



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación.**

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y CONTROL  
ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON LAS VARIABLES  
NIVEL Y CAUDAL EVALUADOS SOBRE UN MÓDULO DIDÁCTICO”

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previa a la obtención del Título de:

**MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL**

Presentado por:

ING. BYRON RAMIRO ROMERO ROMERO

ING. NINO TELLO VEGA URETA

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2016

## **AGRADECIMIENTO**

NINO VEGA

Agradezco a Dios y a la Virgen María por haberme permitido lograr esta nueva meta, a mi esposa Jenny que me han dado su apoyo incondicional y fuerza en cada paso que he dado.

También a la Universidad Politécnica Salesiana-Sede Guayaquil por permitir el uso de sus laboratorios.

BYRON ROMERO

Agradezco a DIOS y a la Virgen Santísima por permitirme cumplir un objetivo más en mi vida; a mis padres Ramiro y Gualberto por su apoyo moral y económico, a mis tíos Vicente y Marcia por sus enseñanzas de vida profesional y por haberme incentivado a continuar mis estudios, así como también a mi hermano Luis por su apoyo incondicional en los momentos difíciles de mi vida.

## DEDICATORIA

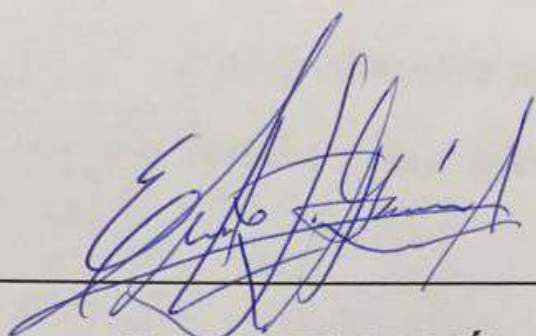
NINO VEGA

Dedico este trabajo a mi madre Amanda por brindarme su ayuda y consejo en el transcurso de mi vida personal y profesión. A mis hijos: Isaac, Kristel y Alexis por su comprensión y apoyo en esta etapa transcurrida.

BYRON ROMERO

Dedico este trabajo a mi madre Leonor Romero por haberme dado la vida, su apoyo, sus enseñanzas, su cariño y por ser siempre la persona que más me ha respaldado para que sea un buen ser humano, también les dedico a mis hijos Scarlette y Santiago así como a mi esposa Adriana por haberme dado su apoyo, comprensión y sacrificio en esta etapa transcurrida.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



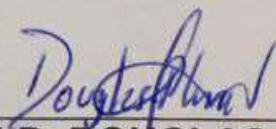
**PhD. SIXTO GARCÍA.**

**PRESIDENTE**



**PhD. WILTON AGILA.**

**DIRECTOR**

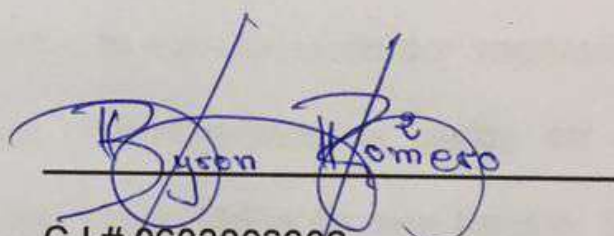


**PhD. DOUGLAS PLAZA**

**MIEMBRO PRINCIPAL**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este trabajo de titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



Byron Romero

C.I # 0603003302

ING. BYRON ROMERO ROMERO



Nino Tello Vega Ureta

C.I # 0801602160

ING. NINO TELLO VEGA URETA

## RESUMEN

En esta memoria se presenta el diseño e implementación de algoritmos de control PID y controlador adaptativo de ganancias programadas en lazo simple y doble lazo o cascada como elementos de regulación para las variables nivel y caudal en una planta didáctica. Se realiza el diseño e implementación de la planta didáctica tipo industrial, que incorpora las variables de nivel y caudal. A partir de ella, se obtiene el modelo lineal y no lineal mediante identificación de sus parámetros y por utilización de ecuaciones físicas. Los modelos obtenidos se han evaluado por separado, seleccionándose al mejor modelo, que posteriormente es usado en la calibración de los diferentes controladores desarrollados en este trabajo. Se diseña el controlador PID estándar y los controladores de ganancias programadas en lazo simple y lazo doble, los mismos que en una primera fase han sido evaluados mediante simulación haciendo uso del software Matlab. La implementación y ejecución real de los controladores en la planta piloto se desarrolló haciendo uso de un sistema embebido con arquitectura abierta, donde se carga todo el algoritmo desarrollado para los distintos controles. La evaluación del desempeño de estos controladores se realizó directamente en el módulo didáctico, variando los valores de referencias de nivel, caudal y tipo de controlador e introduciendo perturbaciones en cada caso, todo ello a través de la aplicación software (SCADA) desarrollada para la interacción entre el módulo didáctico y el usuario del sistema.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	I
DEDICATORIA .....	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XXXI
INTRODUCCIÓN.....	XXXIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. EL PROBLEMA.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3.3. METODOLOGÍA.....	4
1.3.3.1. EXPERIMENTAL.....	4
1.3.3.2. DEDUCTIVO.....	4

1.4. ESTADO DEL ARTE .....	5
1.4.1. CONTROL ADAPTATIVO EN LA INDUSTRIA .....	5
1.4.1.1. CICLOS COMBINADOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA .....	5
1.4.1.2. CONTROL ADAPTATIVO PARA LA TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO EN UNA PLANTA DE ENERGÍA A CARBÓN .....	6
1.4.1.3. CONTROL ADAPTATIVO DE LOS REACTORES DE ZANJAS DE OXIDACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. ....	7
1.4.1.4. CONTROL ADAPTATIVO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE AZUFRE EN PEMEX CADEREYTA REFINERÍA .....	7
CAPÍTULO 2 .....	9
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. CONTROL CLÁSICO .....	9
2.1.1. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO .....	11
2.1.2. SISTEMAS DE LAZO CERRADO .....	12
2.2. CONTROLADOR PID .....	13
2.2.1. EL CONTROLADOR PID EN TIEMPO CONTINUO .....	13
2.2.1.1. ESTRUCTURA Y ALGORITMO DE CONTROL PID .....	14
2.2.2. CONTROLADOR PID EN TIEMPO DISCRETO .....	17
2.2.3. SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID .....	19
2.3. CONTROL ADAPTATIVO .....	22
2.3.1. CONTROL ADAPTATIVO CON MODELO DE REFERENCIA .....	24



2.3.2. CONTROLADOR ADAPTATIVO POR GANANCIAS PROGRAMADAS	25
2.3.3. CONTROLADORES AUTOAJUSTABLES STR	27
2.4. CONTROL EN CASCADA	28
2.5. IDENTIFICACIÓN	28
2.5.1. MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS:	30
2.5.1.1. RESPUESTA A UNA ENTRADA ESPECIAL	30
2.5.1.2. MÉTODO BASADO EN LA CORRELACIÓN	31
2.5.2. MÉTODOS PARAMÉTRICOS:	32
2.5.2.1. MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS	32
2.5.2.1.1. PROPIEDADES DEL ESTIMADOR DE MÍNIMOS CUADRADOS.	33
CAPÍTULO 3	36
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA	36
3.1. SISTEMA HIDRÁULICO	37
3.1.1. SELECCIÓN Y MONTAJE DE COMPONENTES HIDRÁULICOS	39
3.1.1.1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA	39
3.1.1.2. TUBERÍAS Y ACCESORIOS	40
3.1.1.3. BOMBA	40
3.1.1.4. VÁLVULAS	42
3.1.1.5. MEDIDOR DE FLUJO	43
3.1.1.6. TANQUE DE CONTROL	45

3.1.2. PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD DEL SISTEMA HIDRÁULICO .....	46
3.2. HARDWARE DE CONTROL.....	47
3.2.1. SENSOR DE NIVEL.....	48
3.2.2. CONTROLADOR (TARJETA DE CONTROL) DE NIVEL .....	49
3.2.3. SELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD PARA LA BOMBA ..	50
3.2.4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 5 VOLTIOS.....	50
3.3. ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO .....	51
3.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 12-24 VOLTIOS .....	51
3.3.2. CIRCUITO DE FUERZA PWM.....	54
3.4. CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.....	56
3.4.1. CIRCUITO SENSOR DE NIVEL .....	57
3.4.1.1. CONFIGURACIÓN DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE NIVEL .....	58
3.4.1.2. PROGRAMA DE LECTURA DEL SENSOR DE NIVEL .....	60
3.4.2. CIRCUITO SENSOR DE CAUDAL .....	63
3.4.2.1. CONFIGURACIÓN DE LA SEÑAL DEL SENSOR DE CAUDAL. ....	64
3.4.2.2. PROGRAMA DE LECTURA DEL SENSOR DE CAUDAL .....	64
3.4.3. CIRCUITO VARIADOR DE VELOCIDAD DE LA BOMBA (PWM) .....	65
3.5. INTERFACE DE USUARIO .....	68
3.5.1. PANTALLA PRINCIPAL.....	68
3.5.2. PANTALLA DE CONTROL LAZO SIMPLE .....	69
3.5.3. PANTALLA DE CONTROL LAZO CASCADA.....	70
CAPÍTULO 4.....	72

4. MODELADO DE LA PLANTA .....	72
4.1. MODELADO ANALÍTICO DE LA PLANTA .....	72
4.1.1. MODELO LINEAL DE LA PLANTA.....	72
4.1.1.1. MODELADO DE ACTUADOR .....	73
4.1.1.1. MODELADO DEL SENSOR ULTRASÓNICO.....	76
4.1.1.1. MODELADO DEL SENSOR DE CAUDAL.....	76
4.1.1.2. MODELADO DEL TANQUE.....	76
4.1.2. MODELO NO LINEAL.....	80
4.1.3. SIMULACIÓN Y AJUSTE DE PARÁMETROS.....	83
4.1.3.1. SIMULACIÓN Y AJUSTE DE PARÁMETRO DEL MODELO LINEAL .....	83
4.1.3.2. SIMULACIÓN DE LA PLANTA NO LINEAL EN LAZO ABIERTO ....	87
4.2. MODELADO POR IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA UTILIZANDO EL SOFTWARE MAT-LAB.....	88
4.2.1. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS. ....	89
4.2.2. SELECCIÓN Y GENERACIÓN DE LA SEÑAL A UTILIZAR EN LA IDENTIFICACIÓN.....	91
4.2.2.1. IDENTIFICACIÓN PARA VARIOS PUNTOS DE OPERACIÓN.....	94
4.3. SELECCIÓN DEL MODELO OPTIMO.....	97
4.3.1. PRUEBA DE OPERACIÓN PARA DIFERENTES MODELOS OBTENIDOS.....	98
4.3.1.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA EL P.O. 13.7 CM.....	98

4.3.1.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA EL P.O. 17.2 CM.....	100
4.3.1.3. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA EL P.O. 19.3 CM.....	101
4.3.1.4. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA EL P.O. 26.5 CM.....	102
4.3.1.5. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA EL P.O. 29.8 CM.....	103
4.3.2. SELECCIÓN DEL MODELO.....	104
CAPÍTULO 5.....	106
5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES.....	106
5.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PID.....	106
5.1.1. CONTROLADOR PID PARA LA VARIABLE NIVEL .....	106
5.1.1.1. INGRESO DE LA FUNCIONES DE TRANSFERENCIA AL WORKSPACE.....	107
5.1.1.2. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SISOTOOL PARA OBTENER EL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 17.2 CM.....	108
5.1.1.3. VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR P.O 17.2 CM. 114	
5.1.1.3.1. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 13.7 CM .....	116
5.1.1.3.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 17.2 CM.....	118
5.1.1.3.3. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 19.3 CM .....	119
5.1.1.3.4. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 26.5 CM .....	120

5.1.1.3.5. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 29.8 CM .....	121
5.1.2. CONTROLADOR PI PARA LA VARIABLE CAUDAL.....	122
5.2. CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS	125
5.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL GANANCIAS PROGRAMADAS.....	126
5.2.1.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS SIMULADOS CONTROL DE GANANCIAS PROGRAMADAS NIVEL .....	128
5.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE CAUDAL GANANCIAS PROGRAMADAS.....	133
5.2.2.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS SIMULADOS CONTROL DE GANANCIAS PROGRAMADAS CAUDAL .....	134
5.2.2.2. SIMULACIONES DEL CONTROLADOR GANANCIAS PROGRAMADAS CAUDAL ANTE PERTURBACIONES.....	136
5.3. DISEÑO DE ALGORITMOS DE CONTROL.....	137
5.3.1. ALGORITMO DEL CONTROLADOR PID NIVEL(GANANCIAS PROGRAMADAS) .....	137
5.3.2. ALGORITMO DEL CONTROLADOR PI CAUDAL(GANANCIAS PROGRAMADAS) .....	141
5.3.2.1. ALGORITMO DEL CONTROLADOR LAZO SIMPLE .....	143
5.3.2.2. ALGORITMO DEL CONTROLADOR LAZO CASCADA .....	145
CAPÍTULO 6.....	147

6. DISEÑO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	147
6.1. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE .....	148
6.1.1. CONTROLADOR DE NIVEL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE SIN PERTURBACIÓN .....	148
6.1.2. CONTROLADOR DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE CON PERTURBACIÓN .....	150
6.2. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE .....	152
6.2.1. CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS SIN PERTURBACIÓN .....	152
6.2.2. CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS CON PERTURBACIÓN .....	154
6.3. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL EN LAZO CASCADA.....	156
6.3.1. CONTROLADOR ADAPTATIVO GANANCIAS PROGRAMADAS LAZO CASCADA PERTURBACIÓN EN LA SALIDA .....	156
6.3.2. CONTROLADOR CASCADA DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON PERTURBACIÓN EN LA ENTRADA .....	159
6.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA CONTROLADOR.....	162
6.5. ANÁLISIS COMPARATIVO .....	164
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	147

BIBLIOGRAFÍA.....	150
ANEXO 1 .....	155

## ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA

<b>A</b>	Área del tanque (sección transversal)
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>ADEX</b>	Control adaptativo predictivo experto
<b>ATX</b>	Fuentes de alimentación
<b>C(s)</b>	Controlador
<b>cm</b>	Centímetros
<b>cm<sup>3</sup>/s</b>	Centímetro cubico por segundo
<b>DAC</b>	Control y acceso de datos
<b>DC</b>	Corriente continúa
<b>den</b>	Denominador
<b>disp.</b>	Mostrar valor en pantalla; función de matlab
<b>e(t)</b>	Error
<b>e(z)</b>	Error en tiempo discreto
<b>E/S</b>	Entradas y salidas
<b>G(s)</b>	Proceso o planta
<b>G(z)</b>	Proceso en tiempo discreto
<b>H</b>	Nivel
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Hidrogeno de azufre
<b>I</b>	Intensidad o corriente
<b>IDE</b>	Software de interfaz y programación para tarjeta arduino
<b>kd</b>	Constante derivativa



<b>Ki</b>	Constante integral
<b>kp</b>	Constante proporcional
<b>Kv</b>	Constante de la válvula
<b>LABVIEW</b>	Software de interfaz y programación de laboratorio de la National Instruments
<b>LPH</b>	Litros por hora
<b>max</b>	Máximo
<b>min</b>	Mínimo
<b>MW</b>	Megavatios
<b>NPT</b>	National Pipe Thread ó rosca nacional para tubería
<b>Ns</b>	Cantidad de datos a simular
<b>num</b>	Numerador
<b>OPC</b>	Objeto para control de procesos
<b><math>\rho</math></b>	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>P</b>	Potencia
<b>P</b>	Proporcional
<b>P(t)</b>	Perturbaciones
<b>P.O</b>	Punto de operación
<b>PC</b>	Computador programable
<b>PD</b>	Proporcional y derivativo
<b>PH</b>	Potencial de hidrogeno
<b>PI</b>	Proporcional e integral

<b>PID</b>	Proporcional integral y derivativo
<b>PLC</b>	Controlador lógico programable
<b>PRBS</b>	Pseudo Random secuencia binaria ó señal seudo aleatoria de secuencia binaria
<b>PSI</b>	Libras de presión por pulgada cuadrada
<b>PWM</b>	Modulación del ancho de pulso
<b>Q</b>	Caudal
<b>qi</b>	Caudal de entrada
<b>qo</b>	Caudal de Salida
<b>R</b>	Resistencia
<b>r(t)</b>	Referencia, consigna y/o set point
<b>Re</b>	Reynolds
<b>re</b>	Valor nominal de la variable manipulable (u)
<b>SCADA</b>	Sistema de control y adquisición de datos
<b>SIG</b>	Señal de inicio del sensor de nivel
<b>SO<sub>2</sub></b>	Oxido sulfúrico
<b>SRU</b>	Unidades recuperadoras de azufre
<b>STO</b>	Optimizador de temperatura de vapor
<b>sys</b>	Función de matlab denominada <i>objeto tipo de sistema</i>
<b>t</b>	Tiempo
<b>tc</b>	Tiempo mínimo de conmutación de la señal
<b>Tm</b>	Tiempo de muestreo

<b>ts</b>	tiempo de simulación
<b>u</b>	Señal de control del controlador externo
<b>u(k)</b>	Acción de control en diferencia
<b>u(z)</b>	Acción de control en tiempo discreto
<b>u2</b>	Señal de salida del controlador Interno cascada
<b>uf</b>	Microfaradios
<b>umax</b>	Valor máximo de u en variación porcentual
<b>umin</b>	Valor mínimo de u en variación porcentual
<b>V</b>	Voltaje
<b>V(p)</b>	Variable programada
<b>VA</b>	Voltaje DC que se mide a la entrada de la interface de fuerza
<b>VB</b>	Voltaje DC que se mide a la salida de la interface de fuerza (voltaje de la bomba)
<b>VF</b>	Voltaje de la fuente de alimentación
<b>Y(s)</b>	Variable de Salida o variable controlada
<b>η</b>	Viscosidad dinámica
<b>v</b>	Velocidad del fluido en cm/s
<b>π</b>	Pi

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. PARÁMETROS DE CONTROLADORES CLÁSICOS [10].....	11
FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO ABIERTO [10].....	12
FIGURA 2.3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL EN LAZO CERRADO. [10].....	13
FIGURA 2.4. ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA DE CONTROL PID [10] .....	14
FIGURA 2.5. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PI [10].....	16
FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE BLOQUES ADICIONADA LA ACCIÓN DERIVATIVA FORMA EL PID. [10] .....	17
FIGURA 2.7. ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR PID DISCRETO. [10].	18
FIGURA 2.8. OPCIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DIGITAL [10] .....	19
FIGURA 2.9. DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE (R) Y RETARDO EQUIVALENTE (L) [10].....	21
FIGURA 2.10. CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN CONTROLADOR ADAPTATIVO [25] .....	23
FIGURA 2.11. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UN CONTROLADOR ADAPTATIVO CON MODELO DE REFERENCIA [25].....	25
FIGURA 2.12. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN LAZO DE CONTROL POR GANANCIAS PROGRAMADAS [25].....	26

FIGURA 2.13. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA UN CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS. [25].....	27
FIGURA 2.14. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA [15].....	28
FIGURA 2.15. SEÑALES MÁS UTILIZADAS PARA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.[16].....	29
FIGURA 2.16. ESTRUCTURA PARA IDENTIFICAR SISTEMAS TIPO CAJA NEGRA [17] .....	29
FIGURA 2.17. TIPO DE SEÑALES DE RESPUESTA DE LA IDENTIFICACIÓN. [17].....	30
FIGURA 2.18. SEÑAL PRBS [17].....	32
FIGURA 2.19. MODELO DE IDENTIFICACIÓN ARX [17].....	33
FIGURA 2.20. MODELO DE IDENTIFICACIÓN OUPUT – ERROR [17].....	34
FIGURA 2.21. MODELO DE IDENTIFICACIÓN ARMAX [17].....	35
FIGURA 3.1. PLANTA EN ESTUDIO.....	37
FIGURA 3.2. SISTEMA HIDRÁULICO.....	38
FIGURA 3.3. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA.....	39
FIGURA 3.4. TUBERÍAS Y ACCESORIOS HIDRÁULICOS .....	40
FIGURA 3.5. BOMBA DE AGUA (ACTUADOR) .....	41
FIGURA 3.6. VÁLVULAS DE OPERACIÓN MANUAL.....	43
FIGURA 3.7. MEDIDOR DE FLUJO TIPO HALF [26].....	43
FIGURA 3.8. TANQUE DE CONTROL .....	46

FIGURA 3.9. TARJETA DE CONTROL ARDUINO MEGA .....	50
FIGURA 3.10. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL TIPO ATX [21] .....	51
FIGURA 3.11. CIRCUITO DE LA FUENTE 12 VOLTIOS DC .....	52
FIGURA 3.12. DIAGRAMA DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 24 VDC. ....	53
FIGURA 3.13. FUENTE DE VOLTAJE DOBLE CON SALIDA DE +12VDC Y +24VDC .....	54
FIGURA 3.14. DISEÑO DEL VARIADOR DE VELOCIDAD (PWM) .....	54
FIGURA 3.15. ANCHO DE PULSO DE LA SEÑAL PWM PARA EL VARIADOR DE VELOCIDAD.....	55
FIGURA 3.16. SEÑAL PWM REAL CON VOLTAJE DE 9.69VDC APLICADO AL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	56
FIGURA 3.17. MONTAJE ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL CONTROL DE NIVEL .....	57
FIGURA 3.18. CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL SENSOR DE NIVEL Y EL CONTROLADOR .....	58
FIGURA 3.19. FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE NIVEL PARA EMISIÓN Y RECEPCIÓN DE SEÑAL DE ULTRASONIDO.....	59
FIGURA 3.20. RAFA DE PULSO EMITIDO POR EL SENSOR ULTRASÓNICO.....	60
FIGURA 3.21. ALGORITMO PARA LECTURA DEL SENSOR DE NIVEL ...	61
FIGURA 3.22. DURACIÓN DEL PULSO DEL SENSOR DE NIVEL .....	62

FIGURA 3.23. CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL SENSOR DE CAUDAL CON EL CONTROLADOR.....	63
FIGURA 3.24. SENSOR DE CAUDAL TIPO HALF [25] .....	64
FIGURA 3.25. CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL VARIADOR DE VOLTAJE (PWM) DE LA BOMBA CON EL CONTROLADOR .....	65
FIGURA 3.26. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA LA CONFIGURACIÓN DEL TEMPORIZADOR 3 COMO PWM .....	66
FIGURA 3.27. PANTALLA PRINCIPAL DEL SCADA .....	69
FIGURA 3.28. PANTALLA DEL SCADA CONTROLADOR EN LAZO SIMPLE .....	70
FIGURA 3.29. PANTALLA DE SCADA CONTROLADOR EN CASCADA ....	71
FIGURA 4.1. GRAFICA DEL CAUDAL VS PWM SUMINISTRADO A LA PLANTA.....	73
FIGURA 4.2. RESPUESTA DEL ACTUADOR A UN ESTÍMULO TIPO ESCALÓN.....	74
FIGURA 4.3. TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA.....	75
FIGURA 4.4. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SIMULACIÓN DEL MODELADO DE LA PLANTA .....	80
FIGURA 4.5. DIAGRAMA DEL MODELO NO LINEAL DE LA PLANTA. ....	82
FIGURA 4.6. RESPUESTA DEL MODELO NO LINEAL CON UNA SEÑAL PRBS .....	82
FIGURA 4.7. RESPUESTA DE LA PLANTA LINEAL EN LAZO ABIERTO ..	84

FIGURA 4.8. RESPUESTA DE LA PLANTA LINEAL EN LAZO ABIERTO CON AJUSTE DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	85
FIGURA 4.9. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA REAL CON LA RESPUESTA DEL MODELO LINEAL DE LA PLANTA USANDO COMO SEÑAL DE PRUEBA LOS DATOS REALES.....	86
FIGURA 4.10. SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW.....	90
FIGURA 4.11. ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS EN LABVIEW .....	90
FIGURA 4.12. SEÑAL PRBS PARA REALIZAR LA IDENTIFICACIÓN EN UN PUNTO DE OPERACIÓN(17.5 CM) .....	94
FIGURA 4.13. RESPUESTA DE LA PLANTA ANTE LA SEÑAL PRBS PUNTO DE OPERACIÓN 17.5 CM .....	95
FIGURA 4.14. RESPUESTA DE LA BOMBA (ACTUADOR) ANTE UNA SEÑAL PWM .....	95
FIGURA 4.15. SEÑAL DE SALIDA DE LA PLANTA CON EL MODELO IDENTIFICADO VS LA SEÑAL DEL MODELO REAL DE LA PLANTA PARA UN PUNTO DE OPERACIÓN 17.5 CM .....	96
FIGURA 4.16. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO IDENTIFICADO .....	98
FIGURA 4.17. RESPUESTA A LA SIMULACIÓN DEL MODELO IDENTIFICADO PARA PO 13.7 CM .....	99



FIGURA 4.18. COMPARACIÓN ENTRE LA RESPUESTA REAL DE LA PLANTA Y LA RESPUESTA DEL MODELO POR ECUACIONES FÍSICAS PARA UN P.O. DE 13.7 CM. ....	99
FIGURA 4.19. COMPARACIÓN ENTRE LA RESPUESTA REAL DE LA PLANTA, RESPUESTA IDENTIFICADA Y LA RESPUESTA DEL MODELO POR ECUACIONES FÍSICAS PARA UN P.O. DE 17.2 CM. ....	101
FIGURA 4.20. SIMULACIÓN ENTRE LA RESPUESTA REAL DE LA PLANTA Y LA RESPUESTA DEL MODELO POR ECUACIONES FÍSICAS PARA UN P.O. DE 19.3 CM ....	102
FIGURA 4.21. COMPARACIÓN ENTRE LA RESPUESTA REAL DE LA PLANTA Y LA RESPUESTA DEL MODELO POR ECUACIONES FÍSICAS PARA UN P.O. DE 26.5 CM ....	103
FIGURA 4.22. COMPARACIÓN ENTRE LA RESPUESTA REAL DE LA PLANTA Y LA RESPUESTA DEL MODELO POR ECUACIONES FÍSICAS PARA UN P.O. DE 29.8 CM ....	104
FIGURA 5.1. TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES DEL MODELO UTILIZANDO SISO TOOLS .....	108
FIGURA 5.2. TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES APLICANDO UN MOVIMIENTO DIRECTO DE LOS CEROS .....	109
FIGURA 5.3. FORMA DE INGRESO DE LOS POLOS Y CEROS DEL COMPENSADOR UTILIZANDO SISO TOOLS.....	110

FIGURA 5.4. SELECCIÓN EN SISO TOOLS PARA OBTENER UNA RESPUESTA TIPO STEP.....	111
FIGURA 5.5. RESPUESTA A LA CALIBRACIÓN DEL CONTROLADOR COMPENSADO .....	112
FIGURA 5.6. TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES UBICACIÓN DE LOS CEROS PARA EL SISTEMA COMPENSADO.....	113
FIGURA 5.7. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR IMPLEMENTADO .....	115
FIGURA 5.8. COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO DEL CONTROLADOR PID IMPLEMENTADO .....	115
FIGURA 5.9. SEÑAL DE CONTROL (U=CAUDAL) EN LAZO CERRADO.	116
FIGURA 5.10. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL P.O. DE 13.7CM.....	117
FIGURA 5.11. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL P.O. DE 17.2 CM.....	118
FIGURA 5.12. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL P.O. DE 19.3 CM.....	119
FIGURA 5.13. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL P.O. DE 26.5 CM.....	120
FIGURA 5.14. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DEL CONTROLADOR EN LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL P.O. DE 29.8 CM.....	121

FIGURA 5.15. SEÑAL DE CONTROL (CAUDAL) PARA TODOS LOS PUNTOS MOSTRADOS EN LA TABLA .....	122
FIGURA 5.16. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR CASCADA .....	123
FIGURA 5.17. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR INTERNO (CAUDAL) .....	123
FIGURA 5.18. RESPUESTA DEL CONTROLADOR INTERNO PI (CAUDAL) PARA UNA ZONA DE OPERACIÓN DE 70 – 100 CM <sup>3</sup> /S .....	124
FIGURA 5.19. RESPUESTA DEL CONTROLADOR INTERNO PI (CAUDAL) PARA UNA ZONA DE OPERACIÓN DE 120 – 150 CM <sup>3</sup> /S .....	125
FIGURA 5.20. DIAGRAMA DE BLOQUES CDEL CONTROLADOR EXTERNO DE GANANCIAS PROGRAMADAS (NIVEL) .....	128
FIGURA 5.21. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID EXTERNO DE GANACIAS PROGRAMADAS (NIVEL) PARA EL MODELO NO LINEAL DE LA PLANTA.....	129
FIGURA 5.22. SEÑAL DE CONTROL DEL CONTROLADOR PID EXTERNO DE GANACIAS PROGRAMADAS PARA LA VARIABLE NIVEL .....	129
FIGURA 5.23. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID EXTERNO DE GANACIAS PROGRAMADAS ANTE PERTURBACIONES A LA SALIDA DEL SISTEMA .....	130
FIGURA 5.24. TREN DE PERTURBACIONES A LA SALIDA DEL SISTEMA .....	131

FIGURA 5.25. SEÑAL DE CONTROL (U) DEL CONTROLADOR PID EXTERNO DE GANACIAS PROGRAMADAS ANTE UN TREN DE PERTURBACIONES A LA SALIDA DEL SISTEMA.....	131
FIGURA 5.26. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID EXTERNO DE GANACIAS PROGRAMADAS ANTE UN TREN DE PERTURBACIONES A LA ENTRADA DEL SISTEMA(CAUDAL).....	132
FIGURA 5.27. TREN DE PERTURBACIONES EN LA ENTRADA DE LA PLANTA(CAUDAL).....	133
FIGURA 5.28. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROLADOR PI DE GANANCIAS PROGRAMADAS.....	134
FIGURA 5.29. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID DE GANANCIAS PROGRAMADAS PARA LA VARIABLE DE CAUDAL.....	135
FIGURA 5.30. SEÑAL DE CONTROL ( U) DE EL CONTROLADOR DE GANANCIAS PROGRAMADAS PARA CAUDAL .....	135
FIGURA 5.31. RESPUESTA DEL CONTROLADOR PID DE GANACIAS PROGRAMADAS PARA LA VARIABLE DE CAUDAL CON PERTURBACIONES.....	136
FIGURA 5.32. SEÑAL DE CONTROL ( U) DE EL CONTROLADOR DE GANACIAS PROGRAMADAS ANTE UN TREN DE PERTURBACIONES A LA SALIDA DEL SISTEMA .....	137
FIGURA 5.33. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS(LAZO EXTERNO)_1 ..	139

FIGURA 5.34. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS(LAZO EXTERNO)_2..	140
FIGURA 5.35. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR PID CAUDAL .....	142
FIGURA 5.36. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL DE LAZO SIMPLE .....	144
FIGURA 5.37. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE CONTROL DE LAZO CASCADA .....	146
FIGURA 6.1. RESPUESTA DEL CONTROLADOR DE NIVEL DE GANANCIAS PROGRAMADAS SIN PERTURBACIONES.....	149
FIGURA 6.2. SEÑAL U1 DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE .....	149
FIGURA 6.3. RESPUESTA DEL CONTROLADOR DE NIVEL DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON CAMBIOS DE CONSIGNA O SETPOINT CON PERTURBACIONES A LA ENTRADA Y SALIDA DE LA PLANTA.....	151
FIGURA 6.4. RETARDO DE TIEMPO DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO GANANCIAS PROGRAMADAS PARA LLEVAR LA PLANTA DE 28CM A 35 CM .....	151
FIGURA 6.5. SEÑAL U1 DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON CAMBIOS EN EL SETPOIN Y PERTURBACIONES EN LA ENTRADA Y SALIDA DE LA PLANTA.....	152

FIGURA 6.6. SEÑAL DE CONTROL DEL REGULADOR PID DE CAUDAL DE GANANCIAS PROGRAMADAS SIN PERTURBACIONES.....	154
FIGURA 6.7. SEÑAL DE CONTROL DEL REGULADOR PID DE CAUDAL DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON PERTURBACIONES.....	155
FIGURA 6.8. RESPUESTA DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA SALIDA DE LA PLANTA. ....	157
FIGURA 6.9. SEÑALES DE CONTROL U1 Y U2 DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA SALIDA DE LA PLANTA.....	157
FIGURA 6.10. SEÑAL DE CONTROL U1 DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA SALIDA DE LA PLANTA.....	158
FIGURA 6.11. SEÑAL DE CONTROL U2 DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA SALIDA DE LA PLANTA.....	158
FIGURA 6.12. RESPUESTA DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA ENTRADA DE LA PLANTA .....	160
FIGURA 6.13. RESPUESTA DEL LAZO DE CONTROL INTERNO DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN	

LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA ENTRADA DE LA PLANTA.....161

FIGURA 6.14. SEÑALES DE CONTROL  $U_1$  Y  $U_2$  DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO CASCADA CON PERTURBACIONES EN LA ENTRADA DE LA PLANTA. ....161

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA: 1. PRIMERA REGLA: PARÁMETROS PARA LA SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID SEGÚN CRITERIO DE ZIEGLER Y NICHOLS .....	21
TABLA: 2. SEGUNDA REGLA: PARÁMETROS PARA LA SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID SEGÚN CRITERIO DE ZIEGLER Y NICHOLS .....	22
TABLA: 3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE CAUDAL .....	44
TABLA: 4. MATRIZ DE PUNTUACIÓN DE SENSOR DE CAUDAL .....	44
TABLA: 5. CRITERIO DE SELECCIÓN DEL SENSOR DE NIVEL.....	48
TABLA: 6. MATRIZ DE PUNTUACIÓN DE SENSOR DE NIVEL .....	49
TABLA: 7. DATOS EXPERIMENTALES EN LAZO ABIERTO CON SALIDA PWM DE 8 BIT.....	67
TABLA: 8. MODELO LINEAL DE LA PLANTA CON ESTIMACIÓN DE SUS PARÁMETROS CON ECUACIONES FÍSICAS .....	87
TABLA: 9. PUNTOS DE OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LA PLANTA (PLANTA REAL Y PLANTA MODELO NO LINEAL).....	88
TABLA: 10. DATOS OBTENIDOS PARA REALIZAR LA IDENTIFICACIÓN	91
TABLA: 11. DATOS OBTENIDOS DEL MODELO IDENTIFICADO PARA VARIOS PUNTOS DE OPERACIÓN .....	97



TABLA: 12. FUNCIONES DE TRANSFERENCIAS CONSOLIDADA OBTENIDA POR ECUACIONES FÍSICAS COMO LOS OBTENIDOS POR IDENTIFICACIÓN .....	97
TABLA: 13. MODELO SELECCIONADO PARA EL DISEÑO DEL CONTROLADOR PID .....	105
TABLA: 14. DATOS DE LAS CONSTANTES $K_P$ , $K_I$ , $K_D$ PARA CADA PUNTO DE OPERACIÓN .....	114
TABLA: 15. CONSTANTES DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR PI INTERNO EN DOS ZONAS DE OPERACIÓN .....	124
TABLA: 16. CONSTANTES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL CONTROLADOR DE GANANCIAS PROGRAMADAS (NIVEL) EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE OPERACIÓN .....	127
TABLA: 17. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADA A LOS DIFERENTES CONTROLADORES .....	163

## INTRODUCCIÓN

En el campo industrial con el objetivo de optimizar recursos, producir productos competitivos, ahorrar energía y conservar el medio ambiente, se debe realizar medidas de los parámetros más importantes que intervienen en las etapas de elaboración, tales como: presión, nivel, caudal, temperatura, PH, etc. y a su vez mantener dentro de unos márgenes establecidos. En este contexto se suele aplicar algún algoritmo de control, generalmente basados en control clásico, para que sí, se produce una desviación fuera de estos márgenes se aplique una acción correctora al elemento final de regulación para obligar que la variable retorne a su valor establecido.(27)

Estos algoritmos de control en los últimos años han tenido un marcado desarrollo gracias a la inclusión del controlador en las tareas de control. Existen diferentes tipos de controladores modernos, entre los más difundidos en la literatura científica se pueden citar los siguientes: Predictivos, Difusos, Neuronal, Predictivos Extendidos, Adaptativos, Distribuidos entre otros. La implementación de estos controladores demanda la utilización de recursos de cómputo más exigentes que los requeridos para la implementación de controladores clásicos, como el controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Sin embargo gracias a la disponibilidad en el mercado de nuevas tecnologías en hardware y software que permiten integrar dispositivos cada

vez más rápidos, con mayores y mejores prestaciones para la implementación física de los controladores [28].

En este trabajo de tesis, se presenta el diseño e implementación de un algoritmo de control adaptativo de ganancias programadas en lazo simple y lazo en cascada, el cual se evalúa su funcionamiento sobre las variables de nivel y caudal de un módulo didáctico desarrollado en esta tesis. La implantación de los algoritmos se realiza sobre la tarjeta embebida Arduino Mega 256 [31], la misma que puede encontrarse a nivel comercial, la tarjeta permite la programación, lectura y escritura de datos analógicos y digitales de manera fácil y económica. Para obtener un desempeño eficiente de los algoritmos de control implementados, se necesitaron realizar algunas etapas, que son detalladas en cada uno de los capítulos de esta memoria de tesis. [29][30]

De hecho en el capítulo 1 se realiza una descripción de la perspectiva histórica, situación actual, desarrollo y aplicación en la Industria de los controladores propuestos en este proyecto.

El capítulo 2 describe todo el diseño y desarrollo de la planta prototipo, los circuitos eléctricos utilizados en el control, el desarrollo de algoritmos usados para la adquisición de las señales eléctricas suministradas por los sensores y su posterior análisis y tratamiento de datos, así también, los algoritmos para los controladores de la comunicación con el sistema SCADA

El modelamiento matemático de la planta sea esta por identificación o el uso de ecuaciones físicas es descrito en el capítulo 3.

El capítulo 4 hace énfasis en el diseño de los controladores PID y los controladores adaptativo de ganancias programadas en lazo simple o en lazo en cascada, todo ello, basado en el análisis de las simulaciones en Matlab.

El capítulo 5 se presenta en detalle la implementación de los controladores en el sistema embebido y ajuste (pruebas de regulación real de los algoritmos) con y sin perturbación tanto en la entrada como en la salida de la planta.

El capítulo 6 describe el comportamiento temporal de las variables caudal, nivel y acciones de control que se obtuvieron con cada uno de los controladores una vez aplicado a la planta real, con o sin perturbaciones.

Finalmente, se contemplan las conclusiones obtenidas en este trabajo, así como unas breves recomendaciones y trabajos futuros de investigación para su posterior implementación física en el campo industrial

# **CAPÍTULO 1**

## **1. EL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Alrededor del mundo son centenares los estudiantes que se ven obligados a dejar los estudios profesionales de carreras técnicas, debido a la complejidad de algunas materias, entre ellas las teorías de control, materias en la que es necesario un razonamiento teórico-práctico, que le permita lograr los conocimientos y habilidades para desenvolverse en su vida profesional.

La Universidad Politécnica Salesiana, adquirió varios equipos de las empresas Feddback y Festo para entrenar a los docentes y estudiantes en la teoría de control, estos módulos son muy costosos lo que generó una compra limitada de equipos, no pudiendo atender las necesidades práctica de cada alumno, adicionalmente estos dispositivos entrenadores tienen como equipo de control a los controladores lógicos programables (PLC), los cuales no dan una versatilidad para modificar los algoritmos de control, cuentan con una escasa guía de prácticas propuesta y no contiene a disposición un manual de

prácticas resueltas para el docente, que le permitan investigar y adquirir las destrezas en el manejo del equipo, todos estos inconvenientes que se presentan dan origen a que el estudiante en su perfil de egreso de las carreras tengan deficiencia en el conocimiento sobre la teoría de control.

Existen empresas como EDIBON, FESTO, NATIONAL INSTRUMENT, que se dedican a diseñar equipos didácticos para las diferentes materias de las mallas curriculares de los programas de ingenierías; pero así mismo, los costos son elevados de sus equipos, lo que hace imposible que en nuestro medio, las instituciones de educación superior adquieran laboratorios completos para control automático,

Este planteamiento nos lleva las siguientes preguntas:

¿Se puede implementar un módulo didáctico para realizar controladores PID y controlador adaptativos de ganancias programadas para procesos industriales que sean de bajo costo?

¿Existen en el mercado algún hardware que permitan una versatilidad para modificar los algoritmos de controles avanzado y que sean de bajos costos?

¿Pueden integrarse las tecnologías embebidas de hardware con software libre de código abierto para permitir la implementación de algoritmos y estrategias avanzadas de control industrial?

¿Qué controlador de los planteados en el tema proporciona un mejor rendimiento a los actuadores?

## **1.2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.**

El presente proyecto trata de desarrollar un módulo didáctico que permita implementar los controladores adaptativo de ganancias programadas en lazo simple y lazo en cascada sobre variables de nivel y caudal, además en este módulo se puede monitorear las variables de entrada y salida del sistema de tal manera que los estudiantes de pregrado y postgrado puedan comprobar los conocimientos teóricos.

## **1.3. OBJETIVOS.**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar e implementar en un módulo didáctico de controladores PID y control adaptativo de ganancias programadas para regular la variable nivel

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Diseñar e implementar una planta didáctica que permita el control de la variable de nivel
- Modelar y simular la planta con esquema de control en lazo simple donde la variable de control es el nivel
- Modelar y simular la planta con esquemas de control en cascada donde la variable interna de regulación es caudal y la variable externa nivel
- Diseñar e implementar los controladores PID y control adaptativo de ganancias programadas para los esquemas de control en lazo simple y control en cascada
- Diseñar e implementar una aplicación software que permita visualizar las variables de la planta



- Comparar los resultados obtenidos con los controladores PID, y controlador adaptativo de ganancias programadas con los dos esquemas de control.

### **1.3.3. METODOLOGÍA.**

Los métodos de investigación que se emplearon en este desarrollo son:

#### **1.3.3.1. EXPERIMENTAL.**

Se realizan diferentes pruebas experimentales para conseguir los objetivos planteados en esta tesis

#### **1.3.3.2. DEDUCTIVO.**

Se utilizó para adquirir conocimientos científicos y lógicos, que sirven en el desarrollo del modelo matemático, programas, rutinas y funciones del proyecto

**Técnica.** Se realizará Observación / Modelación y análisis de datos estadísticos.

La investigación por el nivel de conocimiento se considera:

**Aplicativa.-** Porque va a permitir entender mejor los principios de este caso.

**Cuantitativa.-** Porque se tomará datos experimentales y se realiza un análisis de los resultados.

## **1.4. ESTADO DEL ARTE**

### **1.4.1. CONTROL ADAPTATIVO EN LA INDUSTRIA**

Luego del perfeccionamiento de esta técnica de control y con los avances tecnológicos para poder reducir al mínimo los costos de implementación, se introduce esta técnica de control en procesos industriales para diferentes áreas como en centrales térmicas de carbón, controles de nivel de agua en grandes canales de riego, plantas de recuperación de azufre en refinerías, y plantas de tratamiento de aguas residuales realizaremos una descripción de estas implementaciones a nivel industrial

#### **1.4.1.1. CICLOS COMBINADOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA**

La aplicación de un sistema de control adaptativo titulado 'Optimizador de temperatura de vapor '(STO), en el ciclo combinado de la Empresa Nacional de Electricidad SA al Barranco de Tirajana en las islas Canarias en junio del 2011. Este ciclo combinado consta de dos turbinas de gas de 70 MW cada una, dos calderas de recuperación y una turbina de vapor también de 70 MW. El STO se aplicó al control de la temperatura de las calderas de recuperación de alta presión y se integra en paralelo con el sistema de control distribuido de la planta por medio de Object Linking and Embedding para la comunicación de control de proceso. Las estrategias de control de STO, diseñados para hacer frente a los problemas de control de temperatura y limitaciones específicas de instrumentación de la planta. El STO mejoró significativamente la precisión de control y la estabilidad de la temperatura

del vapor y esto confirmó que el control adaptativo es una metodología fiable de auto-sintonización para este tipo de proceso. [6]

#### **1.4.1.2. CONTROL ADAPTATIVO PARA LA TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO EN UNA PLANTA DE ENERGÍA A CARBÓN**

Donde se implementa la aplicación de una solución adaptativa de control predictivo experto (ADEX) para el proceso de control de temperatura de vapor sobrecalentado en la central a carbón de Scottish Power en Cockenzie cerca de Edimburgo en Escocia en junio del 2012. El proyecto constaba de dos fases, la primera de las cuales era un ensayo para establecer la factibilidad y los posibles beneficios de ADEX en comparación con el sistema de control existente mediante el uso de una plataforma de software en el PC conectado a la planta mediante un Controlador lógico programable (PLC) a través de la vinculación e incrustación de objetos para control de procesos (OPC), y la segunda fase consistía en verificar e instalar una solución permanente, utilizando un módulo controlador ADEX con un enlace digital a la planta de PLC. El objetivo general del proyecto es reducir las variaciones de temperatura de vapor causadas por los cambios de carga y otras perturbaciones, a fin de proteger a la turbina de vapor (Unidad 3) y reducir al mínimo las tensiones térmicas en la tubería de atemperación y la caldera y así minimizar los fallos prematuros, junto con los costes asociados de riesgo. En la primera fase, ADEX demostró una mejora del 50% en la reducción de la variación de temperatura de vapor global en comparación con el método

existente, y la posterior instalación del módulo controlador ADEX proporcionado la robustez y las copias de seguridad necesarias para una solución industrial final. [6]

#### **1.4.1.3. CONTROL ADAPTATIVO DE LOS REACTORES DE ZANJAS DE OXIDACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

La implementación de esta aplicación de control adaptativo se la realiza al reactor de oxidación en la planta de tratamiento de aguas residuales de Ceutí (Murcia, España) donde se evalúa el desempeño y las estrategias de control que se centraron sobre la reducción del consumo de energía así como en el monitoreo de todos los parámetros con los que el agua residual puede salir de esta planta ya que por regulaciones y exigencias ambientales se deben cumplir. Los resultados de la aplicación del sistema de control muestran mejoras significativas en términos de una estabilidad más alta y la precisión de variables controladas, así como la reducción del consumo de energía de la planta, y mejor calidad del agua efluente. [6]

#### **1.4.1.4. CONTROL ADAPTATIVO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE AZUFRE EN PEMEX CADEREYTA REFINERÍA**

Se realizó el diseño y aplicación de un sistema de control optimizado, basado en la metodología de control adaptativo, a las unidades de recuperación de azufre (SRU) de la Refinería de Pemex en Cadereyta, El objetivo principal es minimizar el contenido de azufre en los gases liberados a la atmósfera para cumplir con los requisitos de nivel de emisiones. Este

objetivo se puede conseguir por un control preciso de la relación entre sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre en el gas de cola (gas de salida). Las estrategias de control que fueron implementadas sirven para controlar la presión en ambos colectores de gas ácido y el caudal de aire que entra en cada SRU. Los resultados muestran que el H<sub>2</sub>S: relación de SO<sub>2</sub> en el gas de cola es considerablemente más estable bajo control adaptativo, particularmente en presencia de los cambios bruscos en la carga de gas ácido. Los picos observados en esta proporción bajo control convencional desaparecieron cuando se implanto el control adaptativo el mismo que muestra una mejora significativa en la operación del proceso. [6]

## **CAPÍTULO 2**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. CONTROL CLÁSICO**

Los sistemas que utilizan control clásico se los pueden clasificar como lineales y no lineales; variantes e invariantes en el tiempo; continuos o discretos, modulados - no modulados, así como según su propósito o finalidad y de esta manera a continuación se realiza una breve descripción de cada una de esta clasificación [9].

- **Sistemas de controles lineales y no lineales**

Los sistemas lineales en la práctica no existen, ya que todos los sistemas son no lineales. La utilización del concepto de linealidad de los sistemas se aplica con el objetivo de obtener modelos ideales, y de esta forma facilitar el análisis y los diseños de sistemas de control, ya que existen en el mercado una gran cantidad de herramientas computacionales y analíticas, para este fin. [9]

- **Sistemas de control en tiempo continuo**

Se dice que un sistema es función continua del tiempo, cuando en varias zonas de este sistema su función depende de la variable tiempo "t". Se puede definir dos tipos de sistemas de control en tiempo continuo como son los sistemas de control de corriente alterna y de corriente directa, cuando hacemos referencia a los sistemas de corriente alterna, se dice que estos están modulados según algún esquema de modulación. Cuando se hace referencia a un sistema de control de corriente directa, no se debe pensar estrictamente que la dirección de las señales o corrientes correctivas es unidireccional, ya que si fuera así no se produciría en algunos casos la acción correctiva necesaria [9]

- **Sistemas de control en tiempo discreto**

Los sistemas de control en tiempo discreto se diferencian de los sistemas en tiempo continuo, porque las señales de uno o varios puntos del sistema de control están codificados digitalmente ó tienen la forma de pulsos. Se pueden dividir a éstos tipos de sistemas, como sistemas de control de datos muestreados y sistemas de control digital. [9]

Para el sistema con datos muestreados las señales se encuentran en forma de pulsos digitales, mientras que para el sistema de control digital se utiliza un controlador digital, como computadora, microcontrolador o cualquier tipo de sistema digital. Los sistemas de datos muestreados, solo reciben información durante instantes específicos de tiempo, por lo que fuera de

estos instantes el sistema no tiene información alguna del proceso controlado. [9]

Dentro de la estructura que tienen estos controladores la Figura 2.1 muestra los parámetros que intervienen en un control PID: setpoint y/ó referencia  $r(t)$ , el controlador  $C(s)$ , acción de control  $u(t)$ , el proceso ó Planta a controlar  $G(s)$ ; las perturbaciones  $p(t)$ , la salida ó variable controlada  $y(s)$ . [9]

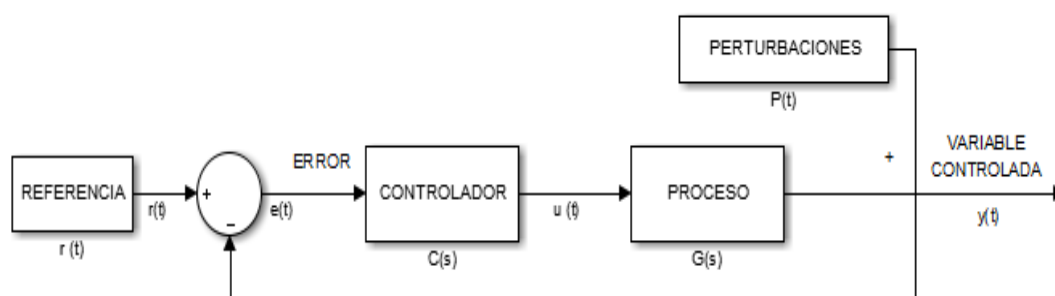


FIGURA 2.1. *Parámetros de controladores clásicos* [10]

### 2.1.1. SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO

Estos sistemas se caracterizan por no poseer una señal de retroalimentación; lo que quiere decir que la variable controlada o de salida no regresa al sistema para ser comparada con la variable de referencia, y por lo tanto, no se verifica el grado de corrección del error en el sistema de control [10]. La figura 2.2 indica el diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto



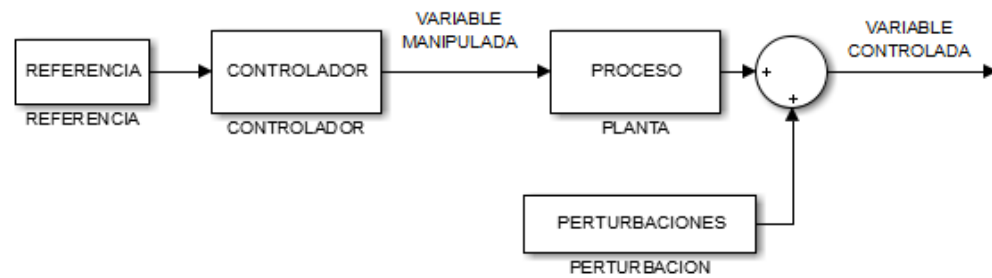


FIGURA 2.2. *Diagrama de bloques para un sistema de control en lazo abierto [10]*

La estabilidad dentro de este tipo de sistemas de control depende de la confiabilidad de los elementos del proceso, y dependen también de que las señales de perturbación no generen una acción de inestabilidad considerable, por lo general estos tipos de sistemas se utilizan cuando la exactitud de regulación en un proceso no es primordial. [9] y [10]

### 2.1.2. SISTEMAS DE LAZO CERRADO

Los componentes y las variables que intervienen en un sistema básico de lazo cerrado se ilustran en la Figura 2.3, en donde la principal característica de éstos sistemas es que la variable de salida o controlada, regresa o se retroalimenta a la entrada, para de esta forma lograr compararla continuamente con el error existente entre la consigna o referencia y la variable controlada [10]

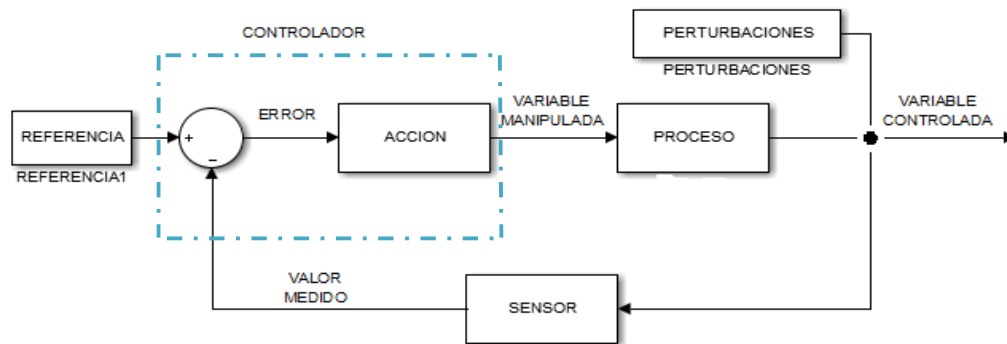


FIGURA 2.3. *Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado. [10]*

Una de las ventajas al comparar continuamente la consigna y la variable controlada es el hecho de poder tomar diferentes acciones correctivas según sea el error o la diferencia entre estas variables. Y de esta manera lograr un sistema que responda rápidamente a los cambios en los procesos o perturbaciones externas al sistema de control.

Sin embargo la retroalimentación no solo tiene el propósito de corregir el error, sino también tiene la misión de variar algunos parámetros del sistema como lo son la ganancia global, la estabilidad, el ancho de banda, margen de fase y sensibilidad del sistema. [9]

## 2.2. CONTROLADOR PID

### 2.2.1. EL CONTROLADOR PID EN TIEMPO CONTINUO

El control clásico también denominado PID (control proporcional integral y derivativo) es el más utilizado en la industria desde el siglo XX, siendo la técnica de control adoptada para la mayoría de los procesos industriales.

Dentro de los principales aspectos relevantes que mantienen al controlador PID como la principal técnica de control y automatización en la industria son: la parte económica, la confiabilidad y la facilidad de calibración (sintonización) [9].

### 2.2.1.1. ESTRUCTURA Y ALGORITMO DE CONTROL PID

En la Figura 2.4 se muestra el controlador PID que surge como consecuencia de la combinación de tres acciones básicas de control como son la acción proporcional ( $K_p$ ), acción integral ( $K_i$ ) y acción derivativa ( $K_d$ ), [10]

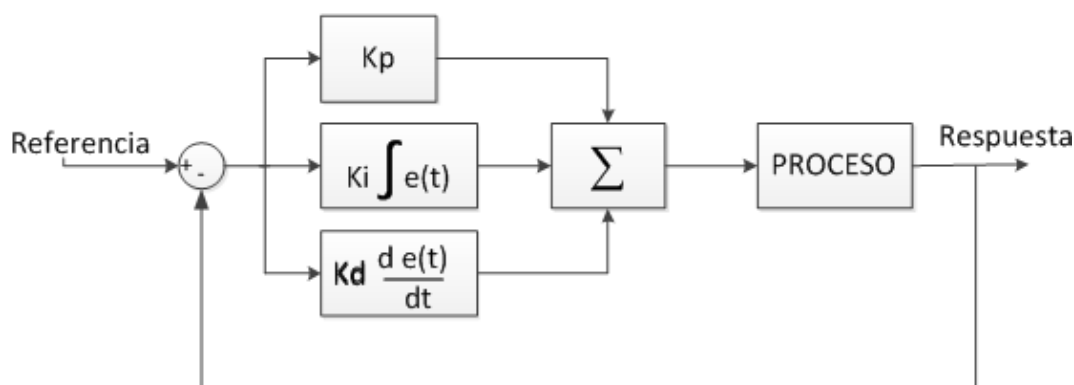


FIGURA 2.4. Esquema básico de un Sistema de Control PID [10]

Las tres acciones de control mostrada dan origen a combinaciones adicionales que se traducen en sub controles y que se implementan de acuerdo a la dinámica de cada proceso, así se tiene el control netamente proporcional P; control proporcional integral PI, control proporcional derivativo PD.

Si la acción del controlador es puramente integral, la ecuación (2.1) muestra que el controlador es proporcional a la integral del error acumulado, multiplicada por la constante integral  $k_1$  [9]

$$u(t) = K_1 \int_0^t e(t) dt ; \quad \text{donde } K_1 = cte \quad (2.1)$$

Con lo que se asegura la estabilidad del sistema realimentado, entonces la variable de salida  $y(t)$  puede ser controlada en estado estacionario sin error, aún en la presencia de perturbaciones  $p(t)$  (suponiendo ésta continua). Efectivamente, en estado estacionario la acción de control  $u(t)$  es constante, condición que sólo se verifica para error nulo, ecuación (2.1). [9]

El inconveniente fundamental al aplicarse la acción integral es que genera un efecto desestabilizador importante debido al retraso de fase de  $90^\circ$  que posee su función de transferencia. Este efecto desestabilizador puede ser reducido si a la acción integral del controlador se le adiciona una acción proporcional, es decir que la acción de control  $u(t)$  responde a la siguiente ecuación: [9]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt ; \quad \text{donde } K_i, K_p = cte \quad (2.2)$$

La figura 2.5 indica el diagrama de bloques de un controlador PI clásico, donde la acción proporcional tiende a reducir la inestabilidad producida por la acción integral, ya que presenta un camino directo en el lazo entre la señal de error y la acción de control. En otras palabras, la acción proporcional (P) adicionada a la integral (I), da lugar a un cero en la transferencia del controlador (PI) cuyo efecto es el de neutralizar la desestabilización que produce el polo en el origen introducido por la acción integral. [10]

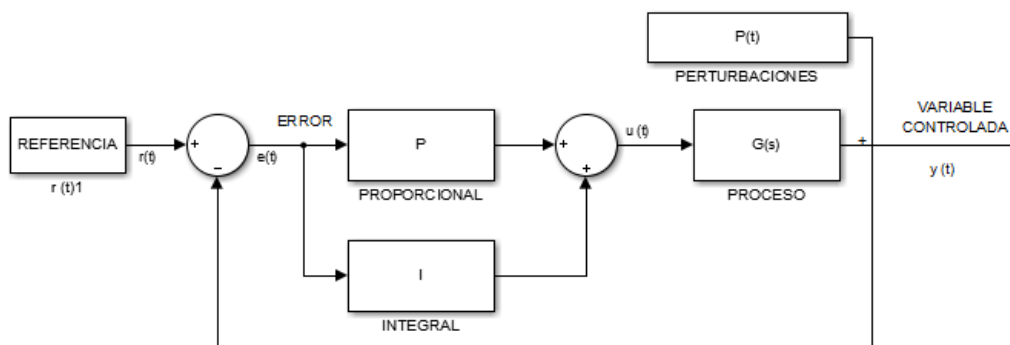


FIGURA 2.5. Diagrama de bloques del Controlador PI [10]

Si ante una perturbación o cambio del set-point, la dinámica con que el sistema alcanza el nuevo estado estacionario no es el adecuado, se puede considerar el incluirse una tercera acción correctora denominada acción derivativa D que en cierta manera se anticipa al error futuro. En la Figura 2.6 se muestra la inclusión de una acción derivativa que haga que la señal de control se incremente con la pendiente del error más que con su valor actual. Este efecto, de adelanto en el tiempo de la acción correctora se traduce en un incremento de la estabilidad relativa del sistema.

Adicionando la acción derivativa (D) a la ecuación (2.2), la acción de control  $u(t)$  tiene la siguiente estructura como la que se indica en la ecuación (2.3) donde  $K_i$ ,  $K_p$ ,  $K_d$  son las constantes integral, proporcional y derivativa respectivamente.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}; \quad \text{donde } K_i; K_p; K_d = cte \quad (2.3)$$

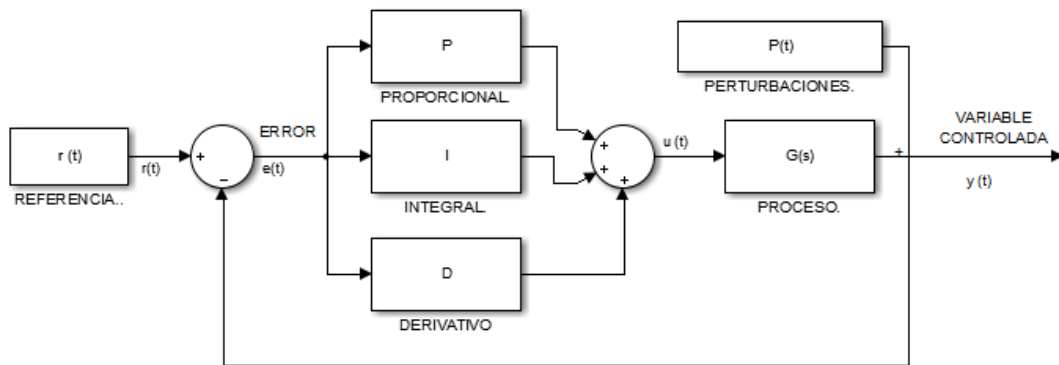


FIGURA 2.6. Diagrama de bloques adicionada la acción derivativa forma el PID. [10]

### 2.2.2. CONTROLADOR PID EN TIEMPO DISCRETO

Un controlador en tiempo discreto se lo implementa en forma similar al de tiempo continuo con la diferencia que necesita de un procesador que sea capaz de calcular una ecuación en diferencias para cada intervalo de muestreo, estas ecuaciones en diferencias deben ser las más sencillas posibles ya que si modificamos cualquier parámetro del controlador afectaría directamente a todo el sistema. [9] [12]

La Figura 2.7 muestra la estructura básica de un controlador PID en tiempo discreto donde se aprecia que este controlador PID discreto presenta una similitud con el controlador en tiempo continuo.

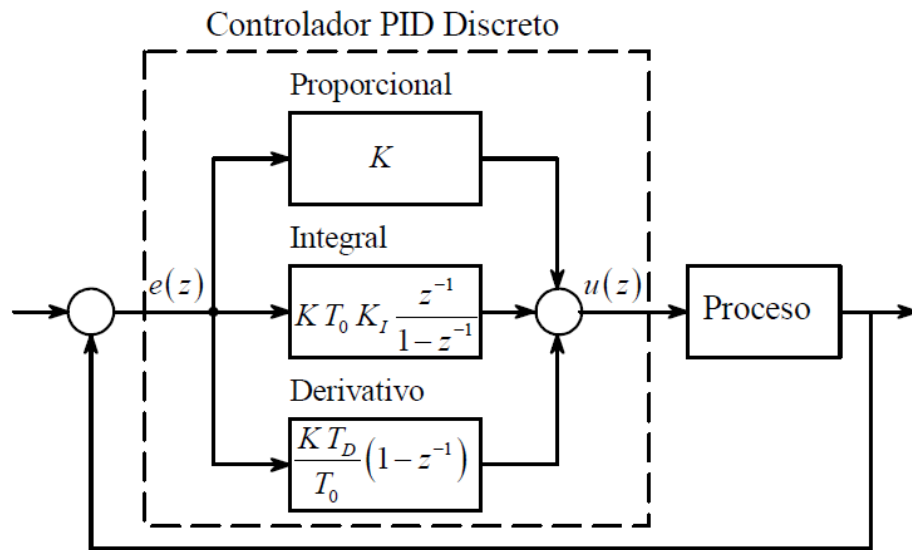


FIGURA 2.7. Estructura del controlador PID discreto. [10]

Desarrollando el diagrama de bloques de la Figura 2.7 se obtiene la señal de control siguientes ecuaciones mostradas a continuación. [13]

$$u(z) = \left\{ \frac{1 * e(z)}{1 - z^{-1}} * \left[ \left( K + \frac{2KT_D}{T_0} \right) + \left( KT_0 K_I - K - + \frac{2KT_D}{T_0} \right) * z^{-1} + \frac{KT_D}{T_0} * z^2 \right] \right\} \quad (2.4)$$

Para facilitar la obtención de la función de transferencia se generan las siguientes constantes: [13]

$$A = \left( K + \frac{2KT_D}{T_0} \right) \quad (2.5)$$

$$B = \left( KT_0 K_I - K - + \frac{2KT_D}{T_0} \right) \quad (2.6)$$

$$C = \frac{KT_D}{T_0} \quad (2.7)$$

Las constantes de las ecuaciones (2.6) (2.7) y (2.8) son reemplazadas en la ecuación (2.4) para generar la función de transferencia de la ecuación (2.8) [13]

$$G(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{A + B * z^{-1} + C * z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (2.8)$$

Desarrollando la función de transferencia mostrada en la ecuación (2.8) se obtiene la ecuación en diferencia mostrada en la ecuación (2.9) la misma que para el procesador facilita el tiempo de cálculo y manejo de datos

$$u(k) = u(k - 1) + A * e(k) + B * e(k - 1) + C * e(k - 2) \quad (2.9)$$

En la figura 2.8 se indica los dos caminos para el diseño un controlador digital basándonos en la información obtenida del sistema o proceso a controlar.

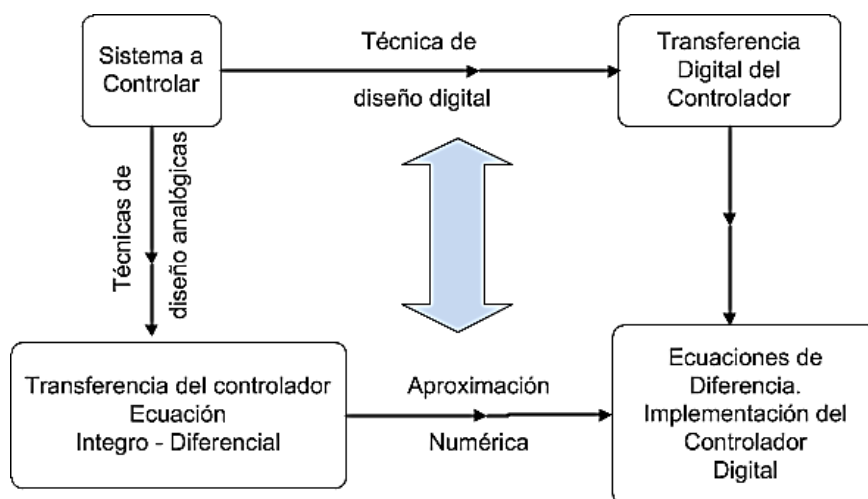


FIGURA 2.8. Opciones para la construcción de un controlador digital [10]

### 2.2.3. SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID

Una vez definido el algoritmo de control y la estructura de control, el siguiente paso es realizar el ajuste o sintonía del regulador, existen varios métodos para realizar dicho ajuste siendo uno de los primeros utilizados el de prueba y error que también se lo conoce como método iterativo de ajuste y error, otro método utilizado es el método directo (por optimización, margen de fase y asignación de polos y ceros) [9] [10]



**Método de ajuste y error:** este método es utilizado cuando se tiene un conocimiento muy básico de sistema a controlar y basa su sintonía en realizar un estímulo a la planta o proceso a controlar y observar cómo responde el proceso a dicho estímulo en función a experiencia del operador se va realizando el ajuste. [9] [10]

Por otra parte dentro del método de sintonía directa se encuentra la:

**Sintonía por Optimización:** este método se fundamenta en el implementado por de Ziegler y Nichols que es el más aplicado para dinámicas no muy complejas y se basa en implementar dos reglas de sintonía las mismas que sintetizamos a continuación: [10]

- En la Figura 2.9 se muestra la primera regla de sintonía que consiste en la aplicación a sistemas en lazo abierto un estímulo tipo escalón cuya respuesta temporal forma una especie de letra S a esta respuesta se le calcula la pendiente, y donde se intersecan dicha pendiente con el punto de inflexión y el eje de las abscisas (eje de tiempo) se determina el retardo equivalente.

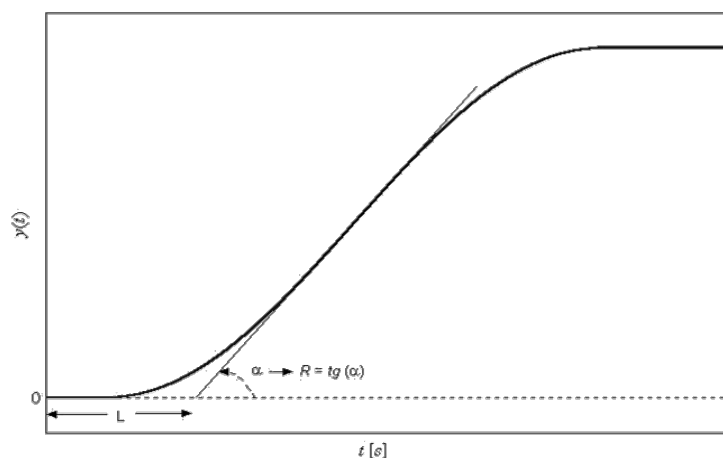


FIGURA 2.9. Determinación de la pendiente ( $R$ ) y retardo equivalente ( $L$ ) [10]

A partir de los parámetros  $R$  y  $L$  de la figura 2.9 se puede definir la constante de tiempo y el retardo del sistema equivalente de primer orden, tabla 1

PARÁMETRO DE SINTONIZACIÓN PID	CONSTANTE	VALORES
P	$K_P$	$K_P = \frac{1.2}{R * L}$
I	$T_i$	$T_i = 2 * L$
D	$T_d$	$T_d = \frac{1}{2 * L}$

TABLA: 1. Primera regla: Parámetros para la sintonización de controladores PID según criterio de Ziegler y Nichols [10]

Con los valores de la tabla 2 se puede determinar los parámetros para la sintonización de controladores PID a la cual se lo denomina **ciclo limite** se basa en recopilación de información obtenida debido a las condiciones límites de estabilización del sistema, dichas condiciones se obtuvieron

implementando un controlador netamente proporcional y se efectuaron en lazo cerrado, donde se denomina  $K_c$  a la ganancia crítica que conduce al sistema al límite de la inestabilidad, así como el parámetro  $P_c$  es el periodo de oscilación para esta condición límite de inestabilidad. Ziegler y Nichols sugieren los siguientes valores para sintonización del controlador PID [9]

PARÁMETRO DE SINTONIZACIÓN PID	CONSTANTE	VALORES
P	$K_P$	$K_P = 0,6 * K_C$
I	$T_i$	$T_i = \frac{1}{2 * P_C}$
D	$T_d$	$T_d = 0,125 * P_C$

*TABLA: 2. Segunda regla: Parámetros para la sintonización de controladores PID según criterio de Ziegler y Nichols [10]*

### 2.3. CONTROL ADAPTATIVO

El termino adaptativo define el cambio de comportamiento conforme se presentan nuevas circunstancias. Entonces como definición de un regulador adaptativo se puede manifestar que es aquel que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a perturbaciones presentes dentro del proceso, aplicado en lazo cerrado, logrando de esta forma que el sistema o proceso conserve sus características de diseño requeridas o mantenga una consigna deseada.

El control adaptativo es un tipo de control dedicado a procesos con dinámicas no lineales en general y a procesos que tienden a variar sus parámetros con el tiempo, y esto posibilita que el estado del proceso sea separado en dos escalas de tiempo que reaccionan a diferente velocidad. La escala lenta corresponde a los cambios de los parámetros y por consiguiente a la velocidad con la cual los parámetros del regulador son modificados, y la escala de tiempo rápida que corresponde al lazo de realimentación negativa compuesto por el proceso y el controlador. [25]

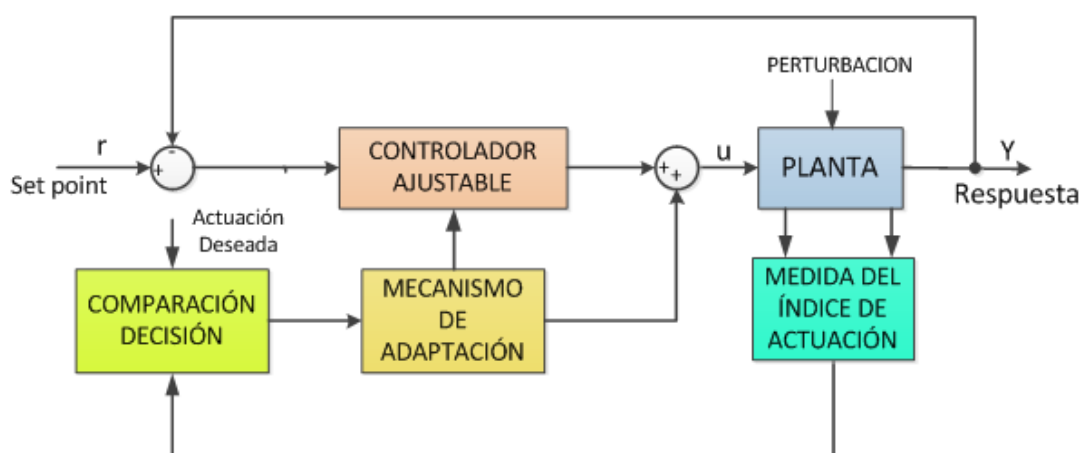


FIGURA 2.10. Configuración básica de un controlador adaptativo [25]

En la figura 2.10 se muestra la estructura básica de un controlador adaptativo que como ya se mencionó está formado por dos lazos, el lazo de realimentación y el lazo de adaptación teniendo para este último como principales elementos el mecanismo de adaptación que es justamente el que modifica y ajusta los parámetros del regulador, también consta de un elemento denominado comparación y decisión que es el que se encarga de comparar el índice de medición deseado y la medida del índice de actuación

de la planta o proceso y de esta forma obtener el error que es enviado al mecanismo de adaptación para que se regule el controlador de forma óptima y en tiempo real. [15]

Dentro de los tipos de controlador adaptativo podemos citar los siguientes:

- Controlador adaptativo con modelo de referencia MRCA
- Control adaptativo por ganancias programadas
- Control adaptativo auto ajustables STR

### **2.3.1. CONTROL ADAPTATIVO CON MODELO DE REFERENCIA**

El control adaptativo por modelo de referencia fue implementado para sistemas continuos este modelo tiene aspectos importantes como la presencia del modelo de referencia que es el encargado de determinar la función de transferencia en lazo cerrado de la planta o sistema a controlar, como podemos apreciar en la figura 2.11 existen dos tipos de lazo, un lazo interior de ajuste de parámetros y un lazo exterior de regulación, también una etapa de pre alimentación que ingresa a la planta la señal obtenida del modelo de referencia. [25] [15]

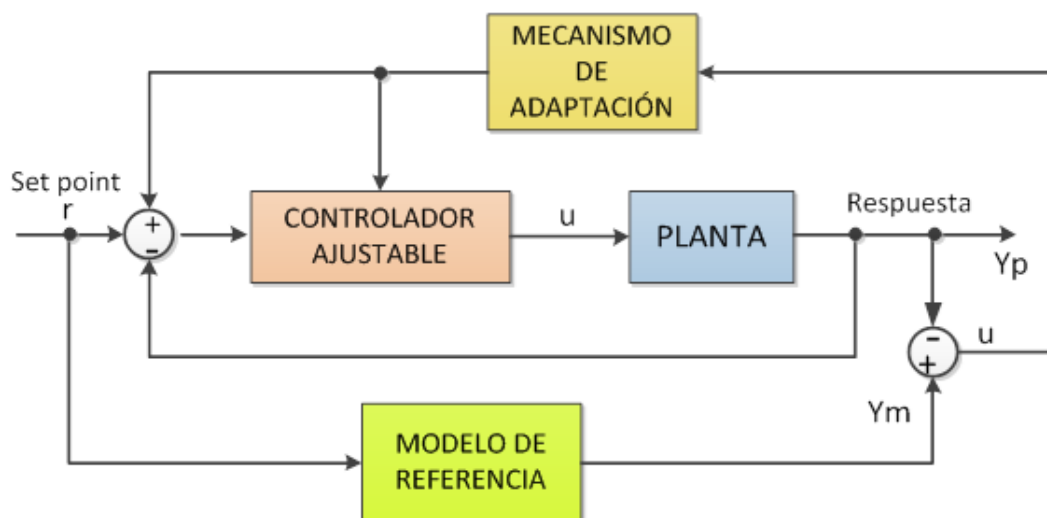


FIGURA 2.11. Diagrama de bloques para un controlador adaptativo con modelo de referencia [25]

### 2.3.2. CONTROLADOR ADAPTATIVO POR GANANCIAS PROGRAMADAS

Como ya es conocido por nosotros las dinámicas de los sistemas cambian en función del punto de operación en el que éste se encuentre al momento de tomar una acción de control, principalmente ocurre esto por las no linealidades inherentes del proceso. [14] [15]

Es por tal motivo que se introduce la técnica del controlador por ganancias programadas (*gains scheduling*), la misma que es una estrategia que se encarga de compensar estas no linealidades, mediante la implementación de un controlador lineal en el cual sus parámetros varían dependiendo de las condiciones de operación. [15]

El plus para diseñar e implementar un controlador por ganancias programadas consiste en determinar las variables que se usan para variar los

parámetros del controlador lineal, también llamadas variables de programación. [14] [15]

El procedimiento a seguir para el diseño de un controlador por ganancias programadas es el siguiente: [14]

- Definir las variables de programación
- Definir puntos de operación del sistema
- Seleccionar estructura del controlador lineal
- Diseñar controladores en cada punto de operación
- Obtener el polinomio característico del sistema a controlar
- Evaluar los resultados obtenidos
- Validar los resultados obtenidos
- Implementar el controlador.

