctica.

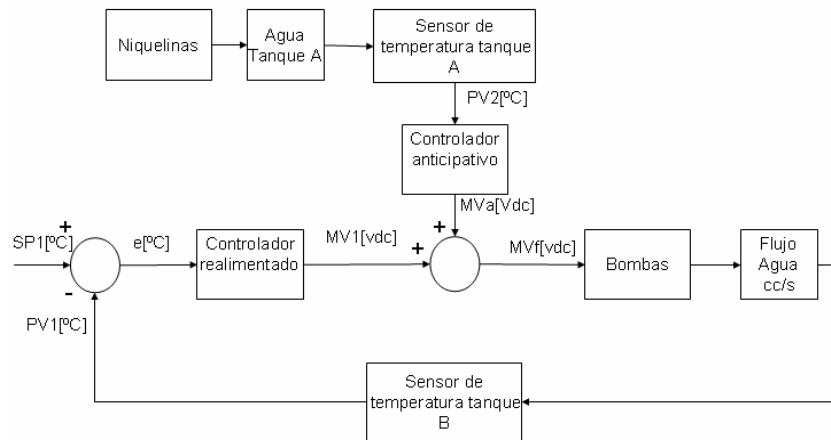


Figura 3.8. Diagrama de bloques de la práctica 3

Al observar el diagrama de bloques de esta práctica, se puede ver que en este sistema se mide la perturbación causada por las niquelinas en el tanque A a través de su sensor de temperatura, y en base a un modelo de cómo esta afecta a la temperatura controlada en el tanque B, en este caso aumentando o disminuyendo el flujo de las bombas al estar a 2°C por debajo o por encima del punto de consigna, el control anticipativo actúa directamente sobre la variable manipulada del proceso, es decir el flujo de las bombas, todo esto en conjunto a un control realimentado que funciona en todo momento.

Teóricamente el control anticipativo es un control perfecto, pero en la práctica no es 100% viable porque:

- No es posible medir todas las perturbaciones que afectan al sistema
- No hay modelos perfectos de los procesos
- No siempre se puede realizar la acción anticipativa satisfactoriamente (anticipación excesiva por ser la corrección más lenta que el efecto).
- El hecho de que el control anticipativo es un control en lazo abierto, por lo que siempre hay que complementarlo con una realimentación del error (control realimentado).

3.3.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de temperatura 1
6. Sensor de temperatura 2
7. Niquelina
8. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
9. Tarjeta PMD-1208LS
10. Mangueras de retorno de agua
11. Manguera A1
12. Cables de conexión.

3.3.5 Procedimiento

1. Comunicar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques a 15cm.
4. Se usarán dos sensores de temperatura, el del tanque 1 irá a la tarjeta "TEMPERATURA 1", y el sensor parte inferior del tanque 2 irá en la tarjeta "TEMPERATURA 2".
5. Se usarán las dos niquelinas posicionadas en el tanque 1 que serán manejadas por la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo. Hacer las conexiones necesarias para que la fuente maneje las niquelinas.

Estos pasos se resumen en la gráfica 3.9.

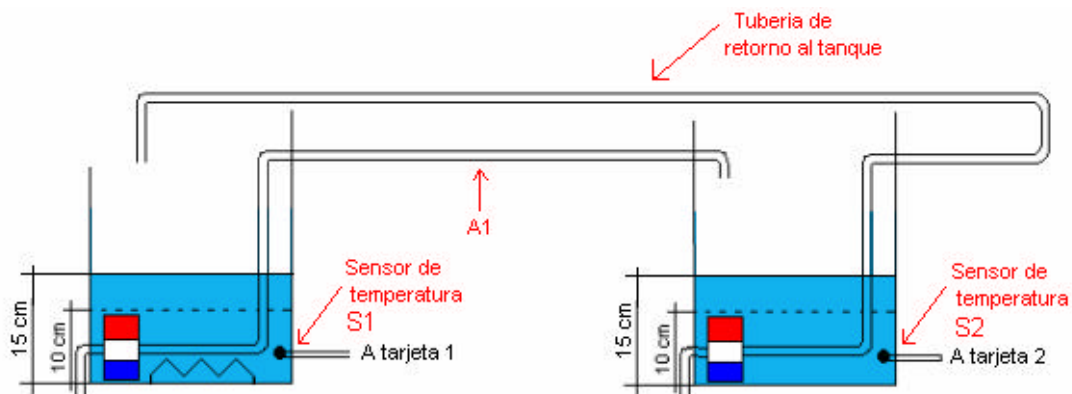


Figura 3.9. Conexiones del módulo para control Anticipativo

6. Conectar las salidas de los sensores de temperatura TIC1 y TIC2 a las entradas analógicas de la tarjeta PMD-12080LS.
7. Las 2 bombas serán manejadas por el controlador (PC). Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la tarjeta, a través de una salida analógica, maneje las bombas.
8. Elaborar el programa para la visualización y control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1, y además el algoritmo anticipativo y el de control PID que gobernará el sistema.
9. Establezca una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 50$, $K_i = 3000$, $K_d = 0$, límite alto = 818 y límite bajo = 500, para las constantes del controlador PID.
10. Precalentar el tanque A hasta una temperatura de 28°C.
11. Ejecute un cambio de set point de 20 °C a 30 °C.
12. Obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 0 al 90%) y T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP).
13. Obtenga las gráficas del efecto de algoritmo anticipativo sobre la variable manipulada del sistema.
14. Modificar el programa de control en el diagrama de bloques eliminando el control anticipativo para que el sistema funcione sólo con el control realimentado.
15. Repetir los pasos 10, 11, 12 y 13 con la nueva configuración del punto 14, y compare los resultados.

3.4 CONTROL POR SUPERPOSICIÓN

3.4.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control por sobreposición.

3.4.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 3.10.

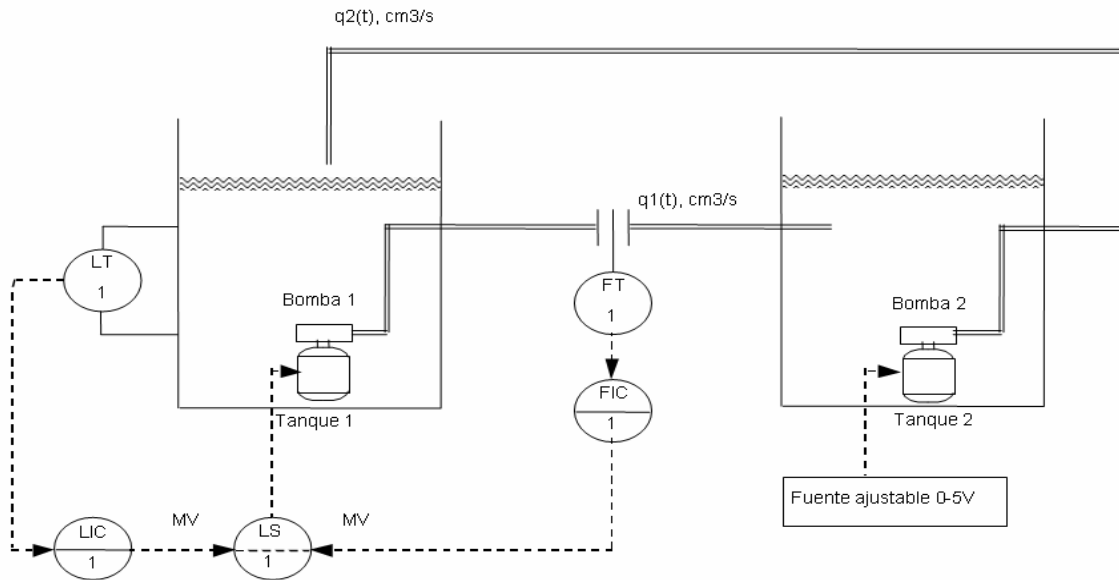


Figura 3.10. Diagrama P&ID del Control por Superposición

Emplear el tanque 1, el tanque 2, sus bombas eléctricas correspondientes, el medidor de nivel y el medidor de flujo en la configuración mostrada por el diagrama P&ID de la figura 3.10.

Implementar un control de superposición, de manera que se pueda ajustar el punto de control del flujo que cruza desde el tanque 1 al tanque 2 dentro del rango especificado del equipo (0 a $130 \text{ cm}^3/\text{s}$ aprox.), y además tener un sistema de protección que no permita que el nivel de líquido salga del rango especificado (10 cm a 30 cm).

El sistema utiliza un selector de baja LS que establecerá la variable manipulada del flujo de las bombas ya sea en base del controlador de nivel o del controlador de flujo.

Este proceso, se concentrará en la medición de nivel existente en el tanque 1 y en la medición de flujo que cruzará hacia el tanque 2, actuando sobre la bomba 1 del tanque de donde proviene el flujo, que será manejada por la salida analógica

de la tarjeta PMD-1208LS; la bomba 2 que rige el retorno será manipulada por la fuente ajustable $0-5V_{DC}$.

El tanque 1 tendrá un nivel de agua de 20 cm, aproximadamente 5.95 galones y el tanque 2 un nivel de agua de 15 cm aproximadamente 3.56 galones.

El medidor de nivel enviará la señal analógica $0-5V_{DC}$, que representará el nivel existente en el tanque 1 y que será recibida por el controlador LIC1; por otra parte el medidor de flujo entregará una señal analógica de $0-10V_{DC}$ que medirá el flujo que se transferirá de un tanque al otro, la misma que ingresará al controlador FIC1. La señal de variable manipulada de los dos controladores serán comparadas y el conmutador de selección LS1 elegirá la de menor valor para controlar la bomba eléctrica 1.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores de alarmas de nivel alto y bajo, del valor del punto de control (SP) de flujo, en cm^3/seg , el valor del punto de control (SP) de nivel, en cm, el valor en línea del flujo y del nivel que alcanza el agua en el tanque y el estado de las variables manipuladas; incluir también la gráfica de las variables controladas y un acceso a la sintonización de las constantes de los dos controladores PIDs, que deberán encontrarse en forma digital.

3.4.3 Fundamento teórico

El control³ por sobreposición o superposición se utiliza generalmente como un control de protección para mantener las variables del proceso dentro de ciertos límites. Por ejemplo, considérese el proceso que aparece en la figura 3.11, en el cual un líquido entra en el tanque y de ahí nuevamente se bombea, bajo control, al proceso.

³ ORTIZ, Hugo R., *Instrumentación y Sistemas de Control*, 1998

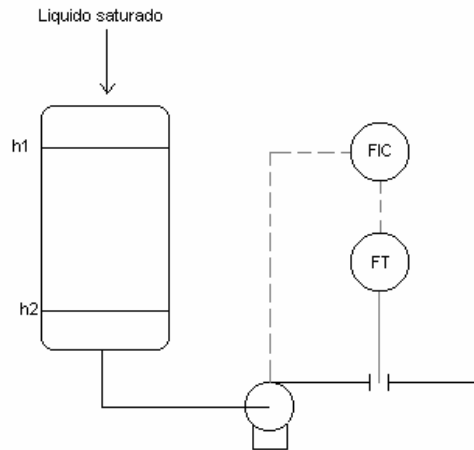


Figura 3.11. Circuito de control de flujo

En operación normal el tanque está a la altura h_1 , pero si por cualquier razón el nivel del líquido baja a la altura h_2 , no se tendrá suficiente volumen positivo neto de succión, de lo que resulta cavitación (cabeceo) en la bomba. Por lo tanto, es necesario diseñar un sistema de control con el que se evite esa condición; este esquema de control se muestra en la figura 3.12.

La bomba variable funciona de tal manera que, cuando se incrementa la entrada de energía se bombea más líquido, entonces el FIC es de acción inversa, mientras que el controlador de nivel LIC a implementar será de acción directa. La salida de cada controlador se conecta a un selector de baja, y de ahí a la salida de la bomba.

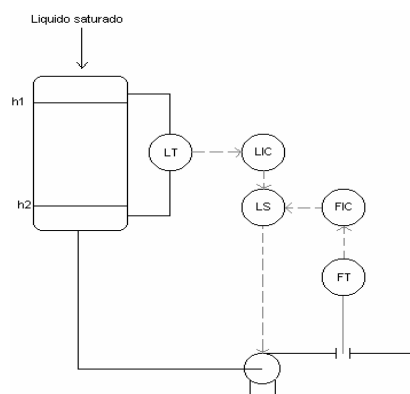


Figura 3.12. Circuito de Control por Sobreposición

Bajo condiciones normales el nivel está en h_1 , el cual se encuentra por arriba del punto de control del controlador de nivel y, por lo tanto, desde el controlador se tratará de acelerar a la bomba tanto como sea posible, mediante el incremento

de la salida. La salida del controlador de flujo puede estar más abajo, y en consecuencia, el conmutador de selección baja elige esta señal para manejar la bomba.

Si ahora el flujo del líquido disminuye y el nivel del tanque empieza a bajar, tan pronto como el nivel llega abajo del punto de control del controlador de nivel, en este controlador se tratará de hacer más lento el bombeo, mediante la reducción de salida. Conforme continua el descenso de nivel, la salida del controlador también sigue en descenso y, cuando llega por debajo de la salida del controlador de flujo, en el selector de baja se elige la salida del controlador de nivel para manejar la bomba. El controlador de nivel se superpone al controlador de flujo.

3.4.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de nivel
6. Sensor de flujo
7. Fuente ajustable $0-5V_{DC}$
8. Tarjeta PMD-1208LS
9. Tubería de retorno
10. Manguera A2 y A3
11. Fuente externa de $24V_{DC}$
12. Cables de conexión.

3.4.5 Procedimiento

1. Unir el sensor de flujo que está en una tubería en forma de T, etiquetada TI, con la manguera A2 y A3. La manguera A2 a la izquierda de TI y A3 a la derecha.
2. La unión hecha A2-TI-A3 conectarla entre el tanque 1 y 2, intercomunicando a los dos.

3. Colocar la tubería de retorno a tanque.
4. Llenar con agua los tanques, el 1 a 15 cm, y el 2 a 15 cm.
5. Se usarán dos sensores, uno de nivel, 0 – 5V_{DC} (30 – 10cm) y el otro de flujo, 0 – 10V_{DC} (0 - 130 cm³/s). Conectar los sensores de flujo y nivel con los M12 asignados.

Estos pasos se resumen en la gráfica 3.13.

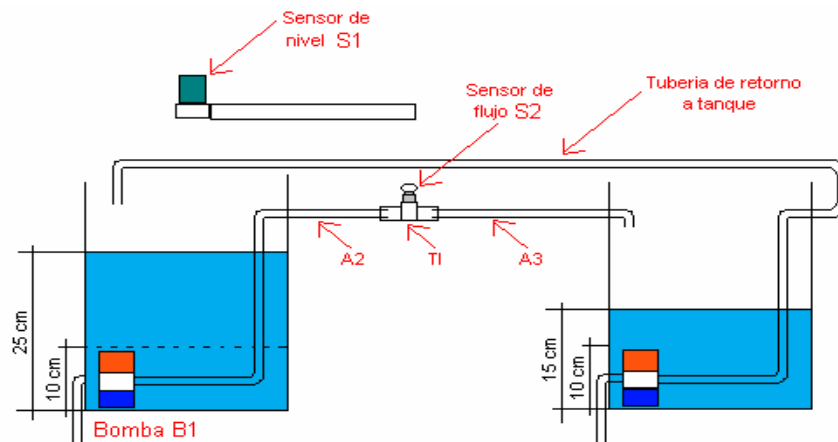


Figura 3.13. Conexiones del módulo para Control por Sobreposición

6. Conectar las salidas de los sensores de nivel y flujo LT1 y FT1 a las entradas analógicas de la tarjeta PMD-1208LS.
7. La bomba de desfogue (tanque 1) será manejada por el controlador (PC), y la de abastecimiento (tanque 2) con la fuente 0 – 10 V_{DC} del módulo. Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la tarjeta, a través de una salida analógica, maneje la bomba de desfogue y la fuente 0 – 10V_{DC} manejen las bombas.
8. Elaborar el programa para la visualización y control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1, y además los algoritmos de control PID (FIC1 y LIC2) con un selector de bajo que gobernará el sistema.
9. Establezca una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de la señal de nivel y de flujo, y los valores de $K_p=2$, $K_i=7$ y $K_d=0$, límite bajo = 350 y límite alto = 1000, para las constantes del controlador FIC, y los valores de

- $K_p=100$, $K_i=0$ y $K_d=0$, límite bajo = 349 y límite alto = 1023, para las constantes del controlador LIC .
10. Establezca un set point de nivel de 20 cm. Haga cambios sucesivos en el set point de flujo de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm^3/s , con un lapso de aproximadamente 8 segundos de duración de cada set point, y obtenga las gráficas de la variable del proceso de flujo en función de su set point.
 11. Establezca un nivel de agua de 15 cm. Ponga un set point de nivel de 10 cm, y de 60 cm^3/s en el de flujo.
 12. Después de unos segundos de funcionamiento, cambie el set point de nivel a 16 cm, observe lo que sucede, cambie de nuevo a 10 cm, y después de unos segundos otra vez cambie el mismo valor a 17 cm. Obtenga las gráficas de la variable del proceso de flujo y la variable manipulada del controlador de nivel en función del comportamiento del set point de flujo.
 13. Repita el paso 11, y obtenga las gráficas de la variable del proceso de nivel y de la conmutación de las variables manipuladas de los dos controladores al alcanzar el nivel de seguridad con una constante K_p igual a 82 en el controlador de nivel. Establezca desde qué momento el controlador de nivel toma el mando del sistema, además del correspondiente e_{ss} (error estacionario) de nivel.
 14. Repita el paso 13 pero con un valor para K_p del controlador de nivel igual a 100.
 15. Utilizando la teoría de Ziegler-Nichols con criterio de 1/4, sintonice el controlador de flujo .
 16. Repita el paso 10 con los nuevos valores de sintonización del paso anterior y compare su funcionamiento con el del principio de la práctica.

3.5 CONTROL SELECTIVO

3.5.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control selectivo.

3.5.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 3.14.

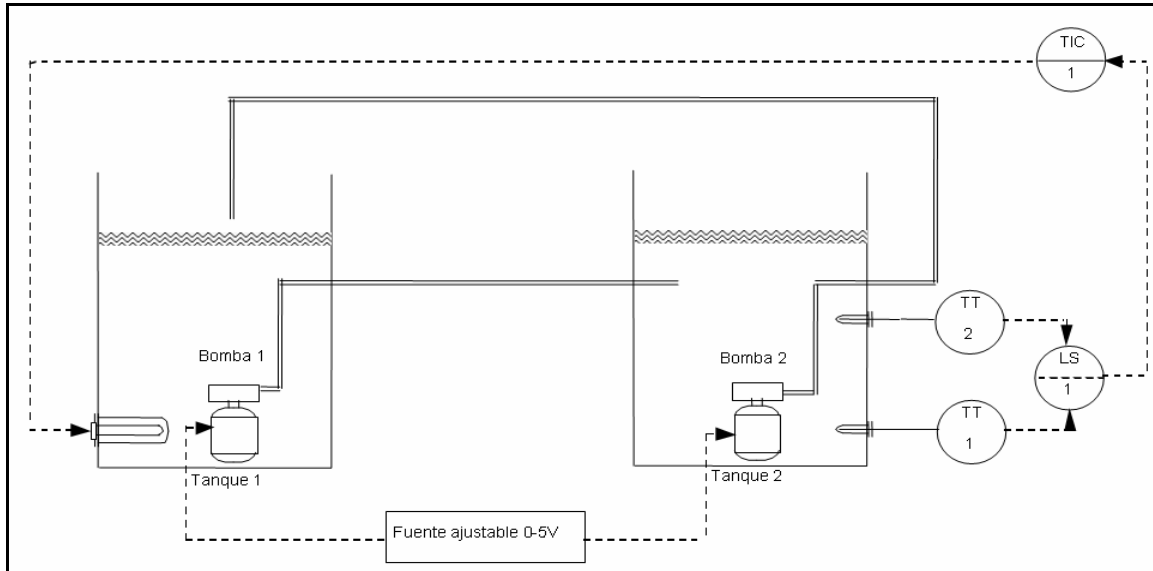


Figura 3.14. Diagrama P&ID del Control Selectivo

Emplear el tanque 1, tanque 2, sus bombas eléctricas correspondientes, y los sensores de temperatura en la configuración mostrada por el diagrama P&ID de la figura 3.14.

Implementar un control selectivo, de manera que se pueda ajustar el punto de control de la temperatura del tanque 2 dentro del rango especificado del equipo (20°C a 70°C), tomando las dos señales dadas por los sensores de temperatura localizados en el mismo tanque. El controlador, aprovechará un selector de alto HS, que elegirá el mayor valor de las dos señales y enviará la señal apropiada al actuador constituida por las niquelinas.

Las bombas que hacen circular el líquido serán manipuladas por la fuente ajustable $0-5V_{\text{DC}}$ a un valor offset.

El tanque 1 tendrá un nivel de agua de 15 cm, aproximadamente 3.56 galones y el tanque 2 un nivel de agua de 20 cm aproximadamente 4.75 galones.

El sensor de temperatura 1 entregará una señal analógica de $0-10V_{DC}$, la cual en conjunto con la señal analógica $0-10V_{DC}$ proveniente del sensor de temperatura 2, ingresarán en un conmutador de selección de alto HS, cuyo resultado ingresará al controlador TIC, que la comparará con el punto de control y enviará una señal de $0-5V_{DC}$ que controlará la energía que recibe la niquelina.

El punto de control será asignado al controlador TIC y, luego de elegir entre las dos señales TT1 y TT2, actuará sobre el sistema para mantener la temperatura del líquido del tanque 2 en el punto de control requerido.

El TIC constituirá un controlador PID con parámetros K_c , T_i y T_D , que se deberá ajustar para obtener un control satisfactorio; se debe considerar que el controlador se deberá colocar en acción inversa, ya que si la temperatura esta bajo el punto de control, el controlador debe dar mayor energía al acondicionamiento de la señal de salida de la PC hacia la niquelina para que la temperatura del líquido regrese al punto de control, tarea que se consigue incrementando la salida del controlador.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores del valor del punto de control (SP), en $^{\circ}C$, el valor en línea de la temperatura alcanzada medida por los sensores y el estado de la variable manipulada (MV); incluir también la gráfica de las variables controladas y un acceso a la sintonización de los valores de ajuste del PID, que deberá encontrarse en forma digital.

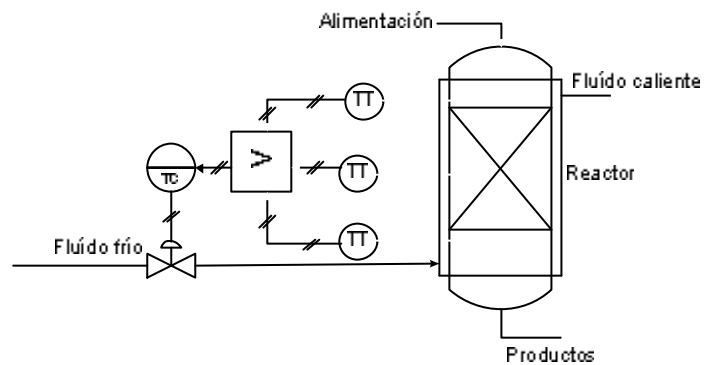
3.5.3 Fundamento teórico

Frecuentemente una situación⁴ es encontrada en donde dos o más variables no deben sobrepasar límites específicos por razones económicas, de eficiencia, o seguridad. Si el número de variables controladas excede el número de variables manipuladas, aquella que sea de mayor utilidad deberá ser lógicamente ser seleccionada para hacer el control. Existen unidades de selección de señal para este tipo de servicio. Estas son empleadas en cuatro áreas básicas de aplicación:

⁴ SHINSKEY, Greg F.; *Process-Control Systems*, Segunda Edición, McGraw -Hill Book company, 1979

- Protección de equipos
- Seleccionamiento
- Instrumentación redundante
- Jerarquía de variables

Como un ejemplo de cómo los equipos pueden ser protegidos por un sistema con control selectivo, considere el control de la temperatura más alta en un reactor de lecho fijo. Existe la posibilidad que la ubicación de la temperatura más alta cambie por degeneración catalítica, flujo, etc. Las temperaturas a lo largo del reactor serán entonces comparadas y la más alta será usada para el control, como lo ilustra la figura 3.15.



6. Sensor de temperatura 3
7. Niquelina
8. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
9. Tubería de retorno
10. Manguera A1
11. Tarjeta PMD-1208LS
12. Cables de conexión.

3.5.5 Procedimiento

1. Comunicar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques, el 1 a 15cm y el 2 a 20cm.
4. Se usarán dos sensores de temperatura, los dos del tanque 2. El sensor parte superior irá a la tarjeta "TEMPERATURA 2", y el sensor parte inferior irá en la tarjeta "TEMPERATURA 1".
5. Se usarán las dos niquelinas posicionadas en el tanque 1 que serán manejadas por el controlador (PC). Hacer las conexiones necesarias para que la PC maneje las niquelinas a través de una salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS.

Estos pasos se resumen en la gráfica 3.16.

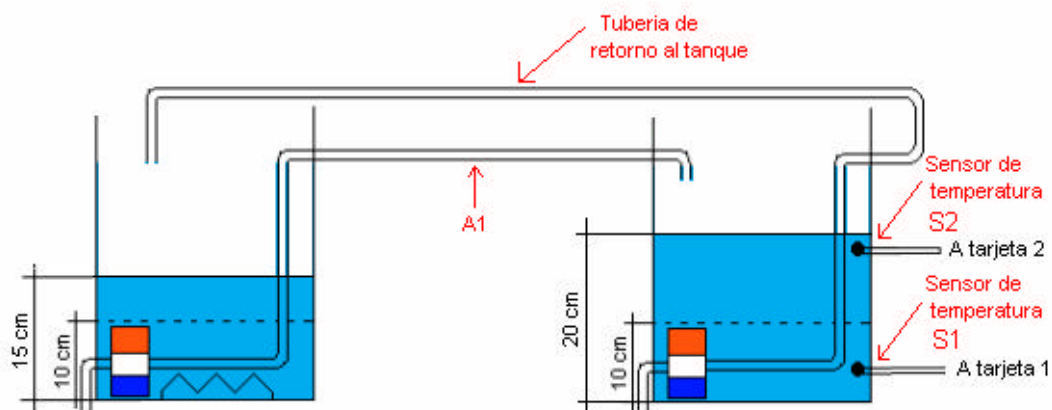


Figura 3.16. Conexiones del módulo para el Control Selectivo

6. Conectar las salidas de los sensores de temperatura a las entradas analógicas de la tarjeta PMD-12080LS.

7. Las 2 bombas serán manejadas por la fuente 0 – 10V_{DC}. Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la fuente maneje las bombas.
8. Elaborar el programa para la visualización y el control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1, y además el algoritmo de control PID y un selector de temperatura baja que gobernará el sistema.
9. Establezca una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 50$, $K_i = 3000$, $K_d = 0$, límite alto = 1023 y límite bajo = 660, para las constantes del controlador PID.
10. Ejecute un cambio de set point de 20 °C a 30 °C.
11. Obtenga gráficamente los valores de las dos temperaturas versus el set point del sistema.
12. Obtenga gráficamente el comportamiento de la variable manipulada en función de las dos temperaturas.
13. Obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 0 al 90%) y T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP).

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE PRÁCTICAS DE CONTROL DIFUSO

En la década pasada, los sistemas difusos han desplazado a las tecnologías convencionales en muchas aplicaciones científicas y sistemas de ingeniería, especialmente en los sistemas de control y el reconocimiento de patrones. Se tiene también un rápido crecimiento en el uso de la lógica difusa en una amplia variedad de productos de consumo y sistemas industriales. Los ejemplos más sobresalientes son: máquinas lavadoras, cámaras de vídeo, cámaras de auto enfoque, aire acondicionado, máquinas lava trastos, transmisión de automóviles, guías de buques, trenes suburbanos, reguladores de control de combustión y control de calidad del cemento. La misma tecnología difusa, en la forma de razonamiento aproximado, está también resurgiendo en la tecnología de información, donde proporciona soporte de decisiones y sistemas expertos con las capacidades de razonamiento poderosos limitados a un mínimo de reglas.

En un sentido amplio, como apuntó Lotfi Zadeh, cualquier campo puede ser fusificado y generalizado reemplazando el concepto de conjunto duro en un campo fuente por el concepto de un conjunto difuso. Por ejemplo se puede fusificar algunos campos básicos tales como la aritmética, la teoría de grafos y la teoría de la probabilidad para desarrollar aritmética difusa, teoría de grafos difusos y teoría de probabilidad difusa, respectivamente; se puede también fusificar algunos campos aplicados tales como redes neuronales, algoritmos genéticos, teoría de estabilidad, reconocimiento de patrones y programación matemática para obtener redes neuronales difusas, algoritmos genéticos difusos, teoría de estabilidad difusa, reconocimiento de patrones difusos y programación matemática difusa, respectivamente.

Los beneficios de tal fusificación incluyen mayor generalidad, poder expresivo más alto, una habilidad elevada para modelar problemas del mundo real, y una metodología para explotar la tolerancia a la imprecisión. Aquí la lógica difusa puede ayudar a alcanzar el entendimiento, robustez y una solución a un costo más bajo.

La lógica difusa se debe usar porque:

- La lógica difusa es conceptualmente fácil de entender.
El concepto matemático detrás de él es razonablemente muy simple. Lo que hace atractiva a la lógica difusa es la “naturaleza” de su enfoque y su facilidad del entendimiento al mismo.
- La lógica difusa es flexible.
Con cualquier sistema dado, es fácil de adaptarlo o dividirlo por etapas sin comenzar de nuevo de cero
- La lógica difusa es tolerante con los datos imprecisos.
Todo es impreciso si se lo mira suficientemente de cerca, pero más que nada, la mayoría de cosas son incluso con una inspección cuidadosa. El razonamiento difuso utiliza este razonamiento en el proceso, en vez de atacarlo al final.
- La lógica difusa puede modelar funciones no lineales de complejidad arbitraria.
Se puede crear un sistema difuso para que vaya de la mano con cualquier conjunto de entradas-salidas.
- La lógica difusa puede ser construida en base de la experiencia de los expertos.
En directo contraste con las redes neuronales, lo cual toma entrenar los datos y genera sombríos e impenetrables modelos, la lógica difusa le

permite basarse en la experiencia de las personas que ya entienden su sistema.

- La lógica difusa puede ser mezclada con técnicas convencionales de control.

Los sistemas difusos no necesariamente reemplazan los métodos convencionales de control. En algunos casos, los sistemas difusos incrementan o simplifican su implementación.

- La lógica difusa está basada en lenguaje natural.

La base para la lógica difusa es la comunicación humana. Esta observación sujeta algunos de los otros argumentos sobre la lógica difusa.

La última justificación es tal vez la más importante y merece mayor discusión. El lenguaje natural, el cual es usado por gente ordinaria en todo momento, ha sido moldeado por miles de años de historia humana, y es conveniente y eficiente.

Las frases escritas en lenguaje ordinario representan un triunfo de comunicación eficiente. Esto generalmente no se lo nota porque el lenguaje ordinario es, naturalmente, algo que se usa todos los días. Debido a que la lógica difusa está construida en base a la estructura de una buena descripción usada en un lenguaje de todos los días, la lógica difusa es fácil de usar.

La lógica difusa no es una panacea. ¿Cuándo se debería usar la lógica difusa? La más segura afirmación es la que fue hecha al inicio: la lógica difusa es una forma conveniente de mapear un espacio de entrada a un espacio de salida. Si no se considera conveniente, intente algo diferente. Si una solución simple ya existe, úselo. La lógica difusa es la codificación del sentido común; use el sentido común cuando lo implemente y probablemente tendrá la decisión correcta. Algunos controladores, por ejemplo hacen un buen trabajo sin usar la lógica difusa. Sin embargo, si tiene tiempo de familiarizarse con la lógica difusa, observará que puede ser una herramienta bastante poderosa para lidiar rápida y eficientemente con imprecisión y no-linealidad.

Una metodología alternativa de diseño, la cual es más simple y rápida

En función de apreciar porqué la metodología de diseño difuso es más atractiva en aplicaciones de control, se debe examinar un típico diagrama de flujo de diseño. La figura 4.1 ilustra una secuencia de pasos de diseño requeridos para desarrollar un controlador una técnica convencional y una difusa.

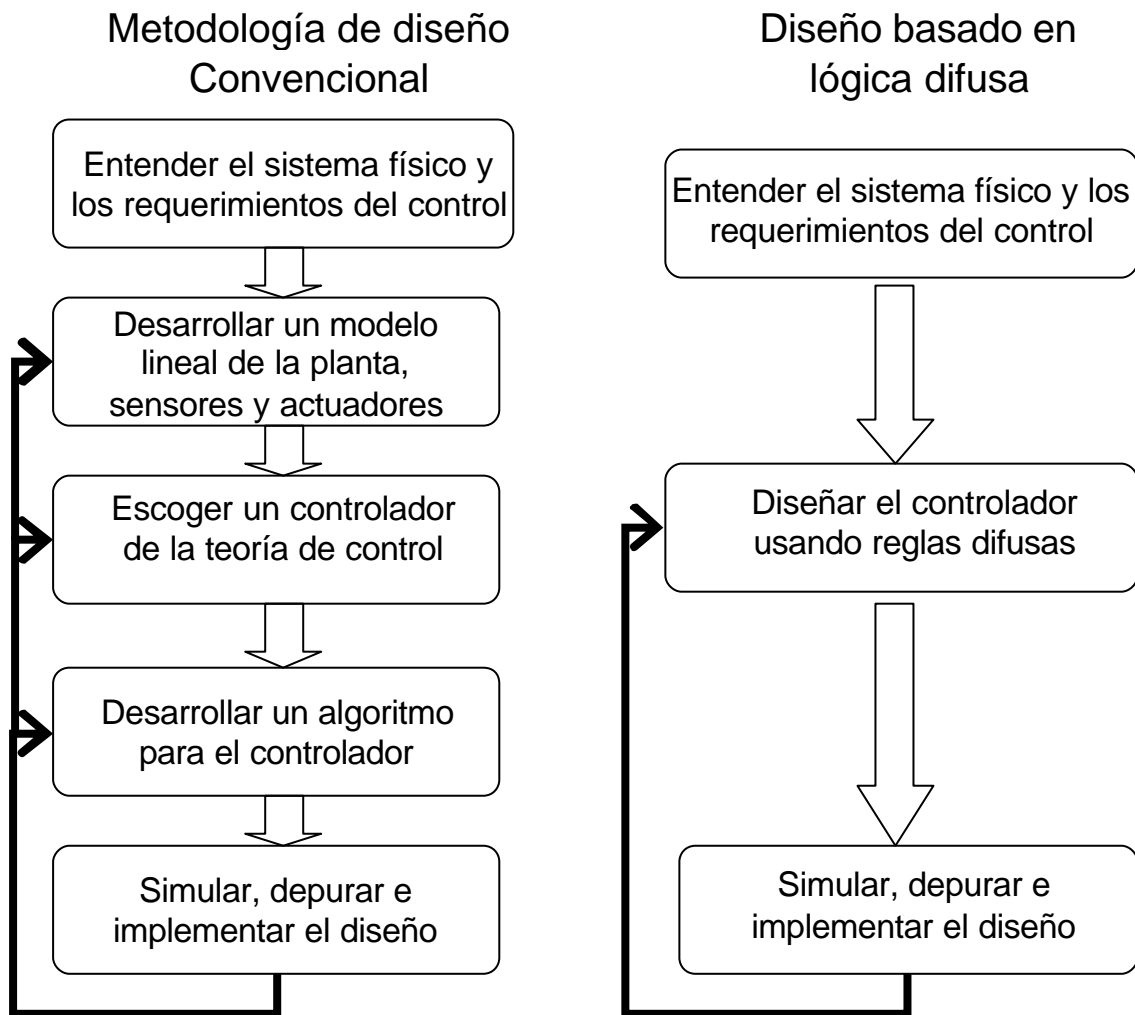


Figura 4.1. Metodologías de diseño

Usando la técnica convencional, el primer paso es entender el sistema físico y sus requerimientos de control. Basados en este entendimiento, el segundo paso es desarrollar un modelo, el cual incluye una planta, sensores y actuadores. El tercer paso es usar la teoría de control lineal en función de determinar una versión simplificada del controlador, tales como los parámetros de un controlador PID. El

cuarto paso es el desarrollar un algoritmo para el controlador simplificado. El último paso es el simular el diseño incluyendo los efectos de no-linealidad, ruido, y variaciones de parámetros. Si el rendimiento no es satisfactorio, se necesita modificar el modelo del sistema, re-diseñar el controlador, re-escribir el algoritmo y tratar de nuevo.

Con la lógica difusa, el primer paso es entender y caracterizar el comportamiento del sistema al usar nuestro conocimiento del sistema. El segundo paso es directamente diseñar el algoritmo de control usando reglas difusas, las cuales describen los principios de la regulación de los controladores en términos de la relación entre sus entradas y salidas. El último paso es el simular y depurar el sistema. Si el rendimiento no es satisfactorio, se tiene que únicamente modificar algunas reglas difusas y tratar de nuevo.

A pesar de que las dos metodologías son similares, la basada en lógica difusa substancialmente simplifica el diseño del lazo. Esto resulta en algunos beneficios significativos, tales como reducir el tiempo de desarrollo, diseño más simple y menor tiempo de implementación.

Por lo anterior dicho entonces, se quiere aplicar estas ventajas a dos técnicas de control, y ver el rendimiento de éstas en base a esta metodología alternativa.

4.1 CONTROL DIFUSO DE NIVEL

4.1.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control difuso.

4.1.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 4.2.

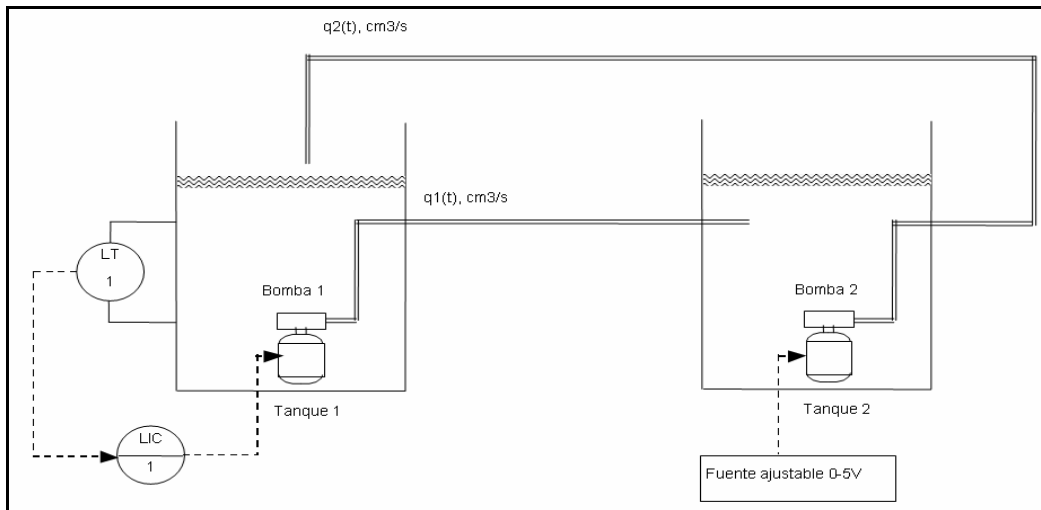


Figura 4.2. Diagrama P&ID del Control Difuso de Nivel

Emplear los componentes en la forma que el diagrama P&ID muestra en la figura 4.2.

Implementar un controlador de nivel difuso, de manera que se pueda ajustar el punto de control del nivel de líquido del tanque 1 dentro del rango especificado del equipo (10 cm a 30 cm). El sistema deberá ser creado utilizando un criterio de observación y conocimiento técnico previo del proceso, aplicando estos conceptos en la modelación apropiada del controlador del sistema.

En este proceso, se medirá el nivel existente en el tanque 1 y se actuará sobre la transferencia de líquido de un tanque al otro. Los tanques tienen un nivel de agua de 30 cm, aproximadamente 7.13 galones cada uno.

La bomba eléctrica 1 será manejada por la salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS, la bomba eléctrica 2 será manejada por una entrada offset de $0-5V_{DC}$ procedente de la fuente ajustable, para añadir perturbaciones al proceso y mantener una recirculación del líquido.

El medidor de nivel entregará una señal analógica de $0-5V_{DC}$, que representará el nivel existente del tanque 1; la señal es tomada por el LIC1, comparándose dicha señal con el punto de control y se enviará una señal analógica de $0-5V_{DC}$

hacia el actuador (bomba eléctrica 1) para mantener el nivel del primer tanque en el punto de control.

El LIC1 constituirá un controlador difuso de tipo Mandani, con su método de defusificación tipo *centroide*; se deberá considerar que el controlador se debe colocar en acción directa, ya que si el nivel de líquido rebasa el punto de control, el controlador debe aumentar el bombeo de líquido para que el nivel regrese al punto de control, tarea que se consigue incrementando la salida analógica del controlador. Este estará compuesto de dos entradas: una será el nivel actual (PV) y la otra la diferencia de este valor con respecto al SP, y una única salida, la cual controlará la intensidad de flujo de la bomba de desfogue.

Elaborar una interfase HMI con un control para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, una representación gráfica del estado del tanque, controles e indicadores digitales de alarmas de nivel alto y bajo, del valor del punto de control (SP), en cm, el valor en línea del nivel (PV) y el estado de la variable manipulada (MV).

Se deberá tener además una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y otra gráfica con el comportamiento de la variable manipulada (MV), para efectos de visualización del desempeño del controlador en todo momento.

4.1.3 Fundamento teórico

Con el advenimiento de la Lógica Difusa (Dr. Lotfi Zadeh 1965) se abrió un campo del saber, en el cual se enfoca el tratamiento de sistemas de un modo similar a como funciona la toma de decisiones de un humano, es decir; hablando en un sentido amplio, se refiere a la forma de trasladar y utilizar el conocimiento empírico que un humano puede poseer acerca de un sistema para poderlo controlar.

El control difuso puede también describirse en forma simple como “controlar con oraciones en lugar de ecuaciones”. Es posible afirmar lo anterior debido a que

el control difuso no emplea leyes analíticas, como son las ecuaciones diferenciales, sino que utiliza un conjunto de reglas empíricas asociadas a cualquier tipo de conocimiento que se tiene de un sistema.

El control difuso reemplaza el modelo matemático utilizado por los controladores convencionales por un cierto número de reglas empíricas (basadas en el conocimiento y la observación), cada una de las cuales se encarga de describir una pequeña porción del comportamiento global del sistema. Dicho de otra forma, el control difuso reemplaza las ecuaciones descriptivas del sistema por conocimiento empírico expresado en forma de reglas tipo *If _ Then* (SI_ ENTONCES), variables lingüísticas y conjuntos difusos. El proceso de inferencia se encarga de tomar estos elementos y computar la salida o salidas deseadas. Las entradas y salidas originales del sistema no son alteradas, es decir, el control difuso sigue manejando la misma relación entradas-salidas, solo que ahora es a través de un modelo difuso en vez de un modelo matemático.

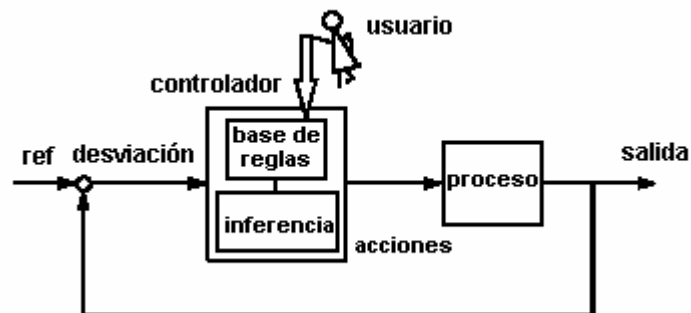


Figura 4.3. Esquema de un Controlador Difuso Directo

Se puede visualizar en la figura 4.3, el esquema de un controlador difuso, el cual se encuentra reemplazando a un controlador analógico. Sus flechas representan en forma gráfica los flujos de algunas señales que entran al mismo tiempo a los diferentes sub-bloques que conforman el controlador.