En la Figura 2.12 se encuentra el diagrama de bloque de la estructura de un controlador por ganancias programadas.

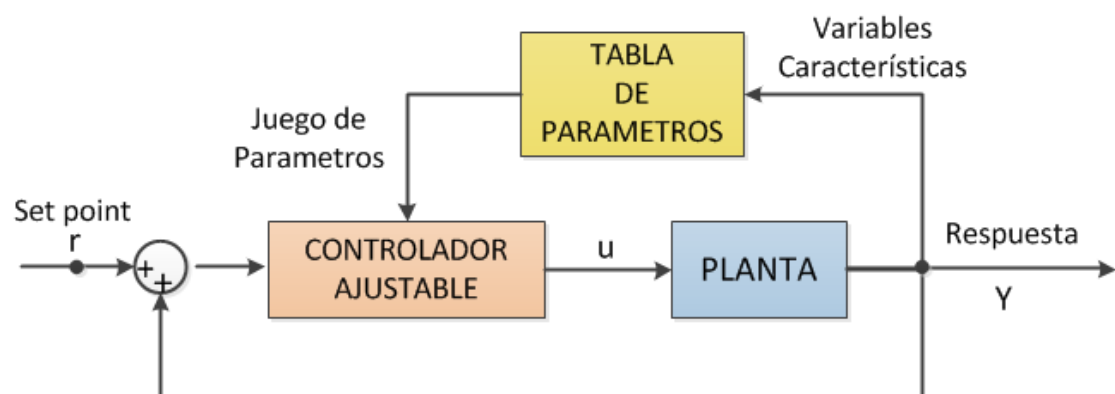


FIGURA 2.12. Diagrama de bloques de un lazo de control por ganancias programadas [25]

En la ecuación (2-10) que representa la señal de control incluye la variable programada ( $V_p$ ). [14]

$$u(t) = K_p(V_p) * e(t) + K_i(V_p) \int_0^t e(t) + K_d(V_p) * \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

### 2.3.3. CONTROLADORES AUTOAJUSTABLES STR

En la Figura 2.13 se muestra los elementos que conforman el controlador autoajustable en el cual se observa tres lazos, el primero de ellos es el algoritmo recursivo de estimación de parámetros, el mecanismo de adaptación y el regulador con parámetros ajustables.

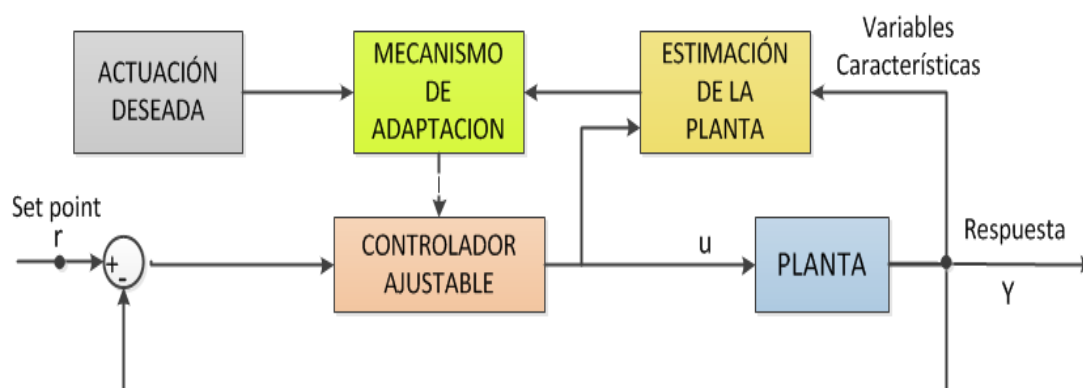


FIGURA 2.13. Diagrama de bloques para un controlador adaptativo de ganancias programadas. [25]

El objetivo de los controladores adaptativos autoajustables es aplicarlo a muchos problemas de control para procesos o sistemas que no son considerados como problemas de control estocástico. [15]



## 2.4. CONTROL EN CASCADA

El control en cascada tiene dos o más lazos de control los mismos que están conectados en forma interna y externa y sirve principalmente para obtener una respuesta más rápida de la planta en estudio y de esta forma también alargar la vida útil de los equipos. En la figura 2.14 se muestra una estructura del control por cascada. [14] [25]

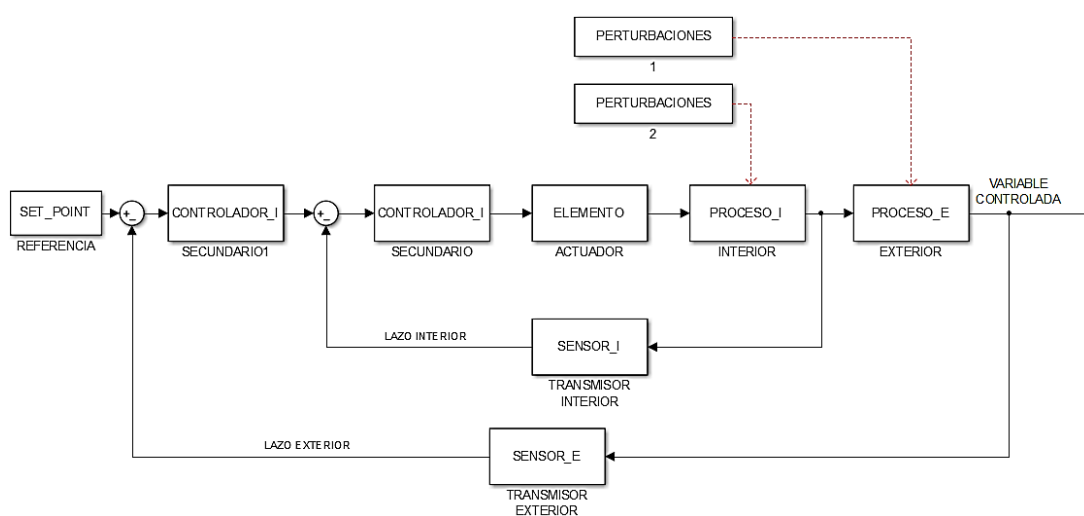


FIGURA 2.14. *Diagrama de bloques de un sistema de control en cascada* [15]

## 2.5. IDENTIFICACIÓN

Antes de desarrollar el procedimiento de identificación de sistemas es necesario conocer la calidad de señales que tiene el sistema a identificar ya que de esto depende el éxito al momento de obtener un modelo identificado, así como identificar las posibles perturbaciones (ruidos) presentes en las señales que hayan al momento de la operación del sistema ya que estas formaran parte del modelo por lo cual se deben utilizar todo tipo de filtros posibles para eliminar este tipo de señal, también hay que considerar la

presencia de largos tiempos de retraso (tiempos muertos) que se generan al momento de realizar las correspondientes mediciones. [16]

En la Figura 2.15 se muestran las señales más utilizadas para realizar la identificación como son la señal tipo escalón, señal senoidal o señal pseudoaleatoria



FIGURA 2.15. Señales más utilizadas para identificación de sistemas.[16]

Identificar sistemas es obtener un modelo matemático al sistema o proceso a controlar, también se la conoce como “modelado experimental”, para lo cual al sistema se considera como una caja negra en lazo abierto sin despreciar las perturbaciones [17]

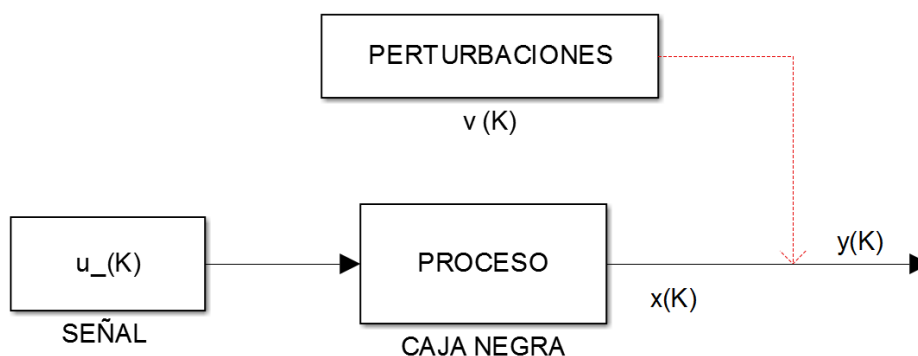


FIGURA 2.16. Estructura para identificar sistemas tipo caja negra [17]

Dentro de los tipos de respuesta del sistema identificado al introducir un tipo de señal pueden ser del tipo sobre-amortiguada o del tipo sub-amortiguada a

esta última también se la conoce como respuesta oscilatoria como se muestra en Figura 2.17 [17]

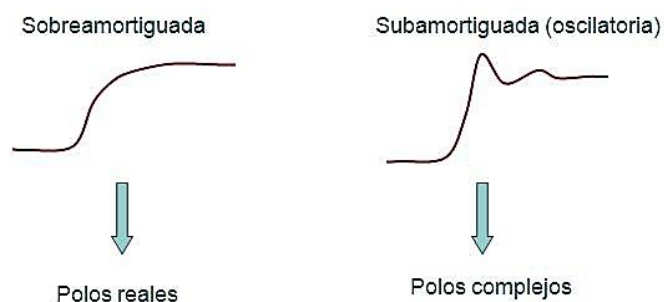


FIGURA 2.17. Tipo de señales de respuesta de la identificación. [17]

Como podemos observar en la Figura 2.17 por lo general las respuestas del tipo sub-amortiguadas de un proceso presentan una mayor velocidad de respuesta, pero presentan como inconveniente la sobreoscilación.

Dentro de los múltiples métodos utilizados para realizar la identificación de sistemas tenemos los métodos paramétricos y no paramétricos estos últimos se describirán con más detalle: [16]

### 2.5.1. MÉTODOS NO PARAMÉTRICOS:

Se fundamenta en el análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia o de la correlación o en el análisis espectral. Dentro de este método tenemos los siguientes casos: [16]

#### 2.5.1.1. Respuesta a una entrada especial

La señal más simple que puede utilizarse para la identificación es la tipo escalón mostrada en la Figura 2.15, con esta señal se obtiene modelos

sencillos y muy aceptables en procesos mono variables y no muy perturbados de este tipo de identificación se obtienen modelos de primer orden con retardo, modelos de segundo orden aperiódicos con retardo o modelos de segundo orden sub-amortiguados con retardo, la elección de uno de estos modelos depende de la forma de la curva obtenida en una respuesta transitoria real así como el grado de precisión que desea dar al ajuste. [16] [17]

#### **2.5.1.2. Método basado en la correlación**

Este método establece la relación entre las funciones de auto-correlación y correlación cruzada de las variables de entrada y salida de un sistema lineal, la señal de entrada debe ser una señal de ruido blanco con esto se consigue que las desviaciones con respecto al punto de operación deben ser valores que no exciten las no linealidades y que la relación señal ruido sea aceptable para que no afecte la condición de identificabilidad. Se emplea un medio computacional para la aplicación de este tipo de señal que se genera como una secuencia de ceros y unos o también denominadas secuencias de aperturas y cierres de la válvula la cual es denominada como señal PRBS mostrada en la Figura 2.18, el software matlab tiene un módulo de identificación donde con el comando `idinput` se genera dicha señal, la estructura de esta señal es `IDINPUT(N, PRBS, BANDA, NIVELES)` donde `N` es la cantidad de muestras que se necesitan generar, `PRBS` el tipo de señal que se desea generar, `BANDA` es el vector fila `[min;max]` que determina los límites de la amplitud de la señal de control; `NIVELES` es el vector que

determina los valores que abarca el espectro de frecuencias de la señal pseudoaleatoria generada [17].

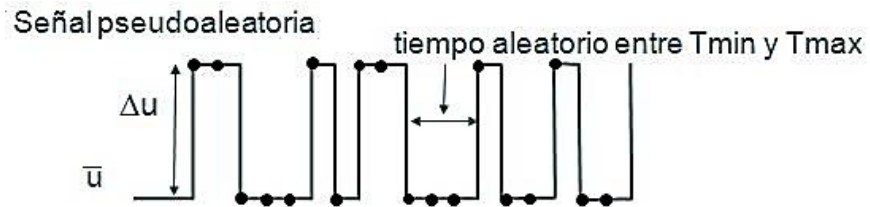


FIGURA 2.18. Señal PRBS [17]

### 2.5.2. MÉTODOS PARAMÉTRICOS:

Para aplicar estos métodos se requieren de una posible estructura de modelo, de un criterio de ajuste de parámetros y por último de una estimación de los parámetros que mejor ajusten el modelo a los datos obtenidos por experimentación, dentro de este tipo o modelo de identificación se tiene las siguientes opciones [16]

- Método de mínimos cuadrados
- Método de variables instrumentales
- Método de error de predicción
- Método de identificación recursiva
- Identificación global

#### 2.5.2.1. MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Este método de identificación consiste en obtener el equivalente discreto de un sistema continuo lineal. Para ello se debe especificar el periodo de muestreo y el intervalo de valores continuos que equivalen a un mismo valor discreto. [17]

Aplicando la transformada Z se obtiene la función discreta del sistema (211).

[17]

$$G(z) = \frac{b_1 * z^{-1} + b_2 * z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2.11)$$

$$\Delta y_k + a_1 \Delta y_{k-1} + a_2 \Delta y_{k-2} = b_1 \Delta u_{k-1} + b_2 \Delta u_{k-2} \quad (2.12)$$

El problema de identificación se basa en obtener los valores  $a_1$ ,

$a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  conocidos [17]

$$\Delta u_0, \Delta u_1, \dots, \Delta u_N \quad Y \quad \Delta y_0, \Delta y_1, \dots, \Delta y_N$$

#### 2.5.2.1.1. Propiedades del estimador de mínimos cuadrados.

- **Modelo ARX.**

$$\Delta y_k + a_1 \Delta y_{k-1} + a_2 \Delta y_{k-2} = b_1 \Delta u_{k-1} + b_2 \Delta u_{k-2} + e_k$$

$$\Delta y(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} e(z) = \frac{B}{A} \Delta u + \frac{1}{A} e \quad (2.13)$$

Equivale a introducir a la salida “limpia” una perturbación que es un ruido blanco “e” previamente filtrado por  $1/A(z)$ : [17]

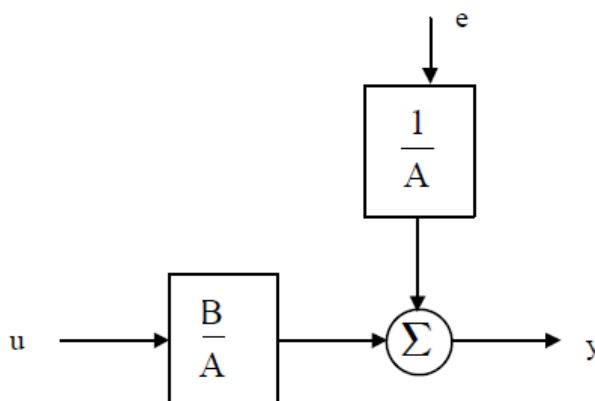


FIGURA 2.19. Modelo de identificación ARX [17]

Esta situación no es cierta, puesto que supone que el valor esperado de los parámetros no tiene sesgo. [16]

- **Modelo OE (OUTPUT ERROR).**

$$\Delta y(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + e(z) = \frac{B}{A} \Delta u + e \quad (2.14)$$

Es decir, que a la salida “limpia” se le suma una perturbación que es directamente un ruido blanco “e”. [17]

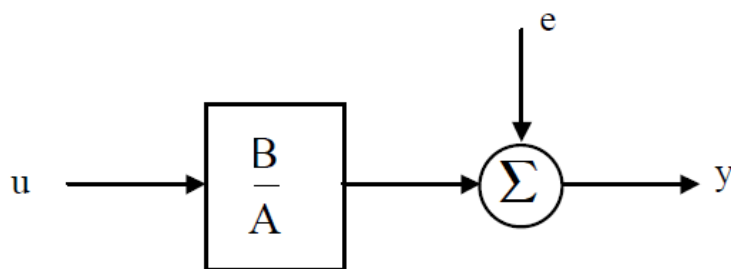


FIGURA 2.20. Modelo de identificación OUPUT – ERROR [17]

Este modelo representa bien la presencia de un ruido de Medida independiente en el sensor. [16]

- **Modelo ARMAX.**

$$\Delta y(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} e(z) = \frac{B}{A} \Delta u + \frac{C}{A} e \quad (2.15)$$

Es decir, que a la salida “limpia” se le suma una perturbación que es un ruido blanco e previamente filtrado por  $C(z)/A(z)$ . [16]

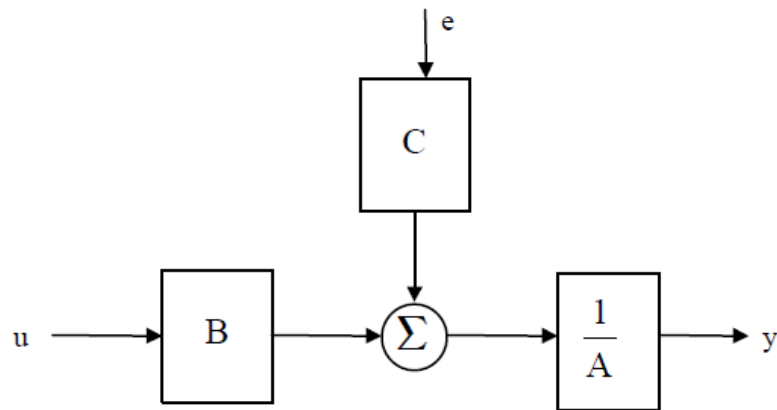


FIGURA 2.21. Modelo de identificación ARMAX [17]



## **CAPÍTULO 3**

### **3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA**

El presente proyecto tiene la principal misión construir un módulo didáctico para instruir a los estudiantes en el manejo de los controladores PID y controladores adaptativo de ganancias programadas, las variables con las cuales se probarán estos controladores serán las variables nivel (h) y caudal (q) considerando que estas variables son las más utilizadas en la industria ecuatoriana, la figura 3.1 muestra el hardware y el sistema hidráulico utilizado.

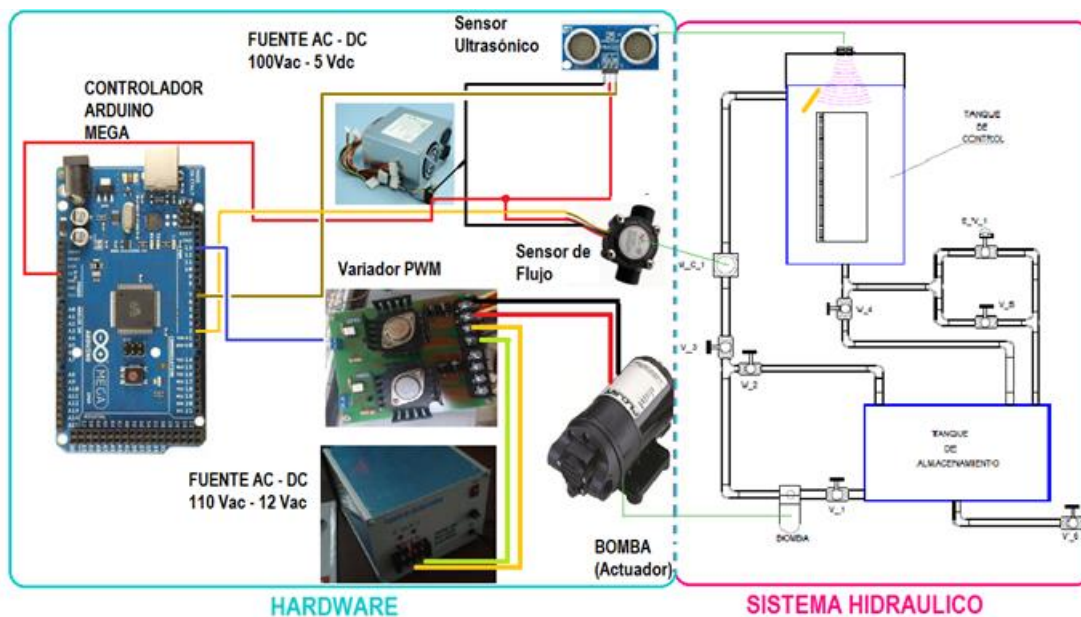


FIGURA 3.1. *Planta en estudio*

### 3.1. SISTEMA HIDRÁULICO

La parte hidráulica consta de dos tanques como se observa en la figura 3.2, el primero denominado tanque de control en donde se realiza el control de nivel, y el segundo tanque denominado de almacenamiento del cual la bomba de desplazamiento positivo (diafragma) tomara el agua para llevarlo al tanque principal y así mantener el punto de operación deseado por el operador del sistema

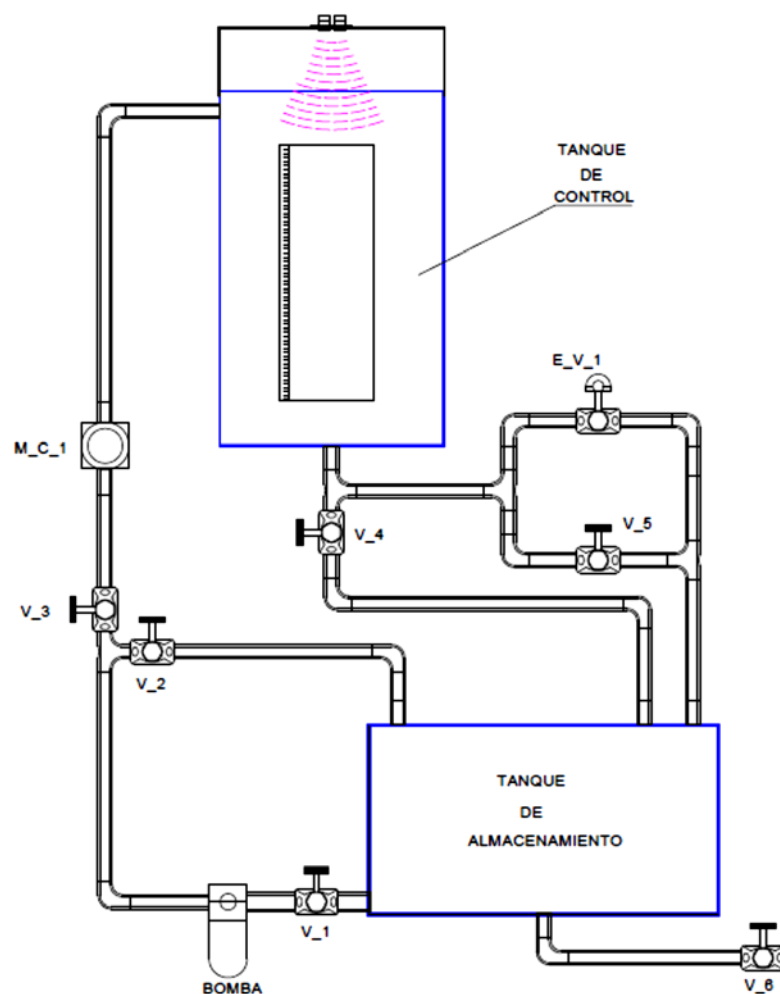


FIGURA 3.2. Sistema Hidráulico

En la figura 3.2 también se observan cada uno de los componentes hidráulicos utilizados en la implementación de este proyecto, en el cual se puede notar que tiene seis válvulas de operación manual denominadas V\_1, V\_3, V\_4, V\_6, (diámetro de ½" NPT) las cuales son utilizadas para controlar el ingreso y salida del agua al tanque principal, mientras que las válvulas V\_2 y V\_5 (diámetro de ½" NPT) son utilizadas para realizar la simulación de las perturbaciones en la entrada y salida de la planta respectivamente.

### 3.1.1. SELECCIÓN Y MONTAJE DE COMPONENTES HIDRÁULICOS

#### 3.1.1.1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

El tanque de almacenamiento de agua que se muestra en la Figura 3.3, está construido en acero inoxidable 304, el factor más influyente para utilizar este tipo de material es el ambiente salino en el que funcionará este tanque, el mismo que tiene un diámetro de 760 mm y una altura de 610 mm, la finalidad de este tanque es tener un almacenamiento de agua lo suficiente como para realizar todas la pruebas correspondientes, para evitar que agentes externos como polvo basura u objetos extraños que puedan ingresar al tanque se instaló una tapa abisagrada (facilitar limpieza interior del tanque) y otra tapa fija,



FIGURA 3.3. *Tanque de almacenamiento de agua*

### 3.1.1.2. TUBERÍAS Y ACCESORIOS

La Figura 3.4 muestra el tipo de tuberías y accesorios hidráulicos implementados en el presente proyecto, y ya que el flujo máximo que se va a transportar por la tubería es de  $190 \text{ cm}^3/\text{s}$  se decide instalar en todo el sistema tubería de  $\frac{1}{2}$ " NPT cedula 40 y como una de las finalidades del proyecto es obtener una planta didáctica con BAJO costo de producción, entonces el material implementado en las tuberías, válvulas y demás accesorios para la instalación hidráulica es de plástico de alta resistencia



FIGURA 3.4. *Tuberías y accesorios hidráulicos*

### 3.1.1.3. BOMBA

Las bombas son consideradas como actuadores del tipo eléctricos, también se definen como el equipo que convierte la energía mecánica en energía hidráulica. En el presente trabajo, la bomba de la Figura 3.5 es el elemento final de control; para lo cual variamos el ingreso de voltaje al motor eléctrico

de esta, con lo que se obtiene el cambio en la masa de flujo ( $Q$ ) de agua que ingresa a la planta. Las características principales de esta bomba son voltaje de entrada 12 voltios de corriente continua, con 7 amperios, el caudal máximo de diseño de esta bomba es de 30 lt/min.



FIGURA 3.5. *Bomba de agua (actuador)*

Para seleccionar la bomba DC se analizaron algunas alternativas las cuales se describen a continuación:

- El sistema bomba monofásica-válvula neumática.- Con este sistema se pretendía mantener constante la alimentación de la bomba y controlar la cantidad de agua que ingresa a tanque de control de nivel con una válvula neumática pero por su alto costo no se seleccionó esta propuesta
- Sistema bomba monofásica y un variador de frecuencia por su costo no se seleccionó esta propuesta.
- Sistema bomba trifásica variador de frecuencia, no fue factible esta propuesta por su costo y por la necesidad de colocar la planta en un

lugar donde se tenga alimentación trifásica, se pretende que la maqueta se la pueda utilizar en un espacio donde se tenga sólo alimentación monofásica.

- Sistema Bomba DC controlador PWM, en las investigaciones realizadas se observó que algunos de los proyectos de control de nivel de tanques utilizan una bomba DC (Bomba FLOJET de 12 V DC) observándose que el comportamiento voltaje de la bomba vs caudal de salida de la misma tienen un alto índice de linealidad por lo que se tomó la decisión de importar este equipo para el proyecto
- La Bomba FLOJET de 12 V DC por tener un motor DC con escobillas y un módulo de diafragma se tiene que tener presente que se le debe dar mantenimiento cada 2 o 3 años

#### **3.1.1.4. VÁLVULAS**

Las válvulas que se utiliza en la planta son del tipo bola (apertura rápida) son plásticas de ½" NPT con rosca en ambos extremos y una unión tipo universal para facilitar el montaje o desmontaje según la necesidad, en esta planta las válvulas cumplen un papel fundamental cuando se trata de generar perturbaciones .



FIGURA 3.6. *Válvulas de operación manual*

### 3.1.1.5. MEDIDOR DE FLUJO

En la figura 3.7 se muestra el medidor tipo turbina, que se ha seleccionado para este trabajo el principio de operación consiste en un rotor que gira de acuerdo a la velocidad del fluido. La rotación de las paletas es detectada por un captador magnético que emite pulsos a cierta frecuencia, los cuales son proporcionales a la razón de flujo volumétrico. Los problemas más comunes de éste medidor se asocian con los elementos de desplazamiento como rodamientos y/o chumaceras, requieren fluidos limpios y con ciertas propiedades lubricantes [26]



FIGURA 3.7. *Medidor de flujo tipo Half [26]*



En las tablas 3 y 4 se muestran algunos criterios para la selección de este sensor, el primero criterio corresponde al rango de medida, el segundo al precio y el tercero al material de fabricación quedando los criterios de selección y la matriz de puntuación de la siguiente manera:

Rango de medición		Precio		Tipo material	
Rango	Puntaje	Rango	Puntaje	Señal	Puntaje
9 dm <sup>3</sup> /min to 162 000 m <sup>3</sup> /h (2.5 gal/min to 1030 gal/d)	1	<\$30	5	Plástico	3
(30-300) cm <sup>3</sup> /s	5	<\$300	4	Aluminio	4
<500 cm <sup>3</sup> /s	2	<\$700	3	Polyurethane; Hard rubber	2
<1000 cm <sup>3</sup> /s	1	Más de \$1000	1	Acero inoxidable	5

TABLA: 3. Criterios de selección del sensor de Caudal



Sensor de caudal	Especificaciones		Evaluación		
	Parámetro	Característica	Puntaje	Peso	Total
 1	Rango de medición	9 dm <sup>3</sup> /min a 162 dm <sup>3</sup> /min	1	0.5	2
	Precio	\$ 4109	1	0.3	0.6
	Material	Polyurethane; Hard rubber	2	0.2	0.4
 2	Rango de medición	1-30 Lt/min	5	0.5	2.5
	Precio	\$30	5	0.3	1.5
	Material	Plástico	3	0.2	0.6

TABLA: 4. Matriz de Puntuación de Sensor de Caudal

De los resultados que se observan en la matriz de puntuación tabla 4 se elige el sensor de caudal YF\_S201, opción # 2, por tener una mejor evaluación en las características del dispositivo

#### **3.1.1.6. TANQUE DE CONTROL**

En la figura 3.6 se observa que este tanque está construido en acero inoxidable 304 tiene un diámetro de 250 mm y una altura de 610 mm, viene provisto de una entrada y salida de agua de ½" NPT, posea una brida rectangular, esta brida tiene una lámina acrílica de 100 mm de ancho x 320 mm de altura con el objetivo de observar todo lo que en su interior ocurre, también está provisto de una escala milimétrica para comparar la altura o nivel de agua dentro del tanque. Dentro del tanque se encuentra soldado una tubería de 40 mm de diámetro conectado al ingreso del agua tiene una longitud de 450 mm se encuentra instalada esta tubería con el objetivo de reducir al mínimo las perturbaciones en la superficie de agua ya que esto causaría falsas lecturas del sensor de nivel, la técnica que se utiliza es la de vasos comunicantes para realizar dichas reducciones a las perturbaciones mencionadas. En la parte superior de este tanque se encuentra una estructura con regulación de altura la misma que sirve para el alojamiento del sensor ultrasónico de nivel.



FIGURA 3.8. *Tanque de control*

### **3.1.2. PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD DEL SISTEMA HIDRÁULICO**

Los tanques y/o recipientes son utilizados para almacenar sólidos y líquidos los mismos que deben garantizar la estanqueidad con respecto al medio exterior y de esta forma evitar posibles contaminaciones. Es por esto que las pruebas de estanqueidad están orientadas a la búsqueda de fugas en los componentes de un sistema, máquina y/o equipo instalados para un determinado proceso.

Dentro de nuestro trabajo se realizó el siguiente procedimiento para determinar la óptima estanquidad del proceso:

- Una vez concluido la construcción del tanque de almacenamiento de agua mostrado en la figura 3.3 se procedió a llenarlo de agua a su máxima capacidad para verificar que no

existan fugas en los cordones de soldadura, llenado a determinar que no existían ninguna.

- Construido el tanque de control se procedió a llenarlo de agua y se detectó que tenía una fuga por la soldadura en el nexo de ingreso de agua hacia el tanque, entonces se vació el tanque y se corrigieron las fugas, se llenó nuevamente el tanque de agua y se determinó la no presencia de fugas.
- Una vez instalada la bomba, tuberías, válvulas, accesorios y sensor de caudal se procedió a llenar de agua el tanque de almacenamiento y se probó la bomba a plena carga con lo cual se verificó la existencia de fugas en las juntas de las tuberías y accesorios que conforman el sistema hidráulico, estas pruebas permitieron concluir que toda la instalación se encuentra lista y sin fugas.

### **3.2. HARDWARE DE CONTROL.**

Para la selección de los componentes a utilizar en la implementación del hardware, se analizó algunas características técnicas, tales como: precio, disponibilidad en el mercado local, rangos de funcionamiento (en función a la planta didáctica), y también los tipos de señales de entrada / salida que necesitan, las tablas 5 y 6 muestran estas características de algunos dispositivos, la evolución de cada tabla se la realiza mediante el uso de matrices de puntuación de los dispositivos. Para armar las matrices de

puntuación se necesita definir los criterios de evaluación que permitan ponderar el peso de cada una de las características de los elementos, de tal manera que al final se tenga un peso total por cada elemento, seleccionándose aquel de mayor peso total en la tabla. A continuación se presentan las matrices: criterios de evaluación y la matriz de puntuación de cada dispositivo.

### 3.2.1. SENSOR DE NIVEL

Uno de los objetivos principales de este proyecto, es el control de nivel, por tal motivo este sensor es de gran importancia para el desarrollo de esta tesis, en función a la maqueta que se ha desarrollado figura 3.2 el alcance de este es debe permitir realizar mediciones de 0 a 60 cm, por lo tanto el primer requerimiento que se debe considerar es el nivel (rango de operación), precio y el tipo de señales que entrega.

Rango de medición		Precio		Tipo material	
Rango	Puntaje	Rango	Puntaje	Señal	Puntaje
2-100 cm	5	<\$30	5	Plástico	3
30-100 cm	4	<\$300	4	Aluminio	4
<300 cm	2	<\$700	3	Semi conductor	2
<500 cm	1	Más de \$1000	1	Acero inoxidable	5

*TABLA: 5. Criterio de selección del Sensor de Nivel*

	Especificaciones		Evaluación		
	Parámetro	Característica	Puntaje	Peso	Total
 <p><b>873C</b> Salida analógica o discreta</p>	Rango de medición	30cm-100cm	4	0.5	2
	Precio	\$ 500	3	0.3	0.6
	Material	Plástico	3	0.2	0.4
	Rango de medición	2cm-300cm	5	0.5	2.5
	Precio	\$20	5	0.3	1.5
	Material	Plástico	3	0.2	0.6

*TABLA: 6. Matriz de Puntuación de sensor de Nivel*

De los resultados que se observan en la matriz de puntuación se elige el sensor de nivel ultrasónico PING\_Parallax por tener una mejor evaluación en las características del dispositivo

### 3.2.2. CONTROLADOR (TARJETA DE CONTROL) DE NIVEL

Para seleccionar esta tarjeta controladora se tomó consideración la cantidad de señales digitales y analógicas que el sistema necesita leer y escribir para producir un control óptimo, así como también el precio del mercado local.

En la Figura 3.9 se observa la tarjeta controladora que se ha seleccionado para implementarla en la planta, en donde se instalarán los algoritmos de control, esta tarjeta se denomina Arduino Mega 256 la cual nos brinda la posibilidad de tener 54 E/S digitales, 12 entradas analógicas, 12 salidas tipo PWM una de las cuales se necesitan para la tarjeta de fuerza del control de

voltaje DC de la bomba, 2 salidas analógica tipo (DAC) y los puertos de comunicación que se necesitan para la implementación del SCADA del sistema

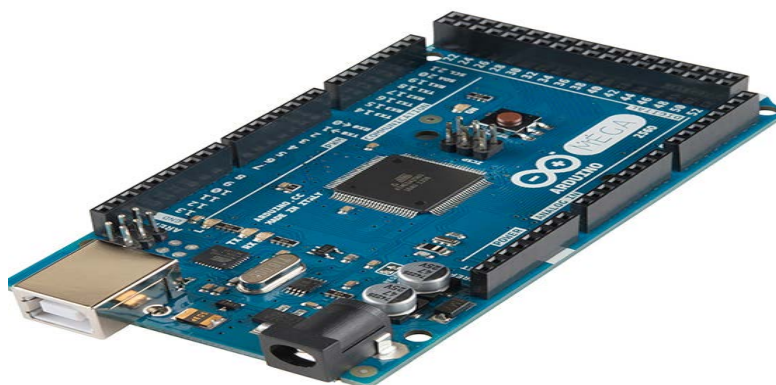


FIGURA 3.9. Tarjeta de control ARDUINO MEGA

### **3.2.3. SELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD PARA LA BOMBA**

Se realizó el pedido de un variador de voltaje DC para la bomba FLOJET de 12 V DC a los proveedores de equipos industriales a nivel nacional y no se encontró este equipo, por tal motivo se tomó la decisión de realizar el diseño de una tarjeta de fuerza que controle el voltaje DC de la bomba por medio de modulación de ancho de pulso (PWM), y el diseño e implementación se detallan en la sección 3.4.3

### **3.2.4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 5 VOLTIOS**

La fuente de alimentación seleccionada es de tipo ATX es una fuente que se encuentran fácilmente en el mercado, es utilizada en el ensamblaje de computadoras, tienen buena demanda en el mercado y el costo es bajo.

En la Figura 3.10 se puede notar los diferentes tipos de voltajes con sus capacidades de corriente que genera la fuente, así como también los colores de los conductores en los cuales se pueden tener estos voltajes. Los elementos que se conectan a esta fuente de alimentación serán los sensores de nivel y caudal más la tarjeta de control ARDUINO MEGA.

Las fuentes ATX tienen canales de alimentación de +12,-12,+5,-5,3.3 voltios



FIGURA 3.10. Fuente de alimentación del tipo ATX [21]

### 3.3. ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO

#### 3.3.1. FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 12-24 VOLTIOS

La fuente de alimentación que se ha desarrollado para el circuito de fuerza del sistema, es de dos canales, de 12-24 voltios respectivamente, con la fuente de 12 voltios se alimenta la tarjeta de fuerza para la bomba, y con la



fuentes de 24 voltios se alimenta el sensor de caudal. Considerando los datos técnico de la bomba 84 watt con una alimentación de 12 voltios DC la fuente debe entregar por lo menos 7 amperios, en este diseño se considera un valor de 150 watt para que opere al 50% la fuente de alimentación.

En la Figura 3.11 se presenta el circuito que se ha implementado para la fuente de 12 voltios, los parámetros de los elementos del circuito se calibraron en el simulador multisim para que pueda soportar la carga (bomba)

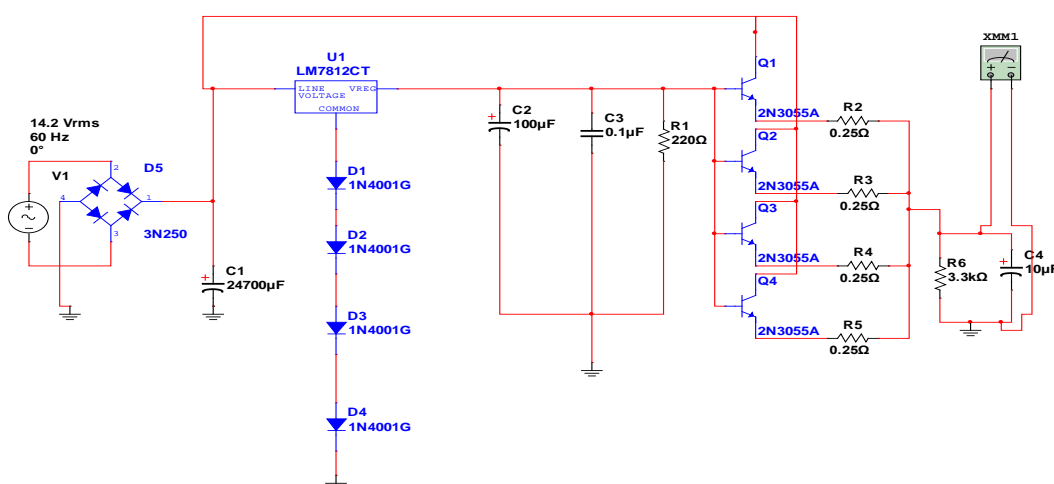


FIGURA 3.11. Circuito de la fuente 12 voltios DC

Los elementos que se utilizaron en el diseño de la fuente de 12 voltios son:

**DATOS:**

4 Transistores 2N33055

$C1 = 24700 \mu f (50v)$

$C2 = 100 \mu f (50v)$

$C3 = 0.1 \mu f (50v)$

$C4 = 10 \mu f (50v)$

$R1 = 220 \Omega (1/2w)$

$R2 \equiv R5 = 0.25 \Omega (1/2w)$

$R6 = 3.3 K\Omega (1/2w)$

4 diodos rectificadores de 20 A

Transformador (120/14VRMS 150 Watt)

Regulador de voltaje LM7812

En la figura(3.12) se muestra el circuito implementado para la fuente de alimentación de 24 voltios DC

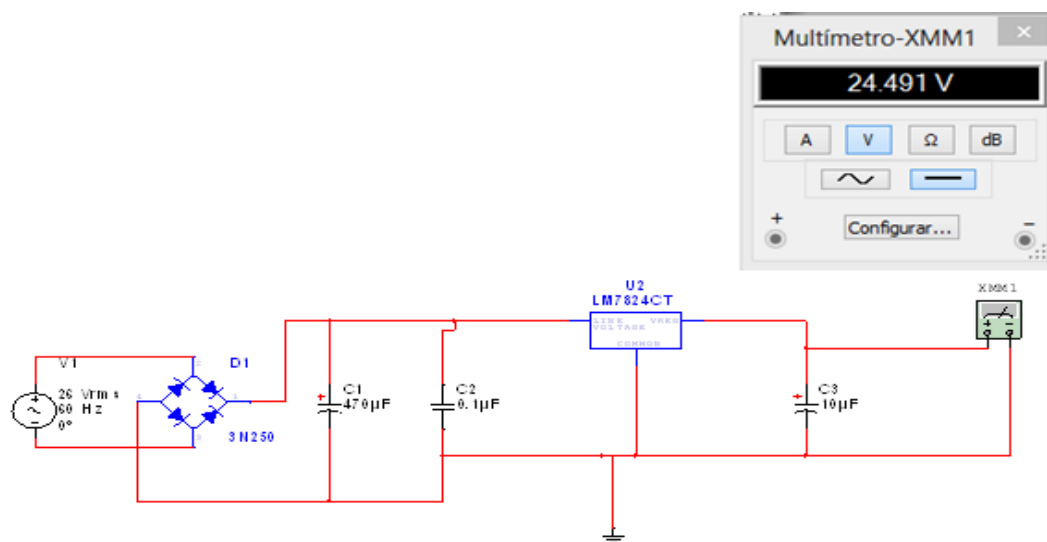


FIGURA 3.12. Diagrama de la fuente de alimentación de 24 Vdc.

Los elementos utilizados en la implementación de la fuente de 24 voltios DC son:

DATOS:

$$C1 = 470 \text{ uf}(50\text{V})$$

$$c2 = 0.1 \text{ uf}(50\text{V})$$

$$c3 = 10\text{uf}(50\text{V})$$

regulador de voltaje LM7824

entrada del secundario = 26 VRMS

En la Figura 3.13 se muestra la implementación de la fuente de 12 / 24 Vdc.,



FIGURA 3.13. Fuente de voltaje doble con salida de +Vdc. y -Vdc.

### 3.3.2. CIRCUITO DE FUERZA PWM

El circuito de fuerza que se ha implementado se lo diseñó con la ayuda del simulador multisim, en este simulador se realiza todas las calibraciones de los elementos que intervienen en el circuito para que pueda soportar la carga(bomba)

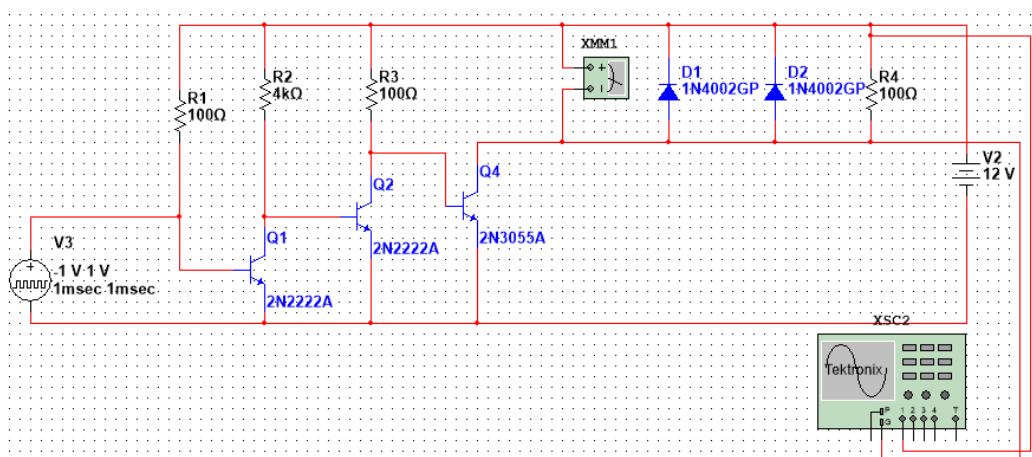


FIGURA 3.14. Diseño del variador de velocidad (PWM)

Los materiales utilizados en la implementación son::

1. Dos transistores 2N2222A
2. Dos resistencias de 100 ohmios dos watt
3. Una resistencia de Kohmios medio watt
4. Dos diodos de potencia
5. Un transistor de potencia 2N3055A
6. Una fuente de alimentación de 12 voltios 10 Amperios

Los transistores que aparecen en el circuito trabajan en las zonas de corte y saturación respectivamente generando una onda cuadrada en la resistencia

La figura 3.16 muestra la simulación para un código de 100 en el PWM, se ha colocado como ancho de pulso ("Pulse width") en V3 el valor de 0.81, eso quiere decir que el ancho de pulso es de 81% de todo el periodo.

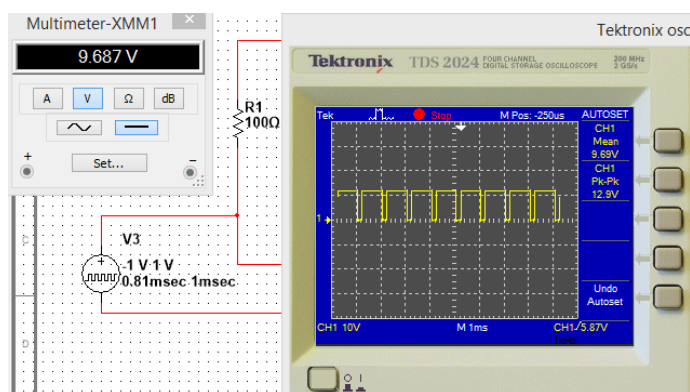


FIGURA 3.15. Ancho de pulso de la señal PWM para el variador de velocidad

Se aplicó a la planta real el mismo código de 100 en PWM, las señal de respuesta en la bomba se tomó con un osciloscopio y se muestran en la figura 3.16 el valor del voltaje DC que se mide es de 9,69 voltios. Con las

figuras (3.14 y 3.15) se puede afirmar que la señal obtenida con el simulador y la señal real son semejantes.

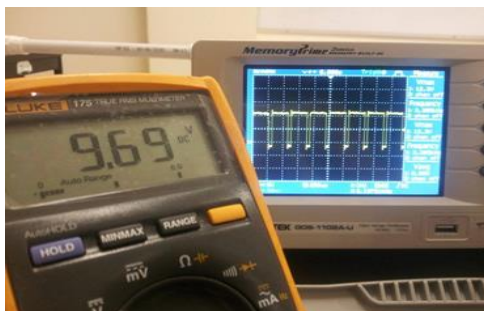


FIGURA 3.16. Señal PWM real con voltaje de 9.69 Vdc aplicado al variador de frecuencia

### 3.4. CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.

En la figura 3.17 se muestra el diagrama de bloques del montaje de cada uno de los componentes eléctricos y electrónicos de este proyecto, se tiene dos sensores, nivel y caudal, los cuales se los ha conectado en los pines 7 y 2 respectivamente del controlador, la fuente de 5 voltios alimenta al controlador y a los sensores, la fuente de 12 voltios alimenta a la tarjeta de fuerza PWM, se observa también el PLC Logo que se ha utilizado como parte fundamental para que el circuito de control eléctrico, tome las decisiones correspondiente del encendido y apagado del módulo, finalmente se tiene el PC en el cual se encuentra almacenado el programa SCADA desde donde el usuario le da la orden del punto de operación en el cual debe operar la planta.

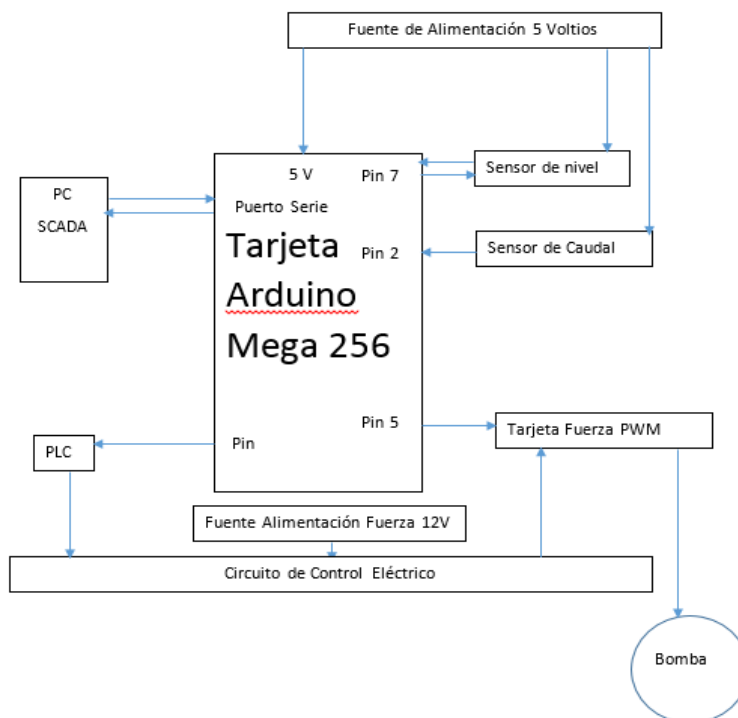


FIGURA 3.17. *Montaje eléctrico y electrónico de entradas y salidas para el control de nivel*

### 3.4.1. CIRCUITO SENSOR DE NIVEL

Este circuito que permite medir el nivel del agua en el tanque de control se muestra en la figura 3.18 tenemos dos tarjetas que intervienen en determinar la medida del nivel, una será la tarjeta controladora Arduino mega 256, la cual se encargará a través de la función nivel (anexo 5) de medir el nivel del tanque, y la tarjeta del sensor ultrasónico PING PARALLAX .

La tarjeta del sensor PING PARALLAX se conecta al pin 7 de la tarjeta arduino y recibe una polarización de 5 voltios de la fuente de alimentación ATX Figura 3.10

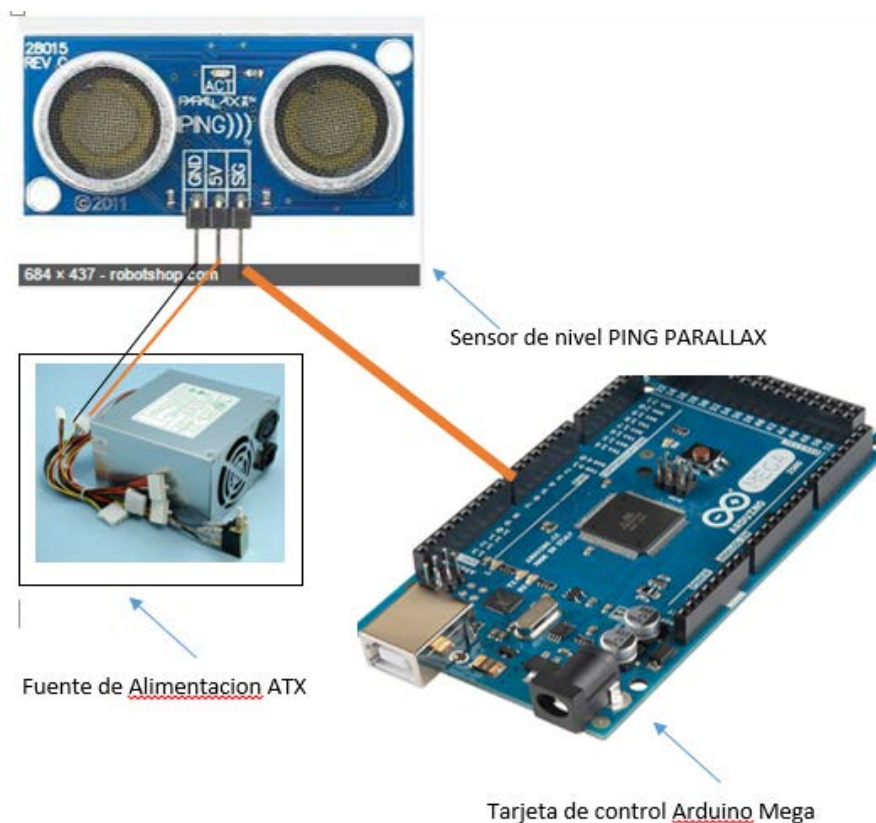


FIGURA 3.18. *Conexión eléctrica del sensor de nivel y el controlador*

#### 3.4.1.1. Configuración de la señal del sensor de Nivel

El sensor Ultrasónico Ping\_Parallax tiene un conector de tres pines, de los cuales dos se utilizan para la alimentación (5 voltios) y el tercer terminal cumple dos funciones: da inicio a la lectura del nivel de agua en la planta, y proporciona un pulso cuyo ancho es proporcional al nivel del agua en el tanque, la secuencia de configuración de la señal en este último terminal es:

Primeramente debe ingresar al sensor un pulso (Stuart pulso) de ultrasonido de frecuencia superiores a las audibles al ser humano, la duración debe de ser por lo menos de 2 micro segundos, esta señal

será enviada por el pin 7 de la tarjeta de control arduino a través de la función nivel (anexo 5). Una vez enviada esta señal, la tarjeta del sensor emite una ráfaga de pulsos Figura 3.20 (sonido sonar TX) a través del emisor, esta ráfaga de pulsos, rebotaran sobre el agua del tanque Figura 319. Un instante después de haber empezado el envío de la ráfaga, el ping SIG del sensor se colocará en alto, hasta esperar por el rebote (sonido) proveniente desde el agua, que hace que la señal pase a nivel bajo, el programa desarrollado en la tarjeta de control se encargará de medir el tiempo en que la señal SIG permanece en alto, tiempo que será transformado a centímetro utilizando la constante de la velocidad del sonido que es 58 equivalente al tiempo que transcurre en ir y regresar la señal de sonido.

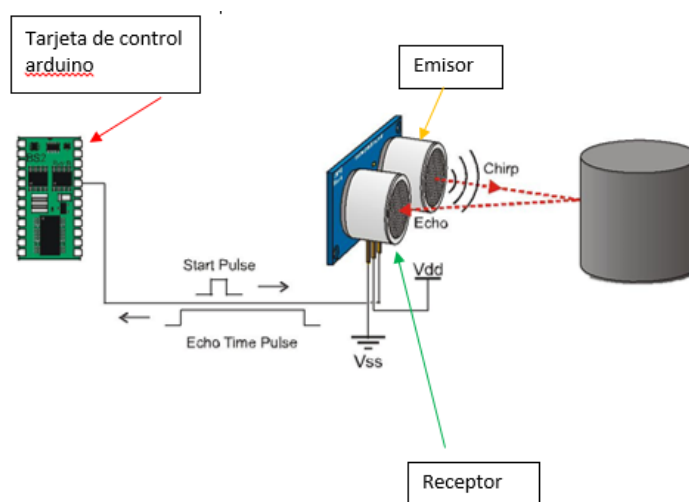


FIGURA 3.19. *Funcionamiento del sensor de nivel para emisión y recepción de señal de ultrasonido.*



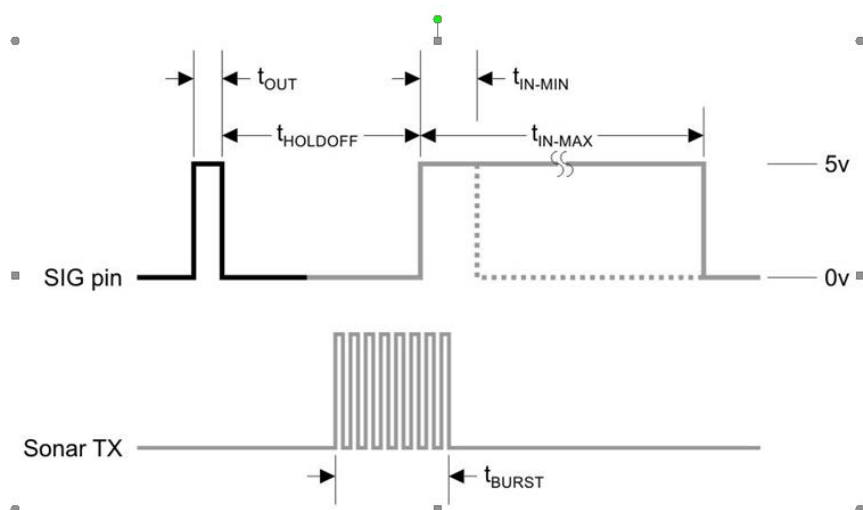
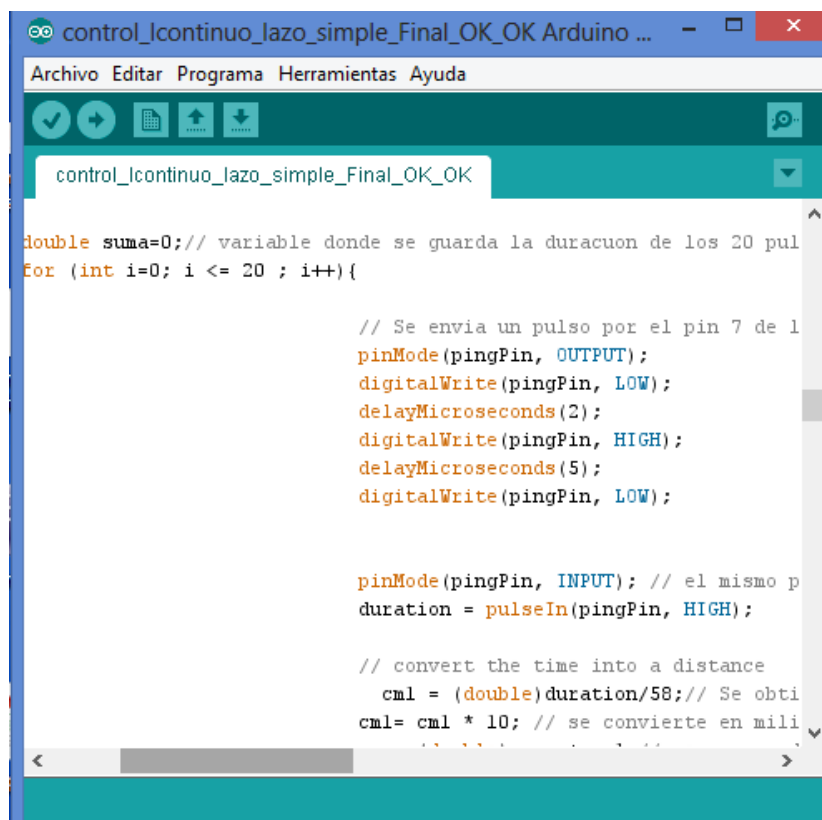


FIGURA 3.20. *Rafa de pulso emitido por el sensor ultrasónico.*

Como se puede observar en la Figura 3.20 el nivel de voltaje de la señal SIG es 5 voltios y no es necesario realizar transformaciones de nivel de voltaje ya que la tarjeta de control soporta este nivel de tensión,

#### 3.4.1.2. Programa de lectura del sensor de nivel

En la Figura 3.21 se puede observar las líneas de código necesarias, para que la tarjeta de control envíe la señal de pulso al terminal SIG del sensor que dará inicio a la lectura del nivel



```

control_lcontinuo_lazo_simple_Final_OK_OK
double suma=0;// variable donde se guarda la duracuon de los 20 pul
for (int i=0; i <= 20 ; i++){

    // Se envia un pulso por el pin 7 de l
    pinMode(pingPin, OUTPUT);
    digitalWrite(pingPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(pingPin, HIGH);
    delayMicroseconds(5);
    digitalWrite(pingPin, LOW);

    pinMode(pingPin, INPUT); // el mismo p
    duration = pulseIn(pingPin, HIGH);

    // convert the time into a distance
    cml = (double)duration/58;// Se obti
    cml= cml * 10; // se convierte en mili

```

FIGURA 3.21. Algoritmo para lectura del sensor de nivel

En el código del programa primeramente se configura el pin 7 como salida para enviar al sensor la señal de pulso de duración 5 microsegundos, la secuencia de pulso es: enviar un cero a este pin de 2 microsegundos, seguidamente se envía un alto de duración 5 microsegundos, nuevamente se envía un cero con lo que se genera la señal de la Figura 3.22 que da inicio a la lectura del sensor de nivel

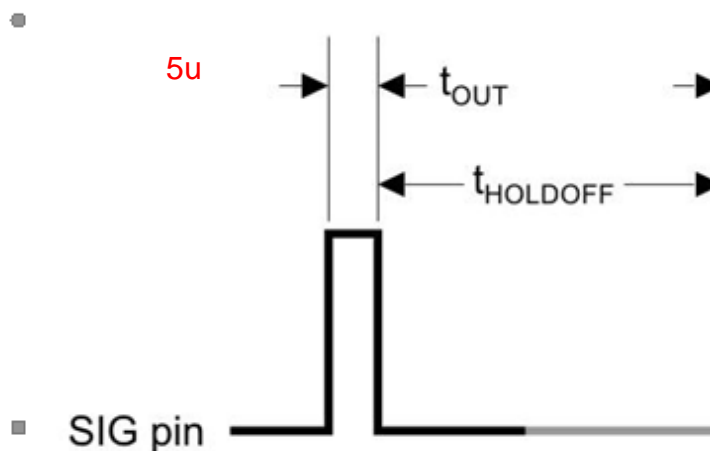


FIGURA 3.22. Duración del pulso del sensor de nivel

Una vez enviados este pulso se configura el pin 7 de la tarjeta de control arduino como entrada para leer el ancho de pulso de la señal SIG del sensor, utilizando la función `pulseIn` la cual permite medir el tiempo que la señal SIG se encuentra en alto, finalmente en la variable `cm1` se almacena la conversión de este tiempo a centímetro, se utiliza en la conversión la constante de la velocidad del sonido que en este caso es 58 ya que la distancia recorrida por los pulsos (sonido) es el equivalente en ir y regresar la señal [19]. Las líneas de código para esta función se encuentran en los anexos

Para mejorar la precisión de la medida del nivel del agua se tomarán 20 muestras, se lo realiza con el lazo `for` de 20 iteraciones, luego se obtendrá el promedio de estas muestras y se enviará al controlador como señal medida.

### 3.4.2. CIRCUITO SENSOR DE CAUDAL

Este circuito sensa la cantidad de agua que ingresará al tanque (caudal), tiene dos tarjetas que intervienen en el sensado del caudal como se observa en la Figura 3.23, una será la tarjeta controladora Arduino mega 256, la misma que se encarga a traves de la funcion llamada cuadal (anexo 6) de medir el caudal del liquido que ingresa al tanque, y la tarjeta del sensor YF\_S201 que dará una señal de pulso por cada revolucion que dé su turbina, con la frecuencia de rotacion de la turbina se determina el caudal que circula por la tubería

La tarjeta del sensor YF\_S201 se conecta al ping 2 de la tarjeta arduino y recibe una polarización de 5 voltios de la fuente de alimentacion ATX.

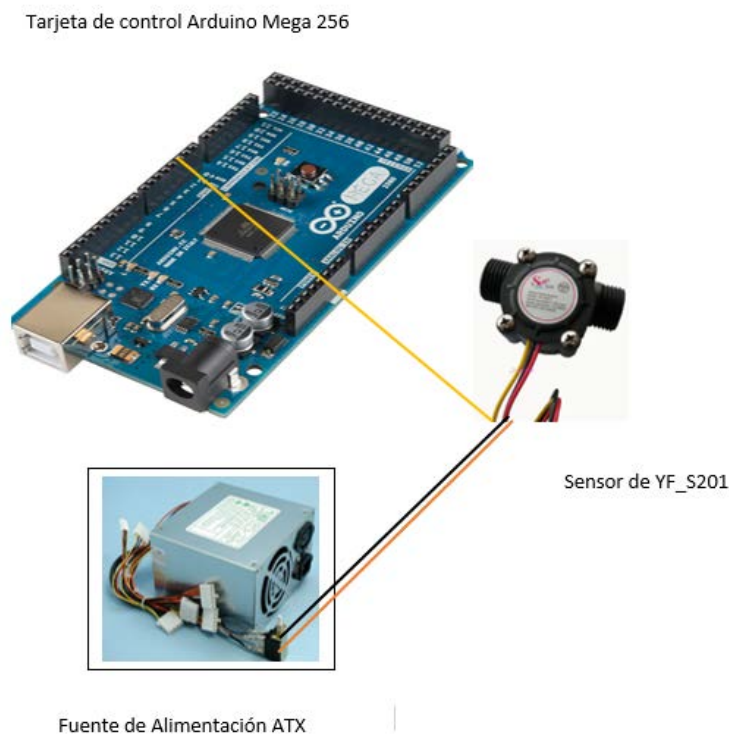


FIGURA 3.23. *Conexión eléctrica del sensor de caudal con el controlador*

### 3.4.2.1. Configuración de la señal del sensor de Caudal.

Como se observa en la Figura 3.24 este sensor tiene tres terminales, dos para la polarización del sensor, terminal rojo para la potencia y negro terminal de tierra (5-24 VDC) y el terminal amarillo (respuesta del sensor), en el que aparecen pulsos cuya frecuencia es proporcional a la cantidad de líquido que pasa por este.



FIGURA 3.24. *Sensor de caudal tipo Half [25]*

Los pulsos provenientes del sensor de caudal se conectan al terminal 2 de la tarjeta de control como se muestra en la figura 3.22, para que con la función caudal del software del controlador (anexo 6) se mida la frecuencia de los pulsos y con esta la cantidad de agua que pasa por la tubería de ingreso de la planta.

El nivel de voltaje de estos pulsos es de 5 voltios, valor que es soportado por la tarjeta arduino.

### 3.4.2.2. Programa de lectura del sensor de Caudal

En el anexo 7 se puede observar las líneas de código y el algoritmo que se usa en la función caudal, para que la tarjeta de control mida la

frecuencia de los pulsos del sensor de caudal. Se contará la cantidad de pulso que se generan en 400 milisegundos con esto se calcula el caudal en la planta.

### 3.4.3. CIRCUITO VARIADOR DE VELOCIDAD DE LA BOMBA (PWM)

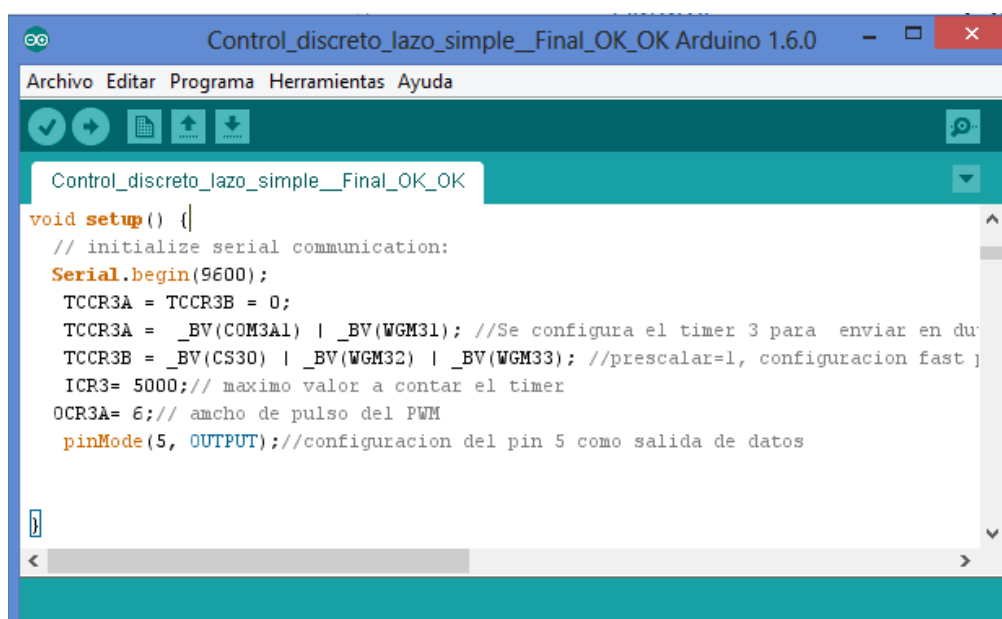
El control de velocidad de la bomba se lo realiza con la técnica modulación por ancho de pulso(PWM) el diseño de la tarjeta (figura 3.25) se lo desarrollo en la sección 3.3.2 La señal PWM será enviada por el controlador (pin5) del sistema a travez de la funcion PWM del software (anexo7),



FIGURA 3.25. *Conexión eléctrica del variador de voltaje (PWM) de la bomba con el controlador*

Se realizó pruebas de funcionamiento de la tarjeta diseñada colocando varios valores de PWM a la tarjeta los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 7. La columna VA de representa el voltaje DC que se mide a la entrada de la interface de fuerza, la columna VB representa el voltaje DC que se mide a la salida de la interface de fuerza (voltaje de la bomba), Vf representa el

voltaje de la fuente de alimentación  $Q_{in}$  es el caudal de ingreso y  $H$  es la altura en el tanque cuando la planta se ha estabilizado. Cómo se puede observar se utilizan un rango de voltaje en la bomba desde 10.11 voltios a 8.16 voltios, aproximadamente 1.95 voltios para controlar los 30 cm del tanque lo que hace que cada código digital del PWM provoque saltos de 8 mm de punto a punto de tal manera que si se requiere saltos más pequeños 1 mm se necesita una salida PWM de más cantidad de bit para provocar variaciones de voltaje más pequeños en la salida de la tarjeta de control. Para mejorar la resolución en el código PWM se utilizó el timer 3 del arduino el cual se configuró para que opere como salida de 16 bit de tipo PWM el detalle de la configuración (figura 3.26) se encuentran en el anexo 2



```
Control_discreto_lazo_simple_Final_OK_OK Arduino 1.6.0
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Control_discreto_lazo_simple_Final_OK_OK
void setup() {
  // initialize serial communication:
  Serial.begin(9600);
  TCCR3A = TCCR3B = 0;
  TCCR3A = _BV(COM3A1) | _BV(WGM31); //Se configura el timer 3 para enviar en du
  TCCR3B = _BV(CS3D) | _BV(WGM32) | _BV(WGM33); //prescalara=1, configuracion fast
  ICR3= 5000; // maximo valor a contar el timer
  OCR3A= 6; // amcho de pulso del PWM
  pinMode(5, OUTPUT); //configuracion del pin 5 como salida de datos
}
```

FIGURA 3.26. Código de programación para la Configuración del temporizador 3 como PWM

SEÑAL PWM	VA	VB	VF	Qin	H
27	0.442	10.11	12.33	552-560	29.6
28	0.458	10.03	12.32	552-560	28.8
29	0.473	9.98	12.32	544-552	27.4
30	0.488	9.95	12.33	536-544	25.6
31	0.507	9.90	12.33	528-536	24.9
32	0.523	9.85	12.33	528-536	24.2
33	0.540	9.80	12.34	520-528	23.5
34	0.556	9.77	12.35	520-528	22.6
35	0.572	9.74	12.35	520-528	22.8
36	0.589	9.69	12.35	520-528	22.2
37	0.605	9.66	12.36	520-528	21.5
38	0.619	9.57	12.33	512-520	20.7
39	0.637	9.51	12.34	512-520	19
40	0.648	9.47	12.34	504-512	18.7
41	0.669	9.42-9.43	12.34	504	16.9
42	0.685	9.38	12.35	496-504	16.2
43	0.702	9.33	12.35	496-504	15.9
44	0.718	9.29	12.36	496-504	15.6
45	0.734	9.24	12.36	496	15.3
46	0.750	9.21	12.36	488-496	14.7
47	0.768	9.15	12.36	488-496	14.3
48	0.784-0.785	9.12	12.38	488-496	13.1
49	0.802	9.08	12.38	480-488	12.3
50	0.819	9.03-9.04	12.38-12.39	480-488	12
51	0.834	9.03	12.40	496	13
52	0.851	8.98	12.40	488-496	12.2
53	0.867	8.94	12.41	488-496	11.5
54	0.884	8.90	12.41	480-488	10.9
55	0.900	8.85	12.41	480-488	10.5
56	0.917	8.81	12.42	480	9.6
57	0.933	8.71	12.39	464-472	7.4
58	0.950	8.67	12.41	456-464	5.9
59	0.966	8.63	12.41	456-464	5.4
60	0.982	8.57	12.41	456	4.7
61	0.999	8.53	12.41	456	4.3
62	1.015	8.48	12.41	456	3.9
63	1.032	8.43	12.41	456	3.7
64	1.048	8.39	12.41	448-446	2.9
65	1.063	8.34	12.41	440-448	2.4
66	1.079	8.30	12.42	440-448	1.7
67	1.096	8.25	12.42	440	0.9
68	1.112	8.20	12.42	432-440	0.6
69	1.129	8.16	12.42	432-440	0,0001

TABLA: 7. Datos experimentales en lazo abierto con salida PWM de 8 bit



### **3.5. INTERFACE DE USUARIO**

En la planta didáctica de este proyecto es importante tener una visualización vía software de las variables que intervienen en el proceso tales como: nivel, caudal, señales de controlador y señal de error del controlador etc., también se necesita que el usuario manipule la consigna del punto de trabajo con este objetivo se desarrolló un sistema SCADA bajo ambiente LabView que nos permita realizar todas estas operaciones, con estos antecedentes se desarrolló un sistema que tiene tres pantallas:

- Pantalla Principal
- Pantalla del Controlador Simple
- Pantalla del Controlador en Cascada

#### **3.5.1. PANTALLA PRINCIPAL**

El ambiente grafico de esta pantalla se muestra en la Figura 3.27, aparecen los esquemas de control en lazo simple y en lazo cascada esta pantalla tiene tres botones: el botón que permite ir a la pantalla de control simple, el botón para seleccionar el lazo cascada y el botón que permite ir a la pantalla para que el usuario ingrese las constantes del controlador PID



FIGURA 3.27. Pantalla principal del SCADA

### 3.5.2. PANTALLA DE CONTROL LAZO SIMPLE

En la figura 3.28 se muestra la pantalla que se presenta una vez que se ha presionado el botón control simple de la pantalla principal, en esta se observa que tiene tres ambientes: Uno en el que se muestra las señales que provienen de la planta tales como: set point, nivel, caudal, señal de control y el error que recibe el controlador PID, Un segundo ambiente en donde se presenta un tanque y un indicador de revoluciones, en el que se puede ver la variación del nivel y el caudal respectivamente, conforme se produce el cambio en la planta real, y el tercer ambiente donde el usuario puede cambiar el set point de la planta

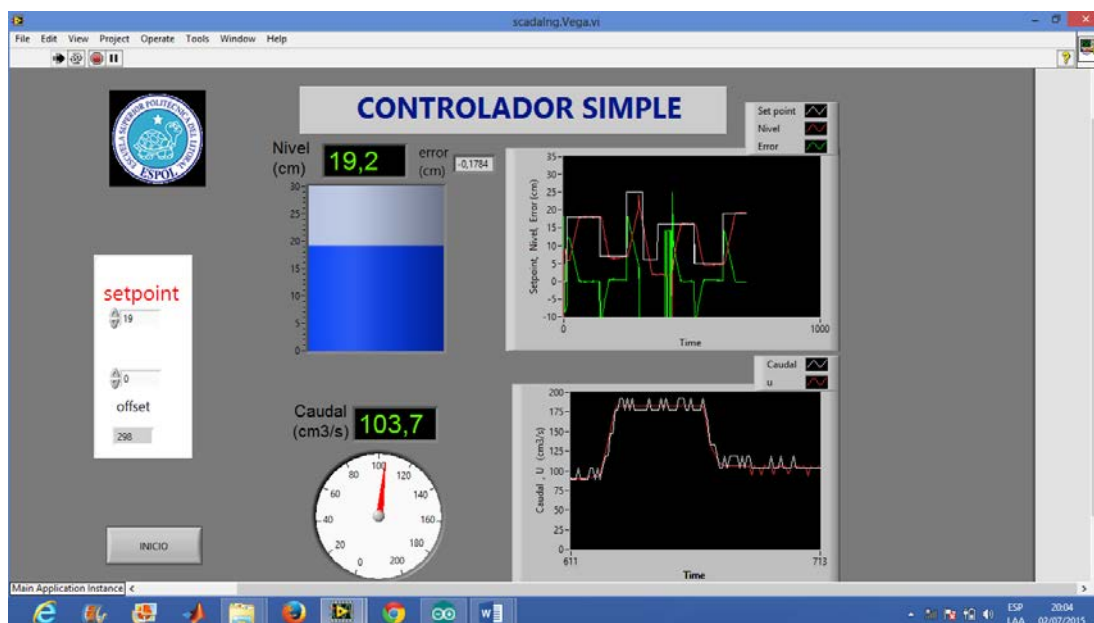


FIGURA 3.28. pantalla del SCADA controlador en lazo simple

En la Figura 3.28 se puede observar que se ha colocado en la planta un setpoint de 19 centímetros, el caudal con el cual la planta opera es de 103  $\text{cm}^3/\text{s}$  y en las gráficas de las señales se puede observar que el setpoint dado por el usuario es alcanzado por el control grafica de color rojo planta real y la señal de color blanco (setpoint) del usuario.

### 3.5.3. PANTALLA DE CONTROL LAZO CASCADA

En la Figura 3.29 se muestra el ambiente grafico que se presenta una vez presionada el botón Control en Cascada de la pantalla principal, en este se observa que tiene tres ambientes: Un ambiente en el que se muestra dos gráficos, en uno se presenta las variables del lazo externo tales como el setpoint nivel y el nivel real de la planta, y en el otro gráfico donde se presenta las variables del lazo interno del controlador cascada las cuales

son: el setpoint (caudal u1) y el caudal real de la tuberías en la entrada de la planta. En el segundo ambiente de la pantalla se presenta un tanque y un indicador de revoluciones, en el que se puede ver la variación del nivel y el caudal respectivamente, conforme se produce el cambio en la planta real, y el tercer ambiente donde el usuario puede cambiar el set point de la planta

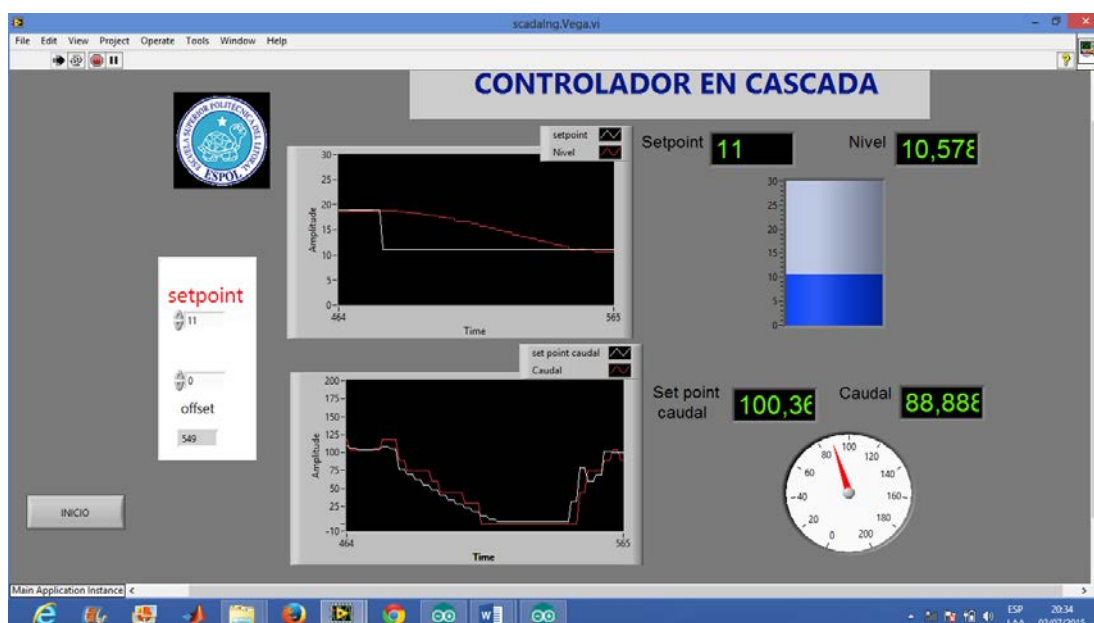


FIGURA 3.29. Pantalla de SCADA controlador en cascada

En la Figura 3.29 se puede observar que el usuario ha colocado un setpoint de 11 centímetros, la planta estuvo operando en un punto de 19 cm y ha bajado al punto de operación de 11 cm, ante este cambio de punto de operación en el grafico se observa que también hay cambios en el caudal de la planta bajando a cero y luego ha tomado un valor de 100 cm<sup>3</sup>/s en donde se ha estabilizado.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. MODELADO DE LA PLANTA**

#### **4.1. MODELADO ANALÍTICO DE LA PLANTA**

Para realizar el diseño de un controlador se necesita tener un modelo matemático de la planta, con el cual, se pueda realizar la simulación y las calibraciones de sus variables. Para determinar la ecuación matemática de cada uno de los componentes del sistema, se realizaron algunas pruebas experimentales, y con estos valores, se calculó las funciones de transferencia de la planta, se ha logrado obtener dos modelos:

1. Modelo lineal
2. Modelo no lineal

##### **4.1.1. MODELO LINEAL DE LA PLANTA**

Con el objetivo de obtener el modelo lineal de la planta se determinará la función de transferencia de los siguientes componentes:

- a) Modelado de actuador
- b) Modelado del sensor Ultrasónico.

- c) Modelado del sensor de caudal.
- d) Modelado del tanque

#### 4.1.1.1. Modelado de actuador

El actuador del sistema consta de la tarjeta de fuerza y la bomba, estos dos elementos serán tratados como un solo componente, para obtener su modelo matemático se utilizan los datos de las pruebas experimentales del anexo 12, En matlab se obtiene la ecuación (4.1) del polinomio que relaciona estos datos (ver anexo 28).

$$PWM=qi*(-24.9585)+4130.1087 \quad (4.1)$$

En la Figura 4.1 se muestra la respuesta obtenida con la ecuación (4.1), y la respuesta real de la planta, la aproximación de estas dos curvas es muy buena, el error entre los valores experimentales y el valor aproximado con el polinomio es mínimo

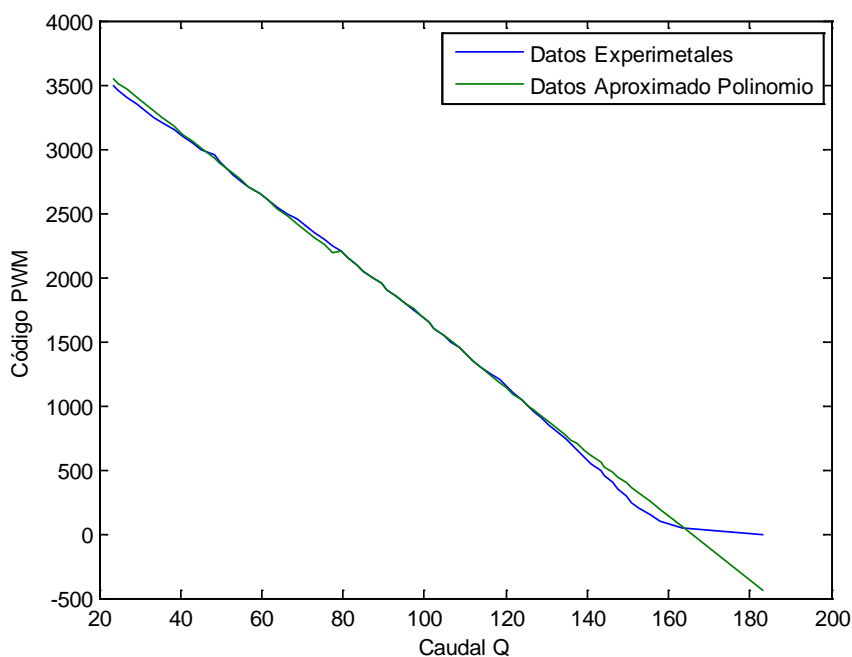


FIGURA 4.1. Gráfica del caudal vs PWM suministrado a la planta

La ecuación (4.1) es la ecuación estática del actuador, se realizó una prueba experimental para obtener el comportamiento dinámico de este, se colocó inicialmente un código PWM de 1995 lo que generó que el caudal del sistema se estabilice en  $86,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , luego se pasó a un código de 1805 en PWM y la salida en la planta tomó un valor de  $92,2 \text{ cm}^3/\text{s}$  de caudal en estado estable en la figura 4.2 se observa la dinámica de esta prueba.

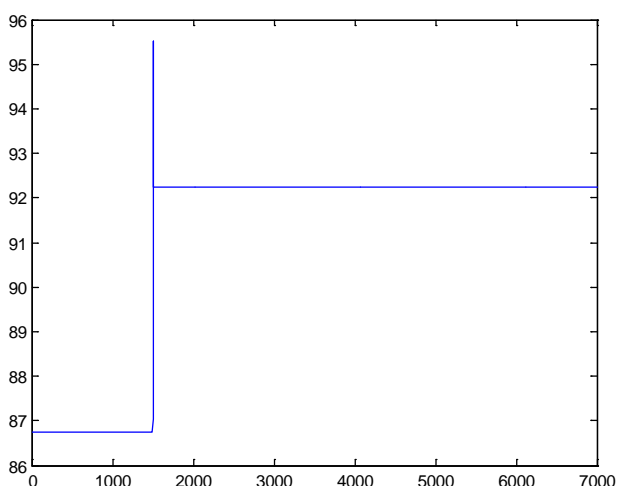


FIGURA 4.2. *Respuesta del Actuador a un estímulo tipo escalón*

Como se puede observar (Figura 4.3) el proceso reacciona de manera aproximada a una función escalón, el tiempo que tarda el sistema en llevar a la planta de  $88 \text{ cm}^3/\text{s}$  a  $92,2 \text{ cm}^3/\text{s}$  es pequeño (aproximadamente 12 segundos) y el sobre nivel es de aproximadamente  $3 \text{ cm}^3/\text{s}$

También se realizó la prueba con este mismo estímulo el PWM de (1995 - 1805) y el resultado se presenta en la Figura 4.3

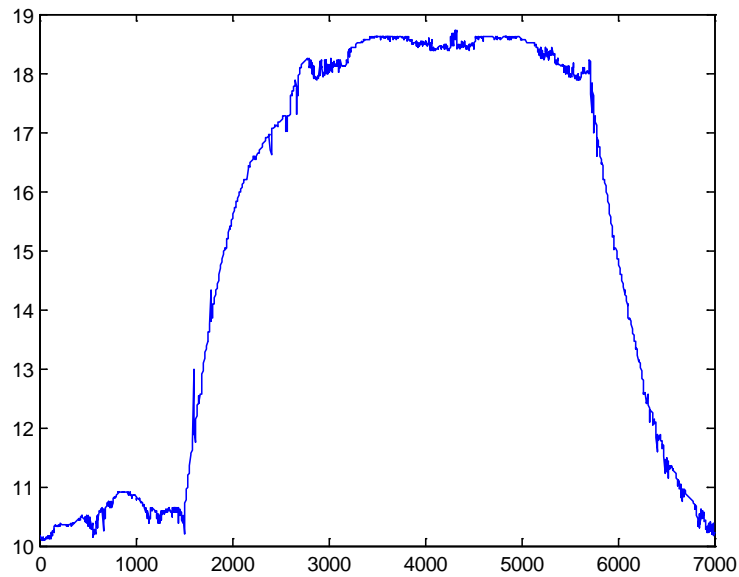


FIGURA 4.3. *Tiempo de estabilización del sistema*

Como se puede observar el sistema se estabiliza en aproximadamente 2000 segundos y tiene la forma de una función exponencial.

Con estas pruebas se tiene como resultado que el tiempo de estabilización del nivel ( $t_{sn}$ ) en la planta, es 142 veces mayor, que el tiempo de estabilización del caudal ( $t_{sq}$ ) de entrada en la dinámica del proceso, con estos resultados la función de transferencia entre código PWM y el caudal de entrada  $Q_i$  ( $Pwm/Q_i$ ) es el correspondiente de la ecuación (4.1a), al realizar la linealización alrededor de un punto de operación el resultado es:

$$Pwm - Pwm_o = \frac{d(q_i * (-24.9585) + 4130.1087)}{dq_i} (q_i - q_i o) \quad (4.1a)$$

Si se reemplaza  $(q_i - q_i o)$  por  $Q_i$  y  $(Pwm - Pwm_o)$  por  $PWM$  la ecuación (4.1b) es la resultante.

$$PWM_{lineal} = -24.9585Q_i \quad (4.1b)$$



Al obtener la transformada de Laplace de esta ecuación (4.1b) y se obtiene la función de transferencia (4.1d)

$$PWM_{lineal}(s) = -24.9585Qi(s) \quad (4.1c)$$

$$Tf = \frac{PWM(s)}{Qi(s)} = -24.9586 \quad (4.1d)$$

#### 4.1.1.1. Modelado del sensor Ultrasónico.

El sensor ultrasónico realiza la medida del nivel en función al ancho del pulso de la señal de respuesta ( $H = (\text{duración del pulso en alto}) / 58$ ) el valor del ancho de pulso es capturado por la tarjeta de adquisición de datos y da como respuesta la distancia por lo tanto la función de transferencia del sensor será considerada como uno ( $G=1$ ). [34][35]

#### 4.1.1.1. Modelado del sensor de caudal.

Al igual que el sensor de nivel, este sensor mide la cantidad de agua que pasa por las tuberías dando como respuestas un tren de pulsos cuya frecuencia es proporcional al caudal (la fórmula de conversión caudal= (frecuencia /7.5)\*60)).

Internamente el software del controlador realiza esta medida por lo que la función de transferencia de este sensor también será considerada como uno:

Función de transferencia del sensor de caudal su ganancia es:  $G=1$

#### 4.1.1.2. Modelado del tanque

En el tanque principal tiene un caudal de ingreso  $qi$  y un caudal de salida  $qo$ , la ecuación (4.3) típica de balance de masa usada en modelos de un tanque es: [23]

$$A \frac{dh}{dt} = qi - qo \quad (4.3)$$

En donde A es el área de la sección transversal del tanque, su diámetro es de 25.5 cm por lo tanto el valor del área se lo determina con las ecuaciones (4.4, 4.5 y 4.6) [23]

$$A = \pi * R^2 \quad (4.4)$$

$$A = \pi * \left(\left(\frac{25.5}{2}\right)^2\right) \quad (4.5)$$

$$A = 510,7 \text{ cm}^2 \quad (4.6)$$

La ecuación de **qo** depende del tipo de flujo de la salida, el mismo que puede ser de tipo laminar o turbulento, para determinar qué tipo de flujo que se tiene en la planta, se calcula el número de Reynolds, si al calcular este número, se obtiene un valor menor a 3000 el flujo será de tipo laminar ( $qo = K * h$ ), si este valor se encuentra entre 3000 y 4400 el flujo es entre laminar y turbulento, pero si es mayor a 5000 es de tipo turbulento ( $qo = K_v * \sqrt{h}$ ), la ecuación (4.6) es la fórmula para calcular el número de Reynolds es: [23]

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\eta} \quad (4.6)$$

Con los datos de la planta:

$\rho = 997.13 \text{ Kg/m}^3$  correspondiente al fluido que es agua a una temperatura de 25 grados centígrados

$D = 16 \text{ mm}$  correspondiente al diámetro de la tubería

$v = 910,44 \text{ cm/s}$  cuando la bomba se alimenta con su máximo valor de voltaje

$v = 412.935 \text{ cm/s}$  cuando la bomba se alimenta con su mínimo valor de

voltaje  $\eta = 0.000891 \text{ kg/m}_s$  Viscosidad del fluido (agua a 25 grados centígrados)

Reemplazando estos valores en la ecuación (4.6) se obtiene que el número de Reynolds es 16302 para la máxima capacidad de la bomba, para la velocidad baja de la bomba (punto de operación de 10 cm en lazo abierto) este número es 6751, por lo tanto la ecuación de  $q_o$  en el modelo es para un flujo de tipo turbulento ecuación (4.7).

$$q_o = K_v * \sqrt{h} \quad (4.7)$$

En donde  $K_v$  es la constante de la válvula y  $h$  es el nivel en el tanque principal  
Al reemplazar el valor de  $q_o$  en la ecuación (4.3) se genera la ecuación (4.8)  
[23]

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - K_v * \sqrt{h} \quad (4.8)$$

El valor de  $K_v$  se lo obtiene con los valores de cada punto de operación de la planta en lazo abierto, una vez estabilizada la planta el término  $A \frac{dh}{dt}$  en la ecuación (4.8) es cero no hay variación de  $h$  (ecuación 4.9), por lo tanto el valor de  $K_v$  se lo obtiene con la ecuación (4.9a)

$$q_i - K_v * \sqrt{h} = 0 \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow K_v = \frac{Q_{i\_operacion}}{\sqrt{h\_operacion}} \quad (4.9a)$$

$Q_{i\_operacion}$  y  $h\_operacion$  son los valores de caudal y altura del nivel en estado estable, en la linealización de la ecuación (4.8) serán considerados

valores constantes,  $K_v$  ha sido calculado para cada punto de operación de la planta los mismos que se muestran en el anexo 17.

La ecuación (4.8) representa un sistema no lineal, al linealizar este sistema alrededor del punto de operación, se obtiene la ecuación (4.10) [23]

$$A \frac{dH}{dt} = Qi - K_v * \frac{1}{2*\sqrt{h_{op}}} H \quad (4.10)$$

Si se reemplaza la ecuación (4.9a) en la ecuación (4.10) se obtiene la ecuación (4.11),

$$ASH(s) = Qi(s) - \frac{Q_{i\_operacion}}{2*h\_operacion} H(s) \quad (4.11)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (4.11) se generan las ecuaciones (4.12 a 4.13) con estas ecuaciones se obtiene la función de transferencia (ecuación 4.15) del tanque de control [23]

$$ASH(s) + \frac{Q_{i\_operacion}}{2*h\_operacion} H(s) = Qi(s) \quad (4.12)$$

$$H(s) \left( AS + \frac{Q_{i\_operacion}}{2*h\_operacion} \right) = Qi(s) \quad (4.13)$$

$$\frac{H(s)}{Qi(s)} = \frac{1}{\left( AS + \frac{Q_{i\_operacion}}{2*h\_operacion} \right)} \quad (4.14)$$

Aplicando la ecuación (4.14) a cada punto de operación de la planta se obtiene las funciones de transferencias para todos estos puntos, en el anexo 18 se consolidan estos resultados.

Para un punto de operación ( $h_{op} = 17.5$  cm;  $q_{op} = 90.3$ ), si se aplica la ecuación (4.14) se obtiene la función de transferencia (ecuación 4.15) de la planta en este punto.

$$\frac{H(s)}{Qi(s)} = \frac{1}{(510,7S + 2,579)} \quad (4.15)$$

La ecuación (4.15) representa la función de transferencia del Sistema lineal en el punto de operación 17.5 cm

Con las funciones de transferencia de todos los elementos del sistema se determina la función de transferencia del modelo lineal de la planta, considerando como entrada el caudal de entrada ( $Q_i$ ) y como salida la altura de tanque ( $h$ ), por lo tanto la función de transferencia de la planta está representada en la Figura 4.4

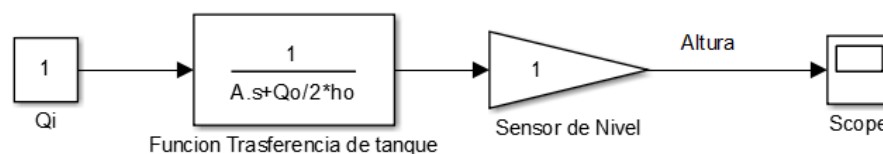


FIGURA 4.4. *Diagrama de bloques para la simulación del modelado de la planta*

Los valores de  $Q_0$  y  $h_0$  corresponden a los valores que toman el caudal y la altura en el tanque en el punto de estabilización en lazo abierto.

#### 4.1.2. MODELO NO LINEAL

Para determinar el modelo no lineal de la planta se utilizó la ecuación (4.3), en esta ecuación se necesita una función para el caudal de salida ( $q_o$ ), la misma debe relacionar el caudal de salida ( $q_o$ ) con la altura del tanque ( $h$ ). La aproximación de la función para  $q_o$  se la realiza con un polinomio utilizando matlab, se necesita tener una tabla de datos de la altura del tanque con su respectivo valor de caudal de salida, se tomaron datos experimentales en 61 puntos de operación (planta en estado estable) en el que se mide la altura del tanque y el caudal de entrada, como no se puede medir el caudal

en la salida de la planta, se aproxima a través del caudal de entrada ( $q_i$ ), en estado estable se cumple que  $q_o=q_i$  con lo cual se tienen los datos de  $h$  con su respectivo  $q_o$ (ver anexo 18). La ecuación del polinomio de grado 10 que relaciona estos datos se presentan en la ecuación (4.16).

$$q_o = a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3 + a_4h^4 + a_5h^5 + a_6h^6 + a_7h^7 + a_8h^8 + a_9h^9 + a_{10}h^{10} \quad (4.16)$$

En donde los valores de los coeficientes de la ecuación son:

$$\begin{aligned} a_0 &= 82.6270565864783 & a_6 &= -0.0000900247768395722 \\ a_1 &= 8.31543200328237 & a_7 &= 1.17084148965381E-06 \\ a_2 &= -3.64128388277439 & a_8 &= 5.45906329778271E-09 \\ a_3 &= 0.640250089807562 & a_9 &= -3.34491409999946E-10 \\ a_4 &= -0.0587217262614073 & a_{10} &= 2.74580210384448E-12 \\ a_5 &= 0.0030752306815469 \end{aligned}$$

La ecuación (4.16) solo es válida para valores de  $q_o$  superiores a  $90 \text{ cm}^3/\text{s}$ , para los valores inferiores a este se utiliza la ecuación de una recta en la aproximación como se muestra en la ecuación (4.17)

$$Q=h*0.876005713911856+75.4571121125367 \quad (4.17)$$

El modelo no lineal de la planta se lo implemento en simulink utilizando las ecuaciones (4.3, 4.16 y 4.17) el diagrama de bloque de este modelo se muestra en la Figura 4.5.

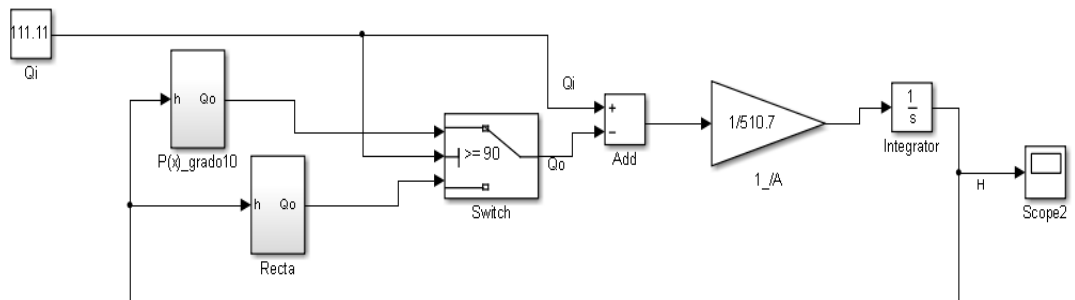


FIGURA 4.5. Diagrama del modelo no lineal de la planta.

A este modelo no lineal se le aplicó en simulink la señal PRBS utilizada en la identificación del punto de operación 17.5 y los resultados se muestran en la Figura 4.6

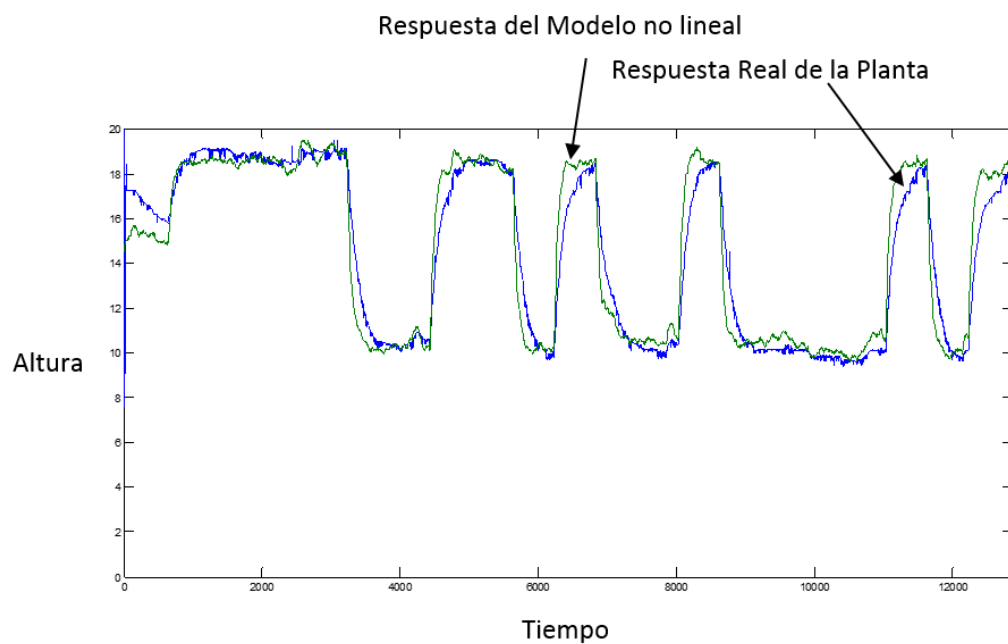


FIGURA 4.6. Respuesta del modelo no lineal con una señal PRBS

### 4.1.3. SIMULACIÓN Y AJUSTE DE PARÁMETROS

Una vez obtenidos los modelos matemáticos lineal y no lineal de la planta de este proyecto se procede a realizar las simulaciones de las mismas para realizar las calibraciones necesarias de tal manera que el modelo represente de la manera más aproximada a la planta real, las simulaciones que se realizarán son las siguientes: [34][35]

1. Simulación de la planta lineal en lazo abierto
2. Simulación de la planta no lineal en lazo abierto

#### 4.1.3.1. Simulación y Ajuste de Parámetro del Modelo Lineal

Se realiza la simulación con el modelo lineal de la planta para un punto de operación de 17.5 centímetros, la función de transferencia para este punto es la ecuación (4.18).

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{1}{(510.7s+2.57)} \quad (4.18)$$

Se realiza la simulación del modelo (ecuación 4.18), utilizando como señal de prueba un escalón con valor inicial 86.2 cm<sup>3</sup>/s y valor final 94 cm<sup>3</sup>/s, estos valores se encuentran alrededor del punto de operación, el resultado de la simulación se muestra en la Figura 4.8 en el que se nota que el valor obtenido con el modelo lineal se encuentra por debajo del valor real, esto se debe a que el modelo de la ecuación (4.18) no se ha considerado las unidades en la que se toman las medias, el caudal debe de estar en cm<sup>3</sup>/s.



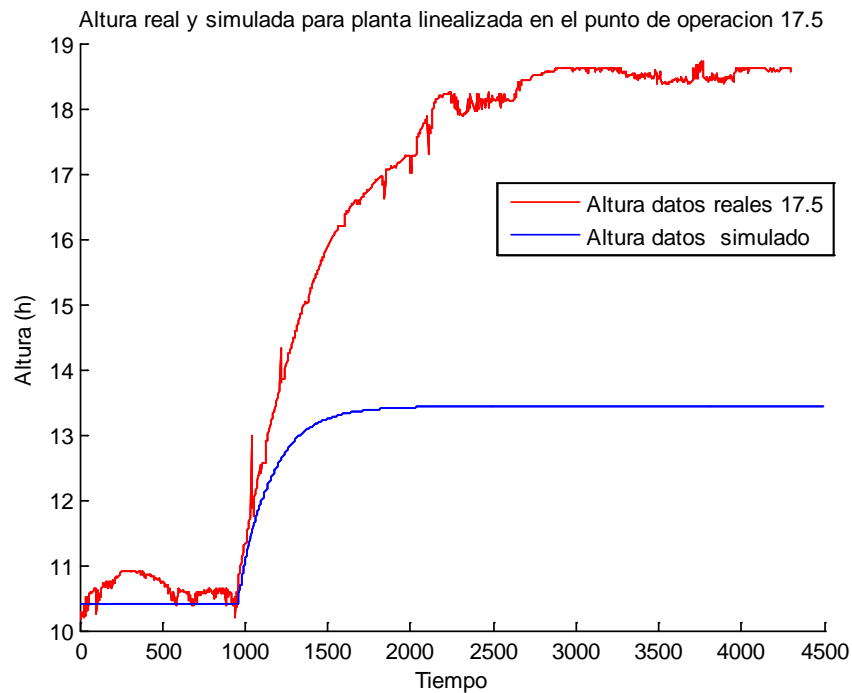


FIGURA 4.7. *Respuesta de la planta lineal en lazo abierto*

Para poder ajustar los parámetros en la función de transferencia de la ecuación 4.18 se usan los datos de la tabla de la identificación de este punto de operación (anexo 19).

Al analizar los datos experimentales de la tabla, se observa que el valor del caudal promedio con el cual alcanza a estabilizar la planta a 18.6 cm es de aproximadamente 94 cm<sup>3</sup>/s, que representa el 51% del valor total de 183 cm<sup>3</sup>/s que puede entregar la bomba, por lo tanto la ganancias de corrección de la ecuación 4.18 se presenta en la ecuación (4.19).

$$G1 = (51\%)(18.6 \text{ cm}) = 2.74 \quad (4.19)$$

Si se coloca esta ganancia a la función de transferencia del sistema lineal de la ecuación (4.18) la función de transferencia modificada será la mostrada en la ecuación (4.20)

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{2.74}{(510.7s+2.57)} \quad (4.20)$$

Al realizar nuevamente la simulación del sistema con esta función de transferencia modificada (Figura 4.8) se puede observar que el comportamiento del modelo lineal de la planta se aproxima al modelo real

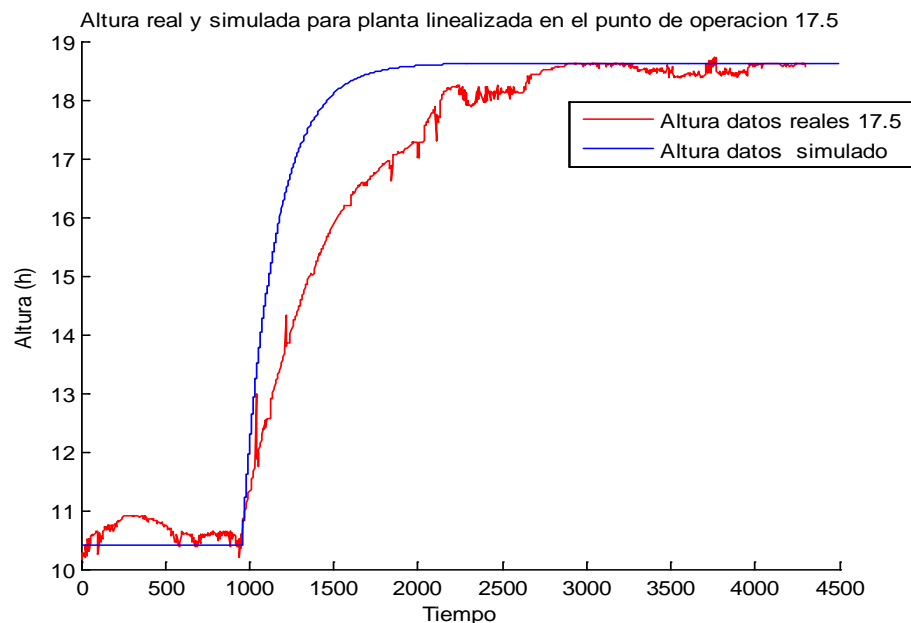


FIGURA 4.8. *Respuesta de la planta lineal en lazo abierto con ajuste de la función de transferencia*

También se ha desarrollado la simulación utilizando como función de transferencia de la planta la ecuación (4.20), en esta prueba se colocó como señal de entrada los valores reales correspondientes de la tabla del anexo 19, obteniéndose buenos resultados del modelo lineal (figura 4.9)

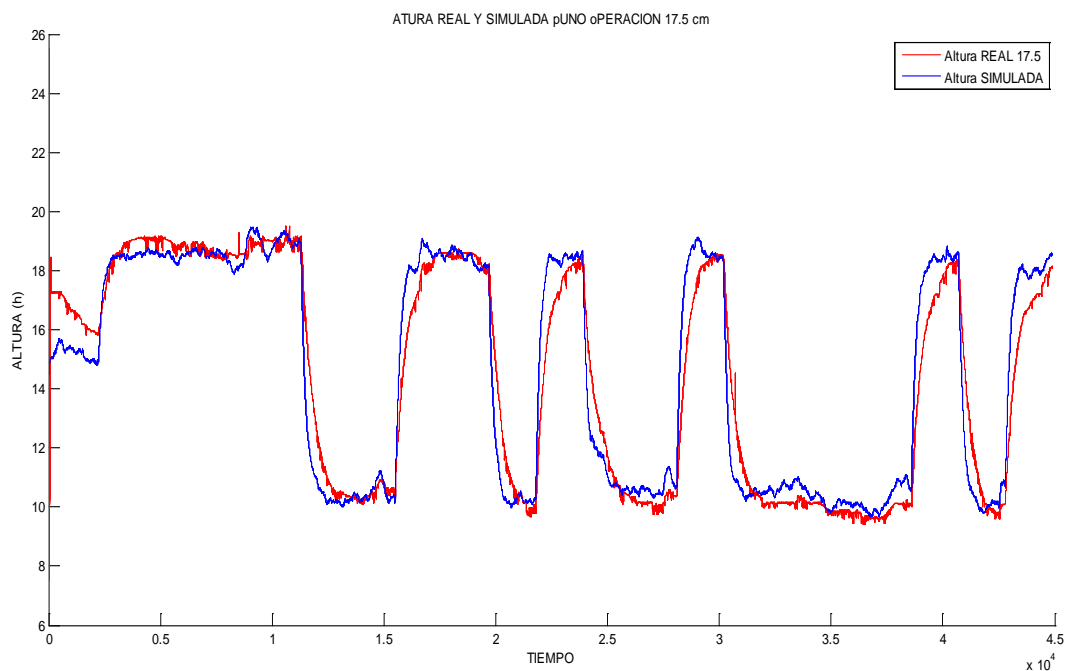


FIGURA 4.9. Comparación de la respuesta real con la respuesta del modelo lineal de la planta usando como señal de prueba los datos reales.

Con la ayuda del procedimiento utilizado para realizar el ajuste de la ecuación (4.18) del modelo lineal de la planta y transformarla en la ecuación (4.20) se realizó el ajuste para cinco puntos de operación y las funciones de transferencias con la estimación de sus parámetros se han consolidado en la tabla 8.

Punto de Operación	Caudal Máximo con PRBS	Altura en estado Estable	% Correspondiente al Caudal	Ganancia de Corrección	Función de Transferencia Corregida
13.7 cm	90,5 cm <sup>3</sup> /s	16.5 cm	49	3.05	2.9/(510.7*S +3,14)
17.2 cm	93.3 cm <sup>3</sup> /s	18.6 cm	51	2.74	2.74/(510.7*S +2.57)
19.3 cm	97.5 cm <sup>3</sup> /s	22.2 cm	53.28	2.4	2.4/(510.7*S +2.48)
26.5 cm	101.5 cm <sup>3</sup> /s	28 cm	55	1.98	1.98/(510.7*S +1.88)
29.8 cm	105 cm <sup>3</sup> /s	31.3	57.4	1.83	1.83/(510.7*S + 1.81)

**TABLA: 8.** Modelo lineal de la planta con estimación de sus parámetros con ecuaciones físicas

#### 4.1.3.2. Simulación de la planta no lineal en lazo abierto

En esta sección se realizó pruebas experimentales al sistema, colocando una entrada de caudal (**qi**) en la planta, y tomando el nivel en el cual se estabiliza en lazo abierto, esta prueba se realizó para varios valores de **qi**, los resultados se consolidan en la tabla 10. Así mismo se realiza la simulación de la planta en simulink utilizando el modelo no lineal, pero ingresando los mismos valores de **qi** utilizados en las pruebas reales, los resultados de esta simulación, también se consolidan en la tabla 9

PUNTOS DE OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO PLANTA NO LINEAL				
PUNTO DE ESTABILIZACIÓN PLANTA REAL		PUNTO DE ESTABILIZACIÓN PLANTA NO LINEAL (SIMULACION)	TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN	ERROR
H (cm)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	H (cm)	Ts (s)	(%)
38,969	111,111	39,2	3000	0,59
36,616	108,62	37,2	3000	1,59
34,334	106,522	34,6	2900	0,77
31,441	104,752	32,83	2800	4,42
28,966	101,476	29,3	3000	1,15
26,928	99,581	27	3000	0,27
24,534	98,45	25,7	3600	4,75
22,384	95,96	23,1	3500	3,20
20,047	93,412	20,6	3500	2,76
17,372	90,996	18	2800	3,62
15,722	88,902	15,3	2800	2,68
13,991	86,963	13,1	3000	6,37
11,297	85,47	11,4	3000	0,91
9,384	83,774	9,4	3000	0,17
			ERROR PROMEDIO	<b>2,38</b>

TABLA: 9. Puntos de operación en lazo abierto de la planta (Planta real y planta modelo no lineal)

Si se analiza los datos de la Tabla 9 se puede concluir que el valor obtenido con el modelo no lineal usando ecuaciones física, se aproximan al valor real de la planta por lo tanto el modelo no lineal tiene un comportamiento aproximadamente igual al modelo real de la planta.

#### 4.2. MODELADO POR IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA UTILIZANDO EL SOFTWARE MATLAB

Para poder obtener el modelo lineal de la planta por el método de identificación de sus parámetros se deben realizar los siguientes pasos:

- a) Diseñar e implementar un software para adquirir los datos (sistema embebido)
- b) Seleccionar la señal que se aplicara a la planta para la identificación
- c) Generar la señal que se aplicará en la entrada de la planta para la identificación
- d) Aplicar la señal generada a la planta
- e) Almacenar la información
- f) Analizar los datos adquiridos para la identificación
- g) Aplicación del software de identificación

#### **4.2.1. DISEÑO DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

En la figura 4.10 se presenta la interface que se ha desarrollado en labview para poder cambiar el punto de operación,  $K_p$ ,  $k_i$  y  $K_d$  en el controlador de la planta. A este programa se le modificó (figura 4.11) para realizar la adquisición de datos en un proceso de identificación. Se reemplaza la variable Setpoint, por un icono, que permita leer de un archivo de Excel, la señal PRBS que se aplicará a la planta en la identificación (sección4.2.2), en este icono de lectura de archivo, se puede configurar la dirección en donde se encuentra el archivo

[19]

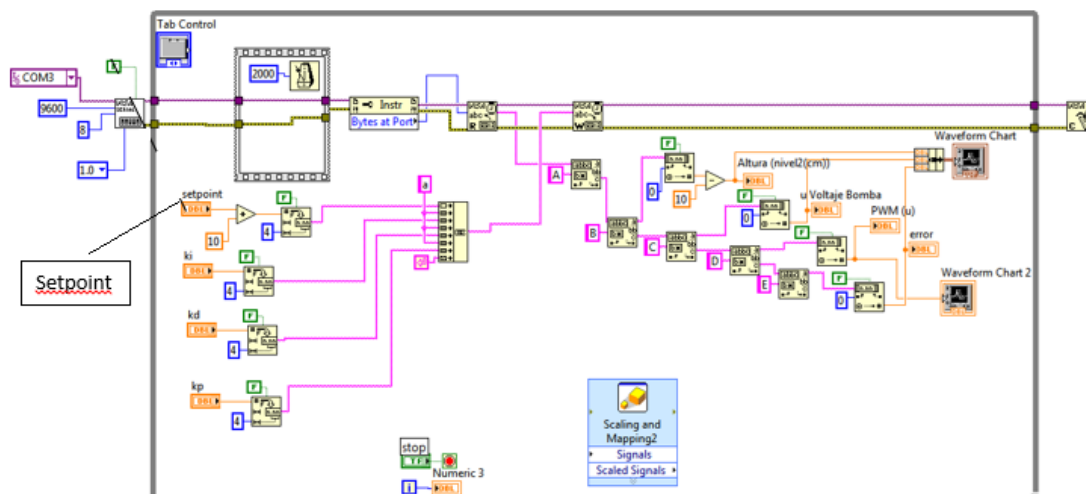


FIGURA 4.10. Software para la adquisición de datos en *labview*

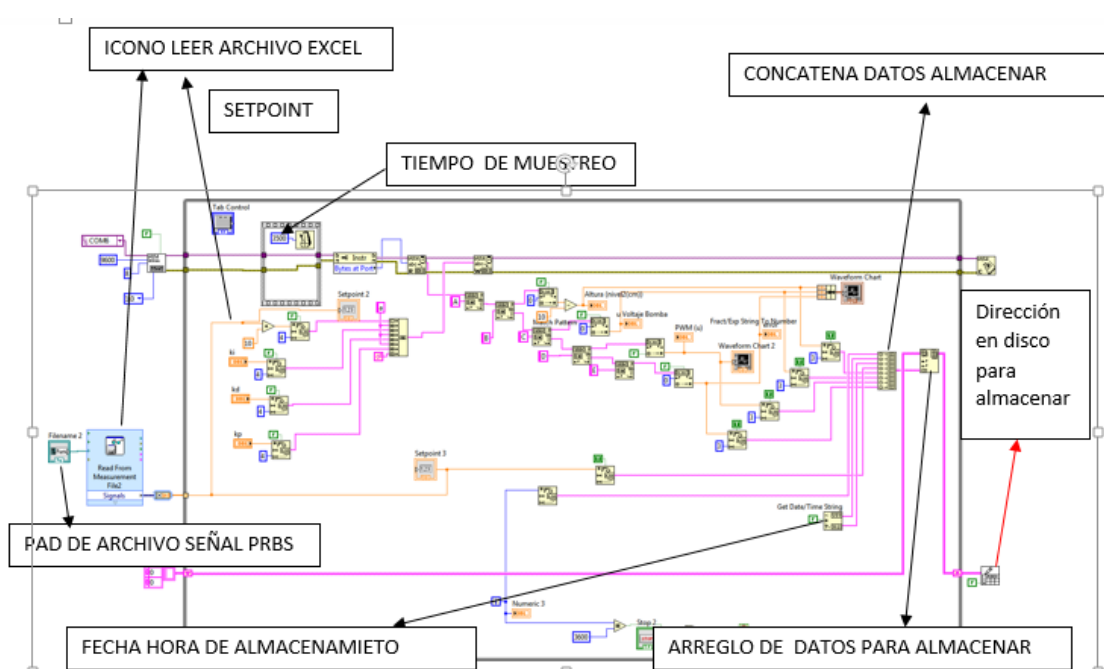


FIGURA 4.11. Elementos que conforman el Software para la adquisición de datos en *labview*

Otra de las modificaciones realizadas en el programa de la figura 4.10 es la concatenación de datos: fecha, hora, setpoint, nivel, caudal y una variable

auxiliar, que se utiliza para realizar la verificación si todos los datos fueron almacenados correctamente (incremento de una constante en cada iteración), los datos concatenados son almacenados en un arreglo, el mismo que será grabado en un archivo en Excel en la dirección del disco que se coloque en el icono del programa. En la Tabla 10 se muestra una prueba de los datos almacenados de la planta.

TABLA DE DATOS ALMACENADOS PARA LA IDENTIFICACION						
Fecha	Hora	Setpoint PRBS	SetpoEjecutadoint PRBS	Nivel_sensor	Caudal_sensor	Identificador
20/03/2015	23:55	1900	1900	11.38	93.206	197.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	13.398	93.206	198
20/03/2015	23:55	1900	1900	13.664	92.796	198.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	9.987	91.787	199
20/03/2015	23:55	1900	1900	7.541	90.606	199.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	24.486	91.588	200
20/03/2015	23:55	1900	1900	25.487	90.8	200.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	17.91	93.619	201
20/03/2015	23:55	1900	1900	10.569	91.787	201.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	15.637	91.787	202
20/03/2015	23:55	1900	1900	8.403	92.593	202.5
20/03/2015	23:55	1900	1900	8.97	91.193	203
20/03/2015	23:55	1900	1900	9.82	93	203.5
20/03/2015	23:56	1900	1900	10.307	92.39	204
20/03/2015	23:56	1900	1900	11.191	90.412	204.5
20/03/2015	23:56	1900	1900	11.691	90.218	205
20/03/2015	23:56	1900	1900	12.559	90.026	205.5
20/03/2015	23:56	1900	1900	13.19	90.8	206
20/03/2015	23:56	1900	1900	13.952	91.987	206.5
20/03/2015	23:56	1900	1900	14.438	90.218	207

*TABLA: 10. Datos obtenidos para realizar la identificación*

#### **4.2.2. SELECCIÓN Y GENERACIÓN DE LA SEÑAL A UTILIZAR EN LA IDENTIFICACIÓN**

Para la identificación de la planta se ha seleccionado la señal PRBS, la cual es un conjunto de impulsos rectangulares modulados de tal manera que se aproxima a un ruido blanco y sus características espectrales es muy rica en



frecuencias, dentro de sus características es un tipo de señal de dos niveles, si se realiza un análisis de auto-correlación es semejante al de un ruido blanco, lo cual permite garantizar un barrido alrededor de las frecuencias de interés.

Para generar esta señal se ha utilizado el siguiente código de Matlab. Que ha sido desarrollado por el estudiante de doctorado el Ing. Pablo Parra. [24]

```
clear all
clc
disp. ('CREACIÓN DE UNA SEÑAL PRBS');
clear dt
clear t
clear PRBS
te=18000;
tm=input ('Ingrese tiempo de muestreo tm:');
ts=input ('Ingrese tiempo de simulación ts:');
re=input ('Ingrese valor nominal de la variable manipulable (u) re:');
tc=input ('Ingrese tiempo mínimo de conmutación de la señal tc:');
disp. ('Ingrese valor máx. y mín. de variación de la señal respecto a la
referencia');
umax=input ('Ingrese valor máx. en variación porcentual umax:');
umin=input ('Ingrese valor mín. en variación porcentual umin:');
PRBS=idinput (ts/tm,'PRBS', [0 tm/tc], [re-umin*re/100 re+umax*re/100]);
i=0;
for i=1:1:te/tm
    dt(i)=i*tm;
end
t(1)=te+tm;
i=0;
for i=1:1:length(PRBS)-1
```

```

    t(i+1)=t(i)+tm;
end
entrada=[[dt,t]' [re*ones(1,te/tm),PRBS]'];

entrada (1:660,2)=re;

```

En este programa la variable '**te**' corresponde al tiempo que demora la planta en estabilizarse en el punto de interés, '**tm**' es el tiempo muestreo, '**ts**' es el tiempo total que trabaja la planta en la identificación, la variable '**re**' es el valor de la señal de entrada(u) correspondiente al punto de operación en análisis, la variable '**tc**' corresponde al tiempo mínimo de conmutación, en este se debe considerar el tiempo que tarda la planta en ir desde el punto más bajo de la señal PRBS al más alto de esta hasta alcanzar la estabilización. Finalmente las variables '**umax**' y '**umin**' corresponden al porcentaje que se mueve la señal 'u' desde el punto de operación hacia arriba y hacia abajo, para generar los extremos de la señal PRBS.

A continuación se muestra los valores con los cuales se generó la señal PRBS (figura 4.12) para el punto de operación de 17.5 cm

**te** = 1800 segundos

**tm** = 3.5 segundos

**ts** = 36000 segundos

**re** = 1900 segundos

**tc** = 1200

**umax** = 5%

**umin** = 5%

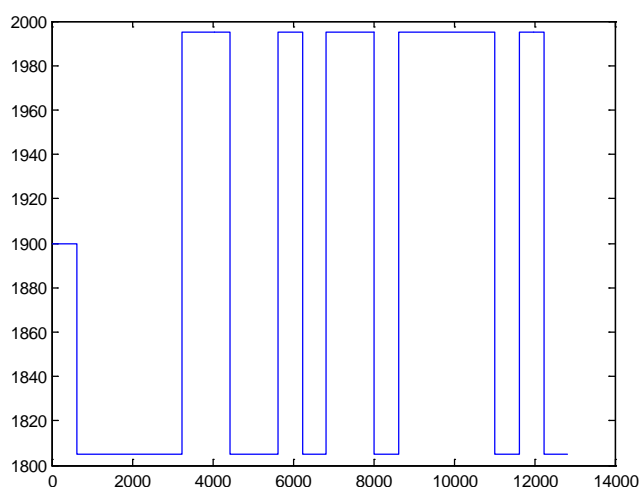


FIGURA 4.12. Señal PRBS para realizar la identificación en un punto de operación(17.5 cm)

#### 4.2.2.1. IDENTIFICACIÓN PARA VARIOS PUNTOS DE OPERACIÓN

Los datos generados de la señal PRBS Figura 4.12 son almacenados en un archivo en Excel Tabla 11, desde el cual, el programa de labview tomara en cada iteración el valor de una celda, enviándolo como setpoint por el puerto serie al controlador. Así mismo la respuesta de la planta a este setpoint son tomados con labview y almacenados también en un archivo en Excel ver anexo 19, el grafico de las señales obtenidas para un punto de operación 17.5 cm se presentan en la Figura 4.13

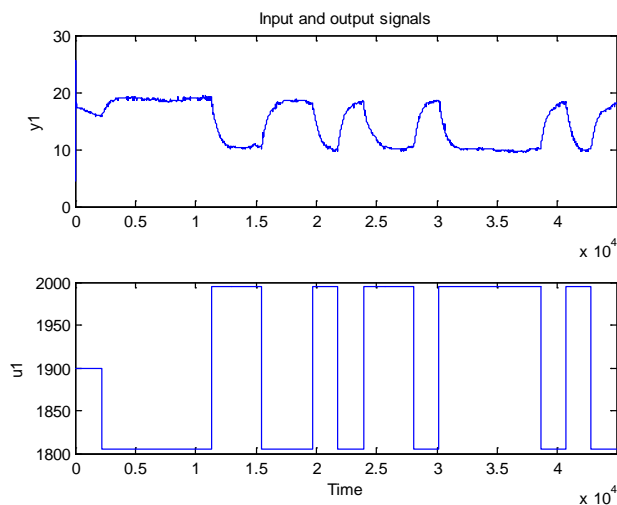


FIGURA 4.13. Respuesta de la planta ante la señal PRBS punto de operación 17.5 cm

Para determinar la función de transferencia en un determinado punto de operación se toma como señal de entrada el caudal y como salida la altura de tanque figura 4.14 en el anexo 24 se presenta el proceso de identificación del sistema para un punto de operación 17.5 cm de nivel

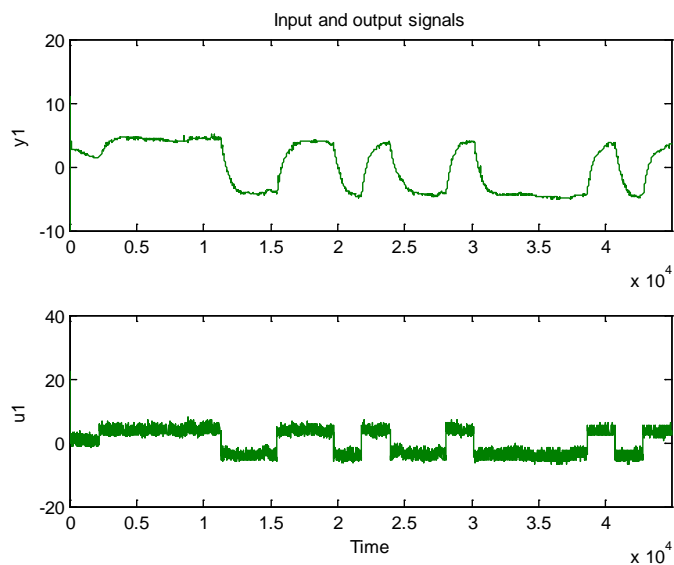


FIGURA 4.14. Respuesta de la bomba (actuador) ante una señal PWM

En la Figura 4.15 se presenta la respuesta de la planta con el modelo obtenido por identificación (en un punto de operación de 17.5 cm) como el comportamiento de la planta real se ha colocado en la simulación del modelo la señal PRBS utilizada en la identificación. De esta figura se puede concluir que el comportamiento del modelo de la planta obtenido por identificación se aproxima al comportamiento real de la planta.

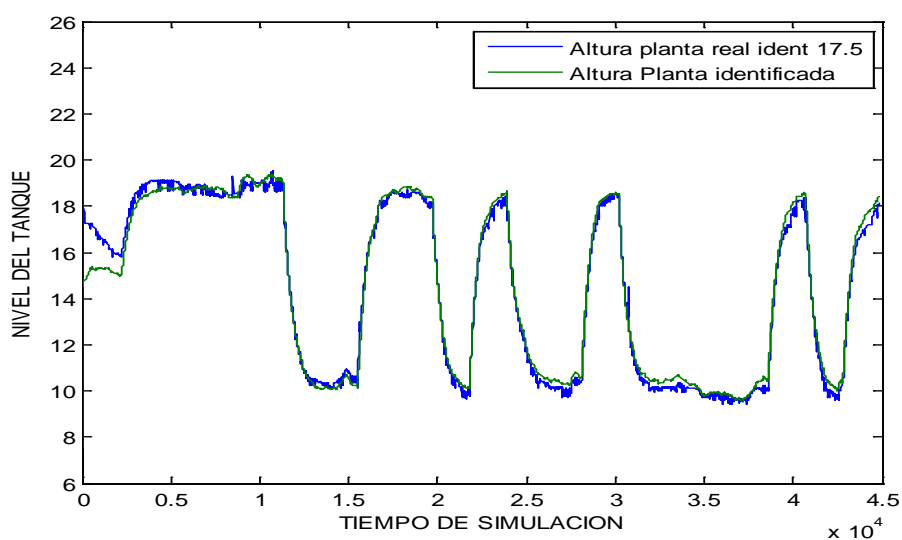


FIGURA 4.15. Señal de salida de la planta con el modelo identificado vs la señal del modelo real de la planta para un punto de operación 17.5 cm

El detalle de la identificación para varios puntos de operación de la planta se lo encuentra en el anexo 20 y sus resultados se consolidan en la tabla 11, las funciones de transferencia de los modelos obtenidos por identificación se utilizan en el diseño del controlador de ganancias programadas.

<b>Modelo Identificado Para Varios Puntos de Operación</b>				
<b>Altura de operación (cm)</b>	<b>Caudal P.O. (cm<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Modelo Seleccionado</b>	<b>% Eficiencia del Modelo</b>	<b>Función de Transferencia</b>
13.7	88	Polynomial (oe221)	95.13	$0.002(s+0.0004292)/(s^2+0.002117+1.325e-6)$
17.2	91	Process Model(P1)	93.04	$1.108/(496.5*s+1)$
19.3	93.1	Polynomial (oe221)	94.28	$0.0017452(s-0.0001001)/(s*(s+0.00155))$
26.5	98.8	Polynomial (oe221)	88.56	$0.00194(s+2.196e-5)/((s+0.001495)(s+0.0001109))$
29.8	102.8	Process Model(P3Z)	92.05	$(0.001813*s-2.46e-08)/(s^2+0.001514+9.743e-7)$

*TABLA: 11. Datos obtenidos del modelo identificado para varios puntos de operación*

### 4.3. SELECCIÓN DEL MODELO OPTIMO

En la tabla 12 se presenta las funciones de transferencia consolidada tanto de los modelos obtenidos por ecuaciones físicas como las obtenidas por identificación.

<b>Punto de Operación</b>	<b>Función de Transferencia Modelo Identificado</b>	<b>Función de Transferencia Modelo Matemático</b>
13.7 cm	$(0.002006 s + 8.612e-07)/(s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06)$	$2.9/(510.7*S + 3,14)$
17.2 cm	$1.108/(496.5*s+1)$	$2.74/(510.7*S + 2.57)$
19.3 cm	$(0.002006 s + 8.612e-07)/(s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06)$	$2.4/(510.7*S + 2.48)$
26.5 cm	$(0.001945 s + 4.273e-08)/(s^2 + 0.001606 s + 1.658e-07)$	$1.98/(510.7*S + 1.88)$
29.8 cm	$(0.001813 s - 2.464e-08)/(s^2 + 0.001514 s + 9.743e-07)$	$1.83/(510.7*S + 1.81)$

*TABLA: 12. Funciones de transferencias consolidada obtenida por ecuaciones físicas como los obtenidos por identificación*

### 4.3.1. PRUEBA DE OPERACIÓN PARA DIFERENTES MODELOS OBTENIDOS

En esta sección se presenta la simulación de los modelos de la planta, se utilizan las funciones de transferencia de la Tabla 12, en cada caso se realizará la simulación para los dos modelos, se ha utilizado como señal de prueba ya sea un escalón o una señal tipo PRBS, la cual también se aplicó en la planta real, con las respuestas obtenidas se seleccionó el modelo que tenga la respuesta más aproximada a los datos reales.

#### 4.3.1.1. Prueba de funcionamiento para el P.O. 13.7 cm

El diagrama de bloques utilizado en simulink se presenta en la Figura 4.16, en el bloque de la función transferencia se coloca la función de transferencia de los modelos tabla 13

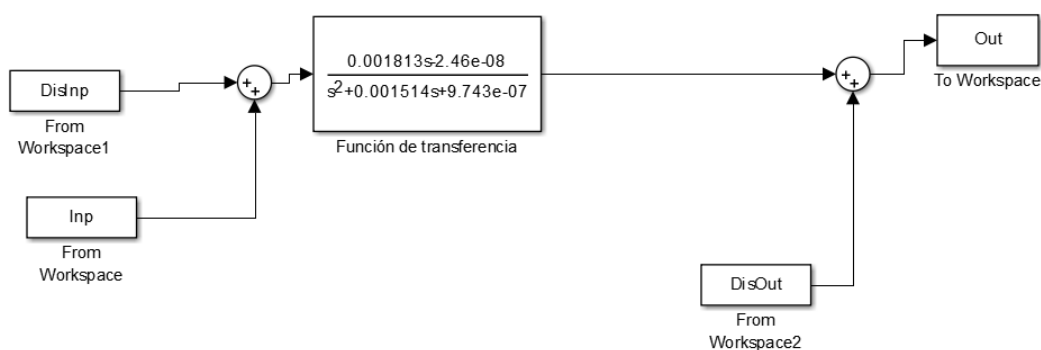


FIGURA 4.16. Diagrama de bloques para la simulación del modelo matemático identificado

En la figura 4.21 se presenta la simulación del sistema, en donde se utilizó el modelo identificado, y en el mismo gráfico se presenta el comportamiento de la planta real ante una entrada PRBS, y en la figura 4.17

se presentan las mismas señales pero utilizando el modelo obtenido por ecuaciones físicas

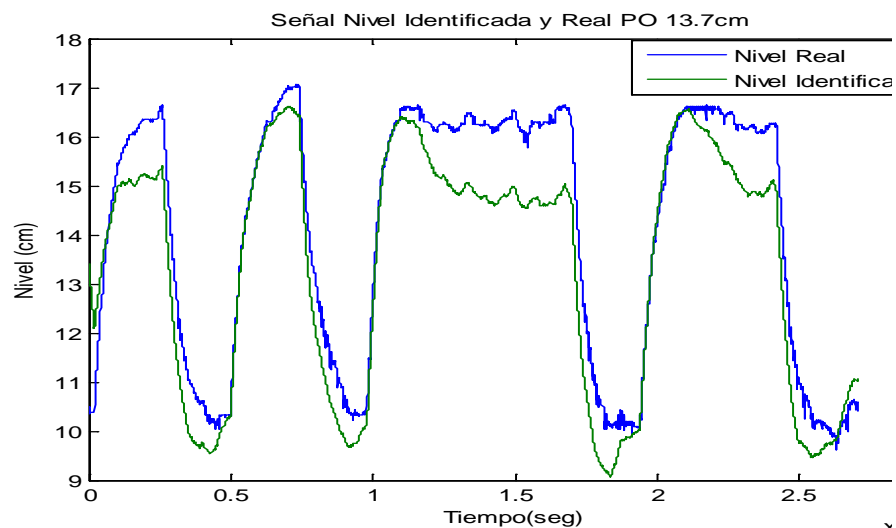


FIGURA 4.17. Respuesta a la simulación del modelo identificado para PO 13.7 cm

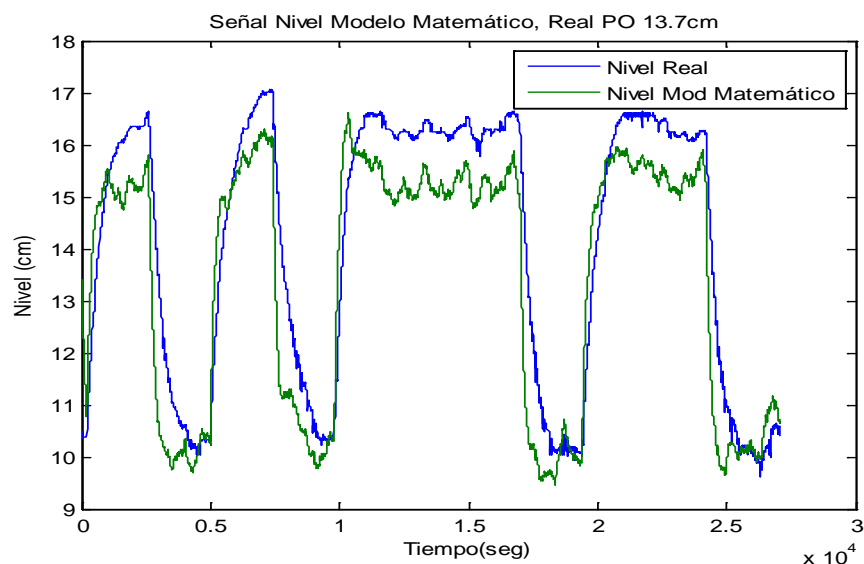


FIGURA 4.18. Comparación entre la respuesta real de la planta y la respuesta del modelo por ecuaciones físicas para un P.O. de 13.7 cm.



Se ha determinado los errores promedios de las señales de la figuras 4.17 y 4.18 y el resultado se presentan en la tabla del anexo 22 en esta tabla se observa que el error promedio de los dos modelos son aproximadamente iguales por lo tanto se puede usar cualquiera de los dos modelos en el diseño de los controladores PID

#### **4.3.1.2. Prueba de funcionamiento para el P.O. 17.2 cm**

En la figura 4.19 presenta la respuesta real y de simulación, para los dos modelos, para este punto de operación, se ha utilizado una señal tipo escalón como entrada, su valor inicial es  $86.5 \text{ cm}^3/\text{s}$  y el valor final es  $94.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , generando en la salida una variación que va desde 10 cm hasta aproximadamente 18,5 cm. Con esta figura se puede concluir los dos modelos se aproximan en gran medida a los datos de la planta real, por tal motivo, se puede utilizar cualquiera de los dos modelos para el diseño del controlador PID

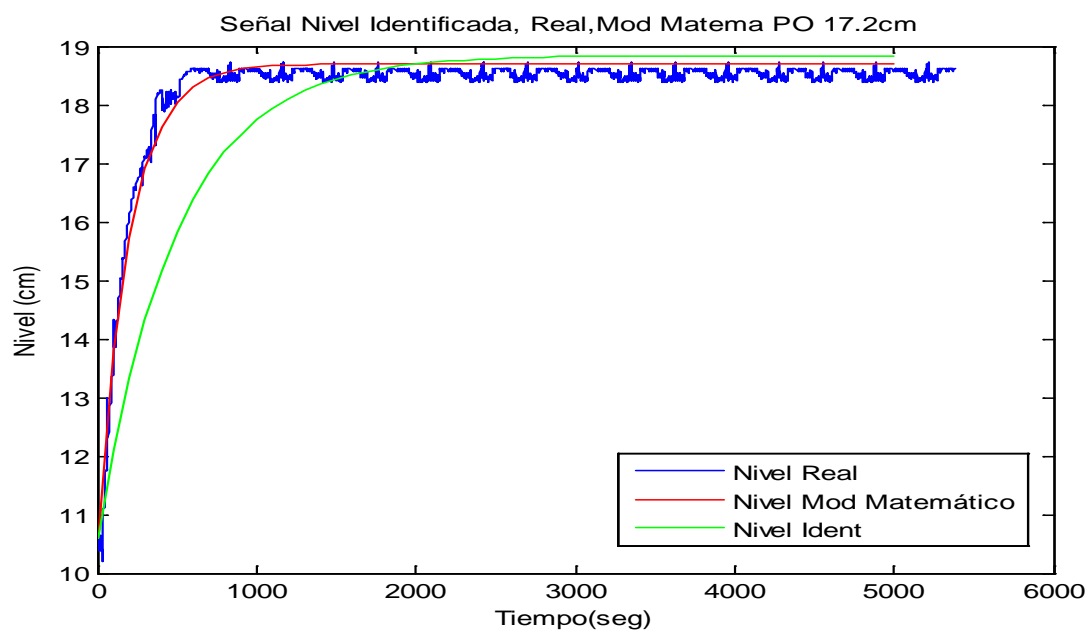


FIGURA 4.19. Comparación entre la respuesta real de la planta, respuesta identificada y la respuesta del modelo por ecuaciones físicas para un P.O. de 17.2 cm.

#### 4.3.1.3. Prueba de funcionamiento para el P.O. 19.3 cm

En la figura 4.20 presenta la respuesta real y de simulación, para los dos modelos, para este punto de operación, se ha utilizado una señal tipo escalón como entrada, su valor inicial es  $99.5 \text{ cm}^3/\text{s}$  y el valor final es  $-104 \text{ cm}^3/\text{s}$ , generando en la salida una variación que va desde 16,5 cm hasta aproximadamente 22,5 cm. Con esta figura se puede concluir los dos modelos se aproximan en gran medida a los datos de la planta real, por tal motivo, se puede utilizar cualquiera de los dos modelos para el diseño del controlador PID

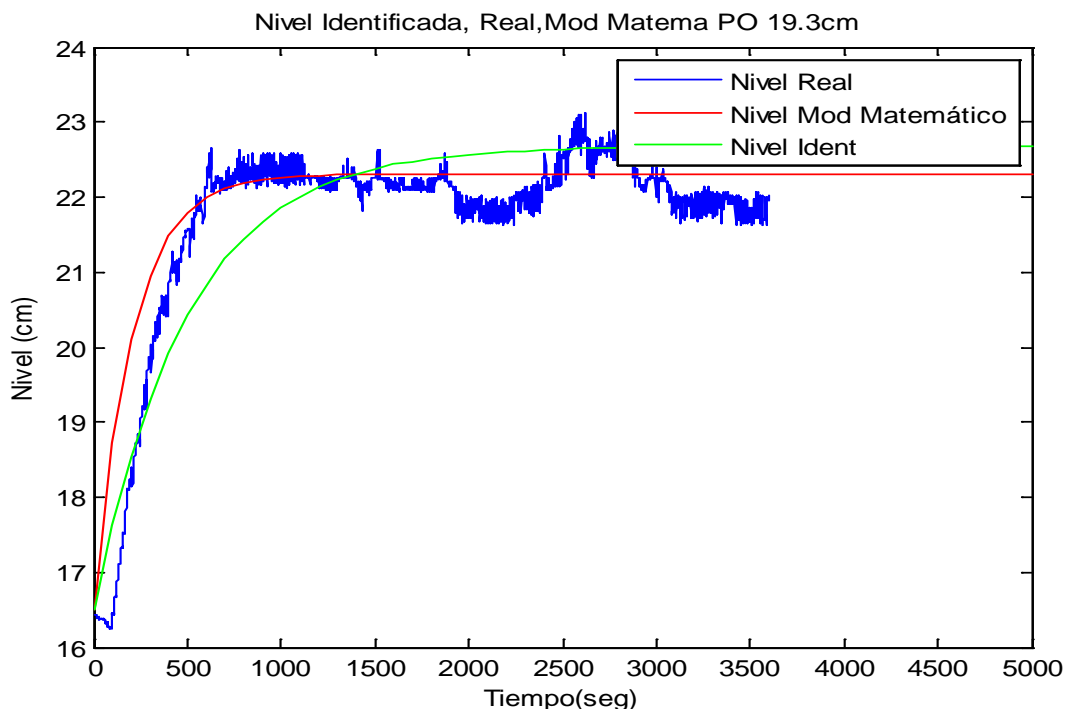


FIGURA 4.20. Simulación entre la respuesta real de la planta y la respuesta del modelo por ecuaciones físicas para un P.O. de 19.3 cm

#### 4.3.1.4. Prueba de funcionamiento para el P.O. 26.5 cm

En la figura 4.21 presenta la respuesta real y de simulación, para los dos modelos, para este punto de operación, se ha utilizado una señal tipo escalón como entrada, su valor inicial es  $105.5 \text{ cm}^3/\text{s}$  y el valor final es  $112 \text{ cm}^3/\text{s}$ , generando en la salida una variación que va desde 23,5 cm hasta aproximadamente 30 cm. Con esta figura se puede concluir los dos modelos se aproximan en gran medida a los datos de la planta real, por tal motivo, se puede utilizar cualquiera de los dos modelos para el diseño del controlador PID

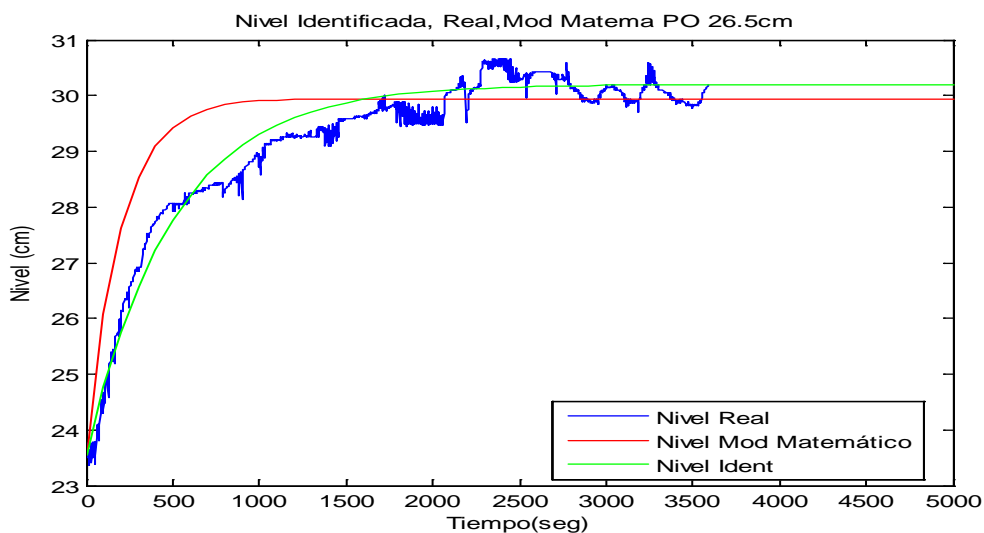


FIGURA 4.21. Comparación entre la respuesta real de la planta y la respuesta del modelo por ecuaciones físicas para un P.O. de 26.5 cm

#### 4.3.1.5. Prueba de funcionamiento para el P.O. 29.8 cm

En la figura 4.22 presenta la respuesta real y de simulación, para los dos modelos, para este punto de operación, se ha utilizado una señal PRBS en la simulación de este caso y las respuesta de los dos modelos siguen aproximadamente el comportamiento de la planta real, con lo cual se concluye que para el diseño del controlador se puede utilizar cualquiera de los dos modelos.

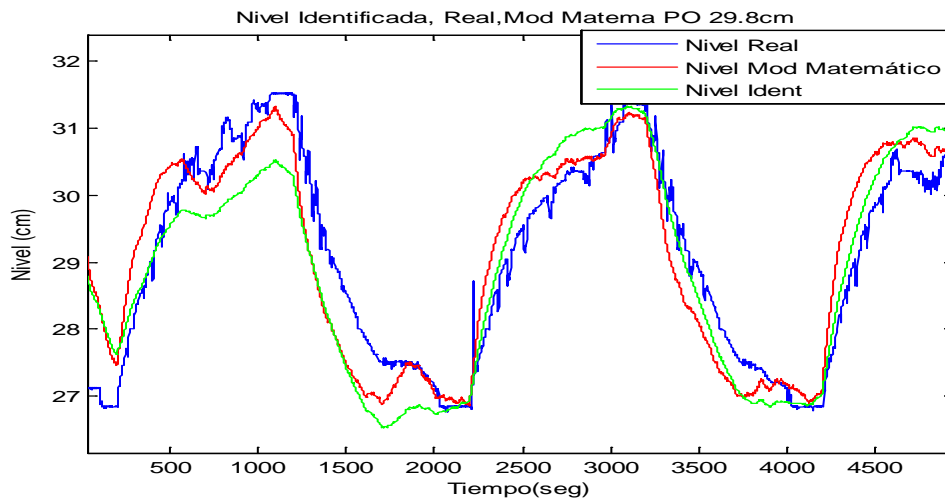


FIGURA 4.22. Comparación entre la respuesta real de la planta y la respuesta del modelo por ecuaciones físicas para un P.O. de 29.8 cm

#### 4.3.2. SELECCIÓN DEL MODELO

De las pruebas realizadas en la sección 4.3.1 se ha calculado el error promedio de cada modelo, comparado con el comportamiento real de la planta, los resultados de estos errores se presentan en el anexo 22, con estos valores se ha seleccionado como mejor modelo aquel que su error promedio es menor, los resultados de los modelos seleccionados para diseñar los controladores se presentan en la tabla 13.

Punto de Operación	Función de Transferencia Modelo Identificado	Función de Transferencia Modelo Matemático	Modelo Seleccionado
13.7 cm	$(0.002006 s + 8.612e-07)/(s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06)$	$2.9/(510.7*S + 3,14)$	$2.9/(510.7*S + 3,14)$
17.2 cm	$1.108/(496.5*s+1)$	$2.74/(510.7*S + 2.57)$	$1.108/(496.5*s+1)$
19.3 cm	$(0.002006 s + 8.612e-07)/(s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06)$	$2.4/(510.7*S + 2.48)$	Cualquier Modelo
26.5 cm	$(0.001945 s + 4.273e-08)/(s^2 + 0.001606 s + 1.658e-07)$	$1.98/(510.7*S + 1.88)$	Cualquier Modelo
29.8 cm	$(0.001813 s - 2.464e-08)/(s^2 + 0.001514 s + 9.743e-07)$	$1.83/(510.7*S + 1.81)$	Cualquier Modelo

*TABLA: 13. Modelo Seleccionado para el Diseño del Controlador PID*

## **CAPÍTULO 5**

### **5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS CONTROLADORES**

Existen diferentes tipo de controladores que se pueden aplicar a una planta, en este proyecto se diseñó el controlador PID para los distintos puntos de equilibrio, y con los valores obtenidos de estos controladores se desarrolla el controlador de Ganancias Programadas y el Control en Cascada.