En el diagrama de bloques de la figura 4.4, el controlador se encuentra en medio de un bloque de pre-procesamiento y de uno de post-procesamiento los cuales son respectivamente las etapas de acondicionamiento de señales hacia el controlador y hacia el proceso.

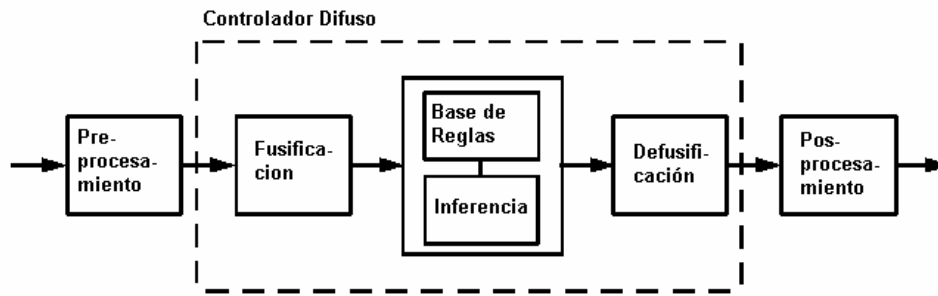


Figura 4.4. Diagrama de Bloques de los componentes de un controlador Difuso

Fusificación

El primer bloque que se encuentra dentro del controlador es el de Fusificación, el cual se encarga en convertir cada dato de entrada en grados de membresía mediante la comparación de dicho valor con uno o varias funciones de membresía. Para cada término lingüístico existe un grado de membresía y este es asignado a cada variable de entrada. De esta forma, el bloque de fusificación equipara los datos de entrada con las condiciones de la base de reglas, y de este modo se determina que tan bien las condiciones de cada regla se relacionan con cada dato particular de entrada.

Base de Reglas

Las reglas pueden usar una variedad de variables tanto en la parte condicional como en la conclusión de las reglas. Debido a esto, los controladores pueden ser aplicados tanto a problemas de multi-entrada y multi-salida (MIMO) como a entradas simples y salidas simples (SISO). Actualmente muchos de los controladores usan el error, cambio en el error y el error acumulado como entradas, pero a pesar de ser algunas entradas, se lo llama de entrada simple, ya que dichas entradas se originan de una misma, que es el error.

En lo que respecta a la creación de la base de reglas, existe al menos tres principales fuentes para encontrar y establecer las reglas de control.

- **Experiencia experta y conocimiento técnico de control.**
- **Basada en las acciones de control de operadores.**
- **Basada en el aprendizaje.**

Cada elemento en el universo de discurso es miembro del conjunto difuso, con algún grado de membresía que incluso puede ser cero. El grado de membresía para todos los miembros describe un conjunto difuso, como por ejemplo “Negativo”. En el conjunto difuso, a los elementos difusos se les asigna un grado de membresía, de tal manera que cuando existe una transición de miembro a no miembro, el cambio es gradual y no abrupto. Debido a esto, todos los elementos que no tienen un grado de membresía de valor cero son llamados soporte del conjunto difuso.

Las funciones de membresía pueden ser truncas en la parte superior, ciertas zonas de su forma pueden ser lineales o en forma triangular, de forma rectangular, o rampas con hombros horizontales. La figura 4.5 muestra algunas formas típicas de funciones de membresía.

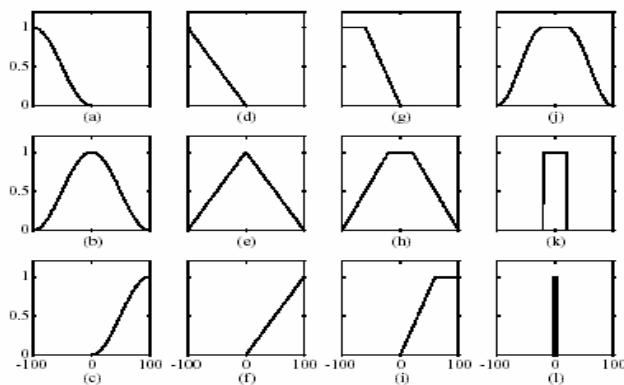


Figura 4.5. Ejemplo de funciones de membresía: (a) función S, (b) función acampanada, (c) función Z, (d-f) versiones triangulares, (g-i) versiones trapezoidales, (j) función acampanada versión plana, (k) rectangular, (l) números singulares

Proceso de Inferencia

La última parte del controlador es el proceso de inferencia. Este es un programa que dibuja las conclusiones actuales o instantáneas para la entrada de ese momento en el controlador. El verbo “inferir” significa concluir de acuerdo a la evidencia, deducir, o tener una consecuencia lógica.

Así el proceso de inferencia es un programa, en el cual la base de reglas es similar a una colección de datos. El mecanismo básico para establecer conclusiones lógicas de una base de reglas es la regla de inferencia el cual lleva el nombre de “*modus ponens*”. El siguiente argumento explica el modus ponens:

Regla: “Si una manzana es roja, entonces está madura”

Situación: “Mi manzana es roja”

Consecuencia: “Mi manzana está madura”

La inferencia difusa permitirá que las manzanas sean pequeñamente diferentes de rojas o sean casi rojas, entonces el proceso de inferencia determinara unas conclusiones también un poco diferentes, como por ejemplo casi madura. Se puede decir por tanto que la inferencia difusa siempre es menos definida que una inferencia no difusa. El proceso de inferencia pasa necesariamente por los siguientes pasos:

Activación. La activación de una regla es la deducción de su conclusión. Refiriéndose a la figura 4.6, las líneas delgadas de la tercera columna corresponden al peso con mayor fuerza encontrado para cada regla. Mediante el uso de **min** o producto (*) usado como operador de activación se encontrará un nuevo conjunto en donde la línea más delgada será la señal activada.

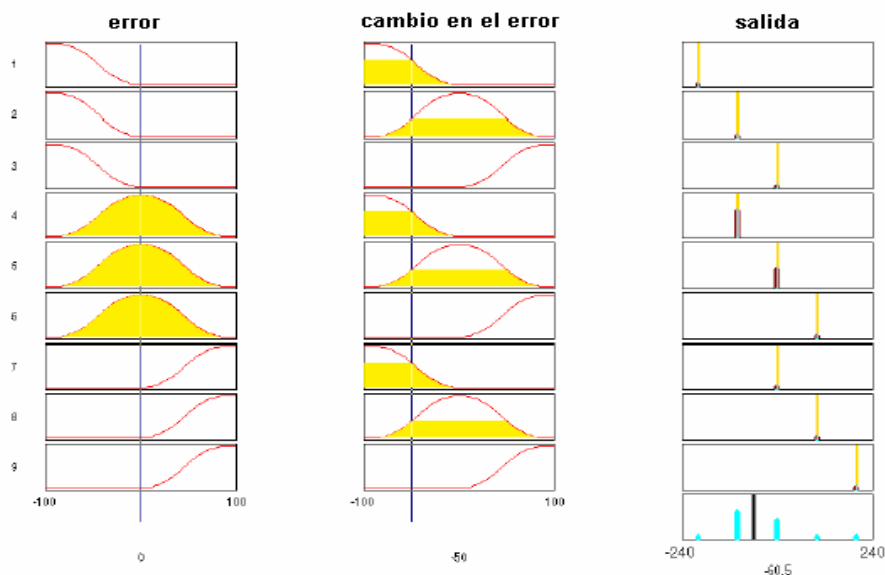


Figura 4.6. Construcción gráfica del control de señales en un controlador difuso

Acumulación. Todas las señales activadas anteriormente para cada regla, son acumuladas, usando el operador **max**, esto se puede ver al final del gráfico al extremo derecho (figura 4.7), mediante esto se logra obtener un conjunto de

valores para cada valor de entrada si se usa singletons o la suma de áreas en el caso de utilizar curvas en el conjunto fuzzy de salida.

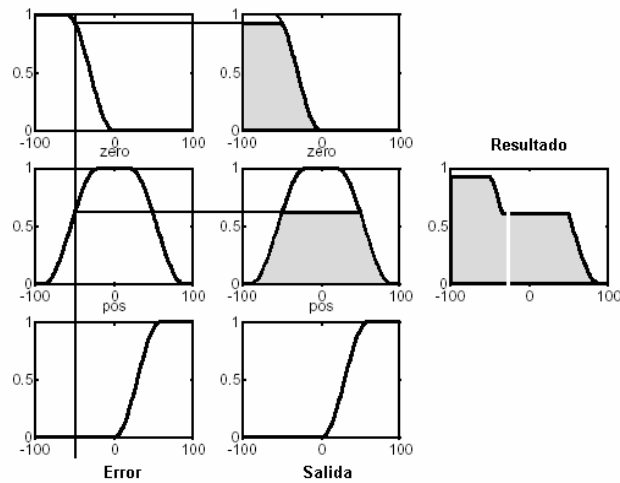


Figura 4.7. Una entrada, una salida basada en reglas sin salida única

Defusificación. El conjunto difuso resultante (figura 4.6, extremo derecho; figura 4.7, extremo derecho) debe ser convertido en un número que se enviará al proceso como la señal de control. Como se puede ver en la figura, la coordenada x marcada con una línea blanca divisoria vertical, será la señal de control. Esta operación es llamada defusificación, y de esta forma el conjunto difuso es defusificado en una señal analógica. Existen algunos métodos de defusificación, de los cuales el más usado es el centro de gravedad.

Centro de Gravedad (COG). El valor de la salida u , (línea blanca en la figura 4.7) es la abcisa del centro de gravedad del conjunto difuso de salida

$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i) \cdot x_i}{\sum_i \mu(x_i)}$$

Aquí x_i es el punto que varía en el universo discreto, y $\mu(x_i)$ es su valor de membresía en la función de membresía. Esta expresión puede ser interpretada como el promedio más significativo de los elementos del conjunto presente. Este método es uno de los más usados a pesar de que su complejidad computacional es relativamente alta. Se lo conoce también como centroide de un área.

4.1.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de nivel
6. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
7. Tubería de retorno
8. Manguera A1
9. Tarjeta PMD-1208LS
10. Fuente externa de 24V_{DC}
11. Cables de conexión.

4.1.5 Procedimiento

1. Conectar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques, el uno a una altura de 15cm, y el otro a 20cm.
4. Colocar en su posición al sensor de nivel y conectar el cable M12 asignado al mismo.

Estos pasos se resumen en la gráfica 4.8.

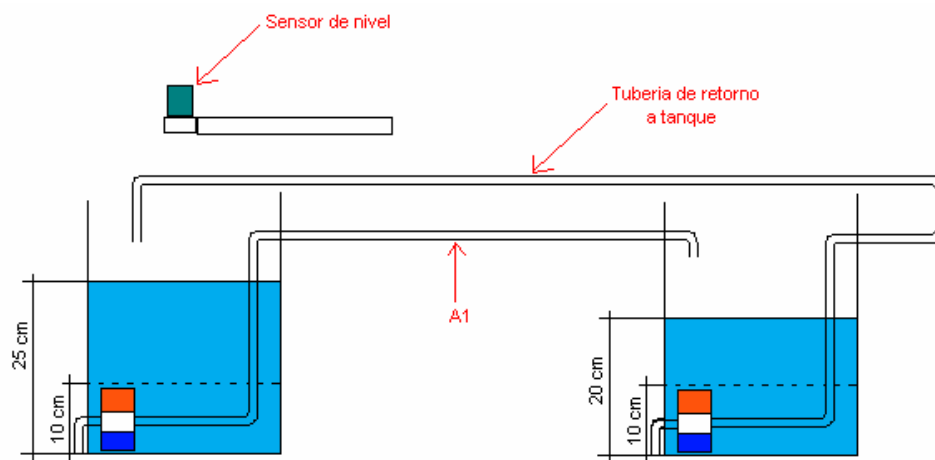


Figura 4.8. Conexiones del módulo para el Control de Difuso Nivel

5. Conectar la salida del sensor de nivel LT1 a una entrada analógica de la tarjeta PMD-1208LS.
6. La bomba de desalajo (bomba 1) será manejada a través de la tarjeta PMD-1208LS por la PC. Se utilizará una salida analógica de la misma para que con cables conectores, la PC controle el desalajo de agua.
7. La bomba de abastecimiento (bomba 2) será manejada con la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo. Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la fuente variable maneje las bomba 2.
8. Elaborar el programa para la visualización y control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1.
9. Utilizar la herramienta *Fuzzy Logic toolbox* del programa Matlab para modelar un controlador difuso de dos entradas; una será el nivel actual (PV) y la otra la diferencia de este valor con respecto al SP, y una única salida, la cual controlará la intensidad de flujo de la bomba de desfogue.
10. Ejecutar el archivo del controlador difuso creado dentro del programa de interfase y control en LabVIEW.
11. Establezca una tasa de 8000 muestras por segundo para la adquisición de la señal del sensor de nivel.
12. Ejecute un cambio de set point de 15 cm a 10 cm y obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 0 a 90%), T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP) y e_{ss} (error estacionario).
13. Compare los resultados con los obtenidos cuando se usó un controlador PID en el mismo proceso (práctica 1).
14. Haga que el sistema alcance un set point de 15 cm, y una vez estabilizado, provoque una perturbación al establecer un flujo de retorno con 3 V_{DC} en la bomba del tanque derecho y obtenga gráficamente la variable del proceso y la variable manipulada del sistema.

4.2 CONTROL ANTICIPATIVO DIFUSO

4.2.1 Objetivo

Comprender el principio de funcionamiento, características y aplicabilidad de la técnica de control anticipativo, en base a un controlador difuso.

4.2.2 Enunciado de la práctica

El sistema de control propuesto es el de la figura 4.9.

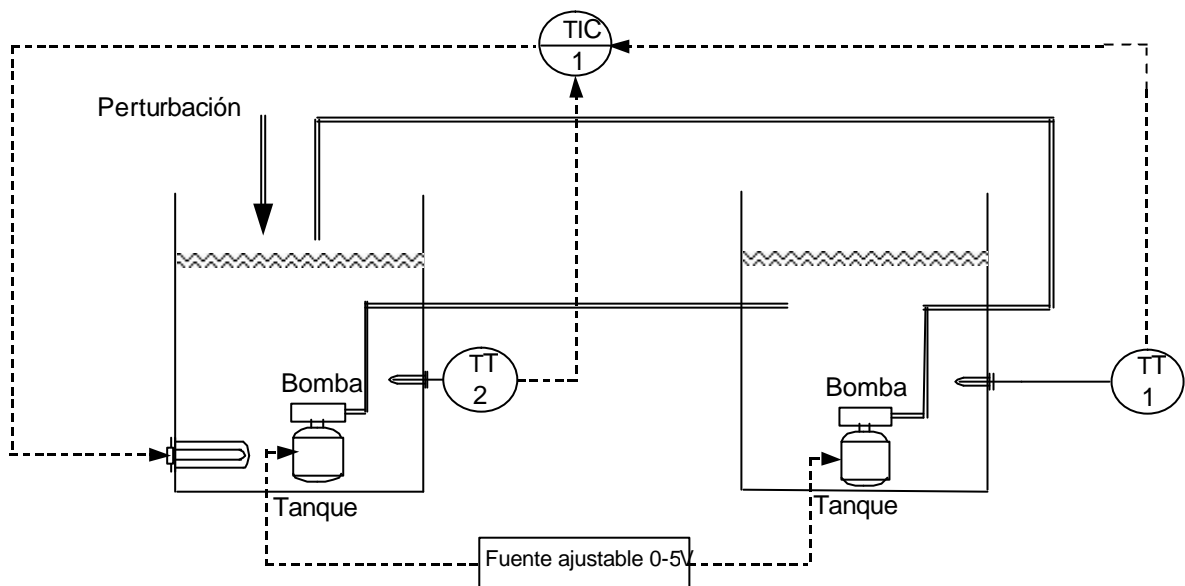


Figura 4.9. Diagrama P&ID del Control Anticipativo Difuso

Emplear el tanque 1, tanque 2, sus bombas eléctricas correspondientes, y los sensores de temperatura en la configuración mostrada por el diagrama P&ID de la figura 4.9.

Implementar un control anticipativo, de manera que se pueda ajustar el punto de control de la temperatura del tanque 2 (primario) dentro del rango especificado del equipo (20°C a 70°C), tomando en cuenta la temperatura a la que se halla el líquido en el tanque 1 (secundario).

El sistema debe ser creado utilizando un criterio de observación y conocimiento técnico previo del proceso, aplicando estos conceptos en la modelación apropiada del controlador del sistema.

Los tanques tienen un nivel de agua de 15 cm, aproximadamente 3.56 galones cada uno. Las bombas que hacen circular el agua de uno a otro tanque, serán impulsadas por la fuente ajustable 0-5V_{DC}, para mantener un mismo nivel de agua y la autonomía del proceso.

Este proceso realizará la medición de temperatura existente en el tanque 1, y en el tanque 2, los cuales entregarán una señal analógica 0-10V_{DC}, y actuarán variando la temperatura del líquido contenido por el tanque 1 mediante una niquelina situada en la mitad del tanque de acuerdo al algoritmo de control anticipativo, para prevenir significativamente las condiciones que pudieren existir en la temperatura del líquido del tanque 1.

Si la temperatura del tanque izquierdo es menor con 2°C que la temperatura que se desea establecer en el tanque derecho, y la variable del proceso también está por alcanzar este punto de consigna, el controlador cortará su salida, previniendo así la inercia y no linealidad del calentamiento del agua, anticipándose al paso de la variable de consigna. En las condiciones restantes, el controlador se podrá comportar de forma lineal.

El TIC será un controlador difuso de tipo Mandani, con su método de defusificación tipo *centroide*; se deberá considerar que el controlador es de acción inversa, ya que si la temperatura del líquido está bajo el punto de control, el controlador deberá calentar más el líquido para que la temperatura regrese al punto de control, tarea que se consigue incrementando la salida analógica del controlador.

Elaborar una interfase HMI con controles para iniciar o apagar el proceso mediante botones de ON/OFF, indicadores del valor del punto de control (SP), en °C, el valor en línea de las temperaturas de los tanques y el estado de la variable manipulada (MV).

Se deberá tener además una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y otra gráfica con el comportamiento de la variable manipulada (MV), para efectos de visualización del desempeño del controlador en todo momento.

4.2.3 Fundamento teórico

El objetivo del control anticipativo es sensar la perturbación de una variable antes de afectar al proceso y tomar la acción correctiva para evitar un efecto dañino al producto.

Determinar condiciones de estabilidad es mucho más difícil con sistemas no lineales que en sistemas lineales, y se debe parcialmente, a que el comportamiento del sistema no solo es influido por la **frecuencia** de las señales sino incluso por la **amplitud** de ellas. Como consecuencia se tiene que la señal de error se detecta un tiempo después de que se produjo el cambio en la carga y ya ha sido afectado el producto, ocurriendo la corrección cuando ya no es necesario o muy tarde.

En esta ocasión, se resolverá este problema con la intervención de un controlador difuso, cuya naturaleza se presta más para procesos no lineales y con tiempos muertos extensos, aceptando varias señales de referencia y obteniendo así un control más eficiente que uno convencional, e interpretando matemáticamente lo que el usuario en base a experiencia previa conoce sobre el sistema. El control difuso podrá reemplazar al controlador realimentado y al controlador de lazo abierto que usualmente se utiliza en conjunto para efectuar el control anticipativo, debido a que soporta la creación de múltiples entradas y que no necesariamente trabaja sólo con el error transitorio del sistema, pudiendo trabajar como controlador realimentado y procesar perturbaciones al sistema en un solo algoritmo.

Aplicar esta técnica de control implica un conocimiento amplio, exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso. La relación

entre la variable de salida y la variable de entrada, constituye el modelo del proceso y es la función de transferencia del sistema de control en adelante.

Se puede decir, que no se puede especificar un procedimiento único de diseño para el control difuso. Métodos de diseño como por ejemplo el lugar de las raíces, respuesta en frecuencia, o márgenes de estabilidad únicamente sirven para sistemas lineales y como ya se explicó el control difuso es un sistema no necesariamente lineal del cual depende en gran mayoría el conocimiento previo práctico que cada diseñador obtiene en la elaboración de un controlador difuso.

4.2.4 Equipo necesario

1. Tanque 1
2. Tanque 2
3. Bomba eléctrica 1
4. Bomba eléctrica 2
5. Sensor de temperatura 1
6. Sensor de temperatura 2
7. Niquelina
8. Fuente ajustable 0-5V_{DC}
9. Tarjeta PMD-1208LS
10. Tubería de retorno
11. Manguera A1
12. Tarjeta PMD-1208LS
13. Cables de conexión.

4.2.5 Procedimiento

1. Comunicar el tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1.
2. Colocar la tubería de retorno a tanque.
3. Llenar con agua los dos tanques a 15cm.
4. Se usarán dos sensores de temperatura, el del tanque 1 irá a la tarjeta "TEMPERATURA 1", y el sensor parte inferior del tanque 2 irá en la tarjeta "TEMPERATURA 2".

- Se usarán las dos niquelinas posicionadas en el tanque izquierdo que serán manejadas por el controlador (PC). Hacer las conexiones necesarias para que la PC maneje las niquelinas a través de una salida analógica de la tarjeta PMD-1208LS.

Estos pasos se resumen en la gráfica 4.10.

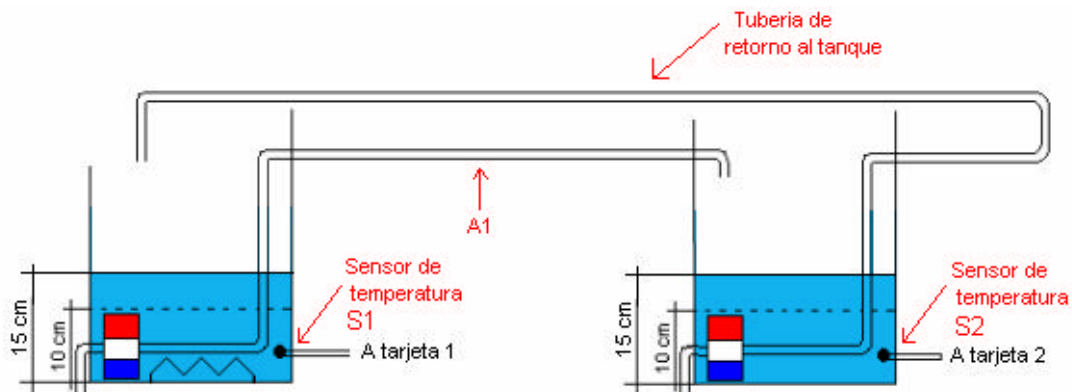


Figura 4.10. Conexiones del módulo para el Control Anticipativo Difuso

- Conectar las salidas de los sensores de temperatura a las entradas analógicas de la tarjeta PMD-12080LS.
- Las bombas serán manejadas con la fuente 0–10V_{DC} del módulo. Con cables conectores realizar las conexiones adecuadas para que la fuente del módulo maneje las bombas.
- Elaborar el programa para la visualización y control del módulo mediante PC, a través de la tarjeta PMD-1208LS en el Software LabVIEW. Aquí constará la interfase HMI con los controles e indicadores solicitados en el enunciado, la configuración necesaria para que la tarjeta de adquisición de datos se comunique satisfactoriamente con el módulo CPTS-1.
- Utilizar la herramienta *Fuzzy Logic toolbox* del programa Matlab para modelar el controlador difuso, de dos entradas, una la temperatura de perturbación (tanque A) y otra con el error entre el set point y la temperatura del tanque B. Como salida se tendrá la intensidad de control de las niquelinas.
- Ejecutar el archivo creado dentro del programa en LabVIEW de interfase y control.

11. Establezca una tasa de muestreo de 4000 muestras por segundo para la adquisición de las señales de los sensores de temperatura.
12. Precalentar el agua del tanque A hasta 28°C.
13. Ejecute un cambio de set point de 20 °C a 30 °C.
14. Obtenga gráficamente los valores de M_p (máximo sobreimpulso), T_r (tiempo de subida del 0 al 90%), T_s (tiempo de establecimiento con $\pm 5\%$ respecto al SP) y e_{ss} (error estacionario).
15. Obtenga gráficamente el comportamiento de la variable manipulada con respecto a la temperatura de perturbación (tanque A) y la variable del proceso tanque B.

CAPITULO V

IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRÁCTICAS

Implementar una técnica de control en un proceso dado, implica un conocimiento amplio sobre la dinámica del proceso y de todas las variables que intervienen en él, además de tener presente los algoritmos de control de cada lazo.

Estas estrategias, se aplican con el fin de lograr un control regulatorio óptimo sobre la variable o variables de interés, las cuales toman estados inestables en la operación normal del proceso, como resultado de las perturbaciones internas y externas al proceso.

En consecuencia, el funcionamiento correcto de un sistema de control está determinado por la naturaleza del proceso, de las características de los lazos de control y de perturbaciones internas y externas.

Antes de aplicar una técnica de control en un proceso, es importante tomar en cuenta que un regulador instalado, al iniciar su operación, requiere de una sintonización sin importar la calidad del mismo.

Si por algún motivo no es posible reducir el error estático a la inestabilidad del proceso, se debe pensar entonces en la estrategia de control para mejorar la respuesta de esa variable en función a la calidad del producto.

5.1 PRÁCTICA #1: CONTROL PID

5.1.1 Enunciado

Se tiene un tanque de capacidad de 7 galones el cual almacena agua; se cuenta con dos bombas, la bomba B1 que permite el desalojo de líquido y la bomba B2 que alimenta al tanque de agua, como ilustra la figura 5.1.

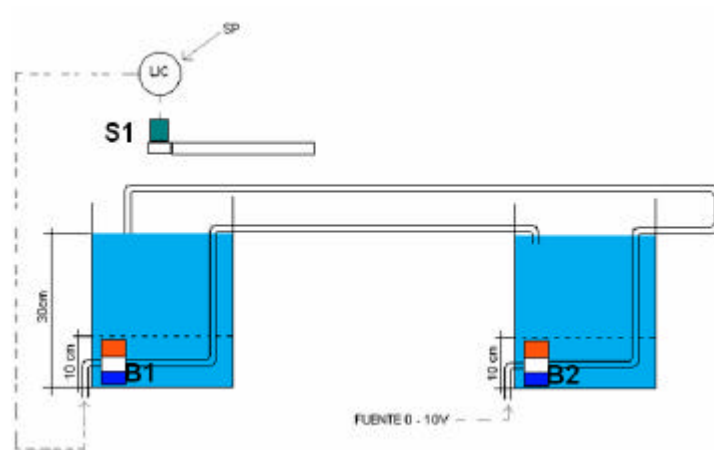


Figura 5.1. Esquema para el Control PID

Se desea implementar en el tanque izquierdo, un controlador PID, de manera que se pueda ajustar el punto de control del nivel de líquido del tanque 1 dentro del rango especificado del equipo (10 cm a 30 cm), regulando el flujo de desfogue de la bomba B1. Se dispone de un sensor de nivel S1 ubicado en el tanque izquierdo. La bomba B2 será utilizada únicamente para provocar perturbaciones en el sistema al ingresar agua al tanque en mención.

5.1.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.1, la bomba de desfogue será manejada por el controlador de nivel LIC (PC) y la de abastecimiento por la fuente del módulo de 0 – 10V_{DC}. Esta última tiene como función afectar el nivel del tanque 1, produciendo cambios en el nivel del líquido y de esta manera que el controlador cumpla su función. Para comenzar, llenar con agua los dos tanques, el uno a una altura de 25cm, y el otro a 20cm. Para poner el módulo en funcionamiento, se necesita hacer primero conexiones de hardware, para luego proceder con el programa de interfase y control en la PC. Las conexiones son descritas a continuación.

5.1.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.2 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno. Ubicar el sensor de nivel en su respectivo soporte sobre el tanque izquierdo del módulo.

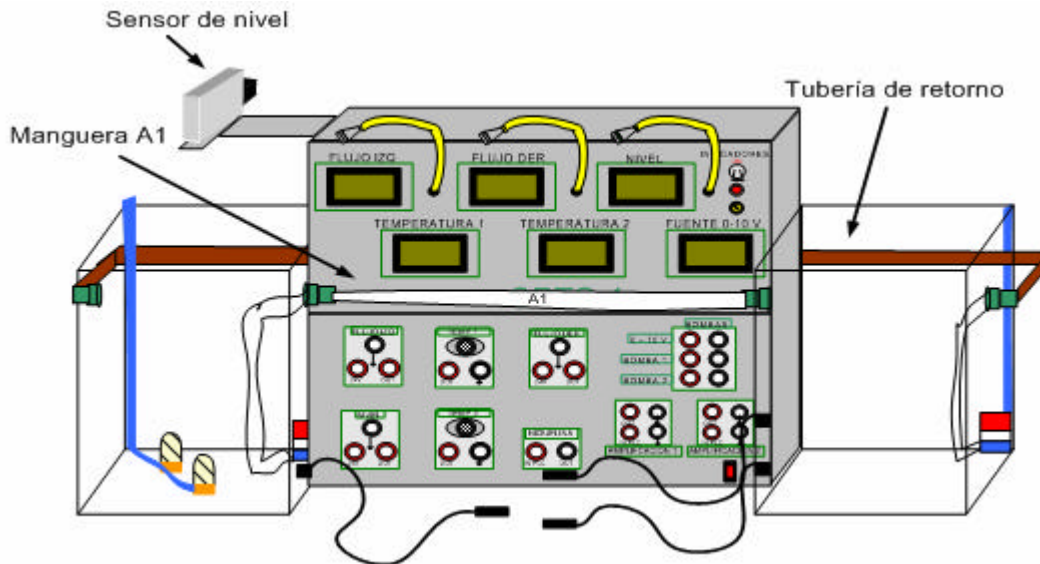


Figura 5.2. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

A continuación, conectar el sensor de nivel a su correspondiente cable M12, el cual provee al mismo de 24 V_{DC} para su funcionamiento y entrega la señal de nivel a los jacks de salida en el panel frontal. Esto se ilustra en la figura 5.3.

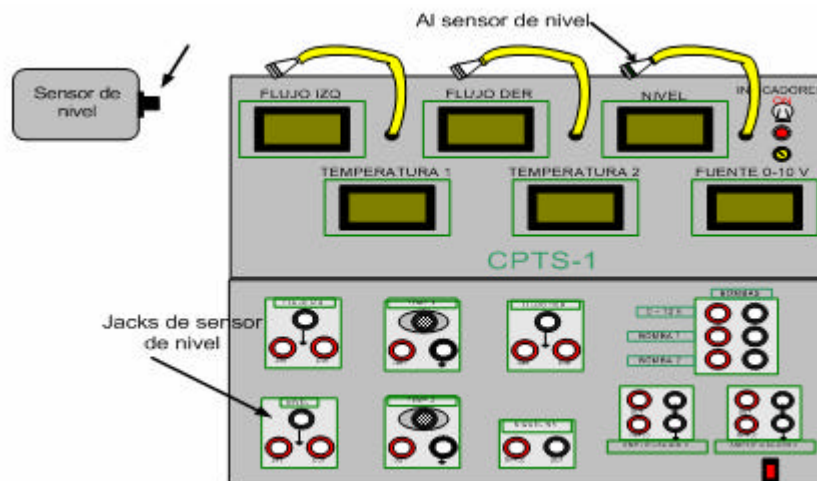


Figura 5.3. Conexión del sensor de nivel

Para que la PC reciba la señal de nivel del tanque izquierdo, conectar la salida del sensor de nivel LT1 desde los jacks de nivel en el panel frontal a los pines 1 y

3 de la tarjeta PMD-1208LS que corresponden al canal analógico de entrada CH0 IN y alimentar el sensor con 24 V_{DC} desde una fuente externa, tal como está ilustrado en la figura 5.4.

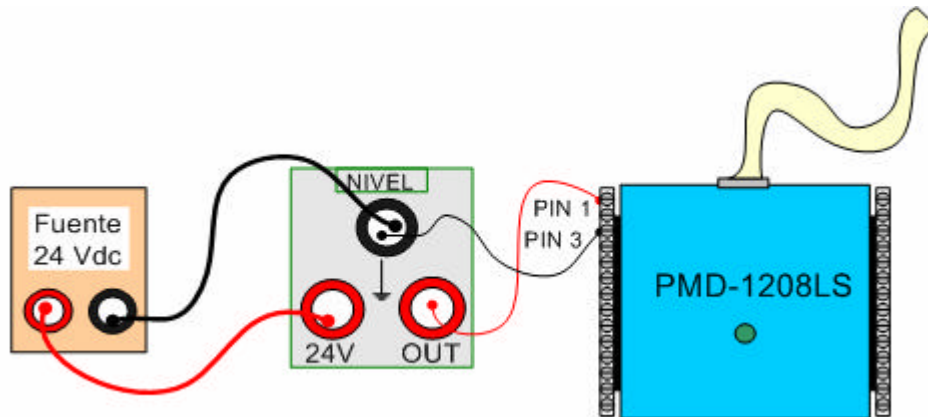


Figura 5.4. Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor

Para controlar el funcionamiento de la bomba de desfogue desde la PC, conectar el pin 12 (tierra) y pin 13 (D/A OUT 0) que corresponde a la salida analógica 0 de la tarjeta PMD-1208LS a los jacks de entrada de la tarjeta de amplificación 1 de las bombas del módulo CPTS-1, para luego conectar la salida de la tarjeta de amplificación al jack de la bomba 1, tal como está ilustrado en la figura 5.5, todo esto localizado en el panel frontal del módulo.

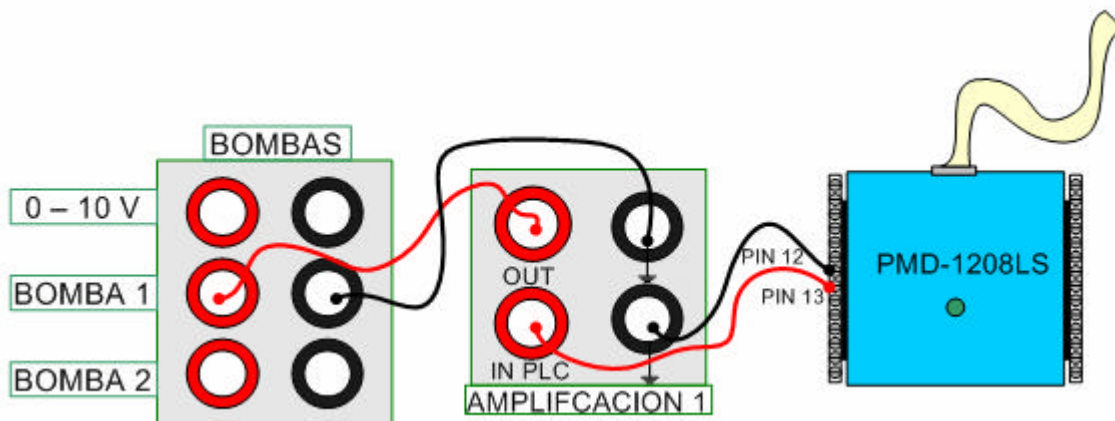


Figura 5.5. Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC

La bomba de abastecimiento (bomba 2) es manejada con la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo, con las conexiones descritas en la figura 5.6.

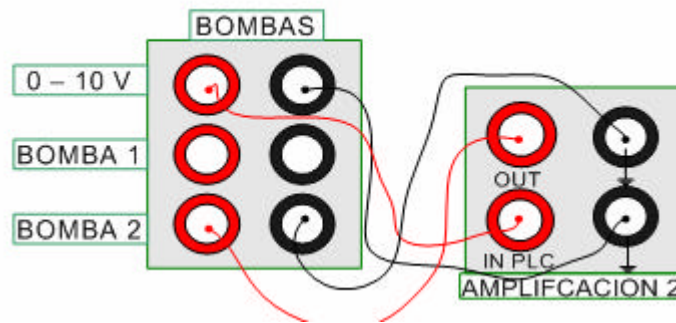


Figura 5.6. Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0 – 10 V_{DC}

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los switchs de los indicadores, de la fuente variable, y la de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

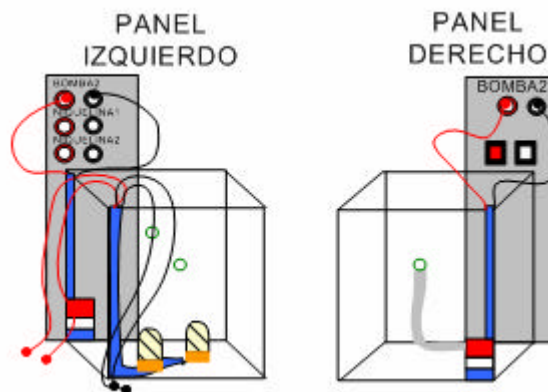


Figura 5.7. Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo

5.1.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado únicamente en la PC de control el software LabVIEW y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal, en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la

comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utilizó una sola entrada y una salida analógica para la señal de nivel y el control de la bomba de desfogue respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN con el rango de $\pm 10 V_{DC}$, que se usará para la señal de nivel y serán convertidos de voltios a centímetros posteriormente. Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 [UC](correspondiente a 0 - 5 V_{DC}), y será usada para el control de la bomba de desfogue. Esto se ilustra en las figuras 5.8 y 5.9.

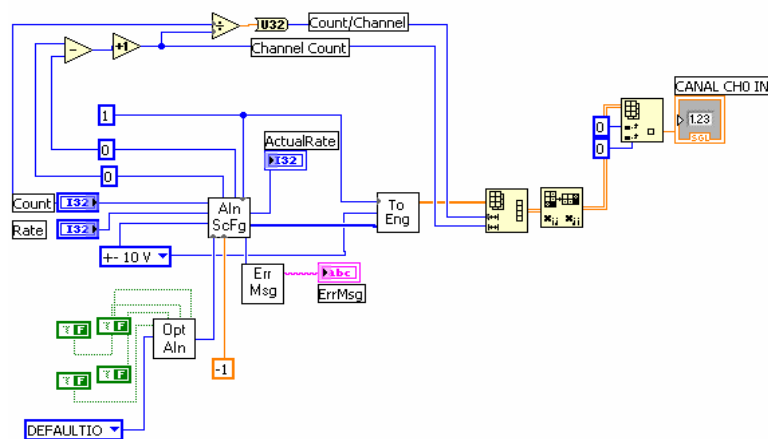


Figura 5.8. Diagrama de bloques para el canal de entrada CH0 IN de la PMD-1208LS

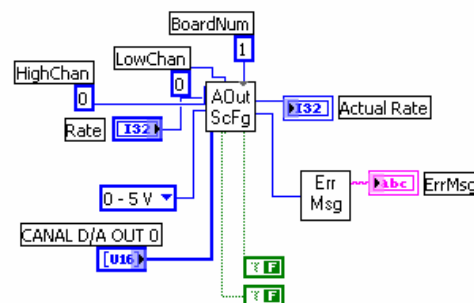


Figura 5.9. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-12008LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques del canal de entrada de la figura 5.8 consta en la interfase del programa como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.8 y 5.9 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como In1canal.vi (canal de entrada) y Outchannel0.vi (canal de salida).

La transformación de unidades crudas a de ingeniería del sensor de nivel se hizo tomando en cuenta que 30 cm en el tanque A representa 0 voltios para el sensor de nivel, y 5 cm representa 5 voltios, con lo que se obtiene:

$$C_m = -5 \cdot V + 30,$$

En donde:

$C_m \rightarrow$ centímetros (0 – 30cm)

$V \rightarrow$ voltios (0 – 5 V)

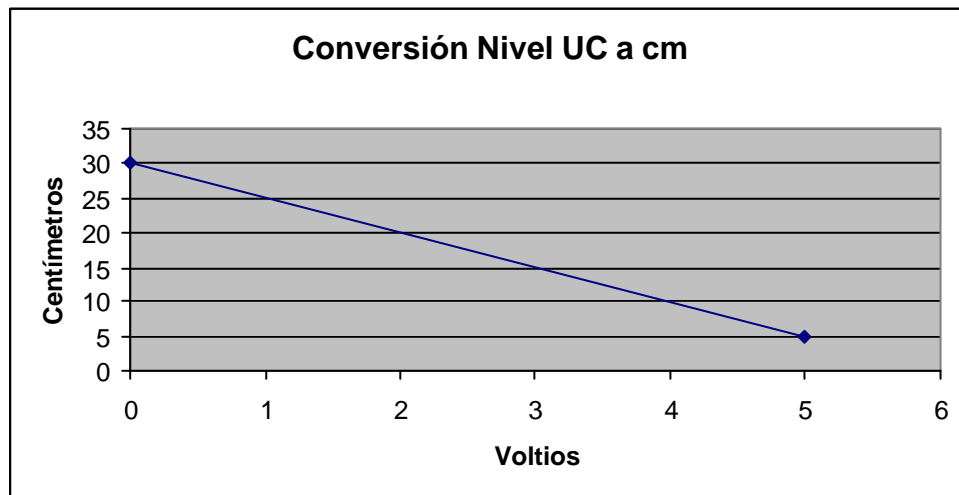


Figura 5.10. Conversión de unidades del sensor del nivel

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, como lo ilustra la figura 5.11.

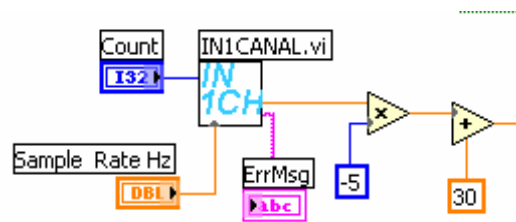


Figura 5.11. Transformación de unidades crudas a de ingeniería de la señal de nivel en el diagrama de bloques del programa

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 3 botones de control, los cuales servirán para encender el proceso, parar el proceso y habilitar los controles de sintonización. Se tomó en cuenta que la acción del controlador PID es directa. El control numérico del set point de nivel del tanque izquierdo está ubicado en la parte superior de la interfase HMI y tiene un rango de 0 a 30 centímetros. En el recuadro de sintonización en la parte inferior, se colocó controles con los valores detallados en la tabla 5.1, con sus correspondientes unidades:

Tabla 5.1. Controles de interfase del Control PID

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 - 2000	adimensional
Constante Integral I	0 - 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 - 2000	Minutos
Bias	0 - 1023	Crudas
Límite bajo	0 - 1023	Crudas
Límite alto	0 - 1023	Crudas

Todos los valores de la tabla 5.1 más el valor de la señal de nivel (PV) y el set point son conectados al VI *Pid directo*, el cual es el controlador PID (directo). Los valores de bias, límite alto y bajo tienen un rango de entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador se entrega al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS y este trabaja en unidades crudas. Este valor luego se expresa en voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC} , el cual controla la intensidad de trabajo de la bomba de desfogue.

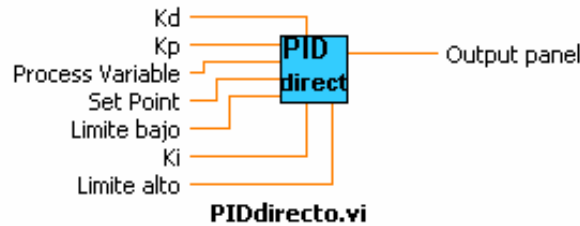


Figura 5.12. Parámetros del instrumento virtual *PID directo*

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y otra gráfica con el comportamiento de la variable manipulada (MV), para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para el nivel del tanque (PV en cm), estado de la bomba de desfogue (on/off), estado de las 2 alarmas, y una representación gráfica del estado del tanque, para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 1 se ilustra en la figura 5.13.