#### **5.1. DISEÑO DEL CONTROLADOR PID**

Para el diseño del controlador PID se ha utilizado las herramienta sisotool de matlab el mismo que permiten obtener fácilmente el controlador para los distintos puntos de equilibrio de una planta, en la siguiente sección se describe la forma como se realiza el diseño del controlador PID para las variables nivel y caudal, usando estas herramienta.

##### **5.1.1. CONTROLADOR PID PARA LA VARIABLE NIVEL**

El desarrollo de un controlador PID consiste básicamente en determinar una constante proporcional ( $K_p$ ), una ganancia integral ( $K_i$ ) y una ganancia derivativa ( $K_d$ ) con la cuales el controlador de la planta determina la acción

de control a seguir en un determinado momento. Para encontrar los juegos de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  se realizaron los siguientes pasos:

- a) Ingreso de las funciones de transferencia al workspace
- b) Aplicación de la herramienta de sisotool a la función de transferencia
- c) Diseño del compensador PID al modelo.
- d) Validación del Compensador Diseñado

A continuación se describe los pasos para determinar las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  del controlador PID, para un punto de operación y para el resto de puntos se ha seguido el mismo procedimiento; no se detalla en el presente documento, pero si se consolidan sus respuestas en la Tabla 15 de esta sección y se realizan las pruebas de los controladores en simulink

#### **5.1.1.1. INGRESO DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA AL WORKSPACE**

Para ingresar las funciones de transferencias de la planta de cada punto de operación al workspace se utiliza el comando `tf(num,dem)` en donde en la variable **num** se ingresa el vector correspondiente al numerador de la función y en la variable **den** se ingresa el vector correspondiente al denominador de la misma, los comandos en Matlab son:

```
sys1=tf([2.9],[510.7 3.14])
```

```
sys2=tf([1.108],[496.5 1])
```

```
sys3=tf([0.002006 8.612e-07],[1 0.002117 1.325e-06])
```

```
sys4=tf([0.001945 4.273e-08],[1 0.001606 1.658e-07])
```

```
sys5=tf([0.001813 -2.464e-08],[1 0.001514 9.743e-07])
```



En las variables sys1, sys2, sys3, sys4, sys5 se almacena las funciones de transferencia de los distintos puntos de operación de la tabla 14

### 5.1.1.2. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SISOTOOL PARA OBTENER EL CONTROLADOR PID PARA EL P.O. 17.2 CM

En el workspace de Matlab se ejecuta el comando sisotool(sys2)

Al ejecutar este comando se genera la trayectoria de las raíces figura 5.1

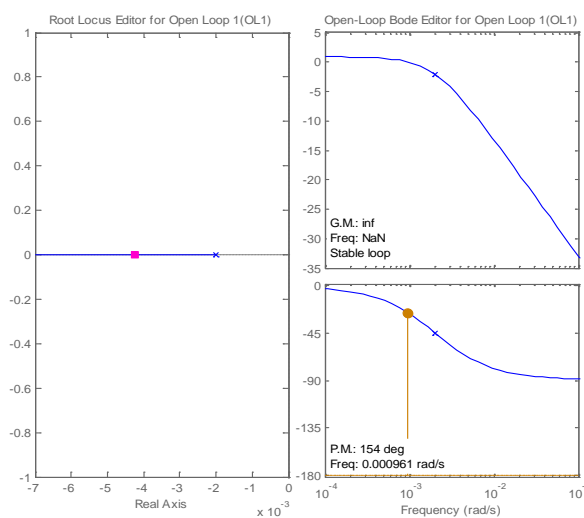


FIGURA 5.1. Trayectoria de las raíces del modelo utilizando SISO TOOLS

Obtenida la trayectoria de la raíces, se procede a diseñar el compensador del controlador PID, para realizar esto, se debe abrir el icono correspondiente a Desing-Edit\_Compensator en la pantalla de la trayectoria de las raíces (Figura 5.2),

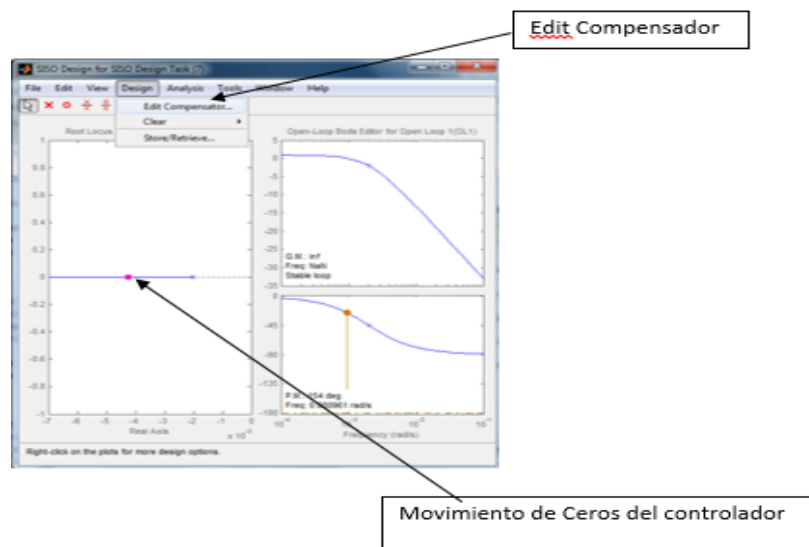


FIGURA 5.2. Trayectoria de las raíces aplicando un movimiento directo de los ceros

Al ejecutar este icono aparece la pantalla (Figura 5.3) para editar el compensador, en esta pantalla en la sección de Dynamics se ingresan los dos ceros y el polo en el origen del controlador PID y el diseño del mismo consistirá en la ubicación adecuada de los ceros, con el mouse se realizará el movimiento en el gráfico de la trayectoria de las raíces (Figura 5.2) hasta lograr una dinámica adecuada.

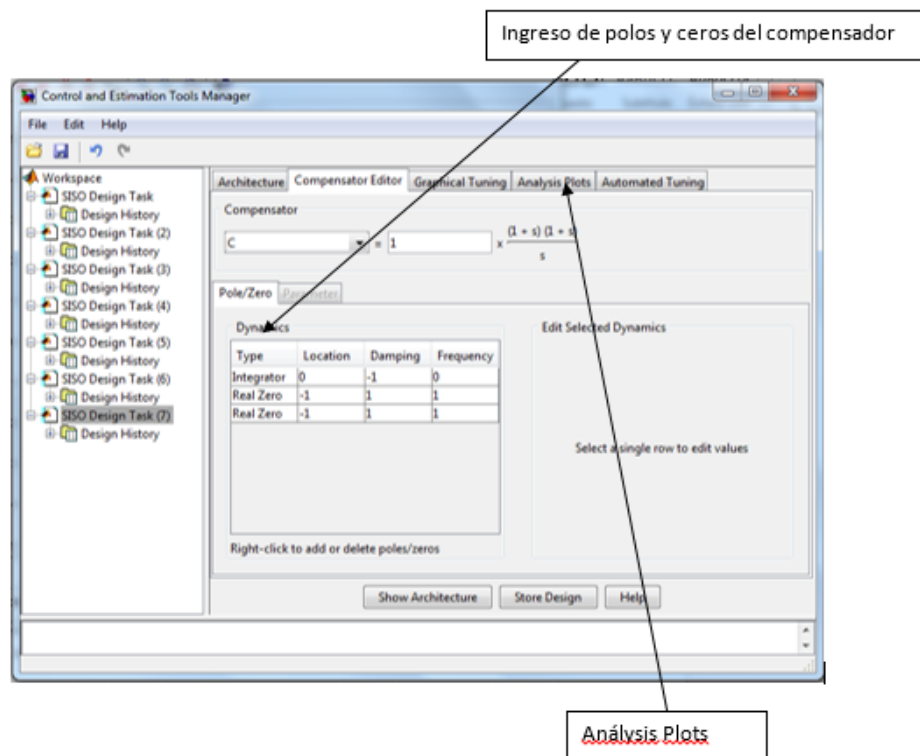


FIGURA 5.3. Forma de ingreso de los polos y ceros del compensador utilizando SISO TOOLS

Para ir presentando la respuesta del sistema a un entrada paso conforme se sintonice los ceros del controlador se debe abrir el icono Analysis Plots que aparece en la Figura 5.3 al presionar este icono se abre la pantalla Figura 5.4

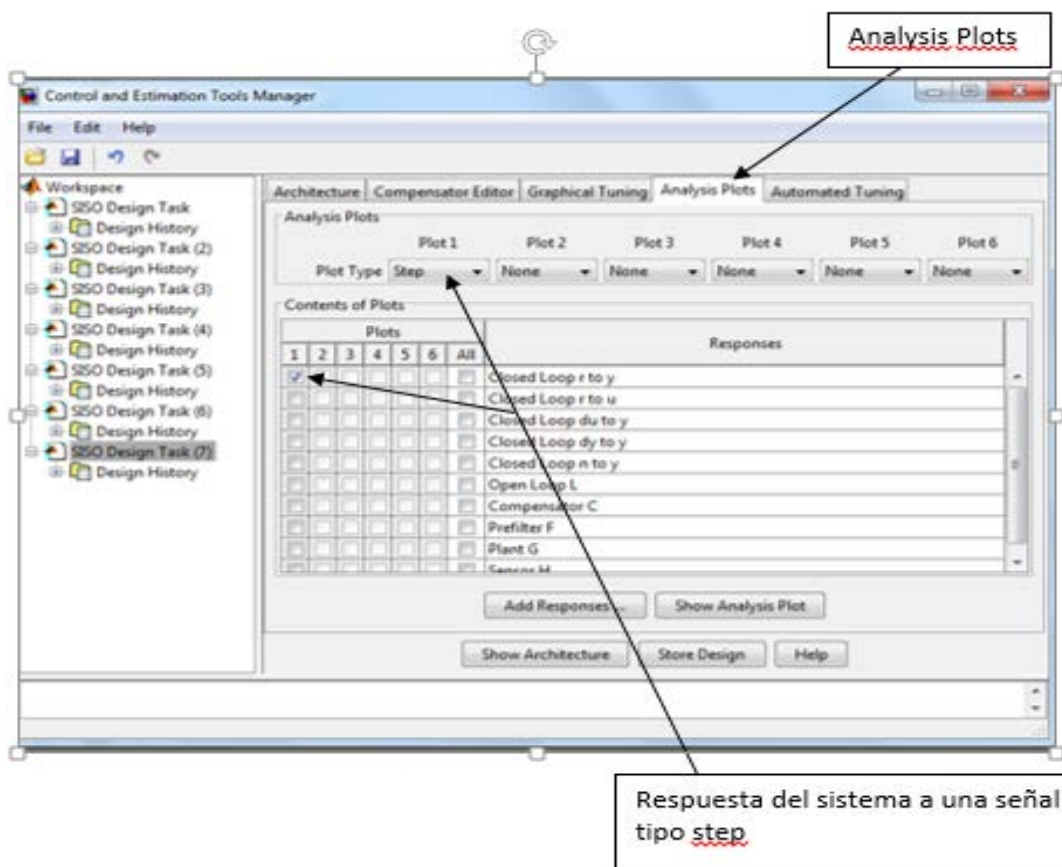


FIGURA 5.4. Selección en SISO TOOLS para obtener una respuesta tipo step

Una vez calibrado el controlador del sys2 se obtiene la respuesta del sistema compensado a una entrada paso la cual se presenta en la Figura 5.5

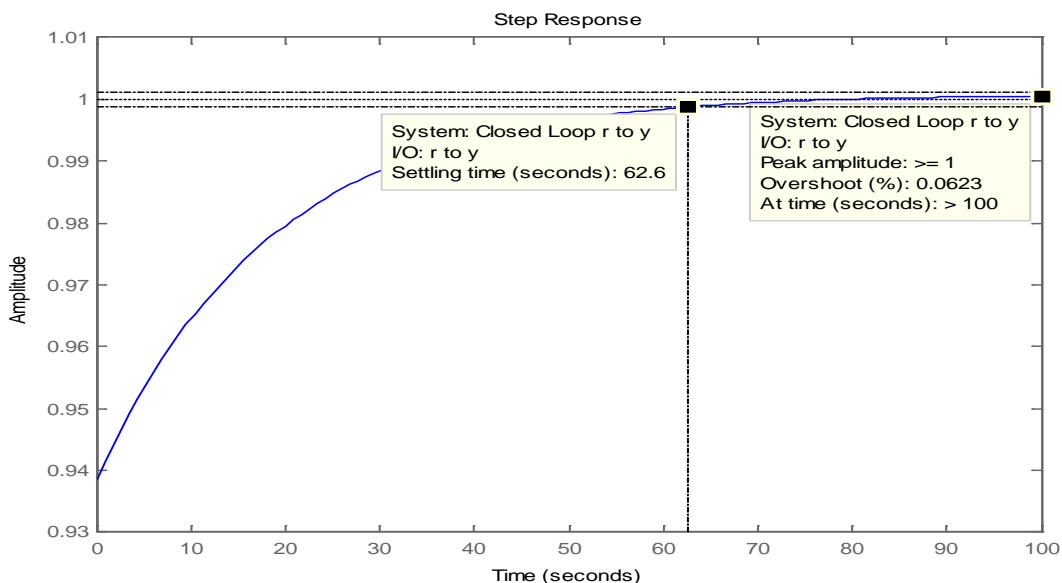


FIGURA 5.5. Respuesta a la calibración del controlador compensado

En este Compensador se ha logrado calibrar de tal forma que el tiempo de estabilización es 62,5 segundos a una entrada paso y tenga un sobre nivel porcentual de 0,0623%, mejorando los 2500 segundos de tiempo de estabilización que se tienen en lazo abierto figura 4.23.

La trayectoria de las raíces de la planta con el sistema compensado se muestra en la Figura 5.6 en esta se puede observar la ubicación de los ceros del compensador los cuales se encuentran resaltados de color rosado en la gráfica, la función de transferencia del compensador es:

$$\frac{2845 s^2 + 178.9 s + 1}{s} \quad (5.1)$$

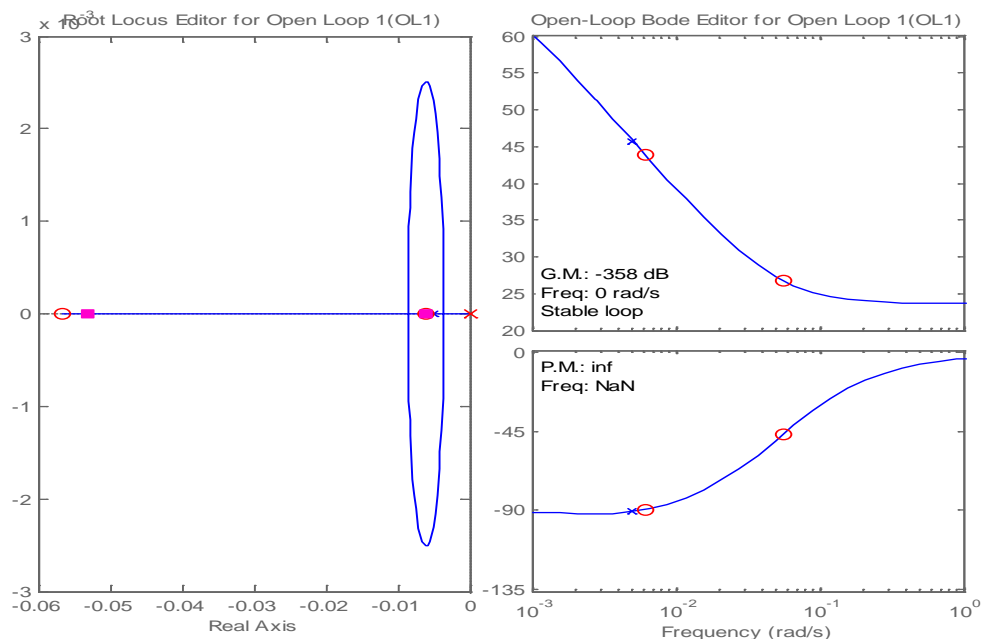


FIGURA 5.6. Trayectoria de las raíces ubicación de los ceros para el sistema compensado

Los ceros del compensador ecuación (5.1) se encuentran ubicados del lado derecho del plano  $s$  y son:

$$\begin{aligned} & -0.0567 \\ & -0.0062 \end{aligned}$$

Llevando la ecuación 5.1 a una forma equivalente de la ecuación 5.2 se puede determinar los valores de la tres constantes a utilizar en el controlador PID ecuación (5.3)

$$Kp * + Ki \frac{1}{s} * + Kd * s \quad (5.2)$$

$$179.8 + 1 \frac{1}{s} * + 2845 * s \quad (5.3)$$

Por tal motivo las constantes del controlador PID para la planta operando en el punto de operación 17.2 cm son:

$$K_p = 179.8$$

$$K_i = 1$$

$$K_d = 2845$$

Los valores de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de los controladores PID de cada uno de los puntos de operación, se han colocado en la tabla 14. Estos valores fueron obtenidos de la misma forma que para el controlador P.O 17.2 cm.

Punto de Operación (cm)	Función de Transferencia	Controlador PID			Ts a un Step (s)	Sobre Nivel (%)
		$K_p$	$K_i$	$K_d$		
13.7	$2.9/(510.7*s + 3,14)$	52	0.32	0.9	40	0.1
17.2	$1.108/(496.5*s+1)$	137	1	3.915	30	1
19.3	$2.4/(510.7*s + 2.48)$	64.74	0.123	4.046	300	1
26.5	$1.98/(510.7*s + 1.88)$	133.33	1	1.667	200	1
29.8	$1.83/(510.7*s + 1.81)$	133.3	1	1.667	200	1

TABLA: 14. Datos de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  para cada punto de operación

### 5.1.1.3. VALIDACIÓN DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR P.O 17.2 CM

Para la validación de los controladores obtenidos en sisotool se realiza la simulación de la planta en lazo cerrado utilizando las constantes de la ecuación (5.3) para el controlador PID y también se obtiene la respuesta de la planta en lazo abierto, el diagrama de bloque utilizado en simulink para esta simulación se presenta en la figura (5.7)

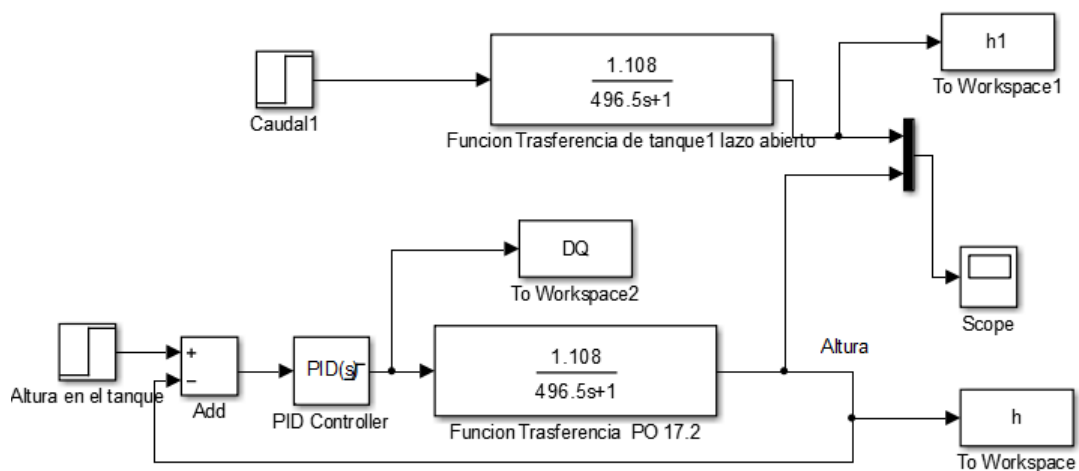


FIGURA 5.7. Diagrama de bloques del controlador implementado

La señal de prueba que se ha utilizado en esta prueba es de tipo escalón de  $7.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ , las señales de respuesta de la planta ante este estímulo se muestran en la figura 5.8.

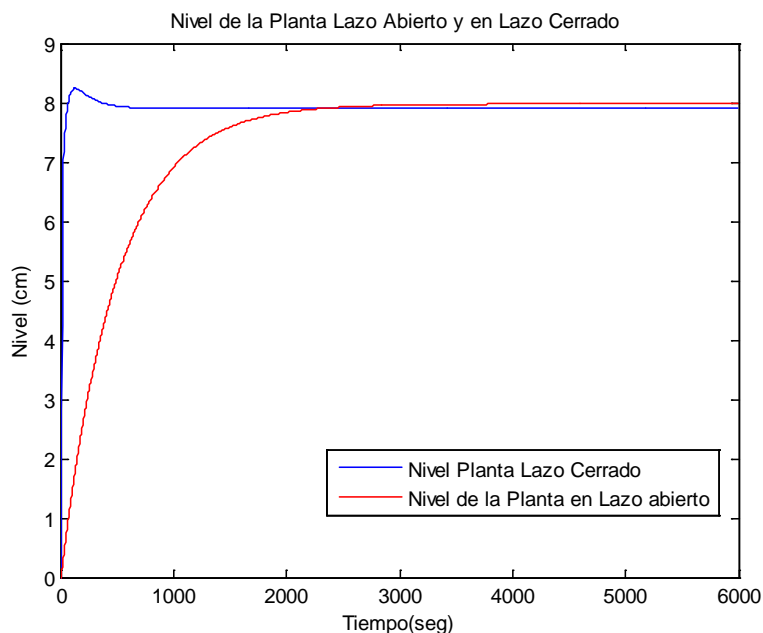


FIGURA 5.8. Comparación de las respuestas de control en lazo abierto y lazo cerrado del controlador PID implementado



Como se puede observar en la Figura 5.8 con el controlador en lazo cerrado se ha logrado mejorar el tiempo de respuesta en la estabilización de la planta de 2500 segundos aproximadamente en lazo abierto a un tiempo de aproximadamente de 700 segundos en lazo cerrado, aunque se observa un valor de aproximadamente 1 % de sobre nivel porcentual en la respuesta del sistema en lazo cerrado. La señal de control  $U$  del sistema en lazo cerrado es la que se muestra en la Figura 5.9 la cual logra tomar un valor de  $183 \text{ cm}^3/\text{s}$  en el inicio y  $8 \text{ cm}^3/\text{s}$  aproximadamente en estado estable.

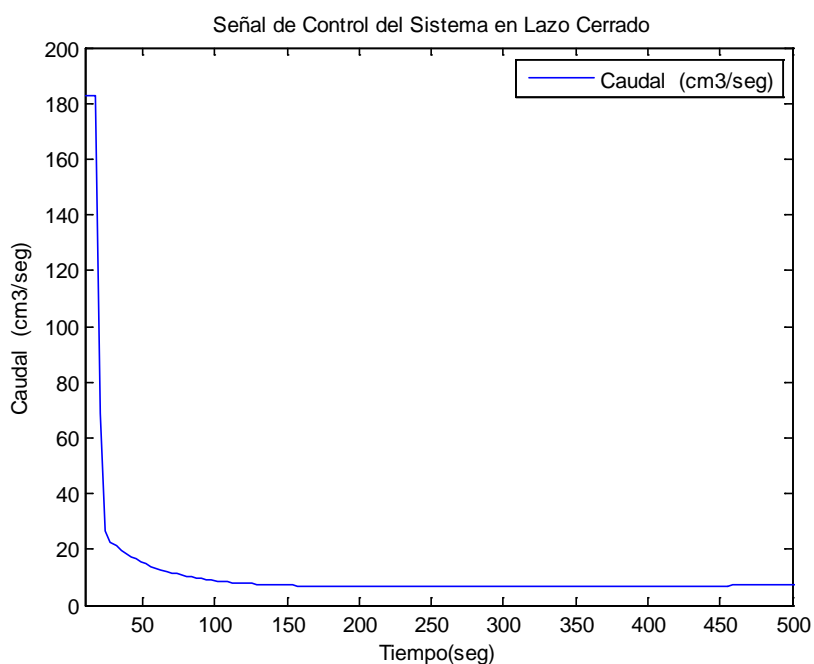


FIGURA 5.9. Señal de control ( $u$ =caudal) en lazo cerrado

#### 5.1.1.3.1. Prueba de funcionamiento del controlador PID para el P.O.

##### 13.7 CM

Para realizar la simulación de este controlador se ha utilizado el mismo diagrama de bloques en simulink de la figura 5.7, con la diferencia que la

función de transferencia de la planta corresponde al P.O 13.7 cm y las constantes del controlador PID son las correspondientes de la tabla 14 para este punto, se utiliza como consigna una entrada paso de magnitud uno, en la figura 5.10, la señal de salida del sistema ha mejorado significativamente con el controlador PID, su tiempo de estabilización se ha reducido de aproximadamente 1000 segundos en lazo abierto a 30 segundos aproximadamente en lazo cerrado, el sistema no tiene sobre nivel porcentual.

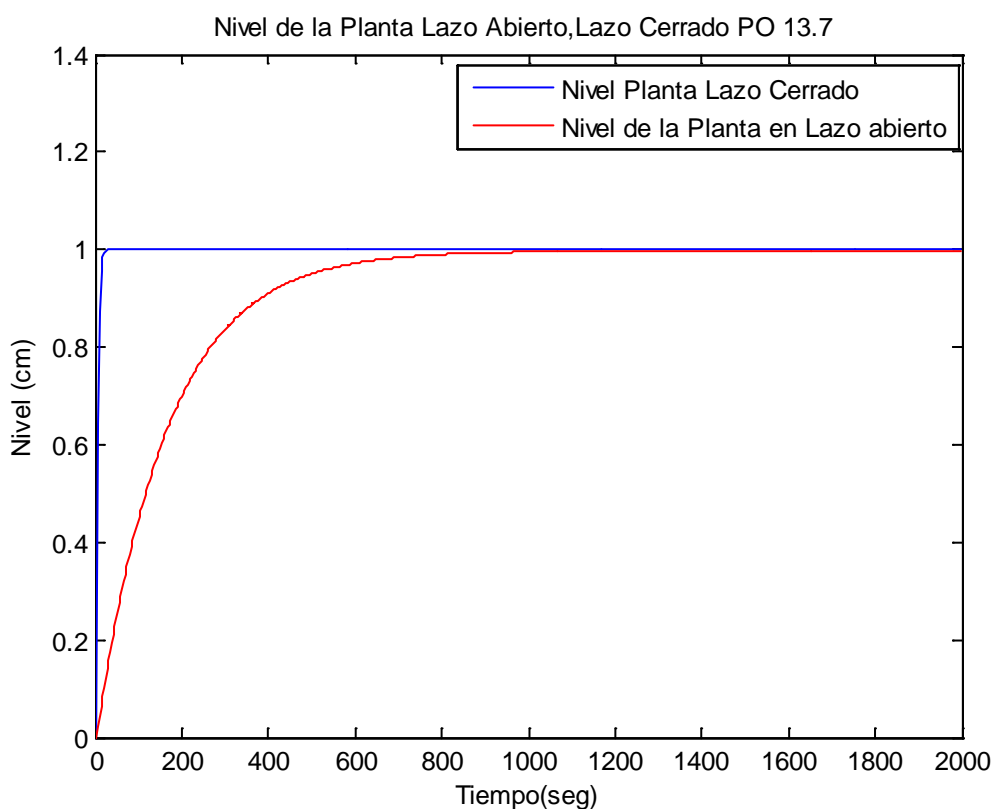


FIGURA 5.10. Comparación de la respuesta del controlador en lazo abierto y lazo cerrado para el P.O. de 13.7 cm

### 5.1.1.3.2. Prueba de funcionamiento del controlador PID para el P.O. 17.2 CM

Para realizar la simulación de este controlador se ha utilizado el mismo diagrama de bloques en simulink de la figura 5.7, con la diferencia que la función de transferencia de la planta corresponde al P.O 17.2 cm y las constantes del controlador PID son las correspondientes de la tabla 14 para este punto, se utiliza como consigna una entrada paso de magnitud uno, en la figura 5.11, la señal de salida del sistema ha mejorado significativamente con el controlador PID, su tiempo de estabilización se ha reducido de aproximadamente 3000 segundos en lazo abierto a 500 segundos aproximadamente en lazo cerrado, el sistema tiene sobre nivel porcentual de aproximadamente 1%.

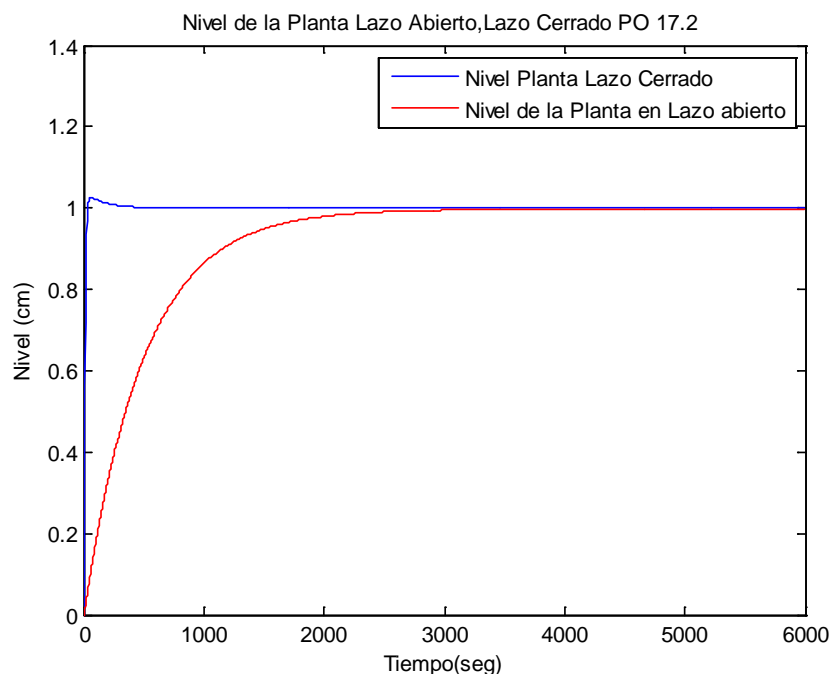


FIGURA 5.11. Comparación de la respuesta del controlador en lazo abierto y lazo cerrado para el P.O. de 17.2 cm

### 5.1.1.3.3. Prueba de funcionamiento del controlador PID para el P.O. 19.3 CM

Para realizar la simulación de este controlador se ha utilizado el mismo diagrama de bloque en simulink de la figura 5.7, con la diferencia que la función de transferencia de la planta corresponde al P.O 19.3 cm y las constantes del controlador PID son las correspondientes de la tabla 14 para este punto, se utiliza como consigna una entrada paso de magnitud uno, en la figura 5.12, la señal de salida del sistema ha mejorado significativamente con el controlador PID, su tiempo de estabilización se ha reducido de aproximadamente 1400 segundos en lazo abierto a 40 segundos aproximadamente en lazo cerrado, el sistema tiene sobre nivel porcentual de aproximadamente 1%.

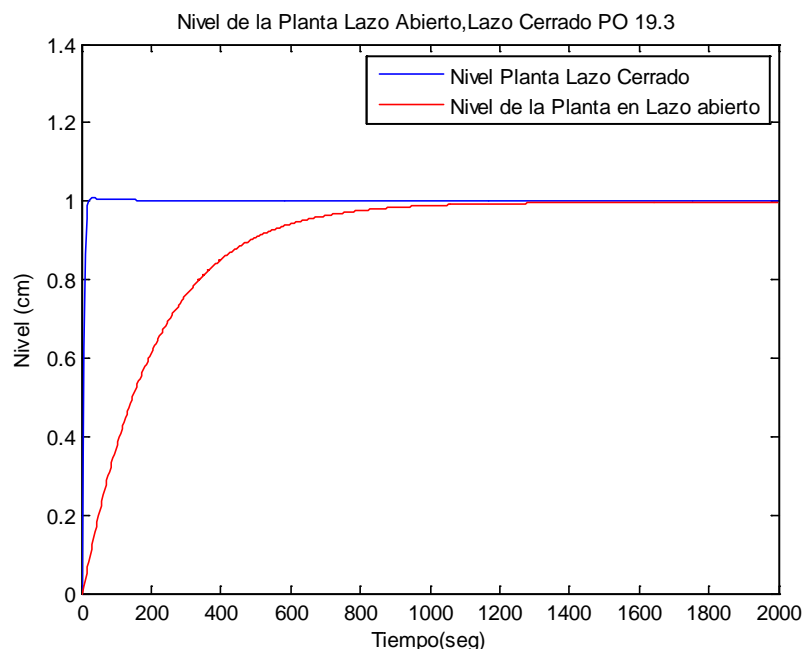


FIGURA 5.12. Comparación de la respuesta del controlador en lazo abierto y lazo cerrado para el P.O. de 19.3 cm

#### 5.1.1.3.4. Prueba de funcionamiento del controlador PID para el P.O. 26.5 CM

Para realizar la simulación de este controlador se ha utilizado el mismo diagrama de bloques en simulink de la figura 5.7, con la diferencia que la función de transferencia de la planta corresponde al P.O 26.5 cm y las constantes del controlador PID son las correspondientes de la tabla 14 para este punto, se utiliza como consigna una entrada paso de magnitud uno, en la figura 5.13, la señal de salida del sistema ha mejorado significativamente con el controlador PID, su tiempo de estabilización se ha reducido de aproximadamente 1500 segundos en lazo abierto a 200 segundos aproximadamente en lazo cerrado, el sistema tienen sobre nivel porcentual de aproximadamente 1%.

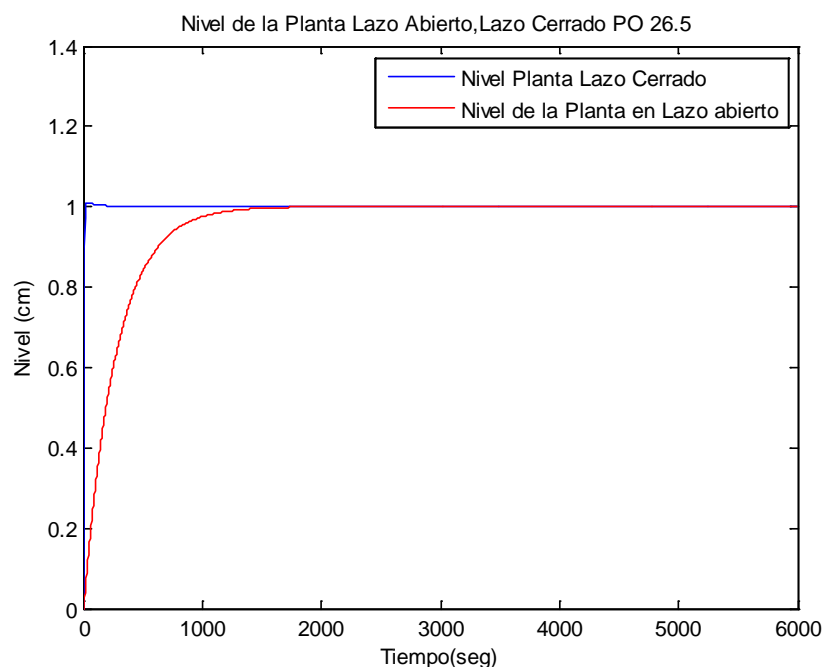


FIGURA 5.13. Comparación de la respuesta del controlador en lazo abierto y lazo cerrado para el P.O. de 26.5 cm

### 5.1.1.3.5. Prueba de funcionamiento del controlador PID para el P.O. 29.8 CM

Para realizar la simulación de este controlador se ha utilizado el mismo diagrama de bloques en simulink de la figura 5.7, con la diferencia que la función de transferencia de la planta corresponde al P.O 29.8 cm y las constantes del controlador PID son las correspondientes de la tabla 14 para este punto, se utiliza como consigna una entrada paso de magnitud uno, en la figura 5.14, la señal de salida del sistema ha mejorado significativamente con el controlador PID, su tiempo de estabilización se ha reducido de aproximadamente 1500 segundos en lazo abierto a 200 segundos aproximadamente en lazo cerrado, el sistema tienen sobre nivel porcentual de aproximadamente 1%.

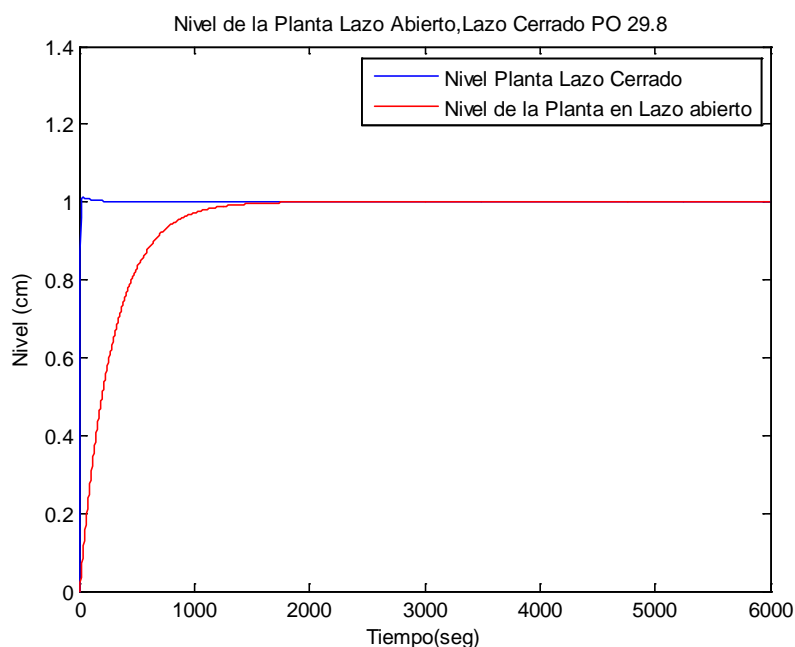


FIGURA 5.14. Comparación de la respuesta del controlador en lazo abierto y lazo cerrado para el P.O. de 29.8 cm

La señal del controlador  $u$  en todos los caso para una entrada paso es como la que se muestra en la Figura 5.15.

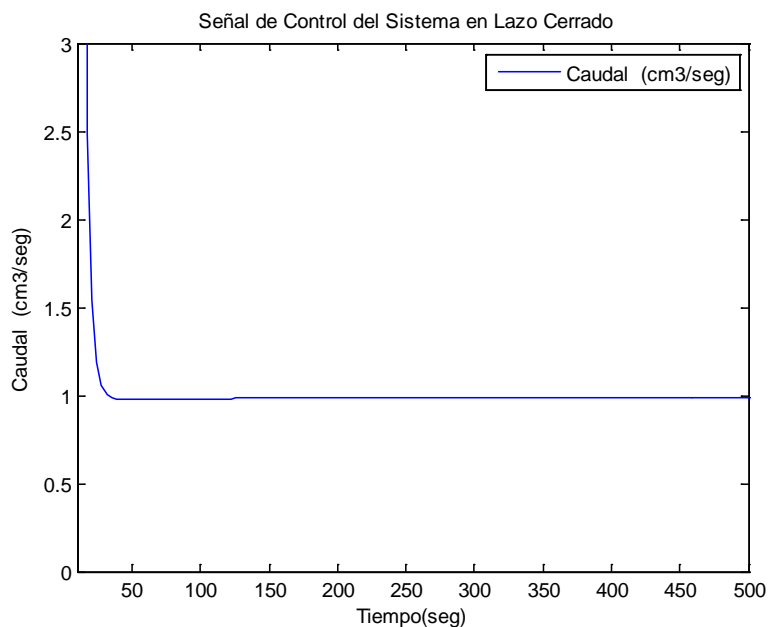


FIGURA 5.15. Señal de control (caudal) para todos los puntos mostrados en la tabla

### 5.1.2. CONTROLADOR PI PARA LA VARIABLE CAUDAL

Para el desarrollo de la propuesta de este proyecto se debe realizar un controlador en cascada (figura 5.16), se define como lazo de control interno el control de caudal. La función de transferencia para este lazo tomará como entrada la señal de control de nivel ( $u_1$ ) y su salida será el caudal de ingreso a la planta. Como la constante de tiempo de estabilización del nivel es muy grande comparada con la constante de tiempo de estabilización del caudal, no es necesario encontrar las ecuaciones dinámicas de la bomba, el controlador primario genera como salida, una señal de control ( $u_1$ ) que tiene unidades de caudal y el controlador interno también debe generar como

salida ( $u_2$ ) unidades de caudal, por lo tanto la ganancia de la planta para este lazo de control es  $G=1$ .

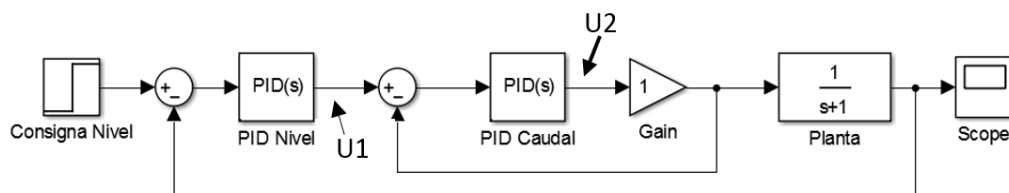


FIGURA 5.16. Diagrama de bloques del controlador Cascada

El esquema del controlador interno considerando la saturación de la variable de control  $u_2$  se presenta en la figura 5.17, en este diagrama se ha considerado un retardo de 0.7 segundos, tiempo que el sistema tarda en tomar la muestra del sensor,

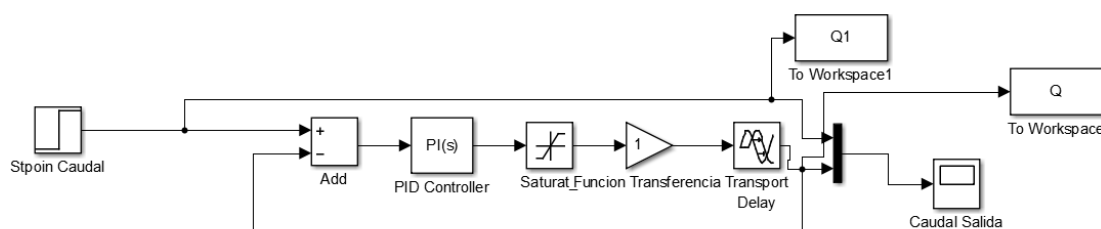


FIGURA 5.17. Diagrama de bloques del controlador interno (caudal)

Se ha realizado la calibración del controlador PI para el lazo interno en simulink de Matlab, y se comprobó el funcionamiento en la planta real, los resultados de las constantes del controlador ( $K_p$ ,  $K_i$ ) que mejor respuesta tiene en la planta se resumen en la tabla 15.

Se ha dividido el funcionamiento del controlador en dos zonas para cubrir el rango de funcionamiento de la planta, uno para el rango de  $60 \text{ cm}^3/\text{s}$  a  $100 \text{ cm}^3/\text{s}$  y el otro para el rango de  $100 \text{ cm}^3/\text{s}$  a  $150 \text{ cm}^3/\text{s}$ .



CONTROLADOR PI DE LA VARIABLE CAUDAL			
Zonas de Operación	Rango de Funcionamiento	Constante Kp	Constante Ki
Zona 1	$70 \text{ cm}^3/\text{s} \leq \text{Caudal} < 100 \text{ cm}^3/\text{s}$	0.46	0.55
Zona 2	$100 \text{ cm}^3/\text{s} \leq \text{Caudal} < 150 \text{ cm}^3/\text{s}$	0.072	0.8

TABLA: 15. Constantes de funcionamiento del controlador PI interno en dos zonas de operación.

En las Figuras 5.18 y 5.19 se muestra las simulaciones realizadas con estas constantes, para cada caso, en las que se puede apreciar que el tiempo que tarda el control en llevar la planta al punto de operación está alrededor de 3 segundos, y tienen un sobre nivel porcentual del alrededor del 5%.

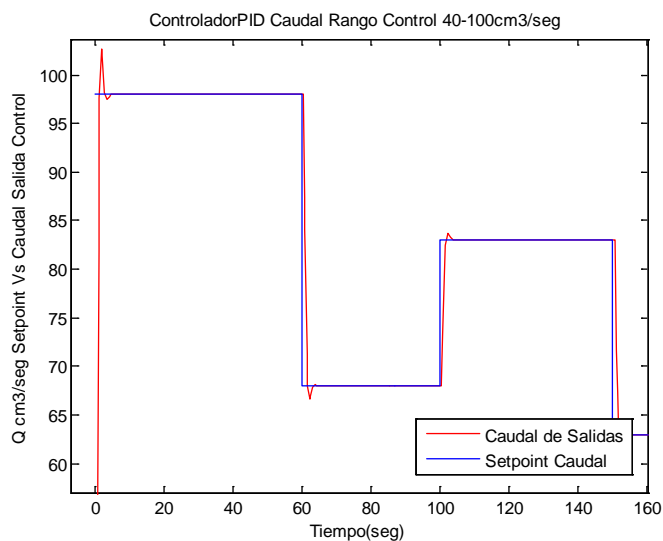


FIGURA 5.18. Respuesta del controlador interno PI (caudal) para una zona de operación de  $70 - 100 \text{ cm}^3/\text{s}$

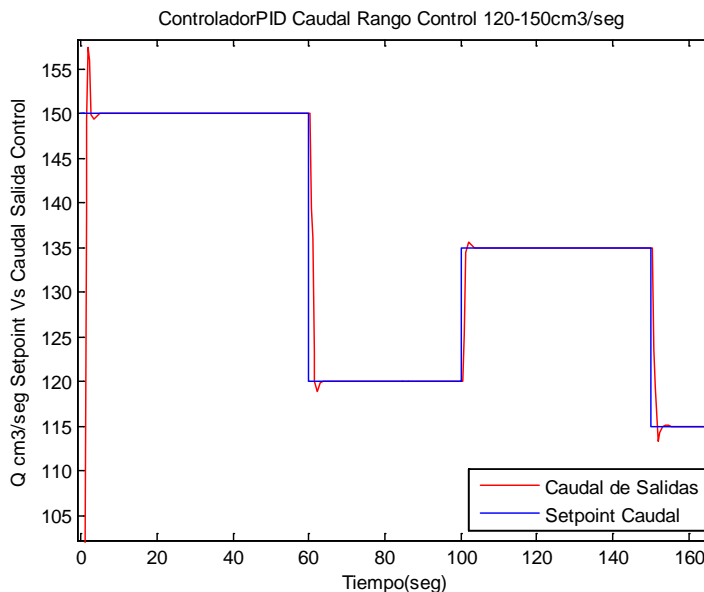


FIGURA 5.19. Respuesta del controlador interno PI (caudal) para una zona de operación de 120 – 150 cm<sup>3</sup>/s

## 5.2. CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS

El control de un sistema por ganancias programada es un método de control que utiliza la dinámica actual de la planta para ir ajustando los parámetros que le corresponden aplicar al controlador en un determinado momento, los valores que seleccionará el algoritmo de control, deben ser previamente calculados, realizando un estudio completo y el diseño de los controladores para varios puntos de operación de la planta lineal, con estos datos se realizan una regresión para el resto de puntos de trabajo, el diseño de los controladores de ganancias programadas para la variable nivel y caudal se realizaron siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Seleccionar una variable auxiliar y definir el rango de operación.
- 2) Determinar los puntos de operación de la variable seleccionada

- 3) Obtener los modelos lineales para diferentes puntos de operación
- 4) Diseñar los controladores PID para cada punto de operación.
- 5) Realizar pruebas de operación del sistema para determinar los rangos de funcionamiento de los controladores lineales diseñados
- 6) Implementar en simulink el controlador de ganancias programadas utilizando el modelo no lineal de la planta
- 7) Realizar pruebas de funcionamiento del controlador ante perturbaciones tanto en la entrada como en la salida de la planta
- 8) Finalmente se realiza el diseño del algoritmo para implementar el controlador de la planta.

Los ítem 2, 3, 4 y 5 se han desarrollado en las secciones 5.1.1.1, 5.1.1.2, 5.1.1.3. En esta sección se desarrollan los ítems 6, 7, 8.

En los controladores de ganancias programadas se debe seleccionar una variable para programar las ganancias en el sistema, en el lazo de control interno esta variable auxiliar será el setpoint de la planta, pero también se puede utilizar la lectura del sensor de nivel. Para el lazo de control interno se utilizará como variable auxiliar el setpoint caudal ( $u_1$ )

### **5.2.1. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL GANANCIAS PROGRAMADAS**

Para cubrir todo el rango de operación del sistema de control de nivel, se realizaron pruebas de funcionamiento de los controladores de la Tabla 15 en la planta real, con esto se determinó el rango de operación de cada controlador, los resultados de esta prueba se muestra en la Tabla 16 , Con

los datos de las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  correspondientes al punto P1 el controlador puede realizar el control de nivel en el rango de 10 cm a 20 cm, con las constantes del punto P2 se puede realizar control en el rango de 10 cm a 20 cm, con las del punto P3 se puede realizar control para un rango de 20 cm a 30 cm y finalmente las constantes del controlador del punto P4 en el rango es de 30 cm a 40 cm respectivamente.

Punto de Operación (cm)	Controlador PID			Rango de Operación
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	
13.7 (P1)	52	0.32	0.9	(10-20) cm
17.2 (P2)	150	1	3	(10-20) cm
19.3 (P3)	64.75	0.123	4.044	(20-30) cm
26.5 (P4)	137	1	2.055	(30-40) cm
29.8 (P5)	133.3	1	1.667	(30-40) cm

*TABLA: 16. Constantes para el funcionamiento del controlador de ganancias programadas (nivel) en los distintos puntos de operación.*

Con los datos de la Tabla 16 se implementa en simulink el controlador de ganancias programadas, el diagrama de este controlador se muestra en la Figura 5.20, en el estimador de parámetros se ha realizado la implementación de las ganancias programadas con switch, el cual selecciona las ganancias  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de la tabla 16 dependiendo del valor que tome la salida (Nivel), en el anexo 25 se muestra la forma como se ha implementado el bloque correspondiente al estimador de parámetros.

Para realizar las pruebas de funcionamiento de este controlador de ganancias programadas se utilizara el modelo no lineal de la planta.

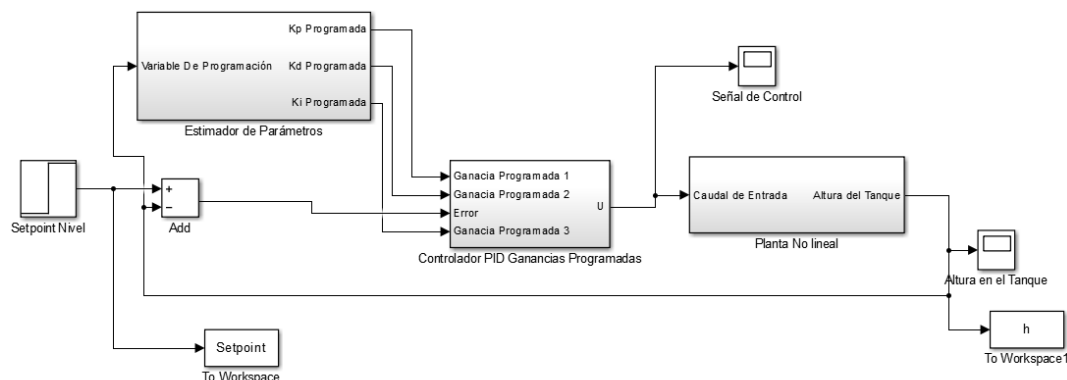


FIGURA 5.20. *Diagrama de bloques del controlador externo de ganancias programadas (nivel)*

### 5.2.1.1. Análisis de Resultados Simulados Control de Ganancias Programadas Nivel

En la Figura 5.21 se ha realizado la simulación cambiando el punto de operación en varios instantes del tiempo como se puede observar la referencia trazada en el sistema es seguida fielmente por el control de la planta, en la gráfica de la Figura 5.22 se presenta la señal de control para esta prueba, en los instantes de cambio de punto de operación la señal de control aumenta significativamente hasta alcanzar el setpoint un vez alcanzado la señal baja su nivel y se mantienen hasta el nuevo cambio.

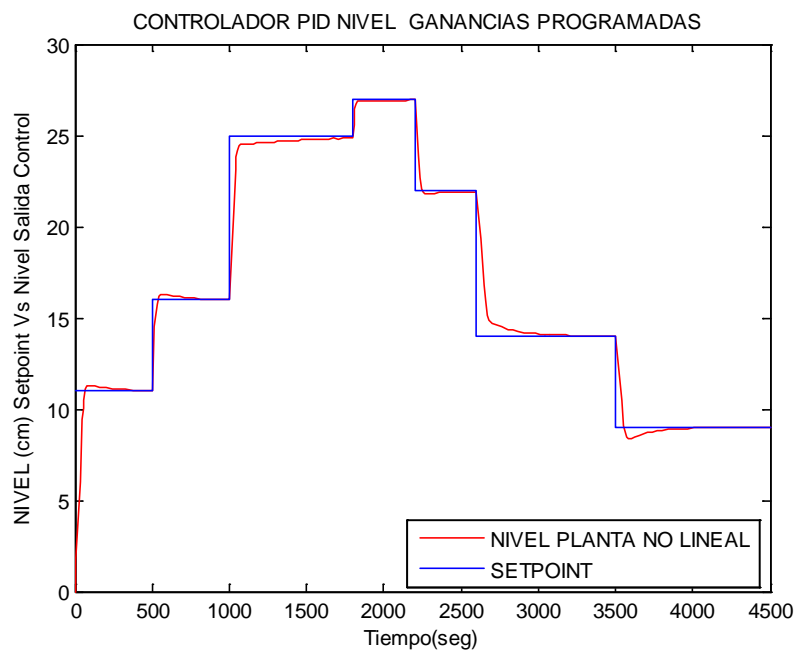


FIGURA 5.21. Respuesta del controlador PID externo de ganancias programadas (nivel) para el modelo no lineal de la planta

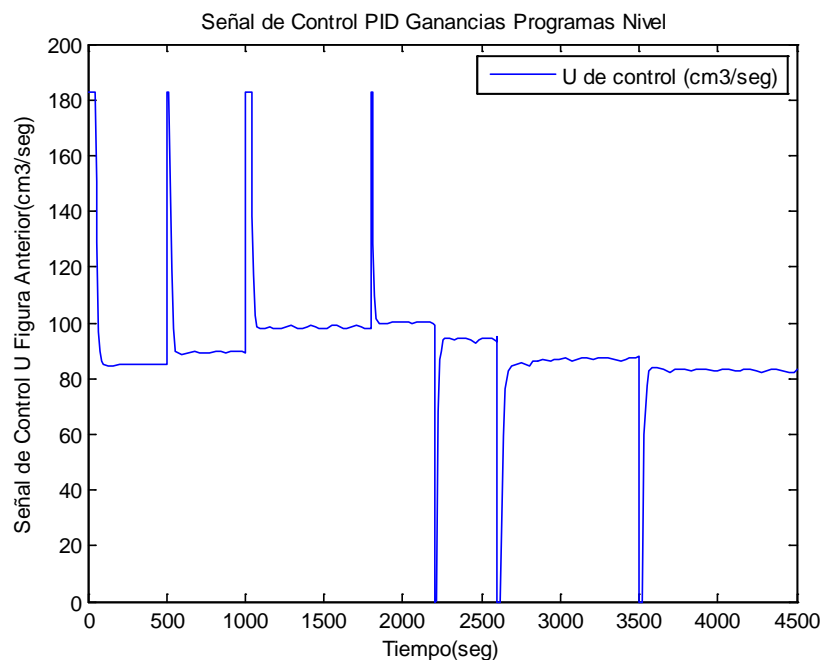


FIGURA 5.22. Señal de control del controlador PID externo de ganancias programadas para la variable nivel

En la simulación (figura 5.23) del controlador con perturbaciones en la salida (nivel), se observa que el control realiza un efecto de recuperación de su punto de trabajo, el tren de perturbaciones realizadas aplicadas en esta simulación (figura 5.24) provocan cambios en la señal de control  $u_1$  (figura 5.25), tanto cuando hay cambio de punto de operación como cuando se produce algún tipo de perturbación, el responsable de este cambio de  $u_1$  es el controlador adaptativo de ganancias programadas que hace que esta señal cambie de valor para lograr llevar a la planta a estado estable.

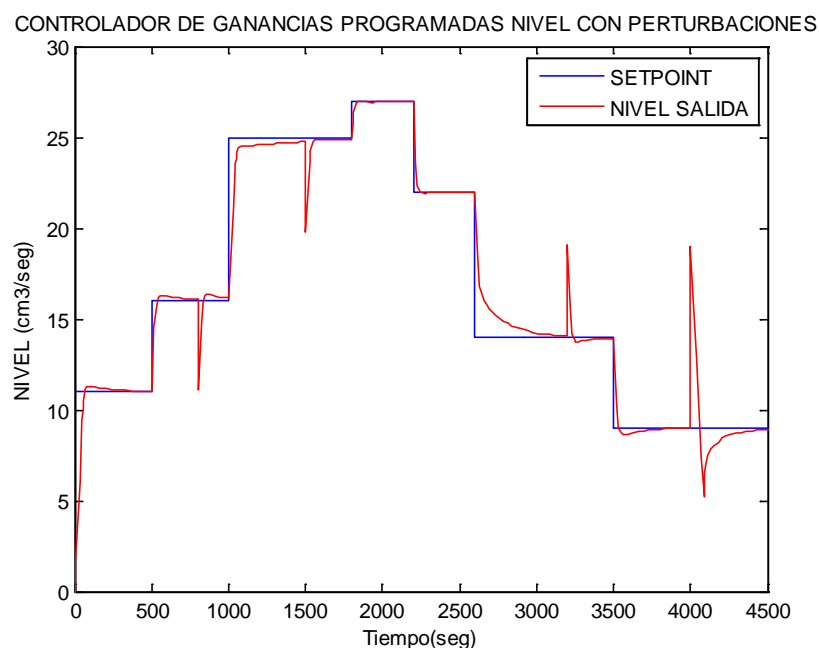


FIGURA 5.23. Respuesta del controlador PID externo de ganancias programadas ante perturbaciones a la salida del sistema

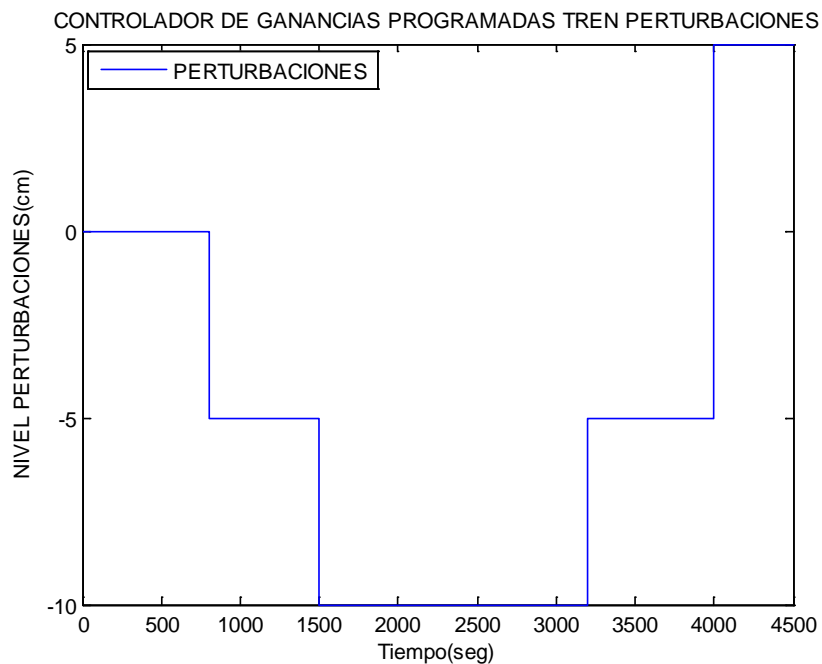


FIGURA 5.24. *Tren de perturbaciones a la salida del sistema*

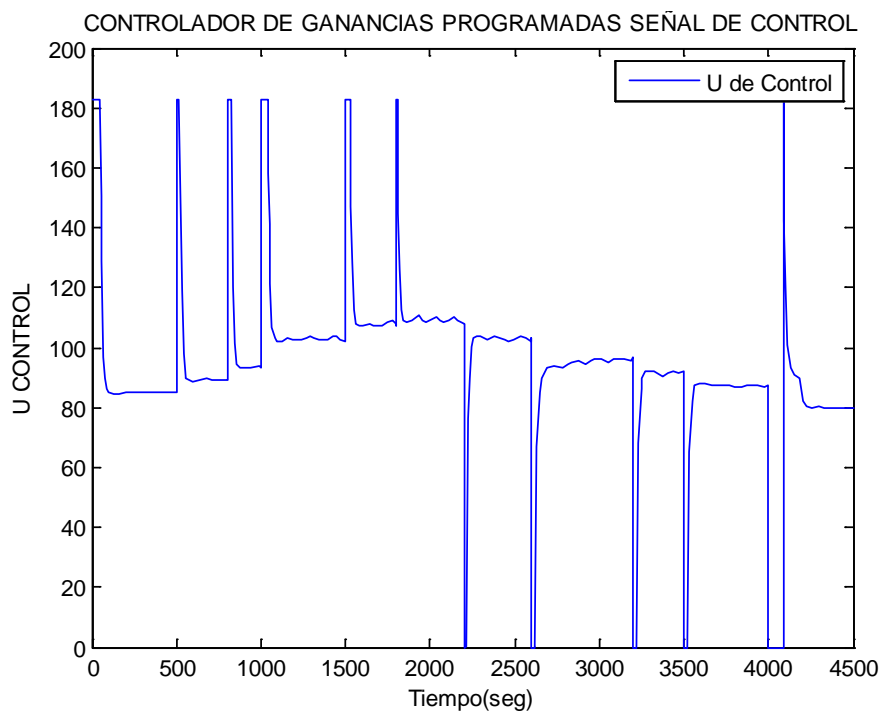


FIGURA 5.25. *Señal de control ( $u$ ) del controlador PID externo de ganancias programadas ante un tren de perturbaciones a la salida del sistema*



En la Figura 5.26 se muestra el comportamiento de la planta con el control de nivel de ganancias programadas, con el tren de perturbaciones (Figura 5.27) realizadas en la entrada de la planta (caudal), esta logra recuperarse satisfactoriamente logrando vencer la perturbaciones y regresando a su punto de operación.

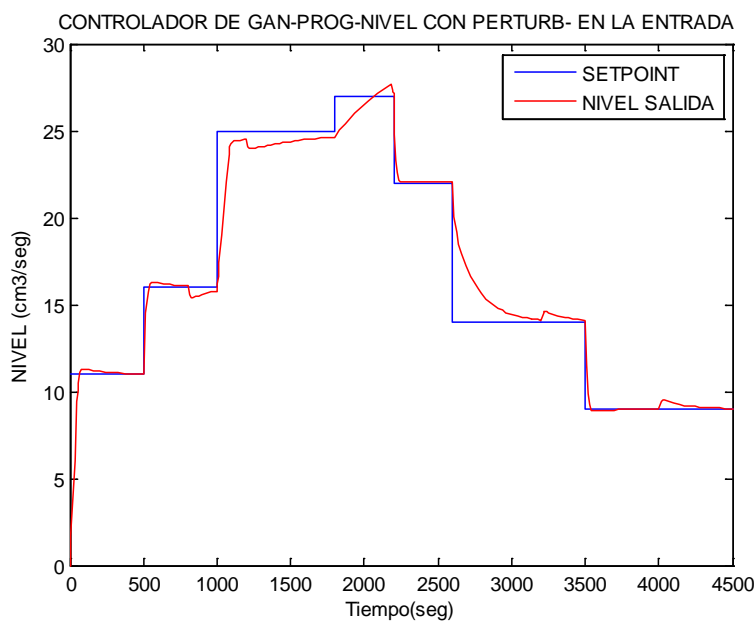


FIGURA 5.26. Respuesta del controlador PID externo de ganancias programadas ante un tren de perturbaciones a la entrada del sistema (caudal)

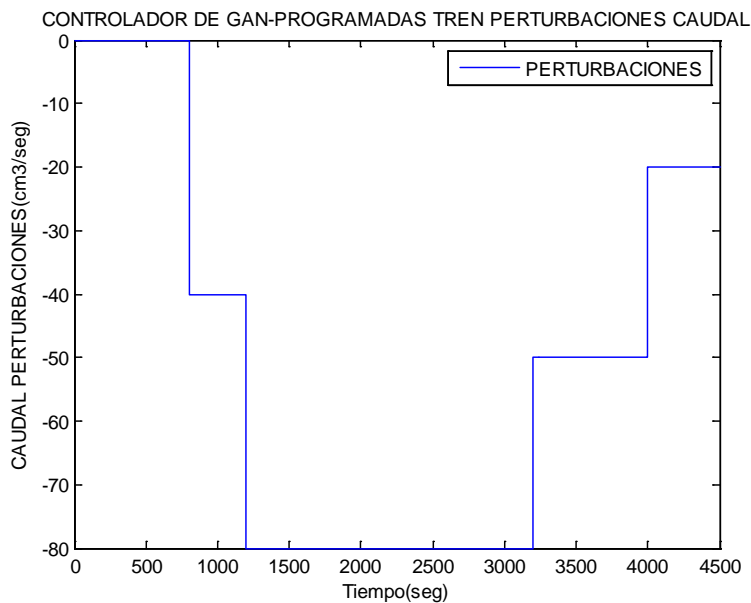


FIGURA 5.27. *Tren de perturbaciones en la entrada de la planta(caudal)*

## 5.2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE CAUDAL GANANCIAS PROGRAMADAS

Para la implementación de este controlador se utilizan los datos de la tabla 14, en donde se encuentran consolidado los controladores de caudal y los rangos de operación de cada uno de estos, en la figura 5.28 se presenta este controlador que se implementó en simulink, el estimador de parámetros se encuentra desarrollado en el anexo 26, en el que se utiliza un switch para seleccionar de la tabla el controlador a utilizar, dependiendo del punto de operación.

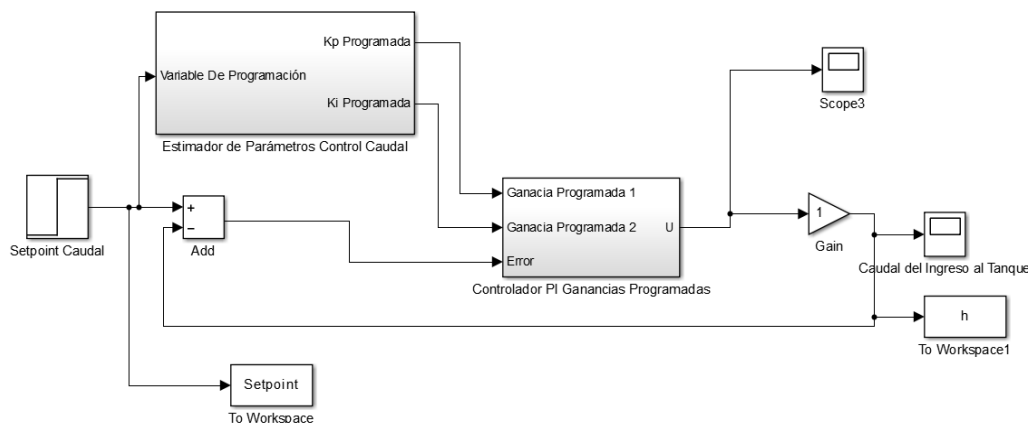


FIGURA 5.28. Diagrama de bloques del controlador PI de ganancias programadas

### 5.2.2.1. Análisis de resultados simulados Control de Ganancias Programadas Caudal

Al realizar la simulación del controlador de Ganancias Programadas Caudal para los diferentes puntos de operación (Figura 5.29) se obtuvieron resultados aceptables, en la figura se observa que el controlador de caudal sigue satisfactoriamente la referencia y la señal  $u_1$  (figura 5.30) cambia en el momento que se tiene nuevo punto de operación, para lograr llevar a la planta a estado estable, los tiempos que demora la planta en ir de un punto a otro es despreciable, así mismo no se observan sobre niveles porcentuales muy pronunciados.

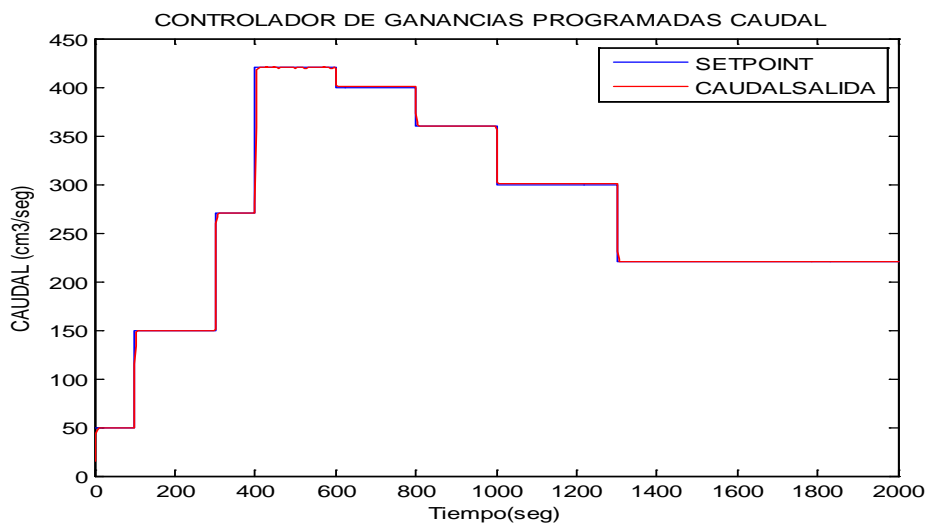


FIGURA 5.29. Respuesta del controlador PID de ganancias programadas para la variable de caudal

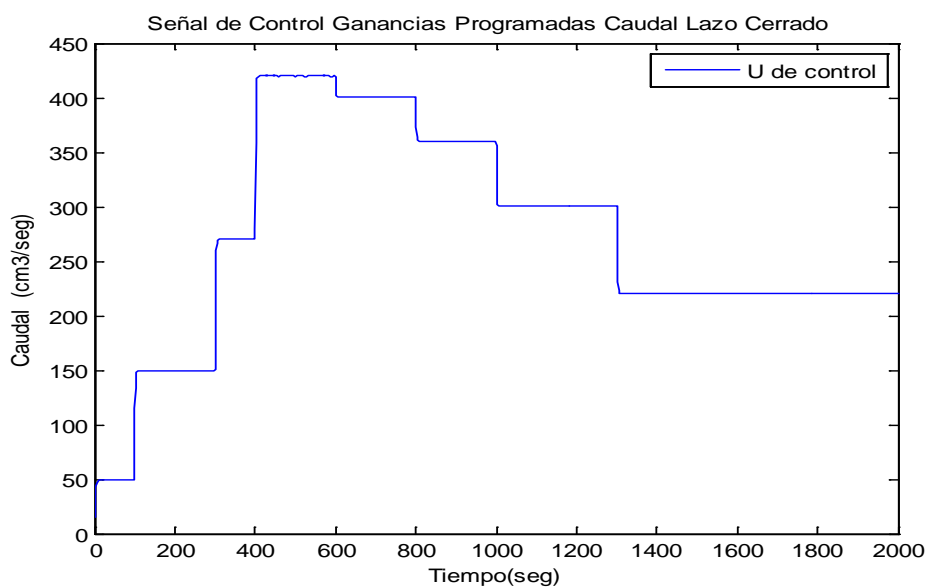


FIGURA 5.30. Señal de control (u) del controlador de ganancias programadas para caudal

### 5.2.2.2. Simulaciones del Controlador Ganancias Programadas Caudal ante Perturbaciones

En la Figura 5.31 se tiene la respuesta del controlador de ganancias programadas caudal, ante las perturbaciones (Figura 5.32), con esta se puede concluir que el control realiza muy bien el seguimiento a la referencia, y se recupera muy rápido ante las perturbaciones, la señal de control toma una dinámica (figura 5.32) para lograr llevar a la planta a estado estable, en donde se produce una nueva referencia o en los puntos donde se tienen las perturbaciones.

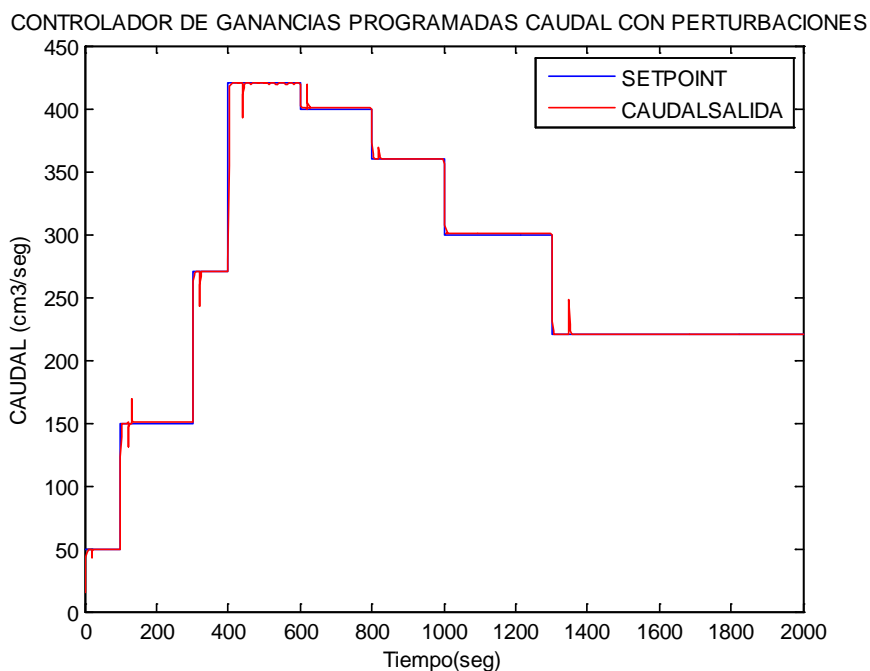


FIGURA 5.31. Respuesta del controlador PID de ganancias programadas para la variable de caudal con perturbaciones

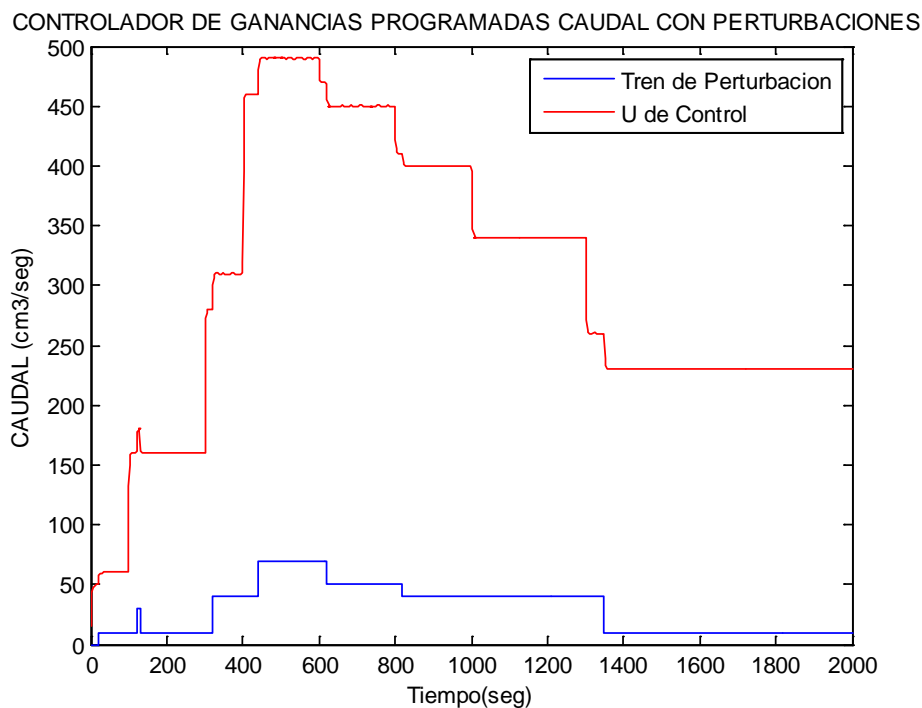


FIGURA 5.32. Señal de control ( $u$ ) de EL CONTROLADOR de ganancias programadas ante un tren de perturbaciones a la salida del sistema

### 5.3. DISEÑO DE ALGORITMOS DE CONTROL

#### 5.3.1. ALGORITMO DEL CONTROLADOR PID NIVEL(GANANCIAS PROGRAMADAS)

El controlador del sistema fue implementado en la tarjeta arduino mega 256, esta tarjeta, para que realice el control debe ser programado, para que ejecute las operaciones necesarias y realice el control, se ha desarrolla un conjunto de funciones cuyos algoritmos se encuentran en los anexos del 2 al 16, las funciones desarrolladas son las siguientes:

- a) Función pidnivel
- b) Función pidcaudal

- c) Función QaPWM
- d) Función Caudal
- e) Función transmisión
- f) Función nivel
- g) Función gananciasProgQ
- h) Función ganaciaProgN

La función pidnivel es la encargada de ejecutar el algoritmo de control PID de la variable nivel, y realiza el llamado de las funciones: nivel, QaPWM, ganaciaProgN, transmisión, para que le brinden los datos de la planta y así ejecute su algoritmo, la función nivel se encarga de la lectura del sensor de nivel en unidades de centímetros, la función ganaciaProgN es la encargada de seleccionar las constantes  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  del controlador dependiendo del punto de operación y los convierte en las constantes  $q_d$  y  $q_i$  del controlador PID digital implementado en este proyecto, esta función recibe como entradas el setpoint, la lectura del sensor de nivel ( $rr1$ ), la diferencia entre el setpoint anterior con el setpoint nuevo ( $rr2$ ) y también el setpoint anterior( $rr3$ ), la función QaPWM es la encargada de convertir la señal de control  $u1$  que da el controlador digital PID a unidades de código PWM, este código será el que envíe el controlador a la tarjeta de fuerza del sistema, la función transmisión es la que permite al usuario realizar el ingreso de los puntos de operación a la cual debe operar la planta, el valor es ingresado desde el SCADA (LabView).