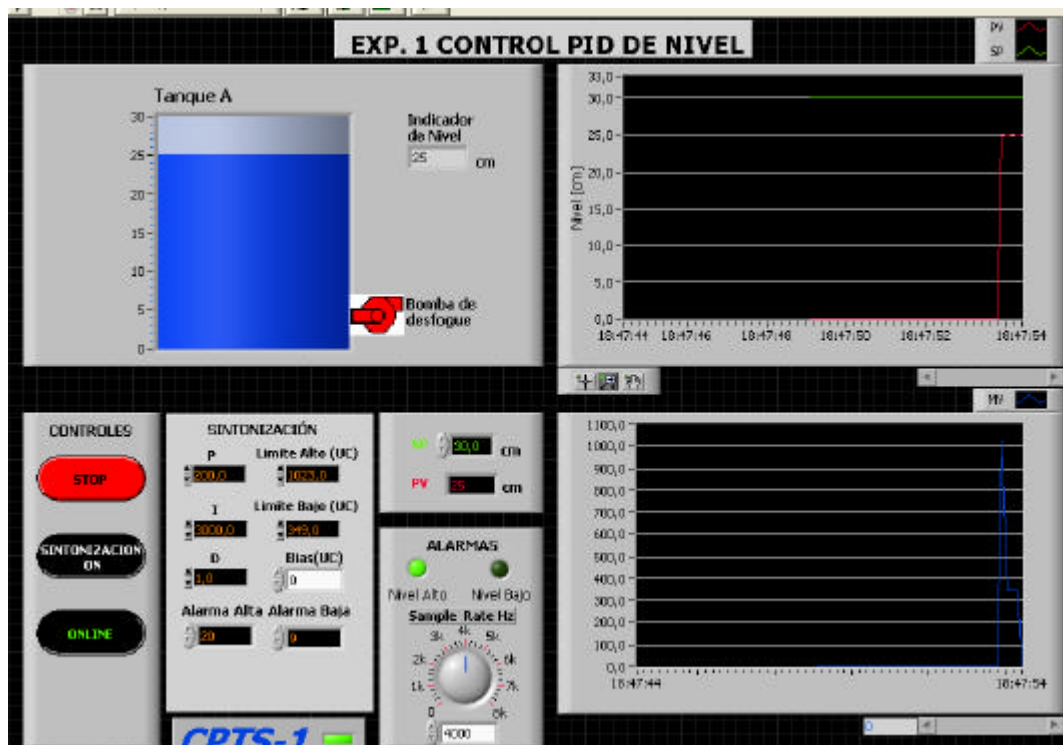


Figura 5.13. Interfase del Control PID

A continuación en la figura 5.14, se tiene el diagrama de bloques completo del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

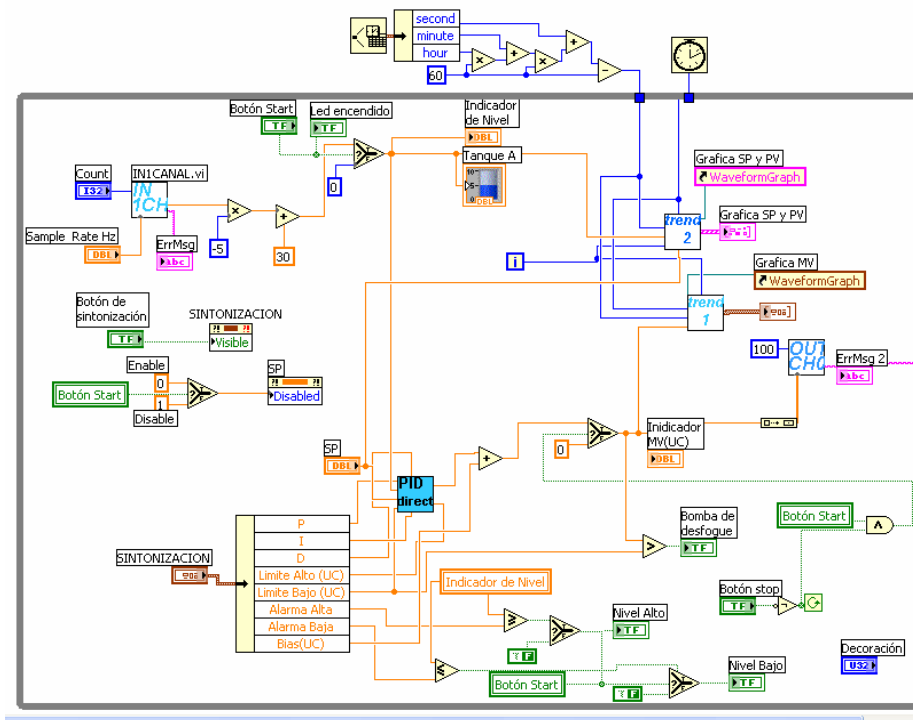


Figura 5.14. Diagrama de bloques Control PID

5.1.3 Resultados

A continuación se tiene los resultados obtenidos luego de la ejecución de todos los pasos del procedimiento de la práctica. Tal como se solicitó, se estableció una tasa de 8000 muestras por segundo para la adquisición de la señal de nivel, se estableció un cambio de set point de 15 a 10 cm, y se fue variando las constantes K_p , K_i , K_d , observando los cambios de comportamiento del sistema. Al final se resume en la tabla 5.2 los valores exactos de los índices de desempeño solicitados para cada uno de los casos.

Se inició la práctica utilizando un controlador tipo P. Así, con constantes de $K_p=100$, $K_i = 0$, $K_d = 0$ para los cálculos respectivos, se obtuvo la siguiente gráfica:

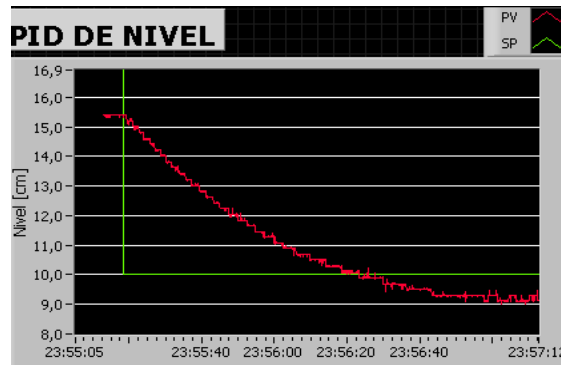


Figura 5.15. Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador P = 100

En la figura 5.15 se observa que el proceso en estas condiciones tiene un comportamiento lento y un sobreimpulso notorio. Al duplicar el valor de la constante K_p (200), se obtuvo los siguientes resultados:

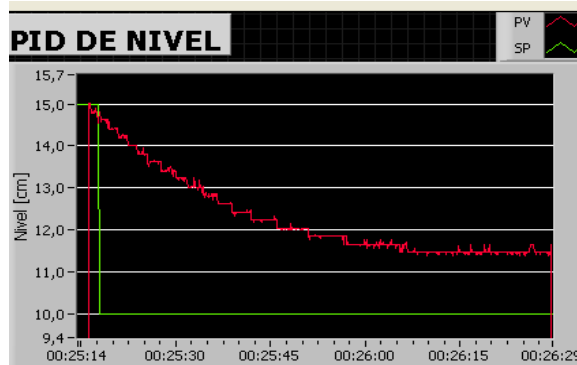


Figura 5.16. Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador P con $K_p = 200$

Al analizar el cambio realizado, se observa que la variable del proceso no logra alcanzar el set point establecido, disminuyendo el tiempo de subida del proceso. Para continuar la práctica se incorporó la constante K_i al controlador (control PI), con valores de 200 para K_p y 300 para K_i , y se obtuvo los siguientes resultados:

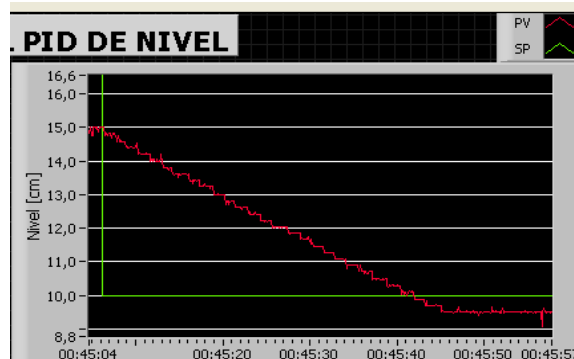


Figura 5.17. Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PI con $K_p = 200$ y $K_i=300$

En estas condiciones, se procedió a aumentar considerablemente la constante K_i y establecerla en 3000, donde se tiene como resultado la siguiente gráfica:

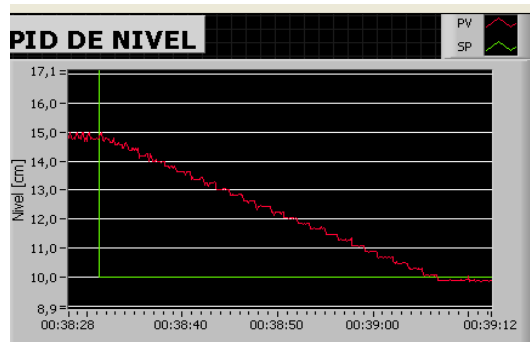


Figura 5.18. Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PI con $K_p = 200$ y $K_i=3000$

Es claro al ver la anterior gráfica que el aumento del sobreimpulso va de la mano con el valor de la constante K_i . Para finalizar, se utilizó un control PID, teniendo como constantes del mismo 200 para K_p , 3000 para K_i , y 1 para K_d , obteniendo los siguientes resultados:

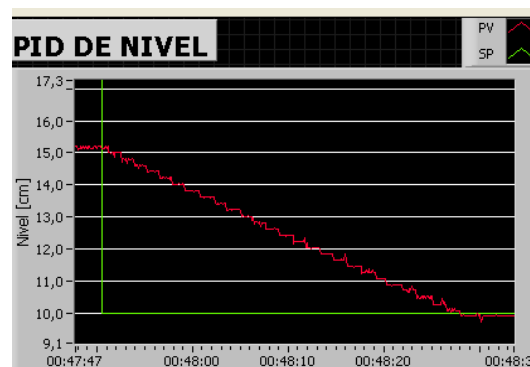


Figura 5.19. Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PID de constantes $K_p = 200$, $K_i=3000$ y $K_d=1$

Finalmente se efectuó una prueba extra con las mismas constantes establecidas en la última instancia, pero aplicando una perturbación con la bomba de retorno al ingresar agua adicional al tanque A, luego de que el sistema alcanzó el set point de 10 cm y se estabilizó.

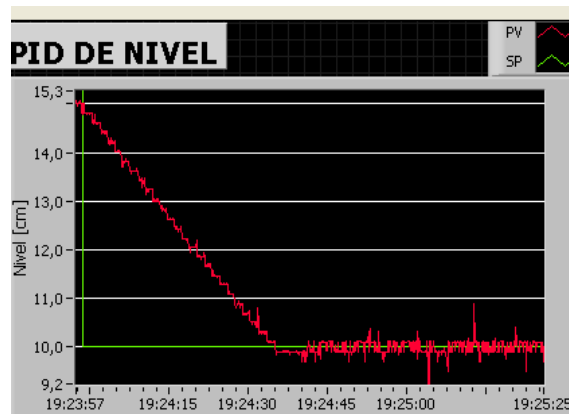


Figura 5.20. Resultados del escalón de 20 a 10 cm con controlador PID y perturbación de la bomba de retorno

A continuación en la tabla 5.2, se tiene los índices de desempeño solicitados en este paso:

Tabla. 5.2 Resumen de índices de desempeño del escalón de 15 a 10 cm en varias configuraciones

Medición	Control P Kp=100	Control P Kp=200	Control PI Kp=200 Ki=300	Control PI Kp=200 Ki=3000	Control PID Kp=200 Ki=3000 Kd=1	Control PID con perturba- ción
$T_r(10-90)\%$ [seg]	45'	No cumple	28'	29'	31'	31'
$T_s 5\%$ [seg]	No cumple	No cumple	41'	39'	38'	38'
M_P [cm]	0,9	No cumple	0,45	0,1	0,08	0,8
M_P [%]	9	No cumple	4,5	1	0,8	8
e_{ss}	0,9	-1,5	0,4	0,1	0,08	No aplica

Al analizar los valores de la tabla 5.2, se observa que mientras más pequeña sea la constante K_p , más grande será el error estacionario y el sobreimpulso. Al analizar los efectos de la constante K_i , se observa una reducción en el tiempo de establecimiento y una disminución en el sobreimpulso y el error estacionario a medida que sea aumenta este valor. Al agregar cautelosamente la constante K_d , se logró afinar un poco más el control, teniendo un mejor desempeño en el sobreimpulso y en su error estacionario. Para finalizar, al aplicar la perturbación al sistema con control PID, el controlador logra mantenerlo estable dentro con $\pm 8\%$

con respecto al set point, lo que entra en los requerimientos estándares de este tipo de sistema.

5.1.4 Conclusiones y Recomendaciones

Una vez implementado el programa de interfase y control, se observó que la ganancia que se le da al controlador mejora la respuesta del sistema, pero todavía existe una leve desviación de la variable de proceso con el punto de consigna (set point).

Gracias a la utilización de todas las combinaciones de los valores de las constantes K_p , K_i y K_d , se pudo llegar a concluir cómo se ven reflejados estos valores en los índices de desempeño de este sistema, llegando al final a una sintonización satisfactoria, con y sin perturbaciones al sistema.

Será muy difícil aminorar el tiempo de subida presentado, ya que el controlador con la sintonización actual hace funcionar a la bomba de desfogue a su intensidad máxima en aproximadamente un 95% del tiempo. El error estacionario pudiera mejorar con una calibración más precisa del sensor de nivel, pero es difícil de lograrlo, debido a la precisión de la perilla de calibración del dispositivo. El tiempo de establecimiento y sobreimpulso máximo presentados en el sistema presentan valores óptimos en su funcionamiento.

La precisión del sensor de nivel alcanza real importancia en el momento en que el sistema alcanza su estabilidad. El efecto de oleaje del agua en el tanque es una de las razones más importantes para que el valor sentido no sea preciso todo el tiempo. En contraparte, la utilización del software LabVIEW, permite hacer cálculos más precisos, mejores de lo que puede hacer un PLC.

Se recomienda establecer un límite bajo en alrededor de 350 UC, debido a que en base a las pruebas, las bombas recién responden alrededor de este valor y no con valores más bajos.

Además se recomienda no trabajar sobre ni bajo los valores de 25 cm y 6 cm, debido a que en niveles demasiado bajos la bomba comienza a tener problemas en su funcionamiento y con valores muy altos el agua comienza a desplazarse involuntariamente hacia el otro tanque a través de las mangueras debido a la presión de la cantidad de agua existente.

Hay que tomar en cuenta que en este sistema se controla únicamente la bomba de desfogue, y una vez sobrepasado el set point, no podrá ser compensado este sobreimpulso creado, viniendo a ser este el error estacionario final si es que la bomba de retorno no es puesta en funcionamiento.

Con esto se comprueba que con el modulo CPTS-1 se puede realizar satisfactoriamente el control PID de nivel desde una PC.

5.2 PRÁCTICA #2: CONTROL EN CASCADA

5.2.1 Enunciado

Se tiene dos tanques de almacenamiento de agua. El tanque izquierdo cuenta con un sensor de temperatura S1, un dispositivo de calentamiento y una bomba de desalojo. En el tanque derecho se encuentra un sensor de temperatura S2 y otra bomba de desalojo como se indica en la figura 5.21.

Las bombas de desalojo tienen como finalidad recircular el líquido entre los tanques.

Aplicando la técnica de control en cascada se desea controlar la temperatura en el tanque derecho, debiendo para ello controlar la temperatura del tanque izquierdo.

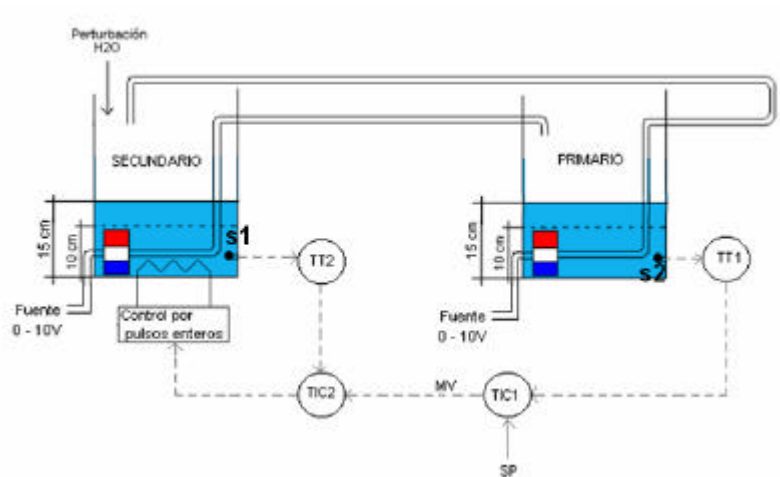


Figura 5.21. Esquema para el Control en Cascada

5.2.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.21, las bombas serán manejadas por la fuente de 0 – 10V para circular el agua entre el tanque 1 y 2 para mezclar la temperatura del agua de los mismos. Las niquelinas van a ser manejadas por la PC a través de la tarjeta PMD-1208LS. A continuación se tiene las conexiones necesarias en hardware y la configuración en software para poner la práctica en funcionamiento.

5.2.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.22 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno.

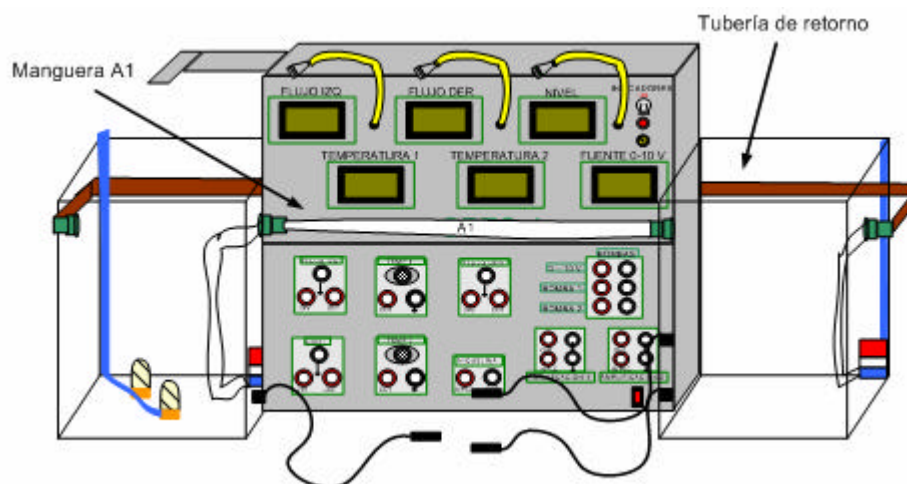


Figura 5.22. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

Para que la PC maneje las niquelinas a través de la tarjeta de adquisición de datos, se debe conectar la salida analógica D/A OUT 0 (pin 13) y tierra (pin 12) a los jacks de entrada de la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas, como se ve en la figura 5.23.

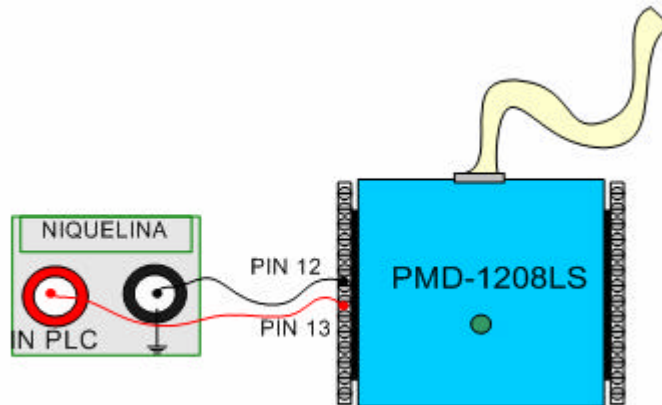


Figura 5.23. Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas

Conectar el plug del sensor de temperatura del tanque izquierdo a su jack correspondiente en la tarjeta de temperatura 1 en el panel frontal del módulo, y conectar la salida de la tarjeta de temperatura hacia el CH0 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 1 y su tierra es el pin 3. Estos pasos lo ilustra la figura 5.24.

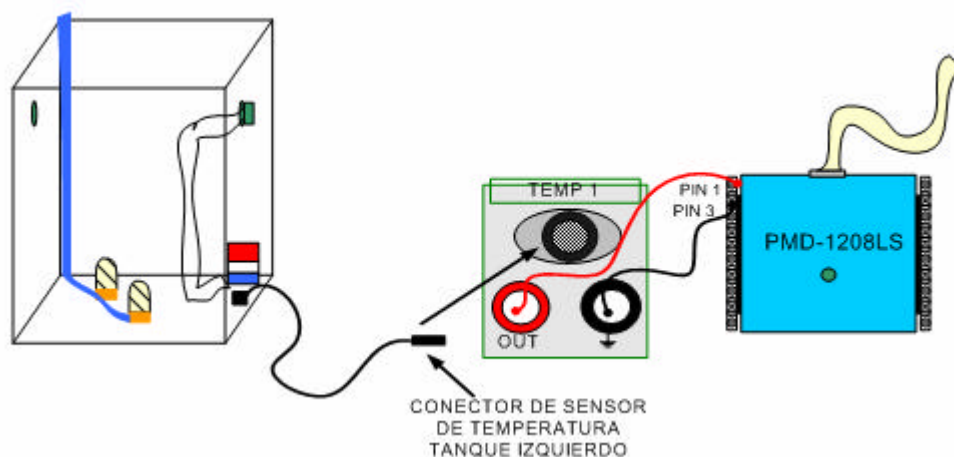


Figura 5.24. Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo

Repetir los pasos anteriores con el conector del sensor de temperatura inferior del tanque derecho hacia la tarjeta de temperatura 2, y desde la salida de esta hacia el CH1 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 2 y su tierra es el pin 6, como lo ilustra la figura 5.25.

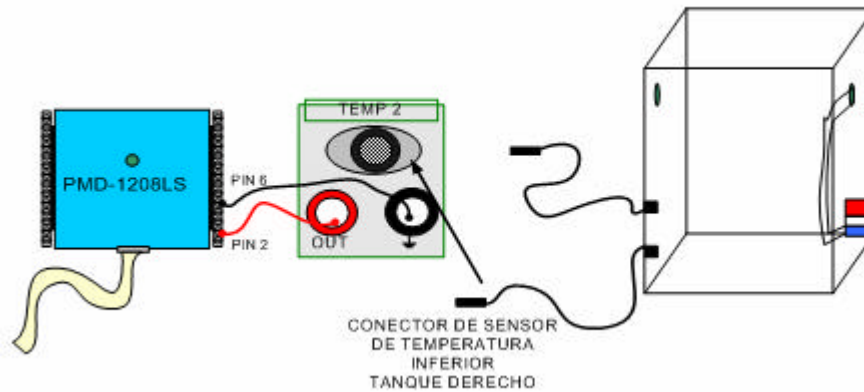


Figura 5.25. Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho

Conectar la fuente 0 – 10 V_{DC} a las dos tarjetas de amplificación de las bombas, para controlar el flujo de agua desde la misma, como lo ilustra la figura 5.26.

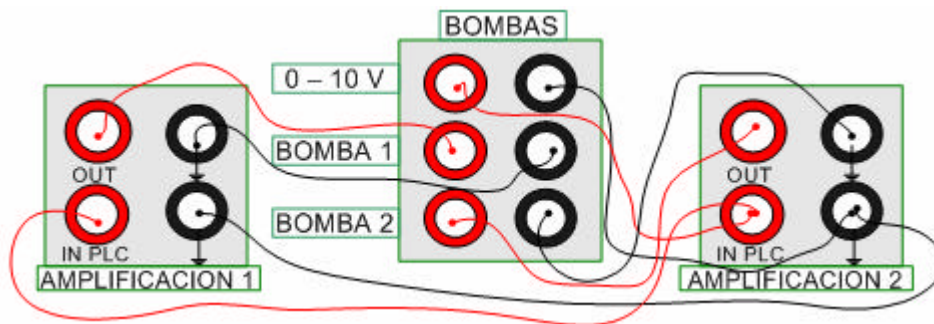


Figura 5.26. Conexiones de la fuente de 0-10 V_{DC} para manejar las dos bombas

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas y niquelinas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los swtichs de los indicadores, de la fuente variable, de los sensores de temperatura, de las niquelinas y de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

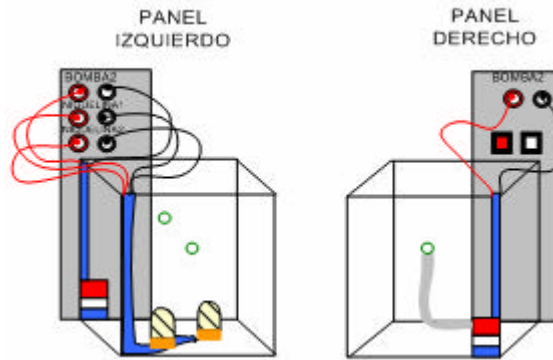


Figura 5.27. Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo

5.2.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado únicamente en la PC de control el software LabVIEW y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utiliza dos entradas y una salida analógica para los dos sensores de temperatura y el control de las niquelinas respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN (sensor de temperatura izquierdo) con el rango de $+10 V_{DC}$, y otro igual para la entrada analógica CH1 IN (sensor de temperatura derecho), los cuales serán convertidos de voltios a grados centígrados posteriormente. Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a $0 - 5 V_{DC}$), y será usada para el control de las niquelinas. Esto se ilustra en las figuras 5.28, 5.29.

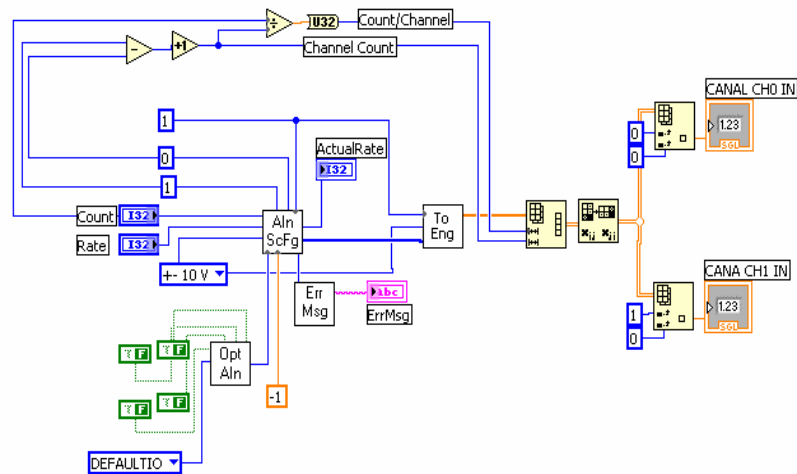


Figura 5.28. Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS

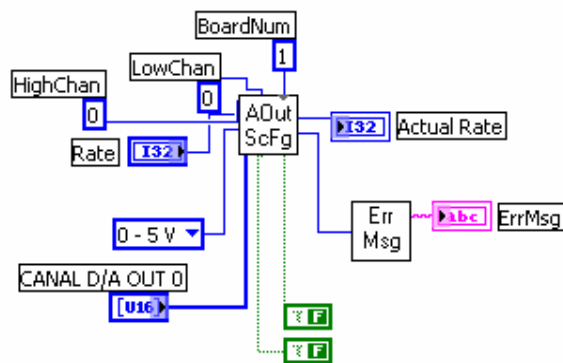


Figura 5.29. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-1208LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques de los canales de entrada de la figura 5.28 consta, en la interfase del programa, como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo en total, 4000 muestras por cada canal. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.28 y 5.29 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como *In2canales.vi* (canales de entrada) y *Outchannel0.vi* (canal de salida).

En base a las mediciones de temperatura del agua en los tanques y del voltaje entregado por los sensores de temperatura, se obtiene la gráfica de la figura 5.30, y al linealizarla se tiene la siguiente función de transferencia, la cual es implementada para transformar las señales de los sensores de temperatura de voltios a grados centígrados:

$$Y = 5,6629X + 12,146$$

En donde:

$Y \rightarrow$ grados centígrados (20 – 70°C)

$X \rightarrow$ unidades crudas (0 – 10 V)

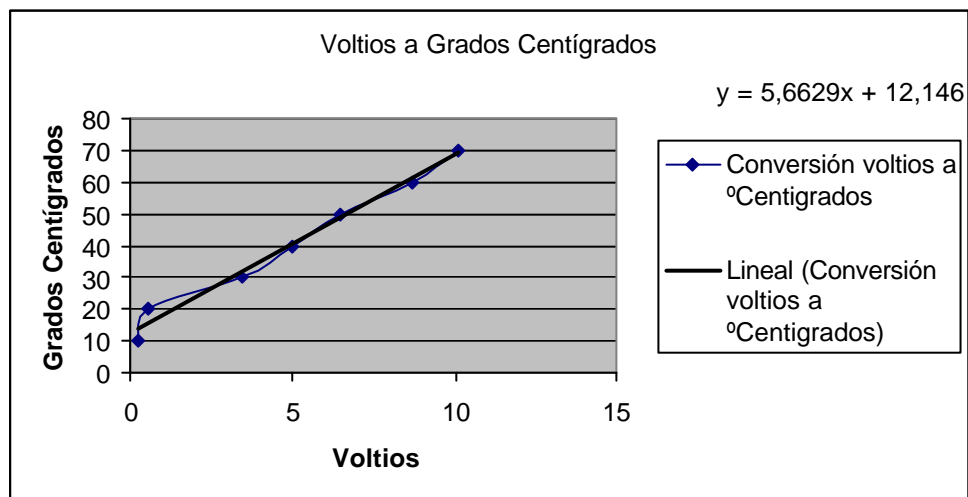


Figura 5.30. Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, una para cada sensor de temperatura, tal como lo ilustra la figura 5.31 para obtener los dos valores de temperatura.

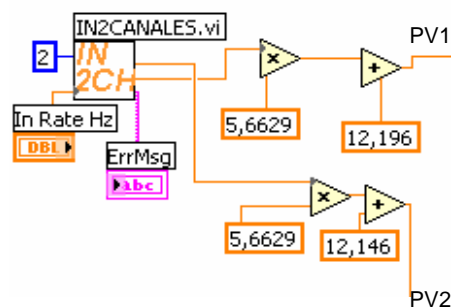


Figura 5.31. Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 4 botones de control, los cuales servirán para encender el proceso, para el proceso, sintonizar los parámetros del controlador TIC1 y por último para sintonizar los parámetros del controlador TIC2.

El control numérico del set point de temperatura del tanque derecho está ubicado en la parte superior de la interfase HMI, y tiene un rango de 0 a 70 grados centígrados. La variable manipulada del controlador primario funciona como set point del controlador secundario, teniendo el mismo rango de funcionamiento que el set point anterior, y puede ser visto su estado junto al gráfico del tanque que le corresponde.

En el recuadro de sintonización de TIC1 y TIC2 respectivamente, se colocaron controles para ingresar los valores detallados en las tablas 5.3 y 5.4:

Tabla 5.3. Controles del TIC1 del Control en Cascada

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 70	°C
Límite alto	0 – 70	°C
Límite bajo	0 – 70	°C

Tabla 5.4. Controles del TIC2 del Control en Cascada

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 1023	UC
Límite alto	0 – 1023	UC
Límite bajo	0 – 1023	UC

Se tomó en cuenta que la acción de los dos controladores es inversa.

Todos los valores de la tabla 5.3 más la señal de temperatura del tanque derecho(PV1) y el set point del mismo son conectados al VI *Simple Pid*, el cual es el controlador primario PID (acción inversa). Los valores de los límites y el bias están entre 0 y 70 (grados centígrados) debido a que la salida de este controlador pasa a ser el set point del controlador secundario TIC2.

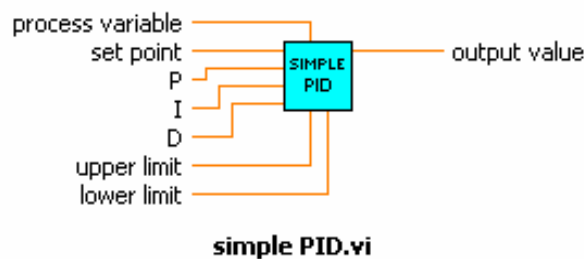


Figura 5.32. Parámetros del instrumento virtual Simple PID

Los valores indicados en la tabla 5.4 más la señal de temperatura del tanque izquierdo (PV2) y la salida del controlador primario (set point secundario) son conectados al otro bloque VI *Simple Pid*, el cual funciona aquí como controlador secundario, y su acción es inversa.

Los valores de bias, límite alto y bajo tienen un rango de entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador se entrega al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS y este trabaja en unidades crudas. Este valor luego se expresa en voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC}, el cual controla la intensidad de trabajo de las niquelinas.

Se tiene en la interfase dos gráficas del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y la variable manipulada escalada(MV), para los dos controladores, para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para la temperatura de los dos tanques (en grados centígrados), estado de la niquelina (on/off), con una representación gráfica en barra de las temperaturas de los tanques y su set point,

para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 2 se ilustra en la figura 5.33.

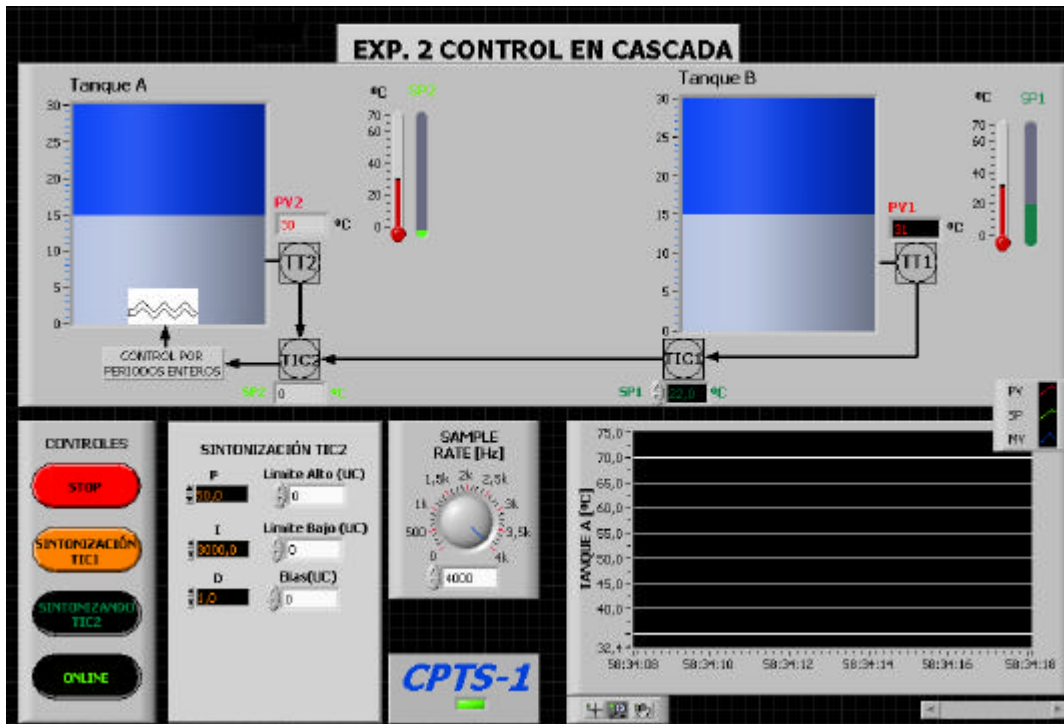


Figura 5.33. Interfase del Control en Cascada

A continuación en la figura 5.34, se tiene el diagrama de bloques completo del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

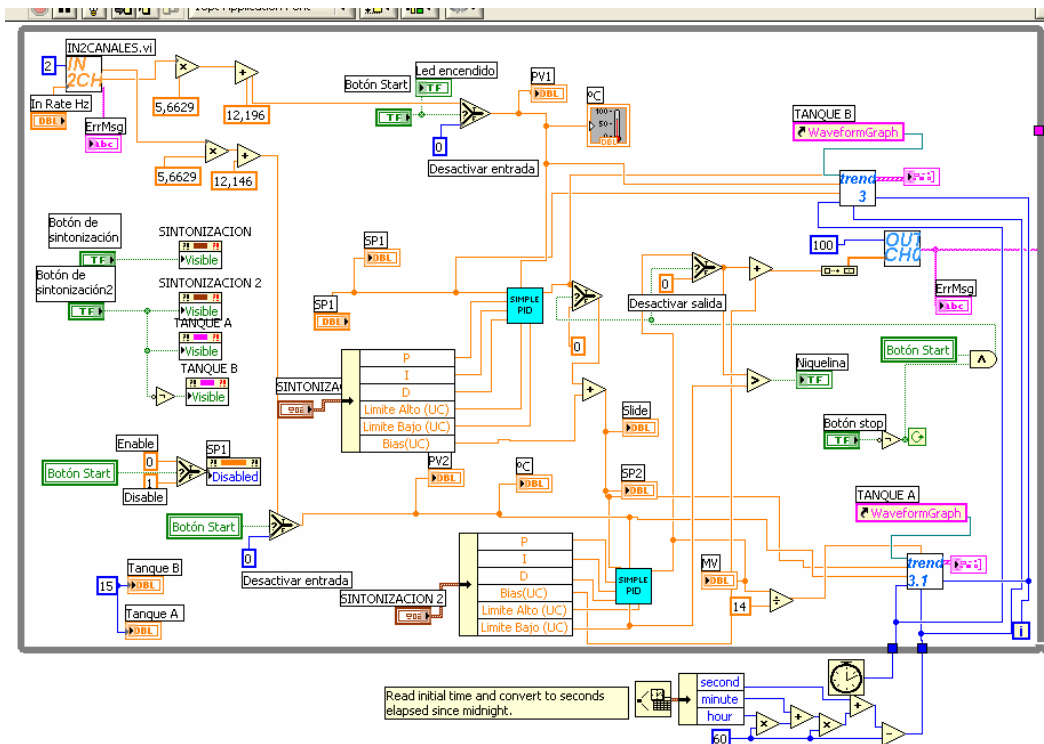


Figura 5.34. Diagrama de bloques del Control en Cascada

5.2.3 Resultados

Los siguientes resultados corresponden a un cambio en la temperatura del tanque derecho (B) del módulo CPTS-1 de 20 a 30 grados centígrados, teniendo en cuenta que el sistema se controla en cascada y utiliza dos controladores en serie para este fin. Se debe tomar en cuenta que se aplicó una perturbación de ingreso de varios litros de agua fría al tanque A una vez alcanzado el punto de consigna. Los valores de las constantes de los controladores primario TIC1 y secundario TIC2 utilizadas son:

- TIC1: $K_p = 5000$, $K_i = 1000$, $K_d = 0$; Límite alto = 32 °C, Límite bajo = 15 °C.
- TIC2: $K_p = 200$, $K_i = 50$, $K_d = 1$; Límite alto = 1023 UC, Límite bajo = 660 UC.

Las señales de los sensores de temperaturas son adquiridas con una tasa de muestreo de 4000 muestras por segundo. A continuación se tiene las gráficas de desempeño de los dos controladores en el control de cascada:

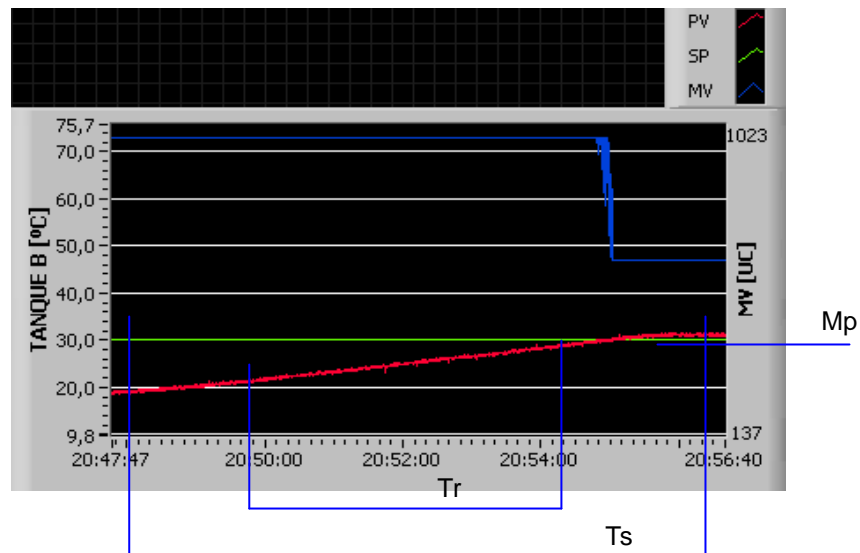


Figura 5.35. Tiempo de subida (T_r), Tiempo de establecimiento (T_s), y máximo sobreimpulso del controlador primario

La tabla 5.5 que se muestra a continuación resume los índices de desempeño tomados de la práctica:

Tabla. 5.5. Índices de desempeño del control en cascada con un escalón de 20 a 30 °C

<i>Medición</i>	<i>Valor</i>
Calentamiento [°C]	10
$T_{r(10-90)\%}$ [min y seg]	5'
$T_s 5\%$ [min y seg]	8' 53"
M_P [°C]	1,5
M_P [%]	5

Al dejar de lado el uso del controlador secundario y poner a funcionar el controlador primario directamente sobre las niquelinas, con constantes de $K_p=200$, $K_i=50$, $K_d=1$, Límite alto = 1023 y Límite bajo =660, se obtuvieron las siguientes gráficas de desempeño:

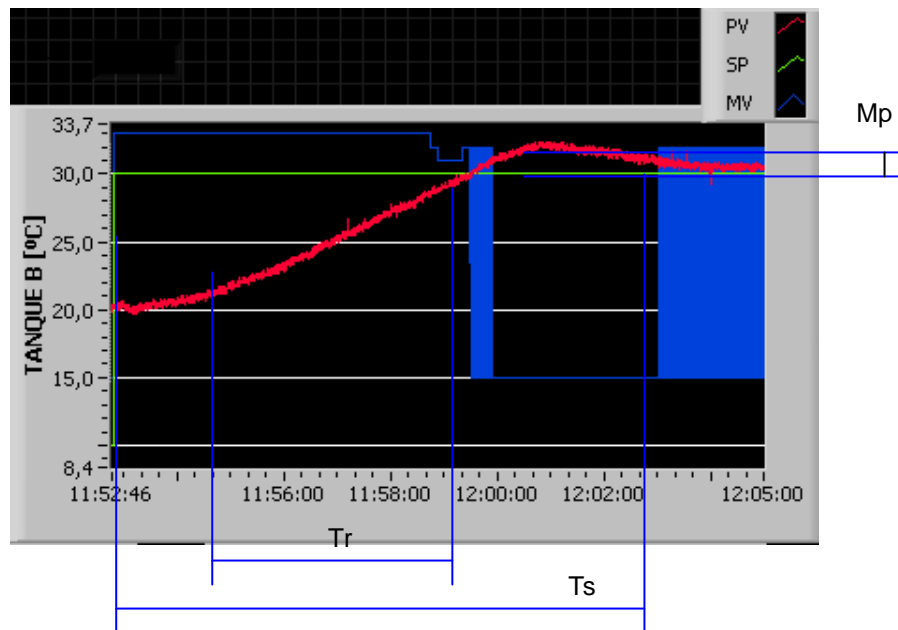


Figura 5.36. Tiempo de subida (T_r), Tiempo de establecimiento (T_s), y máximo sobreimpulso con un solo controlador

La tabla 5.6 que se muestra a continuación resume los índices de desempeño tomados de esta prueba con un único controlador:

Tabla. 5.6. Índices de desempeño del sistema con un solo controlador

<i>Medición</i>	<i>Valor</i>
Calentamiento [°C]	10
$T_r(10-90)\%$ [min y seg]	4' 47"
$T_s 5\%$ [min y seg]	9' 32"
M_P [°C]	2
M_P [%]	6,66

Comparando las gráficas obtenidas con el control en cascada y el control con un solo controlador, se observa que ambos tienen un desempeño similar en el tiempo de subida y su error estacionario, teniendo el control en cascada un mejor comportamiento en el tiempo de establecimiento y provocando un menor sobreimpulso en el sistema.

5.2.4 Conclusiones y Recomendaciones

Aplicando el control en cascada en el módulo CPTS-1, se puede observar que la temperatura secundaria está en función de la primaria, es decir, que el punto de control del controlador secundario se reajusta con el primario.

Se comprueba de esta manera que cualquier cambio de temperatura en el secundario se compensa con la del primario, obteniendo una mejor estabilidad en la variable de proceso. La sintonización de los rangos máximos y mínimos del controlador primario debe ser analizado cuidadosamente para que el secundario no tenga demasiados cambios abruptos en su funcionamiento, específicamente con el valor ingresado para la constante integral.

Se observa que hay que tener un poco más de cuidado en la sintonización de estos procesos, debido a que tiene largos períodos muertos y que el efecto de calentamiento o enfriamiento del agua no es lineal.

Se recomienda establecer un límite bajo en alrededor de 670 UC en el controlador secundario, debido a que en base a las pruebas, las niquelinas recién responden alrededor de este valor y su efecto es imperceptible con valores más bajos.

Se recomienda también que el controlador del lazo menor (controlador secundario) se sintonice con la ganancia más alta posible y un rango estrecho de acción del controlador primario entre sus límites alto y bajo, para tener un efecto más inmediato en el sistema.

Se demuestra así que con el módulo CPTS-1 se puede implementar de manera satisfactoria esta técnica de control desde una PC.

5.3 PRÁCTICA #3: CONTROL ANTICIPATIVO

5.3.1 Enunciado

Se tiene dos tanques de almacenamiento de agua. El tanque izquierdo cuenta con un sensor de temperatura S1, un dispositivo de calentamiento y una bomba

de desalojo. En el tanque derecho se encuentra un sensor de temperatura S2 y otra bomba de desalojo como se indica en la figura 5.37.

Las bombas de desalojo tienen como finalidad recircular el líquido entre los tanques.

Aplicando la técnica de control anticipativo se desea controlar la temperatura en el tanque derecho, debiendo para ello sensar la temperatura del tanque izquierdo.

Si la temperatura del tanque izquierdo es menor con 2°C que la temperatura que se desea en el tanque derecho, el controlador incrementará su salida en un 25%, aumentando de esta manera el desalojo de líquido mediante las bombas; de igual manera si la temperatura en el tanque izquierdo es mayor con 2°C , el controlador disminuye su salida en el porcentaje mencionado, disminuyendo así el desalojo de líquido.

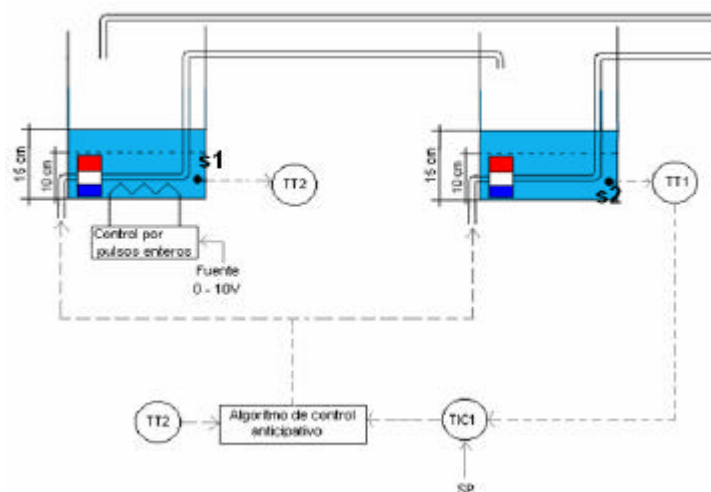


Figura 5.37. Esquema para el control Anticipativo

5.3.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.37, las bombas son manejadas por la PC para circular el agua entre el tanque 1 y 2 con el fin de mezclar la temperatura del agua de los mismos. La cantidad de líquido a bombear está en función del controlador. Las niquelinas son manejadas por la fuente de $0 - 10\text{V}_{\text{DC}}$ del módulo, y tendrán

una intensidad fija de calentamiento. El usuario deberá manejar la misma hasta un máximo de $5V_{DC}$ ya que el circuito de acondicionamiento para las niquelinas funciona con ese valor al máximo de su capacidad.

A continuación se tiene las conexiones necesarias en hardware y la configuración en software para poner la práctica en funcionamiento.

5.3.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.38 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno.

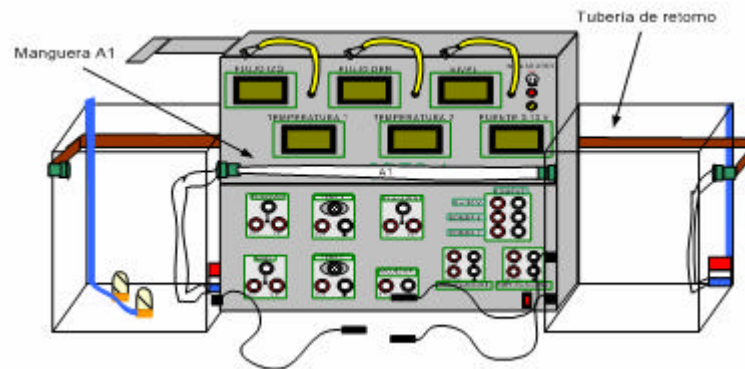


Figura 5.38. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

Juntar el conector del sensor de temperatura del tanque izquierdo a su jack correspondiente en la tarjeta de temperatura 1 en el panel frontal del módulo, y conectar la salida de la tarjeta de temperatura hacia el CH0 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 1 y su tierra es el pin 3. Estos pasos lo ilustra la figura 5.39.

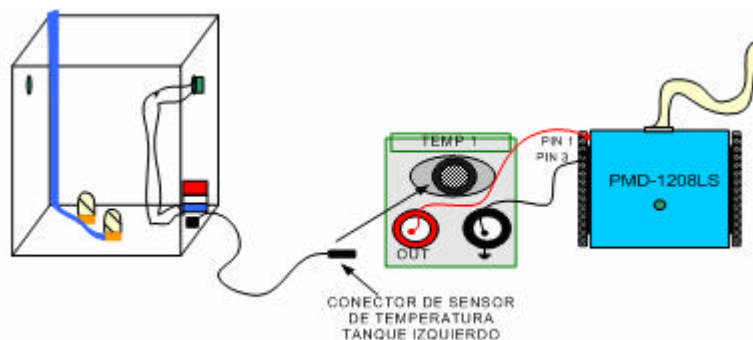


Figura 5.39. Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo

Repetir los pasos anteriores con el conector del sensor de temperatura inferior del tanque derecho hacia la tarjeta de temperatura 2, y desde la salida de esta hacia el CH1 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 2 y su tierra es el pin 6, como lo ilustra la figura 5.40.

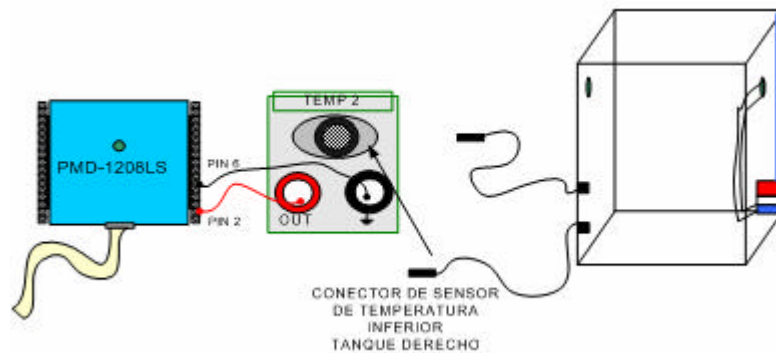


Figura 5.40. Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho

Para controlar la circulación de agua en el módulo CPTS-1 desde la PC, conectar el pin 12 (tierra) y pin 13 (D/A OUT 0) que corresponde a la salida analógica 0 de la tarjeta PMD-1208LS a los jacks de entrada de la tarjeta de amplificación 1 y de la tarjeta de amplificación 2 del módulo CPTS-1, para luego conectar la salida de las tarjeta de amplificación al jack de la bomba 1 y al de la bomba 2 respectivamente, tal como está ilustrado en la figura 5.41, todo esto localizado en el panel frontal del módulo.

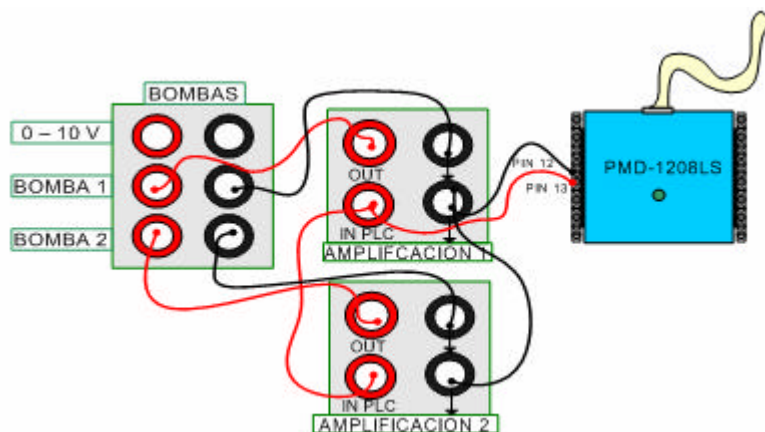


Figura 5.41. Conexiones necesarias para controlar las 2 bombas de agua desde la PC

Para que la fuente de $0 - 10 \text{ V}_{\text{DC}}$ maneje las niquelinas, conectar su salida a los jacks de entrada de la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas, como se ve en la figura 5.42.

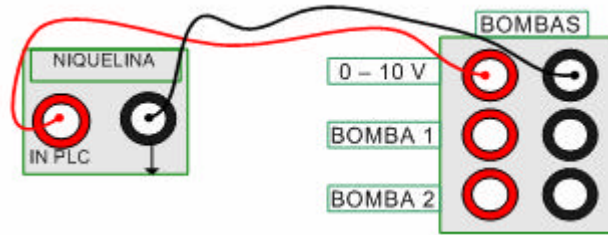


Figura 5.42. Conexión de la fuente de 0 -10 V_{DC} a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas y niquelinas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los swtichs de los indicadores, de la fuente variable, de los sensores de temperatura, de las niquelinas y de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

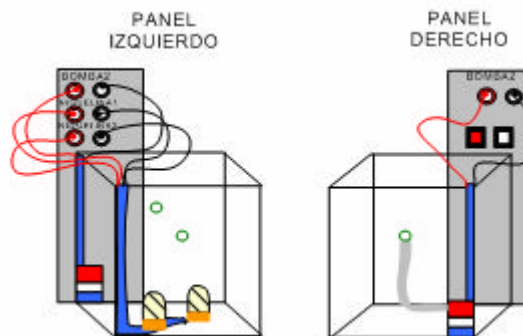


Figura 5.43. Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo

5.3.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado únicamente en la PC de control el software LabVIEW y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal, en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utiliza dos

entradas y una salida analógica para los dos sensores de temperatura y el control de las bombas respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crean los controles para la entrada analógica CH0 IN (sensor de temperatura izquierdo) con el rango de $+10 V_{DC}$, y otro igual para la entrada analógica CH1 IN (sensor de temperatura derecho), los cuales serán convertidos de voltios a grados centígrados posteriormente. Se crean también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a $0 - 5 V_{DC}$), y será usada para el control de las bombas. Esto se ilustra en las figuras 5.44 y 5.45.

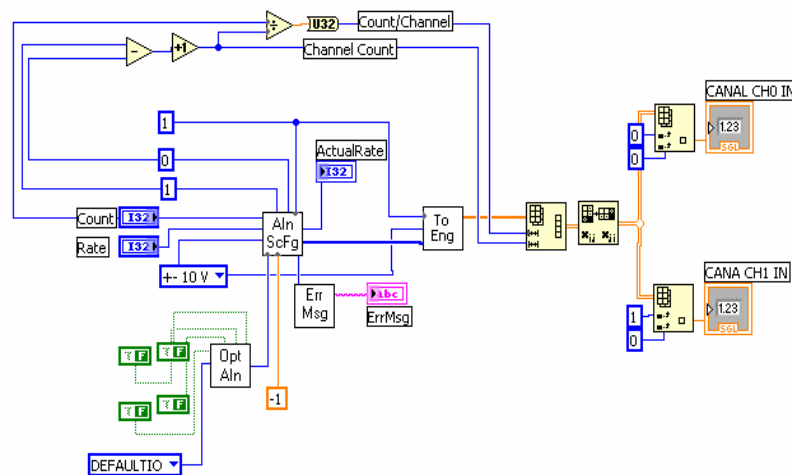


Figura 5.44. Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS

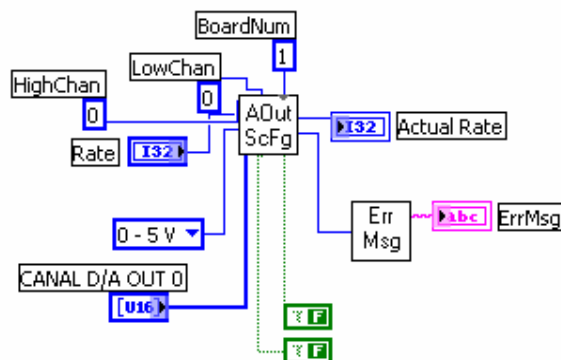


Figura 5.45. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-12008LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo

regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques de los canales de entrada de la figura 5.44 consta en la interfase del programa como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo en total, 4000 muestras por cada canal. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.44 y 5.45 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como *In2canales.vi* (canales de entrada) y *Outchannel0.vi* (canal de salida).

En base a las mediciones de temperatura del agua en los tanques y del voltaje entregado por los sensores de temperatura, se obtiene la gráfica de la figura 5.46, y al linealizarla se tiene la siguiente función de transferencia, la cual es implementada para transformar las señales de los sensores de temperatura de voltios a grados centígrados:

$$Y = 5,6629X + 12,146$$

En donde:

Y → grados centígrados (20 – 70°C)

X → unidades crudas (0 – 10 V)

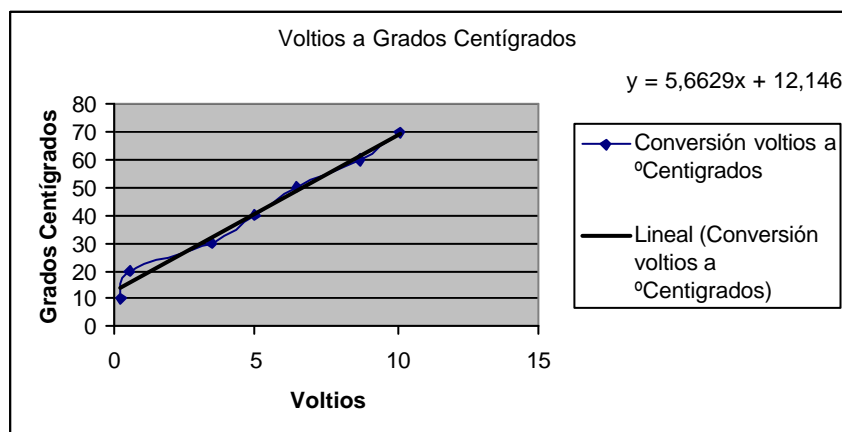


Figura 5.46. Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, una para cada sensor de temperatura, tal como lo ilustra la figura 5.47 para obtener los dos valores de temperatura.

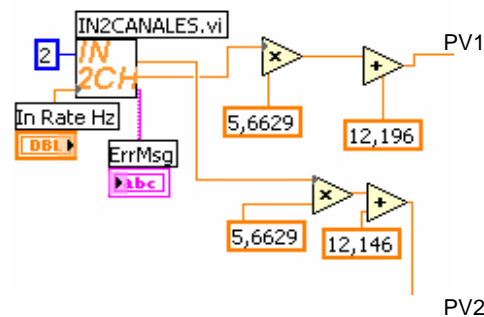


Figura 5.47. Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 3 botones de control, los cuales sirven para encender el proceso, detener el proceso y habilitar los controles de sintonización. El control numérico del set point de temperatura del tanque derecho está ubicado en la parte superior de la interfase HMI, y tiene un rango de 0 a 70 grados centígrados. En el recuadro de sintonización, se colocaron controles para ingresar los valores detallados en la tabla 5.7, con sus correspondientes unidades:

Tabla 5.7. Controles de sintonización del Control Anticipativo

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 1023	Crudas
Límite bajo	0 – 1023	Crudas
Límite alto	0 – 1023	Crudas

Todos los valores de la tabla 5.7 más la señal de temperatura del tanque derecho (PV1) y el set point del mismo son conectados al VI *Simple Pid*, el cual es el controlador PID (inverso). Los valores de bias, límite alto y bajo tienen un rango de entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador pasa por al algoritmo anticipativo y luego al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS, la cual trabaja en unidades crudas. Este valor se expresa luego en

voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC}, el cual controla la intensidad de trabajo de las bombas.

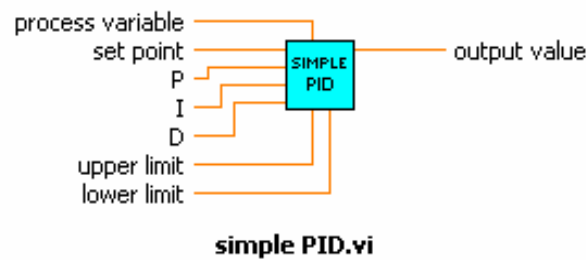
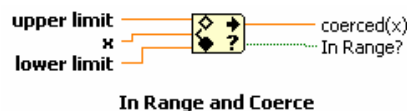


Figura 5.48. Parámetros del instrumento virtual simple PID

La acción anticipativa en este programa está en que si la temperatura del tanque izquierdo está bajo 2°C del set point, el algoritmo hará que las bombas trabajen un 25% más, y si está 2°C arriba, que las bombas trabajen un 25% menos.

Estos cálculos se realizan en el diagrama de bloques restando la temperatura del tanque izquierdo menos el set point de temperatura del tanque derecho, y con el instrumento virtual *In Range and Coerce.vi* se determina si esta diferencia está entre 0 y 2 o 0 y -2, multiplicando por 0.75 y 1.25 la variable manipulada respectivamente.



Determines whether **x** falls within a range specified by the **upper limit** and **lower limit** inputs and optionally coerces the value to fall within the range. The function performs the coercion only in Compare Elements mode. This function accepts time stamp values if all inputs are time stamp values.

Figura 5.49. Parámetros del instrumento virtual In Range and Coerce

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y otra gráfica con el comportamiento de la variable manipulada (MV), para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para la temperatura de los dos tanques, estado de las bombas (on/off), con una representación gráfica en barra de las temperaturas, indicadores del estado del algoritmo anticipativo, para efectos de monitoreo del sistema. La interfase completa de la práctica 3 se ilustra en la figura 5.50.

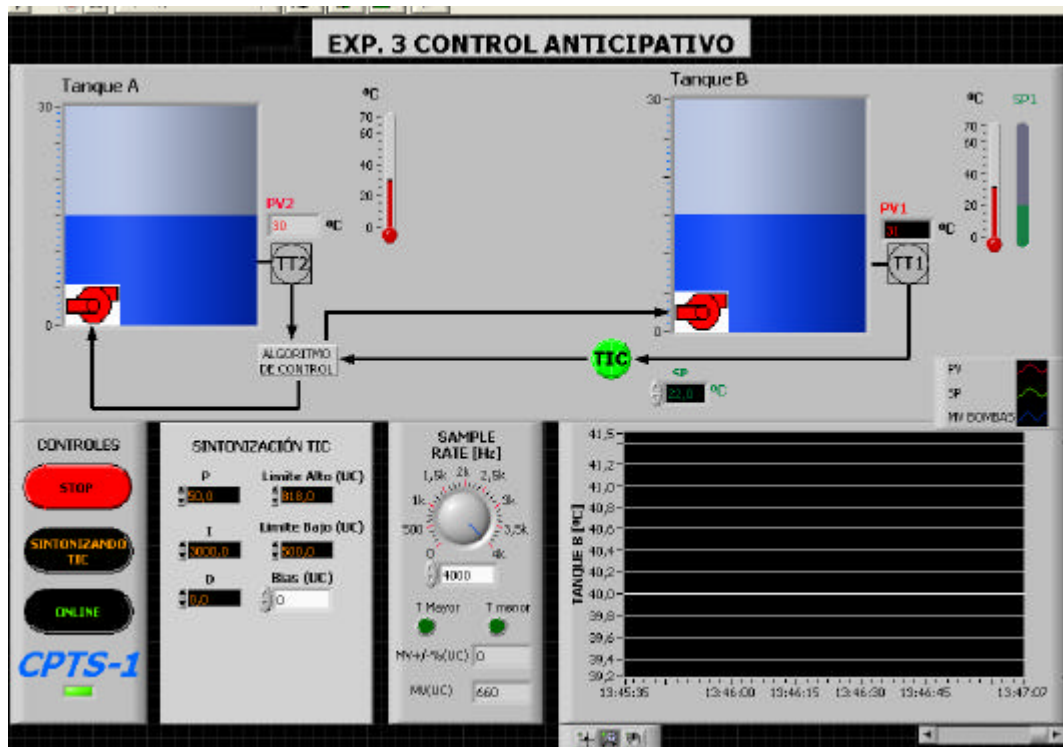


Figura 5.50. Interfase Control Anticipativo

A continuación en la figura 5.51, se tiene el diagrama de bloques completo del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

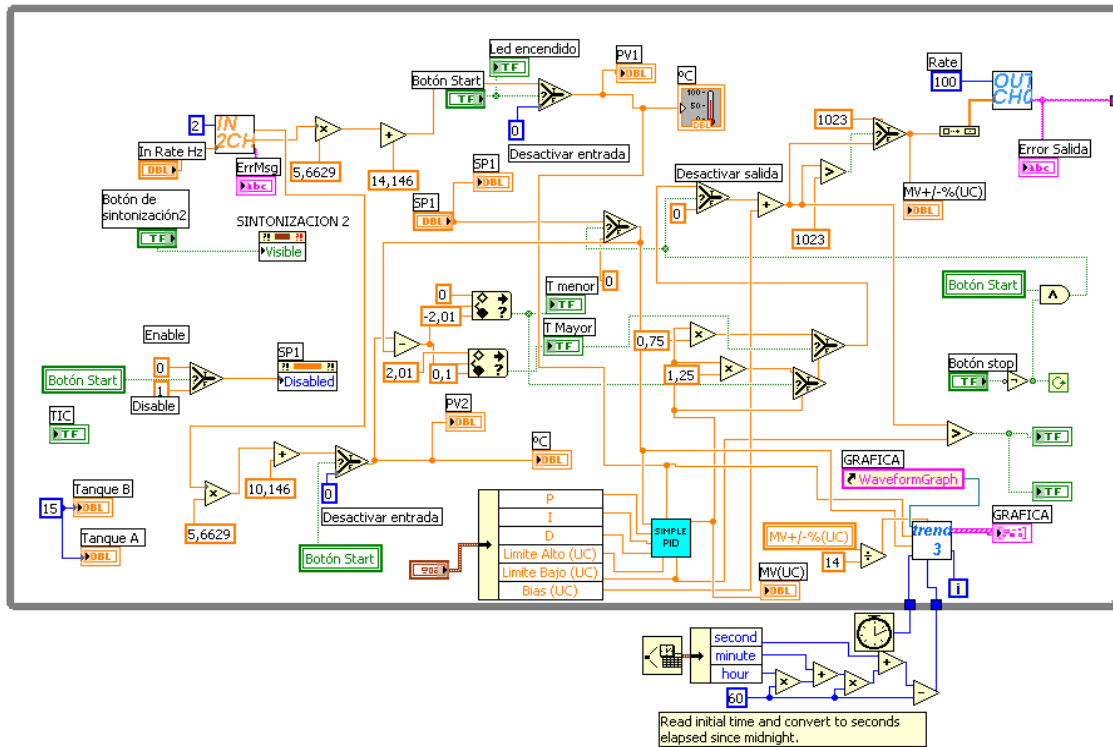


Figura 5.51. Diagrama de bloques Control Anticipativo

5.3.3 Resultados

Para la realización de la práctica, se estableció una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 50$, $K_i = 3000$, $K_d = 0$, límite alto = 818 y límite bajo = 500, para las constantes del controlador PID, tal como se solicitó en el enunciado de la práctica.

Se precalentó el tanque A hasta los 28 °C, para observar el comportamiento del sistema con esta perturbación de por medio. Se ejecutó a un cambio en la temperatura del tanque derecho (B) de 20 a 30 grados centígrados, teniendo en cuenta los requisitos del control anticipativo. A continuación se muestran las gráficas correspondientes a esta prueba:

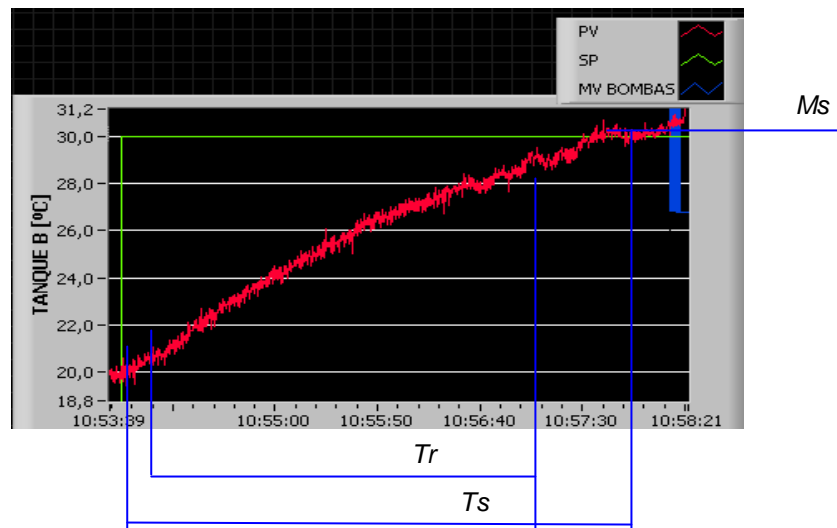


Figura 5.52. Tiempo de subida (T_r), de establecimiento (T_s) y máximo sobreimpulso (M_s) ante un escalón de 20 a 30 °C del control anticipativo

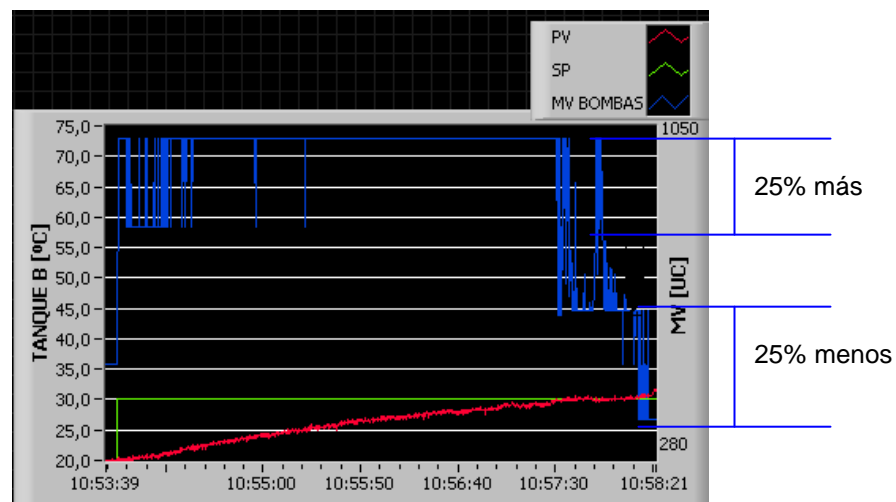


Figura 5.53. Efecto del algoritmo anticipativo sobre la MV

Observando la figura 5.52, se puede observar tanto el tiempo de subida, tiempo de establecimiento y sobreimpulso máximo existente en el proceso. En la figura 5.53 se puede apreciar claramente el cumplimiento del algoritmo anticipativo cuando la temperatura del tanque izquierdo entra en el rango de ± 2 °C con respecto al set point impuesto.

La tabla 5.8 que se muestra a continuación resume los valores de las mediciones hechas al sistema:

Tabla. 5.8. Índices de desempeño del control Anticipativo

Medición	Valor
Calentamiento	10

[°C]	
$T_{r(10-90)\%}$ [min y seg]	2' 49"
$T_s 5\%$ [min y seg]	4' 04"
M_P [°C]	0,9
M_P [%]	3

El sobreimpulso máximo porcentual obtenido no rebasa los requerimientos estándares de máximo 10% en este tipo de pruebas. Se observa que debido a que se controla la temperatura del tanque B en base al flujo de agua de un tanque al otro con una intensidad fija de calentamiento de las niquelinas, se produce un efecto de cambio más veloz en la variable del proceso que al manipular la intensidad de las niquelinas, las cuales provocan una respuesta más lenta del proceso, además de tener un mayor sobreimpulso.

Para continuar, se efectuó la misma prueba de escalón de 20 a 30°C, con la misma perturbación inicial, pero eliminando el control anticipativo y operando únicamente el control realimentado sobre las bombas, con las mismas constantes de sintonización que en los anteriores resultados.

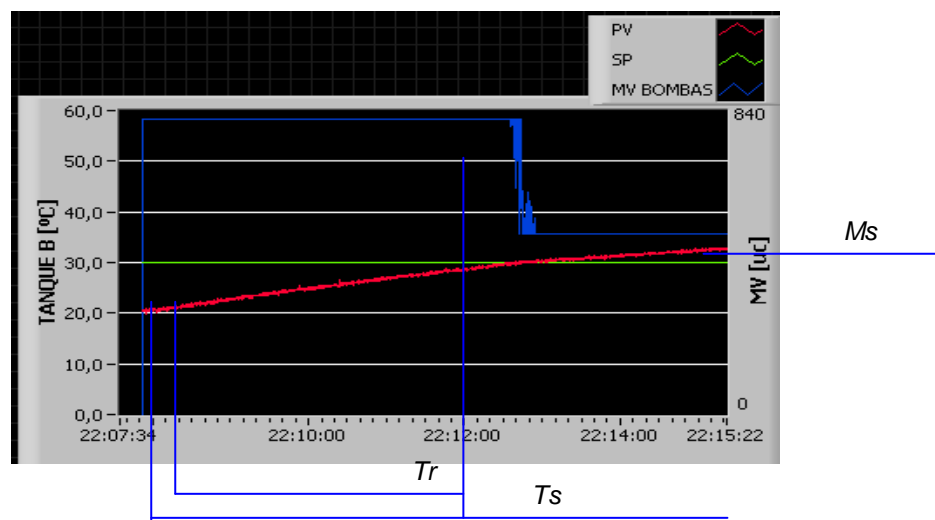


Figura 5.54. Tiempo de subida (T_r), de establecimiento (T_s) y máximo sobreimpulso (M_s) ante un escalón de 20 a 30 °C del control anticipativo

Así se tiene que la sintonización actual, combinado con el hecho de no tomar en cuenta la temperatura del tanque de agua de origen, hace que se afecte al proceso especialmente en el tiempo de establecimiento de la variable del proceso,

y en el sobreimpulso máximo generado, siendo los dos valores notoriamente mayores a los generados cuando el control anticipativo toma parte.

La tabla 5.9 que se muestra a continuación resume los valores de las mediciones hechas al sistema sin la presencia del control anticipativo:

Tabla. 5.9 Índices de desempeño del sistema sin control anticipativo

Medición	Valor
Calentamiento [°C]	10
$T_r(10-90)\%$ [min y seg]	3' 40"
$T_s 5\%$ [min y seg]	8' 10"
M_P [°C]	3,1
M_P [%]	10,33

Las figuras 5.55 y 5.56 resumen los índices de desempeños al aplicar control realimentado y control realimentado más control anticipativo en este proceso.

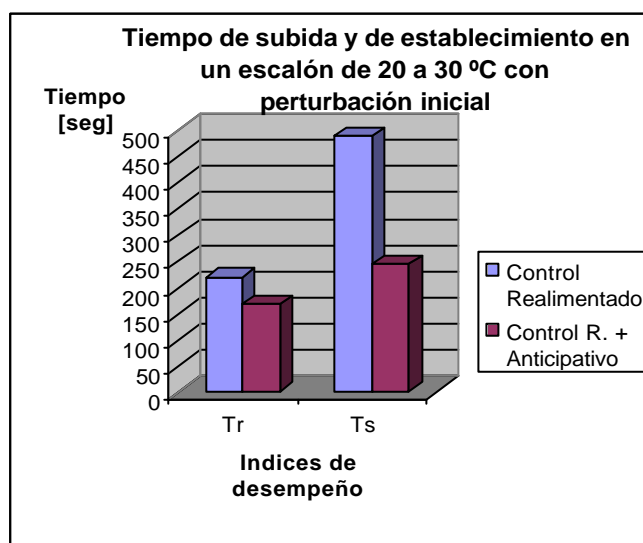


Figura 5.55. Tiempo de subida y de establecimiento con control realimentado y con control realimentado más control anticipativo

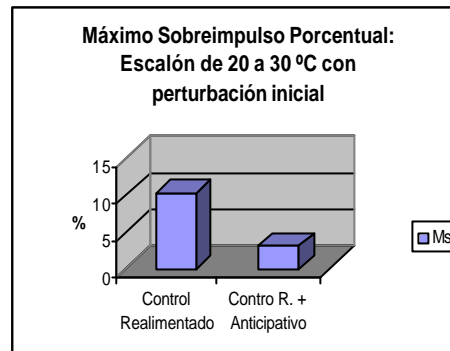


Figura 5.56. Máximo sobreimpulso porcentual con control realimentado y con control realimentado más control anticipativo

5.3.4 Conclusiones y Recomendaciones

Una vez implementado el programa de interfase y control, se observó que cada vez que ingresan al proceso diferentes perturbaciones, la variable de proceso se desvía del punto de control. Con el control anticipativo se logra compensar antes de que se vea afectada la variable controlada. Esta clase de condiciones son implementadas de una manera sencilla y precisa cuando el controlador es una PC, pudiendo inclusive extenderlas a más condiciones si existiera la capacidad de registrar otras perturbaciones.

Se logró cumplir que, dependiendo de la temperatura del tanque izquierdo, se entregue mayor o menor energía a los actuadores (bombas), acompañado en todo momento de un control realimentado basado en la variable del proceso (temperatura tanque derecho). Al analizar los resultados, queda claro que mientras más se pueda tomar en cuenta las perturbaciones en un proceso, se obtendrá un mejor modelo del proceso obteniendo mejores resultados que al aplicar un simple control realimentado basado únicamente en el error generado. Esto ayuda al sistema a reaccionar de mejor manera a las condiciones extras que puedan surgir en el funcionamiento de un proceso.

Se recomienda establecer los límites de trabajo de 550 UC a 850 UC en el controlador, para que el algoritmo anticipativo ingrese en el rango de funcionamiento de las bombas.

De esta manera se comprueba que con el módulo CPTS-1 se puede realizar con buenos resultados esta técnica de control desde una PC.

5.4 PRÁCTICA #4: CONTROL POR SOBREPOSICIÓN

5.4.1 Enunciado

Se tiene dos tanques de almacenamiento de agua como se muestra en la figura 5.57; cada uno de estos posee una bomba, la bomba B1 que desaloja el líquido del tanque izquierdo y la bomba B2 que lo alimenta. Se cuenta además con un sensor de nivel y otro de flujo, S1 y S2, respectivamente.

Con un controlador de flujo se desea controlar el flujo de líquido del tanque izquierdo actuando sobre la bomba B1 cuando el nivel en el tanque izquierdo sea suficiente. Cuando el líquido en el tanque izquierdo llegue a niveles que pongan en riesgo la integridad de la bomba se sobrepondrá un controlador de nivel, aplicando así la técnica de control por sobreposición.

En la figura 5.57 se muestra el concepto del control por sobreposición a aplicar en el módulo.

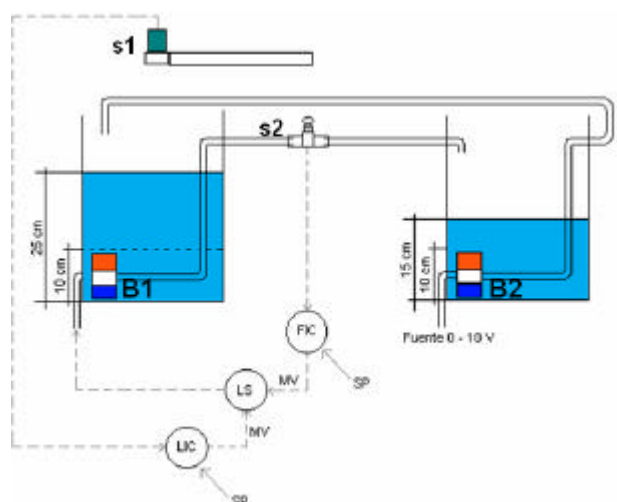


Figura 5.57. Esquema para el Control por Sobreposición

5.4.2 Implementación

La bomba de desfogue será manejada ya sea por el lazo de control de flujo o por el lazo de control de nivel, esto determinado en la PC y manejado a través de la tarjeta PMD-1208LS. La bomba de abastecimiento es manejada por la fuente del módulo de 0 – 10V_{DC}. Esta última tiene como función afectar el nivel del tanque 1, produciendo cambios en el nivel del líquido y de esta manera que el controlador cumpla su función. Para poner el módulo en funcionamiento, se necesita hacer primero conexiones de hardware, para luego proceder con el programa de interfase y control en la PC. Las conexiones son descritas a continuación.

5.4.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.58 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante las mangueras etiquetadas como A2, A3, T1 y la tubería de retorno. Un sensor de flujo está conectado a la tubería T1. Ubicar el sensor de nivel en su respectivo soporte sobre el tanque izquierdo del módulo.

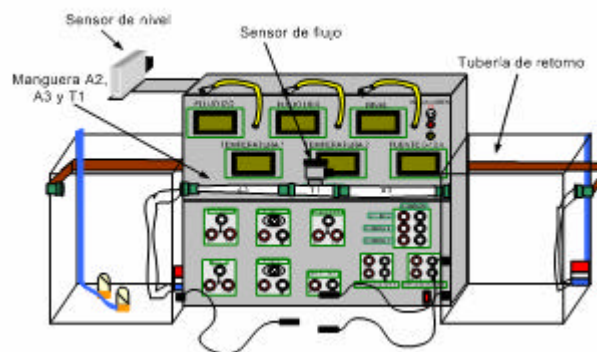


Figura 5.58. Conexión de manguera A2, A3, T1 y tubería de retorno

A continuación, conectar el sensor de nivel al tercer cable M12, el cual provee al mismo de 24 V_{DC} para su funcionamiento y entrega la señal de nivel a los jacks de salida en el panel frontal. Así mismo, conectar el sensor de flujo al segundo cable M12. Esto se ilustra en la figura 5.59.

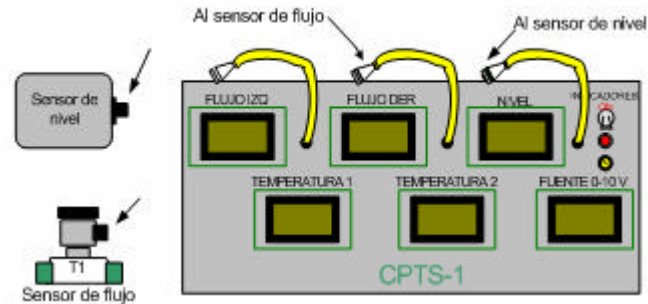


Figura 5.59. Conexión del sensor de nivel y de flujo

Para que la PC reciba la señal de nivel del tanque izquierdo, conectar la salida del sensor de nivel LT1 desde los jacks de nivel en el panel frontal a los pines 2 y 6 de la tarjeta PMD-1208LS que corresponde al canal analógico de entrada CH1 IN y tierra. Alimentar además al sensor con 24 V_{DC} desde una fuente externa, tal como está ilustrado en la figura 5.60.

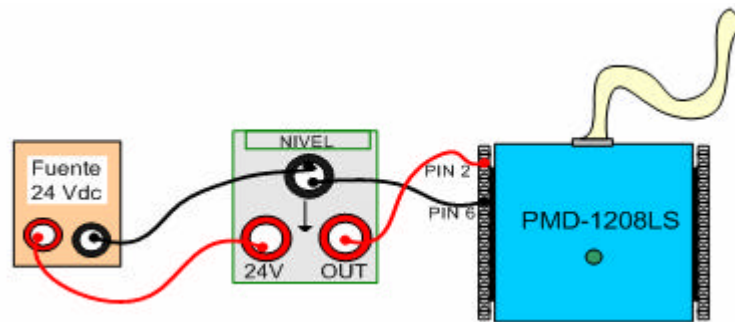


Figura 5.60. Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor

Para las conexiones del sensor de flujo, conectar la salida del mismo que proviene desde los jacks de “flujo der” en el panel frontal a los pines 1 y 3 de la tarjeta PMD-1208LS que corresponde al canal analógico de entrada CH0 IN y tierra. Alimentar además al sensor con 24 V_{DC} desde una fuente externa, tal como está ilustrado en la figura 5.61.

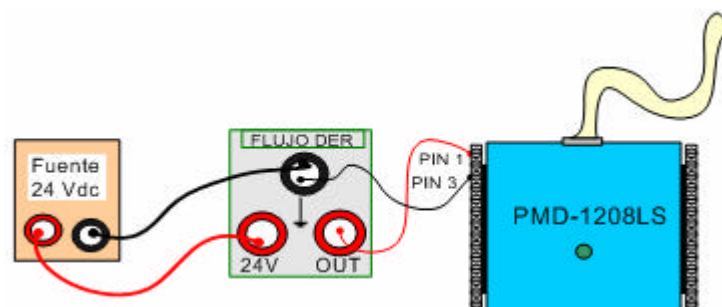


Figura 5.61. Conexión del sensor de flujo a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor

Para controlar el funcionamiento de la bomba de desfogue desde la PC, conectar el pin 12 (tierra) y pin 13 (D/A OUT 0) que corresponde a la salida analógica 0 de la tarjeta PMD-1208LS a los jacks de entrada de la tarjeta de amplificación 1 de las bombas del módulo CPTS-1, para luego conectar la salida de la tarjeta de amplificación al jack de la bomba 1, tal como está ilustrado en la figura 5.62, todo esto localizado en el panel frontal del módulo.

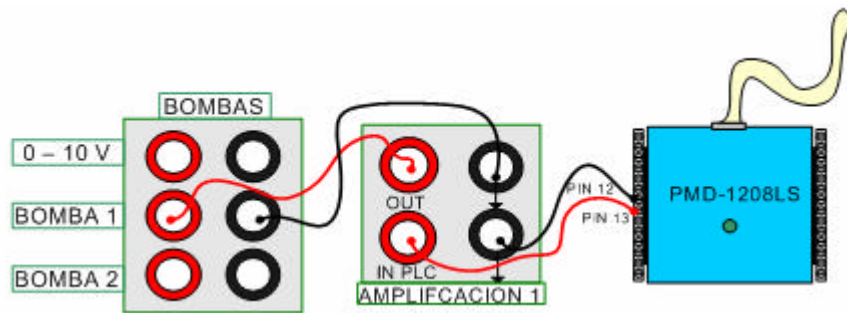


Figura 5.62. Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC

La bomba de abastecimiento (bomba 2) es manejada con la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo, con las conexiones descritas en la figura 5.63.

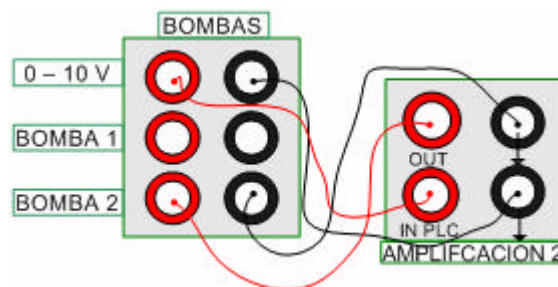


Figura 5.63. Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0 – 10 V_{DC}

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los swtichs de los indicadores, de la fuente variable, y de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

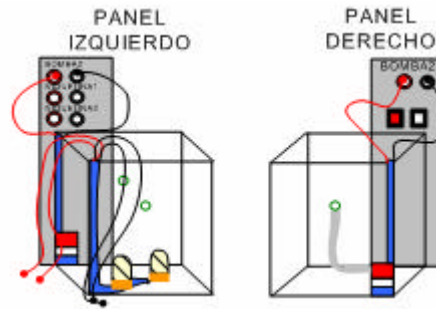


Figura 5.64. Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo

5.4.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado únicamente en la PC de control el software LabVIEW y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal, en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utilizó dos entradas y una salida analógica para la señal de nivel, flujo y el control de la bomba de desfogue respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN con el rango de $+10 V_{DC}$, que se usará para la señal de flujo y serán convertidos de voltios a cm^3/s posteriormente. Se crea otra entrada analógica del mismo tipo para la adquisición de la señal de nivel, la cual se convertirá de voltios a centímetros en base a una función de transferencia.

Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, los cuales tienen el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a $0 - 5 V_{DC}$), y serán usados para el control de la bomba de desfogue. Esto se ilustra en las figuras 5.65 y 5.66.

La transformación de unidades crudas a de ingeniería del sensor de nivel se hizo tomando en cuenta que 30 cm en el tanque A representa 0 voltios para el sensor de nivel, y 5 cm representa 5 voltios, con lo que se obtiene:

$$C_m = -5 \cdot V + 30,$$

En donde:

$C_m \rightarrow$ centímetros (0 – 30cm)

$V \rightarrow$ voltios (0 – 5 V)

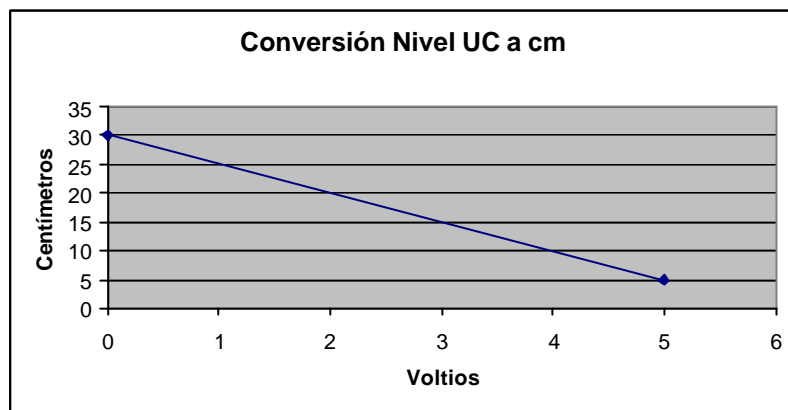


Figura 5.67. Conversión de unidades del sensor del nivel

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, como lo ilustra la figura 5.68.

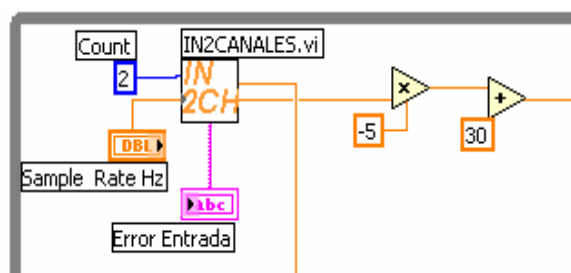


Figura 5.68. Transformación de unidades crudas a de ingeniería de la señal de nivel

La transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería del sensor de flujo se debe hacer tomando en cuenta que el sensor entregará una señal de 2 a 10 V_{DC} equivalente a un rango de 0 a 130 cm^3/s . En base a mediciones hechas que constan en la tabla 1.2, se obtuvo la siguiente función de transferencia:

$$Y = 76,213 \cdot \ln(X) - 47,09$$

En donde:

$Y \rightarrow \text{cm}^3/\text{s}$ (0 – 130 cm^3/s)

$X \rightarrow \text{voltios}$ (2 – 10 V)

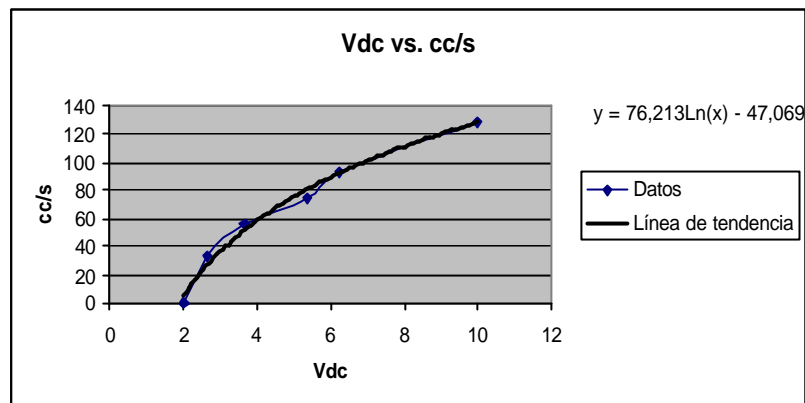


Figura 5.69. Conversión de unidades del sensor de flujo

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, tal como lo ilustra la parte inferior de la figura 5.70.

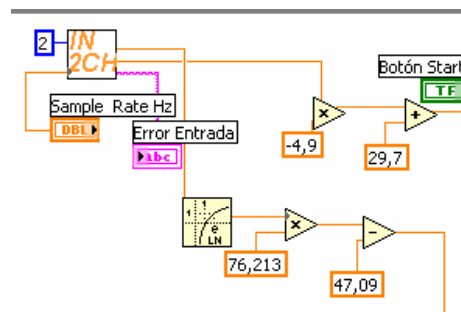


Figura 5.70. Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de la señal de flujo en el diagrama de bloques del programa

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 4 botones de control, los cuales sirven para encender el proceso, detener el proceso, sintonizar los parámetros del controlador FIC y por último para sintonizar los parámetros del controlador LIC. El control numérico del set point de nivel del tanque derecho está ubicado en la parte superior de la interfase HMI, y tiene un rango de 0 a 30 centímetros. El control del set point de flujo tiene un rango de 0 a 130 cm^3/s . En el recuadro de sintonización de FIC y LIC respectivamente, colocar controles para ingresar los valores detallados en las tablas 5.10 y 5.11:

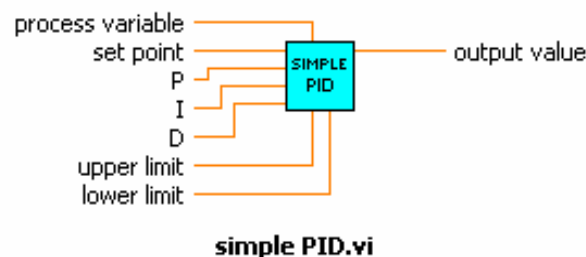
Tabla 5.10. Controles del FIC del Control por Sobreposición

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 1023	UC
Límite alto	0 – 1023	UC
Límite bajo	0 – 1023	UC

Tabla 5.11. Controles del LIC del Control por Sobreposición

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 1023	UC
Rango alto de ingeniería	0 – 1023	UC
Rango bajo de ingeniería	0 – 1023	UC

Todos los valores de la tabla 5.10 más la señal de flujo y el set point del mismo son conectados al VI *Simple Pid.vi*, el cual es el controlador de flujo PID (inverso). Los valores de los límites y el bias están entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador se entrega al selector de bajo y luego al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS, que trabaja en unidades crudas. Este valor se expresa en voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC}, el cual controla la intensidad de trabajo de la bomba de desfogue.

**Figura 5.71. Parámetros del instrumento virtual simple PID**

Los valores de la tabla 5.11 más la señal de nivel y el set point del mismo son conectados al VI *Pid directo.vi*, el cual es el controlador de nivel PD (directo). Los

valores de los límites y el bias están entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador se entrega al selector de bajo, y luego al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS, que trabaja en unidades crudas. Este valor se expresa luego en voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC}, el cual controla la intensidad de trabajo de la bomba de desfogue.

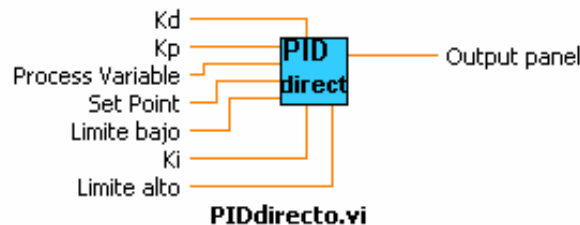


Figura 5.72. Parámetros del instrumento virtual *PID directo*

Una vez calculadas las dos variables manipuladas de los dos controladores anteriores, estas se someten a un selector de bajo, el cual compara los dos valores y entrega finalmente a la salida analógica D/A OUT 0 que controla el desfogue de la bomba con la señal de menor valor, cumpliendo la condición de sobreposición de la práctica.

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y la variable manipulada (MV), para cada controlador, para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo, además de una gráfica aparte con el estado de los dos valores de variables manipuladas, para observar el efecto de sobreposición de un controlador sobre otro y viceversa.

Se incluye además indicadores digitales para el nivel del tanque y flujo de la bomba de desfogue, estado de la bomba de desfogue (on/off), estado de las 2 alarmas, y representación gráfica del estado del tanque, para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 4 se ilustra en la figura 5.73.

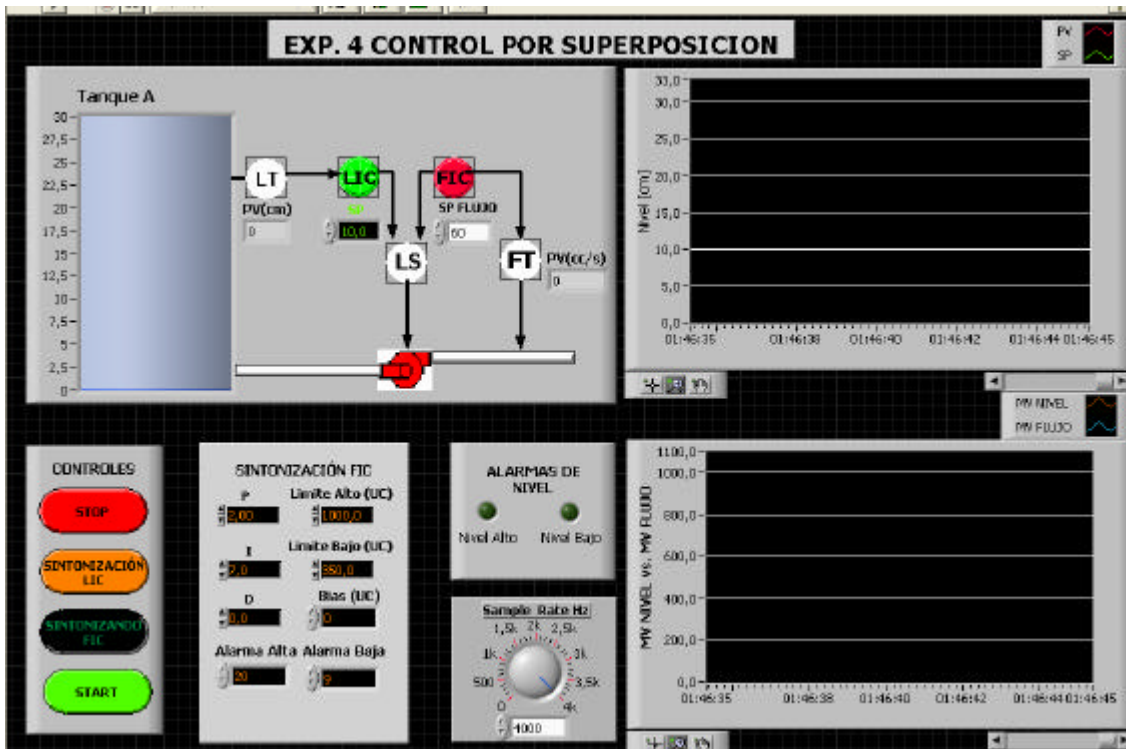


Figura 5.73. Interfase del Control por Sobreposición

A continuación en la figura 5.74, se tiene el diagrama de bloques completo del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

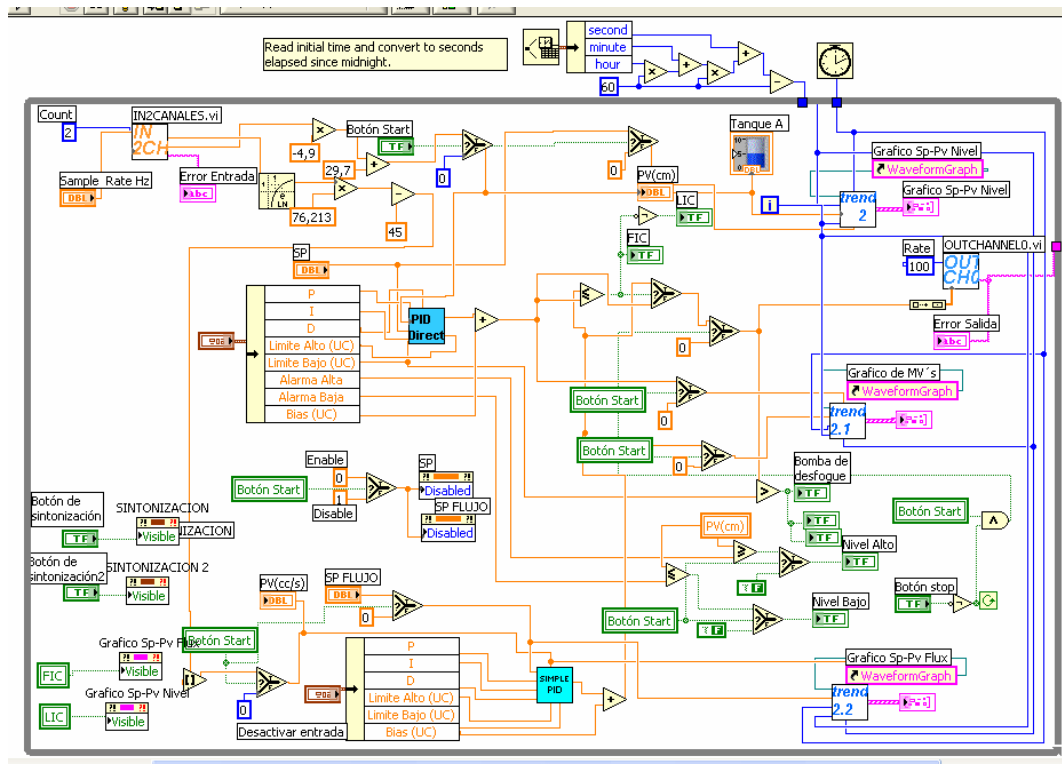


Figura 5.74. Diagrama de bloques Control por Sobreposición

5.4.3 Resultados

Como se solicitó en el procedimiento de la práctica, se estableció una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de la señal de nivel y de flujo, los valores de $K_p=2$, $K_i=7$ y $K_d=0$, límite bajo = 350 y límite alto = 1000, para las constantes del controlador FIC, y los valores de $K_p=200$, $K_i=0$ y $K_d=0$, límite bajo = 349 y límite alto = 1023, para las constantes del controlador LIC.

Con un nivel inicial de 20 cm de agua, se procedió a probar un cambio sucesivo de set point de flujo, de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm^3/s . En este lapso de prueba, el controlador de flujo siempre estuvo al mando del sistema al no alcanzar el nivel de seguridad establecido. La figura 5.75 ilustra este paso del procedimiento.

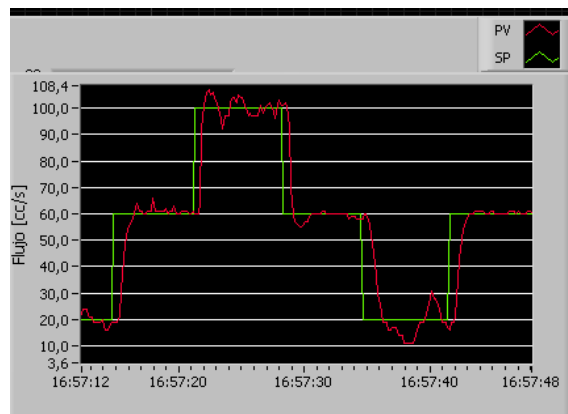


Figura 5.75. Resultado de la variación de set point de flujo de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm^3/s , sin alcanzar el nivel de seguridad

Para comprobar que la sobreposición de controladores se está llevando a cabo, se procedió a cambiar bruscamente el set point de nivel, y se observa en la figura 5.76 que el flujo es directamente afectado cuando se forzó el sobrepaso del nivel de seguridad. En la figura 5.77 se observa la conmutación de las variables manipuladas al provocar que el set point de nivel se sobrepase. Por efecto del selector de baja, el controlador de nivel toma el control y aminora la tasa de flujo inmediatamente hasta que el sistema deje de bombear.

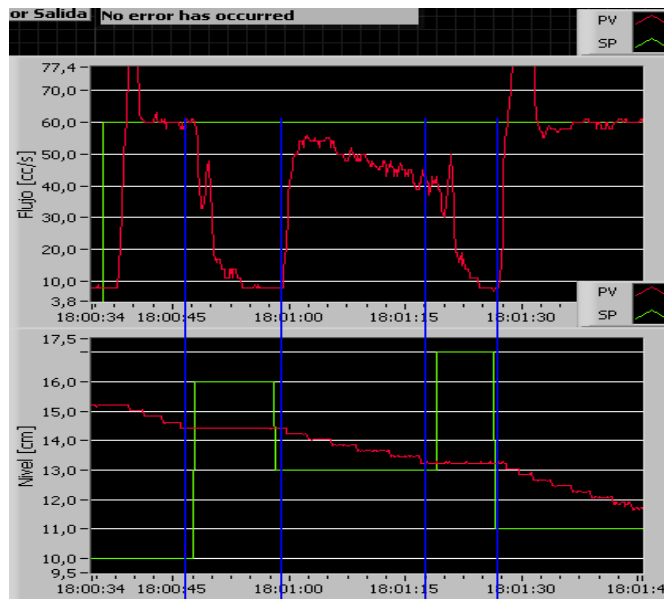


Figura 5.76. Comportamiento del flujo cuando el set point de nivel está cerca o es sobrepasado

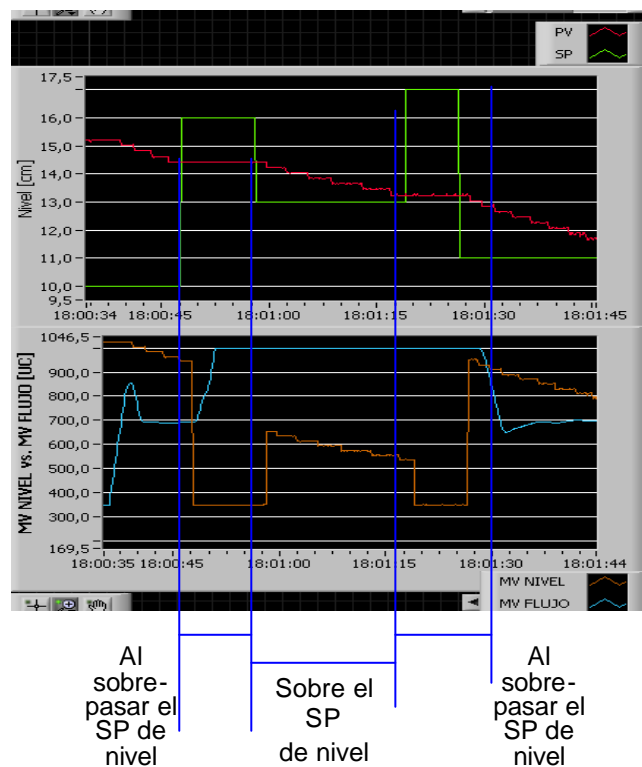


Figura 5.77. Comportamiento de la MV de nivel cuando el set point de nivel está cerca o es sobrepasado

La velocidad de conmutación de los controladores depende en gran manera del valor de la constante K_p del controlador de nivel. Este cambio de valor provocó que la conmutación de controladores y la detención del bombeo se la realice ya sea más anticipada y con mayor velocidad mientras el valor de K_p sea más grande, o más tardía y lentamente a medida que el valor de K_p sea menor. Se

procedió a probar el comportamiento del controlador de nivel, al establecer un set point de nivel de 10 cm, con un flujo de $60 \text{ cm}^3/\text{s}$, con una constante K_p de 82 en el primer intento y de 100 en el segundo. Las figuras 5.78 y 5.79 ilustran estos dos pasos.

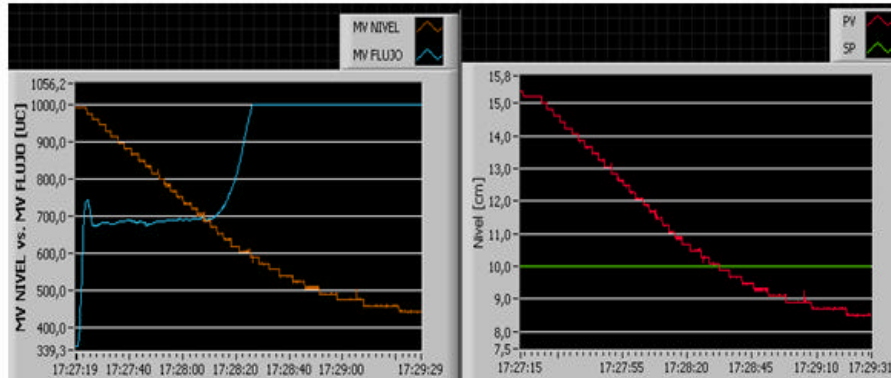


Figura 5.78. Conmutación de las MVs de nivel y flujo para detener el bombeo de agua con una constante $K_p = 82$

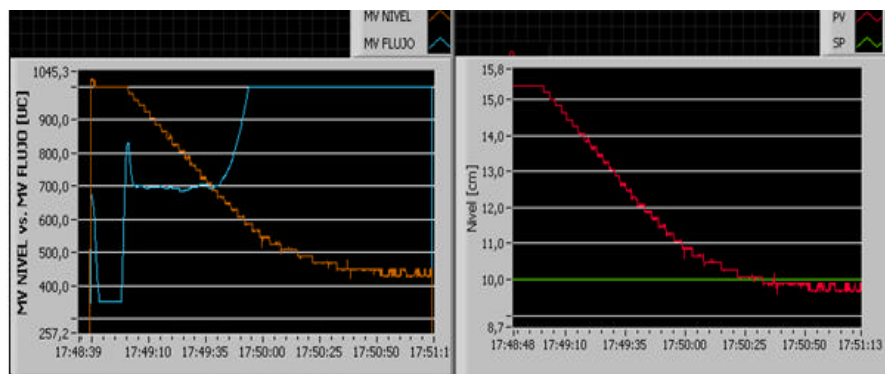


Figura 5.79. Conmutación de las MVs de nivel y flujo para detener el bombeo de agua con una constante $K_p = 100$

La conmutación de los controladores cuando la constante $K_p=82$ se ejecuta cuando el nivel de agua se encuentra en 11,3 cm, deteniéndose el bombeo de agua definitivamente en 8,7 cm, obteniendo un error estacionario de 1,3 cm. Al repetir la prueba con un K_p mayor ($K_p=100$), la conmutación de controladores sucedió al tener el sistema un nivel de agua de 12 cm, deteniéndose el bombeo del mismo en 9,7 cm, obteniendo un error estacionario de 0,3 cm.

Con el fin de afinar un poco más el comportamiento del controlador de flujo, se procedió a utilizar el método de sintonización de respuesta al escalón de Ziegler-Nichols. Estas reglas de sintonización están establecidas para que la respuesta del sistema muestre un decremento de su amplitud en un 25% por período. Las fórmulas están basadas en un modelo aproximado de respuesta ideal del sistema,

donde se tiene la pendiente Kc/Tr (ganancia del sistema/tiempo de subida) de la tangente del punto de inflexión de la respuesta del sistema, y el tiempo de retardo Tu de la misma. Usando los datos medidos de Tu y Kc/Tr , en conjunto con las fórmulas dadas en la tabla 5.12, los parámetros de sintonización pueden ser determinados con cálculos simples.

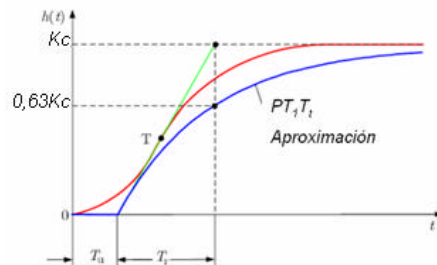


Figura 5.80. Descripción de la respuesta del sistema a un escalón dado en base a tres valores: Kc (ganancia de la planta), Tr (tiempo de subida) y Tu (tiempo de retardo)

Tabla 5.12. Ecuaciones de cálculo de las constantes PID

P	$\frac{1}{Kp} * \frac{Tr}{Tu}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{Kp} * \frac{Tr}{Tu}$	$3.33 * Tu$	-
PID	$\frac{1.2}{Kp} * \frac{Tr}{Tu}$	$2 * Tu$	$0.5 * Tu$

Para aplicar los conceptos anteriores, se aplicó un escalón de 0 a 60 cm^3/s en el sistema, teniendo en la gráfica 5.81 los resultados:

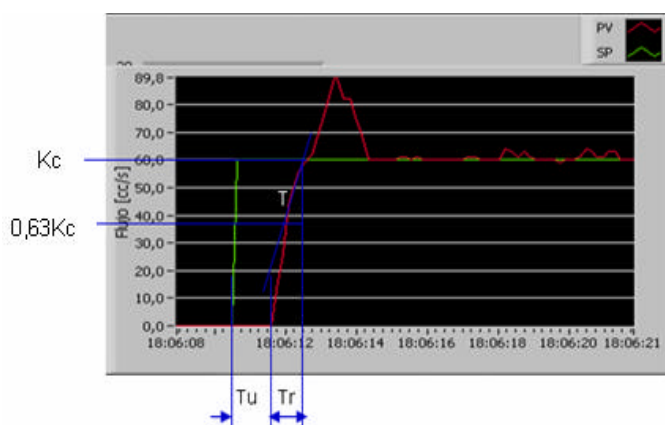


Figura 5.81. Valores obtenidos para la sintonización del sistema

Así, se tiene que el tiempo de retardo Tu tiene un valor de 1,1 segundos, y el tiempo de subida Tr 0,9 segundos. La ganancia del sistema Kc es igual a 60. Se utilizó las fórmulas de la tabla 5.12 para calcular un controlador PI, teniendo que:

$$Kp = \frac{0,9}{Kc} * \frac{Tr}{Tu}$$

$$Kp = \frac{0,9}{60} * \frac{0,9}{1,1}$$

$$Kp = \frac{0,81}{66}$$

$$Kp = 0,01227$$

$$Ki = 3,33 * Tu$$

$$Ki = 3,3 * 1,1$$

$$Ki = 3,663$$

Una vez con los valores calculados, y manteniendo los valores del controlador de flujo, con un nivel inicial de 20 cm de agua, se repitió el cambio sucesivo de set point de flujo, de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm³/s. La figura 5.82 muestra la respuesta del sistema en esta prueba.

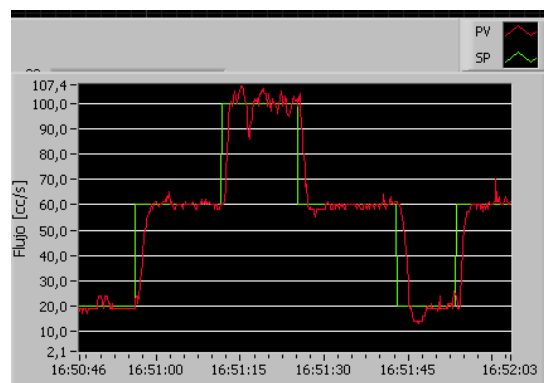


Figura 5.82. Resultado de la variación de set point de flujo de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm³/s, con sintonización de Ziegler-Nichols

Al comparar los resultados de los cambios de set point de flujo del principio de la práctica (figura 5.75), y los obtenidos en base al método de Ziegler-Nichols (figura 5.82), se observa especialmente una gran mejoría en los tiempos de establecimiento con respecto al punto de consigna y en los sobreimpulsos de la respuesta del sistema.

5.4.4 Conclusiones y Recomendaciones

Se pudo comprobar que el control por sobreposición se utiliza como un esquema de protección. Tan pronto como el proceso regresa a sus condiciones normales de operación, el esquema de sobreposición regresa automáticamente a su estado de operación normal. Es de vital importancia para este proceso tener un monitoreo gráfico de lo que está sucediendo con las variables manipuladas de los dos controladores, para así llegar a una sintonización satisfactoria del proceso.

En contraste, el controlador de flujo en este caso necesitó ser sintonizado con constantes muy pequeñas, para tener una reacción lenta y precisa en su funcionamiento, y por otro lado, el controlador de nivel, el cual brinda a este proceso el esquema de protección, fue sintonizado como un controlador de tipo proporcional, con el objetivo de protección más que de precisión. Fue claro que el cambio de valor de la constante K_p afecta directamente a la velocidad de reacción del esquema de protección.

El método de sintonización de Ziegler-Nichols al inducir un escalón en el sistema se mostró efectivo al mejorar el tiempo de establecimiento y los impulsos provocados al sintonizar originalmente sólo en base a prueba y error, siendo el control de flujo un proceso muy apto para aplicar estos conocimientos.

Así se concluye que con el módulo CPTS-1 se puede implementar de manera satisfactoria la técnica de control por sobreposición desde una PC.

5.5 PRÁCTICA #5: CONTROL SELECTIVO

5.5.1 Enunciado

Se tienen dos tanques de almacenamiento de agua como se indica en la figura 5.83. El tanque izquierdo cuenta con un dispositivo de calentamiento y el derecho con dos sensores de temperatura, S1 y S2. Además, los tanques cuentan

con una bomba de desalajo de líquido cada uno que sirven para la recirculación del agua entre los mismos.

Aplicando control selectivo, se desea controlar la temperatura en el punto donde se encuentran los sensores S1 o S2 dependiendo de cual sea la mayor entre ellas.

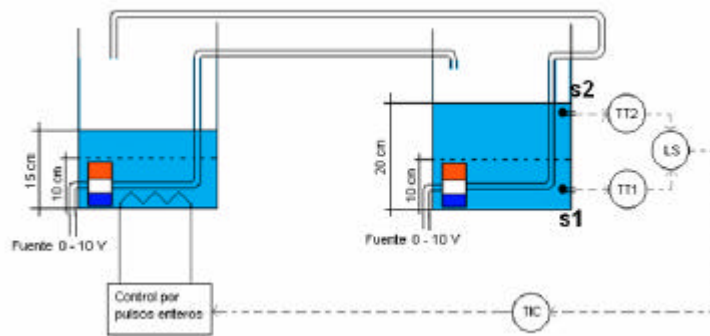


Figura 5.83. Esquema para el Control Selectivo

5.5.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.83, las bombas serán manejadas por la fuente 0 – 10V para circular el agua entre el tanque 1 y 2 para mezclar la temperatura del agua de los mismos. Las niquelinas van a ser manejadas por la PC a través de la tarjeta PMD-1208LS. A continuación se tiene las conexiones necesarias en hardware y la configuración en software para poner la práctica en funcionamiento.

5.5.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.84 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno.

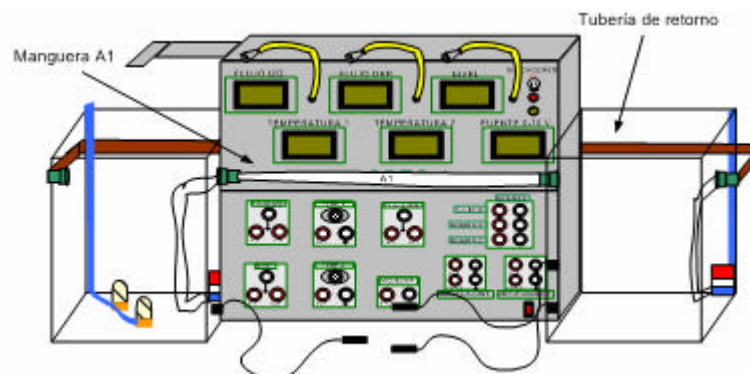


Figura 5.84. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

Para que la PC maneje las niquelinas a través de la tarjeta de adquisición de datos, conectar la salida analógica D/A OUT 0 (pin 13) y tierra (pin 12) a los jacks de entrada de la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas, como se ve en la figura 5.85.

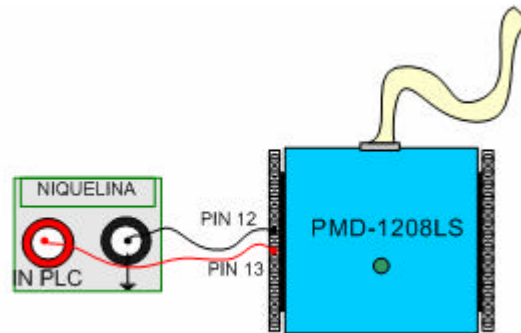


Figura 5.85. Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas

Conectar el plug del sensor de temperatura superior del tanque izquierdo a su jack correspondiente en la tarjeta de temperatura 1 en el panel frontal del módulo, y conectar la salida de la tarjeta de temperatura hacia el CH0 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 1 y su tierra es el pin 3. Estos pasos lo ilustra la figura 5.86.

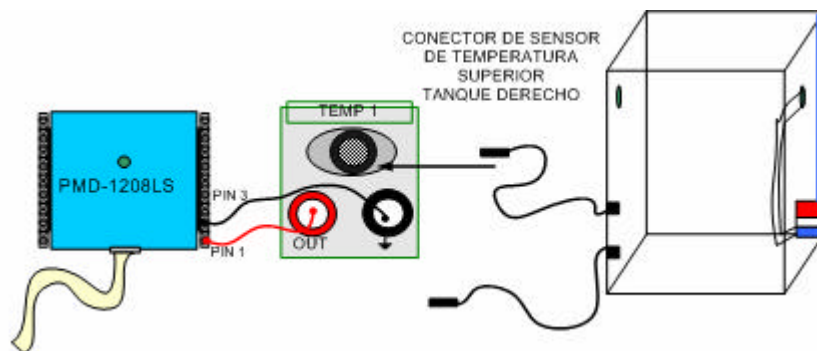


Figura 5.86. Conexiones del sensor de temperatura superior del tanque izquierdo

Repetir los pasos anteriores con el conector del sensor de temperatura inferior del tanque derecho hacia la tarjeta de temperatura 2, y desde la salida de esta hacia el CH1 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 2 y su tierra es el pin 6, como lo ilustra la figura 5.87.

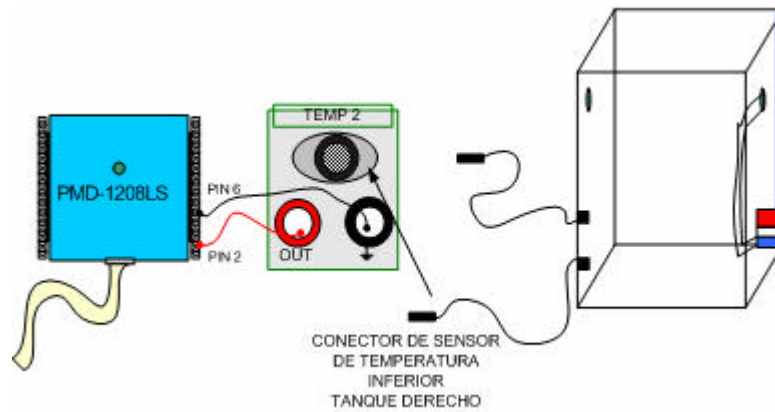


Figura 5.87. Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho

Conectar la fuente 0 – 10 V_{DC} a las dos tarjetas de amplificación de las bombas, para controlar el flujo de agua desde la misma, como lo ilustra la figura 5.88.

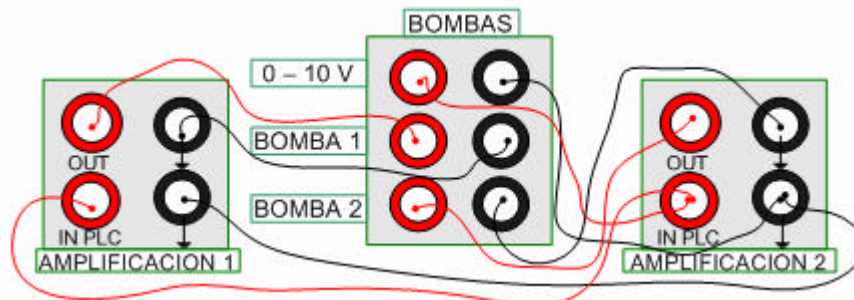


Figura 5.88. Conexiones de la fuente de 0-10 V_{DC} para manejar las dos bombas

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas y niquelinas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los swtichs de los indicadores, de la fuente variable, de los sensores de temperatura, de las niquelinas y la de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

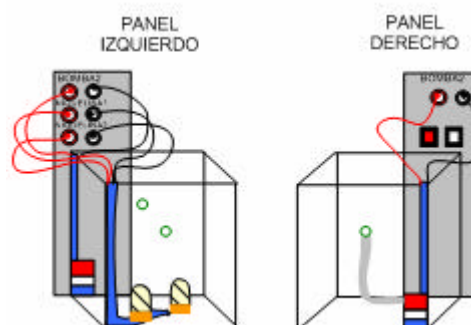


Figura 5.89. Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo

5.5.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado únicamente en la PC de control el software LabVIEW y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal, en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utiliza dos entradas y una salida analógica para los dos sensores de temperatura y el control de las niquelinas respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN (sensor de temperatura superior derecho) con el rango de $+10 V_{DC}$, y otro igual para la entrada analógica CH1 IN (sensor de temperatura inferior derecho), los cuales serán convertidos de voltios a grados centígrados posteriormente. Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a 0 – 5 V_{DC}), y será usada para el control de las niquelinas. Esto se ilustra en las figuras 5.90, 5.91.

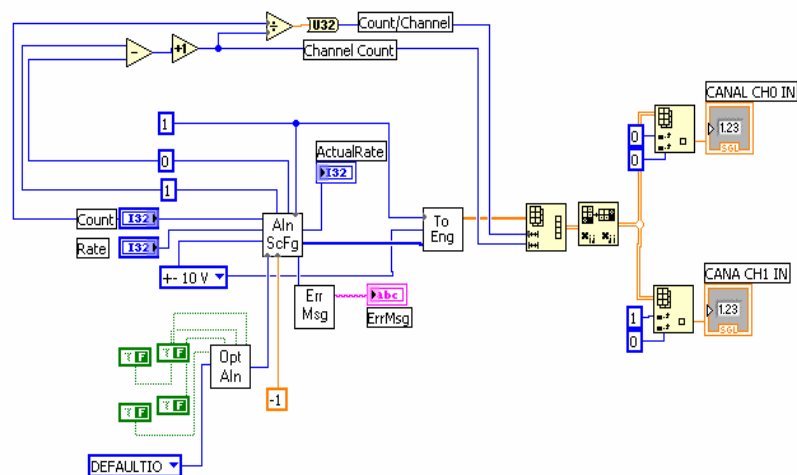


Figura 5.90. Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS

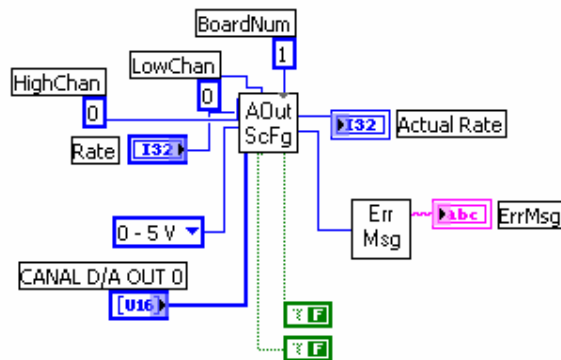


Figura 5.91. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-12008LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques de los canales de entrada de la figura 5.90 consta en la interfase del programa como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo en total, 4000 muestras por cada canal. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.90 y 5.91 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como *In2canales.vi* (canales de entrada) y *Outchannel0.vi* (canal de salida).

En base a las mediciones de temperatura del agua en los tanques y del voltaje entregado por los sensores de temperatura, se obtiene la gráfica de la figura 5.92, y al linealizarla se tiene la siguiente función de transferencia, la cual es implementada para transformar las señales de los sensores de temperatura de voltios a grados centígrados:

$$Y = 5,6629X + 12,146$$

En donde:

Y → grados centígrados (20 – 70°C)

X → unidades crudas (0 – 10 V)

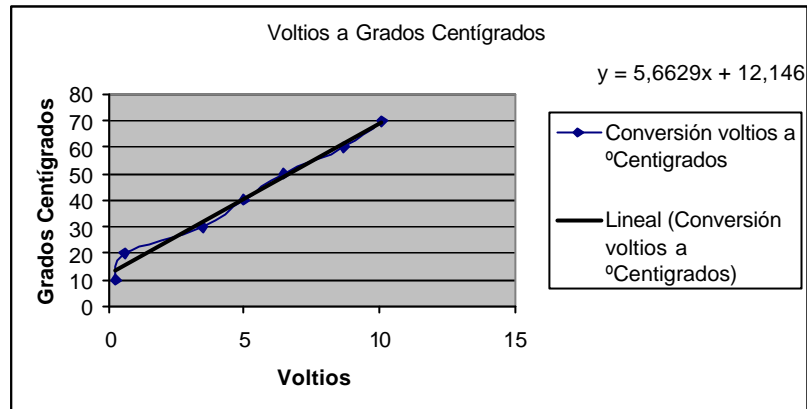


Figura 5.92. Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, una para cada sensor de temperatura, tal como lo ilustra la figura 5.93 para obtener los dos valores de temperatura.

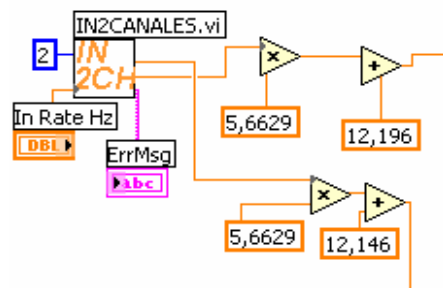


Figura 5.93. Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de los dos canales de entrada

Para controlar la temperatura del tanque derecho en función de su valor más inferior, se implementa un selector de temperatura alta, el cual compara los valores del sensor superior y el inferior del tanque y escoge el valor más bajo, la que pasará a ser la variable del proceso vigente del controlador del sistema.

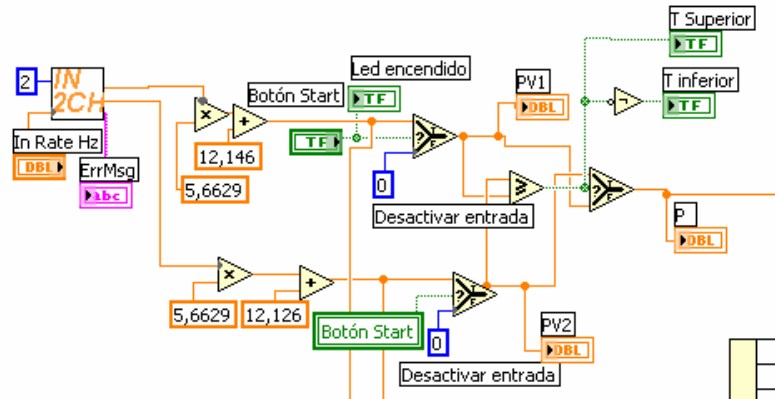


Figura 5.94. Diagrama de bloques del selector de alto de las dos señales de temperatura del tanque izquierdo

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 3 botones de control, los cuales servirán para encender el proceso, para el proceso y sintonizar los parámetros del controlador TIC1. El control numérico del set point está ubicado en la parte superior de la interfase, y tiene un rango de 0 a 70 grados centígrados. En el recuadro de sintonización, se colocaron controles para ingresar los valores detallados en la tabla 5.13:

Tabla 5.13. Controles del TIC1 del Control Selectivo

Valor	Rango	Unidades
Constante Proporcional P	0 – 2000	adimensional
Constante Integral I	0 – 2000	Min/repetición
Constante Derivativa D	0 – 2000	Minutos
Bias	0 – 1023	UC
Límite alto	0 – 1023	UC
Límite bajo	0 – 1023	UC

Los valores indicados en la tabla 5.13 más la variable del proceso vigente y el set point son conectados al bloque VI *Simple Pid.vi*, el cual funciona como controlador, y su acción es inversa. Los valores de bias, límite alto y bajo tienen un rango de entre 0 y 1023 debido a que la variable manipulada de este controlador se entrega al canal de salida analógico de la tarjeta PMD-1208LS y

esta trabaja en unidades crudas. Este valor se expresa luego en voltaje en un rango de 0 a 5 V_{DC}, el cual controla la intensidad de trabajo de las niquelinas.