El diagrama de flujo de la función PID del lazo externo corresponde al diagrama de flujo de las figuras 5.33 y 5.34, en el anexo 3 se encuentra el código implementado en arduino de esta función.

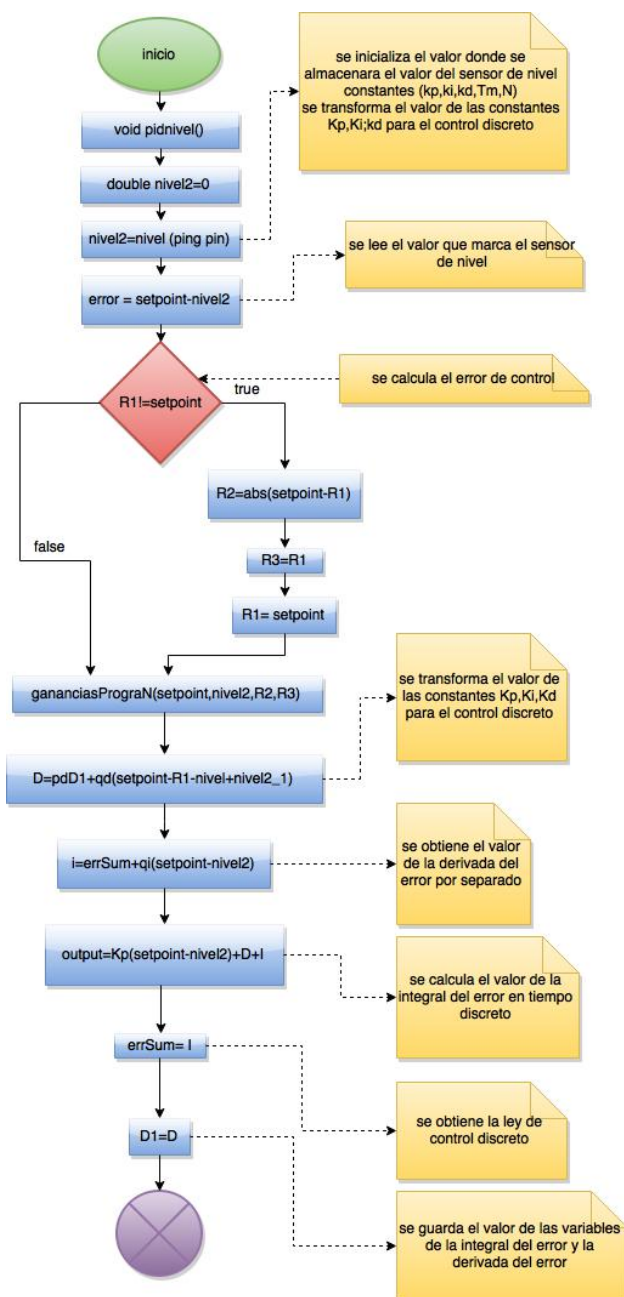


FIGURA 5.33. Diagrama de Flujo del algoritmo de control Adaptativo de Ganancias Programadas(lazo externo)\_1



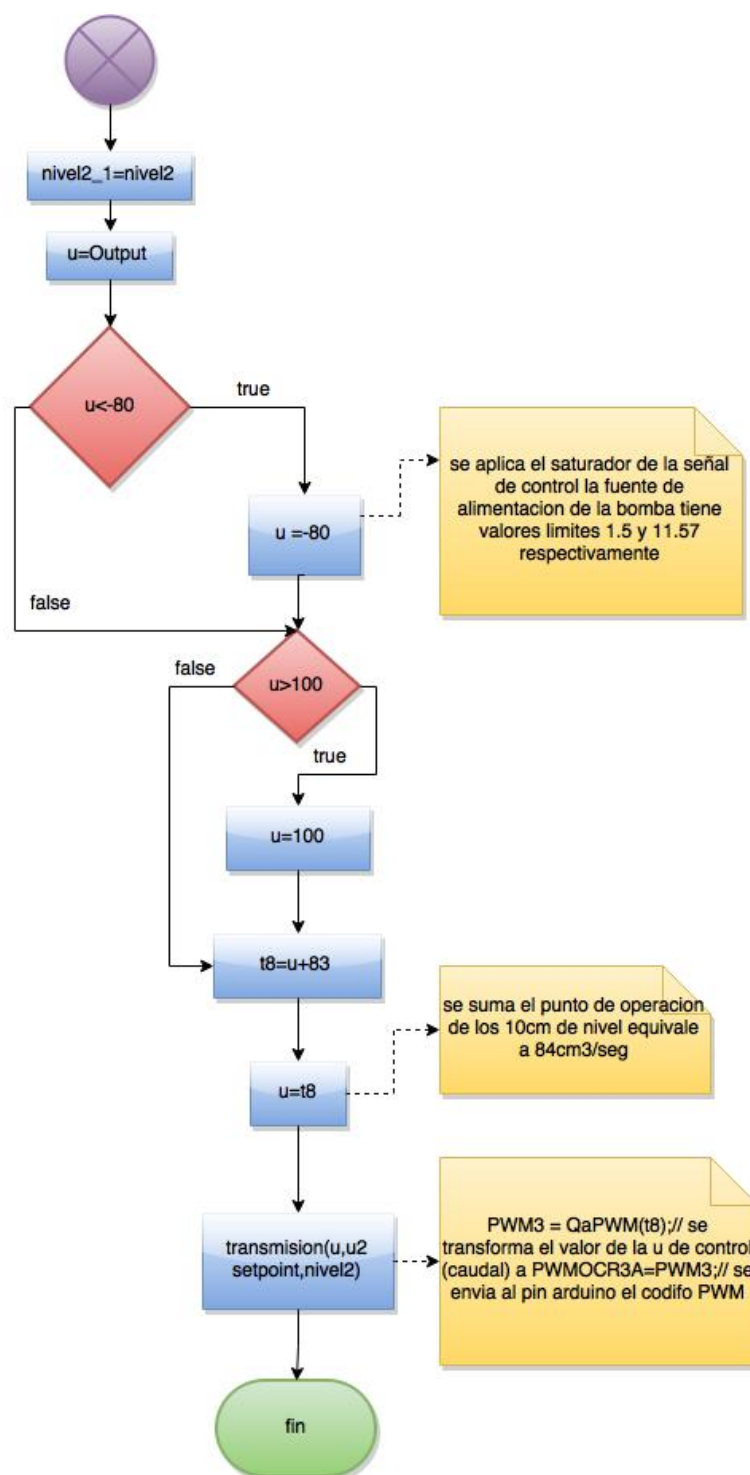


FIGURA 5.34. Diagrama de Flujo del algoritmo de control Adaptativo de Ganancias Programadas(lazo externo)\_2

### **5.3.2. ALGORITMO DEL CONTROLADOR PI CAUDAL(GANANCIAS PROGRAMADAS)**

Este controlador desarrollado en el arduino mega 256 usa un grupo de funciones para su correcto funcionamiento estas son:

- a) Función pidcaudal
- b) Función QaPWM
- c) Función transmisión
- d) Función caudal

El diagrama de flujo con el cual se ha implementado el controlador PI caudal, se muestra en la figura 5.35, y el código del programa de este diagrama se encuentra en el anexo 11, el algoritmo realiza primeramente la lectura del sensor de caudal, luego con este valor a través de la función gananciasProgQ, selecciona los valores a utilizar (tabla 15) de  $k_p$  y  $k_i$ , con estos valores se aplica la ley de control PI, esto permite generar la señal de control( $u_2$ ), que se debe enviar a la planta pasando primeramente por un saturador (la bomba no puede entregar un valor inferior de  $17 \text{ cm}^3/\text{s}$  ni superior a  $183 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) esta señal  $u_2$  se ha convertido a código PWM utilizando la función QaPWM, y el valor que entrega esta última función se ha enviado a la tarjeta de fuerza con el comando OCR3A, finalmente los datos de la planta se muestran en el SCADA con la ayuda de la función transmisión.

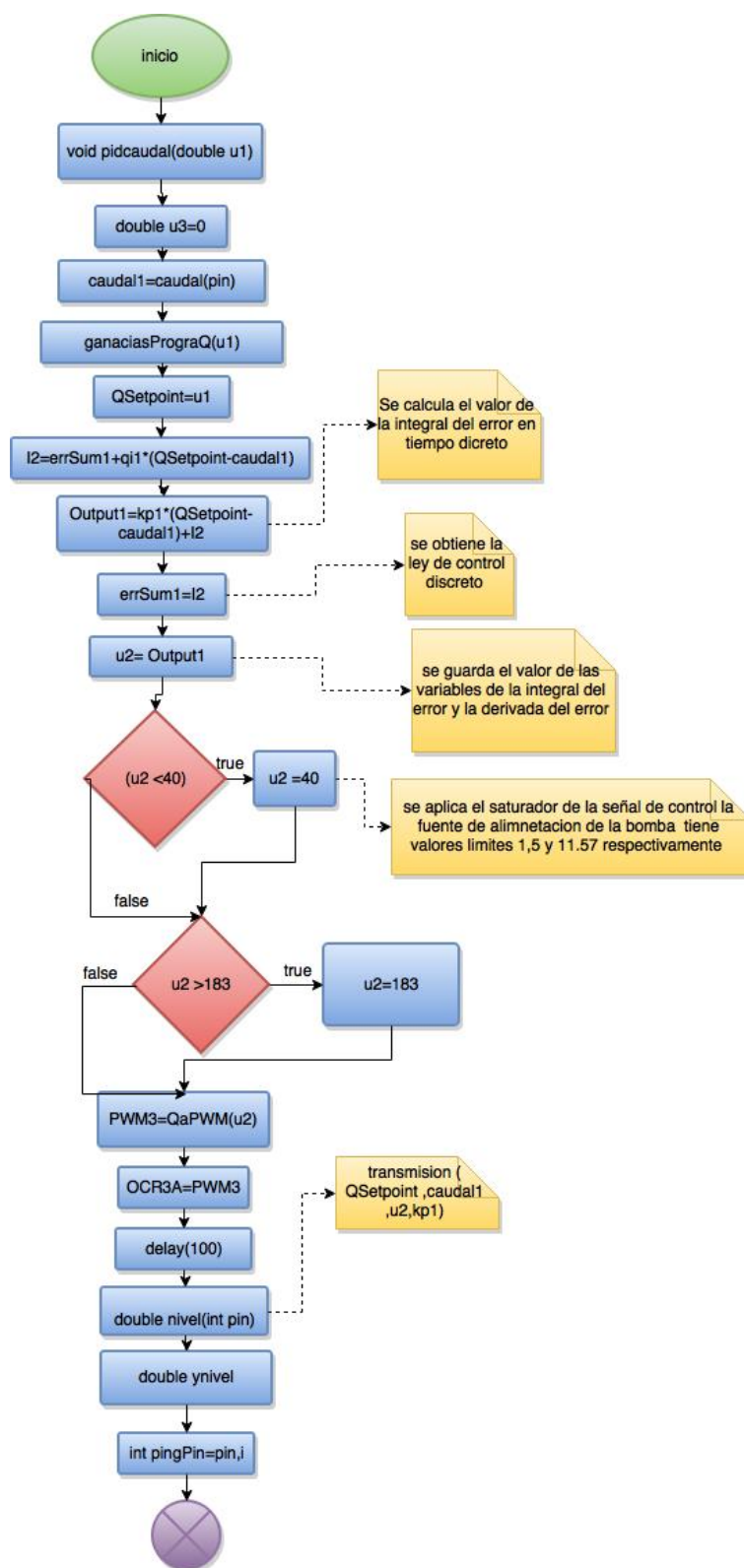


FIGURA 5.35. Diagrama de flujo del controlador PID caudal  
FUENTE: Los autores

### **5.3.2.1. ALGORITMO DEL CONTROLADOR LAZO SIMPLE**

En la figura 5.36 se tiene el diagrama de flujo del algoritmo del control en lazo simple (control ganancias programadas nivel) y en el anexo 10 se tiene las líneas de código del programa, en la variable t1 se inicia la medida del tiempo de muestreo y con t2 se mide el tiempo en cada iteración del programa, con los valores t1 y t2 se determina la variable delta\_T que cuando es igual al tiempo de muestreo de la planta se ejecuta la acción de control PID de la sección 5.3.1

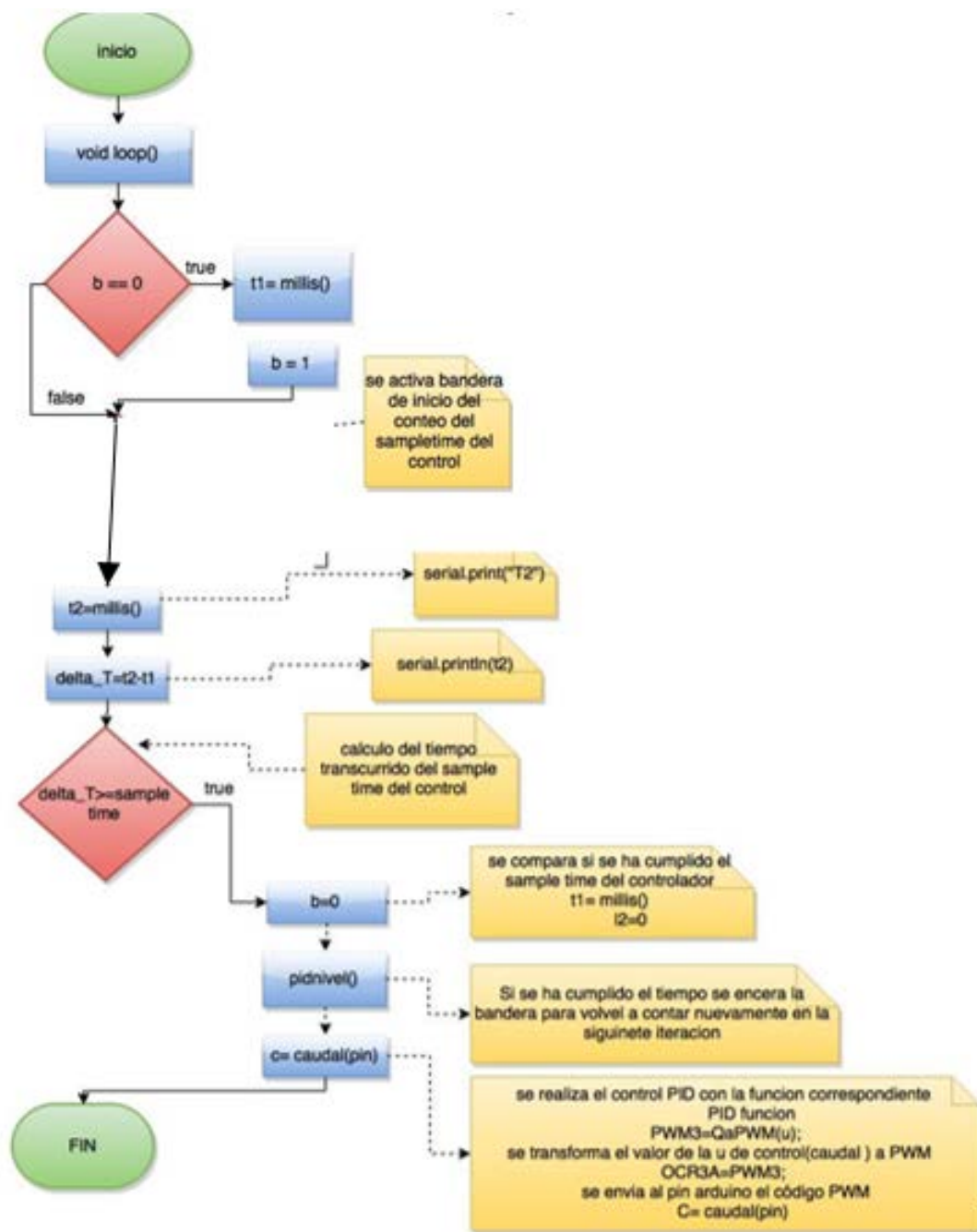


FIGURA 5.36. Diagrama de flujo del algoritmo de control de lazo Simple

### 5.3.2.2. ALGORITMO DEL CONTROLADOR LAZO CASCADA

En la figura 5.37 se tiene el diagrama de flujo del algoritmo del control en lazo cascada (control ganancias programadas nivel y ganancias programadas caudal) y en el anexo 10 se tiene las líneas de código del programa para el arduino, en el diagrama de flujo, la variable t1 inicia la medida del tiempo de muestreo y con t2 se mide el tiempo en cada iteración, con los valores t1 y t2 se determina la variable delta\_T, si el valor de esta variable no es igual al tiempo de muestreo de la planta, se ejecuta el lazo de control interno (algoritmo de control PID caudal sección 5.3.2) si el valor de delta\_T es igual al tiempo de muestreo se ejecuta la acción de control PID de nivel(sección 5.3.1), se ha colocado en el algoritmo una restricción para el controlador interno, a través, de la señal de control externo  $u$ , si esta se encuentra en el rango de operación entre 40 cm<sup>3</sup>/s a 150 cm<sup>3</sup>/s el control en cascada se ejecuta, caso contrario sólo se ejecuta el lazo de control externo, que es la condición que se observa en el diagrama de flujo por la saturación que puede tener la señal de control.

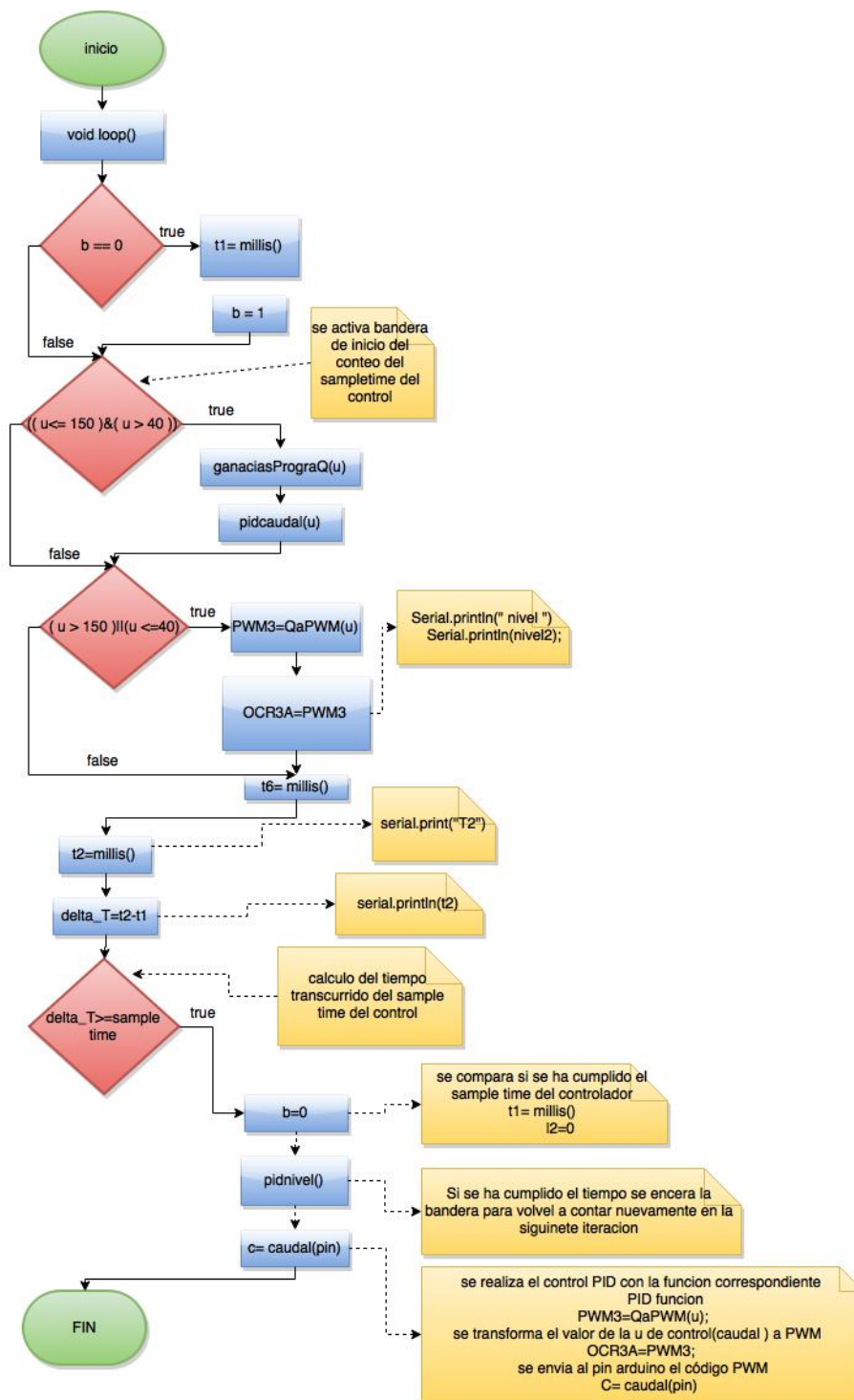


FIGURA 5.37. Diagrama de flujo del algoritmo de control de lazo Cascada

## **CAPÍTULO 6**

### **6. DISEÑO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presenta las diferentes pruebas de regulación que se realizaron en lazo simple y en lazo en cascada con o sin perturbaciones tanto en la entrada como en la salida de la planta, las pruebas realizadas se presenta en el siguiente orden:

- a) Prueba de Regulación del controlador de ganancias programadas del nivel en lazo simple
- b) Prueba de Regulación del controlador de ganancias programadas del caudal en lazo simple
- c) Prueba de Regulación del controlador de nivel en lazo cascada



## **6.1. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE**

### **6.1.1. CONTROLADOR DE NIVEL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE SIN PERTURBACIÓN**

En la Figura 6.1 se tienen las pruebas de operación de la planta sin perturbación, se ha colocado para esta prueba en el controlador (arduino mega 256) el algoritmo de control adaptativo de ganancias programadas de lazo simple, en la figura se puede observar que se ha llevado la planta de un punto de operación a otro en distintos instantes de tiempo. El controlador ha logrado en un tiempo aceptable estabilizar el nivel, y el sobre nivel porcentual de la salida es despreciable, la señal de control  $u_1$  (figura 6.2) tiene una dinámica que permite aumentar o disminuir el ingreso de agua dependiendo del setpoint, si se comparan las Figuras 6.1 y 6.2 se puede afirmar que cuando la planta debe ir a un punto de operación más arriba, el controlador debe realizar el ingreso de más agua por lo que la señal  $u_1$  de planta debe incrementarse hasta lograr llegar al nuevo punto de trabajo en el cual se estabiliza, mientras que cuando va de un punto de operación de alto a bajo debe disminuir la cantidad de agua que ingresa al tanque, hasta llegar al nuevo punto de operación en donde se estabiliza nuevamente.

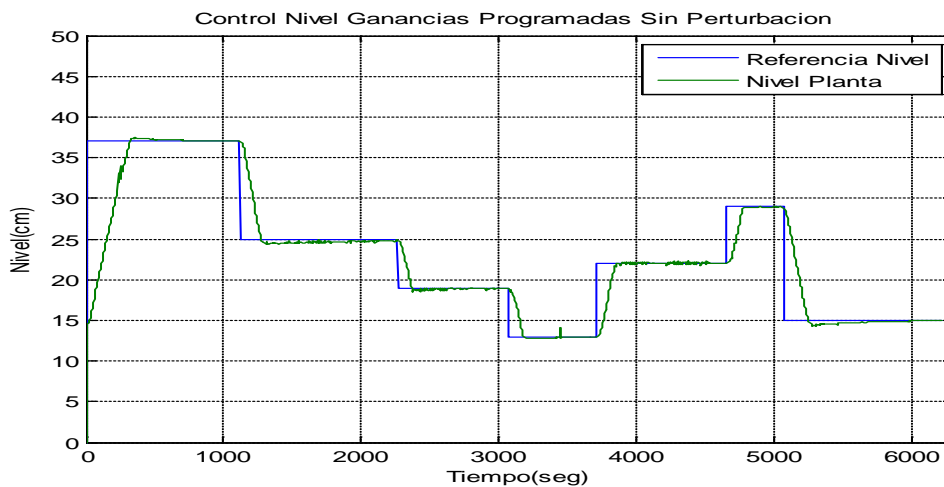


FIGURA 6.1. Respuesta del controlador de nivel de ganancias programadas sin perturbaciones

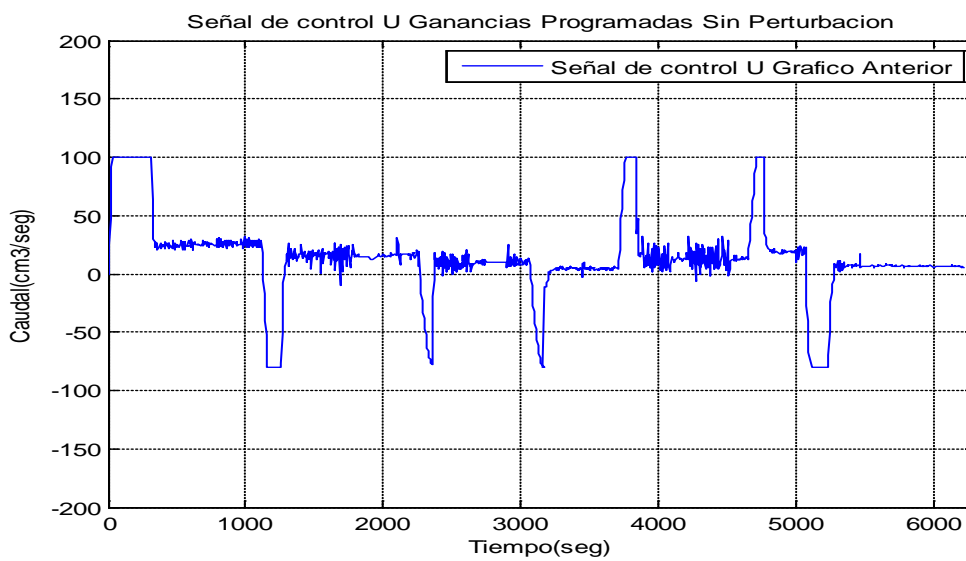


FIGURA 6.2. Señal  $u_1$  del controlador adaptativo de ganancias programadas en lazo simple

### **6.1.2. CONTROLADOR DE GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE CON PERTURBACIÓN**

Se realizó prueba de funcionamiento del controlador adaptativo de ganancias programadas de lazo simple (Figura 6.3 y 6.5), en la prueba, la planta se ha llevado a los puntos de operación (17, 27, 35, 28, 20 y 14) cm respectivamente y se ha generado perturbaciones tanto en la entrada como en la salida del sistema una vez que se ha estabilizado. Si se analiza la señal de salida, se puede observar que el nivel en la planta sigue fielmente a la referencia, pero en los puntos en los cuales se presenta las perturbaciones se afecta a la salida de la planta, pero el control responde satisfactoriamente para regresar nuevamente el nivel a su punto de operación. En la señal de control ( $u_1$  figura 6.5) se puede observar el efecto que se produce cuando una perturbación de ingreso de líquido al tanque de control, la señal de control  $u_1$  disminuye para que el nivel llegue nuevamente a su punto de operación, pero si la cantidad de líquido en el tanque se pierde por efecto de perturbación, la señal de control aumenta, para compensar esta pérdida, logrando mantener la cantidad de líquido en el tanque de control.

En la figura 6.4 se puede ver el tiempo que tarda el controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en llevar a la planta de 28 cm a 35 cm aproximadamente 120 segundos.

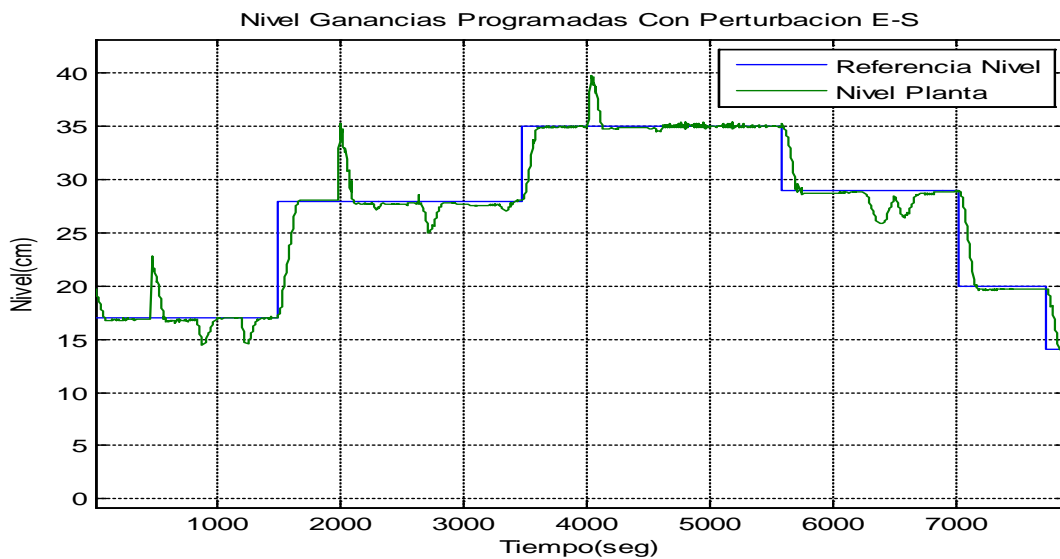


FIGURA 6.3. Respuesta del controlador de nivel de ganancias programadas con cambios de consigna o setpoint con perturbaciones a la entrada y salida de la planta

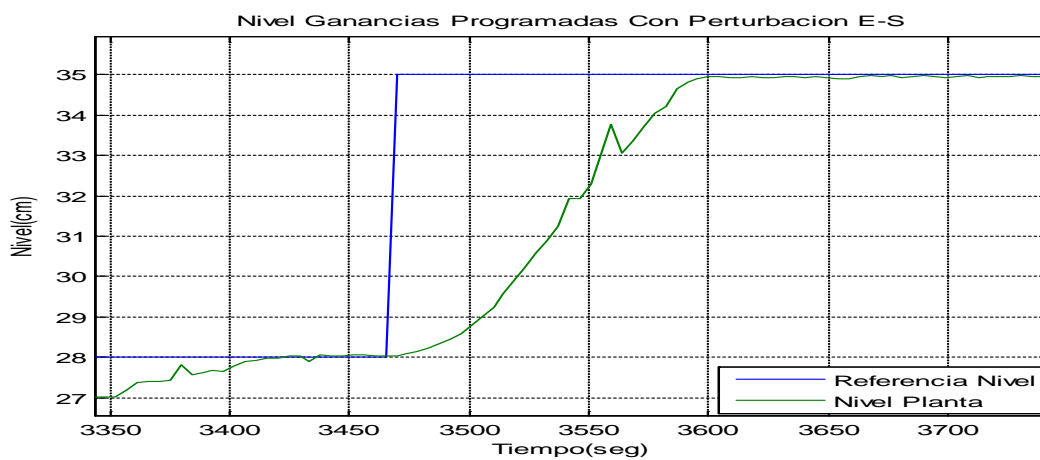


FIGURA 6.4. Retardo de tiempo del controlador Adaptativo Ganancias Programadas para llevar la planta de 28 cm a 35 cm

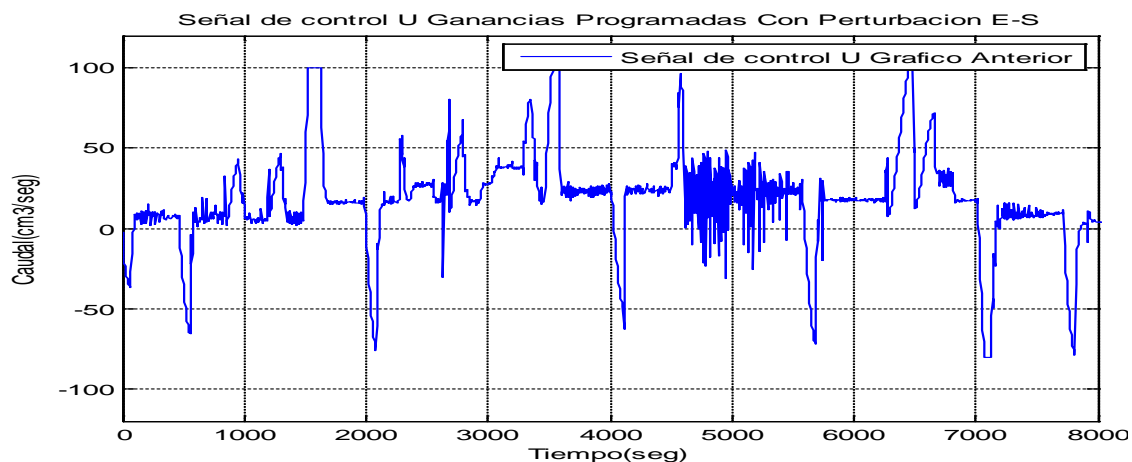


FIGURA 6.5. Señal  $u_1$  del controlador Adaptativo de Ganancias Programadas con cambios en el setpoint y perturbaciones en la entrada y salida de la planta

## 6.2. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS EN LAZO SIMPLE

### 6.2.1. CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS SIN PERTURBACIÓN

En la Figura 6.6 se tiene las pruebas de operación de la planta sin perturbación, se ha colocado para esta prueba en el controlador (arduino mega 256) el algoritmo de control Adaptativo de Ganancias Programadas del Caudal en lazo simple, los puntos de operación por el cual pasa el sistema son: (85, 135, 115, 130, 150, 120 y 104)  $\text{cm}^3/\text{s}$  respectivamente. El controlador ha logrado en un tiempo pequeño estabilizar el caudal, y el sobre nivel porcentual de la salida es despreciable, la señal de control  $u_2$  (figura 6.6) tiene una dinámica que permite aumentar o disminuir el ingreso de agua

dependiendo del setpoint, si se comparan las señales de la figura se puede afirmar que cuando la planta debe ir a un punto de operación más arriba, el controlador debe realizar el ingreso de más agua por lo que la señal  $u_2$  de planta debe incrementarse hasta lograr llegar al nuevo punto de trabajo en el cual se estabiliza, mientras que cuando va de un punto de operación de alto a bajo debe disminuir la cantidad de agua que ingresa al tanque, hasta llegar al nuevo punto de operación en donde se estabiliza nuevamente con esta prueba se puede concluir que el controlador de Ganancias Programadas Caudal cumple su función de llevar al planta a los distintos puntos de operación del caudal, con la ventaja que el porcentaje de sobre nivel porcentual es casi despreciable, como se observa en la figura y el tiempo de estabilización de la planta para producir un salto de operación es despreciable, si se lo compran con el tiempo de estabilización de la variable nivel en el tanque, el cual es de 120 s aproximadamente para producir un salto de operación de 6 cm.

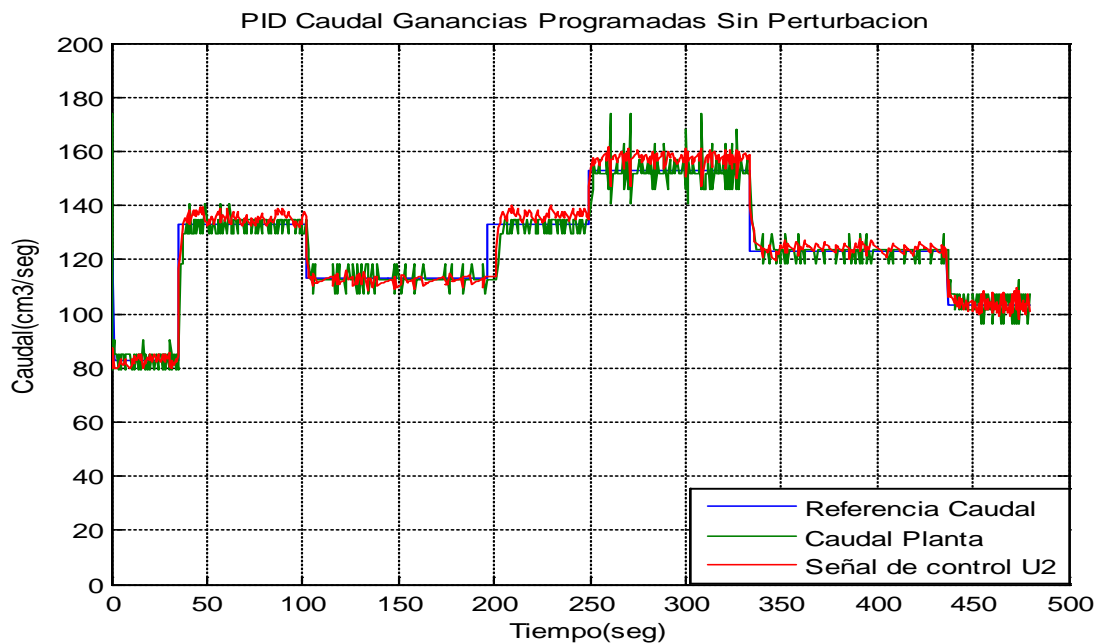


FIGURA 6.6. Señal de control del regulador PID de caudal de ganancias programadas sin perturbaciones

## 6.2.2. CONTROLADOR PI DE CAUDAL CON GANANCIAS PROGRAMADAS CON PERTURBACIÓN

Se realizó prueba de funcionamiento del controlador PI de Ganancias Programadas de la variable Caudal con perturbaciones, en la Figura 6.7 se muestra la respuesta de este controlador para diferentes puntos de operación. Analizando esta figura, se puede observar que este controlador hace que el caudal en la planta siga fielmente a la referencia a pesar de las perturbaciones que se realizaron. Los intervalos de tiempo en los cuales se producen las perturbaciones se detallan a continuación:

Perturbación 1 se la realiza desde los 120 s hasta los 220 s.

Perturbación 2 se la realiza desde los 350 s hasta los 380 s

Perturbación 3 se la realiza desde los 460 s hasta los 480 s.

Perturbación 4 se la realiza desde los 580 s hasta los 630 s.

Perturbación 5 se la realiza desde los 780 s hasta los 830 s.

Ante estas perturbaciones el controlador de Ganancias Programadas del Caudal, responde de una manera óptima, manteniendo el setpoint a pesar de las perturbaciones. La señal de respuesta del controlador ( $u_2$ ) en los intervalos donde se producen las perturbaciones incremento su valor, con lo cual, se compensa las pérdidas provocadas por la perturbación del sistema en esta variable.

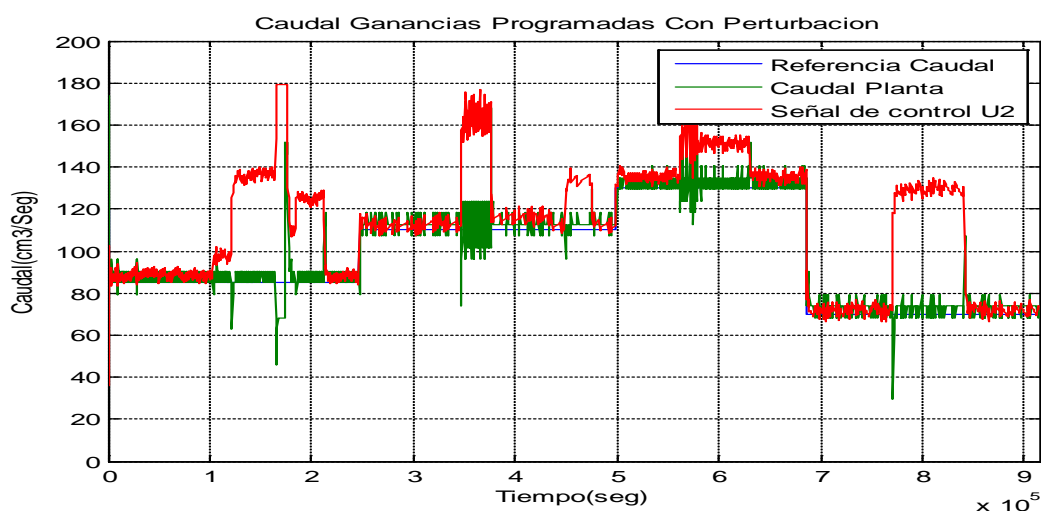


FIGURA 6.7. Señal de control del regulador PID de caudal de ganancias programadas con perturbaciones



### **6.3. PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR DE NIVEL EN LAZO CASCADA**

#### **6.3.1. CONTROLADOR ADAPTATIVO GANANCIAS PROGRAMADAS LAZO CASCADA PERTURBACIÓN EN LA SALIDA**

Se realizó prueba de funcionamiento del controlador adaptativo de ganancias programadas de lazo doble (Figura 6.8 ,6.9, 6.10, y 6.11), en la prueba, la planta se ha llevado a los puntos de operación (17, 23, 33, y 26) cm respectivamente, una vez que se ha estabilizado el nivel en cada uno de los puntos de operación, se le aplica una perturbación en la salida de la planta. Se ha realizado tres perturbaciones: una de ellas a los 220 segundos en la salida de la planta (apertura de válvula de salida adicional al 100%) la cual le provoca una bajada en su punto de operación de 2 cm tardándose en la planta en recuperarse aproximadamente 80 segundos, luego se aplica una perturbación en el intervalo de 1020 a 1300 segundos en la salida de la planta, apertura válvula a un 40% , el efecto en la salida de la planta es casi despreciable ante esta perturbación, finalmente se ha realizado una perturbación en la salida de la planta realizando una apertura del 100% de la válvula de salida, esta perturbación provoca una caída del nivel de 3 cm, tardándose en recuperar la planta en aproximadamente 100 segundos.

En la señal de control  $u_1$  (figura 6.10) se puede observar el efecto del controlador, cuando se provoca una perturbación en el caudal de salida de la planta, la señal de control  $u_1$  aumenta para que el nivel llegue nuevamente a su punto de operación, pero el controlador tarda un determinado tiempo en

compensar la pérdida en el caudal de salida, así mismo la señal  $u_2$  aumenta ya que el controlador del lazo interno debe llevar esta variable al valor de  $u_1$ .

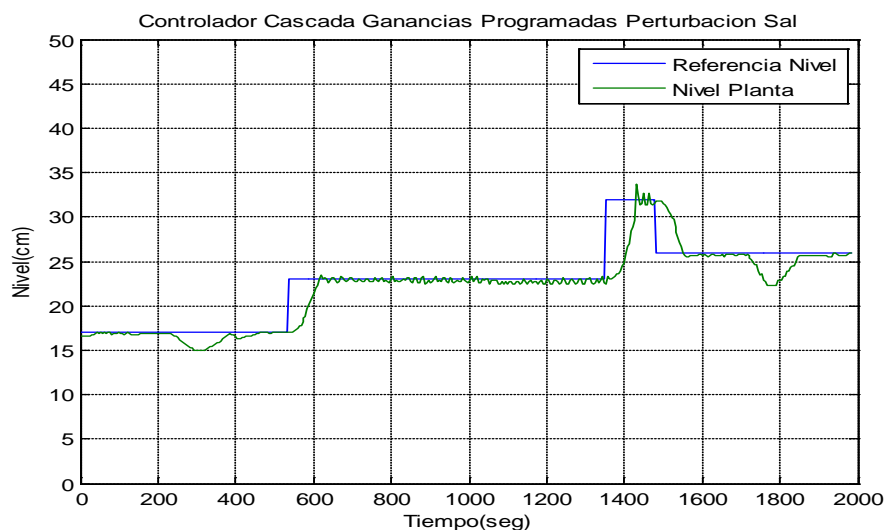


FIGURA 6.8. Respuesta del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo Cascada con perturbaciones en la salida de la planta.

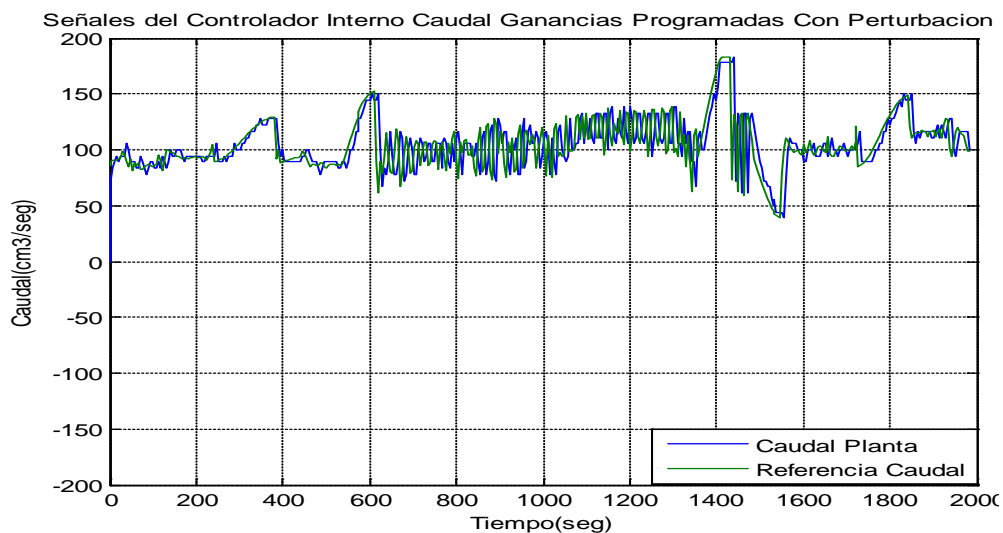


FIGURA 6.9. Señales de Control  $u_1$  y  $u_2$  del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo cascada con perturbaciones en la salida de la planta.

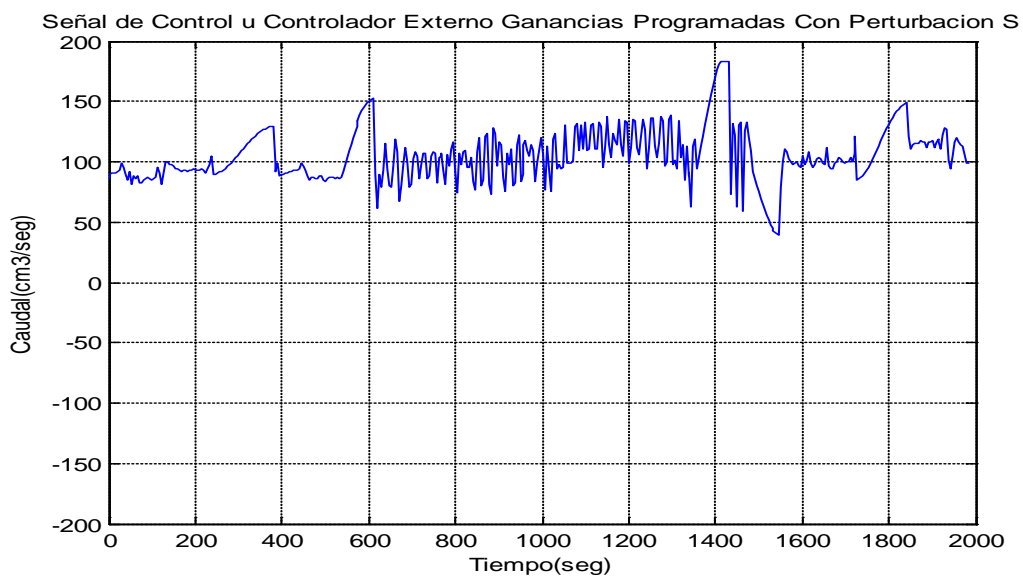


FIGURA 6.10. Señal de Control  $u_1$  del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo cascada con perturbaciones en la salida de la planta

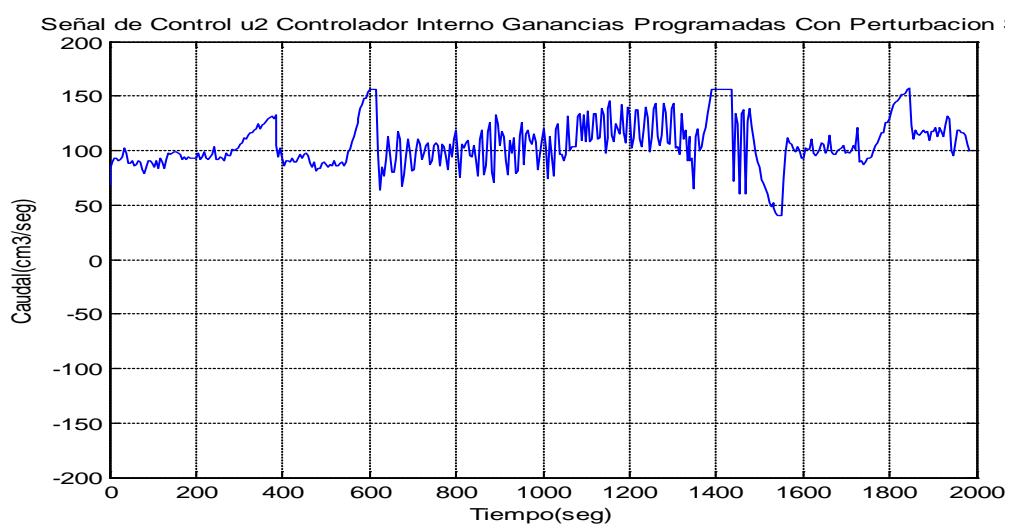


FIGURA 6.11. Señal de Control  $u_2$  del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo cascada con perturbaciones en la salida de la planta

### 6.3.2. CONTROLADOR CASCADA DE GANANCIAS PROGRAMADAS CON PERTURBACIÓN EN LA ENTRADA

En la Figura 6.12 se muestran la respuesta que genera la planta, al colocar en la tarjeta arduino mega 256 el Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo Cascada, En la figura 6.13 se puede observar que se ha realizado tres perturbaciones, una perturbación en el rango de 150 a 200 segundos la cual no genera caída en el nivel en el tanque principal, luego se aplica una perturbación en el intervalo de 450 a 530 segundos en la misma entrada de la planta, el efecto en la salida de la planta ante esta perturbación es nula, finalmente se ha realizado una perturbación en la entrada de la planta (caudal de ingreso) en el rango de 750 a 800 segundos esta perturbación no provoca caída del nivel, en la Figura 6.13 se muestran la respuesta del controlador interno el cual sigue fielmente a la referencia, y en la Figura 6.14 se muestra las dos señales de control: tanto del controlador interno **u2** como externo **u1** se puede observar en estas señales el efecto que provocan las perturbaciones, en **u1** se mantiene constante en los tiempos que se generan las perturbaciones, mientras que la señal **u2**, en la primera perturbación se incrementa en aproximadamente  $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ , en la segunda perturbación se incrementa en aproximadamente  $45 \text{ cm}^3/\text{s}$  y en la última perturbación hay un incremento de aproximadamente  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ , con lo cual se compensa la pérdida debido a la perturbación en el caudal de entrada de la planta.

Observando la figura 6.12 se puede concluir, que en el controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo Cascada no le afecta a la salida las perturbaciones de la entrada, el nivel se mantiene en sus puntos de operación a pesar de tener presente las perturbaciones en la entrada del sistema, por lo cual se puede afirmar que este controlador es más robusto ante perturbaciones en la entrada, que el controlador de ganancias programadas de lazo simple.

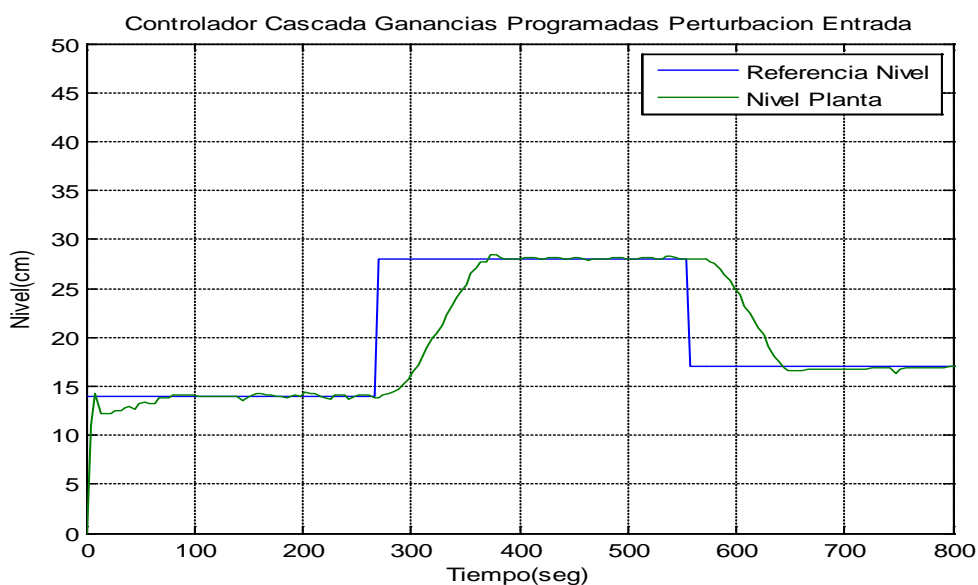


FIGURA 6.12. Respuesta del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo Cascada con perturbaciones en la entrada de la planta

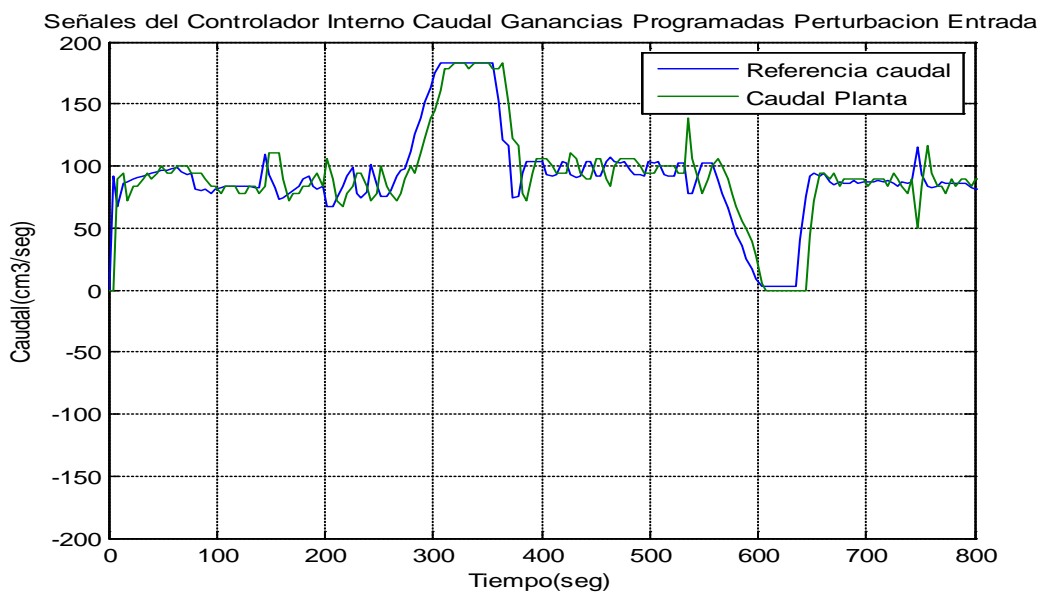


FIGURA 6.13. Respuesta del lazo de control interno del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo Cascada con perturbaciones en la entrada de la planta

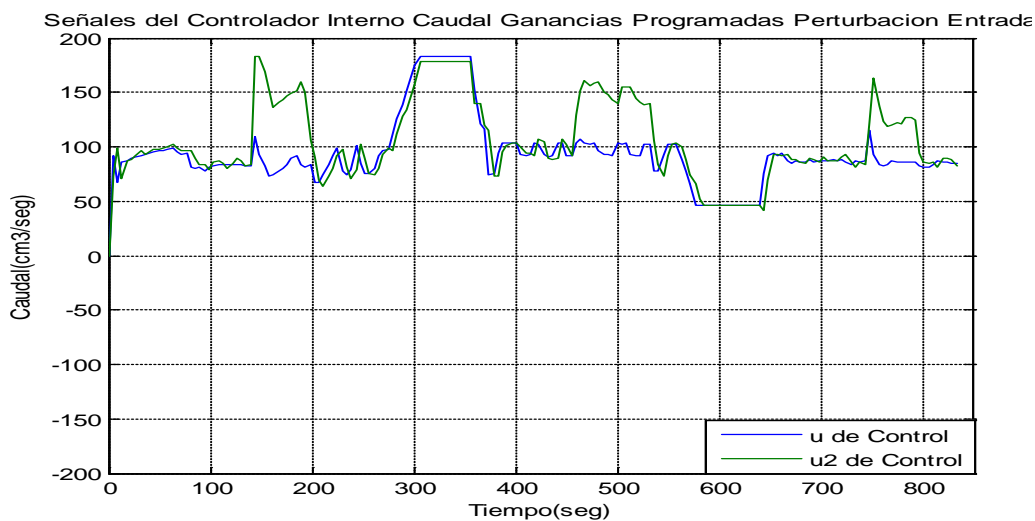


FIGURA 6.14. Señales de Control  $u_1$  y  $u_2$  del Controlador Adaptativo de Ganancias Programadas en lazo cascada con perturbaciones en la entrada de la planta.

En el anexo 27 se presentan algunas pruebas de regulación adicionales que se realizaron en la planta.

#### **6.4. RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA CONTROLADOR**

Como se pudo observar en las pruebas de regulación realizadas a los controladores PID y PI tanto de nivel como de caudal respectivamente el controlador hace que la planta siga a la referencia planteada llegando a estabilizarse en su punto de operación y ante perturbaciones tanto en la entrada como en la salida de la planta el controlador responde de manera satisfactoria haciendo que la planta realice los correctivos en el actuador (señal  $u_1$  de control) para compensar el aumento o disminución en su entrada o salida correspondientemente, los valores de tiempo de estabilización, sobre nivel porcentual, y algunas observaciones de cada uno de estos controles se muestran en la Tabla 17

En las pruebas realizadas en lazo simple y lazo cascada sin perturbación se puede observar que el controlador sigue fielmente a la referencia, mientras que para las pruebas realizadas a estos controles ante la presencia de perturbaciones en la entrada se observó que para el control en lazo simple le afecta a la salida de la planta, haciendo que baje aproximadamente de 1 a 2 cm por debajo de su nivel de referencia, tardándose en recuperar su punto de operación en alrededor de 12 minutos, en cambio para el control por lazo en cascada las perturbaciones que se realizan en la entrada de la planta afectan de manera mínima a la salida, a tal punto que son casi despreciables. Cuando se le realizaron perturbaciones en la salida de la

planta con la apertura del 25% de la válvula adicional que se encuentra en la salida del tanque principal, el control de lazo en cascada mostró una mínima alteración en su salida, que fue alrededor de 2 milímetros, pero ante estas mismas perturbaciones en el esquema de control en lazo simple si afecta a la salida de la planta haciendo que caiga en el rango de 5 a 10 milímetros, y el tiempo que tarda en recuperarse la planta es alrededor de 10 minutos, en el caso que a estos esquemas de control se les realice perturbaciones grandes en sus salidas el sistema se vuelve oscilatorio en la Tabla 17 se muestran los resultados de las pruebas.

Controlador	Tiempo de Estabilización	Sobre Nivel Porcentual	Respuesta ante Perturbaciones	Observaciones
PID Nivel	120 segundos para un salto de 6 cm de nivel	Nulo	Satisfactorio	Perturbaciones en la entrada bajan el nivel en el rango de 1 a 2 cm Tarda en recuperarse aproximadamente 10 minutos. Perturbaciones en la salida hace que baje el nivel de (1-3) cm recupera su punto en aproximadamente 5 minutos
PI Caudal	2 segundos	Nulo	Satisfactorio	Perturbaciones en la entrada afecta de manera mínima a la salida
Ganancias Programadas-Caudal	2 segundos	Nulo	Satisfactorio	Perturbaciones en la entrada afecta de manera mínima a la salida
Lazo Simple Ganancias Programadas-Nivel	120 segundos para un salto de 6 cm de nivel	Nulo	Satisfactorio	Perturbaciones en la entrada y salida de la planta afectan a la planta tarda en recuperarse entre 4 y 5 minutos
Lazo Cascada Ganancias Programadas	120 segundos para un salto de 6 cm de nivel	Nulo	Satisfactorio	Perturbaciones en la entrada no afecta a su salida, pero perturbaciones en su salida la afecta de manera mínima

**TABLA: 17. Resultados de las pruebas realizada a los diferentes controladores**



## 6.5. ANÁLISIS COMPARATIVO

Para realizar un análisis comparativo entre los controladores, de lazo simple y lazo en cascada, se utilizan las pruebas de regulación que se describieron en las secciones 6.1, 6.2, 6.3 de este capítulo con la ayuda de sus gráficos se puede afirmar lo siguiente:

Los controladores de ganancias programadas de lazo simple y lazo en cascada siguen fielmente a la referencia y pueden pasar por diferentes puntos de operación respectivamente, en este proyecto la planta ha sido configurada para que los cambios de puntos de trabajo solo se puedan realizar en saltos mayores a 6 centímetros.

Cuando se realizan perturbaciones en la entrada de la planta, el control en cascada responde de mejor manera que el control en lazo simple ya que sus perturbaciones afectan de manera mínima a la salida de la planta, en cambio en el control en lazo simple se observa que la salida se ve afectada en aproximadamente de 1 a 2 cm de su punto de operación tardando en recuperar el mismo alrededor de 4 a 5 minutos

Cuando se realizan perturbaciones de ingreso a adicional de agua al tanque principal los dos controladores responden de la misma manera ante esta perturbación, tardándose en recuperar el punto de trabajo en aproximadamente 2 minutos, si se hace un ingreso adicional de agua de aproximadamente 4 litros.

Para perturbaciones de apertura de alrededor de 25% de la válvula de salida adicional de la planta el controlador en cascada responde de manera semejante al controlador en lazo simple

La señal de controlador **u1** en lazo simple tiene una mejor dinámica que el controlador en lazo cascada tiene es menos oscilatoria

El tiempo de estabilización del controlador de lazo simple es semejante al tiempo de estabilización del control lazo cascada, para saltos de puntos de trabajos semejantes se encuentra alrededor de los 120 segundos.

Los dos tipos de controladores de este proyecto tienen un sobre nivel porcentual nulo para saltos de puntos de operación de 6 cm

Para perturbaciones grandes en la salida (apertura de la válvula adicional en la salida al 100%) los dos controladores vuelven oscilatoria a la planta.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES.**

1. El control adaptativo de ganancias programadas en lazo cascada tiene un mejor rendimiento que el controlador de ganancias programadas de lazo simple debido a que ante perturbaciones en la entrada de la planta se ve afectada de manera mínima su salida
2. Los dos controladores de ganancias programadas implementados en este proyecto siguen fielmente a la referencia para saltos configurado en la planta de 6 centímetros
3. El tiempo de estabilización para saltos de 6 centímetros en el punto de operación en la planta con los controladores adaptativos de ganancias programadas de lazo simple y lazo cascada es de 120 segundos aproximadamente.
4. Ante perturbaciones en la salida de la planta los controladores adaptativo de ganancias programadas de lazo simple y lazo cascada responden de manera semejante

5. Gracias a la técnica de control adaptativo de ganancias programadas se ha logrado desarrollar un software para el sistema arduino mega 256 que genera un excelente rendimiento de control para la planta didáctica de este proyecto, el mismo que se puede medir por el tiempo de respuesta de la máquina y también por el sobre nivel porcentual que en este caso es nulo
6. Se ha logrado construir una planta didáctica a bajo costo gracias al empleo del sistema embebido arduino meja 256, la cual resulta ser muy versátil al momento de implementar controladores avanzados.
7. Se ha logrado desarrollar la interface de usuario entre el sistema embebido arduino mega 256 y el SCADA LabView el mismo que permite la interacción entre la maqueta y el usuario del sistema de manera fácil.

## **RECOMENDACIONES.**

1. Los controladores implementados en este proyecto han sido desarrollados en el sistema embebido arduino mega 256 el mismo que presenta una gran versatilidad y costo bajo para cualquier controlador inteligente que se requiera desarrollar.
2. La comunicación entre el sistema arduino y el programa LabView resulta ser de gran ayuda para visualizar las variables de la planta.
3. Uno de los inconvenientes que presenta el programa de LabView a la hora de utilizarlo en un sistema Scada es la poca confiabilidad que da a

la hora de interactuar con sistemas embebidos que tengan un sistema operativo de uso libre

4. Los controladores implementados en la planta didáctica han sido desarrollados para saltos de por lo menos 6 cm de punto de operación, son muy confiables cuando el sistema Arduino actúa sin el SCADA pero a veces pierden la comunicación cuando está presente la interface con el usuario.
5. Por los problemas que tienen repentinamente el software de LabView con los sistemas embebidos para la implantación de controladores inteligentes se recomienda como un trabajo futuro de tesis desarrollar un sistema SCADA con software libre pero que interactúe con los sistemas embebidos lo que permitirá abaratar costos en la implantación de cualquier controlador.
6. Se puede bajar los saltos de puntos de operación en la planta pero se necesita realizar una programación más robusta en la parte de las ganancias programadas del controlador.
7. En el controlador de lazo doble o cascada realiza un tiempo de muestreo de la variable nivel de cada 4.5 segundos y la longitud de sus tuberías generan un retardo de aproximadamente 3 segundos, este controlador fue implementado con las constantes calibradas del lazo simple lo cual genera pequeñas oscilaciones en el funcionamiento con el lazo cascada. Se puede corregir estas oscilaciones ingresando unas nuevas constantes con el control actuando con los dos lazos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1].Franco M Edison.; Pinedo Carlos R; Naranjo P. Freddy “Control por ganancias programadas de dos tanques en cascada”, Universidad del Valle Julio de 1996.
- [2].Danko J. y Ondrovicova M. “ADAPTIVE CONTROL OF A LABORATORY TANK SYSTEM”, University of Technology, de BRATISLAVA, Enero del 2000
- [3].Castillo C. Perce, “ DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL NO LINEAL ADAPTATIVO MULTIVARIABLE APLICADO A UN MANIPULADOR ROBOTICO TRASLACIONAL DE 2DOF”, Universidad Nacional de Ingeniería del Perú, año 2004.
- [4].Pérez R Aída R., Conno C. Antonieta A., Enríquez P Álvaro D. “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO TIPO PROGRAMADOR DE GANANCIA PARA LA REGULACIÓN DEL NIVEL EN UN TANQUE ESFÉRICO”, Universidad de Carabobo, diciembre del 2009,
- [5].Parra A. Ángelo R, “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL ADAPTATIVO DE GANANCIA PROGRAMADA PARA EFECTUAR EL CONTROL DE LA FRECUENCIA DE SALIDA DE UN GENERADOR”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, año 2011
- [6].PATENTES DE ADEXCORP, <http://www.adexcop.com/es/industry> fecha de consulta mayo 2015.

- [7]. Angulo B. Cecilio y Raya G. Cristóbal, “Tecnología de los sistemas de control”, primera edición, ediciones UPC, septiembre 2004
- [8]. Ing. Loos Jochen “Historia de la evolución de la limitación del nivel de agua en calderas de vapor y de agua caliente”, BOSCH, fecha de consulta Mayo 2015
- [9]. Tacconi Eugenio, Mantz Ricardo, Solsona Jorge, Puleston Pablo, CONTROLES BASADOS EN ESTRATEGIAS PID, año 2005
- [10]. Alfaro Ruíz Víctor M. “**métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores**”, <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/viewFile/6430/6135> , fecha de consulta Agosto 2014
- [11]. Kuo Benjamin C. “Sistema de control automático” editorial Prentice Hall, fecha de consulta Febrero 2015
- [12]. UNIVERSIDAD NACIONAL SAN JUAN (ARGENTINA) controladores discretos de bajo orden, [http://dea.unsj.edu.ar/control3/teor%C3%ADa/capitulo9\\_controladoresDiscretos.pdf](http://dea.unsj.edu.ar/control3/teor%C3%ADa/capitulo9_controladoresDiscretos.pdf) fecha de consulta enero 2015
- [13]. García J. Luis E, “Control digital teoría y práctica”, fecha de consulta Febrero 2015
- [14]. García J. Luis E, “Sistemas de control avanzado”, fecha de consulta Febrero 2015



- [15]. Naus G.J.L. "Gain scheduling Robust Desing and Automated Tunning of Automotive Controller, University of technology Eindhoven", octubre 2009
- [16]. López G. María Elena, "identificación de sistemas aplicados a un motor de corriente continua", año 2006
- [17]. Martínez Bueno Ángel, "identificación Experimental de sistemas", Universidad de Alicante, año 2011.
- [18]. Enríquez H. Rafael, "**Guía de usuario de Arduino**", noviembre 2009
- [19]. LabVIEWTM, v. 10. Manual de referencia
- [20]. MATLAB® R2012a, versión 7.6. Funciones System Identification toolbox
- [21]. <http://www.taringa.net/posts/info/14090746/Fuentes-de-alimentacion-conmutadas.html> formato APA
- [22]. Gómez M. Jorge A. y Mendoza A. German "Aplicación del control adaptativo a procesos industriales tipo SISO", Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2009.
- [23]. Mott Roobert, " Mecánica de fluidos" sexta edición, 2006, <http://es.slideshare.net/alexsuarezlastra/mecanica-defluidosrobertmott6taedicion>, fecha de consulta Octubre 2014
- [24]. Parra R. Pablo "Modelación y Simulación en ambiente Ecosimpro de una Cámara de Secado para Cacao", Universidad Politécnica Salesiana, Noviembre 2012.