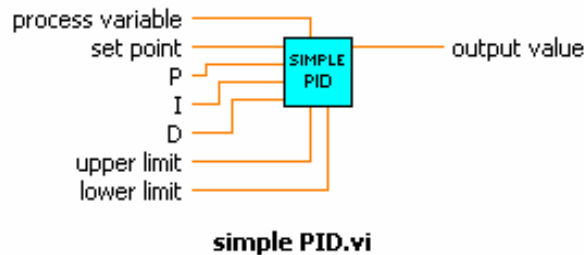


Figura 5.95. Parámetros del instrumento virtual Simple PID

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y la variable manipulada (MV), para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para la temperatura de los dos sensores (en grados centígrados), estado de selección de sensor de temperatura, estado de la niquelina (on/off), estado del selector de sensor de temperatura y una representación gráfica en barra de la temperatura y set point, para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 5 se ilustra en la figura 5.96.

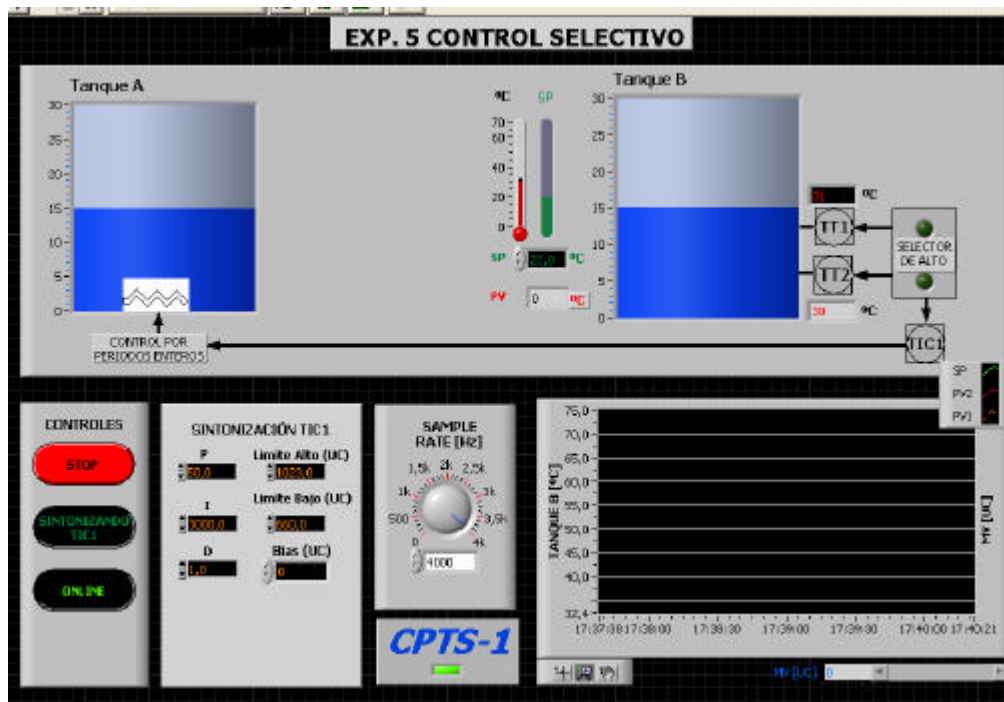


Figura 5.96. Interfase del Control Selectivo

A continuación en la figura 5.97, se tiene el diagrama de bloques del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

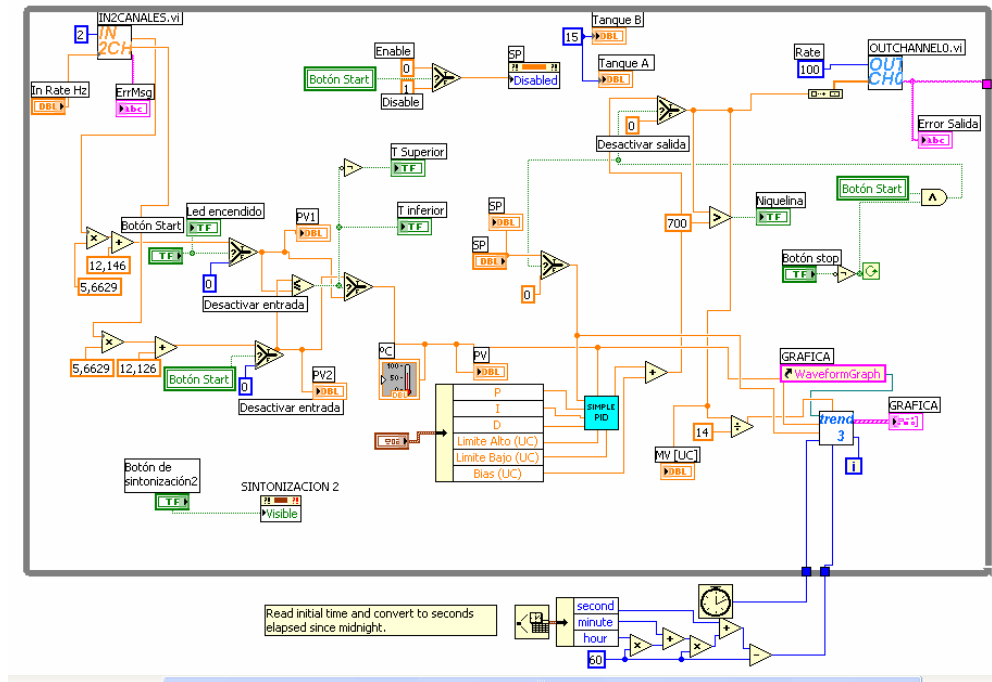


Figura 5.97. Diagrama de bloques del Control Selectivo

5.5.3 Resultados

Para poner en funcionamiento la práctica, se estableció una tasa de 4000 muestras por segundo para la adquisición de los sensores de temperatura y los valores $K_p = 50$, $K_i = 3000$, $K_d = 0$, límite alto = 1023 y límite bajo = 660, para las constantes del controlador PID. A continuación se ejecutó un cambio de set point de 20 °C a 30 °C en la temperatura del tanque B.

En la gráfica 5.98 se tiene los valores de los dos sensores de temperatura del tanque B (rojo y naranja), y el set point establecido (verde). Se puede observar que la temperatura de la superficie del agua (naranja) al iniciar el proceso es la más alta, pero con el transcurso del tiempo, el agua que se va depositando en el fondo del tanque B se convierte en la de mayor temperatura (roja). En la figura 5.99 se observa el comportamiento de la variable manipulada, cuyo controlador

toma como referencia a la temperatura más alta, que en este caso al alcanzar el set point es el sensor TT2 (color rojo).

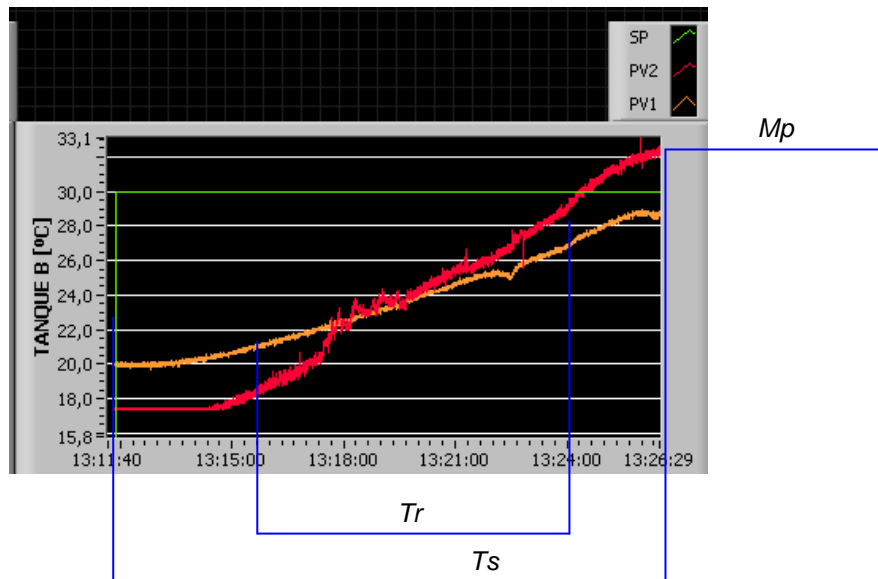


Figura 5.98. Comportamiento de las dos temperaturas durante el proceso con respecto al set point

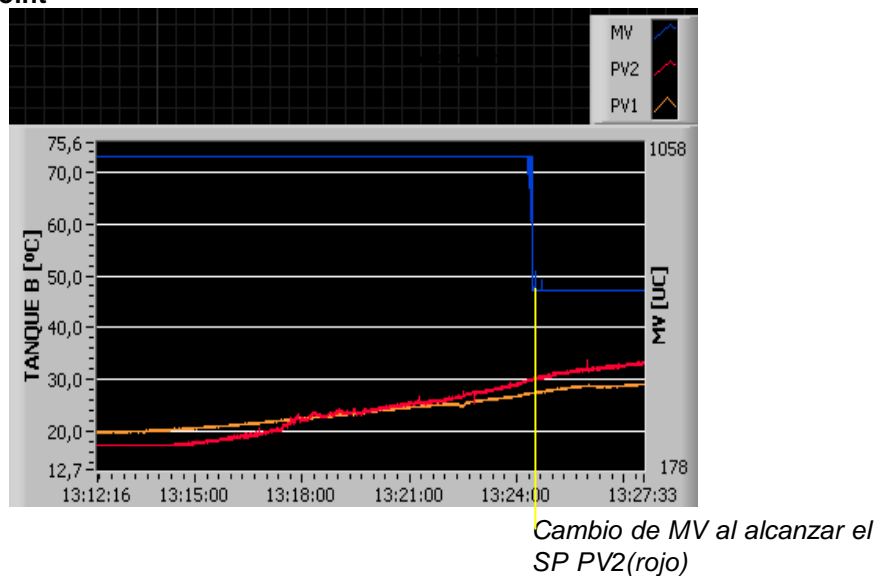


Figura 5.99. Comportamiento de la variable manipulada con respecto a las dos temperaturas

Observando la figura 5.98, se puede apreciar el tiempo de subida, tiempo de establecimiento, y el sobreimpulso máximo ante un escalón de 20 a 30 grados centígrados. A continuación en la tabla 5.14, se resume los índices de desempeño de esta prueba:

Tabla. 5.14 Índices de desempeño del control selectivo ante un escalón de 20 a 30°C

Medición	Valor
Calentamiento [°C]	10
$T_{r(10-90)\%}$ [min y seg]	8' 25"
$T_s 5\%$ [min y seg]	14' 40"
M_P [°C]	2,1
M_P [%]	7

El sobreimpulso máximo porcentual obtenido no rebasa los requerimientos estándares de máximo 10% en este tipo de pruebas. Los tiempos de subida y de establecimiento son más extensos que en las prácticas anteriores, debido primordialmente a que en esta práctica se utiliza más cantidad de agua en función de utilizar los dos sensores de temperatura.

5.5.4 Conclusiones y Recomendaciones

En esta técnica de control, la variable de proceso se puede limitar a un valor bajo o alto, dependiendo de los requerimientos del proceso en sí, es decir, se tendría que analizar si los límites inferior y superior podrían afectar al mismo. Para aplicar esta técnica en el módulo CPTS-1, se seleccionó el valor más alto de entre las dos variables de proceso, ya que en la mayoría de los casos en situaciones reales, la temperatura más alta es la más peligrosa en un proceso. Así, se cumplió el objetivo de mantener “bajo control” varias variables de entrada con una sola variable de salida.

Se demostró que la selección de la variable del proceso a tomar en cuenta puede ir variando con el transcurso del tiempo, como en este caso cuando la temperatura más alta al iniciar el proceso fue en la parte más superficial de la columna de agua, pero que con el transcurso del tiempo, y el asentamiento del agua suele cambiar al parte intermedia de la columna, siendo los fundamentos teóricos efectivos para la ejecución de la práctica. El calentamiento del agua en el

tanque no es uniforme, y el control selectivo permite sortear esta clase de problemas con eficacia.

Cabe notar que es un proceso con grandes tiempos muertos, debido al gran volumen de agua a calentar, tal como el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento lo indica. La reducción de velocidad de muestreo de la señal del sensor de nivel no provocó un cambio de comportamiento notorio del sistema.

Con valores de sintonización obtenidos en base a prueba y error, se pudo observar que la variable de proceso seleccionada sigue dentro de condiciones aceptables al punto de consigna (set point), con lo que se demostró que el control Selectivo puede ser desarrollado en el modulo CPTS-1 desde una PC.

5.6 PRÁCTICA #6: CONTROL DIFUSO DE NIVEL

5.6.1 Enunciado

Se tiene un tanque de capacidad de 7 galones el cual almacena agua; se cuenta con dos bombas, la bomba B2 que alimenta al tanque de agua y la bomba B1 que permite el desalojo de líquido, como ilustra la figura 5.100.

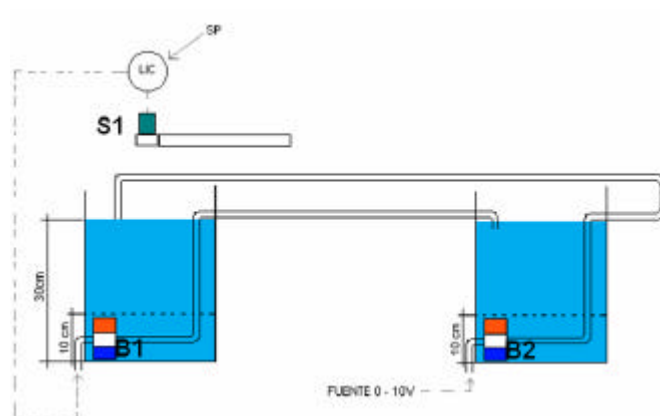


Figura 5.100. Esquema para el Control Difuso de Nivel

Se desea que en el tanque izquierdo, mediante un sensor de nivel S1, se implemente un controlador difuso de tipo Mandani, con método de defusificación tipo *centroide*, de manera que se pueda ajustar el punto de control del nivel de líquido del tanque 1 dentro del rango especificado del equipo (10 cm a 30 cm), regulando el flujo de desfogue de la bomba B1 (una salida), tomando en cuenta el nivel presente (PV) y la diferencia de este valor con respecto al SP (2 entradas). La bomba B2 será utilizada únicamente para provocar perturbaciones en el sistema al ingresar agua al tanque en mención.

5.6.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.100, la bomba de desfogue será manejada por el controlador de nivel LIC (PC) y la de abastecimiento por la fuente del módulo de 0 – 10V_{DC}. Esta última tiene como función afectar el nivel del tanque 1, produciendo cambios en el nivel del líquido y de esta manera que el controlador cumpla su función. Para comenzar, llenar con agua los dos tanques, el uno a una altura de 25cm, y el otro a 20cm. Para poner el módulo en funcionamiento, se necesita hacer primero conexiones de hardware, para luego proceder con el programa de interfase y control en la PC. Las conexiones son descritas a continuación.

5.6.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.101 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno. Ubicar el sensor de nivel en su respectivo soporte sobre el tanque izquierdo del módulo.

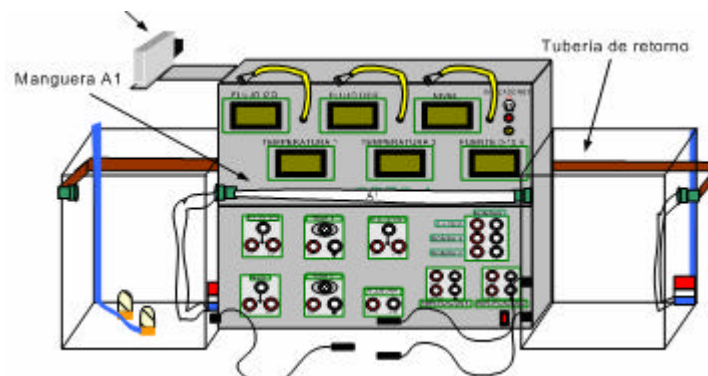


Figura 5.101. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

A continuación, conectar el sensor de nivel a su correspondiente cable M12, el cual provee al mismo de 24 V_{DC} para su funcionamiento y entrega la señal de nivel a los jacks de salida en el panel frontal. Esto se ilustra en la figura 5.102.

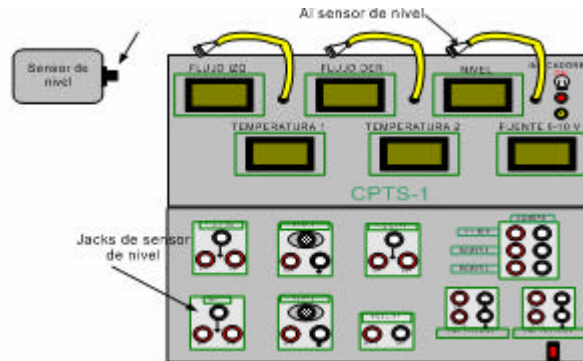


Figura 5.102. Conexión del sensor de nivel

Para que la PC reciba la señal de nivel del tanque izquierdo, conectar la salida del sensor de nivel LT1 desde los jacks de nivel en el panel frontal a los pines 1 y 3 de la tarjeta PMD-1208LS que corresponden al canal analógico de entrada CH0 IN y alimentar el sensor con 24 V_{DC} desde una fuente externa, tal como está ilustrado en la figura 5.103.

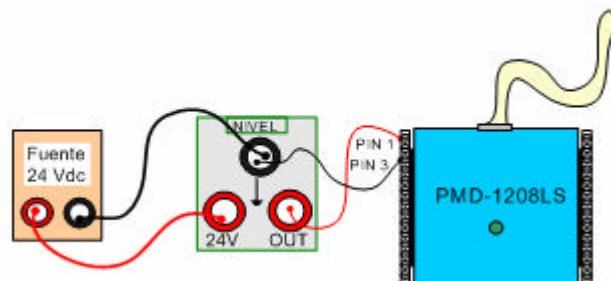


Figura 5.103. Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor

Para controlar el funcionamiento de la bomba de desfogue desde la PC, conectar el pin 12 (tierra) y pin 13 (D/A OUT 0) que corresponde a la salida analógica 0 de la tarjeta PMD-1208LS a los jacks de entrada de la tarjeta de amplificación 1 de las bombas del módulo CPTS-1, para luego conectar la salida de la tarjeta de amplificación al jack de la bomba 1, tal como está ilustrado en la figura 5.104, todo esto localizado en el panel frontal del módulo.

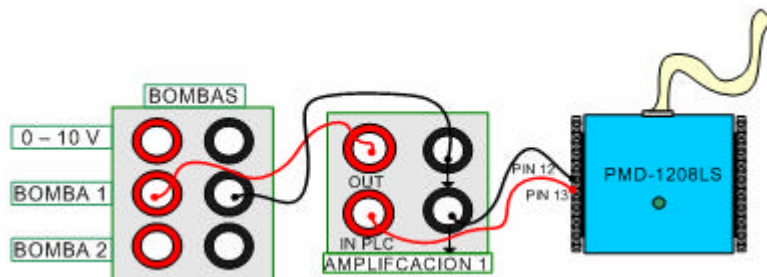


Figura 5.104. Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC

La bomba de abastecimiento (bomba 2) es manejada con la fuente de 0 – 10V_{DC} del módulo, con las conexiones descritas en la figura 5.105.

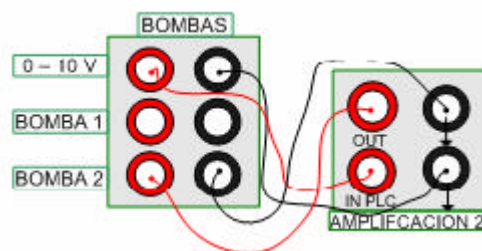


Figura 5.105. Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0 – 10 V_{DC}

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los switichs de los indicadores, de la fuente variable, y la de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

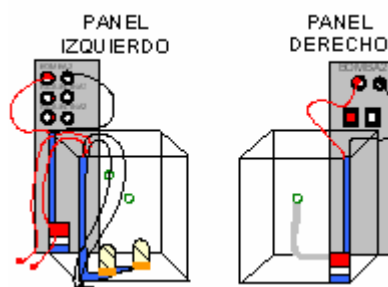


Figura 5.106. Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo

5.6.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado en la PC de control el software LabVIEW, Matlab con Fuzzy Logic Toolbox y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal, en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utilizó una sola entrada y una salida analógica para la señal de nivel y el control de la bomba de desfogue respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN con el rango de $+10\text{ V}_{DC}$, que se usará para la señal de nivel y serán convertidos de voltios a cm posteriormente. Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a 0 - 5 V_{DC}), y será usada para el control de la bomba de desfogue. Esto se ilustra en las figuras 5.107 y 5.108.

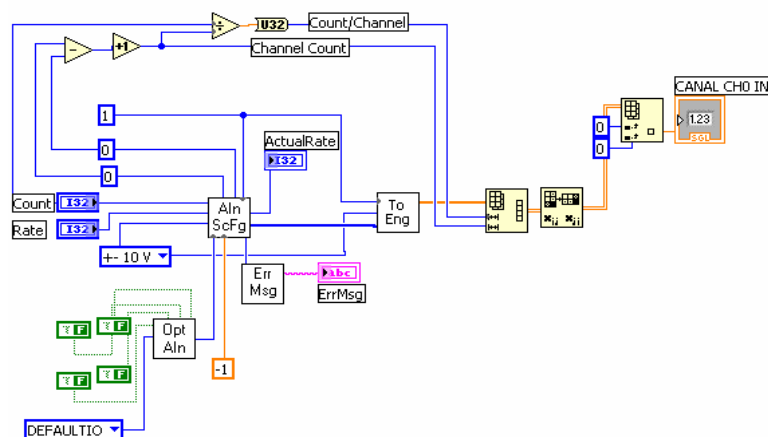


Figura 5.107. Diagrama de bloques para el canal de entrada CH0 IN de la PMD-1208LS

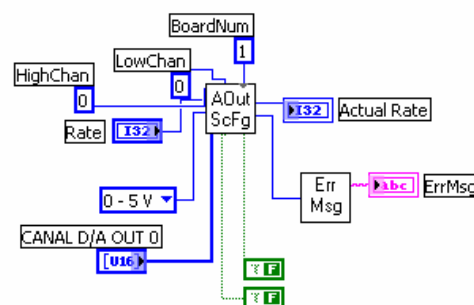


Figura 5.108. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-12008LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques del canal de entrada de la figura 5.107 consta en la interfase del programa como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.107 y 5.108 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como *In1canal.vi* (canal de entrada) y *Outchannel0.vi* (canal de salida).

La transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería del sensor de nivel se hizo tomando en cuenta que 30 cm en el tanque A representa 0 voltios para el sensor de nivel, y 5 cm representa 5 voltios, con lo que se obtiene:

$$Cm = -5 \cdot V + 30,$$

En donde:

$Cm \rightarrow$ centímetros (0 – 30cm)

$V \rightarrow$ voltios (0 – 5 V)

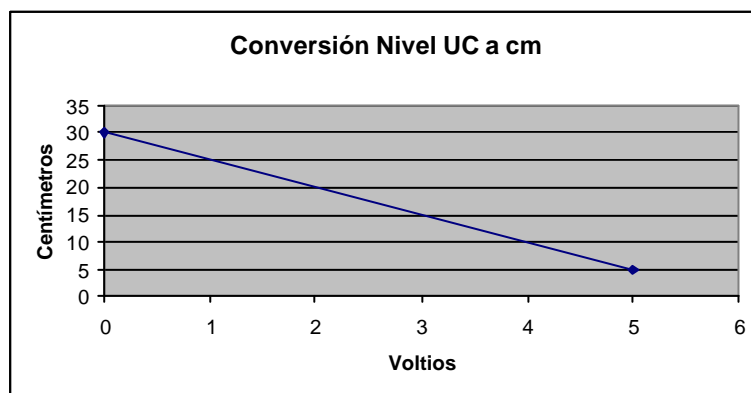


Figura 5.109. Conversión de unidades del sensor del nivel

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, como lo ilustra la figura 5.110.

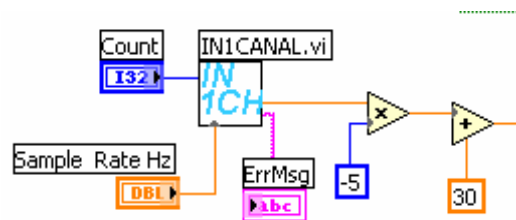


Figura 5.110. Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de la señal de nivel en el diagrama de bloques del programa

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 2 botones de control, los cuales servirán para encender el proceso y parar el proceso. Se colocó además controles para ingresar los valores detallados en la tabla 5.15, con sus correspondientes unidades:

Tabla 5.15. Controles de interfase del Control Difuso de Nivel

Valor	Rango	Unidades
Set Point	0 - 70	cm
Alarma baja	0 - 70	cm
Alarma alta	0 - 70	cm

Para modelar el controlador de nivel difuso, se utilizó el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, se creó un sistema de dos entradas y una salida, con método de defusificación tipo centroide. Las entradas han sido establecidas, la primera pensando en que el flujo de desfogue de la bomba varía dependiendo de cuánta cantidad de líquido existe en el tanque, debido a la presión ejercida por el peso de la misma, siendo reflejada esta condición en la variable *Nivel*, en centímetros, y la otra entrada se justifica por el error existente entre el nivel de agua y el set point, llamando a la variable *Error*, en centímetros también. La salida *bomba* representa el valor que controla la intensidad de desfogue de la bomba, en unidades crudas.

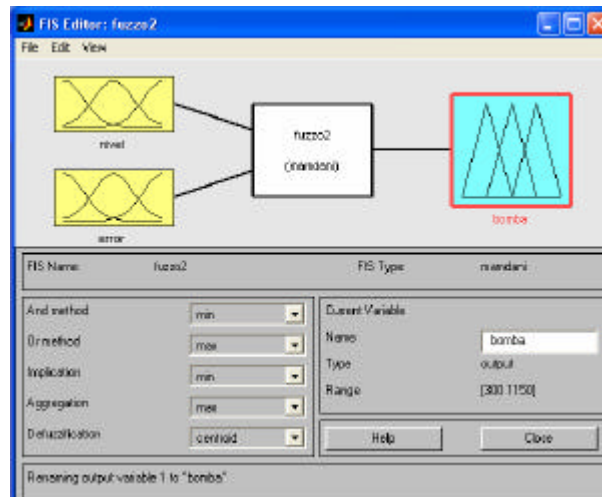



Figura 5.111. Establecimiento de las variables de entrada y salida en el Fuzzy Logic Toolbox

Sus rangos y funciones de membresía de las dos entradas y salida del sistema están detallados en la tabla 5.16.

Tabla 5.16. Funciones de membresía de cada entrada y salida del Control Difuso de Nivel

	Nombre de la Variable	Rango de la Variable	Funciones de Membresía	Forma de la función	Rango de la función
Entradas	Nivel	0 a 30 [cm]	Bajo		0 a 13 [cm]
			Medio		13 a 20 [cm]
			Alto		20 a 30 [cm]
	Error	-30 a 20 [cm]	Neg		-30 a 0 [cm]
			Peq		0 a 0.72 [cm]
			Medio		0.72 a 5 [cm]
Salida	Bomba	300 a 1150 [UC]	Nada	0 a 360 [UC]	
			Suave	360 a 630 [UC]	
			Medio	630 a 930 [UC]	
			Mucho	870 a 1150 [UC]	

El resultado de la creación de las funciones de membresía con los valores de la tabla anterior es el observado en las figura 5.112, 5.113 y 5.114, que corresponden a las dos entradas y la salida del sistema.

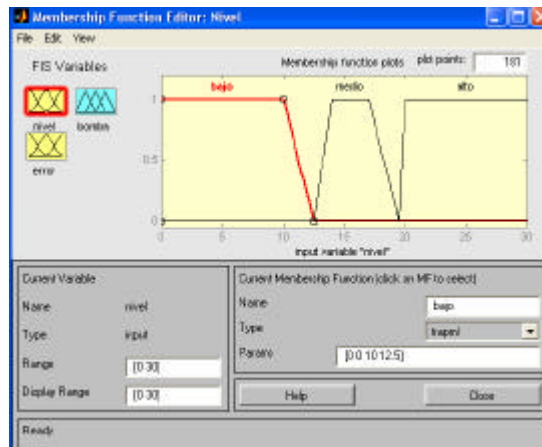


Figura 5.112. Funciones de membresía de la entrada *nivel*

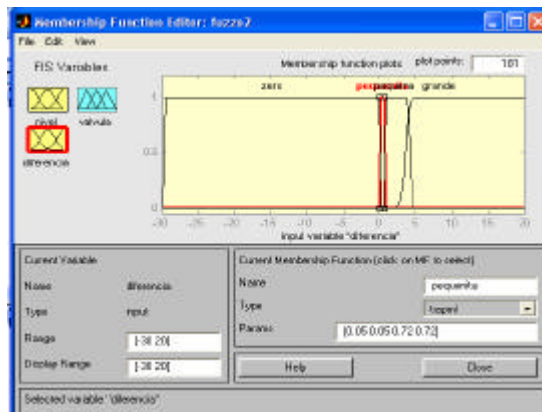


Figura 5.113. Funciones de membresía de la entrada *error*

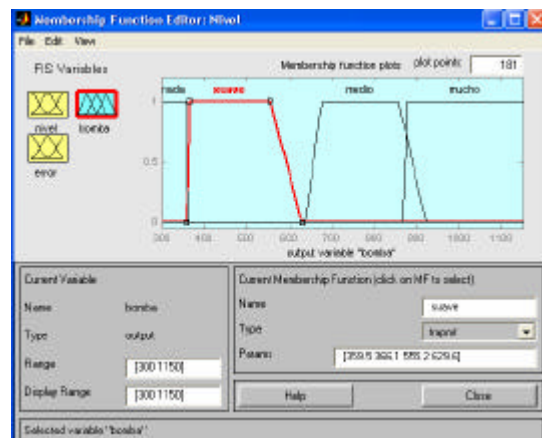


Figura 5.114. Funciones de membresía de la salida *bomba*

A continuación en la tabla 5.17, se tiene expresadas la base de reglas que gobiernan el controlador:

Tabla 5.17. Base de reglas del Control Difuso de Nivel

ENTRADAS					SALIDA
NIVEL	operador	ERROR	BOMBA		
IF	alto	AND	peq	THEN	suave
	alto	AND	medio		suave
	alto	AND	grande		medio
	medio	AND	medio		mucho
	medio	AND	grande		mucho
	medio	AND	peq		medio
	bajo	AND	peq		medio
	bajo	AND	medio		mucho
	bajo	AND	grande		mucho
	neg	AND	nada		nada

Estas reglas han sido establecidas pensando en que mientras más grande *Error* sea, más brusca se necesita que sea la intensidad de *Bomba*, pero tomando en cuenta que a mayor *Nivel* de agua, menor esfuerzo requerirá *Bomba* para cumplir su objetivo de alcanzar el set point. Esta es la lógica principal que gobierna el controlador difuso. El conjunto de reglas fueron depuradas en un proceso repetido de prueba y error y basado en la experiencia anterior del funcionamiento del módulo, hasta alcanzar un resultado satisfactorio.

En la figura 5.115, se tiene el ingreso de las reglas mencionadas en el editor de reglas de Fuzzy Logic Toolbox.

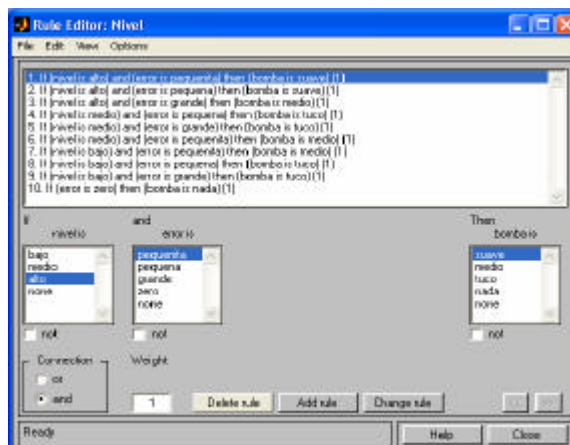


Figura 5.115. Reglas ingresadas en el editor

Con la inclusión de la base de reglas, el controlador está completo. Se guardó el archivo con el nombre de *niveldifuso* y es posible salir de Matlab.

De vuelta al programa en LabVIEW, para poder utilizar el modelo difuso creado anteriormente, se utiliza el instrumento virtual *Matlab Script.vi* en el diagrama de bloques del programa, el cual puede ejecutar cualquier tipo de comando de Matlab, y se usa de forma que se llame al archivo del modelo difuso creado, ingresando las entradas del sistema y este retornando la salida correspondiente, que equivale a la variable manipulada del sistema. Para crear variables de entrada y salida en *este instrumento*, simplemente se da clic derecho sobre su extremo y se escoge ya sea la creación de una entrada o salida.

El valor del sensor de nivel adquirido y transformado a centímetros, representa la variable *nivel*, y la diferencia entre el control numérico *set point* y *nivel* representa la variable *error*. Estas dos variables son conectadas a dos entradas del mismo nombre en el instrumento *Matlab Script* para su evaluación.

Los comandos usados por *Matlab Script* para evaluar el modelo difuso son el comando *readfis* para leer el archivo creado, y *evalfis* para evaluar las variables de entrada y retornar la salida del archivo. La implementación de esto en el diagrama de bloques del programa en LabVIEW y la sintaxis de los comandos se ilustra en la figura 5.116.

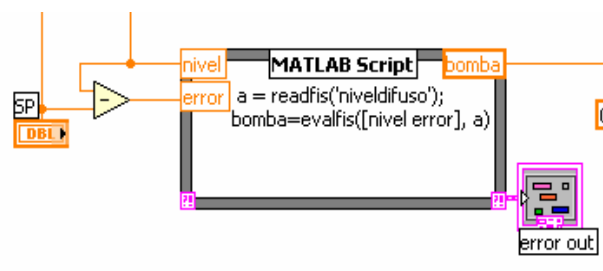


Figura 5.116. Utilización de la VI *Matlab Script* para el Control Difuso de Nivel

El valor retornado por Matlab Script en *bomba*, es conectado al diagrama de bloques de la salida analógica D/A OUT0 de la tarjeta PMD-1208LS, para que este valor se refleje en el control de la intensidad de la bomba de desfogue.

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP) versus la variable sensada (PV), y otra gráfica con el comportamiento de la

variable manipulada (MV), para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para el nivel del tanque (PV en cm), estado de la bomba de desfogue (on/off), estado de las 2 alarmas, y una representación gráfica del estado del tanque, para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 6 se ilustra en la figura 5.117.

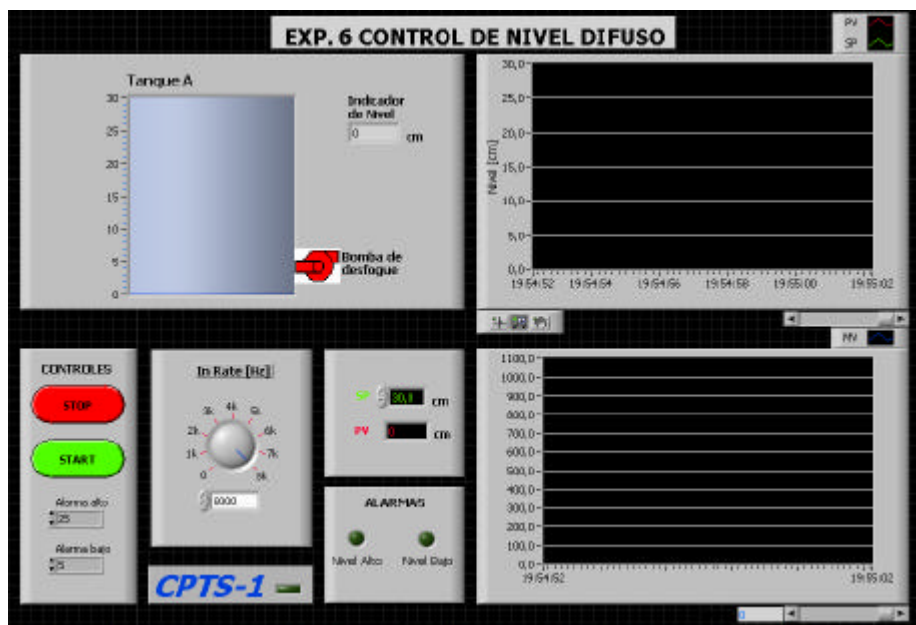


Figura 5.117. Panel frontal Control Difuso de Nivel

A continuación en la figura 5.118, se tiene el diagrama de bloques del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

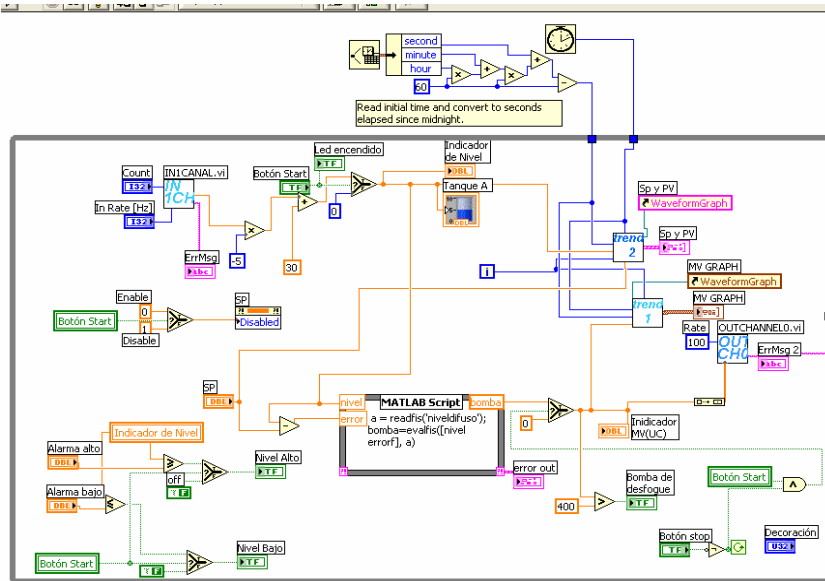


Figura 5.118. Diagrama de bloques Control Difuso de Nivel

5.6.3 Resultados

Los siguientes resultados corresponden a un cambio en el nivel del tanque izquierdo del módulo CPTS-1 de 15 a 10 cm, lo que equivale a un desalajo de aproximadamente 1,19 galones de agua. La tasa de muestreo del sensor de nivel fue de 8000 muestras por segundo.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a esta prueba:

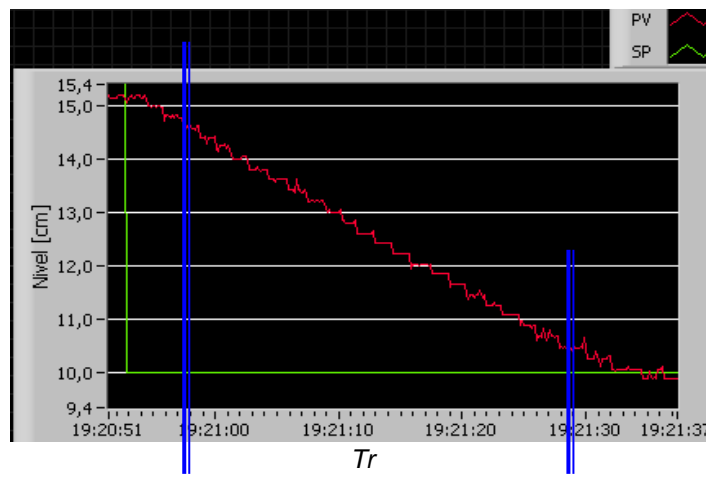


Figura 5.119. Tiempo de subida

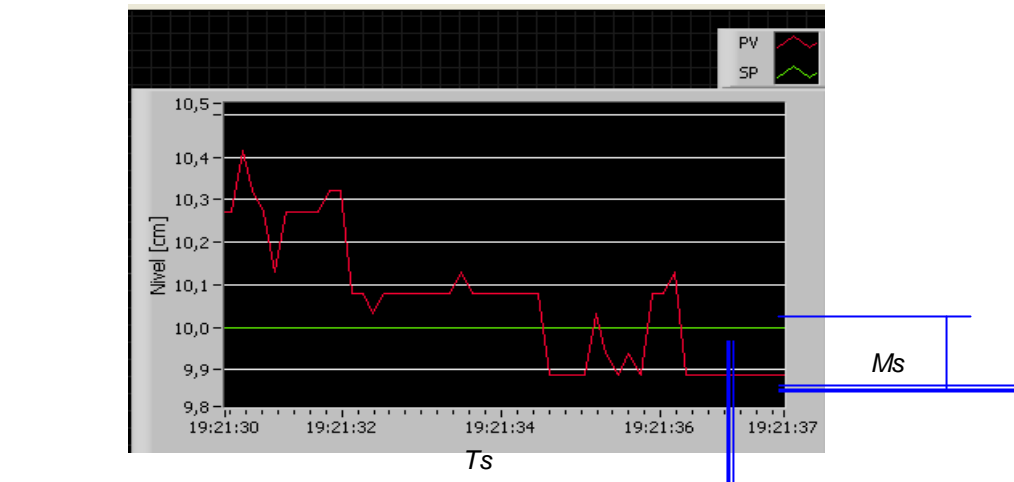


Figura 5.120. Tiempo de establecimiento y Sobreimpulso máximo

La tabla 5.18 que se muestra a continuación resume los valores de las mediciones hechas en esta prueba:

Tabla. 5.18. Valores de índices de desempeño del control difuso de nivel

Medición	Valor
Desplazamiento [cm]	5
Volumen de agua [gal]	1,19
$T_{r(10-90)\%}$ [s]	30
T_s 5% [s]	43,5
M_P [cm]	0,11
M_P [%]	1,1
Error estacionario [cm]	0,11

Observando las figuras 5.119 y 5.120, se puede apreciar que el control implementado presenta tiempos de subida menores que el controlador PID en este rango de trabajo, pero mayores con respecto al tiempo de establecimiento, explicándose esto al estar el control difuso diseñado para que se proceda con cautela al estar la variable del proceso cerca del punto de consigna. Esto se ve reflejado positivamente al tener sobreimpulsos máximos menores que los causados cuando se utilizó un controlador PID.

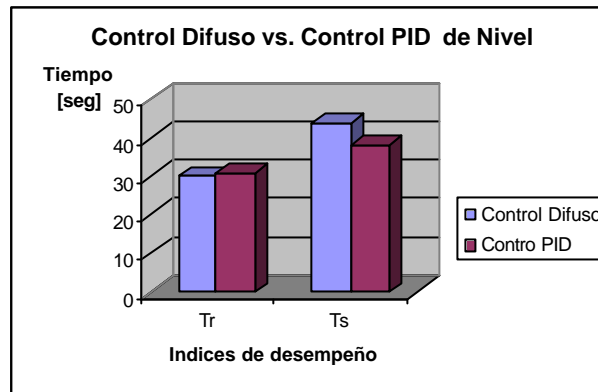


Figura 5.121. Comparación de los tiempos de subida y de establecimiento del Control PID y control Difuso

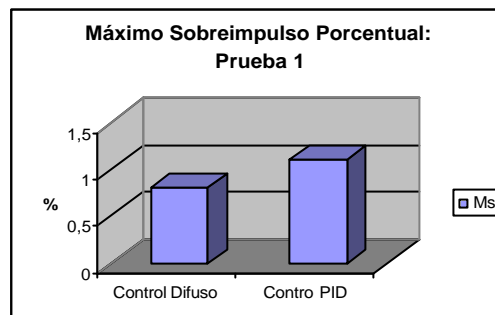


Figura 5.122. Comparación de los máximos impulsos porcentuales del Control PID y control Difuso

La reducción de velocidad de muestreo de la señal del sensor de nivel no provocó un cambio de comportamiento notorio del controlador. A continuación, se tiene el comportamiento del proceso cuando después de estabilizarlo en 10 cm, se procedió a aplicar una perturbación con el ingreso de agua a través de la bomba de retorno. Se obtuvo un sobreimpulso de 0,2 cm máximo, un comportamiento muy similar al que tuvo el sistema cuando se utilizó un controlador PID de por medio. En la gráfica 5.123, se tiene los resultados del control difuso a la izquierda, y con controlador PID en la derecha.