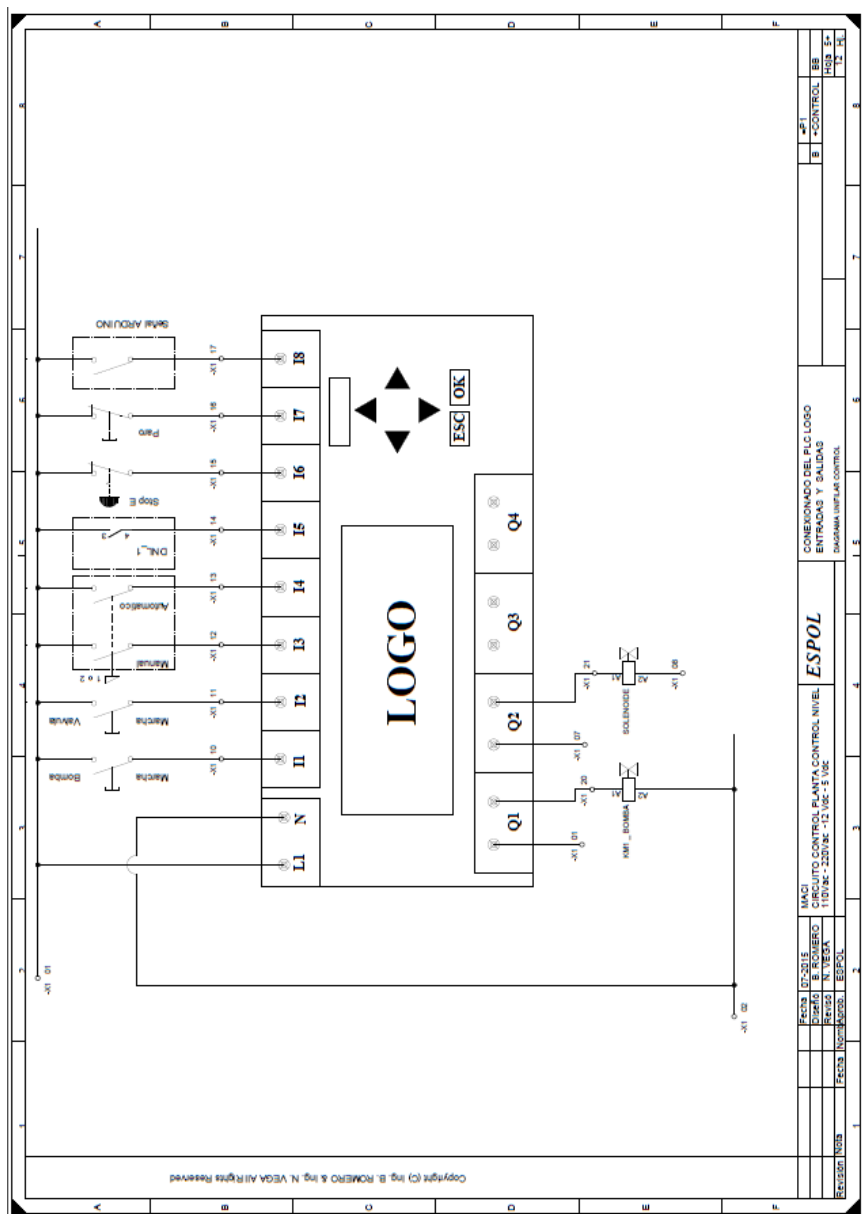
- [25]. Rubio Francisco y López Manuel “Control Adaptativo y Robusto”, Universidad de Sevilla, España, 1996.
- [26]. Smith & Corripio, 1997
- [27]. Posadas Cobos, H. Estimación de prestaciones para Exploración de Diseño en Sistemas Embebidos Complejos HW/SW. Universidad de Cantabria. (2011). Disponible en: [www.tdx.cat/bitstream/10803/32204/1/TesisHPC.pdf](http://www.tdx.cat/bitstream/10803/32204/1/TesisHPC.pdf).
- [28]. Sánchez Dams Rubén D. ESTADO DEL ARTE DEL DESARROLLO DE SISTEMAS EMBEBIDOS DESDE UNA PERSPECTIVA INTEGRADA ENTRE EL HARDWARE Y SOFTWARE. Revista Colombiana de Tecnología de Avanzada. Volumen 2 Número 22, 2013.
- [29]. Sánchez Dams, Rubén Darío. Controlador lógico programable. Una mirada interna Barranquilla, Colombia: Editorial Universitaria de la Costa. Primera Edición. EDUCOSTA, 2009.
- [30]. Téllez Mosqueda, J. Estado de la Formación en Sistemas Embebidos. Fondo de Información y Documentación para la Industria 2012. Disponible en: [http://www.infotec.com.mx/work/models/infotec/Resource/6088/1/images/CT\\_no1.pdf](http://www.infotec.com.mx/work/models/infotec/Resource/6088/1/images/CT_no1.pdf).
- [31]. Fernández Josep “Ejemplos de Aplicación con Arduino: medida de caudal” Universitat Rovira I Virgili, septiembre 2012

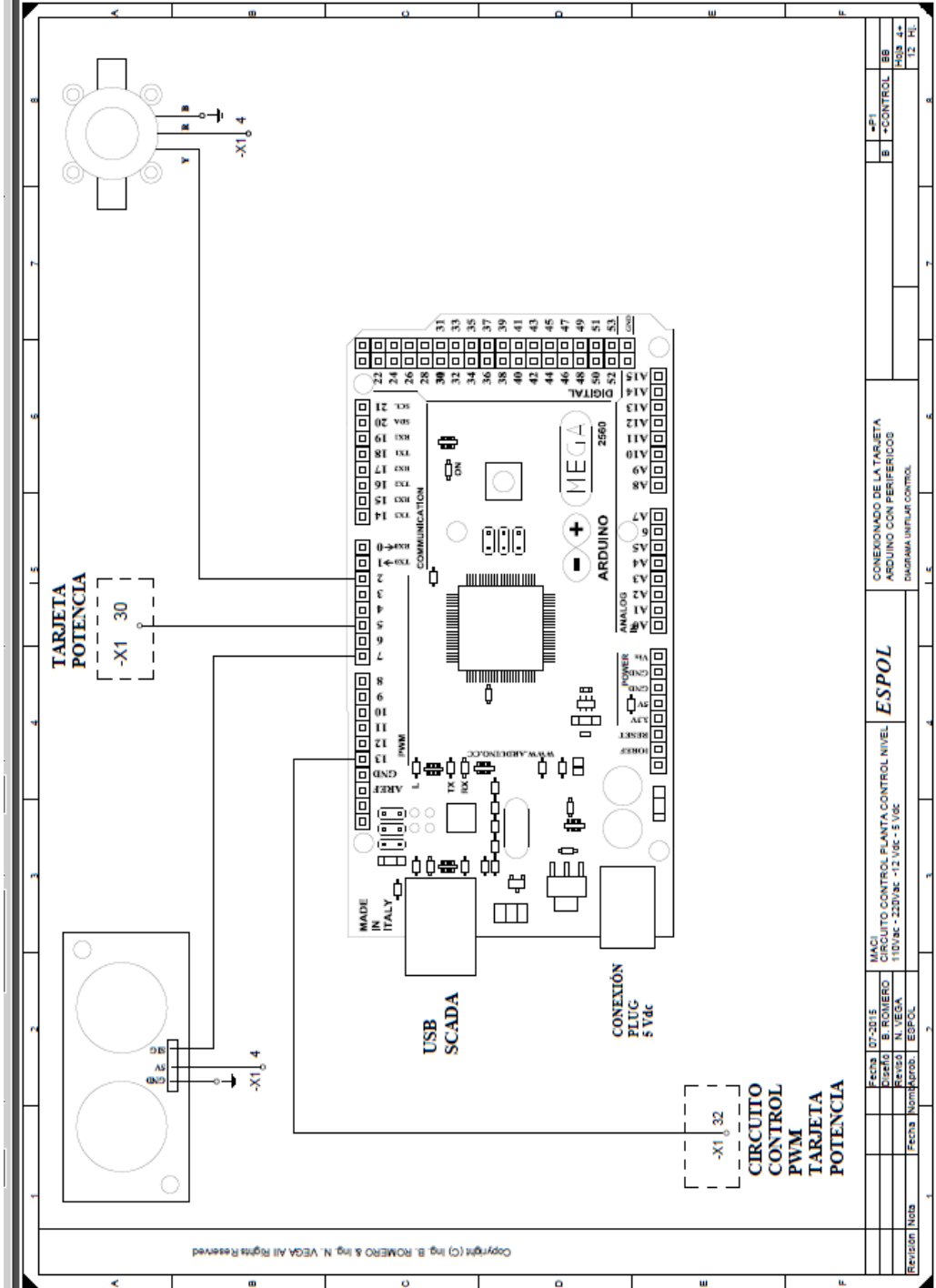
- [32]. 8-bit Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash [http://biakom.com/pdf/ATMEGA2561\\_Atmel.pdf](http://biakom.com/pdf/ATMEGA2561_Atmel.pdf)  
Fecha de consulta, Febrero – Mayo 2015.
- [33]. León G. Christopher F. “Diseño e implementación del control PID de velocidad de un motor DC utilizando la tarjeta FPGA SPARTAN 3E y Labview para los laboratorios de la carrera de ingeniería electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana” Universidad Politécnica Salesiana, Octubre 2011
- [34]. Pérez A. Mauricio, Gil L. Juan E., Botero G. Edmar O. “Diseño de controladores avanzados para un motor de dc”, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín Colombia, Junio 2009.
- [35]. Cerezo L. Yolanda “Contribución al diseño y sintonía de controladores PID discretos en sistemas muestreados de forma no convencional” UNED, Madrid, 2011



# ANEXO 2

## DIAGRAMA DE CONTROL ELÉCTRICO DE LA PLANTA

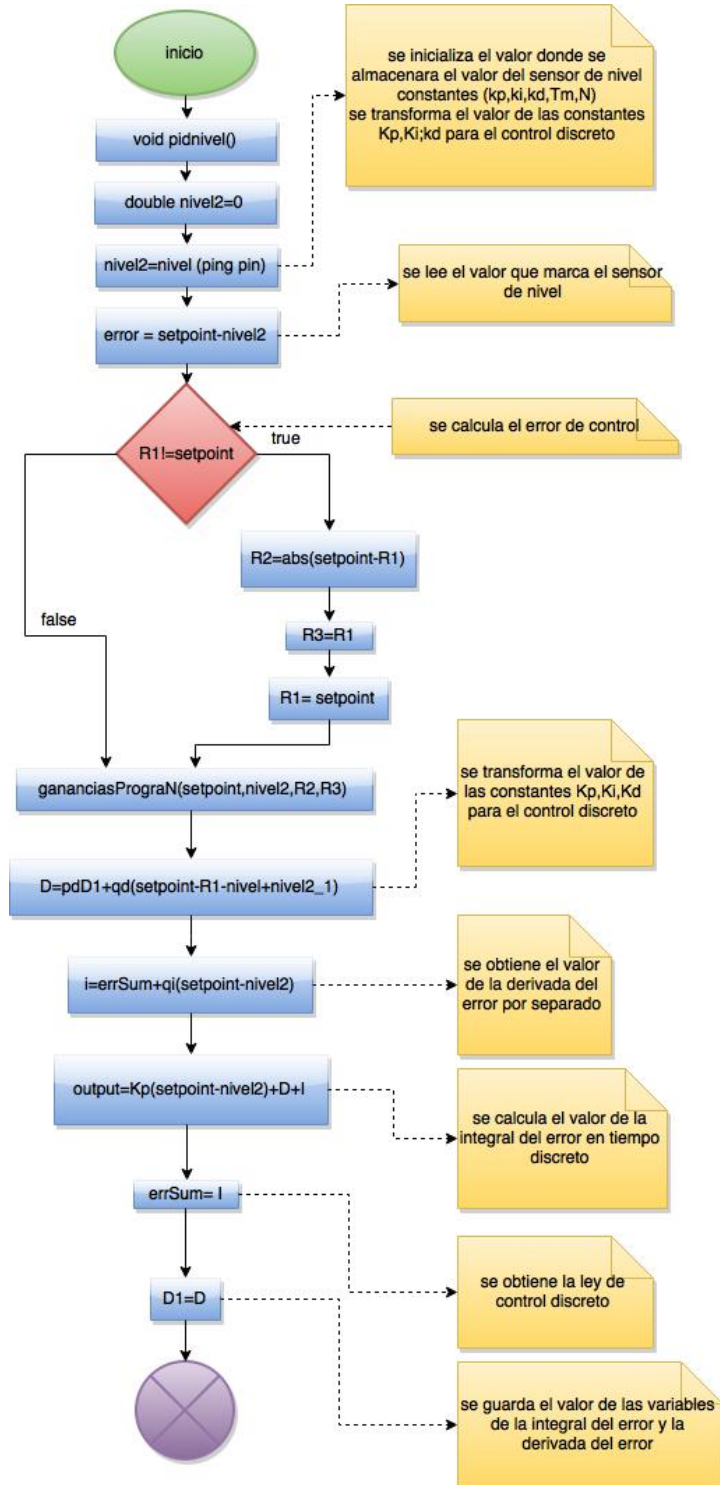


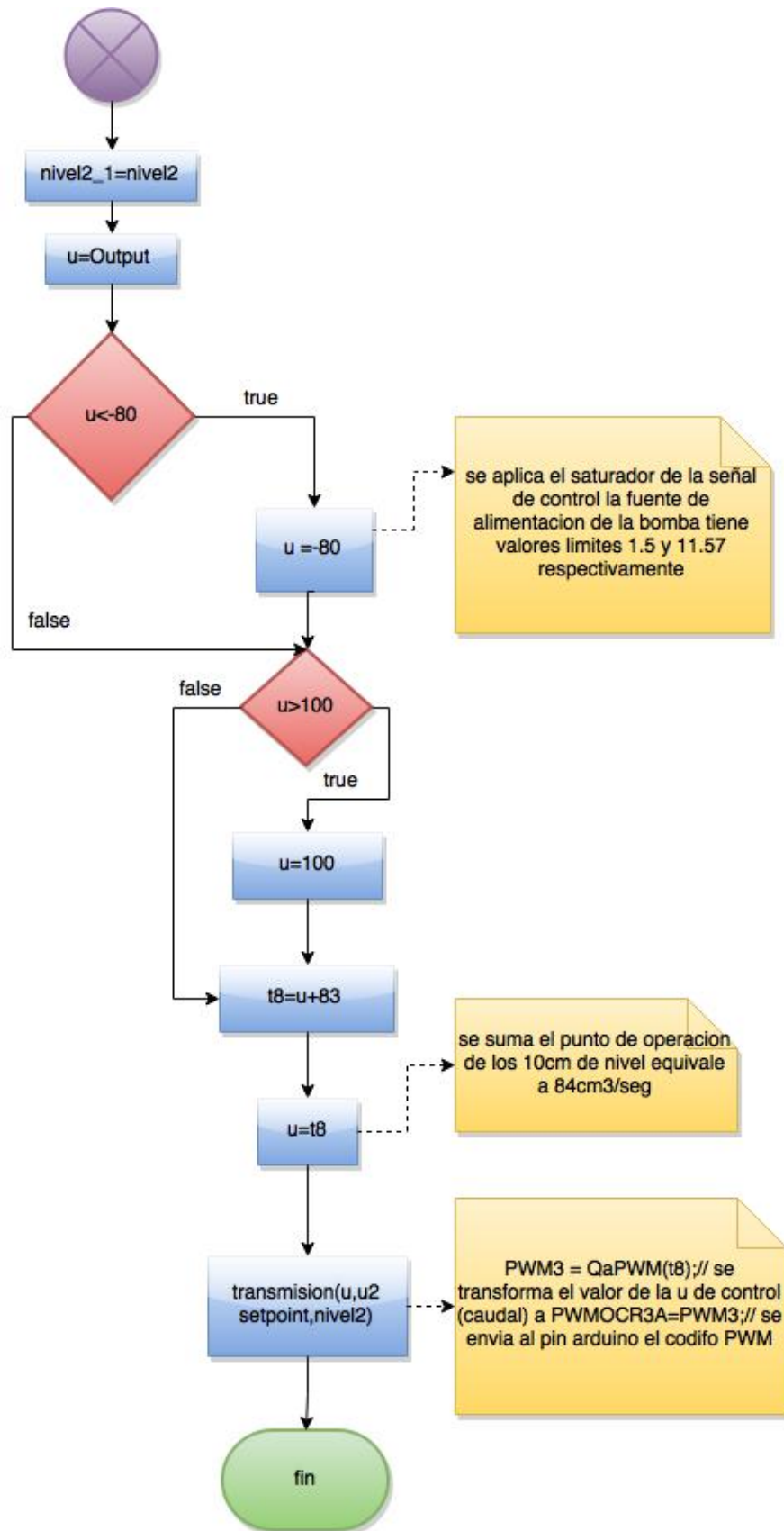


Fecha 07-2015	MAGI	CIRCUITO CONTROL PLANTA CONTROL NIVEL	ESPOL	CONEXIONADO DE LA TARJETA ARDUINO CON PERIFERICOS	MOD. 4+
Diseño B. ROMERO	110Vac - 220Vac - 12 Vac - 5 Vdc			DIAGRAMA UNIFILAR CONTROL	12 HL
Revisión N. VEGA					
Fecha Norm. aprob.	ESPOL				

# ANEXO 3

## DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROLADOR PID NIVEL







## LÍNEAS DE CÓDIGO DEL PROGRAMA EN ARDUINO

```
void pidnivel()
{
  double nivel2=0;// se inicializa el valor donde se almacenara
  el valor del sensor de nivel
  //constantes(kp,ki,kd,Tm,N);// se transforma el valor de las
  contantes kp,ki,kd para el control discreto
  nivel2=nivel(pingPin);// se lee el valor que marca el sensor de
  nivel
  error=setpoint-nivel2;// se calcula el error de control
  if(R1!=setpoint){

    R2=abs(setpoint-R1);
    R3=R1;
    R1=setpoint;
  }
  gananciasPrograN(setpoint,nivel2,R2,R3);
  // se transforma el valor de las contantes kp,ki,kd para el
  control discreto
  D=pd*D1+qd*(setpoint-R1-nivel2+nivel2_1);// se obtiene el valor
  de la derivada del error por separado
  I=errSum+qi*(setpoint-nivel2);// Se calcula el valor de la
  integral del error en tiempo dicreto
  Output=kp*(setpoint-nivel2)+D+I;// se obtiene la ley de control
  discreto
  errSum=I;// se guarda el valor de las variables de la integral
  del error y la derivada del error
  D1=D;

  nivel2_1=nivel2;
  u=Output;

  if (u <-80){ // se aplica el saturador de la señal de control
  la fuente de alimnetacion de la bomba tiene valores limites 1,5 y
  11.57 respectivamente
    u =-80;
  }
  if (u >100){
    u =100;
  }
  t8=u+83;// se suma el punto de operacion de los 10 cm de nivel
  equivale a 84cm3/seg
  u=t8;
  //PWM3=QaPWM(t8);// se transforma el valor de la u de
  control(caudal ) a PWM

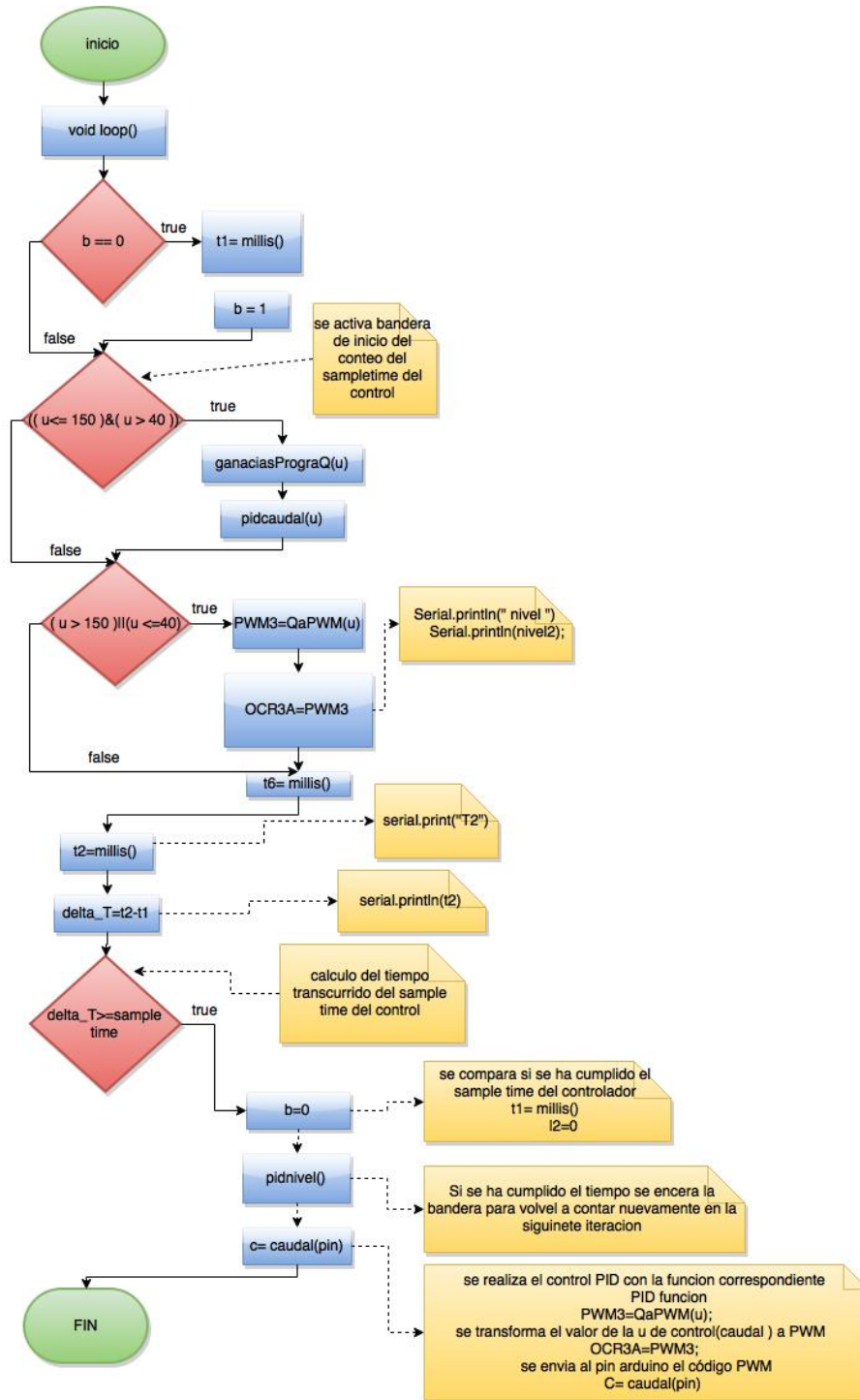
  //OCR3A=PWM3;// se envia al pin arduino el código PWM
  transmision (,u,u2 setpoint , nivel2); }
```

```
pidLazoSimple Arduino 1.6.0
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
pidLazoSimple $
void pidnivel()
(
  double nivel2=0;// se inicializa el valor donde se almacenara e
  constantes(kp,ki,kd,Tm,N);// se transforma el valor de las conta
  nivel2=nivel(pingPin);// se lee el valor que marca el sensor de
  error=setpoint-nivel2;// se calcula el error de control
  D=pd*Dl+qd*(setpoint-Rl-nivel2+nivel2_l);// se obtiene el valor
  I=errSum+qi*(setpoint-nivel2);// Se calcula el valor de la integ
  Output=kp*(setpoint-nivel2)+D+I;// se obtiene la ley de control
  errSum=I;// se guarda el valor de las variables de la integral d
  Dl=D;
  Rl=setpoint;
  nivel2_l=nivel2;
  u=Output;
  if (((u <0)&&(error<0))||((u >183)&&(error>0))){
  I=errSum-qi*(setpoint-nivel2);//si el control se encuentra satura
  }
  if (u <0){ // se aplica el saturador de la señal de control la
  u =24;
  }
  if (u >183){
  u =183;
  }
  PWM3=QaPWM(u);
  OCR3A=PWM3;
  transmission ( nivel2 , C, u,u2);| }

```

# ANEXO 4

## DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL CASCADA



```

void loop(){

  if ( b == 0 ){
    t1= millis();
    b=1; // se activa bandera de inicio del conteo
    del      samptime del control
  }
  if (( u<= 150 )&( u > 40 )){
    gananciasPrograQ(u);
    pidcaudal(u);
  }
  if (( u > 150 ) || (u <=40)){
    PWM3=QaPWM(u);

    OCR3A=PWM3;
  }

  t2=millis();

  delta_T=t2-t1;// cálculo del tiempo transcurrido del
sample time del control

  if (delta_T >=SampleTime){ // se compara si se ha cumplido el
sample time del controlador

    b=0;//Si se ha cumplido el tiempo se encera la
bandera para volver a contar nuevamente en la siguiente iteración
    pidnivel();// se realiza el control PID con la
funcion correspondiente

    C= caudal(pin);

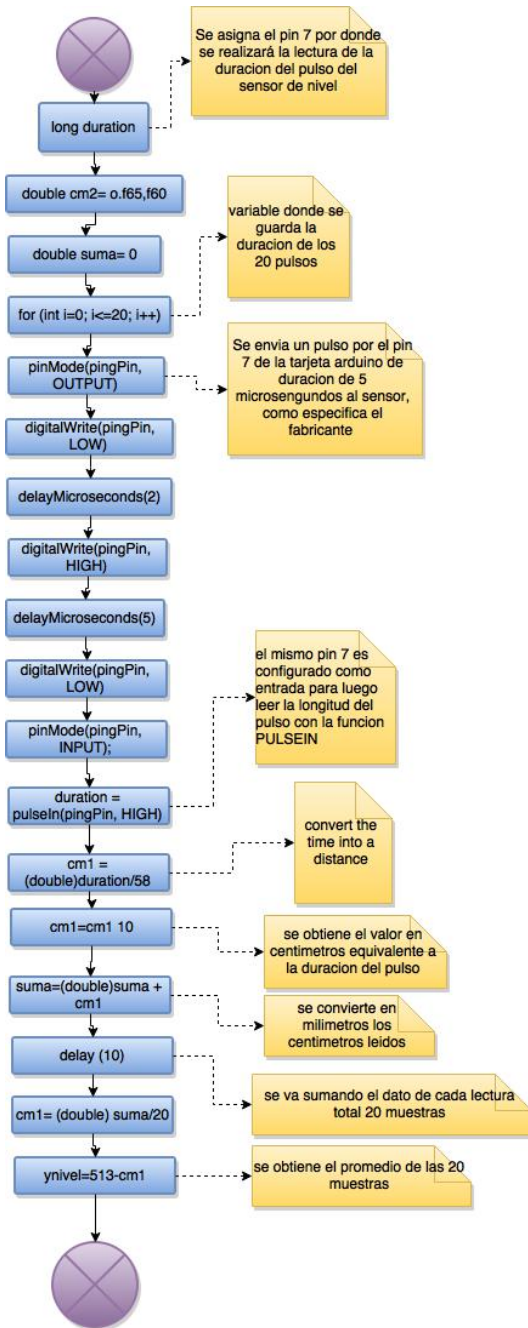
  }

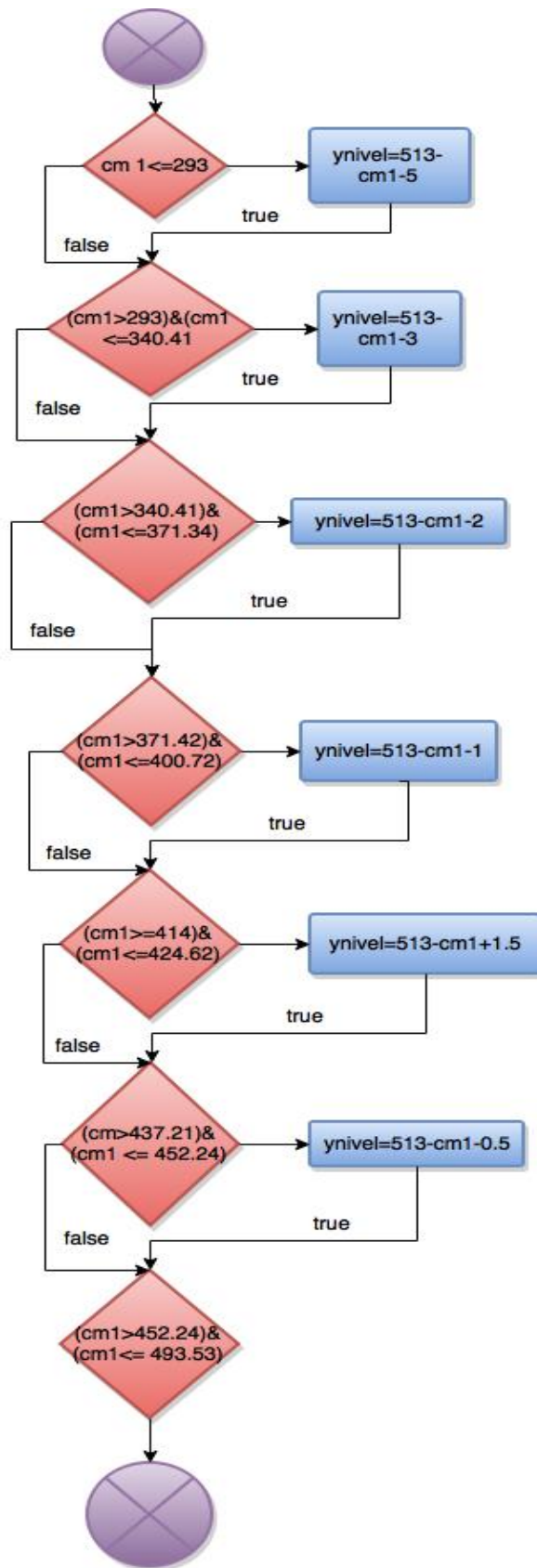
}

```

# ANEXO 5

## DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNCIÓN NIVEL





## LINEAS DE CODIGO FUNCIÓN NIVEL

```
double nivel(int pin)
{
    double ynivel;
    int pingPin=pin,i; // Se asigna el pin 7 por
donde se realizará la lectura de la duración del pulso del
// sensor de nivel
    long duration; // variable en donde se guarda
la duracion del pulso
    double cm1=0,F65,F60;

    double suma=0;// variable donde se guarda la
duracuon de los 20 pulsos
    for (int i=0; i <= 20 ; i++){

        // Se envía un
pulso por el pin 7 de la tarjeta arduino de duración de 5
microsegundos al sensor, como especifica el fabricante
        pinMode(pingPin,
OUTPUT);
        digitalWrite(pingPin,
LOW);
        delayMicroseconds(2);
        digitalWrite(pingPin,
HIGH);
        delayMicroseconds(5);
        digitalWrite(pingPin,
LOW);

        pinMode(pingPin,
INPUT); // el mismo pin 7 es configurado como entrada para luego
leer la longitud del pulso con la funcion PULSEIN
        duration =
pulseIn(pingPin, HIGH);

        // convert the
time into a distance
        cm1 =
(double)duration/58;// Se obtiene el valor en centímetros
equivalente a la duración del pulso
        cm1= cm1 * 10; //
se convierte en milímetros los centímetros leídos
        suma=(double)suma
+ cm1;// se va sumado el dato de cada lectura total 20 muestras
        delay(10);
    }
}
```

```
    cm1= (double)suma/20;// Se obtienen el promedio de las 20
muestras
```

```
    ynivel=513-cm1;
```

```
    if (cm1<=293 ){
```

```
        ynivel=513-cm1-5;
    }
```

```
    if ((cm1>293) & (cm1 <=340.41) ){
```

```
        ynivel=513-cm1-3;
    }
```

```
    if ((cm1>340.41) & (cm1 <=371.34) ){
```

```
        ynivel=513-cm1-2;
    }
```

```
    if ((cm1>371.42) & (cm1 <=400.72) ){
```

```
        ynivel=513-cm1-1;
    }
```

```
    if ((cm1>=414) & (cm1 <=424.62) ){
```

```
        ynivel=513-cm1+1.5;
    }
```

```
    if ((cm1>=437.21) & (cm1 <=452.24) ){
```

```
        ynivel=513-cm1-0.5;
    }
```

```
    if ((cm1>452.24) & (cm1 <=493.53) ){
```

```
        ynivel=513-cm1+0.5;
    }
```

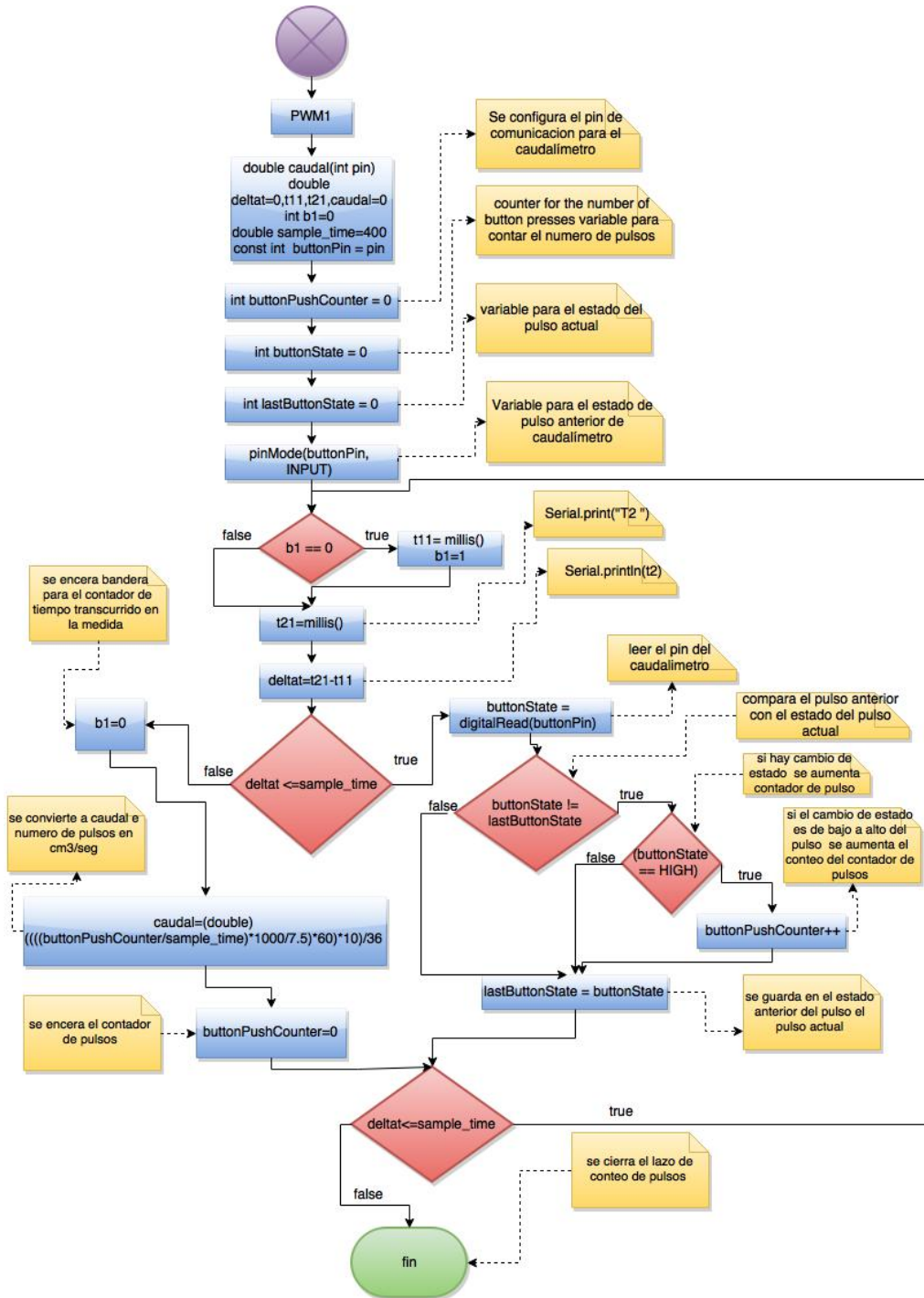
```
    return (((ynivel+5)+100)/10);
```

```
}
```



# ANEXO 6

## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCIÓN CAUDAL



## LÍNEAS DE CÓDIGO DE LA FUNCIÓN CAUDAL

```
double caudal(int pin) {
    double deltat=0,t11,t21,caudal=0;
    int b1=0;
    double sample_time=400;
    const int  buttonPin = pin;    // Se configura el pin de
    comunicación para el caudalímetro

    int buttonPushCounter = 0;    // counter for the number of
    button presses variable para contar el numero de pulsos
    int buttonState = 0;          // variable para el estado del
    pulso actual
    int lastButtonState = 0;      // Variable para el estado de
    pulso anterior de caudalímetro
    pinMode(buttonPin, INPUT);

    do {

        if ( b1 == 0 ){
            t11= millis();
            b1=1;
        }

        // Serial.print("T2
");

        t21=millis();
        //

        Serial.println(t2);

        deltat=t21-t11;

        if (deltat <=sample_time){

            // lee el pin del
            caudalímetro
            buttonState =
            digitalRead(buttonPin);

            // compara el
            pulso anterior con el estado del pulso actual
            if (buttonState
            != lastButtonState) {

                // si hay cambio de estado se aumenta el contador de pulso
                if (buttonState == HIGH) {
```

```

// si el cambio de estado es de bajo a alto del pulso se aumenta
el conteo del contador de pulsos

buttonPushCounter++;

}

}

estado anterior del pulso el pulso actual // se guarda en el
buttonState; lastButtonState =

else
{

}

// se encera bandera para el contador de tiempo transcurrido en
la medida del tiempo de pulsos b1=0;

caudal=(double)
(((buttonPushCounter/sample_time)*1000/7.5)*60)*10)/36;// se
convierte a caudal e número de pulsos en cm3/seg

buttonPushCounter=0;// se encera el contador de pulsos

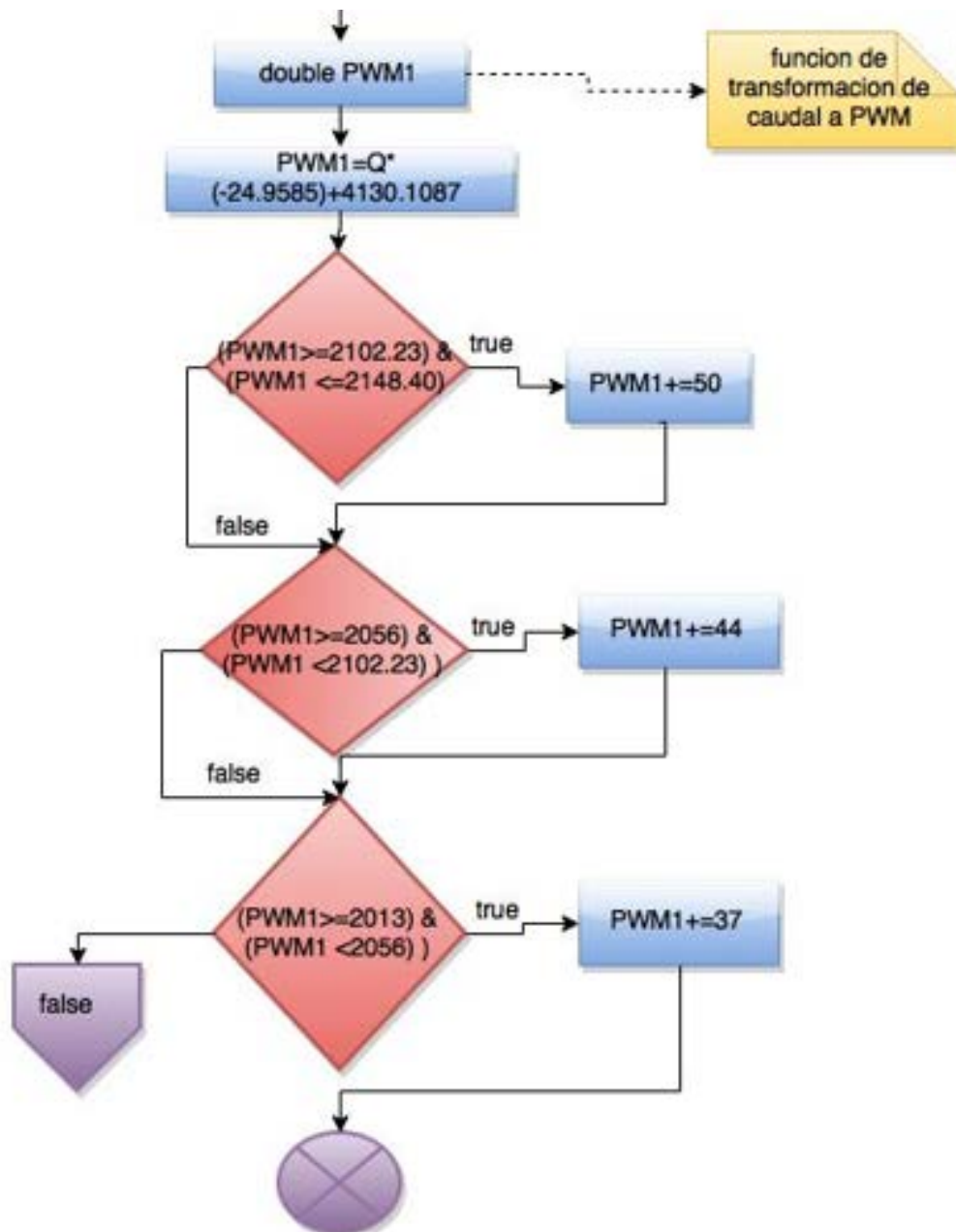
} while( deltat<=sample_time );// se
cierra el lazo de conteo de pulsos

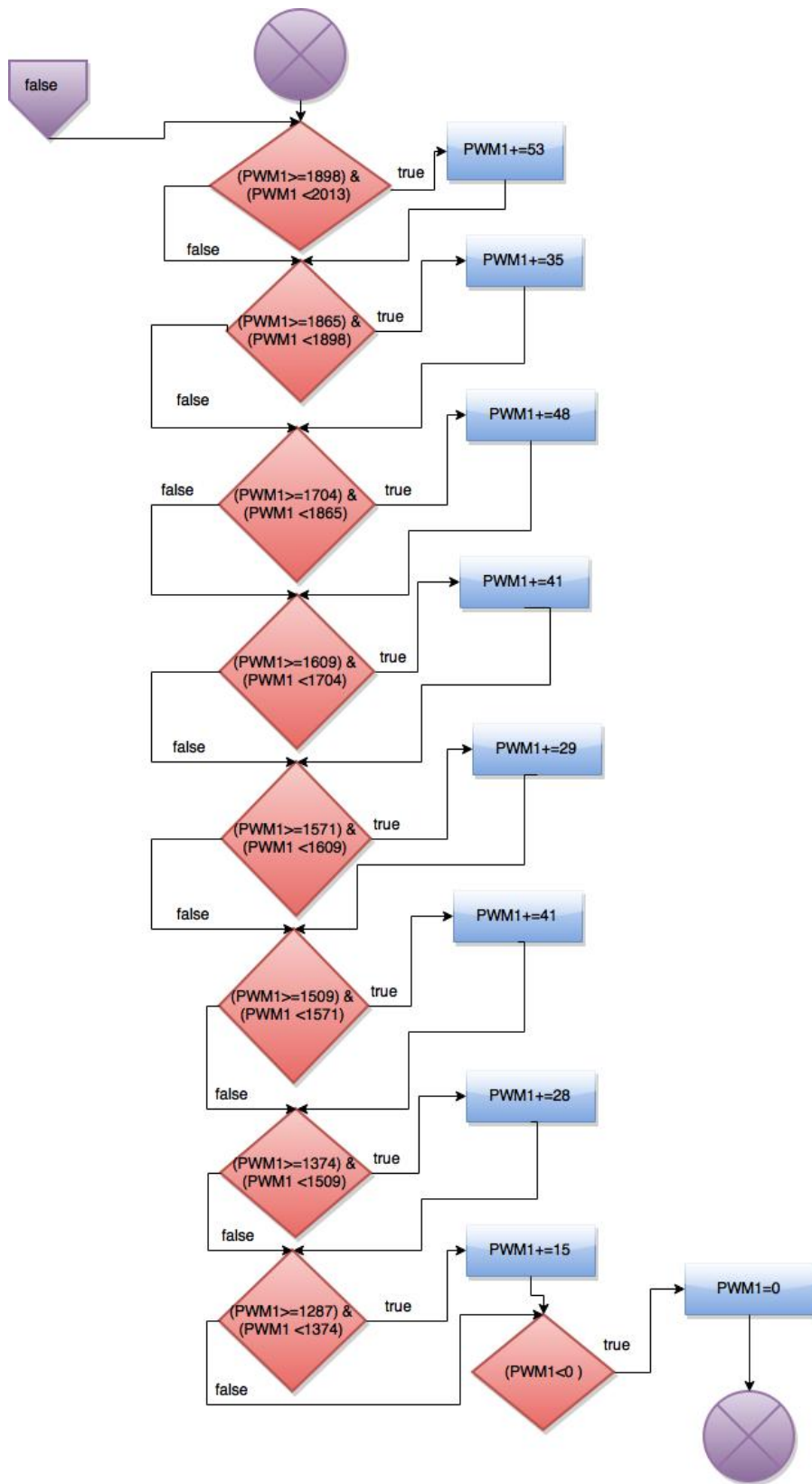
return caudal;
}

```

## ANEXO 7

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCIÓN QaPWM





## LÍNEAS DE CÓDIGO DE FUNCIÓN QaPWM

```
double QaPWM(double Q)// función de transformación de caudal a
PWM
{ double PWM1;
PWM1=Q*(-24.9585)+4130.1087;
if ((PWM1>=2102.23) & (PWM1 <=2148.40) ){

    PWM1+=50;
}
if ((PWM1>=2056) & (PWM1 <2102.23) ){

    PWM1+=44;
}
if ((PWM1>=2013) & (PWM1 <2056) ){

    PWM1+=37;
}
if ((PWM1>=1898) & (PWM1 <2013) ){

    PWM1+=53;
}
if ((PWM1>=1865) & (PWM1 <1898) ){

    PWM1+=35;
}
if ((PWM1>=1704) & (PWM1 <1865) ){

    PWM1+=48;
}
if ((PWM1>=1609) & (PWM1 <1704) ){

    PWM1+=41;
}
if ((PWM1>=1571) & (PWM1 <1609) ){

    PWM1+=29;
}
if ((PWM1>=1509) & (PWM1 <1571) ){

    PWM1+=41;
}
}
```

```
if ((PWM1>=1374) & (PWM1 <1509) ){

PWM1+=28;
}
if ((PWM1>=1287) & (PWM1 <1374) ){

PWM1+=15;
}
if (PWM1<0 ){

PWM1=0;
}

return PWM1;
}
```

## ANEXO 10

### SOFTWARE DE CONTROL LAZO SIMPLE

```
void loop(){
    if ( b == 0 ){
        t1= millis();
        b=1; // se activa bandera de inicio del conteo
del sampletime del control
    }

    t2=millis();

    delta_T=t2-t1;// calculo del tiempo transcurrido del
sample time del control

    if (delta_T >=SampleTime){ // se compara si se ha
cumplido el sample time del controlador

        b=0;//Si se ha cumplido el tiempo se encera la
bandera para volver a contar nuevamente en la siguiente iteración
        pidnivel();// se realiza el control PID con la
función correspondiente

        C= caudal(pin);

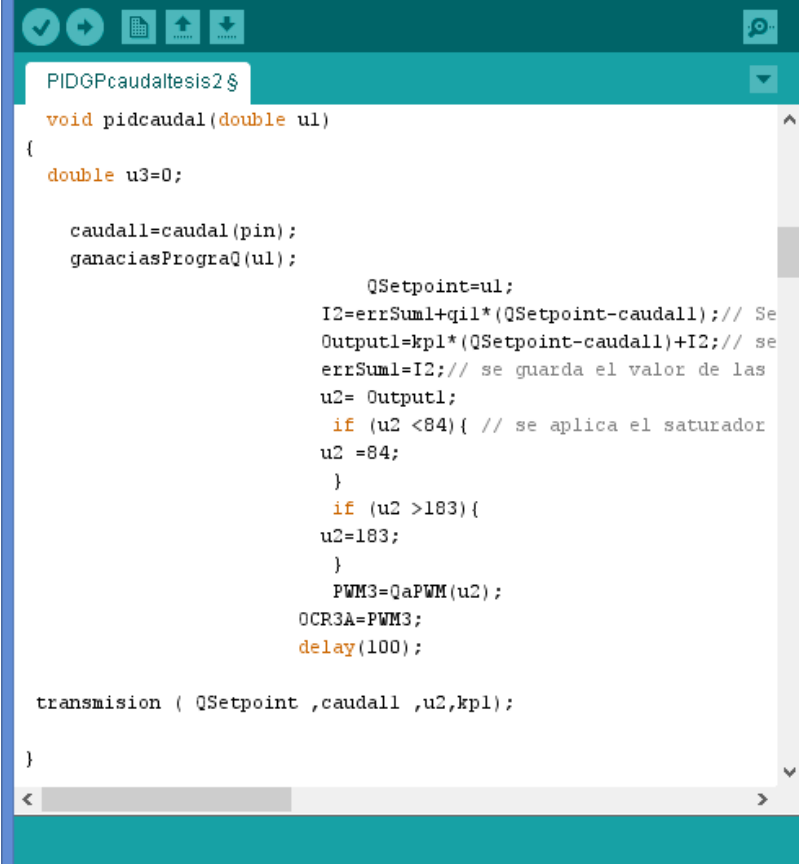
    }
}
```



## ANEXO 11

### ALGORITMO DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS DE LA VARIABLE CAUDAL.

En la Figura se muestra las líneas de código realizadas en el IDE de arduino para la implantación del controlador de ganancias programadas de la variable caudal, en la que se puede observar que se ha implementado el mismo algoritmo del controlador PI con la diferencia que se aumenta la función gananciasPrograQ la misma que permite seleccionar las constantes  $k_p$  y  $k_i$  de la tabla dependiendo del punto de operación de la planta



```
PIDGPcaudaltesis2 $
void pidcaudal(double ul)
{
  double u3=0;

  caudall=caudal(pin);
  gananciasPrograQ(ul);

  QSetpoint=ul;
  I2=errSum1+qi1*(QSetpoint-caudall); // Se
  Output1=kp1*(QSetpoint-caudall)+I2; // se
  errSum1=I2; // se guarda el valor de las
  u2= Output1;
  if (u2 <84){ // se aplica el saturador
    u2 =84;
  }
  if (u2 >183){
    u2=183;
  }
  PWM3=QaPWM(u2);
  OCR3A=PWM3;
  delay(100);

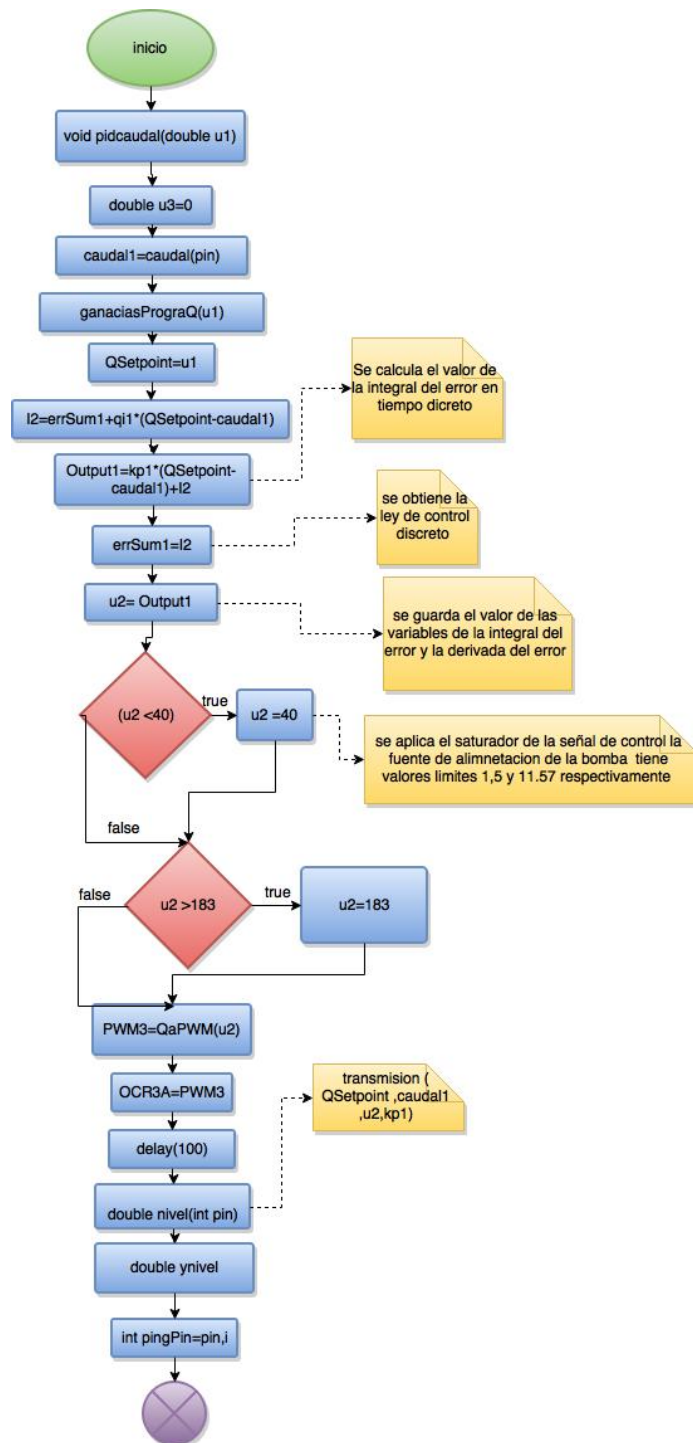
  transmission ( QSetpoint ,caudall ,u2,kp1);
}
< >
```

Para que el controlador PI de ganancias programadas de la variable caudal opere correctamente, primeramente el algoritmo lee el caudal que tiene la planta, con este valor se procede a seleccionar las constantes  $k_p$  y  $k_i$  que debe utilizar el control para el punto de operación dado a través de la función gananciasPrograQ, después de esto, el algoritmo aplica la ley de control, obteniendo con esto la señal  $u_2$  la cual es convertida a código PWM por la función QaPWM, finalmente este valor convertido se lo envía a la planta con la función OCR3A,

### **Función gananciasPrograQ**

El diagrama de flujo de esta función se muestra en el anexo 15, en la que se nota que es un selector de ganancias en donde si el caudal  $u_1$  se encuentra entre  $40 \text{ cm}^3/\text{s}$  y  $105 \text{ cm}^3/\text{s}$  las constantes a utilizar son  $k_{p1}=0.46$  y  $k_i=0.55$  así mismo si la variable caudal( $u_1$ ) es mayor que 105 se utilizaran las constantes  $k_{p1}=0.072$  y  $k_i=0.8$ , en la parte final de este algoritmo se convierte la constante **ki** en **qi** que es la que se usa en el controlador digital de este proyecto .

## DIAGRAMA DE FLUJO DEL CONTROL PI CAUDAL



## LÍNEAS DE CÓDIGO DE LA FUNCIÓN PI CAUDAL

```
void pidcaudal(double u1)
{
    double u3=0;

    caudal1=caudal(pin);
    gananciasPrograQ(u1);

    QSetpoint=u1;
    I2=errSum1+qi1*(QSetpoint-caudal1);//
Se calcula el valor de la integral del error en tiempo discreto
    Output1=kp1*(QSetpoint-caudal1)+I2;//
se obtiene la ley de control discreto
    errSum1=I2;// se guarda el valor de las
variables de la integral del error y la derivada del error
    u2= Output1;
    if (u2 <40){ // se aplica el saturador
de la señal de control la fuente de alimentación de la bomba
tiene valores limites 1,5 y 11.57 respectivamente
    u2 =40;
    }
    if (u2 >183){
    u2=183;
    }
    PWM3=QaPWM(u2);

    OCR3A=PWM3;

    delay(100);

}
```

```
void pidcaudal(double u1)
{
  double u3=0;
  caudall=caudal(pin);
  qil=double (kil*Tml);

  QSetpoint=u1;
  I2=errSum1+qil*(QSetpoint-caudall); // Se
  Output1=kpl*(QSetpoint-caudall)+I2; // se
  errSum1=I2; // se guarda el valor de las
  u2= Output1;
  if (u2 <40){ // se aplica el saturador
  u2 =40;
  }
  if (u2 >183){
  u2=183;
  }
  PWM3=QaPWM(u2);
  OCR3A=PWM3;
  delay(100);
  transmision ( QSetpoint ,caudall ,u2,kpl);
}
```

Algoritmo del controlador PID de ganancias programadas caudal

## ANEXO 12

**TABLA DE CONVERSIÓN DE CAUDAL A CÓDIGO PWM**

Tabla de Transformación del Caudal a Código PWM				
VB	Q(cm3/s)	PWM	Q_PWM POL GRADO 10	Compensación en zona de Interés
1.8	23,65	3500	3539,841181	
1.95	24,8	3450	3511,138957	
2.1	26,8	3400	3461,222045	
2.25	29,2	3350	3401,321751	
2.4	31,2	3300	3351,404839	
2.5	33,55	3250	3292,752467	
2.65	35,75	3200	3237,843864	
2.8	38,4	3150	3171,703956	
2.93	40,7	3100	3114,299507	
3.05	42,83	3050	3061,137996	
3.198	44,95	3000	3008,22607	
3.43	48,4	2950	2922,119397	
3.53	49,73	2900	2888,92465	
3.62	51,3	2850	2849,739874	
3.73	53,15	2800	2803,566731	
3.85	55	2750	2757,393587	
4	56,9	2700	2709,972521	
4.13	59,5	2650	2645,080536	
4.25	61,6	2600	2592,667778	
4.39	63,8	2550	2537,759175	
4.52	66,3	2500	2475,363035	
4.65	68,8	2450	2412,966895	
4.8	71	2400	2358,058292	
4.93	73	2350	2308,14138	
5.05	75,25	2300	2251,984855	
5.2	77,45	2250	2197,076251	
5.32	79,4	2200	2148,407262	2198,407262
5.46	81,25	2150	2102,234119	2152,234119
5.60	83,1	2100	2056,060975	2100,060975
5.72	84,8	2050	2013,6316	2050,6316
5.84	87,5	2000	1946,243769	1999,243769
5.98	89,4	1950	1898,822703	1951,822703
6.11	90,75	1900	1865,128787	1900,128787

6.24	93,2	1850	1803,98057	1851,98057
6.35	95,3	1800	1751,567813	1799,567813
6.5	97,2	1750	1704,146747	1752,146747

### TABLA DE CONVERSIÓN DE CAUDAL A CÓDIGO PWM

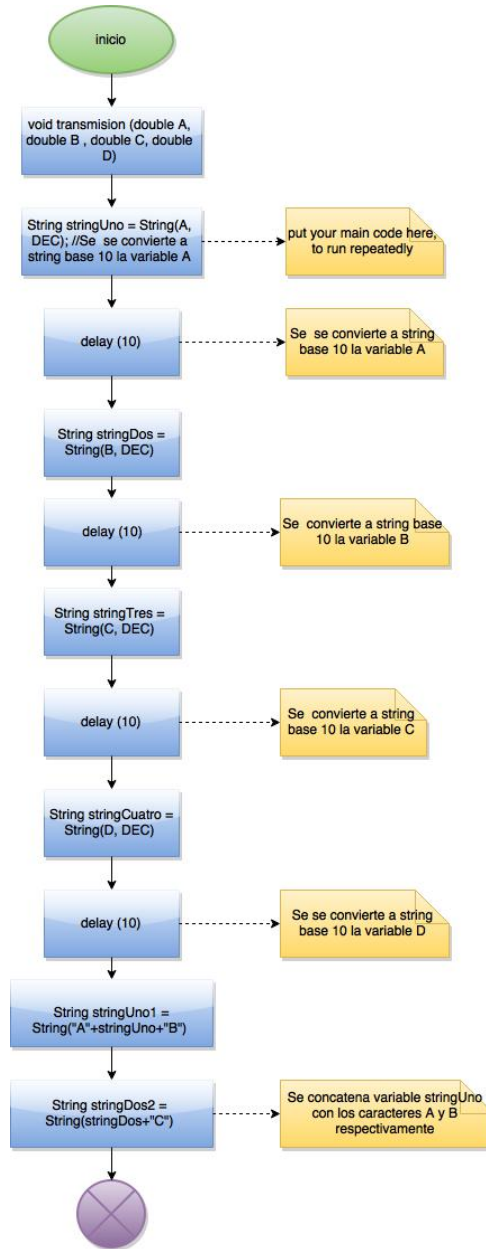
Tabla de Transformación del Caudal a Código PWM				
VB	Q(cm3/s)	PWM	Q_PWM POL GRADO 10	Compensación en zona de Interés
6.61	99	1700	1659,221526	1700,221526
6.73	101	1650	1609,304614	1650,304614
6.86	102,5	1600	1571,86693	1600,86693
6.98	105	1550	1509,47079	1550,47079
7.12	106,5	1500	1472,033106	1500,033106
7.25	108,5	1450	1422,116194	1450,116194
7.37	110,4	1400	1374,695128	1402,695128
7.49	112	1350	1334,761599	1349,761599
7.61	113,9	1300	1287,340532	1302,340532
7.73	116,3	1250	1227,440238	
7.84	118,35	1200	1176,275403	
7.96	120	1150	1135,093951	
8.08	122	1100	1085,177039	
8.20	123,8	1050	1040,251818	
8.31	125,7	1000	992,8307522	
8.44	126,9	950	962,8806051	
8.56	128,8	900	915,4595388	
8.67	130,6	850	870,5343181	
8.77	132,4	800	825,6090974	
8.90	134,5	750	773,1963399	
9.01	136,1	700	733,2628104	
9.13	137,4	650	700,8168177	
9.24	139,2	600	655,891597	
9.35	141	550	610,9663763	
9.47	143,3	500	553,5619276	
9.58	144,4	450	526,1076261	
9.70	146,2	400	481,1824054	
9.81	147,6	350	446,2405671	
9.92	149,5	300	398,8195008	
10.04	150,8	250	366,373508	
10.18	152,5	200	323,9441329	

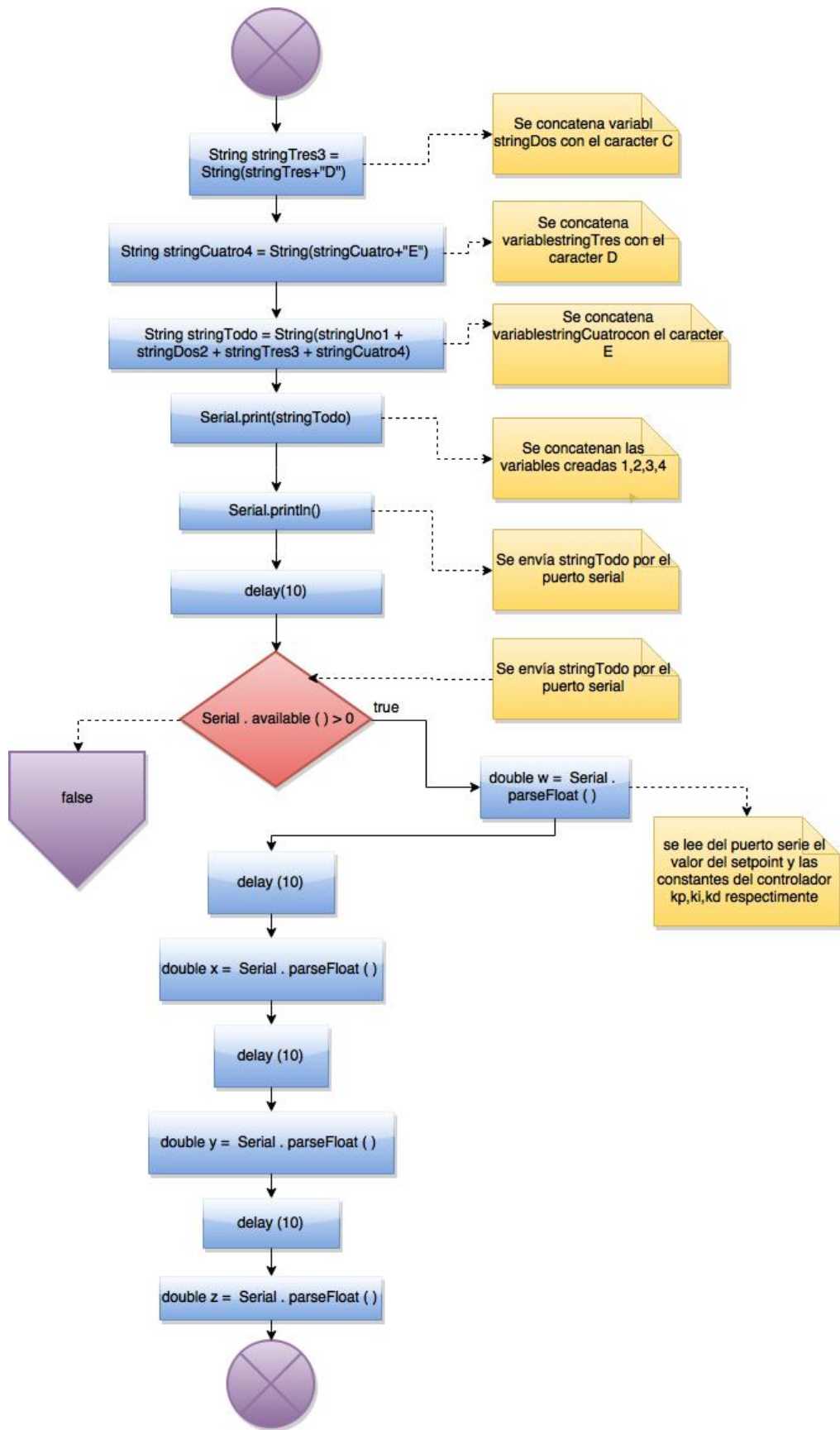
10.33	155,4	150	251,5646107	
10.5	158	100	186,6726252	
10.82	163,3	50	54,39280875	
12.25	183	0	-437,2887733	



# ANEXO 13

## DIAGRAMA DE FLUJO FUNCIÓN TRANSMISIÓN





## LÍNEAS DE CÓDIGO DE LA FUNCIÓN TRANSMISIÓN

```
void transmision (double A, double B , double C, double D)
{
    // put your main code here, to run repeatedly:

    String stringUno = String(A, DEC); //Se se convierte a string
base 10 la variable A
    delay (10);
    String stringDos = String(B, DEC); //Se convierte a string base
10 la variable B
    delay (10);
    String stringTres = String(C, DEC); //Se convierte a string
base 10 la variable C
    delay (10);
    String stringCuatro = String(D, DEC); //Se se convierte a string
base 10 la variable D
    delay (10);

    String stringUno1 = String("A"+stringUno+"B"); //Se concatena
variable stringUno con los caracteres A y B respectivamente
    String stringDos2 = String(stringDos+"C"); //Se concatena
variabl stringDos con le caracteer C
    String stringTres3 = String(stringTres+"D"); //Se concatena
variablestringTres con el caracter D
    String stringCuatro4 = String(stringCuatro+"E"); //Se concatena
variablestringCuatrocon el caracter E

    String stringTodo = String(stringUno1 + stringDos2 + stringTres3
+ stringCuatro4); //Se concatenan las variables creadas 1,2,3,4

    Serial.print(stringTodo); //Se envía stringTodo por el puerto
serial
    Serial.println();
    delay(10); //se da un tiempo de espera al sistema

    if ( Serial . available ( ) > 0 ) { // se lee del puerto serie
el valor del setpoint y las constantes del controlador kp,ki,kd
respectivamente

    double w = Serial . parseFloat ( ) ;
    delay (10);
    double x = Serial . parseFloat ( ) ;
    delay (10);
    double y = Serial . parseFloat ( ) ;
    delay (10);
    double z = Serial . parseFloat ( ) ;
    delay (10);
    //kp = w ;
```

```
//ki = x;  
//kd = y;  
setpoint = w;  
//ki = x;  
//kd = y;  
//kp = z;  
if ((ki==0)&&(kd==0)&&(setpoint==0)&&(kp==0)) { //Si el valor de  
las señales no son enviadas desde labview se le da un punto de  
operación por default al control  
  
    ki=0.001;  
    kd=-0.427;  
    kp=14;  
    setpoint=33;  
  
}  
Serial.flush();// se desactiva la comunicación  
}  
  
}
```

## **ANEXO 14**

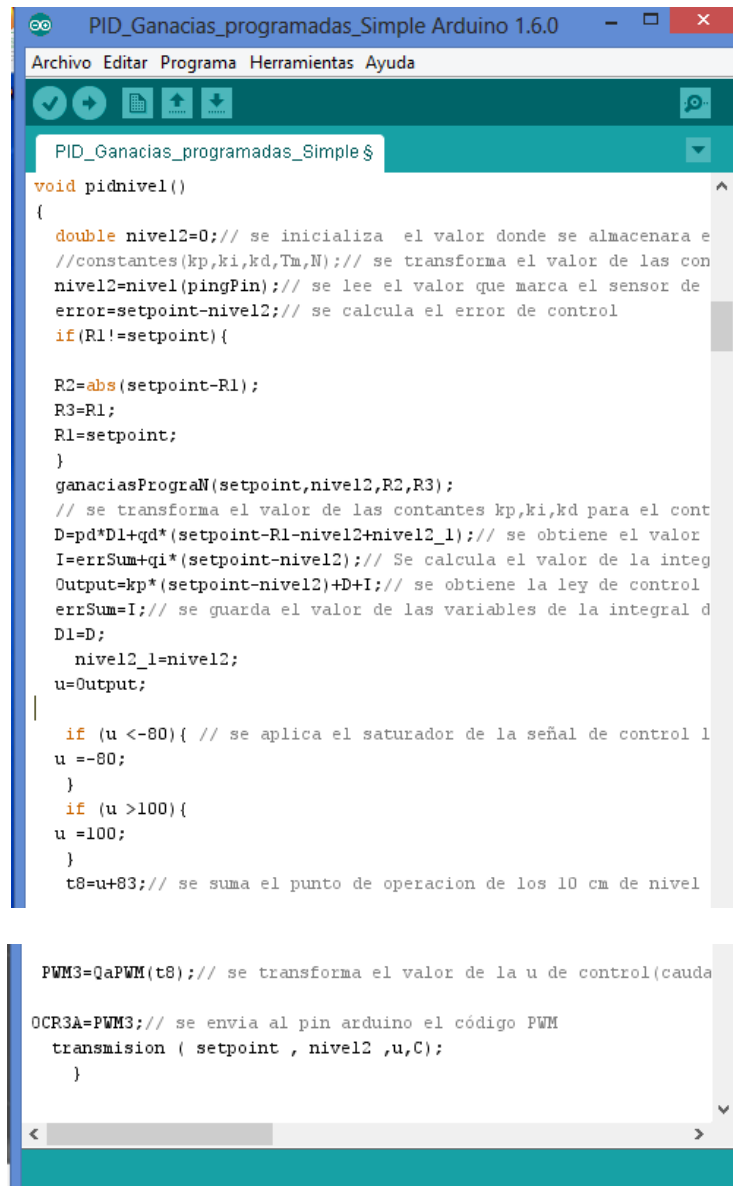
### **ALGORITMO DEL CONTROLADOR ADAPTATIVO DE GANANCIAS PROGRAMADAS DE LA VARIABLE NIVEL.**

Al igual que la implementación de los controladores PID de las variables nivel y caudal se ha realizado la implementación de los controladores de ganancias programadas en el sistema arduino mega 256, el algoritmo de este controlador se muestra en anexo 10 como se puede notar en el diagrama de flujo, el procedimiento para el tratamiento de las señales es semejante al de los controladores PID nivel y Caudal con la diferencia que se ha desarrollado una función adicional para este controlador con el objetivo de seleccionar las constantes  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  en función al punto de operación dado por el usuario, a esta función se le asignó el nombre de gananciasPrograN y se describe en la sección 5.3.1, la cual recibe como entradas el setpoint, la lectura del sensor de nivel ( $rr1$ ), la diferencia entre el setpoint anterior con el setpoint nuevo ( $rr2$ ) y también el setpoint anterior( $rr3$ ), la secuencia de acciones que realiza este controlador es la siguiente:

- a) Inicialización de variables
- b) Lectura del sensor de nivel
- c) Actualización de las variables  $rr1$ ,  $rr2$ ,  $rr3$
- d) Aplicación de la función gananciasPrograN
- e) Aplicación de la ley de control PID
- f) Aplicación del saturador de la variable caudal

g) Aplicación de la función QaPWM

h) Envío del código PWM a la tarjeta de fuerza del sistema.



```
PID_Ganacias_programadas_Simple Arduino 1.6.0
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
PID_Ganacias_programadas_Simple $
void pidnivel()
{
  double nivel2=0;// se inicializa el valor donde se almacenara e
  //constantes(kp,ki,kd,Tm,N);// se transforma el valor de las con
  nivel2=nivel(pingPin);// se lee el valor que marca el sensor de
  error=setpoint-nivel2;// se calcula el error de control
  if(R1!=setpoint){
    R2=abs(setpoint-R1);
    R3=R1;
    R1=setpoint;
  }
  gananciasProgramM(setpoint,nivel2,R2,R3);
  // se transforma el valor de las constantes kp,ki,kd para el cont
  D=pd*D1+qd*(setpoint-R1-nivel2+nivel2_1);// se obtiene el valor
  I=errSum+qi*(setpoint-nivel2);// Se calcula el valor de la integ
  Output=kp*(setpoint-nivel2)+D+I;// se obtiene la ley de control
  errSum=I;// se guarda el valor de las variables de la integral d
  D1=D;
  nivel2_1=nivel2;
  u=Output;
  if (u <-80){ // se aplica el saturador de la señal de control l
    u =-80;
  }
  if (u >100){
    u =100;
  }
  t8=u+83;// se suma el punto de operacion de los 10 cm de nivel

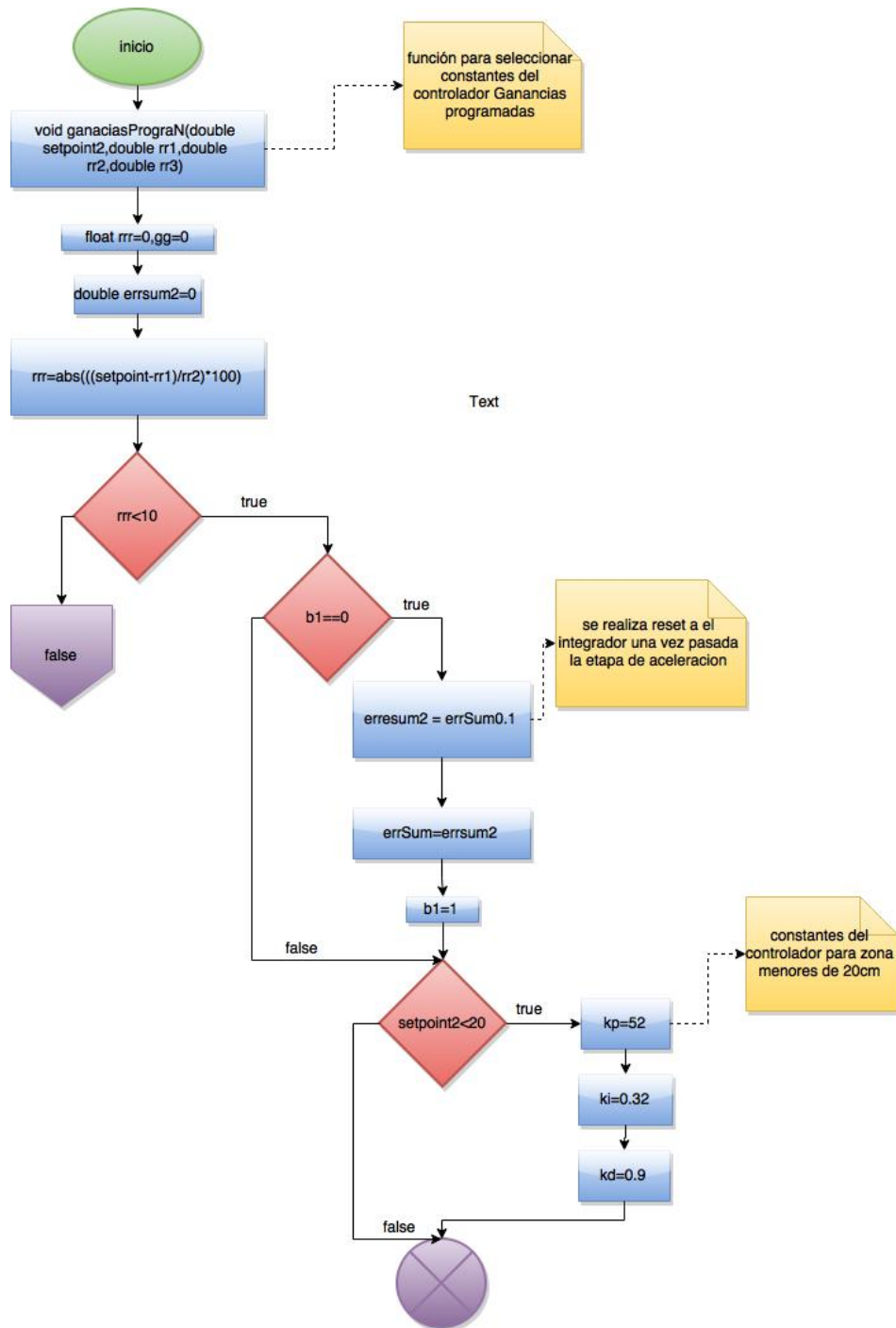
  PWM3=QaPWM(t8);// se transforma el valor de la u de control(cauda
  OCR3A=PWM3;// se envia al pin arduino el código PWM
  transmision ( setpoint , nivel2 ,u,C);
}
```

Algoritmo de control adaptativo de ganancias programadas de la variable nivel

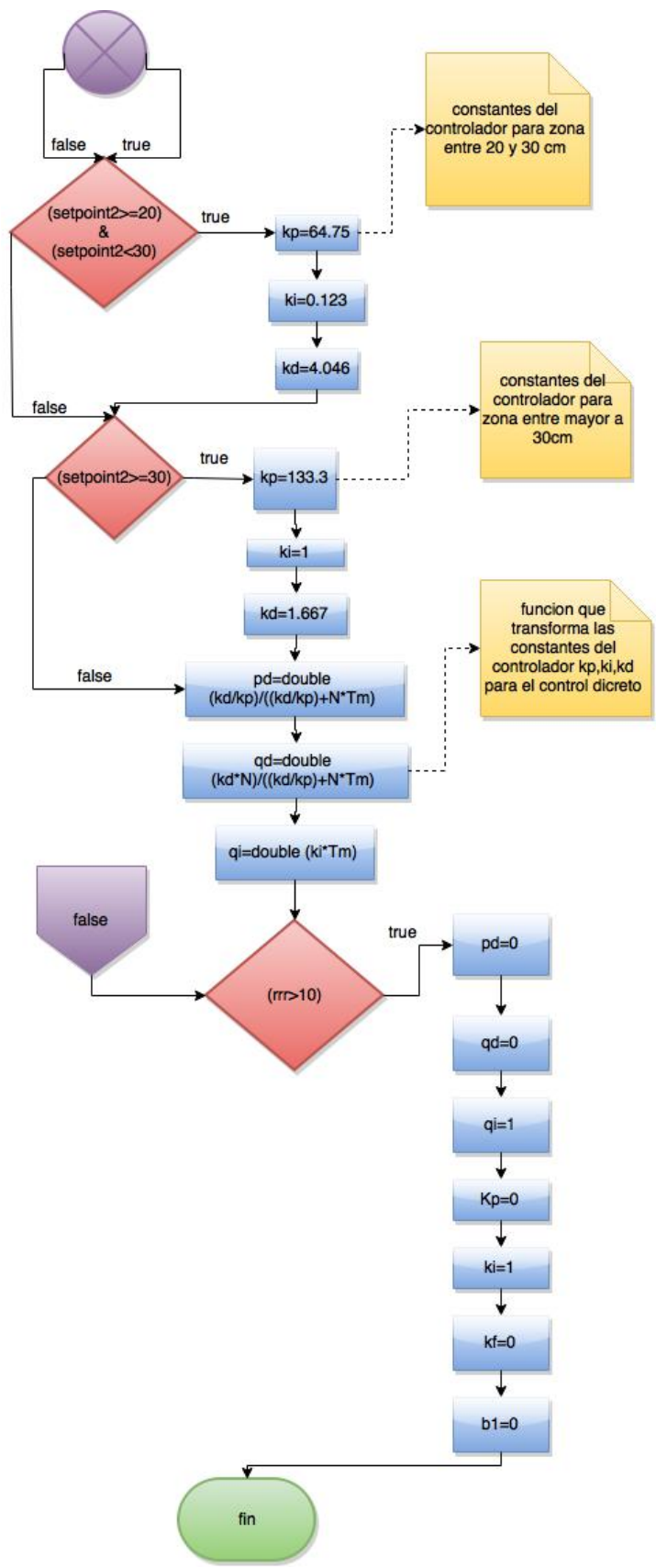
### **Función gananciasPrograN**

Como se mencionó en la sección 5.3.1 esta función se ha creado para el controlador de nivel de ganancias programadas, en la parte inicial del diagrama de flujo de la función que se muestra en el anexo 16, se realiza el cálculo del porcentaje de avance del nivel en la planta desde el setpoint anterior al setpoint su valor se almacena en la variable (rrr), luego se aplica un bloque de selección para cuando la variable rrr toma un valor inferior al 10% al ingresar con la condición afirmativa a este bloque se verifica la condición de una bandera b1 la cual nos da la información si se ha cambiado de punto de operación y si ha ingresado por primera vez se lleva al 10% la parte integral del controlador PID con el objetivo de evitar los sobre niveles porcentuales que se dan debido a la aplicación del saturador del sistema por las condiciones de operación de la bomba

## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCIÓN GANANCIAS PROGRAMADAS NIVEL







## LÍNEAS DE CÓDIGO FUNCIÓN gananciasPrograN

```
void gananciasPrograN(double setpoint2,double rr1,double
rr2,double rr3)// función para seleccionar constantes del
controlador Ganancias programadas
{
    float rrr=0,gg=0;
    double errsum2=0;
    rrr=abs(((setpoint-rr1)/rr2)*100);
    if (rr2 >0){
        gg=25;
    }
    if(rrr <10){
        if (b1==0 ){ // se le realiza reset a el
integrador una vez pasada la etapa de aceleración

            errsum2=errSum*0.1;
            errSum=errsum2;

            b1=1;

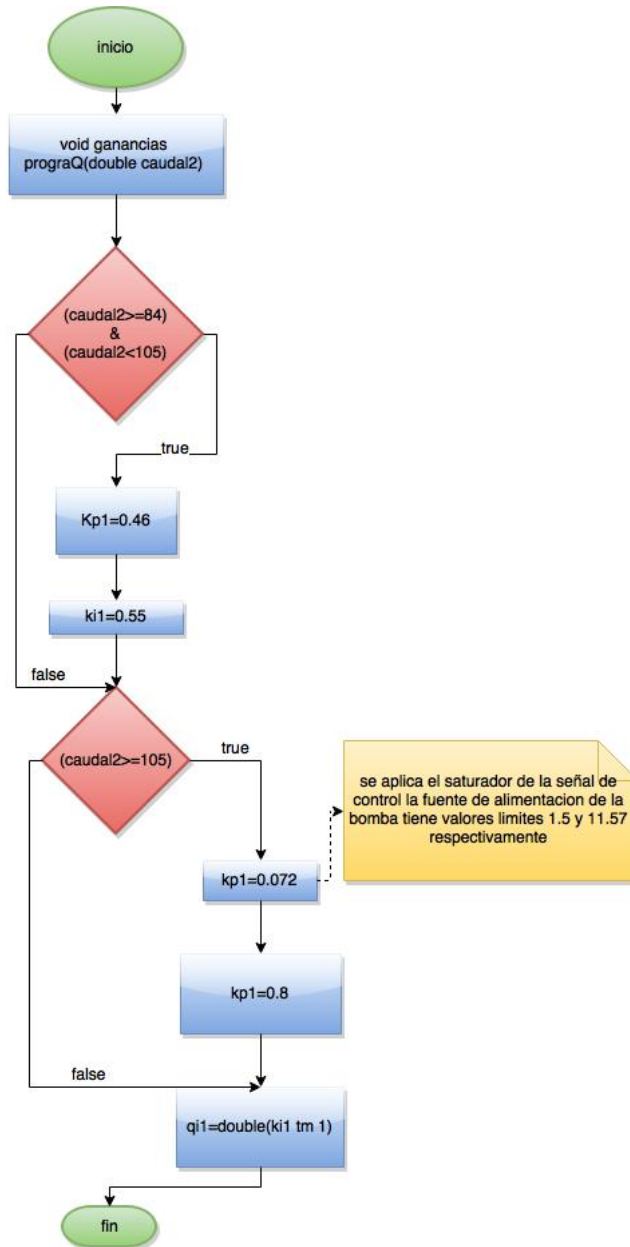
        }
        if (setpoint2 <20){ // Constantes del
controlador para zona menores de 20 cm
            kp=52;
            ki=0.32;
            kd=0.9;

        }
        if ((setpoint2>=20) & (setpoint2<30) ){ //
Constantes del controlador para zona entre 20 y 30 cm
            kp=64.75;
            ki=0.123;
            kd=4.046;

        }
        if ((setpoint2>=30)){ // Constantes del
controlador para zona entre mayor a 30 cm
            kp=133.3;
            ki=1;
            kd=1.667;
        }
        pd=double (kd/kp)/((kd/kp)+N*Tm);//
funcio que transforma las constantes del controlador kp,ki,kd
para el control discreto
            qd=double (kd*N)/((kd/kp)+N*Tm);
            qi=double (ki*Tm);
    }
    if((rrr>=10)){
        pd=0;// acrelacion de control en cambio de stpoint
        qd=0; qi=1; kp=0; ki=1; kd=0; b1=0    } }
```

# ANEXO 15

## DIAGRAMA DE FLUJO FUNCIÓN GANANCIAS PROGRAMADAS CAUDAL



## LÍNEAS DE CÓDIGO FUNCIÓN GANANCIAS PROGRAMADAS CAUDAL

```
void gananciasPrograQ(double caudal2)
{
    if ((caudal2>=84) & (caudal2 <105) ){
        kp1=0.46;
        kil=0.55;

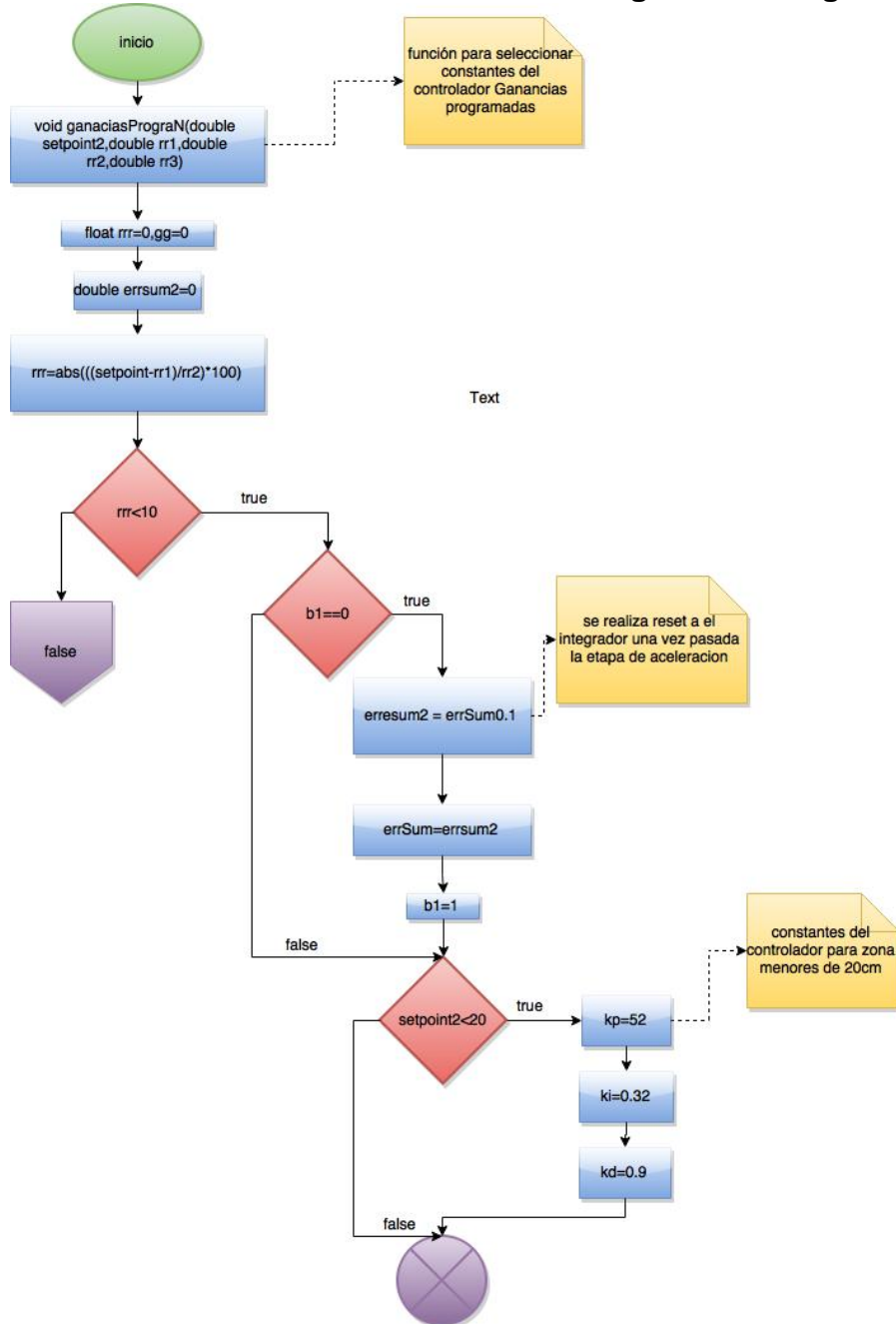
    }
    if ((caudal2 >=105) ){ // se aplica el saturador de la señal
de control la fuente de alimentación de la bomba tiene valores
límites 1,5 y 11.57 respectivamente
        kp1=0.072;
        kil=0.8;

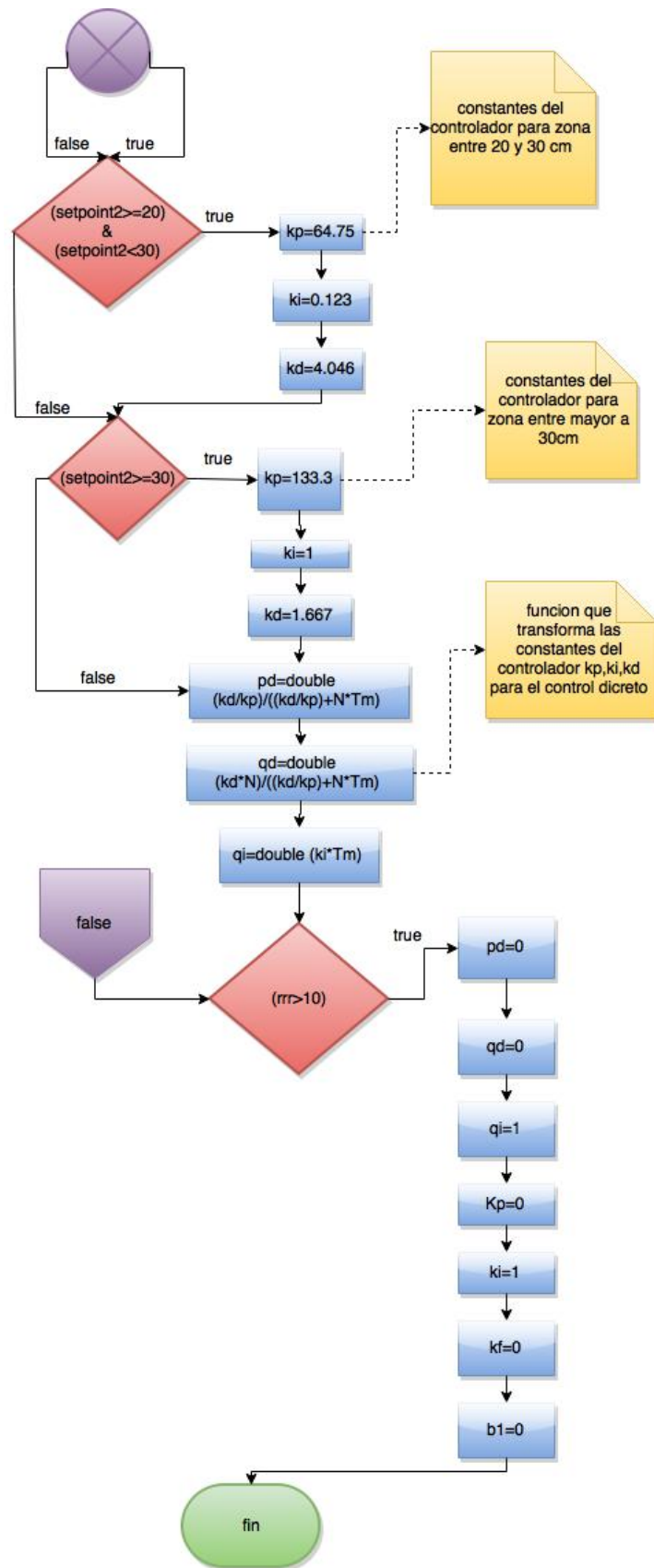
    }

    qil=double (kil*Tm1);
}
```

# ANEXO 16

## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCIÓN gananciaPrograN

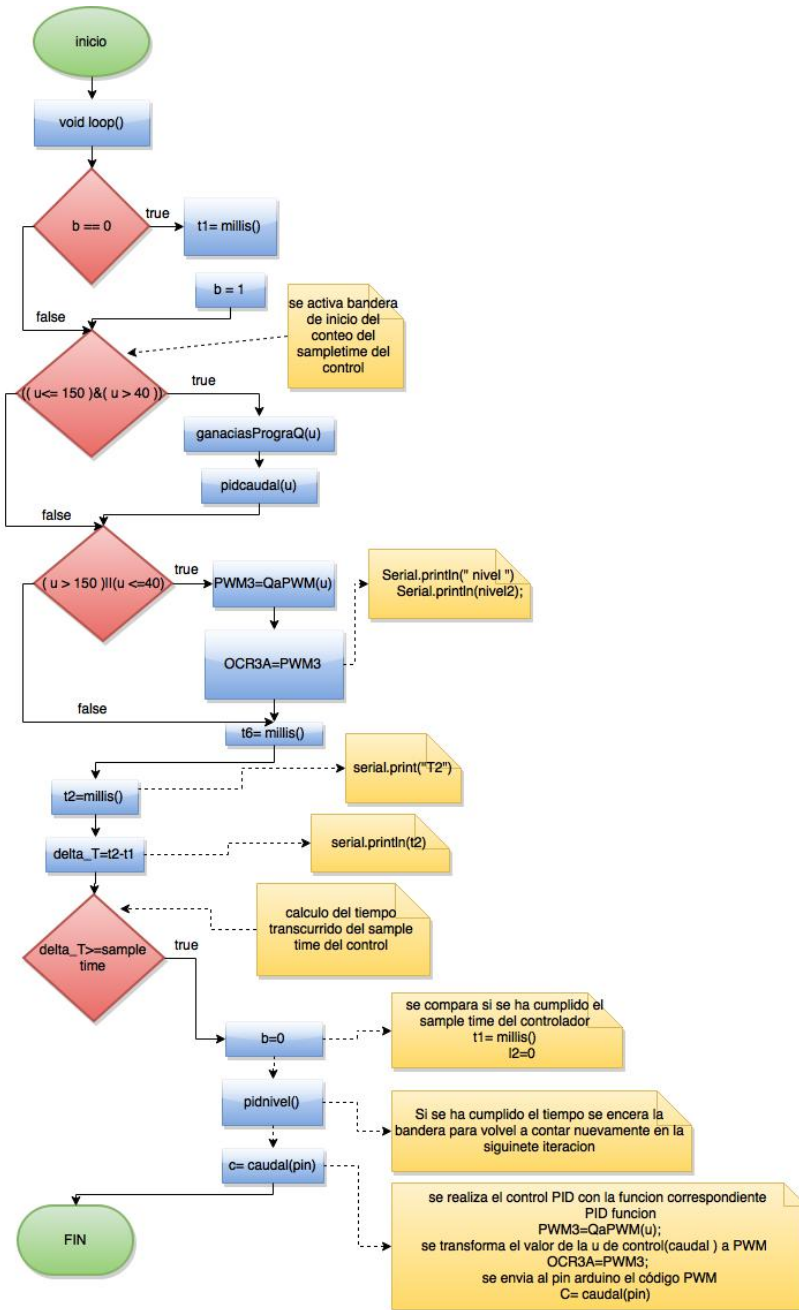




## DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FUNCION ganaciaPrograN

```
void gananciasPrograN(double setpoint2,double rr1,double
rr2,double rr3)// función para seleccionar constantes del
controlador Ganancias programadas
{
    float rrr=0,gg=0;
    double errsum2=0;
    rrr=abs(((setpoint-rr1)/rr2)*100);
    if (rr2 >0){
        gg=25;
    }
    if(rrr <10){
        if (b1==0 ){ // se le realiza reset a el
integrador una vez pasada la etapa de aceleración
            errsum2=errSum*0.1;
            errSum=errsum2;
            b1=1;
        }
        if (setpoint2 <20){ // Constantes del
controlador para zona menores de 20 cm
            kp=52;
            ki=0.32;
            kd=0.9;
        }
        if ((setpoint2>=20) & (setpoint2<30) ){ //
Constantes del controlador para zona entre 20 y 30 cm
            kp=64.75;
            ki=0.123;
            kd=4.046;
        }
        if ((setpoint2>=30)){ // Constantes del
controlador para zona entre mayor a 30 cm
            kp=133.3;
            ki=1;
            kd=1.667;
        }
        pd=double (kd/kp)/((kd/kp)+N*Tm); //
funcio que transforma las constantes del controlador kp,ki,kd
para el control discreto
        qd=double (kd*N)/((kd/kp)+N*Tm);
        qi=double (ki*Tm);
    }
    if((rrr>=10)){
        pd=0;// acrelacion de control en cambio de stpoint
        qd=0;    qi=1;    kp=0;    ki=1;
        kd=0;    b1=0;
    }
}
```

# DIAGRAMA A DE FLUJO DE LA FUNCIÓN CONTROL ADAPTATIVO GANANCIAS PROGRAMADAS LAZO CASCADA





```

void loop(){

  if ( b == 0 ){
    t1= millis();
    b=1; // se activa bandera de inicio del conteo
del sampletime del control
  }
  if (( u<= 150 )&( u > 40 )){
    ganaciasPrograQ(u);
    pidcaudal(u);
  }
  if (( u > 150 ) || (u <=40)){
    PWM3=QaPWM(u);

    //Serial.println(" nivel ");
    //Serial.println(nivel2);
OCR3A=PWM3;
  }

  t2=millis();

  delta_T=t2-t1;// cálculo del tiempo transcurrido del
simple time del control

  if (delta_T >=SampleTime){ // se compara si se ha
cumplido el sample time del controlador

    b=0;//Si se ha cumplido el tiempo se encera la
bandera para volver a contar nuevamente en la siguiente iteración
    pidnivel();// se realiza el control PID con la
función correspondiente

    C= caudal(pin);

  }

}

```

## ANEXO 17

**TABLA CONSTANTE DE LA VÁLVULA (Kv) vs PUNTOS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA**

MAYOR PUNTO DE ESTABILIZACIÓN			CONSTANTE DE LA VÁLVULA	Kv(x) en Función a la Altura del Tanque
PWM	H(cm)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	Kv	Kv(x)
1350	38,969	111,111	17,79907469	17,81503017
1360	38,147	109,754	17,77011189	17,80201071
1370	37,747	109,554	17,92142342	17,84080217
1380	37,597	109,354	17,74729325	17,85886455
1390	37,369	108,82	17,79891188	17,8883914
1400	36,616	108,62	17,95040901	17,99078825
1410	36,147	108,262	18,00693995	18,05093966
1420	34,972	108,062	18,27312253	18,17906435
1430	34,853	107,163	18,15201242	18,1906112
1440	34,772	106,622	18,08139731	18,19837832
1450	34,334	106,522	18,17929807	18,23951493
1460	33,578	106,422	18,36555276	18,31038592
1470	33,134	105,556	18,33774759	18,35409969
1480	32,593	105,292	18,44306967	18,41114654
1490	32,197	105,03	18,50996773	18,45610912
1500	31,441	104,752	18,68160341	18,55017249
1510	31,441	103,74	18,70145681	18,55017249
1520	30,771	103,233	18,41070304	18,64243169
1530	30,209	102,581	18,74520814	18,72566971
1540	29,947	102,481	18,6455492	18,76610179
1550	28,966	101,476	18,85467612	18,92530908
1560	28,034	101,466	19,16364007	19,08608386
1570	27,947	101,456	19,19155383	19,10150683
1580	26,922	100,529	19,37482116	19,28834601
1590	26,919	99,681	19,21245773	19,28890695
1600	26,928	99,581	19,18612196	19,28722438
1610	26,978	99,561	19,35470193	19,27789061
1620	26,484	100,529	19,35016593	19,37115643
1630	25,228	98,65	19,64064195	19,61972671
1640	25,197	98,65	19,65272022	19,62608944
1650	24,534	98,45	19,87611679	19,76505267
1660	23,891	96,84	19,81242414	19,90537679

1670	23,372	96,64	19,98982456	20,02288486
1680	23,247	96,618	20,03893264	20,0517752
1690	22,809	96,178	20,13829133	20,15486776
1700	22,384	95,96	20,28249561	20,25775377

MAYOR PUNTO DE ESTABILIZACIÓN			CONSTANTE DE LA VÁLVULA	Kv(x) en Función a la Altura del Tanque
PWM	H(cm)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	Kv	Kv(x)
1710	22,066	95,095	20,24397889	20,3366516
1720	21,322	94,457	20,45597473	20,52808124
1730	20,841	94,246	20,64446583	20,65740806
1740	20,447	93,827	20,65798093	20,76698885
1750	20,047	93,412	20,95574646	20,88197082
1760	19,584	93,206	21,06168776	21,02033014
1770	18,672	92,796	21,47503285	21,31253047
1780	18,397	91,787	21,39969932	21,40663913
1800	17,372	90,996	21,8321945	21,78730399
1810	17,278	90,796	21,84338706	21,82485012
1820	16,909	90,218	21,93987926	21,97698096
1830	16,297	89,654	22,20832672	22,24697932
1840	15,841	89,454	22,47545374	22,46340541
1850	15,722	88,902	22,42113715	22,52210378
1860	15,178	88,702	22,7680658	22,80231796
1870	14,201	87,463	23,37046258	23,47141095
1880	14,011	87,263	23,15638042	23,35408609
1890	14,006	87,133	23,27813061	23,46837385
1900	13,991	86,963	23,24931358	23,4805313
1910	12,747	86,856	24,32740761	24,28218298
1920	12,634	86,699	24,39178886	24,3593679
1930	12,609	86,168	24,26641891	24,37654578
1940	11,772	85,643	24,96127386	24,9755168
1950	11,297	85,47	25,42916733	25,34205087
1960	10,903	84,444	25,57383101	25,66835645
1970	9,384	83,774	27,34735025	27,33680243

## ANEXO 18

### FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE OPERACIÓN

PUNTOS DE OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO				
MAYOR PUNTO DE ESTABILIZACIÓN			CONSTANTE DE LA VÁLVULA	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA
PWM	H(cm)	Q(cm <sup>3</sup> /s)	Kv	Tf
1360	38,147	109,954	17,80249361	1/(510.7*S + 1.44)
1370	37,747	109,954	17,98685754	1/(510.7 *S +1,456)
1380	37,597	109,954	17,74729325	1/(510.7*S + 1.462)
1390	37,369	108,82	17,89657038	1/(510.7*S + 1.456)
1400	36,616	108,82	17,98346077	1/(510.7*S + 1.486)
1410	36,147	108,262	18,00693995	1/(510.7*S + 1.497)
1420	34,972	108,262	18,30694223	1/(510.7*S + 1.547)
1430	34,853	107,163	18,15201242	1/(510.7*S + 1.537)
1440	34,772	106,622	18,08139731	1/(510.7*S + 1.5331)
1450	34,334	106,622	18,19636431	1/(510.7*S + 1.552)
1460	33,578	106,622	18,40006733	1/(510.7*S + 1.588)
1470	33,134	105,556	18,33774759	1/(510.7*S + 1.593)
1480	32,593	105,292	18,44306967	1/(510.7*S + 1.615)
1490	32,197	105,03	18,50996773	1/(510.7*S + 1.631)
1500	31,441	104,252	18,59243278	1/(510.7*S + 1.658)
1510	31,441	103,74	18,70145681	1/(510.7*S + 1.65)
1520	30,771	103,233	18,41070304	1/(510.7*S + 1.677)
1530	30,209	102,481	18,72693458	1/(510.7*S + 1.696)
1540	29,947	102,481	18,6455492	1/(510.7*S + 1.711)
1550	28,966	101,496	18,85839221	1/(510.7*S + 1.751)
1560	28,034	101,496	19,1693061	1/(510.7*S + 1.81)
1570	27,947	101,496	19,19912028	1/(510.7*S + 1.816)
1580	26,922	100,529	19,37482116	1/(510.7*S + 1.867)
1590	26,919	99,581	19,19318379	1/(510.7*S + 1.85)
1600	26,928	99,581	19,1899761	1/(510.7*S + 1.85)
1610	26,978	100,529	19,35470193	1/(510.7*S + 1.863)
1620	26,484	99,581	19,35016593	1/(510.7*S + 1.88)
1630	25,228	98,65	19,64064195	1/(510.7*S + 1.955)
1640	25,197	98,65	19,65272022	1/(510.7*S + 1.957)
1650	24,534	98,65	19,91649489	1/(510.7*S +2,01)
1660	23,291	96,84	20,06599562	1/(510.7*S + 2,078)
1670	23,872	96,84	19,82030704	1/(510.7*S + 2,028)

1680	23,347	96,618	19,99597116	1/(510.7*S + 2,0691)
1690	22,809	96,178	20,13829133	1/(510.7*S + 2,108)
1700	22,384	95,96	20,28249561	1/(510.7*S + 2,1434)
1710	22,066	95,095	20,24397889	1/(510.7*S + 2,1547)
1720	21,322	94,457	20,45597473	1/(510.7*S + 2,2150)
1730	20,841	94,246	20,64446583	1/(510.7*S + 2,26)
1740	20,447	93,827	20,65798093	1/(510.7*S + 2,29)
<b>PUNTOS DE OPERACIÓN EN LAZO ABIERTO</b>				
<b>MAYOR PUNTO DE ESTABILIZACIÓN</b>			<b>CONSTANTE DE LA VÁLVULA</b>	<b>FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA</b>
<b>PWM</b>	<b>H(cm)</b>	<b>Q(cm3/s)</b>	<b>Kv</b>	<b>Tf</b>
1750	20,047	93,412	20,95574646	1/(510.7*S + 2,33)
1760	19,584	93,206	21,06168776	1/(510.7*S + 2,34)
1770	18,672	92,796	21,47503285	1/(510.7*S + 2,48)
1780	18,397	91,787	21,39969932	1/(510.7*S + 2,35)
1800	17,272	90,996	21,8953044	1/(510.7*S + 2,63)
1810	17,278	90,996	21,89150236	1/(510.7*S + 2,63)
1820	16,909	90,218	21,93987926	1/(510.7*S + 2,67)
1830	15,841	89,454	22,47545374	1/(510.7*S + 2,82)
1840	16,297	89,454	22,15878442	1/(510.7*S + 2,74)
1850	15,722	88,702	22,37069703	1/(510.7*S + 2,82)
1860	15,178	88,702	22,7680658	1/(510.7*S + 2,92)
1870	14,006	87,963	23,50406458	1/(510.7*S + 3,14)
1880	14,201	87,963	23,34213459	1/(510.7*S + 3,09)
1890	14,011	87,963	23,49987034	1/(510.7*S + 3,14)
1900	13,991	87,963	23,51666076	1/(510.7*S + 3,14)
1910	12,747	87,056	24,38342541	1/(510.7*S + 3,41)
1920	12,634	86,699	24,39178886	1/(510.7*S + 3,43)
1930	12,609	86,168	24,26641891	1/(510.7*S + 3,42)
1940	11,772	85,643	24,96127386	1/(510.7*S + 3,63)
1950	11,297	85,47	25,42916733	1/(510.7*S + 3,78)
1960	10,903	84,444	25,57383101	1/(510.7*S + 3,87)
1970	9,384	83,774	27,34735025	1/(510.7*S + 4,46)

## ANEXO 19

**TABLA DE DATOS USADOS EN LA IDENTIFICACIÓN PUNTO DE OPERACIÓN 17.5 cm (41 datos)**

Datos Para Identificación Punto de Operación 17.5 cm							
Items	Fecha	Hora	Set point PRBS	Setpoint PRBS Arduino	Nivel sensor	Caudal sensor	Identificador
22	20/03/2015	23:55	1900	1900	20,62	112,593	196
23	20/03/2015	23:55	1900	1900	4,543	96,398	197
24	20/03/2015	23:55	1900	1900	11,38	93,206	197,5
25	20/03/2015	23:55	1900	1900	13,398	93,206	198
26	20/03/2015	23:55	1900	1900	13,664	92,796	198,5
27	20/03/2015	23:55	1900	1900	9,987	91,787	199
28	20/03/2015	23:55	1900	1900	7,541	90,606	199,5
29	20/03/2015	23:55	1900	1900	24,486	91,588	200
30	20/03/2015	23:55	1900	1900	25,487	90,8	200,5
31	20/03/2015	23:55	1900	1900	17,91	93,619	201
32	20/03/2015	23:55	1900	1900	10,569	91,787	201,5
33	20/03/2015	23:55	1900	1900	15,637	91,787	202
34	20/03/2015	23:55	1900	1900	8,403	92,593	202,5
35	20/03/2015	23:55	1900	1900	8,97	91,193	203
36	20/03/2015	23:55	1900	1900	9,82	93	203,5
37	20/03/2015	23:56	1900	1900	10,307	92,39	204
38	20/03/2015	23:56	1900	1900	11,191	90,412	204,5
39	20/03/2015	23:56	1900	1900	11,691	90,218	205
40	20/03/2015	23:56	1900	1900	12,559	90,026	205,5
41	20/03/2015	23:56	1900	1900	13,19	90,8	206

## ANEXO 20

### IDENTIFICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL PUNTO DE OPERACIÓN 13.7 CM

Para determinar el modelo matemático por identificación del punto de operación 13.7 cm de nivel se necesita que la planta genere un caudal de 88 cm<sup>3</sup>/s en la bomba para estos se configuró la señal PRBS con los siguientes datos

$$T_e = 1800$$

$$T_m = 2 \text{ s}$$

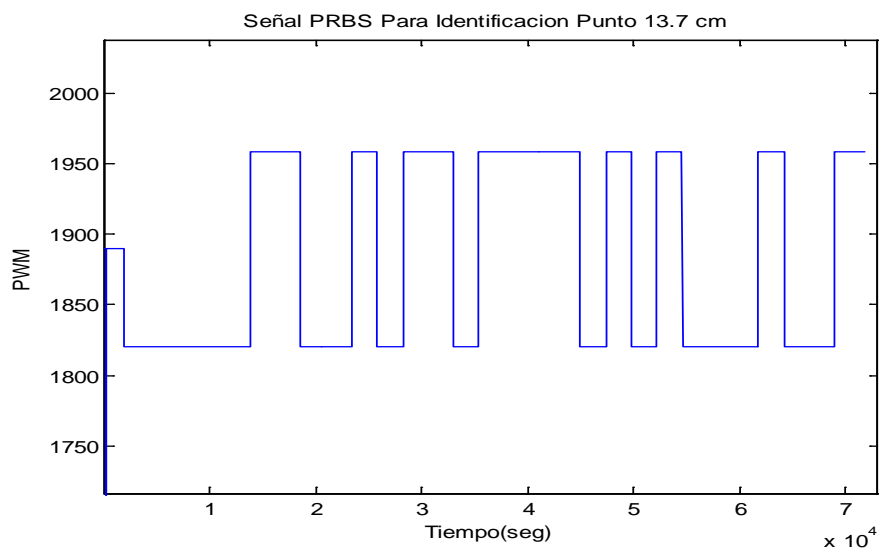
$$T_s = 71900$$

$$R_e = 1200$$

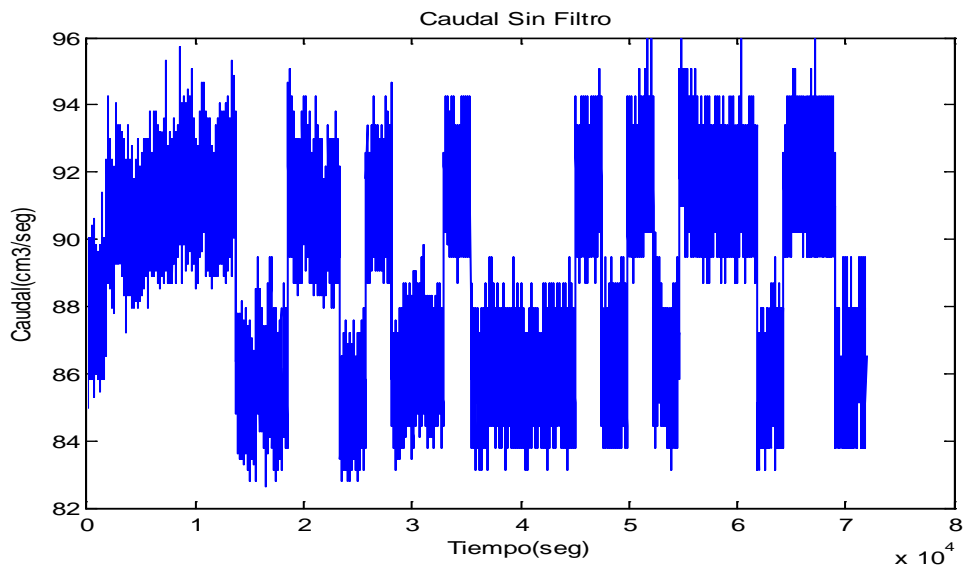
$$u_{\max} = 3\%$$

$$u_{\min} = 3\%$$

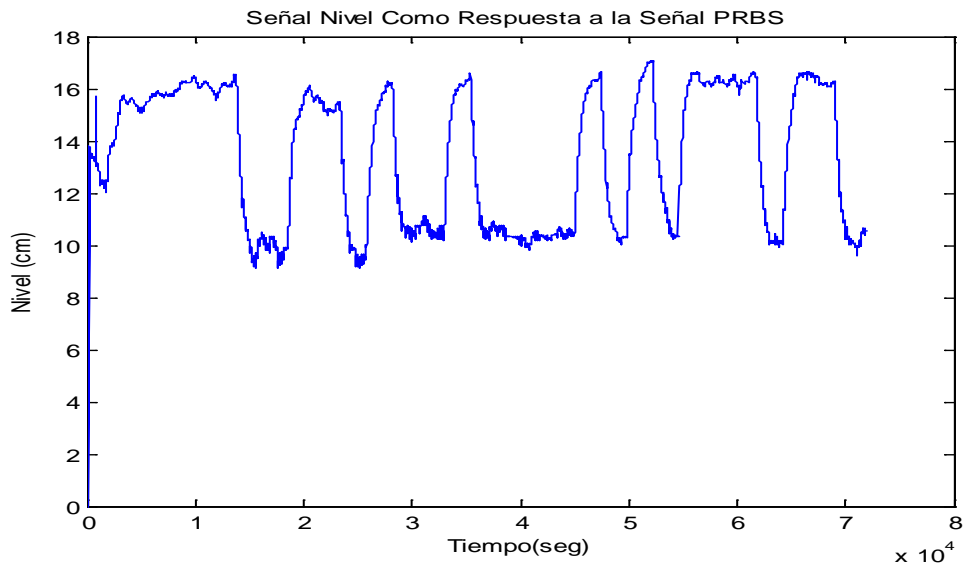
Con estos datos la señal PRBS generada es la que se muestra en la figura:



Con este valor de PWM se genera la señal de caudal real en la bomba que se muestra en la figura



La señal de nivel real en el tanque es la que se muestra en la figura...



La señal de caudal y nivel real tienen la presencia de un ruido por lo que se le aplica un filtro a los datos, las líneas de código que permiten realizar el filtrado de las mismas en código de matlab es:



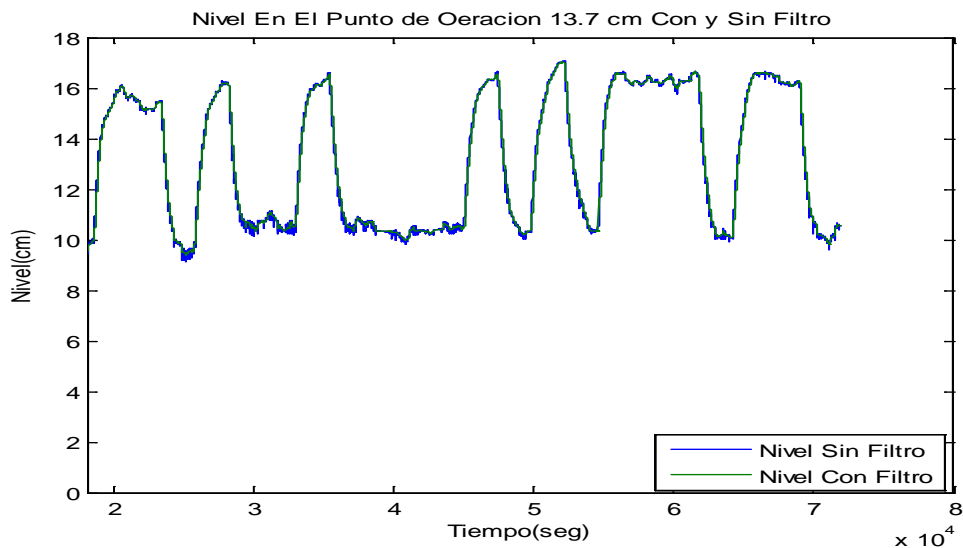
```

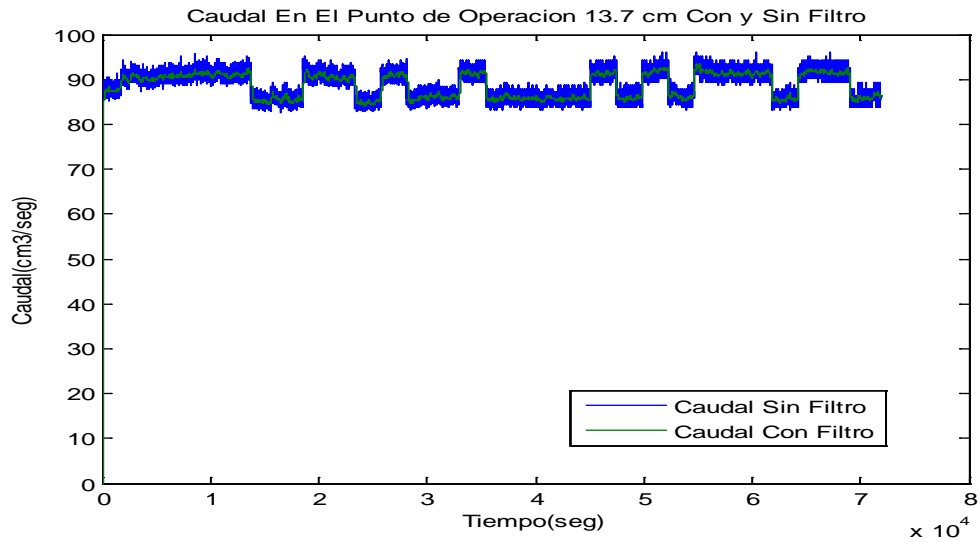
sys=tf(1,[50 1])
y_fit=lsim(sys,wo,t)
plot(t,[wo y_fit])

x_fit=lsim(sys,wi,t)
plot(t,[wi x_fit])

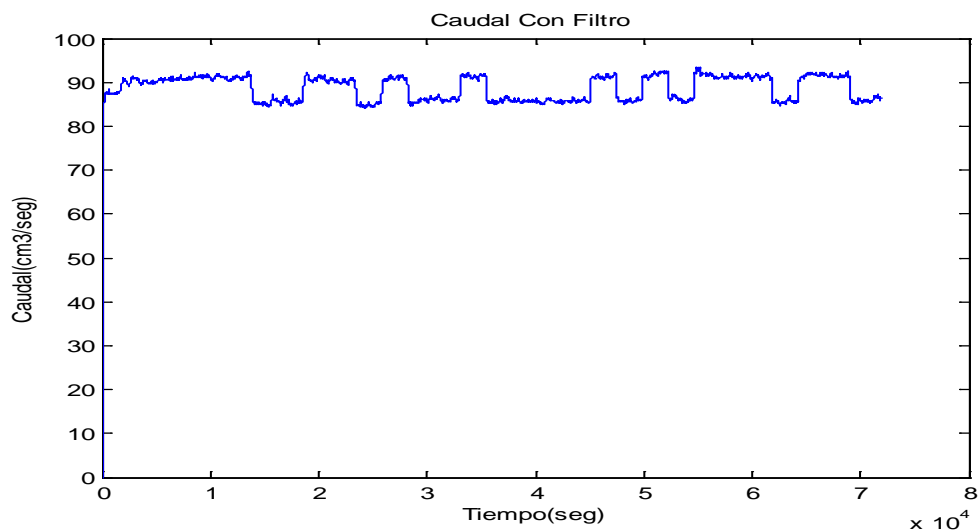
```

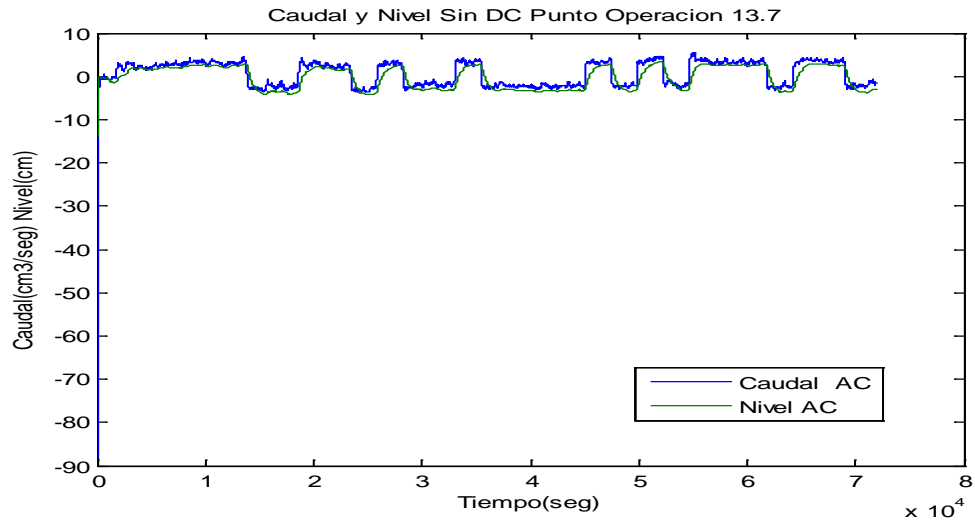
En las variables wo y wi se almacenan los datos de nivel y caudal respectivamente de la planta real, El filtro que se aplica tiene como función de transferencia  $1/(50s+1)$ , la respuesta de las señales se muestran en las figuras en el mismo plot de matlab se presentan los datos reales sin filtro y los datos con filtro.





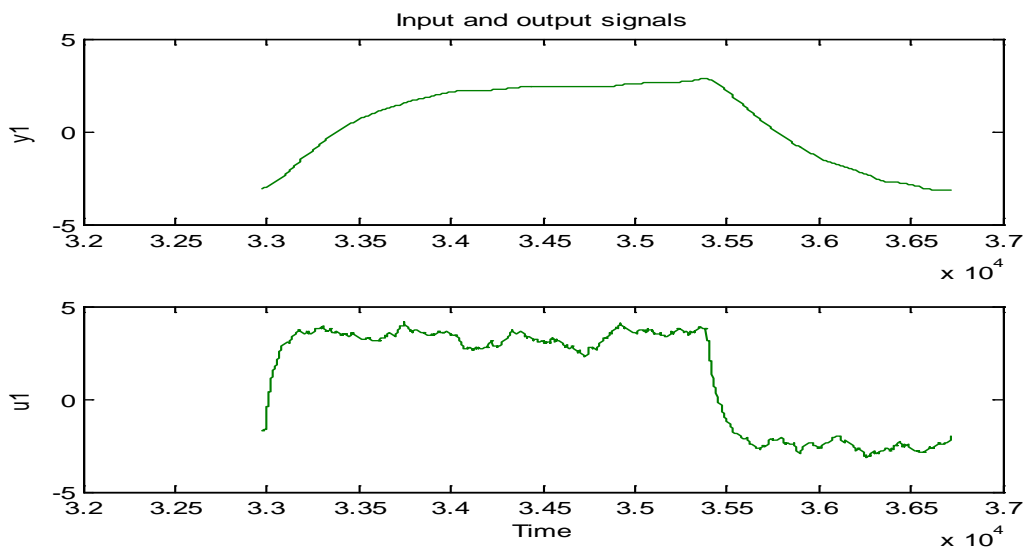
La señal de caudal un vez que se aplicó el filtro, será la que se utiliza en la identificación de la planta, se tomara como señal de entrada el caudal de la planta y como salida el nivel en el tanque, a estos valores se les resta los valores del punto de operación es decir los valores 13.7 cm al nivel y 88 cm<sup>3</sup>/s al caudal, para obtener el valor AC de las dos señales, las respuestas a esta operación se muestra en las figuras siguientes



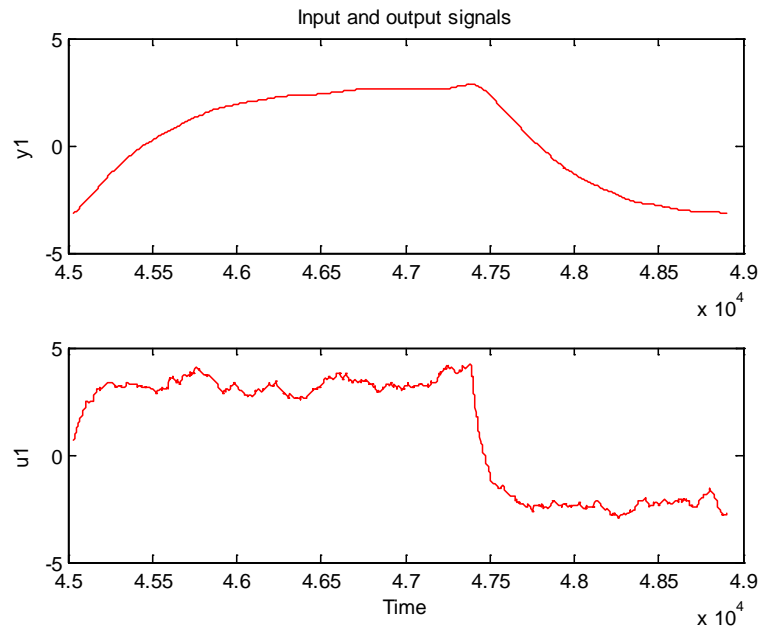


Luego de este tratamiento de los datos se utiliza el toolbox de matlab IDENT para la identificación en el que se importan los datos AC de nivel y caudal, de estos datos se ha seleccionado un tramo para la identificación y otro tramo para la validación lo cual se muestra en las figuras siguientes

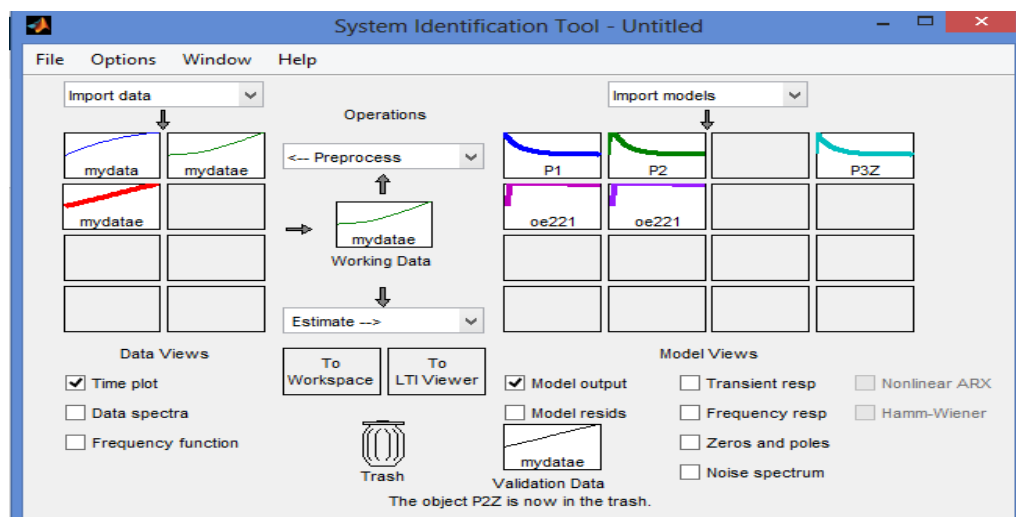
Tramo para identificar



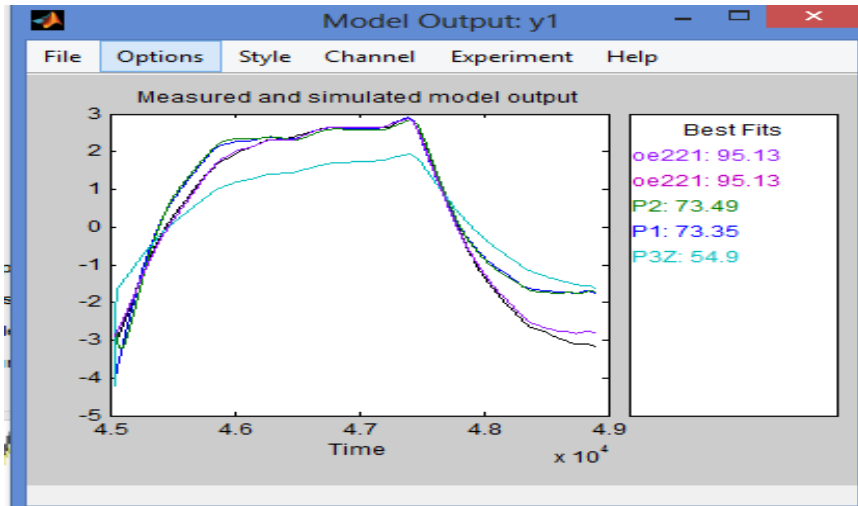
## Tramo para validar



Se ha utilizado varios modelos para realizar la aproximación de la planta en la figura se muestran los modelos.



De todos los modelos utilizados para la identificación los mejores modelos se presentan en la figura.



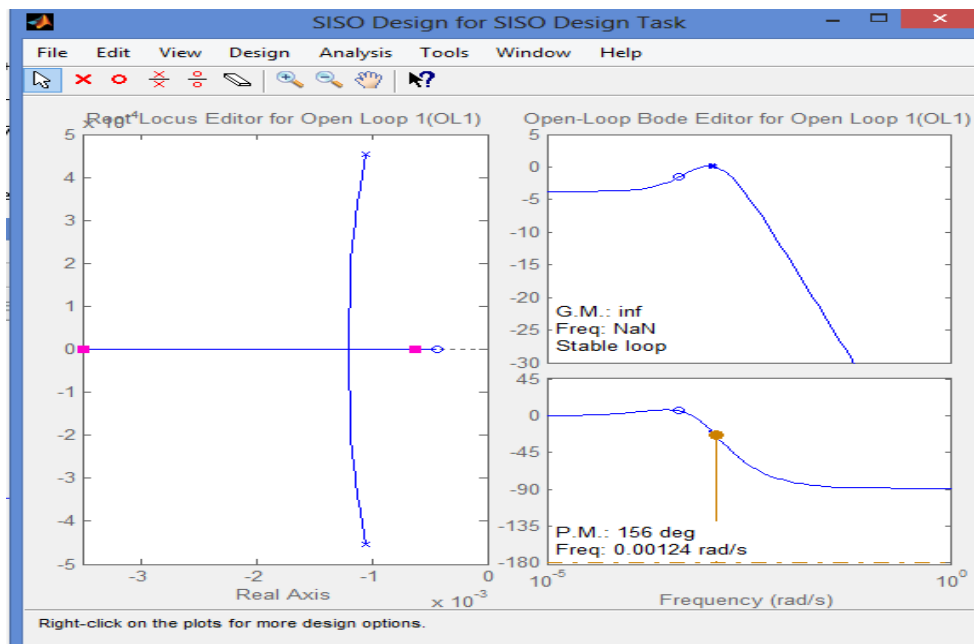
Se exporta al workspace el modelo oe2221 y se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{0.002006 s + 8.612e-07}{s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06}$$

Transformando a modelo de polos y zeros se tiene que el modelo es:

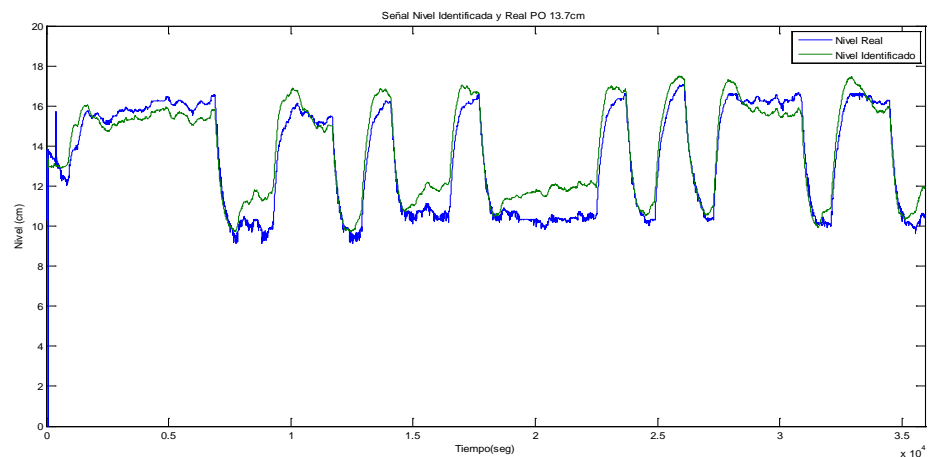
$$\frac{0.0020064 (s+0.0004292)}{(s^2 + 0.002117s + 1.325e-06)}$$

Si se grafica la trayectoria de las raíces de este modelo se tiene:



En la trayectoria de las raíces se observa que el modelo tiene dos polos con componente imaginaria y cero cerca del origen del plano s

Como se puede observar la planta es estable, todos sus ceros y polos se encuentran del lado derecho del plano s. Se aplicó los datos reales de caudal con los cuales se realizó la identificación y los resultados se muestran en la figura



En la figura se puede apreciar que a pesar de tener una buena aproximación en el modelamiento, cuando se realiza la simulación con todos los datos reales de la identificación el modelo tiene un error significativo en el seguimiento de la señal.

### **Identificación del Modelo Matemático de la Función de Transferencia Para el Punto de Operación 19.3 cm**

Para determinar el modelo matemático por identificación del punto de operación 19.3 cm de nivel para el cual se necesita que la planta genere un caudal de 93.1 cm<sup>3</sup>/s en la bomba se realizó el mismo procedimiento de la sección de identificación para estos se configuró la señal PRBS con los siguientes datos

te=1800

tm=2 seg

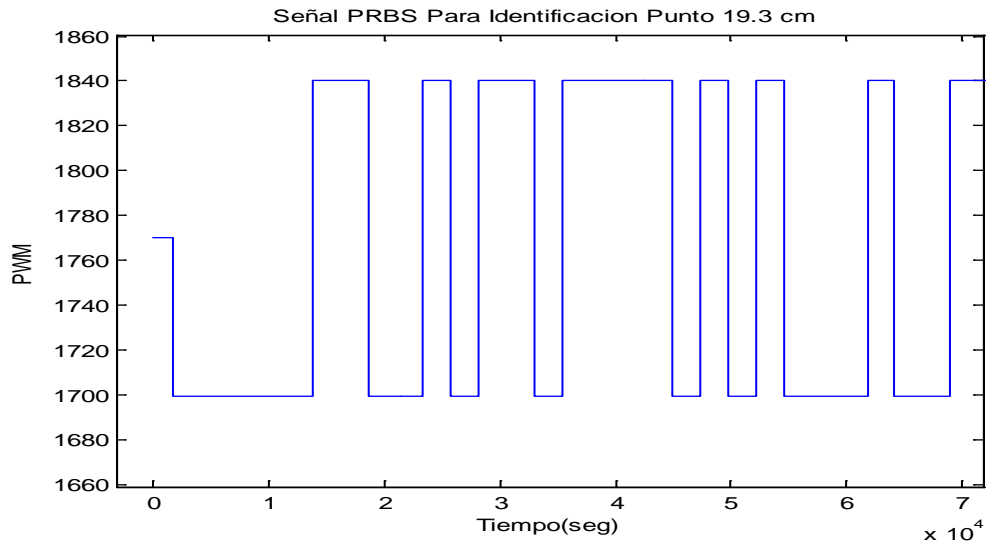
ts=71900

re=1200

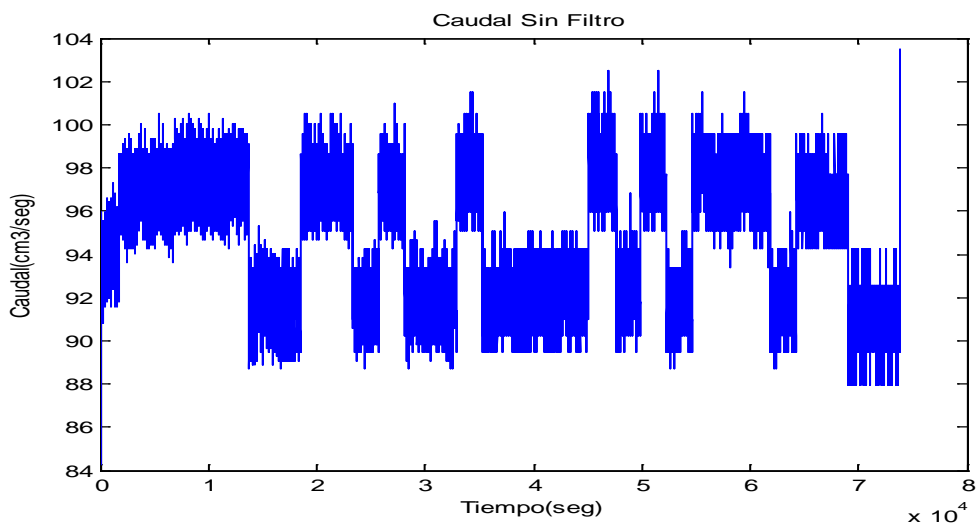
umax=3%

umin=3%

Con estos datos la señal PRBS generada es la que se muestra en la figura:

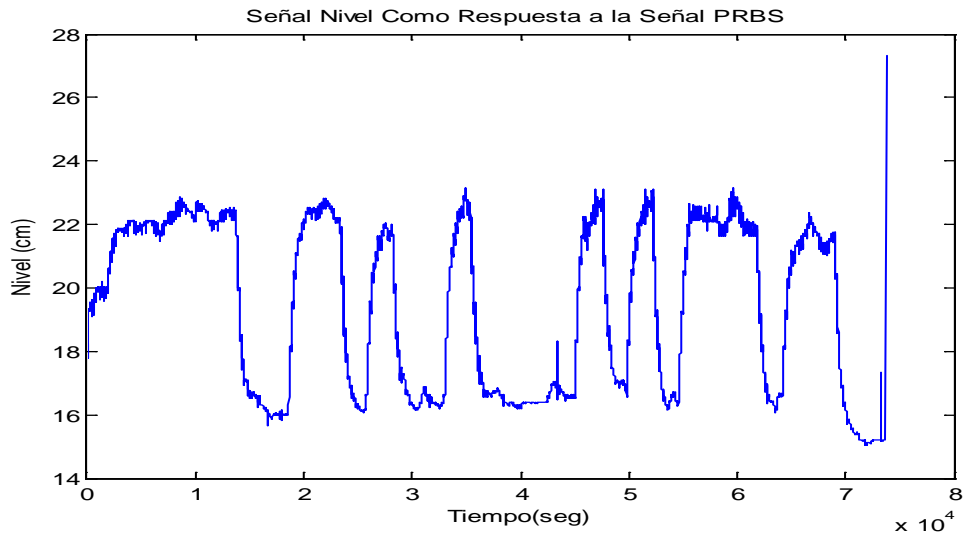


Con este valor de PWM se genera la señal de caudal real en la bomba que se muestra en la figura



La señal de nivel real en el tanque es la que se muestra en la figura...



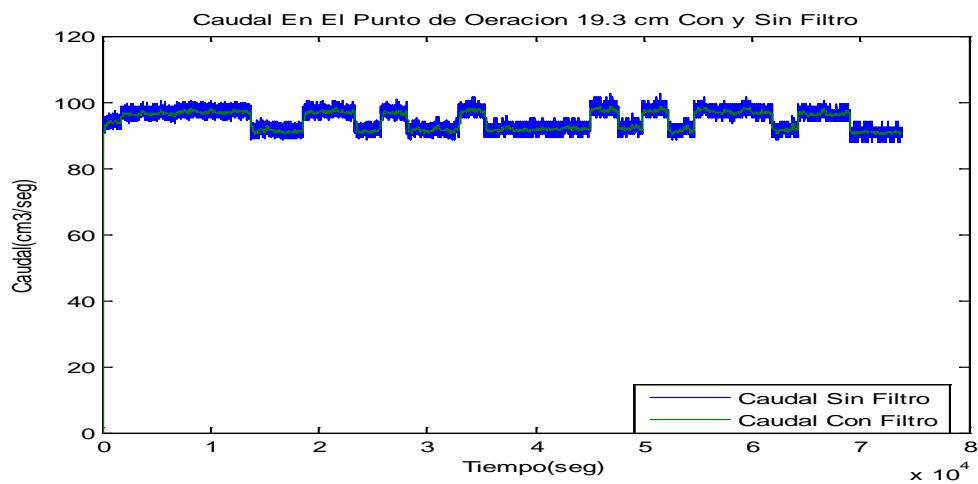
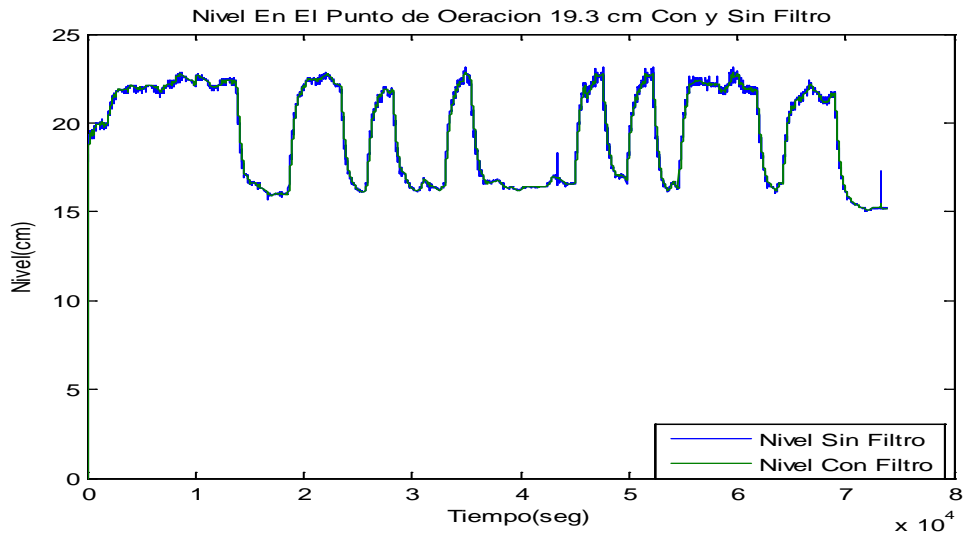


La señal de caudal y nivel real tiene la presencia de un ruido por lo que se le aplica un filtro a los datos, las líneas de código que permiten realizar el filtrado de las mismas en código de matlab es:

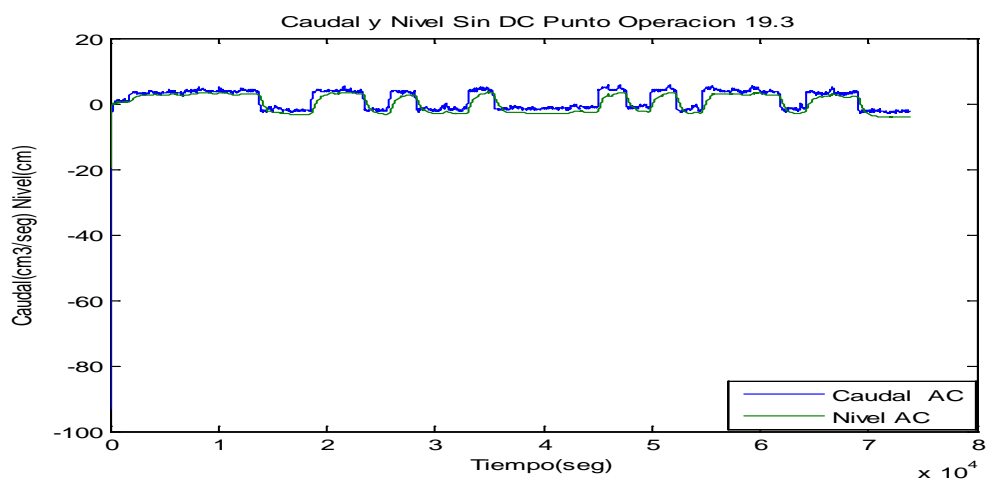
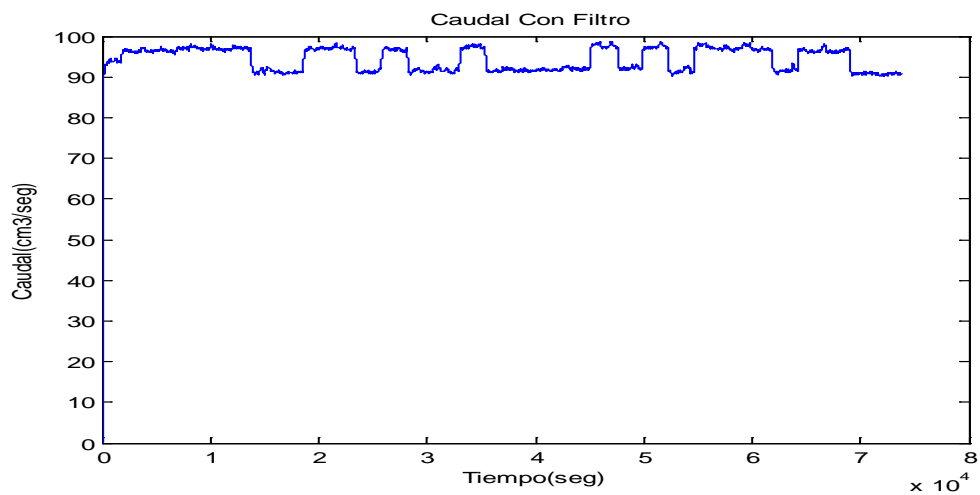
```
sys=tf(1,[50 1])
y_fit=lsim(sys,wo,t)
plot(t,[wo y_fit])

x_fit=lsim(sys,wi,t)
plot(t,[wi x_fit])
```

En las variables wo y wi se almacenan los datos de nivel y caudal respectivamente de la planta real, El filtro que se aplica tiene como función de transferencia  $1/(50s+1)$ , la respuesta de las señales se muestran en las figuras en el mismo plot de matlab se presentan los datos reales sin filtro y los datos con filtro.

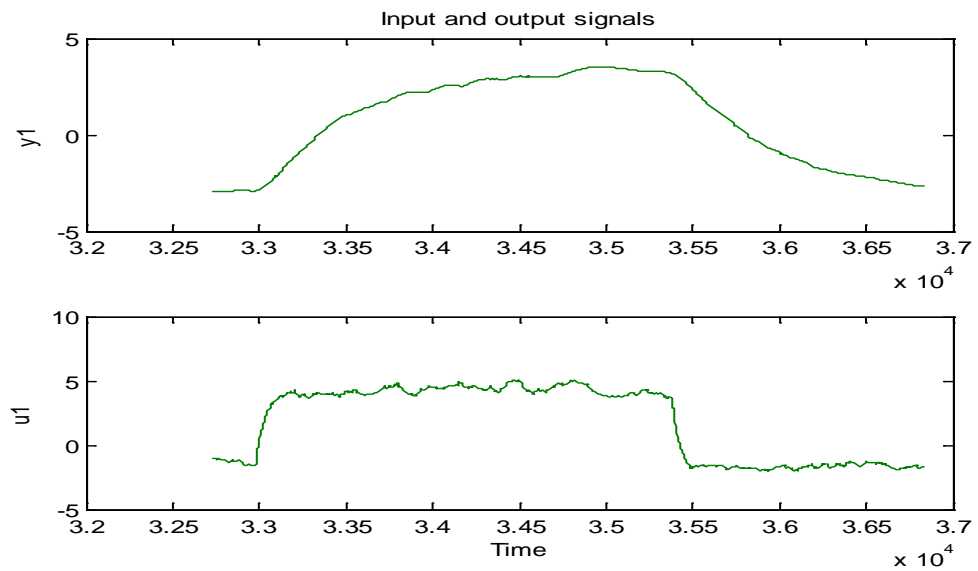


La señal de caudal una vez que se aplicó el filtro, será la que se utiliza en la identificación de la planta, se tomara como señal de entrada el caudal de la planta y como salida el nivel en el tanque, a estos valores se les resta los valores del punto de operación es decir los valores 19.3 cm al nivel y 93.1  $\text{cm}^3/\text{s}$  al caudal para obtener el valor AC de las dos señales, las respuesta a esta operación se muestra en las figuras

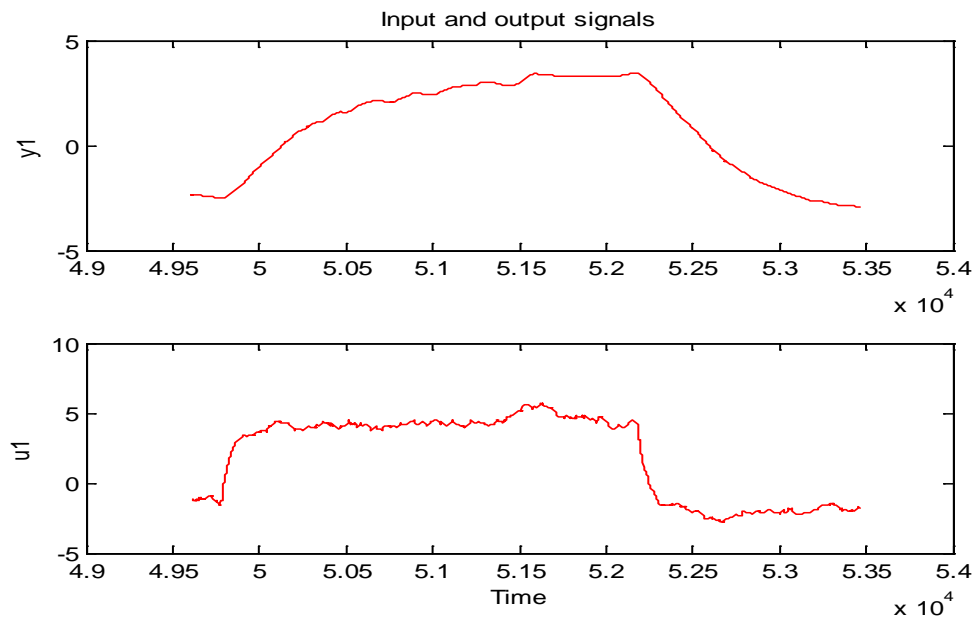


Luego de este tratamiento de los datos se utiliza el toolbox de matlab IDENT para la identificación en el que se importan los datos AC de nivel y caudal, de estos datos se ha seleccionado un tramo para la identificación y otro tramo para la validación como se aprecia en las siguientes figuras

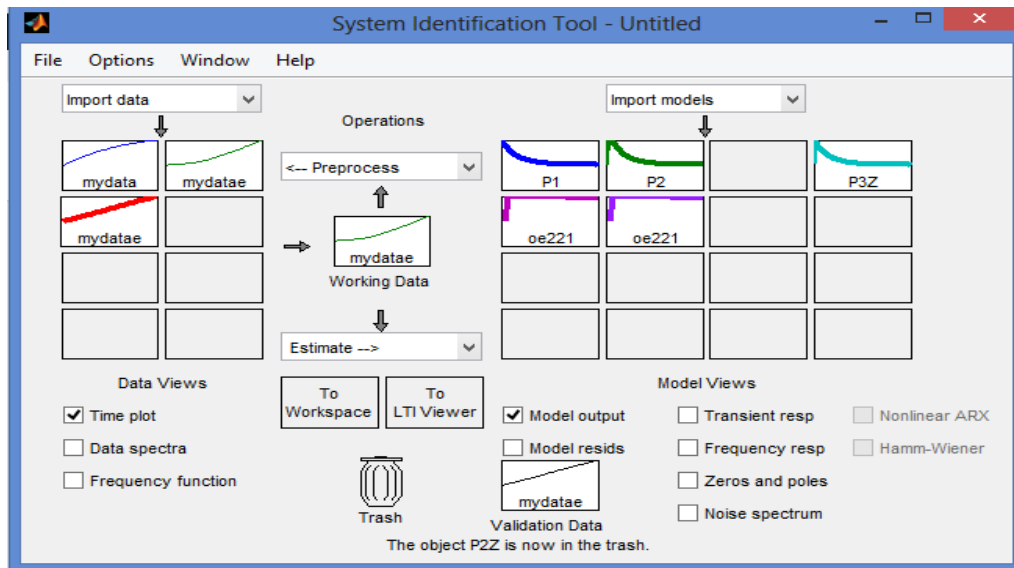
### Tramo para identificar



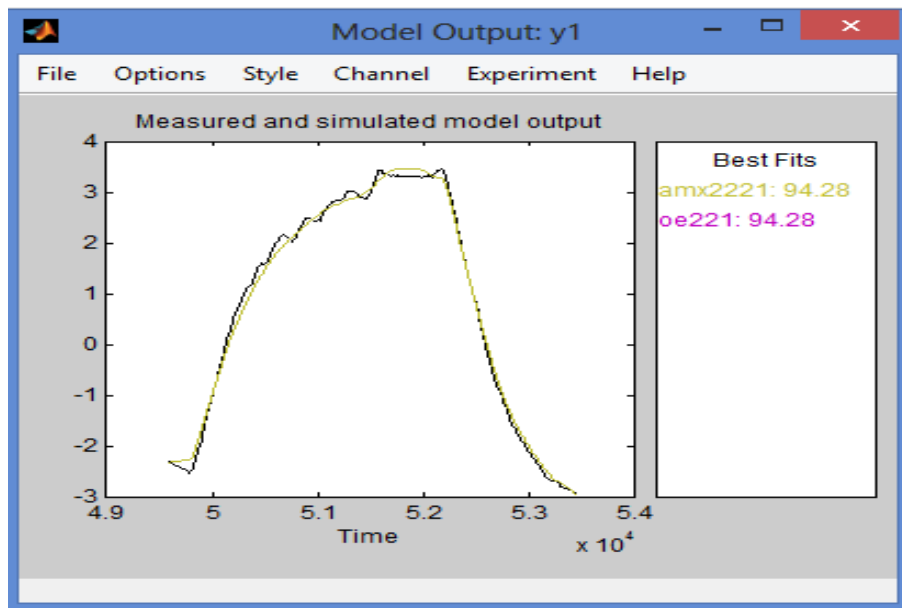
### Tramo para validar



Se ha utilizado varios modelos para realizar la aproximación de la planta en la figura siguiente se muestran los modelos.



De todos los modelos utilizados para la identificación los mejores modelos se presentan en la figura



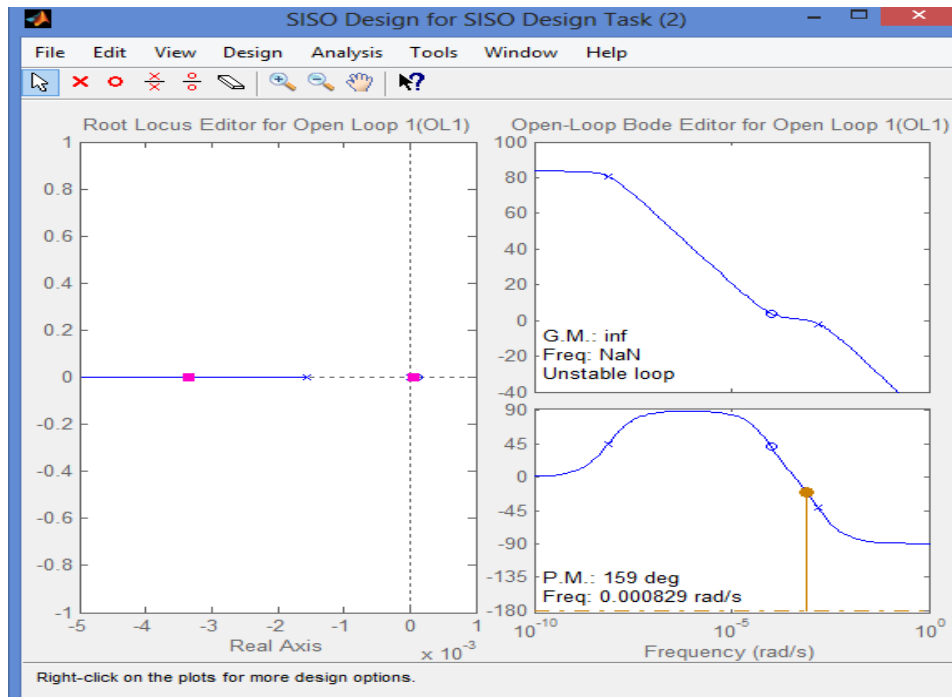
Se exporta al workspace el modelo oe2221 y se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{0.002006 s + 8.612e-07}{s^2 + 0.002117 s + 1.325e-06}$$

Transformando a modelo de polos y zeros se tiene que el modelo es:

$$\frac{0.0020064 (s+0.0004292)}{(s^2 + 0.002117s + 1.325e-06)}$$

Si se grafica la trayectoria de las raíces de este modelo se tiene:



En la trayectoria de las raíces se observa que el modelo tiene dos polos con componente imaginaria y un cero cerca del origen del plano s

Como se puede observar la planta es estable todos sus ceros y polos se encuentran del lado derecho del plano s. Se aplicó los datos reales de caudal

con los cuales se realizó la identificación y los resultados se muestran en la figura, también se puede apreciar que a pesar de tener una buena aproximación en el modelamiento del modelo cuando se realiza la simulación con todos los datos reales de la identificación el modelo tiene un error significativo en el seguimiento de la señal.