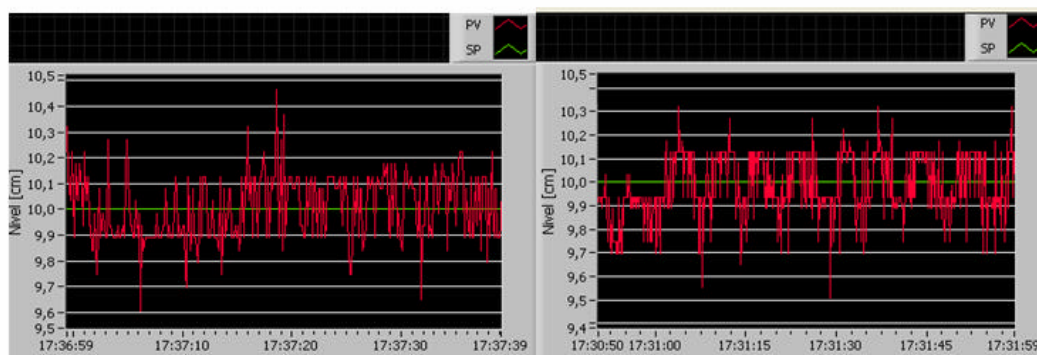


Figura 5.123. Comparación del Control PID y el control Difuso ante una perturbación después de estar estable el sistema

5.6.4 Conclusiones y Recomendaciones

Una vez implementado el programa de interfase y control, se observó que el controlador difuso implementado de dos entradas y de 10 reglas funciona adecuadamente, con especial ventaja en la precisión que este control ofrece al sistema.

Cabe resaltar que su implementación fue posible gracias a conocer de antemano el comportamiento del proceso a fondo, lo que facilitó el establecimiento de las funciones de membresía y especialmente las reglas que gobiernan el controlador.

El controlador difuso implementado utiliza dos entradas, que comparado con una única referencia usada por el controlador PID de la práctica 1, hace de ésta una técnica más puntual en su funcionamiento, sin mayor inconveniente en su implementación.

Con esto se comprueba que con el modulo CPTS-1 se puede realizar satisfactoriamente el control de nivel Difuso desde una PC.

5.7 PRÁCTICA #7: CONTROL ANTICIPATIVO DIFUSO

5.7.1 Enunciado

Se tiene dos tanques de almacenamiento de agua. El tanque izquierdo cuenta con un sensor de temperatura S1, un dispositivo de calentamiento y una bomba de desalojo. En el tanque derecho se encuentra un sensor de temperatura S2 y otra bomba de desalojo como se indica en la figura 5.124.

Las bombas de desalojo tienen como finalidad recircular el líquido entre los tanques.

Aplicando la técnica de control anticipativo difuso se desea controlar la temperatura en el tanque derecho, debiendo para ello sensor la temperatura del tanque izquierdo.

Si la temperatura del tanque izquierdo es menor con 2°C que la temperatura que se desea establecer en el tanque derecho, y la variable del proceso está por alcanzar este punto de consigna, el controlador cortará su salida, previniendo así la inercia y no linealidad del calentamiento del agua, anticipándose al paso de la variable de consigna. En las condiciones restantes, el controlador se podrá comportar de forma lineal.

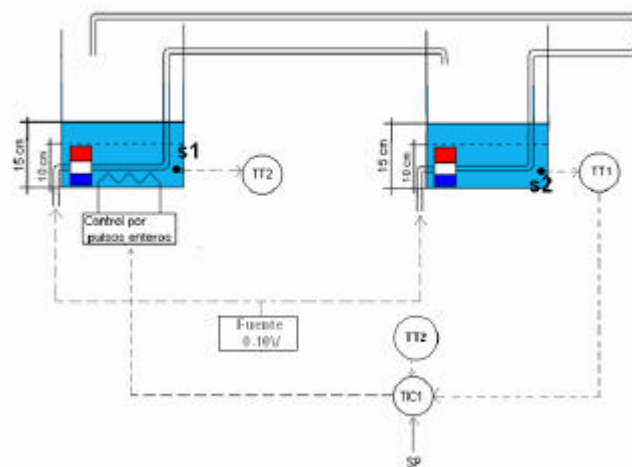


Figura 5.124. Esquema para el Control Anticipativo Difuso

5.7.2 Implementación

Como se observa en la figura 5.124, las bombas serán manejadas por la fuente de $0 - 10\text{V}_{\text{DC}}$ para circular el agua entre el tanque 1 y 2 para mezclar la temperatura del agua de los mismos. Las niquelinas van a ser manejadas por la PC a través de la tarjeta PMD-1208LS. A continuación se tiene las conexiones necesarias en hardware y la configuración en software para poner la práctica en funcionamiento.

5.7.2.1 Conexiones de Hardware

La figura 5.125 ilustra la conexión del tanque 1 con el tanque 2 mediante la manguera etiquetada A1 y la tubería de retorno.

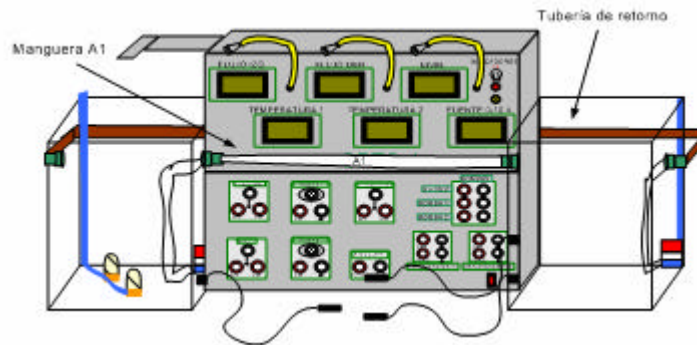


Figura 5.125. Conexión de manguera A1 y tubería de retorno

Para que la PC maneje las niquelinas a través de la tarjeta de adquisición de datos, conectar la salida analógica D/A OUT 0 (pin 13) y tierra (pin 12) a los jacks de entrada de la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas, como se ve en la figura 5.126.

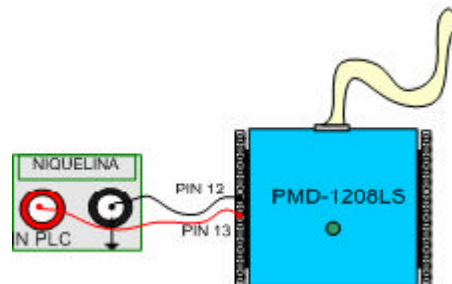


Figura 5.126. Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas

Conectar el plug del sensor de temperatura del tanque izquierdo a su jack correspondiente en la tarjeta de temperatura 1 en el panel frontal del módulo, y conectar la salida de la tarjeta de temperatura hacia el CH0 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 1 y su tierra es el pin 3. Estos pasos b ilustra la figura 5.127.

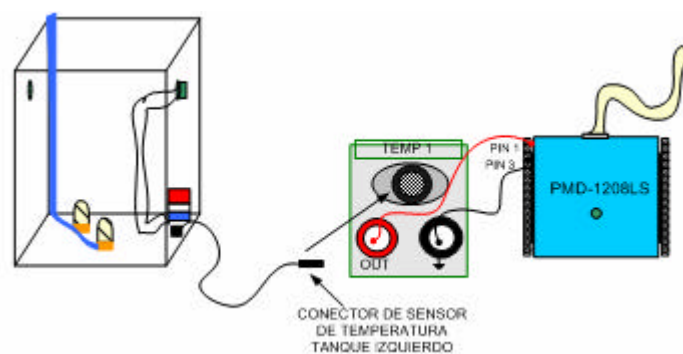


Figura 5.127. Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo

Repetir los pasos anteriores con el conector del sensor de temperatura inferior del tanque derecho hacia la tarjeta de temperatura 2, y desde la salida de esta hacia el CH1 IN de la tarjeta PMD-1208LS, cuyo pin es el 2 y su tierra es el pin 6, como lo ilustra la figura 5.128.

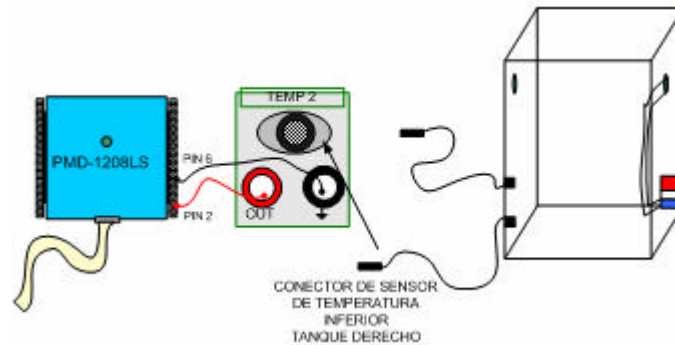


Figura 5.128. Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho

Conectar la fuente 0 – 10 V_{DC} a las dos tarjetas de amplificación de las bombas, para controlar el flujo de agua desde la misma, como lo ilustra la figura 5.129.

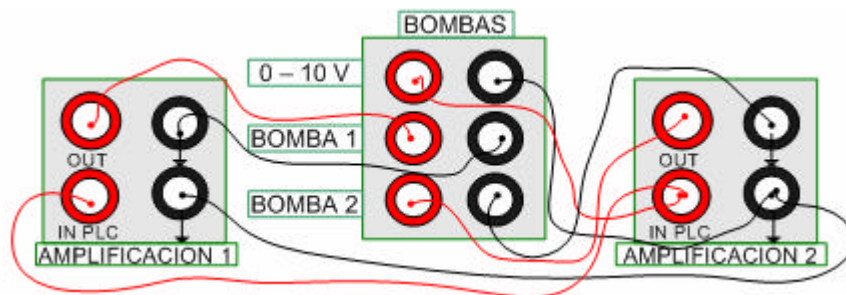


Figura 5.129. Conexiones de la fuente de 0-10 V_{DC} para manejar las dos bombas

Para finalizar con las conexiones de hardware, conectar las bombas y niquelinas a sus jacks respectivos ubicados en las caras laterales del módulo CPTS-1. Encender los swtichs de los indicadores, de la fuente variable, de los sensores de temperatura, de las niquelinas y de las bombas, ubicados en los paneles frontales y laterales, completando así los pasos de conexión para su funcionamiento.

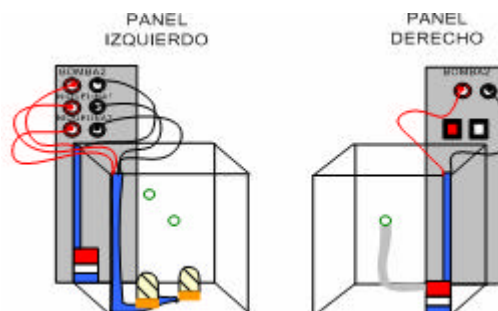


Figura 5.130. Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo

5.7.2.2 Configuración de software

Para esta práctica, se requiere tener instalado en la PC de control el software LabVIEW, Matlab con Fuzzy Logic Toolbox y el programa Instacal, proveído al instalar la tarjeta PMD-1208LS en la PC.

La tarjeta de adquisición de datos debe estar configurada con sus entradas analógicas tipo individuales, esto en el programa InstaCal en donde se configura la misma. Para crear el programa de interfase y control, ejecutar el programa LabVIEW y crear un archivo nuevo. Se configura primero todo lo referente a la comunicación entre la PC y el módulo CPTS-1. En esta práctica se utiliza dos entradas y una salida analógica para los dos sensores de temperatura y el control de las niquelinas respectivamente.

En el diagrama de bloques del programa, con la utilización de los instrumentos virtuales de la tarjeta PMD-1208LS, se crea los controles para la entrada analógica CH0 IN (sensor de temperatura izquierdo) con el rango de $+10 V_{DC}$, y otro igual para la entrada analógica CH1 IN (sensor de temperatura derecho), los cuales serán convertidos de voltios a grados centígrados posteriormente. Se crea también los controles para la salida D/A OUT 0, la cual tiene el rango de funcionamiento de 0 a 1023 (correspondiente a 0 - 5 V_{DC}), y será usada para el control de las niquelinas. Esto se ilustra en las figuras 5.131 y 5.132.

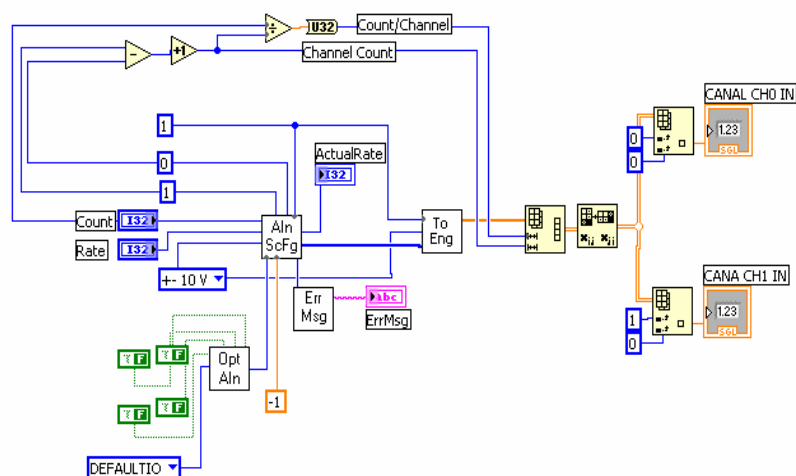


Figura 5.131. Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS

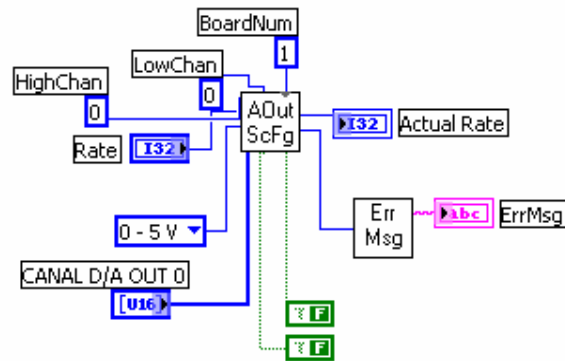


Figura 5.132. Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS

Los diagramas de bloques anteriores son los ejemplos *xainscfg.vi* y *xaoutscf.vi*, incluidos en el disco de instalación de la tarjeta PMD-12008LS, los cuales son útiles para crear canales de entrada y salida con frecuencia de muestreo regulable. Para más detalle sobre el uso de cada uno de estos instrumentos virtuales, consultar el punto 2.4.3 del presente documento.

El control numérico *Rate* del diagrama de bloques de los canales de entrada de la figura 5.131 consta en la interfase del programa como una perilla regulable, la cual tendrá una tasa de muestreo máxima de 8000 muestras por segundo en total, 4000 muestras por cada canal. Los dos diagramas de bloques de las figuras 5.131 y 5.132 fueron comprimidos cada uno a un solo bloque por cuestiones de espacio y organización del programa, y constan en el diagrama de bloques general como *In2canales.vi* (canales de entrada) y *Outchannel0.vi* (canal de salida).

En base a las mediciones de temperatura del agua en los tanques y del voltaje entregado por los sensores de temperatura, se obtiene la gráfica de la figura 5.133, y al linealizarla se tiene la siguiente función de transferencia, la cual es implementada para transformar las señales de los sensores de temperatura de voltios a grados centígrados:

$$Y = 5,6629X + 12,146$$

En donde:

Y → grados centígrados (20 – 70°C)

X → unidades crudas (0 – 10 V)

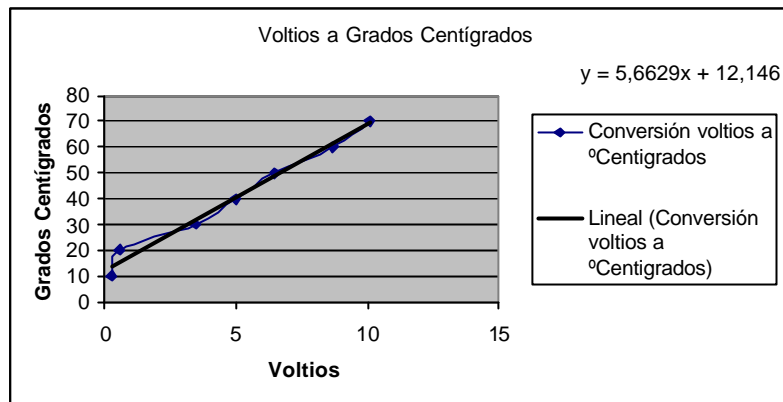


Figura 5.133. Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados

Esta ecuación es implementada en el diagrama de bloques del programa, una para cada sensor de temperatura, tal como lo ilustra la figura 5.134.

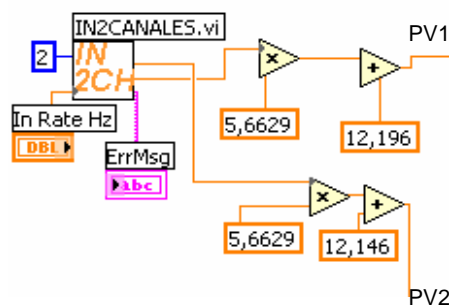
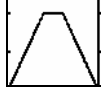



Figura 5.134. Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada

En el panel frontal de la interfase en LabVIEW, están insertados 2 botones de control, los cuales servirán para encender el proceso y detener el proceso. Se colocó además un control numérico para el set point de temperatura del tanque derecho con el rango de valores de 20 a 70 grados centígrados.

Para modelar el controlador anticipativo difuso, se utilizó el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, creando un sistema de dos entradas y una salida, con defusificación tipo centroide. La entrada *Error* es el resultado de la diferencia entre el set point del tanque derecho y la temperatura del tanque izquierdo, y la entrada *perturbación* es la diferencia entre el set point y la temperatura del tanque izquierdo. La salida controlará la intensidad de funcionamiento de las niquelinas. Sus rangos y funciones de membresía están detallados en la tabla 5.19.

Tabla 5.19. Funciones de membresía de cada entrada y salida del Control Anticipativo Difuso

	Nombre de la Variable	Rango de la Variable	Funciones de Membresía	Forma de la función	Rango de la función
Entradas	Error	-20 a 55 [°C]	Negativo		-20 a 0 [°C]
			Poco		0 a 3 [°C]
			Mucho		3 a 60 [°C]
	Perturbación	-20 a 55 [°C]	Porencima		-20 a 0 [°C]
			Enrango		0 a 2 [°C]
			Bajorango		2 a 55 [°C]
Salida	Salida	500 a 950 [UC]	Nada		500 a 950 [UC]
			Leve		700 a 740 [UC]
			Medio		740 a 780 [UC]
			Alto		780 a 950 [UC]

El resultado del ingreso de los valores de la tabla anterior en el editor de funciones de membresía es el observado en las figura 5.135, 5.136 y 5.137, que corresponden a las dos entradas y la salida del sistema.

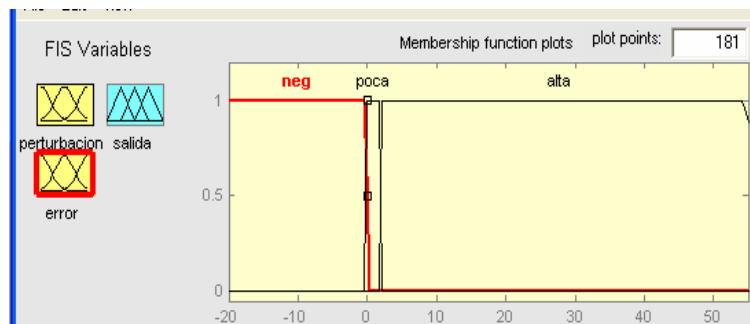


Figura 5.135. Funciones de membresía de la entrada *error* del Control Anticipativo Difuso

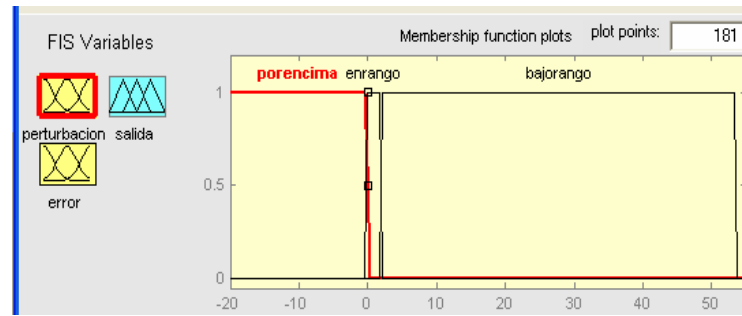


Figura 5.136. Funciones de membresía de la entrada *perturbación* del Control Anticipativo Difuso

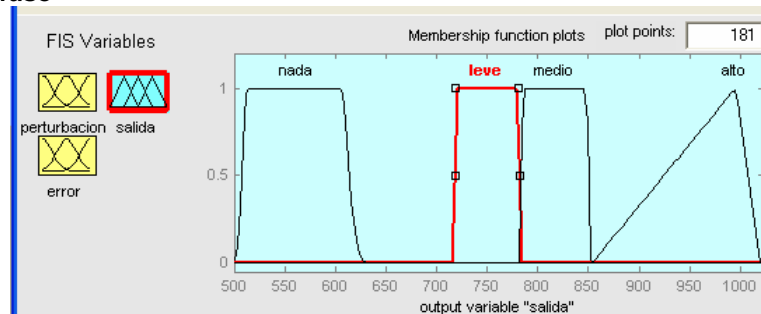


Figura 5.137. Funciones de membresía de *salida* del Control Anticipativo Difuso

Para cumplir con el control anticipativo de la temperatura del tanque izquierdo con referencia al set point de temperatura del tanque derecho, las reglas del controlador fueron planteadas para que cuando la entrada *Perturbación* sea clasificada como *Enrango*, que quiere decir que la temperatura del tanque izquierdo está en el margen de 2 grados centígrados de anticipación establecido y la entrada *Error* sea clasificada como *Poca*, que indica que el set point de temperatura del tanque derecho está por alcanzarse, la intensidad de las niqelinas sea *Leve*, funcionando cautelosamente y evitando que el set point establecido sea sobrepasado. Las otras reglas hacen que el controlador diseñado funcione como controlador realimentado en el resto de condiciones, entregando una salida *Leve* cuando el *Error* es *Poca*, una salida *Nada* cuando el *Error* es *Neg* (*Negativo*), y una salida *Alta* cuando el *Error* es *Alta*.

A continuación en la tabla 5.20, se tiene expresadas la base de reglas que gobiernan el controlador:

Tabla 5.20. Base de reglas del Control Anticipativo Difuso

ENTRADAS				SALIDA
	PERTURBACIÓN	operador	ERROR	SALIDA
IF	Enrango	AND	Poca	Leve

	Porencima	AND	Neg	THEN	Nada
	Porencima	AND	Poca		Leve
	Porencima	AND	Alta		Medio
	Bajorango	AND	Neg		Nada
	Bajorango	AND	Poca		Leve
	Bajorango	AND	Alta		Alto

En la figura 5.138, se tiene el ingreso de las reglas mencionadas en el editor de reglas de Fuzzy Logic Toolbox.

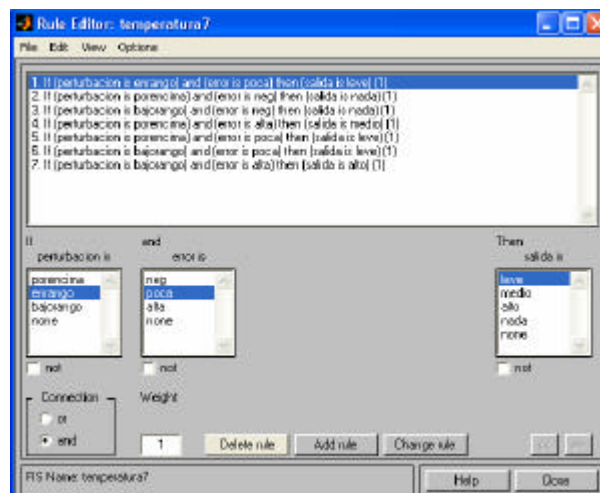


Figura 5.138. Reglas ingresadas en el editor del Control Anticipativo Difuso

Con la inclusión de la base de reglas, el controlador está completo. Se guardó el archivo con el nombre de *temperatura2* y es posible salir de Matlab.

De vuelta al programa en LabVIEW, para poder utilizar el modelo difuso creado anteriormente, se utiliza el instrumento virtual *Matlab Script.vi* en el diagrama de bloques del programa, el cual puede ejecutar cualquier tipo de comando de Matlab, y se usa de forma que se llame al archivo del modelo difuso creado, ingresando las entradas del sistema y este retornando la salida correspondiente, que equivale a la variable manipulada del sistema. Para crear variables de entrada y salida en *este instrumento*, simplemente se da clic derecho sobre su extremo y se escoge ya sea la creación de una entrada o salida.

El set point establecido en el control numérico menos el valor del sensor de temperatura del tanque izquierdo adquirido y transformado a grados centígrados, representa la variable *Perturbación*, y la variable *error*, la cual es el resultado de la

diferencia entre el set point y la temperatura del tanque izquierdo, son conectadas a dos entradas del mismo nombre en el instrumento virtual *Matlab Script* para su evaluación.

Los comandos usados por *Matlab Script* para evaluar el modelo difuso son el comando *readfis* para leer el archivo creado, y *evalfis* para evaluar las variables de entrada y retornar la salida del archivo. La implementación de esto en el diagrama de bloques del programa en LabVIEW y la sintaxis de los comandos se ilustra en la figura 5.139.

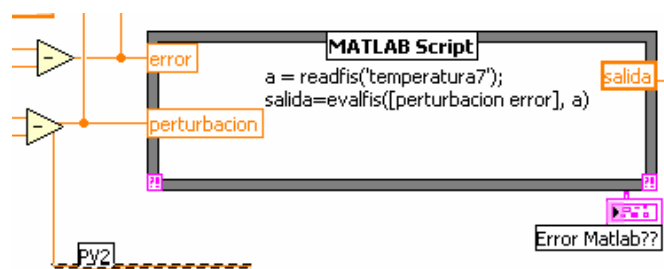


Figura 5.139. Utilización de la VI *Matlab Script* para el Control Anticipativo Difuso

El valor retornado por Matlab Script en *niquelina*, es conectado al diagrama de bloques de la salida analógica D/A OUT0 de la tarjeta PMD-1208LS, para que este valor se refleje en el control de la intensidad de las niquelinas del tanque izquierdo.

Se tiene en la interfase una gráfica del desempeño del set point establecido (SP), la variable sensada (PV), y la variable manipulada (MV), para efectos de sintonización y una mejor visualización de su desempeño en función del tiempo.

Se incluye además indicadores digitales para la temperatura de los dos tanques, estado de la niquelina (on/off), estado de la condición de anticipación, estado de la comunicación de LabVIEW con Matlab, además de una representación gráfica en barra de las temperaturas y su set point, para efectos de monitoreo del sistema. Así, la interfase completa de la práctica 7 se ilustra en la figura 5.140.

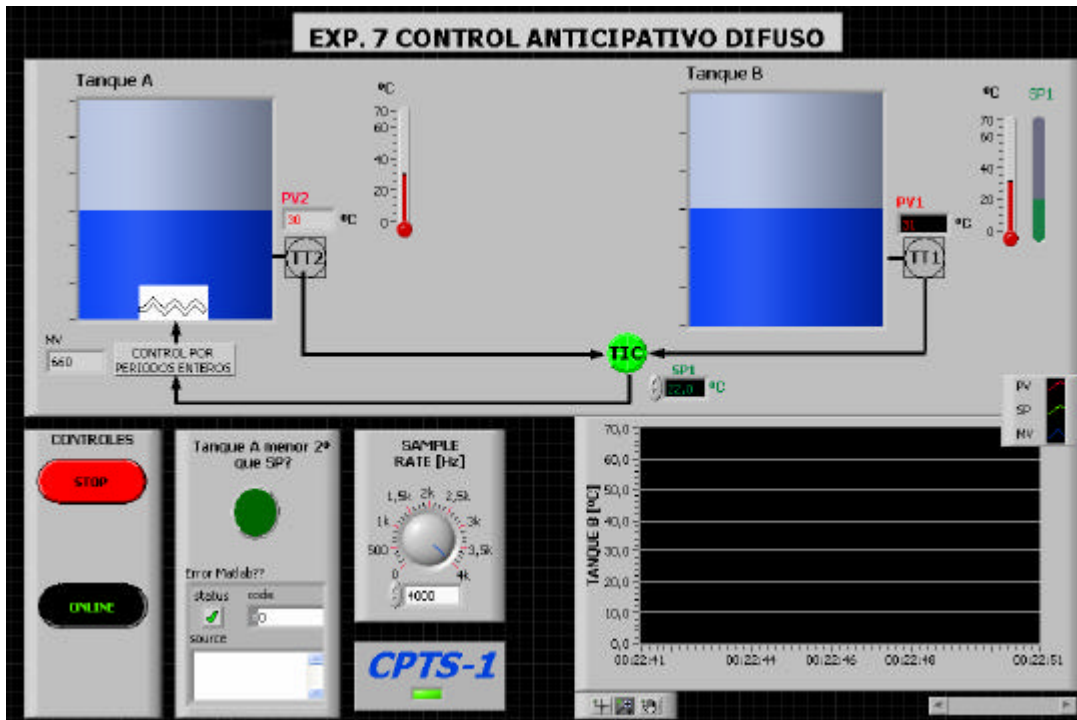


Figura 5.140. Panel frontal Control Anticipativo Difuso

A continuación en la figura 5.141, se tiene el diagrama de bloques del programa, el cual debe ser encerrado en un lazo *while*, para que su funcionamiento sea continuo.

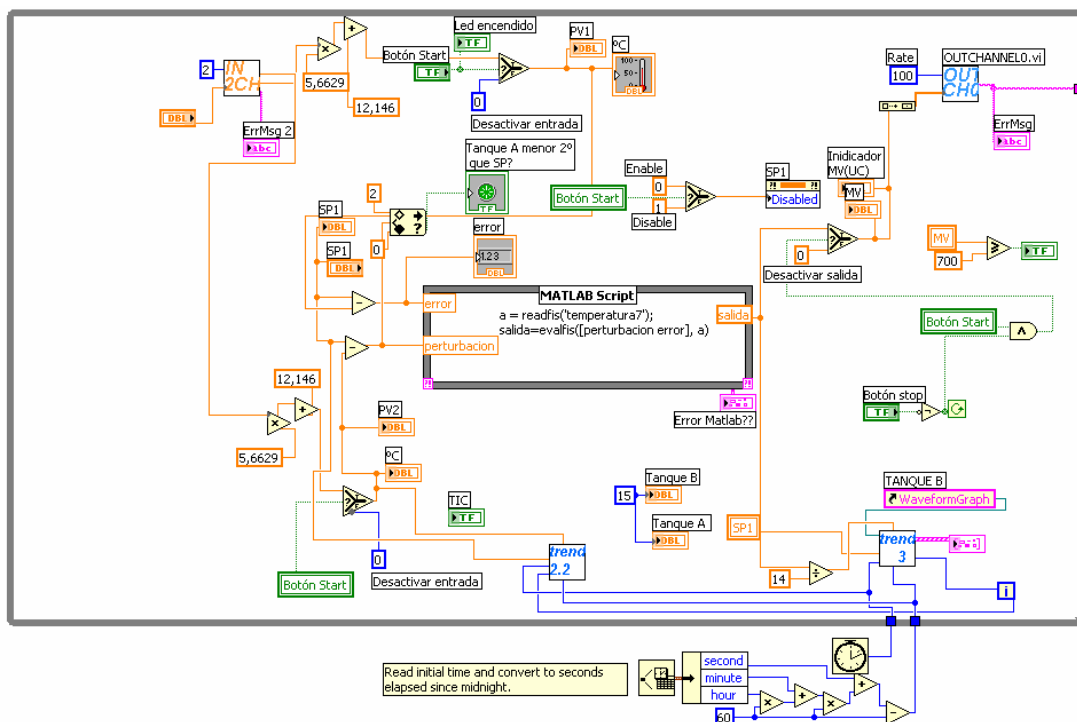


Figura 5.141. Diagrama de bloques Control Anticipativo Difuso

5.7.3 Resultados

Estos resultados corresponden a un cambio en la temperatura del tanque derecho (B) del módulo CPTS-1 de 20 a 30 grados centígrados, teniendo en cuenta los requisitos del control anticipativo. Las señales de los sensores de temperaturas son adquiridas con una tasa de muestreo de 4000 muestras por segundo cada uno.

A continuación se muestran las gráficas correspondientes a esta prueba:

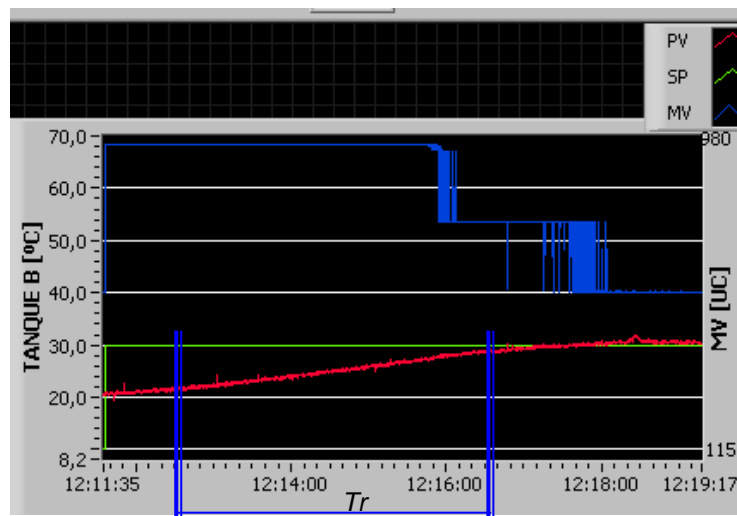
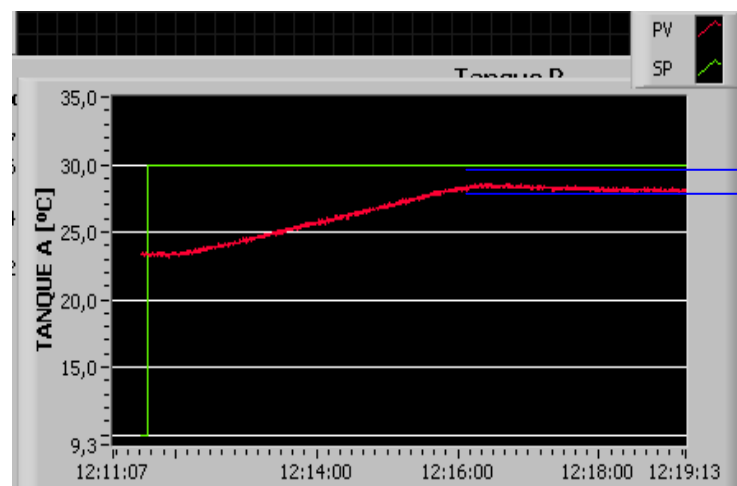


Figura 5.142. Tiempo de subida (10 – 90%)



2° C de
Anticipación

Figura 5.143. Efecto del control anticipativo sobre la PV del tanque derecho

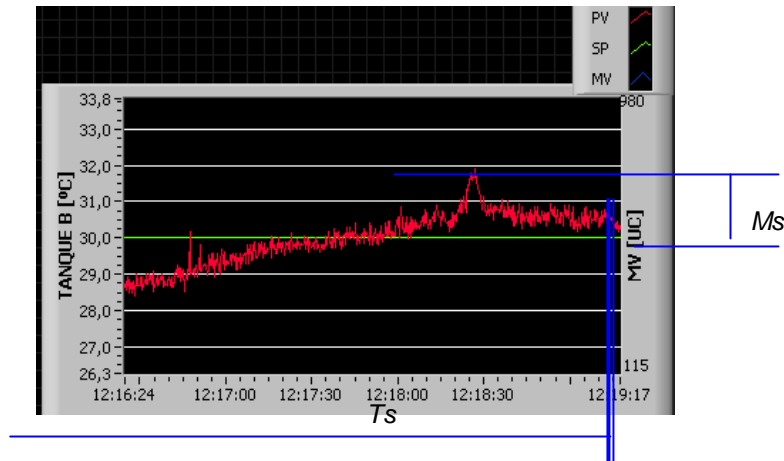


Figura 5.144. Sobreimpulso máximo y tiempo de establecimiento

La tabla 5.21 que se muestra a continuación resume los valores de las mediciones hechas al sistema:

Tabla. 5.21 Índices de desempeño del control anticipativo difuso

Medición	Valor
Calentamiento [°C]	10
$T_r(10-90)\%$ [min y seg]	4' 05"
$T_s 5\%$ [min y seg]	7' 42"
M_P [°C]	1,8
M_P [%]	6

Observando las figuras 5.142, y 5.144, se puede observar tanto el tiempo de subida, tiempo de establecimiento y sobreimpulso máximo existente en el proceso. En la figura 5.143 se puede apreciar el efecto del control anticipativo cuando la temperatura del tanque izquierdo y el tanque derecho entran en el rango de -2 °C con respecto al set point impuesto.

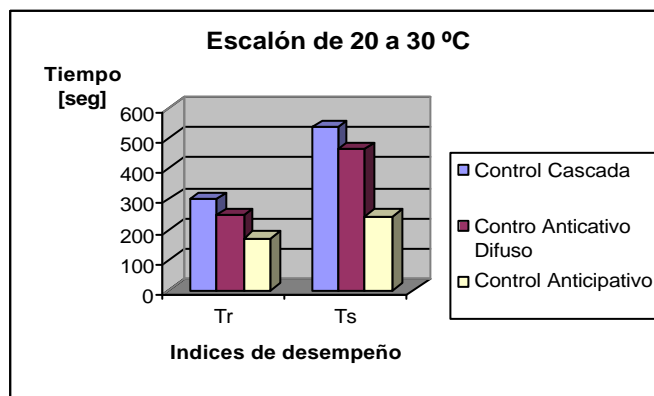


Figura 5.145. Comparación de los tiempos de subida y de establecimiento del Control en Cascada, control Anticativo Difuso y control Anticativo, ante el mismo escalón

Al comparar los índices de desempeño de esta técnica de control con el control anticipativo y con control en cascada sobre la misma prueba, el control anticipativo muestra tiempos de duración mucho más pequeños, seguido por la técnica de esta práctica, siendo el de más lentitud el control en cascada. Se debe tomar en cuenta que el control Anticipativo tenía como actuador a controlar el flujo de las bombas y constaba de calentamiento constante de niquelinas, lo que basado en los resultados, es de mayor efecto en el cambio de temperatura de la variable del proceso.

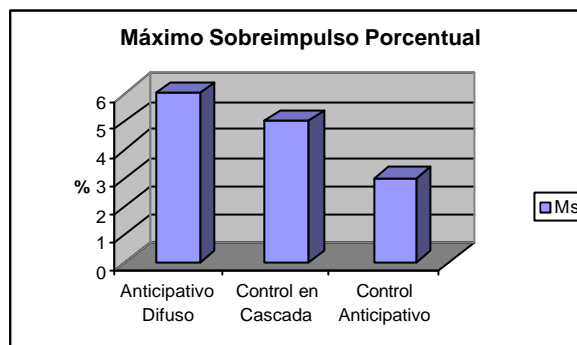


Figura 5.146. Comparación de los máximos impulsos porcentuales del Control Anticipativo difuso, control en cascada y control anticipativo, ante el mismo escalón

La técnica aplicada en esta práctica permitió un sobreimpulso máximo mayor que las dos otras técnicas consideradas, pero estando todavía dentro de los rangos estándares buscados en este tipo de procesos. El cambio de tasa de muestreo de los sensores de temperatura no afectó notoriamente al comportamiento del proceso.

5.7.4 Conclusiones y Recomendaciones

Una vez implementado el programa de interfase y control, se pudo observar que el controlador difuso resultó ser fácil de implementar, pudiendo ser muy específicos en su funcionamiento y obteniendo buenos resultados. La utilización de dos entradas y una salida, con únicamente siete reglas mostró la versatilidad del uso de la técnica de control difuso, tomando en cuenta las condiciones específicas que esta técnica de control requiere.

Igual que en el caso anterior, un conocimiento previo del comportamiento del proceso es fundamental para tener éxito al crear un controlador difuso. La

temperatura del tanque 2 a controlar fue manipulada satisfactoriamente a través del calentamiento del tanque 1, previniendo que la inercia del calentamiento del agua en el tanque 1 haga sobrepasar del objetivo establecido en el set point del tanque 2, por demasiado margen, teniendo buenos resultados especialmente en su tiempo de establecimiento del proceso.

Es necesario poner mucha atención en el establecimiento de las funciones de membresía de cada entrada, cuyos valores exactos son determinantes en este y cualquier otra función de un controlador difuso.

Con esto se comprueba que con el modulo CPTS-1 se puede realizar satisfactoriamente el control Anticipativo Difuso desde una PC.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La necesidad de validar las técnicas de análisis y diseño de sistemas de control mediante la experimentación es evidente. Existe en este momento una tendencia creciente a virtualizar la experimentación, reemplazando por simulaciones la experiencia directa. Este proyecto ayuda a acercar al estudiante a la experiencia real, utilizando las mismas herramientas que utiliza en la simulación de conceptos (PC y software LabVIEW o Matlab), por lo que la transición de simulación a la experiencia real tendrá elementos en común y facilitará las cosas al estudiante en su aprendizaje.
- La facilidad del uso de la tarjeta PMD-1208LS en lo relacionado a su software y a su hardware, hacen de esta un elemento a tomar en cuenta para fines educativos, pudiendo ser útil en una gran rango de aplicaciones, desde el más elemental hasta algo tan demandante como fue la ejecución de este proyecto.
- Debido a que la tarjeta PMD-1208LS trabaja con dos de los programas de mayor difusión en el medio educativo en los actuales momentos como son LabVIEW y Matlab, y además por su conectividad tipo USB, la utilidad de este equipo está asegurada para muchos años en el futuro sin temor a quedar obsoleta en este medio.
- La utilización del programa LabVIEW para el uso de interfase y control del CPTS-1 probó ser un gran acierto, debido a su gran desempeño en el trabajo con instrumentación del tipo del que se usó en este proyecto, su confiabilidad en su funcionamiento en tiempo real, en la variedad de

herramientas que este pone a disposición del usuario, en su apertura a conectarse con otros programas, sin haber quedado atrás en ningún momento con referencia al desempeño que tuvo el modulo CPTS-1 cuando estuvo controlado por un PLC.

- El haber podido utilizar software como LabVIEW y Matlab a través de la tarjeta PMD-1208LS y poder explotar sus recursos en la experiencia real, abre una gran cantidad de posibilidades de aplicación de la misma, tales como la aplicación de mucha teoría que solo ha llegado a ser simulada en programas de PC, debido a la falta de un dispositivo como la tarjeta que sirve como nexo entre la PC y cualquier hardware externo donde se quiera aplicar la teoría .
- La ejecución de este proyecto ayuda a desmitificar aún más el uso de la técnica de control difuso, demostrando su gran valía en determinadas situaciones, y mostrando su principal virtud: utilizar el lenguaje diario para reemplazar complejos procesos matemáticos y tener éxito en ello.

6.2 RECOMENDACIONES

- Hay que recalcar que es fundamental primero tener el conocimiento adecuado sobre el manejo del módulo CPTS-1 y la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS para evitar cualquier daño en el uso de los mismos. Se recomienda leer extensamente la documentación de estos dos dispositivos, y revisar reiteradamente las conexiones hechas en el momento de conectarlos.
- El usuario del módulo CPTS-1 deberá tener cuidado con las conexiones flojas de mangueras, desbordamiento de agua de los tanques, utilización de los niquelinas y bombas sin carga, y contacto alguno del agua con cualquiera de los dispositivos en funcionamiento.

- Se recomienda seguir investigando qué otras aplicaciones se podrían dar a la tarjeta PMD-1208LS, pues como ya se expuso, esta tiene interconectividad con gran variedad de software, y se podrían ampliar las posibilidades de experimentar la teoría en la realidad a través de ella, tales como utilizar otras técnicas de control sobre el mismo módulo.

BIBLIOGRAFÍA

- ORTIZ, Hugo R., **Instrumentación y Sistemas de Control**, 1998.
- CUADRADO, Jorge R., **Sistema de Entrenamiento para Control de Procesos CPTS-1 – Fase 1: Diseño**, 2003.
- LÓPEZ, Fausto, GUARICELA, Pablo, **Sistema de Entrenamiento para Control de Procesos CPTS-1 – Fase 2: Implementación**, 2003.
- COUGHLIN, Robert F., RISCOLL, Frederick F., **Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales**, Cuarta Edición, Prentice-Hall Hispanoamérica S.A., México 1993.
- THE MATHWORKS, **Fuzzy Logic Toolbox for Use with Matlab**, Segunda Edición, 2005.
- MEASUREMENT COMPUTING, **PMD-1208LS Personal Measurement Device for Analog and Digital I/O User's Guide**, 2004
- MEASUREMENT COMPUTING, **Universal Library User's Guide**, 2004
- SHINSKEY, Greg F., **Process-Control Systems**, Segunda Edición, McGraw-Hill Book company, 1979.
- <http://virtual.cvut.cz/dynlabmodules/syscontrol/node64.html>, Empirical tuning rules according to Ziegler and Nichols.

ANEXO 1

LISTADO DEL EQUIPO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CPTS-1

CARA FRONTAL

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Display de medición de voltaje del sensor de temperatura 1	(CPTS-1-DTT1)
Display de medición de voltaje del sensor de temperatura 2	(CPTS-1-DTT2)
Display de medición de corriente del sensor de flujo1	(CPTS-1-DFT1)
Display de medición de corriente del sensor de flujo2	(CPTS-1-DFT2)
Display de medición de voltaje del sensor de nivel	(CPTS-1-DLT1)
Display de medición de voltaje offset de bombas	(CPTS-1-DB1)
Jack del sensor de temperatura1	(CPTS-1-JTT1)
Jack de señal de salida del sensor de temperatura1	(CPTS-1-JSTT1)
Jack de tierra del sensor de temperatura1	(CPTS-1-JTTT1)
Jack del sensor de temperatura 2	(CPTS-1-JTT2)
Jack de señal de salida del sensor de temperatura 2	(CPTS-1-JSTT2)
Jack de tierra del sensor de temperatura 2	(CPTS-1-JTTT2)
Jack del sensor de flujo 1	(CPTS-1-JFT1)
Jack de alimentación del sensor flujo 1	(CPTS-1-JAFT1)
Jack de señal de salida del sensor de flujo 1	(CPTS-1-JSFT1)
Jack de tierra del sensor de flujo 1	(CPTS-1-JTFT1)
Jack del sensor de flujo 2	(CPTS-1-JFT2)
Jack de alimentación del sensor flujo 2	(CPTS-1-JAFT2)
Jack de señal de salida del sensor de flujo 2	(CPTS-1-JSFT2)
Jack de tierra del sensor de flujo 2	(CPTS-1-JTFT2)
Jack del sensor de nivel	(CPTS-1-JLT1)
Jack de alimentación del sensor de nivel	(CPTS-1-JALT1)
Jack de señal de salida del sensor de nivel	(CPTS-1-JSLT1)
Jack de tierra del sensor de nivel	(CPTS-1-JTLT1)
Jack de voltaje offset de bombas	(CPTS-1-JOB)
Jack de tierra offset de bombas	(CPTS-1-JTOB)
Jack de voltaje de bomba 1	(CPTS-1-JB1)
Jack de tierra de bomba 1	(CPTS-1-JTB1)
Jack de voltaje de bomba 2	(CPTS-1-JB2)
Jack de tierra de bomba 2	(CPTS-1-JTB2)
Jack amplificación voltaje bomba 1	(CPTS-1-JAB1)

Jack amplificación voltaje bomba 2	(CPTS-1-JAB2)
Jack de voltaje entrada de niquelina	(CPTS-1-JN1)
Jack de tierra entrada de niquelina	(CPTS-1-JTN1)
Jack de voltaje entrada de niquelina	(CPTS-1-JN2)
Jack de tierra entrada de niquelina	(CPTS-1-JTN2)
Interruptor master	(CPTS-1-SM1)

Cara Lateral Izquierda

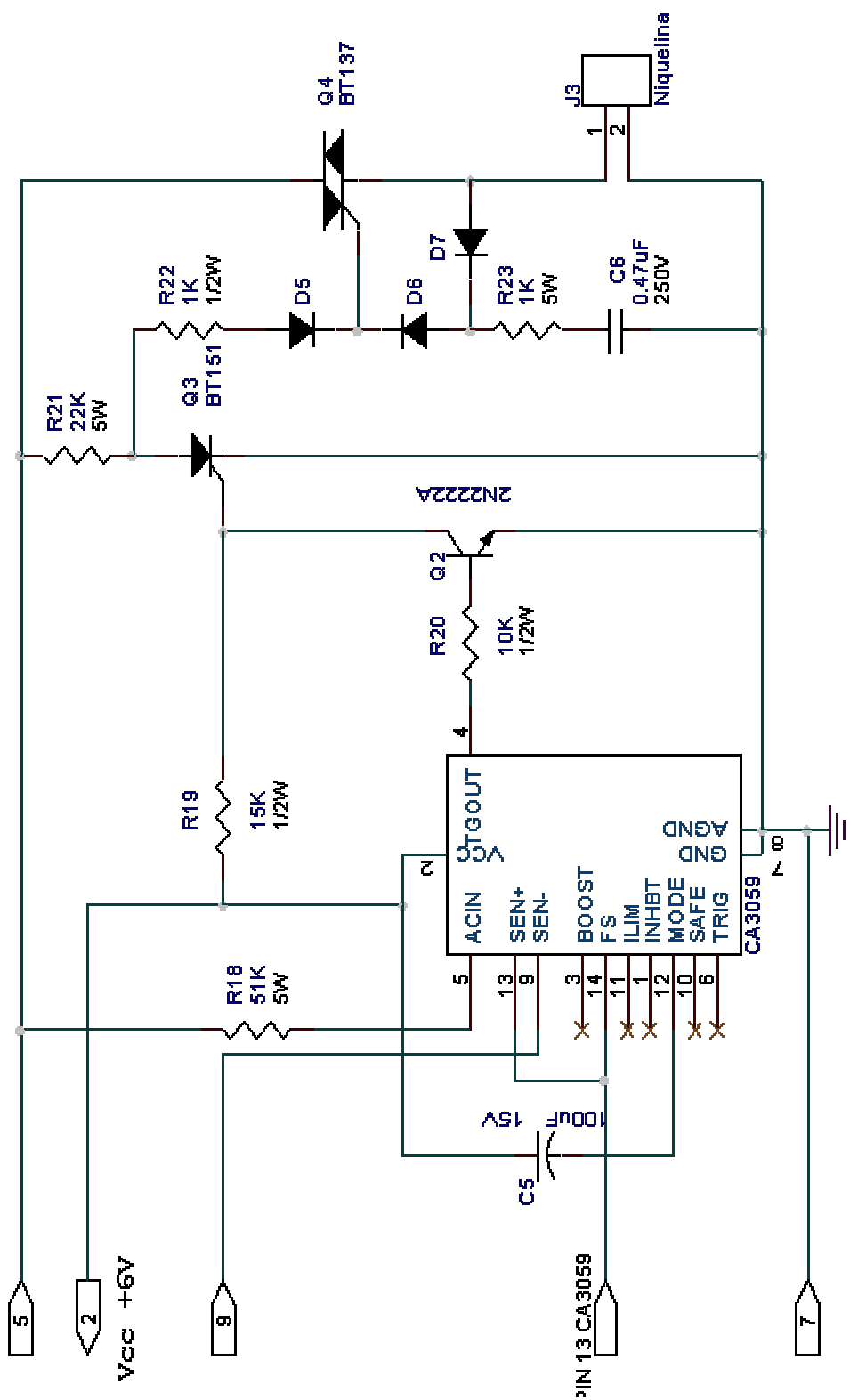
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Jack voltaje + bomba 1	(CPTS-1-JSB1)
Jack de tierra bomba 1	(CPTS-1-JSTB1)
Jack niquelina 1	(CPTS-1-JSN1)
Jack niquelina 2	(CPTS-1-JSN2)

Cara Lateral Derecha

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Jack voltaje + bomba 2	(CPTS-1-JSB2)
Jack de tierra bomba 2	(CPTS-1-JSTB2)
Interruptor temperatura	(CPTS-1-ST1)
Interruptor amplificación	(CPTS-1-SA1)

ANEXO 2

CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO CONTROLADOR - NIQUELINA



CONTROL POR PERIODOS ENTEROS

ANEXO 3

INSTALACIÓN DE HARDWARE DE LA TARJETA PMD-1208LS

Instalación del Hardware

Para conectar la PMD-1208LS al sistema, se debe hacer lo siguiente:

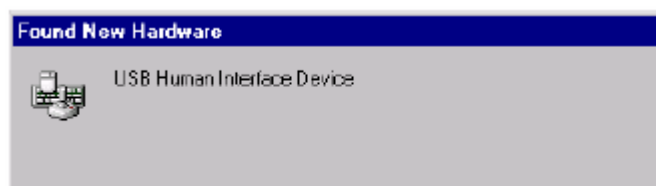
Con la computadora encendida, conectar el cable USB en el puerto USB de la computadora o a un hub USB externo que esté conectado a la computadora. El cable USB provee energía y comunicación a la PMD-1208LS.

Cuando se conecta el dispositivo por primera vez, la ventana de dialogo **“Se ha encontrado nuevo hardware”** aparece. Cuando el sistema operativo es Windows XP, esta ventana es reemplazada por una notificación en la esquina derecha inferior de la pantalla.



Primera ventana de dialogo de instalación.

Una segunda pantalla **“Se ha encontrado nuevo hardware”** aparece después de que la primera desaparece. Cuando el sistema operativo es Windows XP, el diálogo es reemplazado por una notificación en la esquina derecha inferior de la pantalla.



Segunda ventana de dialogo de instalación.

Cuando la segunda ventana se cierra, la instalación se ha completado. El led de la PMD-1208LS debe parpadear tres veces y después permanecer encendido. Esto indica que la comunicación está establecida entre la PMD-1208LS y la PC.

ANEXO 4

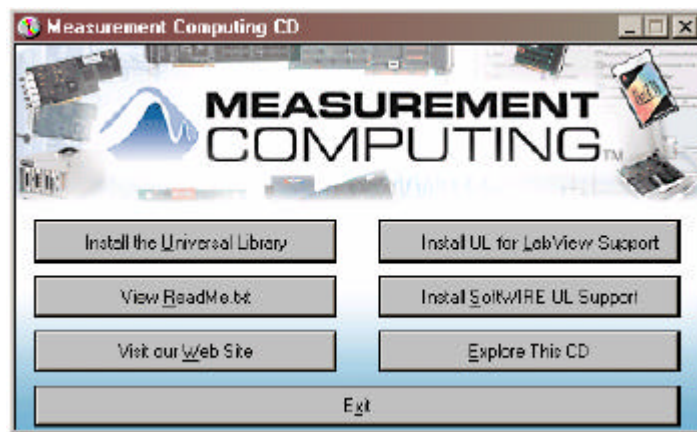
INSTALACIÓN DE SOFTWARE DE LA TARJETA PMD-1208LS

Instalación del Software

El CD de instalación contiene la *Librería Universal*, el software de configuración y calibración *InstaCal*, la librería universal para LabVIEW, y los controles Software MCC DAQ para Visual Basic 6.

Para instalar la Librería Universal y el software InstaCal, se debe hacer lo siguiente:

1. Insertar el CD de instalación en el PC. La siguiente ventana se muestra.



Ventana de instalación del software de la PMD-1208LS.

2. Hacer clic el botón "*Install the Universal Library*" y seguir las instrucciones.
3. Cuando la instalación se ha completado, es necesario resetear la computadora.

El CD de instalación contiene los siguientes programas opcionales que se puede instalar para el uso del dispositivo PMD-1208LS. La Librería Universal debe ser instalada para ejecutar estos paquetes de software opcionales.

- Universal Library para LabVIEW – Para usar la PMD-1208LS con LabVIEW, se debe hacer clic en el botón "*Install the UL for LabVIEW*"

Support” y seguir las instrucciones señaladas. LabVIEW debe estar instalado antes de que se pueda instalar la Librería Universal para LabVIEW.

- SoftWIRE MCC DAQ para Visual Basic 6 – Para usar la PMD-1208LS con los controles SoftWIRE 31, hacer clic en el botón “*Install SoftWIRE UL Support*”.

ANEXO 5

CONFIGURACIÓN DE LA TARJETA PMD-1208LS

Configuración de la tarjeta

Todas las opciones de configuración de la PMD-1208LS son controladas a través de software. Se puede configurar algunos de las opciones usando *InstaCal*, tales como las entradas analógicas (ocho individuales o cuatro diferenciales) y el número de serie del dispositivo conectado. Para configurar estas opciones con *InstaCal*, se debe realizar el siguiente procedimiento:

1. Ejecutar el programa *InstaCal*.
Una ventana de diálogo **“Plug and Play Board Detection”** aparece, mostrando la PMD-1208LS. Esta ventana solo aparece cuando se instala por primera vez el dispositivo, o se reinstala el mismo.
2. Dejar marcado el visto en el casillero junto a la PMD-1208LS, y oprimir OK.
La ventana se cierra, e inmediatamente la PMD-1208LS es añadida a la lista de tarjetas instaladas en la PC, en la ventana principal del programa *InstaCal*.
3. Oprimir dos veces sobre la PMD-1208LS y la ventana **“Board Configuration”** aparece.
4. Abrir la pestaña llamada **“No. de Channels”** y seleccionar ya sea *4 Differential* para 4 entradas diferenciales o *8 Single Ended* para 8 entradas individuales, como configuración de las entradas analógicas.
5. Oprimir OK y salir del programa *InstaCal*.

ANEXO 6

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA TARJETA PMD-1208LS

ESPECIFICACIONES

Típicamente para 25° C a menos que se especifique de otra manera.

Sección Entrada Análoga

Parámetro	Condiciones	Especificación
Tipo de Convertidor A/D		Tipo Aproximación Sucesiva
Rango de Voltaje de entrada para operación lineal, modo Entrada Simple.	CHx a GND	±10 V máx.
Rango de voltaje de entrada en modo común para operación lineal, Modo Diferencial	CHx a GND	-10 V min., +20 V máx.
Voltaje de entrada máximo absoluto	CHx a GND	±40 V máx.
Corriente de Entrada (Nota 1)	Vin = +10 V	70 µA típicamente
	Vin = 0 V	-10 µA típicamente
	Vin = -10 V	-94 µA típicamente
Número de Canales		8 Simples / 4 Diferenciales, seleccionables por software
Rangos de Entrada, Modo Simple		±10 V, G=2
Rangos de Entrada, Modo Diferencial		±20 V, G=1
		±10 V, G=2
		±5 V, G=4
		±4 V, G=5
		±2.5 V, G=8
		±2.0 V, G=10
		±1.25 V, G=16
		±1.0 V, G=20
		Seleccionables por Software
Throughput	Establecido por software	50 S/s
	Escaneo Continuo	1.2 kS/s
	Escaneo Forzado a muestreo de 4K FIFO	8 kS/s
Cola de Canal de Ganancia	Hasta 8 elementos	Canal, rango y ganancia configurables por software

Resolución (Nota 2)	Diferencial	12 bits, sin códigos perdidos
	Modo simple	11 bits
Precisión CAL	CAL = 2.5 V	Típico $\pm 0.05\%$, $\pm 0.25\%$ máx.
Error de Linealidad Integral		Típico ± 1 LSB
Error de Linealidad Diferencial		Típico ± 0.5 LSB
Repetibilidad		Tipo ± 1 LSB
Corriente CAL	Fuente	5 mA máx.
	Drenaje	20 μ A mín., 200 nA típico
Fuente de Disparo (trigger)	Seleccionable por software	Externo digital: TRIG IN

Nota 1. La corriente de entrada es una función de un voltaje aplicado en los canales análogos de entrada. Para un voltaje de entrada dado, V_{in} , el voltaje de fuga es aproximadamente igual a $(8.181 \cdot V_{in} - 12) \mu$ A.

Nota 2. El convertidor AD7870 solamente retorna 11 bits (0 – 2047 códigos) en modo simple.

PRECISIÓN, MODO DIFERENCIAL

Rango	Precisión
± 20 V	5.1
± 10 V	6.1
± 5 V	8.1
± 4 V	9.1
± 2.5 V	12.1
± 2 V	14.1
± 1.25 V	20.1
± 1 V	24.1

PRECISIÓN, MODO SIMPLE

Rango	Precisión (LSB)
± 10 V	4.0

COMPONENTES DE PRECISIÓN, MODO DIFERENCIAL – TODOS LOS VALORES SON (\pm)

Rango	% de Lectura	Ganancia de error a FS (mV)	Offset (mV)	Precisión en FS (mV)
± 20 V	0.2	40	9.766	49.766
± 10 V	0.2	20	9.766	29.766
± 5 V	0.2	10	9.766	19.766
± 4 V	0.2	8	9.766	17.766
± 2.5 V	0.2	5	9.766	14.766
± 2 V	0.2	4	9.766	13.766

±1.25 V	0.2	2.5	9.766	12.766
±1 V	0.2	2	9.766	11.766

COMPONENTES DE PRECISIÓN, MODO SIMPLE – TODOS LOS VALORES SON (±)

Rango	% de Lectura	Ganancia de FS (mV)	Error a FS (mV)	Offset (mV)	Precisión en FS (mV)
±10	0.2	20		19.531	39.531

SECCIÓN SALIDA ANÁLOGA

Parámetro	Condiciones	Especificación
Tipo de convertidor D/A		PWM
Resolución		10 bits, 1 en 1024
Rango máximo de salida		0-5 V
Número de Canales		2 salidas de voltaje
Throughput	Paso por software	100 S/s en modo canal simple 50 S/s modo canal dual
Voltaje de encendido y reset		Inicializa a código 000h
Voltaje máximo (Nota 3)	Sin carga	Vs
	Carga de 1 mA	0.99*Vs
	Carga de 5 mA	0.98*Vs
Controlador de salida	Cada salida D/A	30 mA
Taza de Slew		0.14 V/mS típico

Nota 3: Vs es la energía del bus USB +5 V. El voltaje de salida análogo máximo es igual a Vs sin carga. V es dependiente del sistema y puede ser menos de 5 V.

ENTRADA/SALIDA DIGITAL

Tipo Digital	82C55
Numero de I/O	16 (Port A0 hasta A7, Port B0 hasta B7))
Configuración	2 bancos de 8
Configuración Pull up/Pull down	Todos los pines en alto a Vs vía resistencias de 47 K (por defecto). Posiciones disponibles para poner en pull down a tierra. Seleccionable por hardware vía resistencias de cero ohms como opción de fábrica.
Voltaje alto de entrada	2.0 V min., 5.5 V máx. absoluto
Voltaje bajo de entrada	0.8 V máx., -0.5 V min. absoluto
Voltaje alto de salida (IOH=-2.5 mA)	3.0 V min.
Voltaje bajo de salida (IOL=2.5 mA)	0.4 V máx.

DISPARO EXTERNO (TRIGGER)

Parámetro	Condiciones	Especificación
Fuente de Disparo (Trigger) (Nota 4)	Digital externa	TRIG_IN
Modo Disparo (Trigger)	Seleccionable por software	Susceptible a nivel: configurable por el usuario para entradas altas o bajas de nivel TTL.
Latencia de disparo	Entrecortado	25 μ s min., 50 μ s máx.
Ancho de pulso de disparo	Entrecortado	40 μ s min.
Voltaje alto de entrada		3.0 V min., 15.0 V máx. absoluto
Voltaje bajo de entrada		0.8 V máx.
Corriente de ruptura de entrada		\pm 1.0 μ A

Nota 4: TRIG_IN está protegido con una resistencia en serie de 1.5 Kohm.

SECCIÓN CONTADOR

Tipo de Contador	Contador de eventos
Número de canales	1
Fuente de entrada	Pin CTR
Resolución	32 bits
Histéresis de disparo Schmidt	20 mV a 100 mV
Corriente de ruptura de entrada	\pm 1 μ A
Frecuencia máxima de entrada	1 MHz
Ancho de pulso alto	500 ns min.
Ancho de pulso bajo	500 ns min.
Voltaje bajo de entrada	0 V min., 1.0 V máx.
Voltaje alto de entrada	4.0 V min., 15.0 V máx.

MEMORIA NO VOLÁTIL

Tamaño de memoria	8192 bytes		
Configuración de Memoria	Rango de dirección	Acceso	Descripción
	0x0000 – 0x17FF	Lectura/Escritura	Datos A/D (muestreo 4K)
	0x1800 – 0x1EFF	Lectura/Escritura	Área de datos del usuario
	0x1F00 – 0x1FEF	Lectura/Escritura	Datos de calibración
	0x1FF0 – 0x1FFF	Lectura/Escritura	Datos del sistema

ENERGÍA

Parámetro	Condiciones	Especificación
Suministro de Corriente (Nota 5)		20 mA
Energía disponible de +5 V USB	Conectado a un hub auto-energizado	4.5 V min., 5.25 V máx.
	Conectado a un hub auto-energizado	4.1 V min., 5.25 V máx.
Corriente de salida (Nota 7)	Conectado a un hub auto-energizado	450 mA min., 500 mA máx.
	Conectado a un hub auto-energizado	50 mA min., 100 mA máx.

Nota 5: Este es el requisito total de corriente para la PMD-1208LS el cual incluye hasta 5 mA para el led de estado.

Nota 6: Auto-energizados se refiere a hubs USB y PC con un suministro de energía propio. Energizados por bus se refiere a hubs USB y PC sin su propio suministro de energía.

Nota 7: Esto se refiere a la cantidad total de corriente que puede ser entregada desde +5 V del USB, salidas análogas y digitales.

GENERAL

Parámetro	Condiciones	Especificación
Error de reloj de controlador USB	25° C	±30 ppm máx.
	0 a 70° C	±50 ppm máx.
	-40 a 85° C	±100 ppm máx.
Tipo de dispositivo		USB 1.1 baja velocidad
Compatibilidad de dispositivo		USB 1.1, USB 2.0

AMBIENTE

Rango de Temperatura de Funcionamiento	-40 a 85° C
Rango de Temperatura de Almacenamiento	-40 a 85° C
Humedad	0 a 90% sin condensación

MECÁNICO

Dimensiones	79 mm. (Largo) x 82 mm. (Ancho) x 25 mm. (Alto)
Longitud del cable USB	3 Metros máx.
Longitud de conexión al usuario	3 Metros máx.

CONECTOR PRINCIPAL Y PINES DE SALIDA

Tipo Conector	Terminales tipo tornillo
Rango del Cable	16 AWG a 30 AWG

MODO DIFERENCIAL, 4 CANALES

Pin	Nombre de la Señal	Pin	Nombre de la señal
1	CH0 IN HI	21	Port A0
2	CH0 IN LO	22	Port A1
3	GND	23	Port A2
4	CH1 IN HI	24	Port A3
5	CH1 IN LO	25	Port A4
6	GND	26	Port A5
7	CH2 IN HI	27	Port A6
8	CH2 IN LO	28	Port A7
9	GND	29	GND
10	CH3 IN HI	30	PC +5 V
11	CH3 IN LO	31	GND
12	GND	32	Port B0
13	D/A OUT 0	33	Port B1
14	D/A OUT 1	34	Port B2
15	GND	35	Port B3
16	CAL	36	Port B4
17	GND	37	Port B5
18	TRIG_IN	38	Port B6
19	GND	39	Port B7
20	CTR	40	GND

MODO DIFERENCIAL, 8 CANALES

Pin	Nombre de la Señal	Pin	Nombre de la señal
1	CH0 IN	21	Port A0
2	CH1 IN	22	Port A1
3	GND	23	Port A2
4	CH2 IN	24	Port A3
5	CH3 IN	25	Port A4
6	GND	26	Port A5
7	CH4 IN	27	Port A6
8	CH5 IN	28	Port A7
9	GND	29	GND
10	CH6 IN	30	PC +5 V
11	CH7 IN	31	GND
12	GND	32	Port B0
13	D/A OUT 0	33	Port B1
14	D/A OUT 1	34	Port B2
15	GND	35	Port B3
16	CAL	36	Port B4
17	GND	37	Port B5
18	TRIG_IN	38	Port B6
19	GND	39	Port B7
20	CTR	40	GND

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema de entrenamiento CPTS-1	3
Figura 1.2	Panel Frontal del Sistema de entrenamiento CPTS-1.....	4
Figura 1.3	Tanque izquierdo del Sistema de entrenamiento CPTS-1.....	5
Figura 1.4	Tanque derecho del Sistema de entrenamiento CPTS-1.....	6
Figura 1.5	Tubería de retorno del Sistema de entrenamiento CPTS-1...	6
Figura 1.6	Paneles del Sistema de entrenamiento CPTS-1	7
Figura 1.7	Bomba Eléctrica.....	8
Figura 1.8	Acondicionamiento Controlador – Bomba.....	9
Figura 1.9	Niquelinas en el tanque izquierdo del CPTS-1.....	10
Figura 1.10	Formas de onda de voltaje en la carga.....	11
Figura 1.11	Control por períodos enteros.....	12
Figura 1.12	Acondicionamiento de salida del controlador para el CA3059.....	13
Figura 1.13	Generador de rampa para el control por períodos enteros.....	14
Figura 1.14	Sensor transmisor de caudal.....	14
Figura 1.15	Voltios _{dc} vs cm ³ /seg.....	16
Figura 1.16	Sensor ultrasónico Bero.....	17
Figura 1.17	Voltaje vs altura de columna de líquido.....	19
Figura 1.18	Voltaje vs altura de columna de líquido con recta de tendencia.....	19
Figura 1.19	Configuración de sensor de temperatura LM335.....	20
Figura 1.20	Circuito sensor de temperatura.....	21
Figura 1.21	Voltaje vs temperatura del sensor 1.....	22
Figura 1.22	Voltaje vs temperatura del sensor 2.....	23
Figura 1.23	Voltaje vs temperatura del sensor 3.....	23
Figura 1.24	Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 1.	23
Figura 1.25	Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 2	24
Figura 1.26	Voltaje vs temperatura con recta de tendencia del sensor 3.	24
Figura 1.27	Interruptor de encendido de fuente variable 0 - 10 V _{DC}	25
Figura 1.28	Interruptores de Sensores de Temperatura y Tarjeta de Acondicionamiento de las Bombas.....	25
Figura 1.29	Interruptor de niquelinas.....	26
Figura 1.30	Conexiones de flujo.....	27
Figura 1.31	Conexiones de nivel.....	27
Figura 1.32	Conexiones de temperatura.....	28
Figura 1.33	Conexiones para manejo de bombas.....	29
Figura 1.34	Conexiones para niquelinas.....	30
Figura 2.1	Tarjeta USB PMD-1208LS.....	32
Figura 2.2	Hardware de la PMD-1208LS.....	33
Figura 2.3	Disco de software de la PMD-1208LS.....	33
Figura 2.4	Numeración de pines en la PMD-1208LS.....	36
Figura 2.5	Diagrama de pines.....	37
Figura 2.6	Conexión de tipo individual.....	38
Figura 2.7	Ejemplo de voltaje diferencial.....	40
Figura 2.8	La conexión digital Port A0 detecta el estado del switch.....	41
Figura 2.9	Esquemático switch conectado al Port A0.....	41
Figura 2.10	Función de transferencia ideal del ADC.....	44

Figura 2.11	Función de transferencia del ADC con error de offset.....	44
Figura 2.12	Función de transferencia del ADC con error de ganancia.....	45
Figura 2.13	Gráfico de la banda de error.....	45
Figura 2.14	Función AInScFg y sus argumentos.....	48
Figura 2.15	Función AOutScFg y sus argumentos.....	49
Figura 2.16	Función ToEng y sus argumentos.....	50
Figura 2.17	Función OptAin y sus argumentos.....	51
Figura 2.18	Función ErrMsg y sus argumentos.....	51
Figura 2.19	Circuito de acondicionamiento de voltaje de bomba.....	53
Figura 2.20	Circuito anterior de acondicionamiento para el CA3059.....	54
Figura 2.21	Cambios propuestos para el circuito de acondicionamiento para el CA3059.....	55
Figura 3.1	Diagrama P&ID del control PID.....	58
Figura 3.2	Conexiones del módulo para el Control PID	63
Figura 3.3	Diagrama P&ID del Control en Cascada.....	65
Figura 3.4	Diagrama de bloques del control en cascada.....	67
Figura 3.5	Conexiones del módulo para control en cascada.....	69
Figura 3.6	Diagrama P&ID de Control con un único lazo.....	70
Figura 3.7	Diagrama P&ID del Control Anticipativo.....	71
Figura 3.8	Diagrama de bloques de la práctica 3.....	73
Figura 3.9	Conexiones del módulo para control Anticipativo	74
Figura 3.10	Diagrama P&ID del Control por Superposición.....	76
Figura 3.11	Circuito de control de flujo.....	78
Figura 3.12	Circuito de Control por Sobreposición.....	78
Figura 3.13	Conexiones del módulo para Control por Sobreposición.....	80
Figura 3.14	Diagrama P&ID del Control Selectivo.....	82
Figura 3.15	Control Selectivo.....	84
Figura 3.16	Conexiones del módulo para el Control Selectivo.....	85
Figura 4.1	Metodologías de diseño.....	90
Figura 4.2	Diagrama P&ID del Control de Nivel Difuso.....	92
Figura 4.3	Esquema de un Controlador Difuso Directo.....	94
Figura 4.4	Diagrama de Bloques de los componentes de un controlador Difuso.....	95
Figura 4.5	Ejemplo de funciones de membresía: (a) función S, (b) función acampanada, (c) función Z, (d-f) versiones triangulares, (g-i) versiones trapezoidales, (j) función acampanada versión plana, (k) rectangular, (l) números singulares.....	96
Figura 4.6	Construcción Grafica del control de señales en un controlador difuso.....	97
Figura 4.7	Una entrada, una salida basada en reglas sin salida única... ..	98
Figura 4.8	Conexiones del módulo para el Control de Nivel Difuso.....	99
Figura 4.9	Diagrama P&ID del Control Anticipativo Difuso.....	101
Figura 4.10	Conexiones del módulo para el Control Anticipativo Difuso... ..	105
Figura 5.1	Esquema para el Control PID.....	108
Figura 5.2	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	109
Figura 5.3	Conexión del sensor de nivel.....	109
Figura 5.4	Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor.....	110

Figura 5.5	Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC	110
Figura 5.6	Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0 – 10 V _{DC}	111
Figura 5.7	Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo.....	111
Figura 5.8	Diagrama de bloques para el canal de entrada CH0 IN de la PMD-1208LS.....	112
Figura 5.9	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	112
Figura 5.10	Conversión de unidades del sensor del nivel.....	113
Figura 5.11	Transformación de unidades crudas a de ingeniería de la señal de nivel en el diagrama de bloques del programa.....	114
Figura 5.12	Parámetros del instrumento virtual PID directo.....	115
Figura 5.13	Interfase del Control PID.....	115
Figura 5.14	Diagrama de bloques Control PID	116
Figura 5.15	Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador P = 100.....	117
Figura 5.16	Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador P con K _p = 200.....	117
Figura 5.17	Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PI con K _p = 200 y K _i =300.....	117
Figura 5.18	Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PI con K _p = 200 y K _i =3000.....	118
Figura 5.19	Resultados del escalón de 15 a 10 cm con controlador PID de constantes K _p = 200, K _i =3000 y K _d =1.....	118
Figura 5.20	Resultados del escalón de 20 a 10 cm con controlador PID y perturbación de la bomba de retorno.....	119
Figura 5.21	Esquema para el Control en Cascada	122
Figura 5.22	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	122
Figura 5.23	Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas.....	123
Figura 5.24	Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo.	123
Figura 5.25	Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho..	124
Figura 5.26	Conexiones de la fuente de 0-10 V _{DC} para manejar las dos bombas.....	124
Figura 5.27	Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo.....	124
Figura 5.28	Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS	125
Figura 5.29	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	126
Figura 5.30	Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados.....	127
Figura 5.31	Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada.....	127
Figura 5.32	Parámetros del instrumento virtual Simple PID.....	129
Figura 5.33	Interfase del Control en Cascada	130
Figura 5.34	Diagrama de bloques del Control en Cascada.....	130
Figura 5.35	Tiempo de subida (Tr), Tiempo de establecimiento (Ts), y	

	máximo sobreimpulso del controlador primario.....	131
Figura 5.36	Tiempo de subida (T_r), Tiempo de establecimiento (T_s), y máximo sobreimpulso con un solo controlador.....	132
Figura 5.37	Esquema para el control Anticipativo.....	135
Figura 5.38	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	136
Figura 5.39	Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo.....	136
Figura 5.40	Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho..	136
Figura 5.41	Conexiones necesarias para controlar las 2 bombas de agua desde la PC.....	137
Figura 5.42	Conexión de la fuente de 0 -10 V_{DC} a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas.....	137
Figura 5.43	Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo.....	138
Figura 5.44	Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS.....	139
Figura 5.45	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	139
Figura 5.46	Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados.....	140
Figura 5.47	Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada.....	140
Figura 5.48	Parámetros del instrumento virtual simple PID.....	141
Figura 5.49	Parámetros del instrumento virtual In Range and Coerce.....	142
Figura 5.50	Interfase Control Anticipativo.....	143
Figura 5.51	Diagrama de bloques Control Anticipativo.....	143
Figura 5.52	Tiempo de subida (T_r), de establecimiento (T_s) y máximo sobreimpulso (M_s) ante un escalón de 20 a 30 °C del control anticipativo.....	144
Figura 5.53	Efecto del algoritmo anticipativo sobre la MV.....	144
Figura 5.54	Tiempo de subida (T_r), de establecimiento (T_s) y máximo sobreimpulso (M_s) ante un escalón de 20 a 30 °C del control anticipativo.....	146
Figura 5.55	Tiempo de subida y de establecimiento con control realimentado y con control realimentado más control anticipativo.....	147
Figura 5.56	Máximo sobreimpulso porcentual con control realimentado y con control realimentado más control anticipativo.....	147
Figura 5.57	Esquema para el Control por Sobreposición.....	149
Figura 5.58	Conexión de manguera A2, A3, T1 y tubería de retorno.....	150
Figura 5.59	Conexión del sensor de nivel y de flujo.....	150
Figura 5.60	Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor.....	150
Figura 5.61	Conexión del sensor de flujo a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor.....	151
Figura 5.62	Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC.....	151
Figura 5.63	Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0– 10 V_{DC}	152
Figura 5.64	Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo.....	152

Figura 5.65	Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS.....	153
Figura 5.66	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	153
Figura 5.67	Conversión de unidades del sensor del nivel.....	154
Figura 5.68	Transformación de unidades crudas a de ingeniería de la señal de nivel.....	155
Figura 5.69	Conversión de unidades del sensor de flujo.....	155
Figura 5.70	Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de la señal de flujo en el diagrama de bloques del programa	156
Figura 5.71	Parámetros del instrumento virtual simple PID.....	157
Figura 5.72	Parámetros del instrumento virtual PID directo.....	157
Figura 5.73	Interfase del Control por Sobreposición.....	158
Figura 5.74	Diagrama de bloques Control por Sobreposición.....	159
Figura 5.75	Resultado de la variación de set point de flujo de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm ³ /s, sin alcanzar el nivel de seguridad	160
Figura 5.76	Comportamiento del flujo cuando el set point de nivel está cerca o es sobrepasado.....	160
Figura 5.77	Comportamiento de la MV de nivel cuando el set point de nivel está cerca o es sobrepasado	161
Figura 5.78	Conmutación de las MVs de nivel y flujo para detener el bombeo de agua con una constante Kp = 82.....	161
Figura 5.79	Conmutación de las MVs de nivel y flujo para detener el bombeo de agua con una constante Kp = 100.....	162
Figura 5.80	Descripción de la respuesta del sistema a un escalón dado en base a tres valores: Kc (ganancia de la planta), Tr (tiempo de subida) y Tu (tiempo de retardo).....	162
Figura 5.81	Valores obtenidos para la sintonización del sistema.....	163
Figura 5.82	Resultado de la variación de set point de flujo de 20 a 60 a 100 a 60 a 20 y a 60 cm ³ /s, con sintonización de Ziegler-Nichols	164
Figura 5.83	Esquema para el Control Selectivo.....	165
Figura 5.84	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	166
Figura 5.85	Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas.....	166
Figura 5.86	Conexiones del sensor de temperatura superior del tanque izquierdo.....	167
Figura 5.87	Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho..	167
Figura 5.88	Conexiones de la fuente de 0-10 V _{DC} para manejar las dos bombas	168
Figura 5.89	Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo derecho.....	168
Figura 5.90	Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS.....	169
Figura 5.91	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	169
Figura 5.92	Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados.....	170

Figura 5.93	Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de los dos canales de entrada.....	171
Figura 5.94	Diagrama de bloques del selector de alto de las dos señales de temperatura del tanque izquierdo.....	171
Figura 5.95	Parámetros del instrumento virtual Simple PID.....	172
Figura 5.96	Interfase del Control Selectivo.....	173
Figura 5.97	Diagrama de bloques del Control Selectivo.....	173
Figura 5.98	Comportamiento de las dos temperaturas durante el proceso con respecto al set point	174
Figura 5.99	Comportamiento de la variable manipulada con respecto a las dos temperaturas	175
Figura 5.100	Esquema para el Control de Nivel Difuso.....	177
Figura 5.101	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	178
Figura 5.102	Conexión del sensor de nivel.....	178
Figura 5.103	Conexión del sensor de nivel a la tarjeta PMD-1208LS y alimentación externa del sensor.....	179
Figura 5.104	Conexiones necesarias para controlar la bomba de desfogue desde la PC.....	179
Figura 5.105	Conexiones necesarias para controlar la bomba de abastecimiento desde la fuente de 0– 10 V _{DC}	179
Figura 5.106	Conexiones de las bombas a los paneles laterales del módulo.....	180
Figura 5.107	Diagrama de bloques para el canal de entrada CH0 IN de la PMD-1208LS.....	181
Figura 5.108	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	181
Figura 5.109	Conversión de unidades del sensor del nivel.....	182
Figura 5.110	Transformación de unidades crudas a unidades de ingeniería de la señal de nivel en el diagrama de bloques del programa.....	182
Figura 5.111	Establecimiento de las variables de entrada y salida en el Fuzzy Logic Toolbox	183
Figura 5.112	Funciones de membresía de la entrada nivel.....	184
Figura 5.113	Funciones de membresía de la entrada error.....	184
Figura 5.114	Funciones de membresía de la salida bomba.....	185
Figura 5.115	Reglas ingresadas en el editor.....	186
Figura 5.116	Utilización de la VI Matlab Script para el Control de Nivel Difuso.....	187
Figura 5.117	Panel frontal Control de Nivel Difuso.....	187
Figura 5.118	Diagrama de bloques Control de Nivel Difuso.....	188
Figura 5.119	Tiempo de subida.....	188
Figura 5.120	Tiempo de establecimiento y Sobreimpulso máximo.....	189
Figura 5.121	Comparación de los tiempos de subida y de establecimiento del Control PID y control Difuso.....	190
Figura 5.122	Comparación de los máximos impulsos porcentuales del Control PID y control Difuso.....	190
Figura 5.123	Comparación del Control PID y el control Difuso ante una perturbación después de estar estable el sistema.....	190
Figura 5.124	Esquema para el Control Anticipativo Difuso.....	192
Figura 5.125	Conexión de manguera A1 y tubería de retorno.....	193

Figura 5.126	Conexión de la tarjeta PMD-1208LS a la tarjeta de acondicionamiento de las niquelinas.....	193
Figura 5.127	Conexiones del sensor de temperatura del tanque izquierdo.....	193
Figura 5.128	Conexiones del sensor de temperatura del tanque derecho..	194
Figura 5.129	Conexiones de la fuente de 0-10 V _{DC} para manejar las dos bombas.....	194
Figura 5.130	Conexiones de las bombas y niquelinas a los paneles laterales del módulo.....	194
Figura 5.131	Diagrama de bloques para los canales de entrada CH0 IN y CH1 IN de la PMD-1208LS.....	195
Figura 5.132	Diagrama de bloques del canal de salida D/A OUT 0 de la PMD-1208LS.....	196
Figura 5.133	Función de transferencia de temperatura en Voltios a grados centígrados.....	197
Figura 5.134	Transformación de unidades crudas a de ingeniería de los dos canales de entrada.....	197
Figura 5.135	Funciones de membresía de la entrada error del Control Anticipativo Difuso.....	198
Figura 5.136	Funciones de membresía de la entrada perturbación del Control Anticipativo Difuso.....	199
Figura 5.137	Funciones de membresía de salida del Control Anticipativo Difuso.....	199
Figura 5.138	Reglas ingresadas en el editor del Control Anticipativo Difuso.....	200
Figura 5.139	Utilización de la VI Matlab Script para el Control Anticipativo Difuso.....	201
Figura 5.140	Panel frontal Control Anticipativo Difuso.....	202
Figura 5.141	Diagrama de bloques Control Anticipativo Difuso.....	202
Figura 5.142	Tiempo de subida (10 – 90%).....	203
Figura 5.143	Efecto del control anticipativo sobre la PV del tanque derecho.....	203
Figura 5.144	Sobreimpulso máximo y tiempo de establecimiento.....	204
Figura 5.145	Comparación de los tiempos de subida y de establecimiento del Control en Cascada, control Anticipativo Difuso y control Anticipativo, ante el mismo escalón.....	204
Figura 5.146	Comparación de los máximos impulsos porcentuales del Control Anticipativo difuso, control en cascada y control anticipativo, ante el mismo escalón.....	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Características técnicas de los tanques.....	7
Tabla 1.2	Voltios _{dc} vs cm ³ /seg.....	16
Tabla 1.3	Voltaje vs. altura de columna de agua.....	18
Tabla 1.4	Voltaje vs. Temperatura de los tres sensores.....	22
Tabla 2.1	Estados del LED de la tarjeta PM-1208LS.....	35
Tabla 2.2	Ejemplos de entradas y resultados de la tarjeta PMD-1208LS	40
Tabla 5.1	Controles de interfase del Control de Nivel PID.....	114
Tabla 5.2	Resumen de índices de desempeño del escalón de 15 a 10 cm en varias configuraciones	119
Tabla 5.3	Controles del TIC1 del Control en Cascada.....	128
Tabla 5.4	Controles del TIC2 del Control en Cascada.....	128
Tabla 5.5	Índices de desempeño del control en cascada con un escalón de 20 a 30 °C	132
Tabla 5.6	Índices de desempeño del sistema con un solo controlador	132
Tabla 5.7	Controles de sintonización del Control Anticipativo	141
Tabla 5.8	Índices de desempeño del control Anticipativo	145
Tabla 5.9	Índices de desempeño del sistema sin control anticipativo	146
Tabla 5.10	Controles del FIC del Control por Sobreposición	156
Tabla 5.11	Controles del LIC del Control por Sobreposición	156
Tabla 5.12	Ecuaciones de cálculo de las constantes PID.....	163
Tabla 5.13	Controles del TIC1 del Control Selectivo	172
Tabla 5.14	Índices de desempeño del control selectivo ante un escalón de 20 a 30°C.....	175
Tabla 5.15	Controles de interfase del Control de Nivel Difuso.....	183
Tabla 5.16	Funciones de membresía de cada entrada y salida del Control de Nivel Difuso	183
Tabla 5.17	Base de reglas del Control de Nivel Difuso.....	185
Tabla 5.18	Valores de índices de desempeño del control difuso de nivel..	189
Tabla 5.19	Funciones de membresía de cada entrada y salida del Control Anticipativo Difuso	198
Tabla 5.20	Base de reglas del Control Anticipativo Difuso	199
Tabla 5.21	Índices de desempeño del control anticipativo difuso.....	204

Sangolquí, Septiembre del 2005

ELABORADO POR:

Sr. Andrés Leonardo Cuadrado Vaca

AUTORIDADES:

Sr. Ing. Xavier Martínez
Tcrn. Estado Mayor
Decano de la Facultad de Ingeniería Electrónica

Sr. Ab. Jorge Carvajal
Secretario Académico de la Facultad de Ingeniería Electrónica