### **Identificación del Modelo Matemático de la Función de Transferencia Para el Punto de Operación 26.5 cm**

Para determinar el modelo matemático por identificación del punto de operación 29.8 cm de nivel se necesita que la planta genere un caudal de 98.8 cm<sup>3</sup>/s en la bomba se realizó el mismo procedimiento de identificación para estos se configuró la señal PRBS con los siguientes datos

te=1800

tm=2 seg

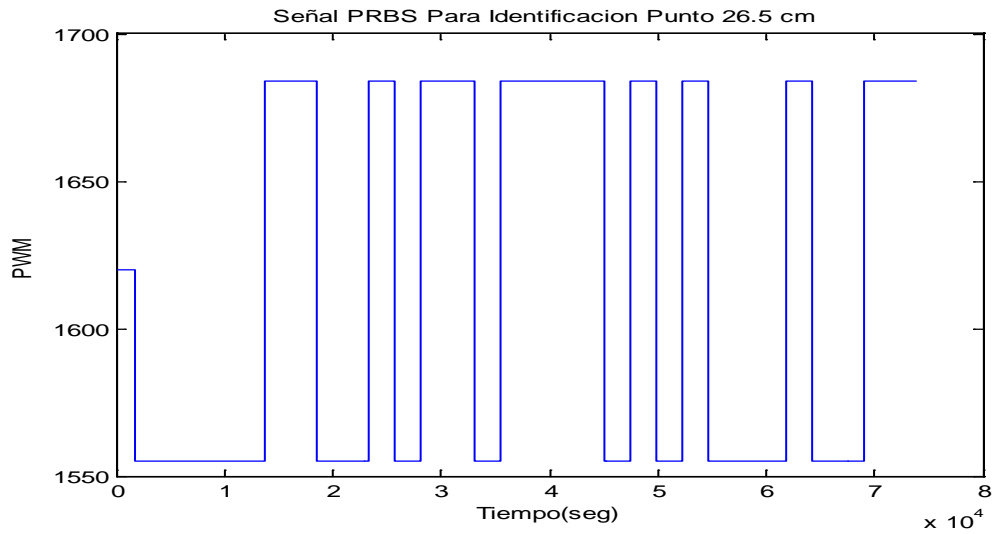
ts=71900

re=1620

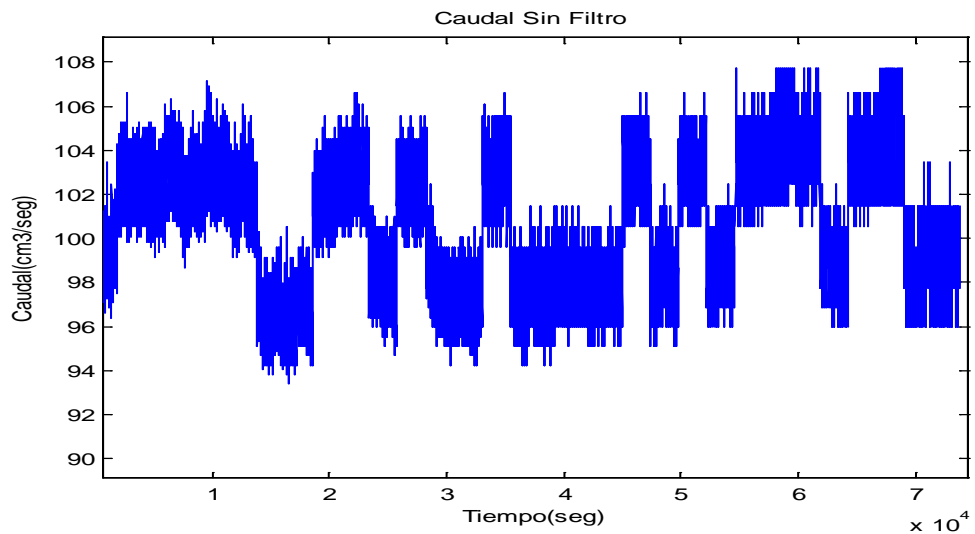
umax=3%

umin=3%

Con estos datos la señal PRBS generada es la que se muestra en la figura:

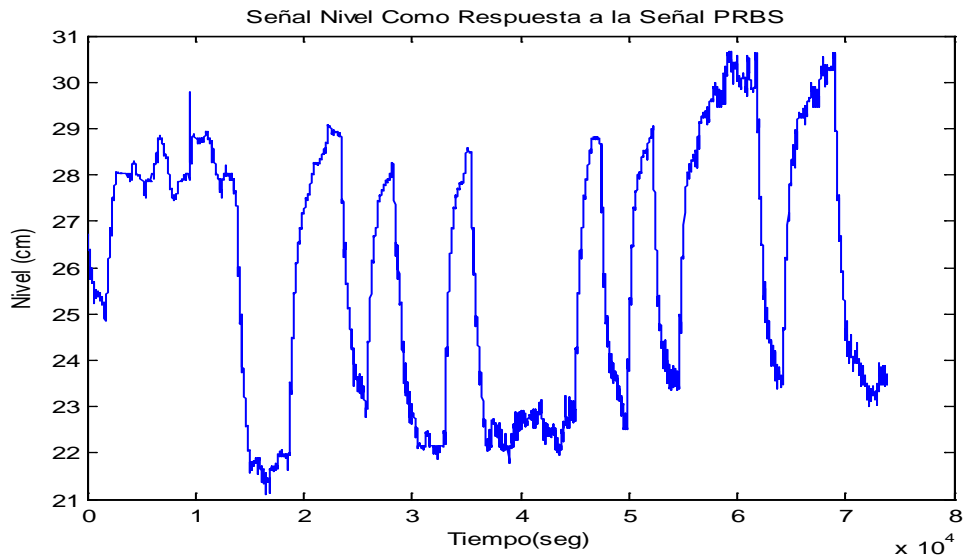


Con este valor de PWM se genera la señal de caudal real en la bomba que se muestra en la figura



La señal de nivel real en el tanque es la que se muestra en la figura...



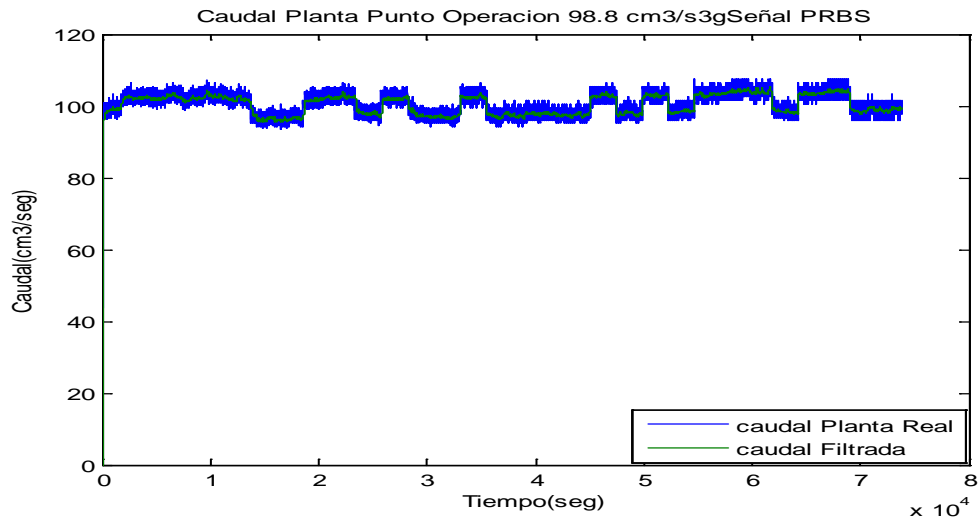
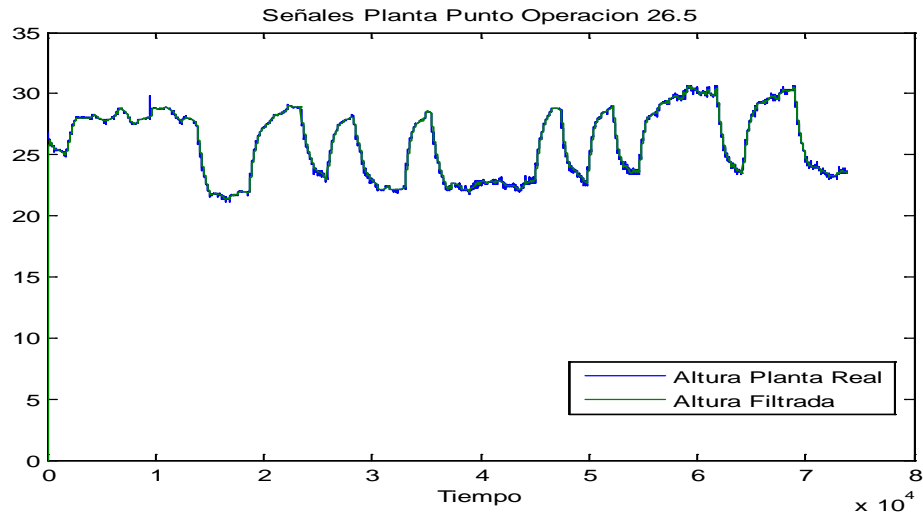


La señal de caudal y nivel real tiene la presencia de un ruido por lo que se le aplica un filtro a los datos, las líneas de código que permiten realizar el filtrado de las mismas en código de matlab es:

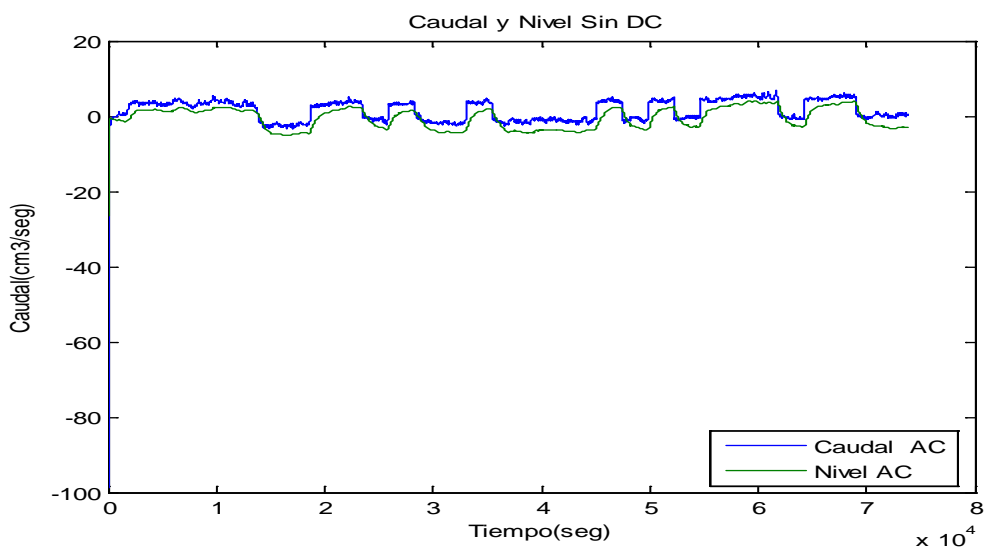
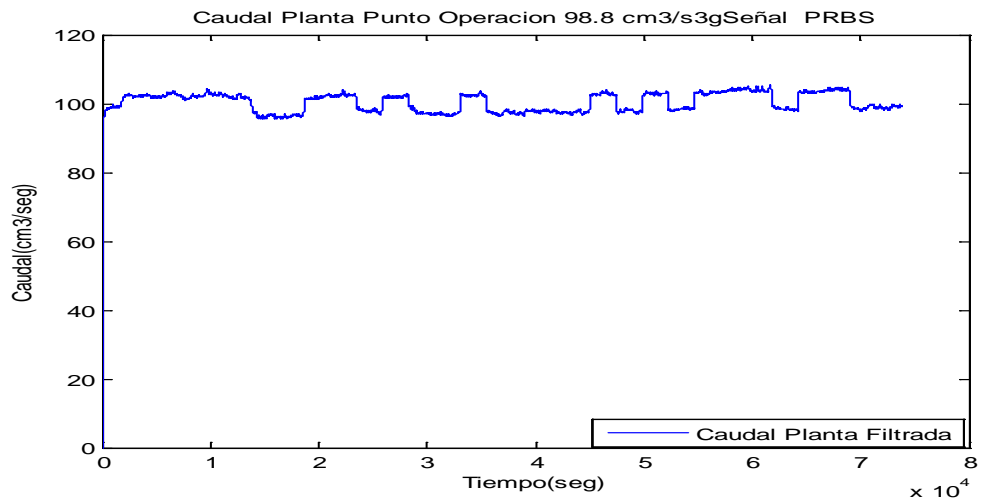
```
sys=tf(1,[50 1])
y_fit=lsim(sys,wo,t)
plot(t,[wo y_fit])

x_fit=lsim(sys,wi,t)
plot(t,[wi x_fit])
```

En las variables wo y wi se almacenan los datos de nivel y caudal respectivamente de la planta real, El filtro que se aplica tiene como función de transferencia  $1/(50s+1)$ , la respuesta de las señales se muestran en las figuras en el mismo plot de matlab se presentan los datos reales sin filtro y los datos con filtro.

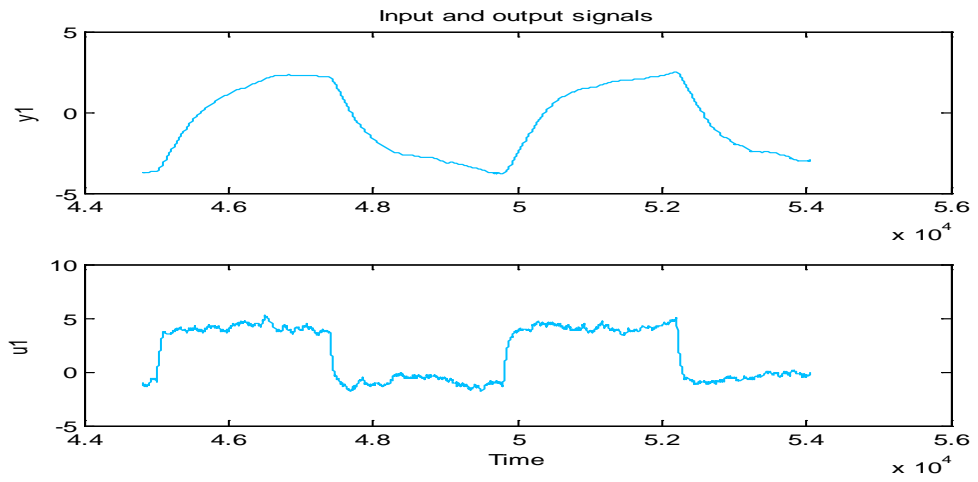


La señal de caudal una vez que se aplicó el filtro, será la que se utiliza en la identificación de la planta, se tomara como señal de entrada el caudal de la planta y como salida el nivel en el tanque, a estos valores se les resta los valores del punto de operación es decir los valores 26.5 cm al nivel y 98.8 cm<sup>3</sup>/s al caudal para obtener el valor AC de las dos señales, las respuesta a esta operación se muestra en las figuras

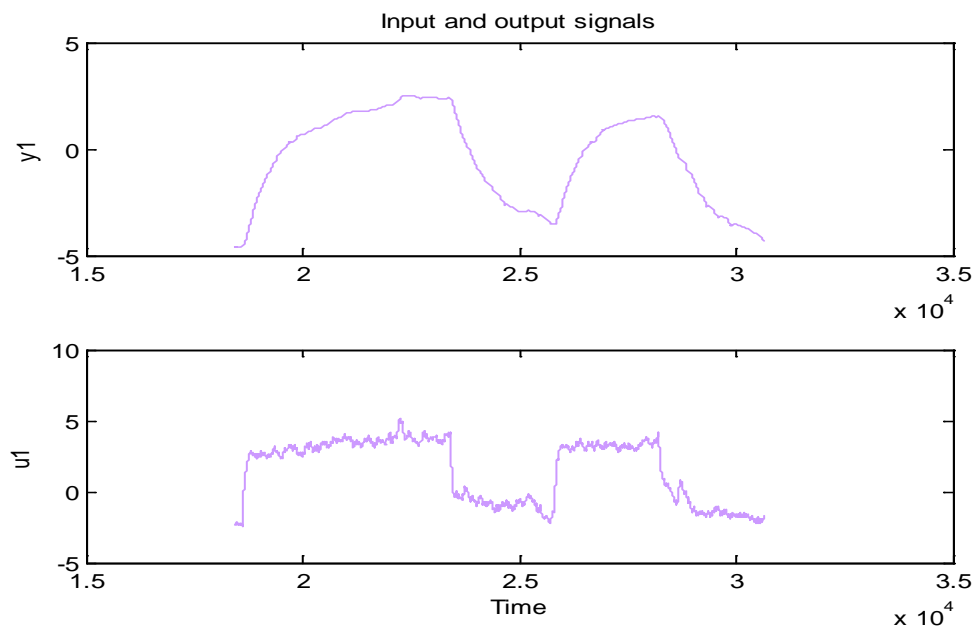


Luego de este tratamiento de los datos se utiliza el toolbox de matlab IDENT para la identificación en el que se importan los datos AC de nivel y caudal, de estos datos se ha seleccionado un tramo para la identificación y otro tramo para la validación como se muestra a continuación

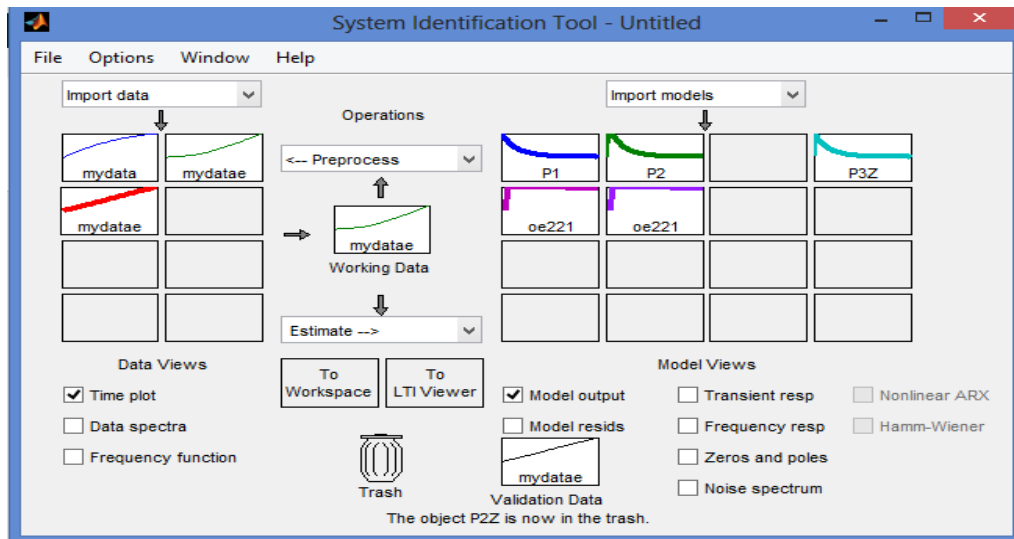
### Tramo para identificar



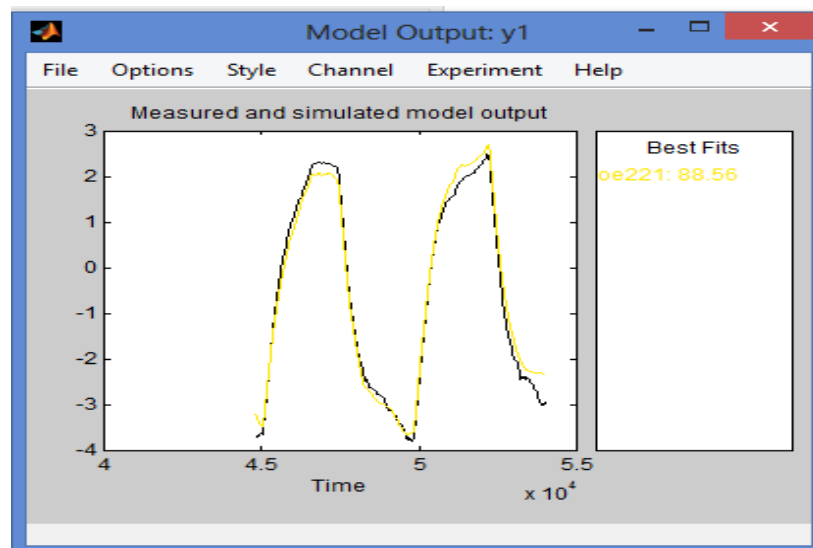
### Tramo para validar



Se ha utilizado varios modelos para realizar la aproximación de la planta en la figura se muestran los modelos..



De todos los modelos utilizados para la identificación los mejores modelos se presentan en la figura



Se exporta al workspace el modelo oe221 y se obtiene la siguiente función de transferencia:

Modelo en workspace

Modelo en workspace

>> tf(oe221)

$$\frac{0.003885 z^{-1} - 0.003884 z^{-2}}{1 - 1.997 z^{-1} + 0.9968 z^{-2}}$$

Si se transforma a sistema continuo se tiene:

```
>> sys3=tf(d2c(oe221))
```

$$\frac{0.001945 s + 4.273e-08}{s^2 + 0.001606 s + 1.658e-07}$$

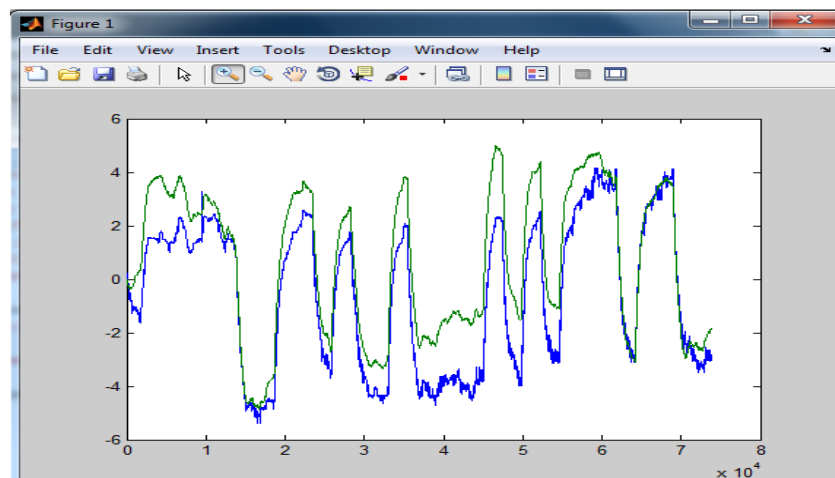
Al presentar en término de polos y zeros se tiene:

$$\frac{0.0019453 (s+2.196e-05)}{(s+0.001495) (s+0.0001109)}$$

Como se puede observar la planta es estable todos sus ceros y polos se encuentran del lado derecho del plano s

En la trayectoria de las raíces se observa que el modelo tiene un polo del lado derecho del plano s

Se aplicó los datos reales de caudal con los cuales se realizó la identificación y los resultados se muestran en la figura



En la figura se puede apreciar la señal de la altura vs el tiempo se ha colocado en el mismo plot el valor real de la planta y la simulación con el modelo identificado colocando en la simulación el valor real que a tomado la planta como entrada la señal de color verde corresponde a la respuesta del modelo y la de color verde corresponde a la señal real como se puede apreciar que la respuesta del modelo tiene valores aceptables.

### **Identificación del Modelo Matemático de la Función de Transferencia Para el Punto de Operación 29.8 cm**

Para determinar el modelo matemático por identificación del punto de operación 29.8 cm de nivel se necesita que la planta genere un caudal de 102.8 cm<sup>3</sup>/s en la bomba se realizó el mismo procedimiento de la sección 4.2 de identificación para estos se configuró la señal PRBS con los siguientes datos

te=1800

tm=2 seg

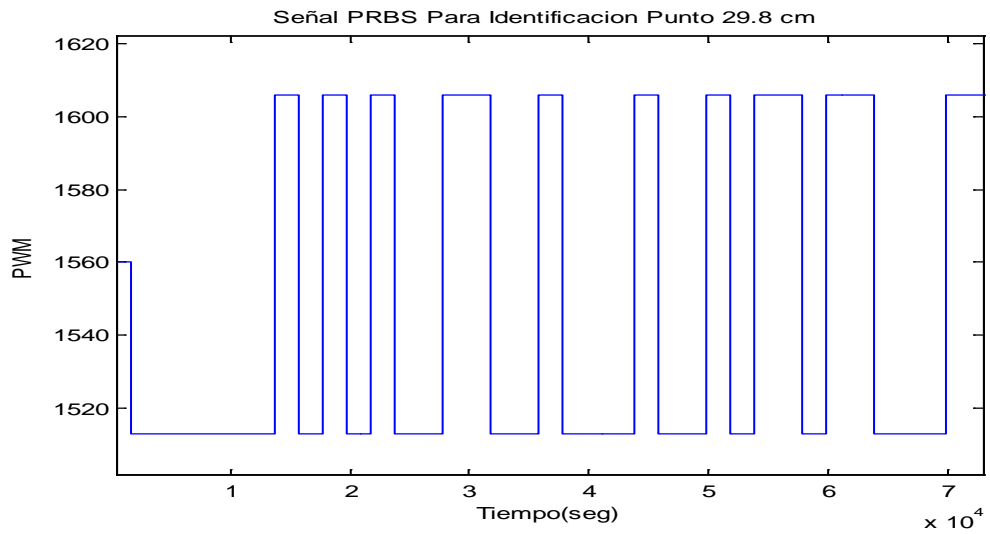
ts=71900

re=1560

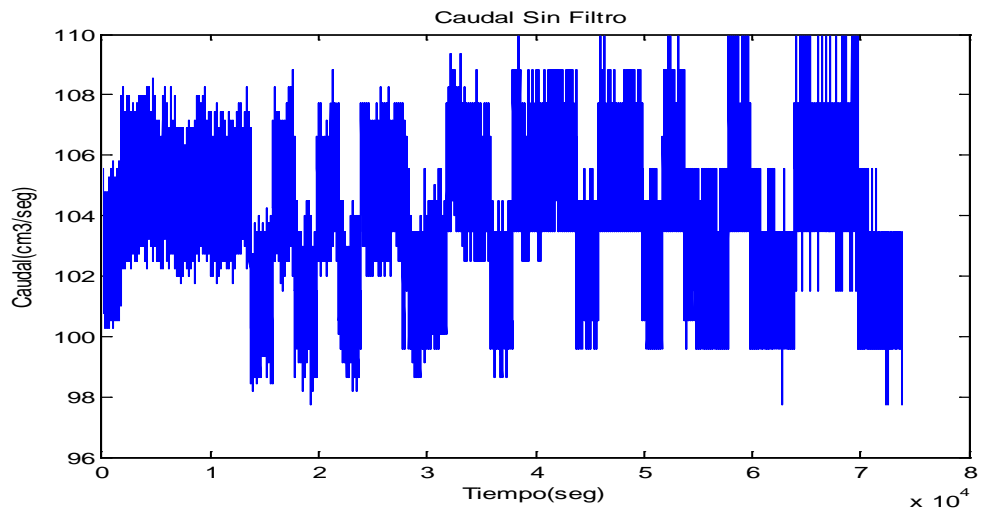
umax=3%

umin=3%

Con estos datos la señal PRBS generada es la que se muestra en la figura:

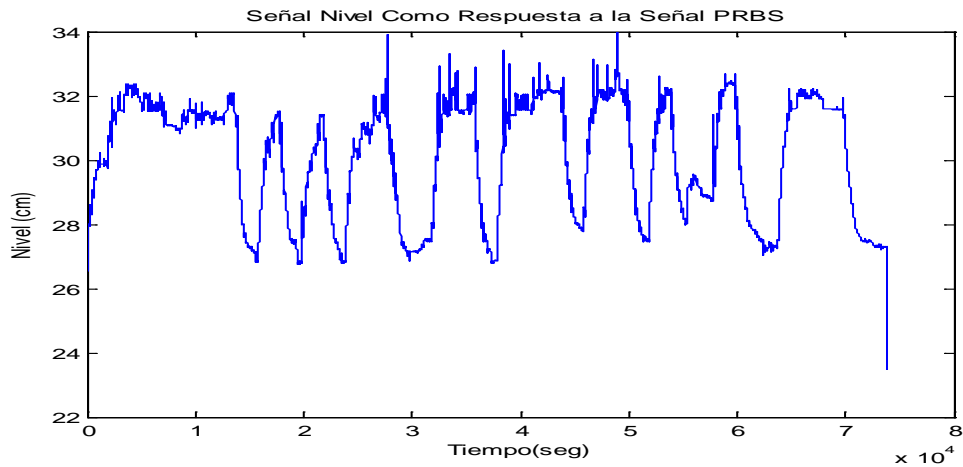


Con este valor de PWM se genera la señal de caudal real en la bomba que se muestra en la figura



La señal de nivel real en el tanque es la que se muestra en la figura



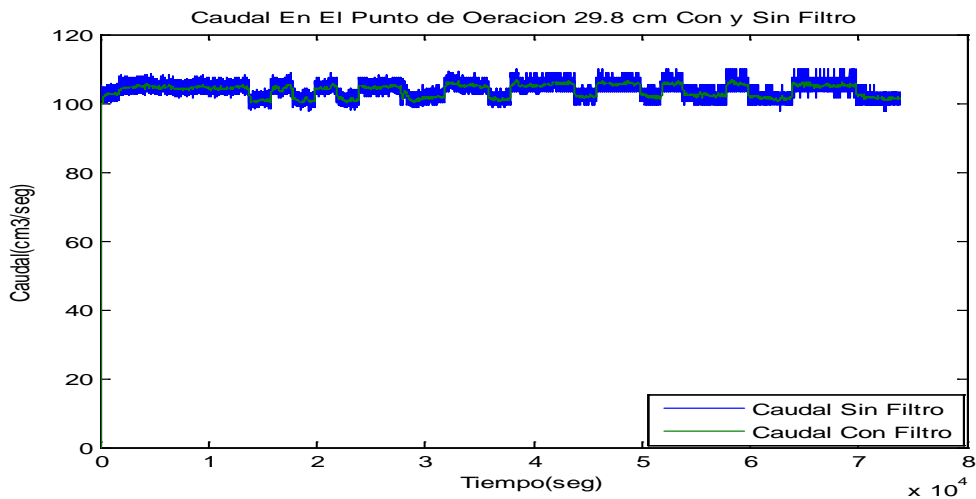
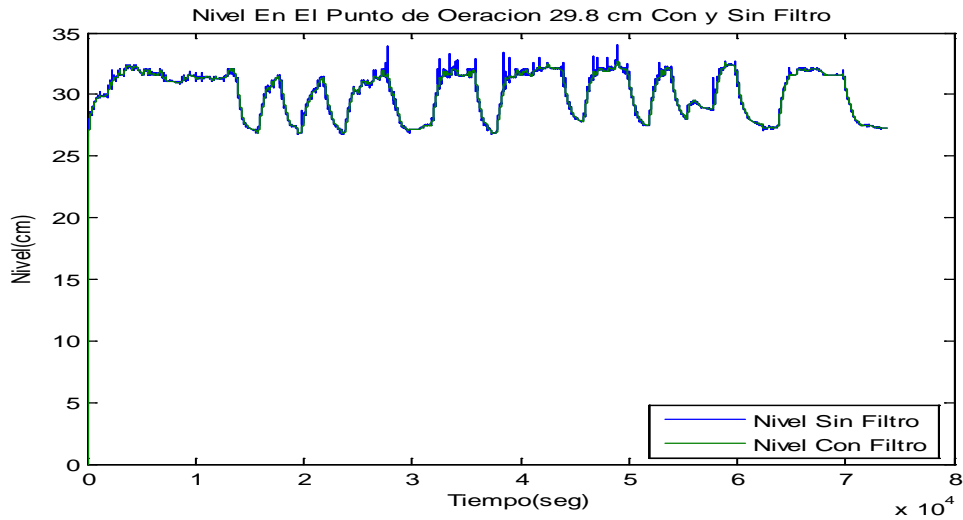


La señal de caudal y nivel real tiene la presencia de un ruido por lo que se le aplica un filtro a los datos, las líneas de código que permiten realizar el filtrado de las mismas en código de matlab es:

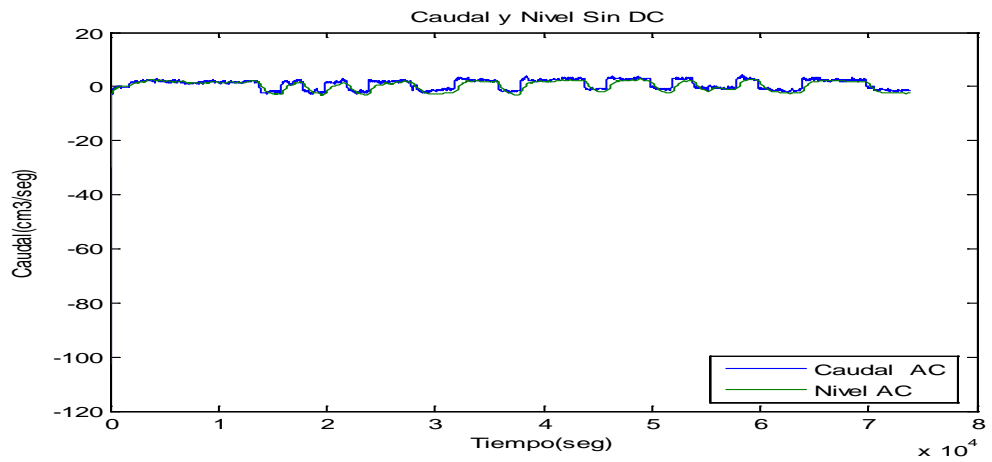
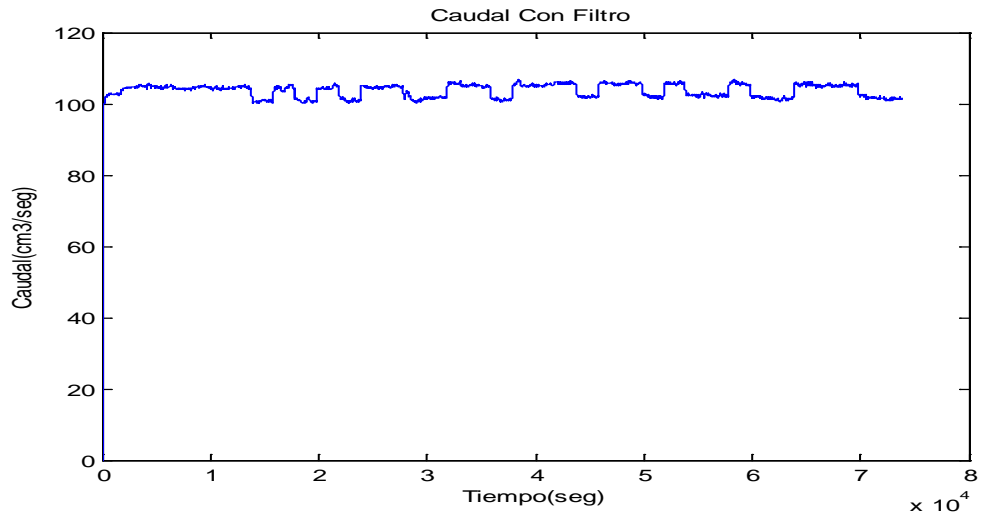
```
sys=tf(1,[50 1])
y_fit=lsim(sys,wo,t)
plot(t,[wo y_fit])

x_fit=lsim(sys,wi,t)
plot(t,[wi x_fit])
```

En las variables wo y wi se almacenan los datos de nivel y caudal respectivamente de la planta real, El filtro que se aplica tiene como función de transferencia  $1/(50s+1)$ , la respuesta de las señales se muestran en las figuras en el mismo plot de matlab se presentan los datos reales sin filtro y los datos con filtro.

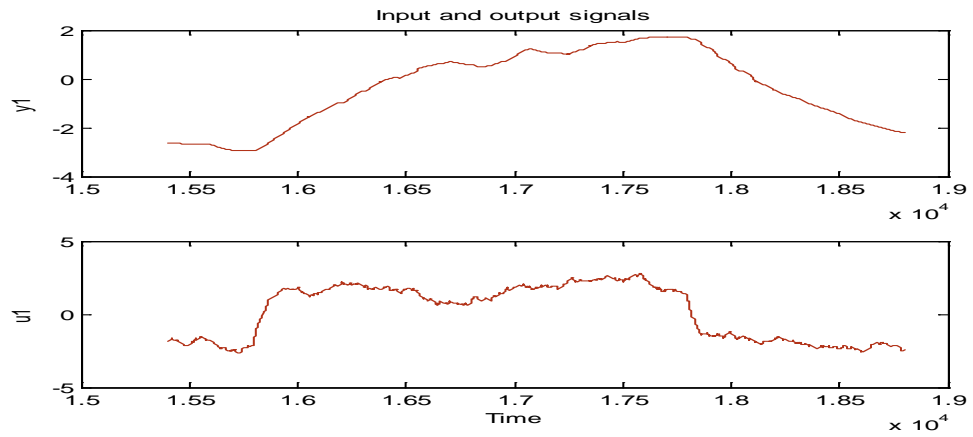


La señal de caudal un vez que se aplicó el filtro, será la que se utiliza en la identificación de la planta, se tomara como señal de entrada el caudal de la planta y como salida el nivel en el tanque, a estos valores se les resta los valores del punto de operación es decir los valores 29.8 cm al nivel y 102.8  $\text{cm}^3/\text{s}$  al caudal para obtener el valor AC de las dos señales, las respuesta a esta operación se muestra en las figuras siguientes.

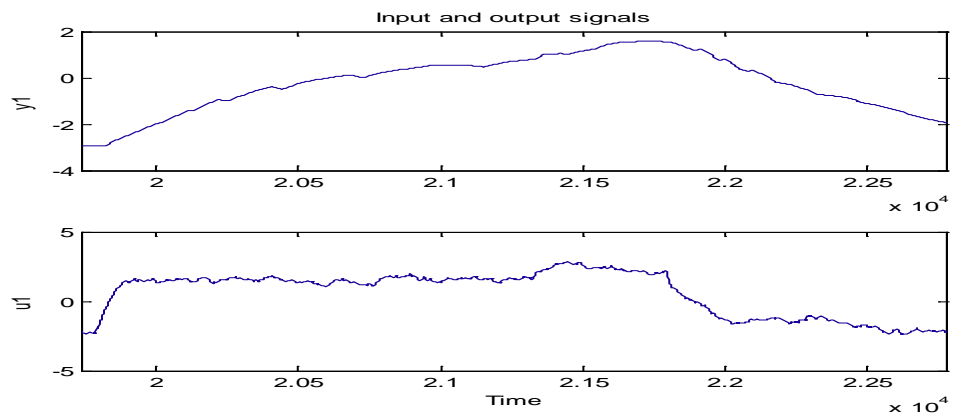


Luego de este tratamiento de los datos se utiliza el toolbox de matlab IDENT para la identificación en el que se importan los datos AC de nivel y caudal, de estos datos se ha seleccionado un tramo para la identificación y otro tramo para la validación

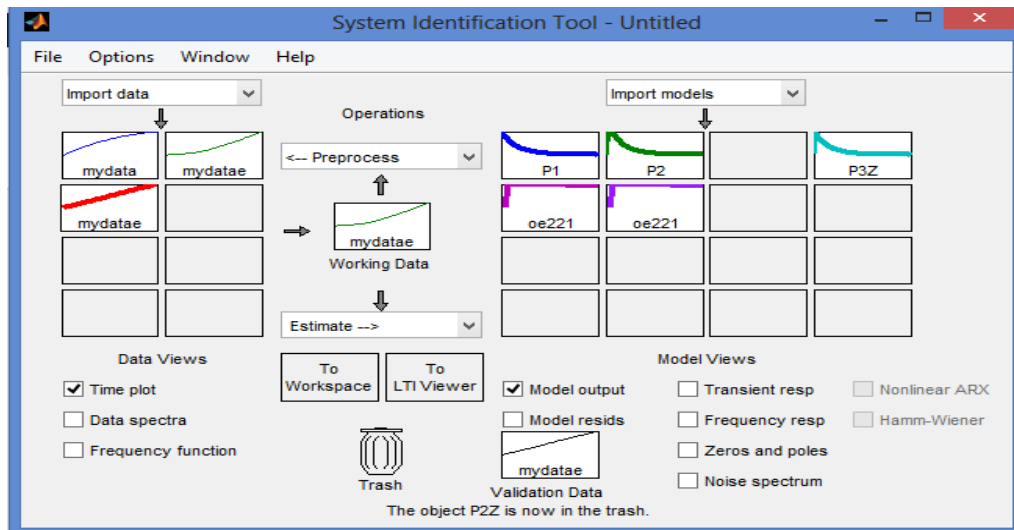
### Tramo para identificar



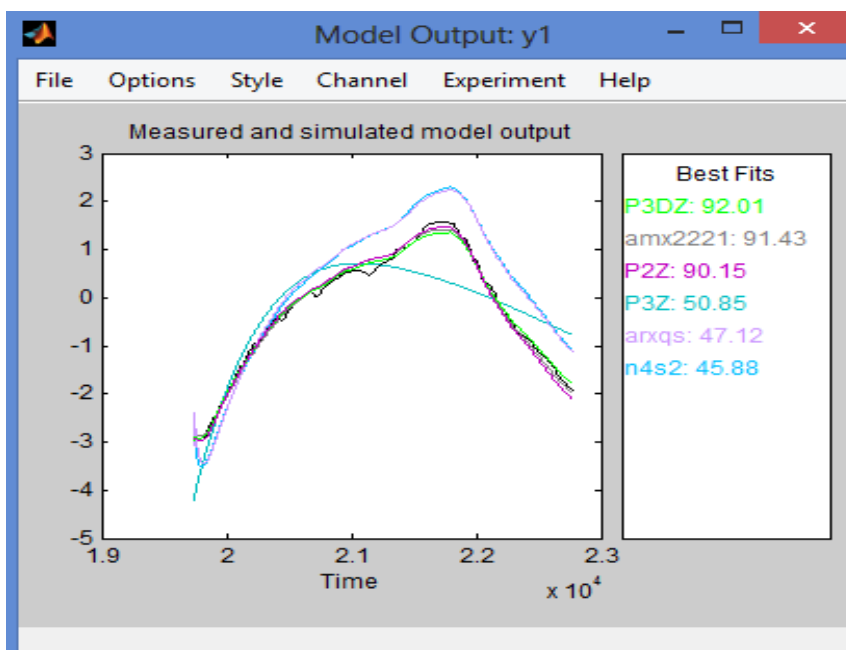
### Tramo para validar



Se ha utilizado varios modelos para realizar la aproximación de la planta en la figura se muestran los modelos..



De todos los modelos utilizados para la identificación los mejores modelos se presentan en la figura



Se exporta al workspace el modelo oe2221 y se obtiene la siguiente función de transferencia:

Modelo en workspace

```
>> zpk(P3DZ)
```

ans =

From input "u1" to output "y1":

$$\exp(-2.9*s) * \frac{1788.5 s}{(s+1e06) (s+0.001013) (s+0.0006608)}$$

Name: P3DZ

Modelo amx2221 la eficiencia es de 91.43% su función de transferencia es:

```
>> sys3=tf(d2c(amx2221))
```

sys3 =

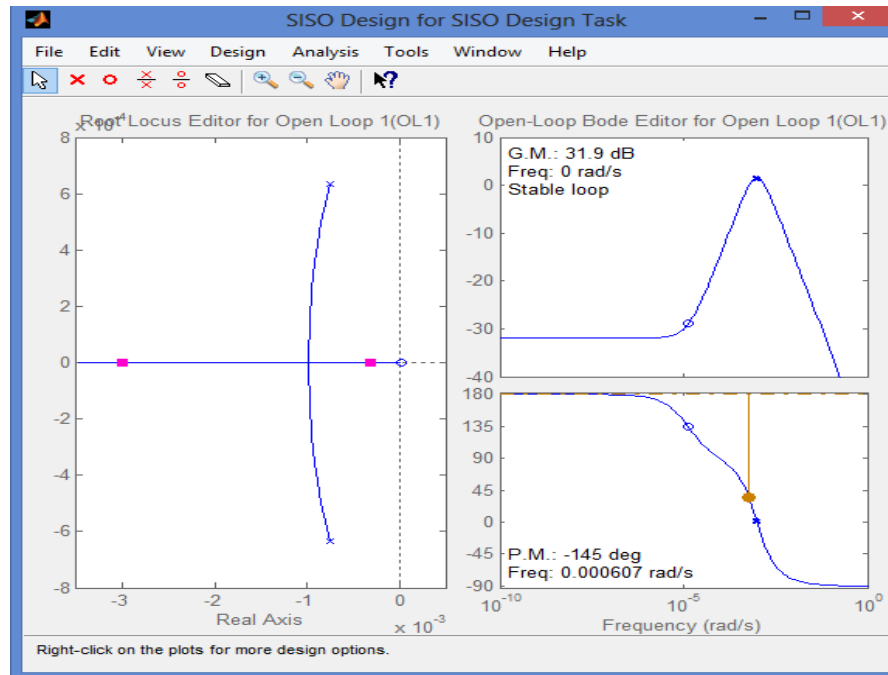
From input "u1" to output "y1":

$$\frac{0.001813 s - 2.464e-08}{s^2 + 0.001514 s + 9.743e-07}$$

Continuous – time transfer function.

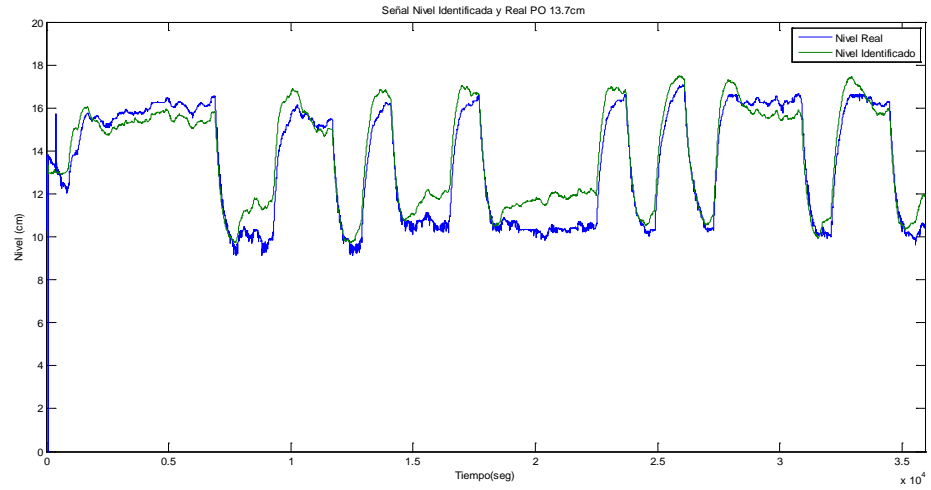
La trayectoria de sus raíces es:

sisotool(sys3)



En la trayectoria de las raíces se observa que el modelo tiene un polo del lado derecho del plano  $s$

Se aplicó los datos reales de caudal con los cuales se realizó la identificación y los resultados se muestran en la figura.

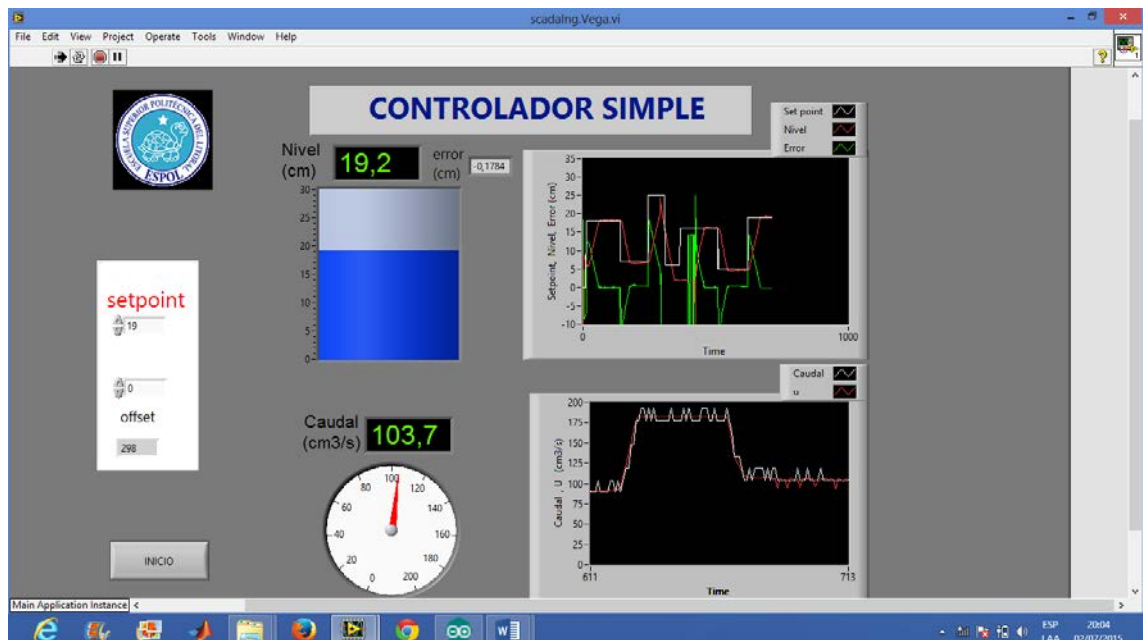
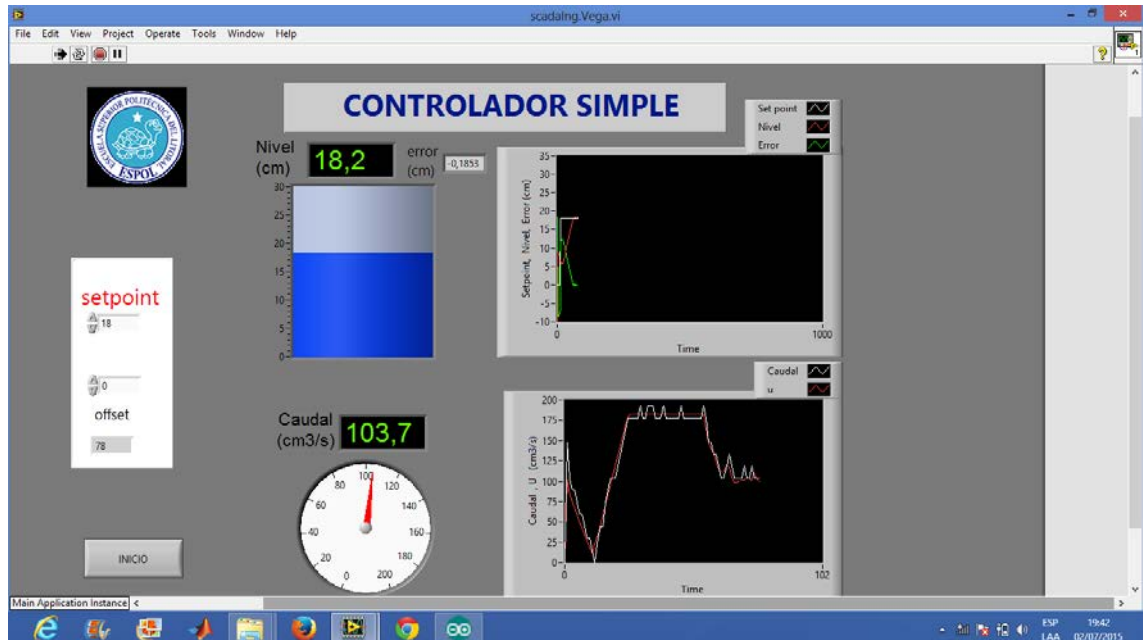


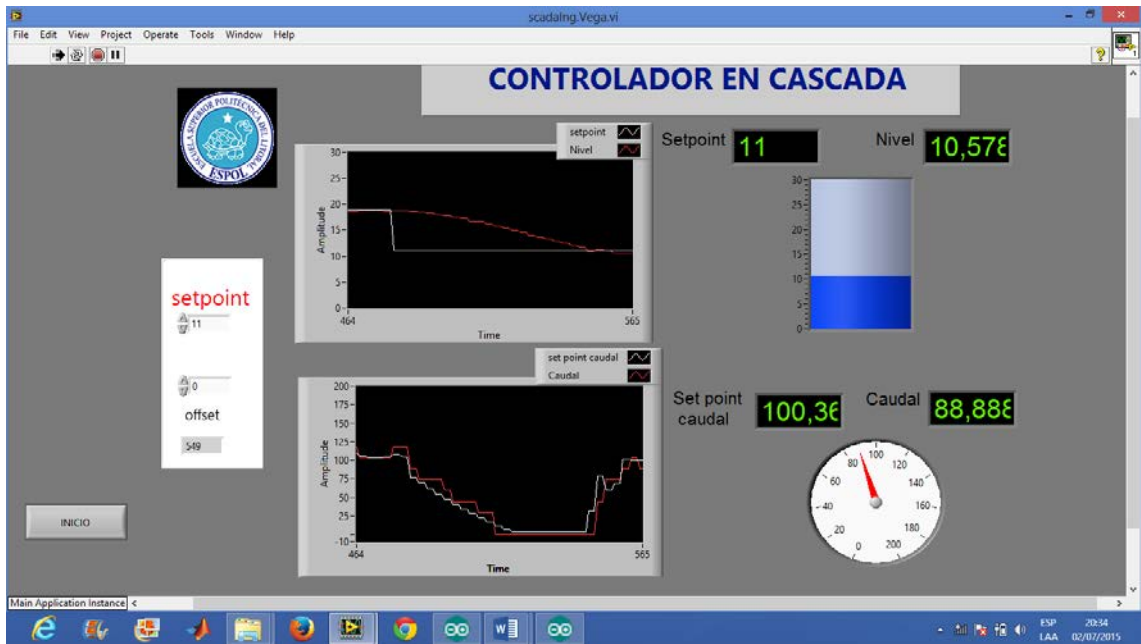
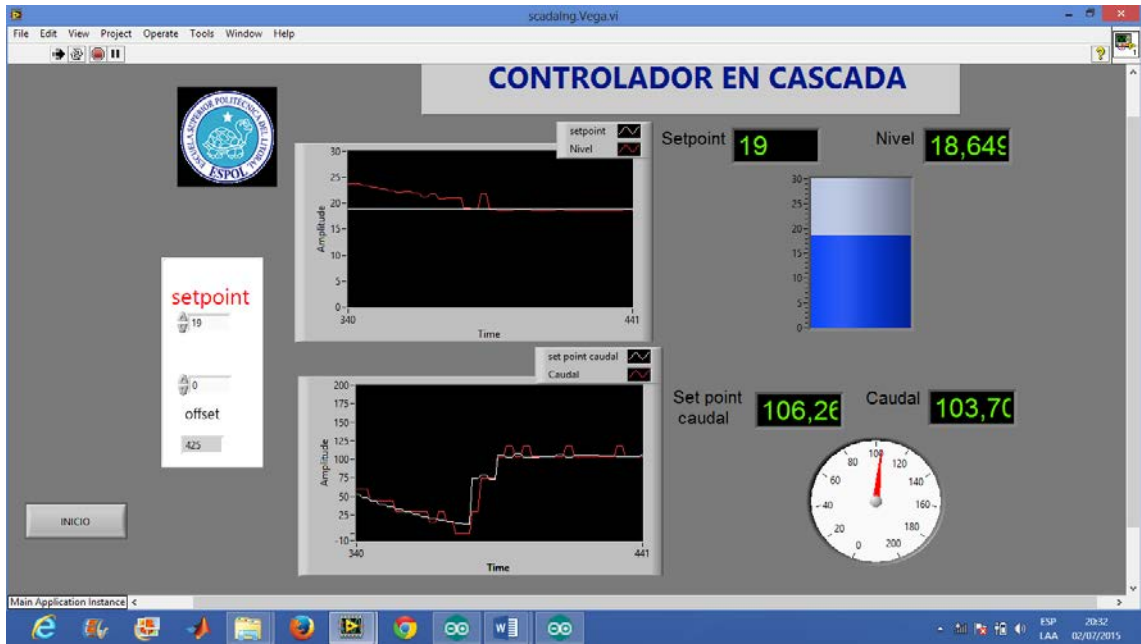
En la figura se puede apreciar que a pesar de tener una buena aproximación en el modelamiento del modelo cuando se realiza la simulación con todos los datos reales de la identificación el modelo tiene un error significativo en el seguimiento de la señal.

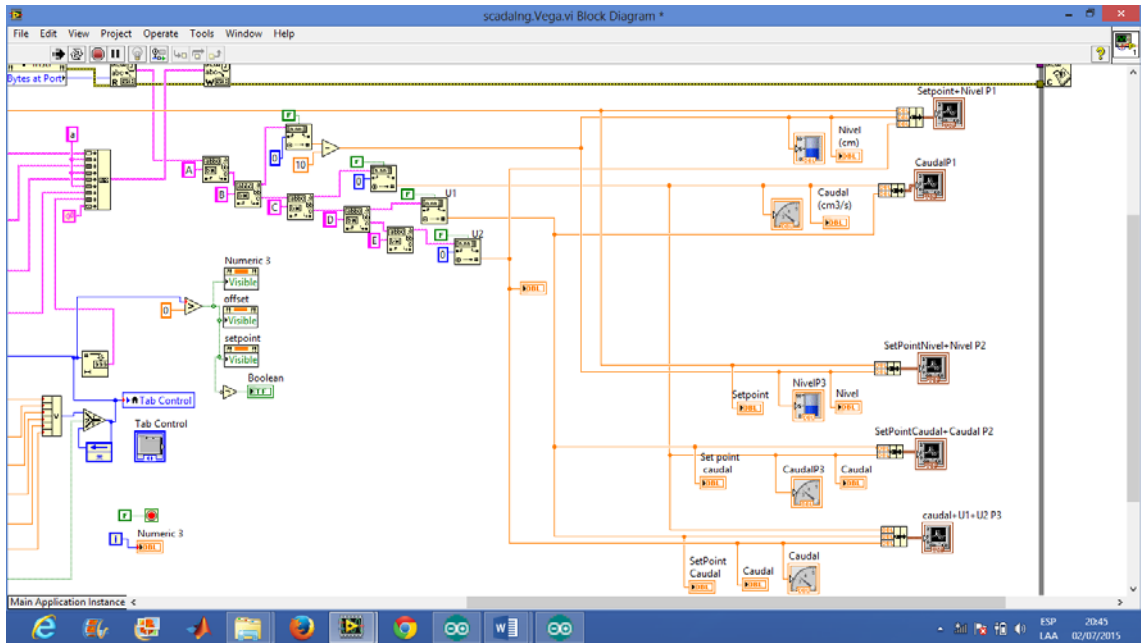
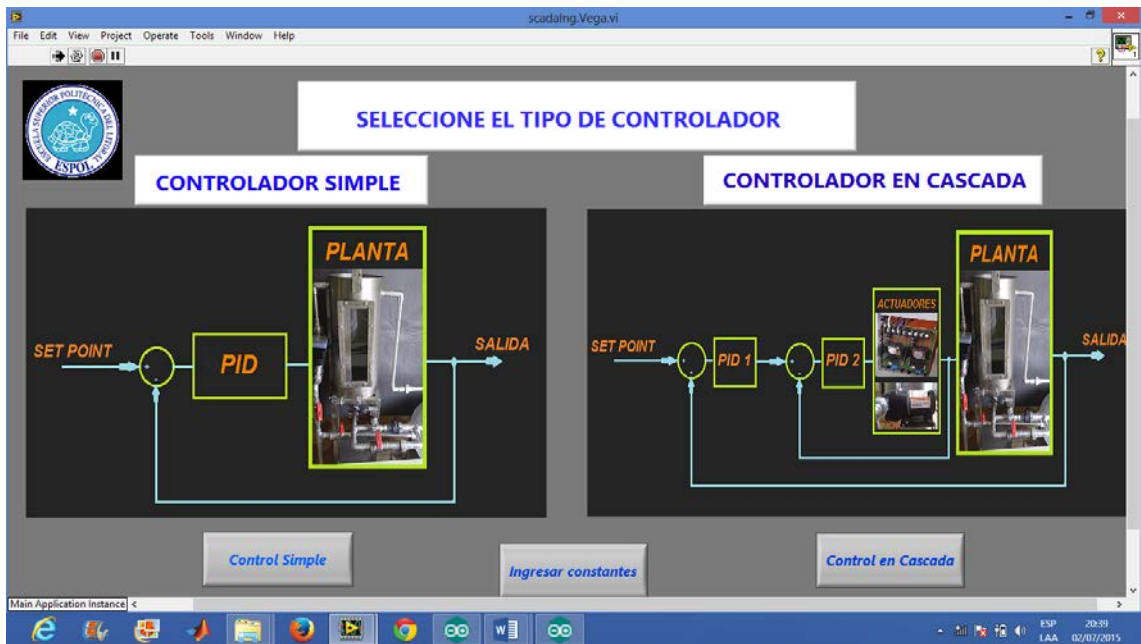


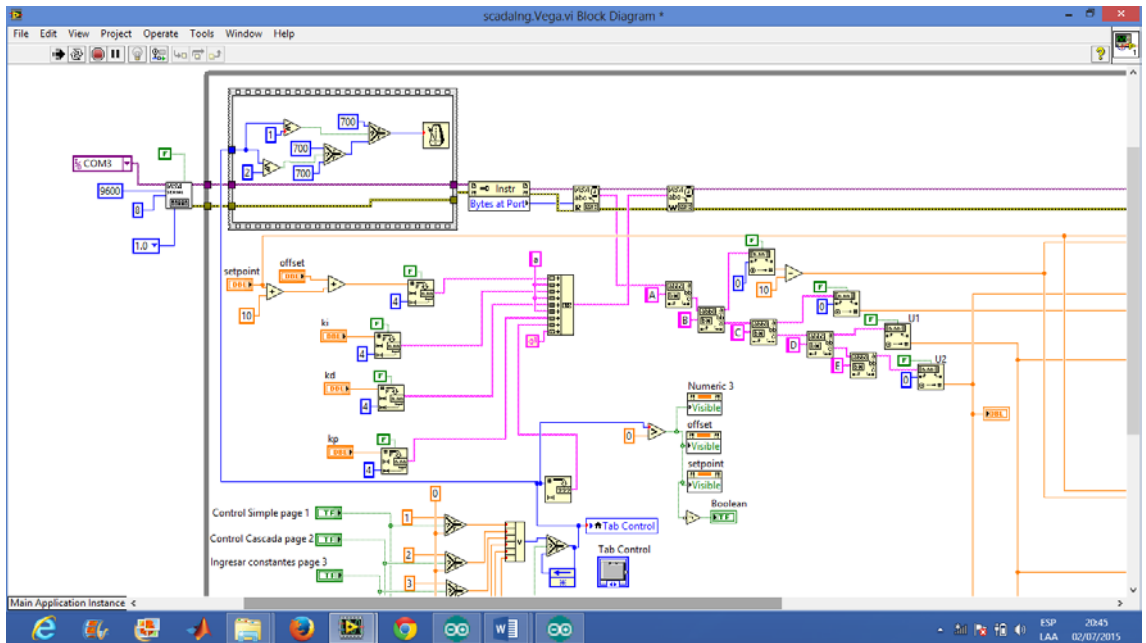
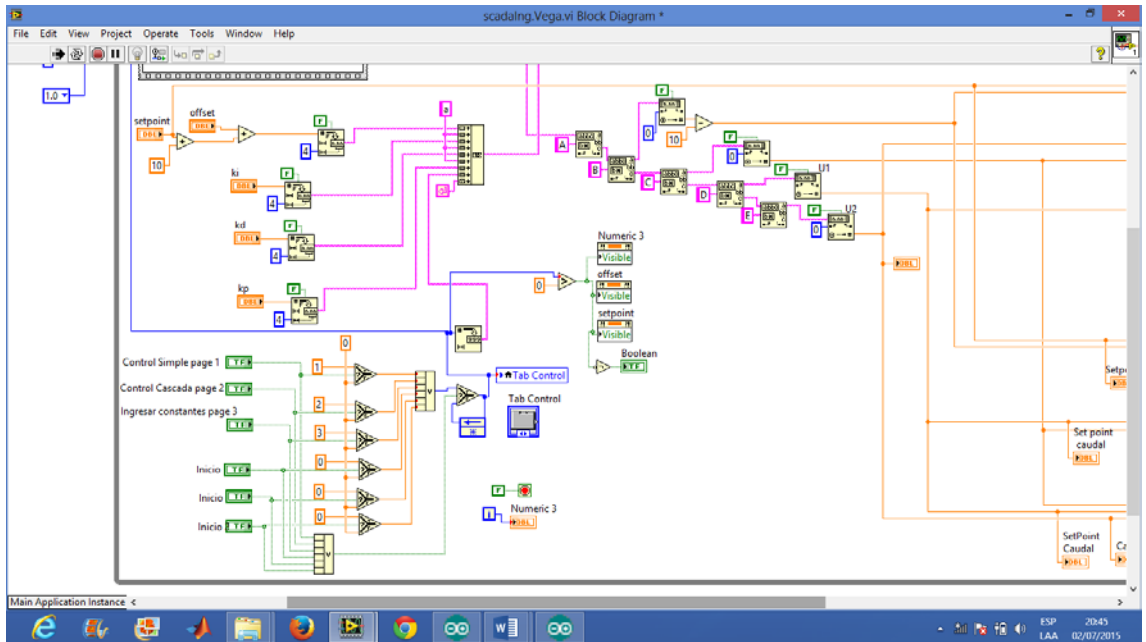
# ANEXO 21

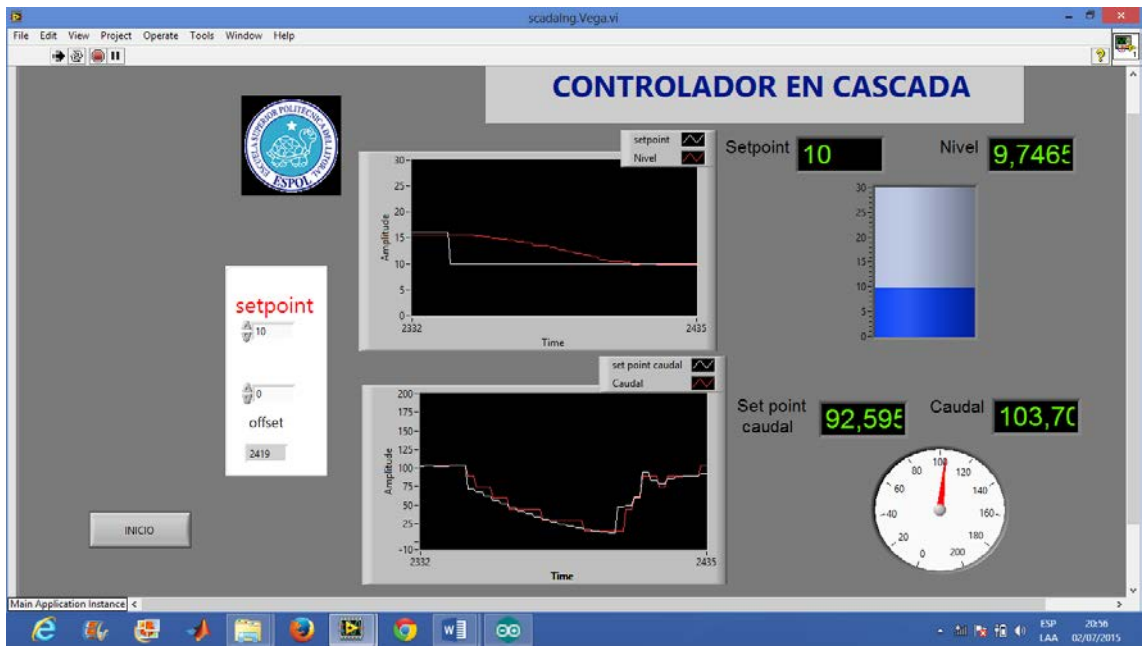
## INTERFACE DEL USUARIO











## ANEXO 22

### RESULTADOS DEL ERROR PROMEDIO

Error Promedio entre Planta Real Modelo Identificado y Modelo Ecuaciones Físicas Punto Operación 13.7cm					
Planta Real	Planta Identificada	Planta Ecuaciones Físicas	Error de Planta Identificada	Error Planta Ecuaciones Físicas	
Nivel Promedio(cm)	Nivelel Promedio(cm)	Nimevel Promedio(cm)	Porcentaje	Porcentaje	
16,5	15,2	15,3	7,878787879	7,272727273	
17	16,5	15,8	2,941176471	7,058823529	
17,5	15,8	16,4	9,714285714	6,285714286	
16,7	15,3	15,8	8,383233533	5,389221557	
Error Pormedio			7,229370899	6,501621661	
Error Promedio entre Planta Real Modelo Identificado y Modelo Ecuaciones Físicas Punto Operación 26,5cm					
Planta Real	Planta Identificada	Planta Ecuaciones Físicas	Error de Planta Identificada	Error Planta Ecuaciones Físicas	
Nivel Promedio(cm)	Nimevel Promedio(cm)	Nimevel Promedio(cm)	Porcentaje	Porcentaje	
26	27	27,2	3,846153846	4,615384615	
28	28	27,8	0	0,714285714	
29	28,5	28,8	1,724137931	0,689655172	
23	22,8	22,9	0,869565217	0,434782609	
Error Pormedio			1,609964249	1,613527028	
Error Promedio entre Planta Real Modelo Identificado y Modelo Ecuaciones Físicas Punto Operación 29,8cm					
Planta Real	Planta Identificada	Planta Ecuaciones Físicas	Error de Planta Identificada	Error Planta Ecuaciones Físicas	
Nivel Promedio(cm)	Nimevel Promedio(cm)	Nimevel Promedio(cm)	Porcentaje	Porcentaje	
28	28,2	28,8	0,714285714	2,857142857	
30,3	29,6	30	2,310231023	0,99009901	
31,5	30,4	31	3,492063492	1,587301587	
29	29,2	29,5	0,689655172	1,724137931	
Error Pormedio			1,80155885	1,789670346	

## ANEXO 23

### PRESUPUESTO DEL PROYECTO DE TESIS

ITEM	RUBRO	VALOR
1	<p>TANQUE DE ALMACENAMIENTO:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material en acero inoxidable 304 espesor 2mm</li><li>• Dimensiones:<ul style="list-style-type: none"><li>○ Diámetro: 760 mm</li><li>○ Altura: 600 mm</li></ul></li><li>• Tipo de fondo: plano</li><li>• Provisto de tapa abatible para facilitar la inspección y mantenimiento.</li><li>• Provisto de carga – descarga de producto así como purga central al fondo de ½” NPT.</li></ul>	\$ 580.00
2	<p>ESTRUCTURA SOPORTE:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Tubo cuadrado de acero inoxidable 304 de (50 x 2)mm</li><li>• Dimensiones:<ul style="list-style-type: none"><li>○ Largo: 1500 mm</li><li>○ Ancho: 1000 mm</li><li>○ Altura: 1200 mm</li></ul></li><li>• Tipo de fondo: plano</li></ul>	\$ 400.00
3	<p>TANQUE DE CONTROL:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material en acero inoxidable 304 espesor 2mm</li><li>• Dimensiones:<ul style="list-style-type: none"><li>○ Diámetro: 250 mm</li><li>○ Altura: 500 mm</li></ul></li><li>• Tipo de fondo: plano</li><li>• Provisto de tapa desmontable para facilitar la inspección y mantenimiento.</li><li>• Provisto de carga – descarga de producto así como purga central al fondo de ½” NPT.</li><li>• Provisto ducto de diámetro 1 ½” con</li></ul>	\$ 500.00

	<p>mall perforada para minimizar el efecto de inestabilidad en la superficie del líquido.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Provisto de estructura regulable para el montaje del sensor ultrasónico de nivel.</li> <li>• Provisto de mirilla vertical de (100 x 300)mm para facilitar la visibilidad del operador</li> <li>• Provisto de una regla metálica inoxidable para comparación visual del Punto de Operación seleccionado.</li> </ul>	
4	<p>BOMBA DE CONTROL</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Provisión de bomba marca flow jet de 30 l/min, de 12Vdc,</li> </ul>	\$ 180. <sup>00</sup>
5	<p>MEDIDOR DE CAUDAL</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo: turbina, modelo YF – S201</li> <li>• Material: plástico</li> <li>• Voltaje de operación: (5 – 24) Vdc</li> <li>• Tipo de señal de salida: pulsos</li> </ul>	\$ 70. <sup>00</sup>
6	<p>SENSOR DE NIVEL</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo: ultrasónico</li> <li>• Rango de medición: 1000 mm</li> <li>• Voltaje de operación: (5 – 24) Vdc</li> <li>• Tipo de señal de salida: pulsos</li> </ul>	\$ 40. <sup>00</sup>
7	<p>VALVULA SOLENOIDE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo: Bola paso total</li> <li>• Voltaje de operación: 220 Vac</li> <li>• Material: Acero inoxidable</li> </ul>	\$ 220. <sup>00</sup>
8	<p>TABLERO DE CONTROL:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tarjeta arduino mega 256</li> <li>• PLC Logo</li> <li>• Breacker de 2 polos 20 amperios</li> <li>• Breacker de 2 polos 12 amperios</li> <li>• 3 Breackers de 1 polo 2 amperios</li> <li>• Tarjeta de control y potencia de voltaje para la bomba</li> <li>• 1 contactor 110 Vac</li> </ul>	\$ 1'480. <sup>00</sup>

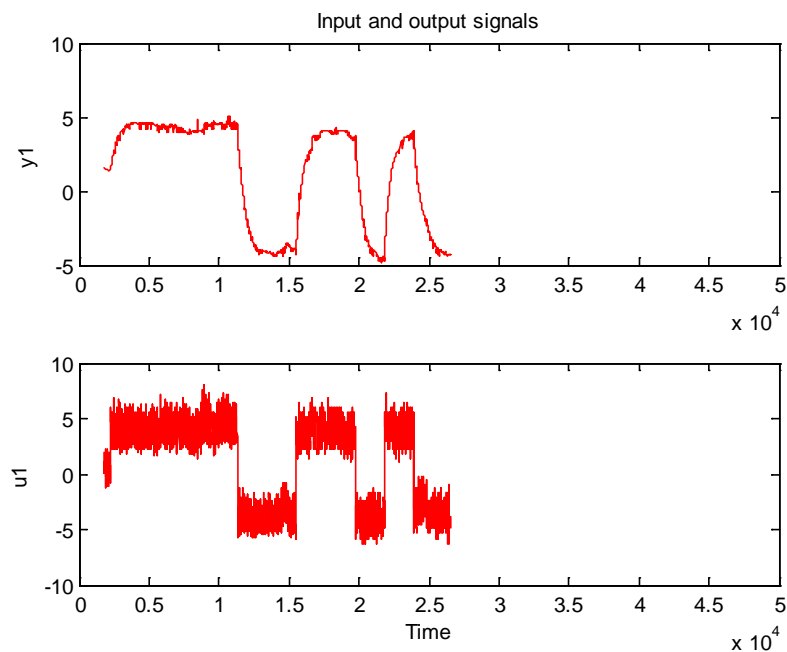


	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 controlador de nivel mediante electrodos</li> <li>• 2 Selectores</li> <li>• 2 Pulsadores NO</li> <li>• 2 Pulsadores NC</li> <li>• 1 Pulsador de Paro de emergencia tipo hongo</li> <li>• 1 fuente de 110 Vac – 5 Vdc</li> <li>• 1 fuente de 110 Vac – 12 Vdc</li> <li>• 1 fuente de 110 Vac – 220 Vac (válvula solenoide)</li> <li>• Gabinete metálico de (600 x 400 x 200) mm</li> </ul>	
9	<p>DESARROLLO DEL SCADA</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Software utilizado: Labview</li> </ul>	\$ 700. <sup>00</sup>
10	<p>SISTEMA HIDRAULICO:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubería y válvulas plásticas</li> <li>• Accesorios como codos tees nudos uniones reductores plásticos.</li> </ul>	\$ 120. <sup>00</sup>
TOTAL		\$ 4'920. <sup>00</sup>

## ANEXO 24

### IDENTIFICACIÓN DEL MODELO PARA UN PUNTO DE OPERACIÓN DE 17.5 cm

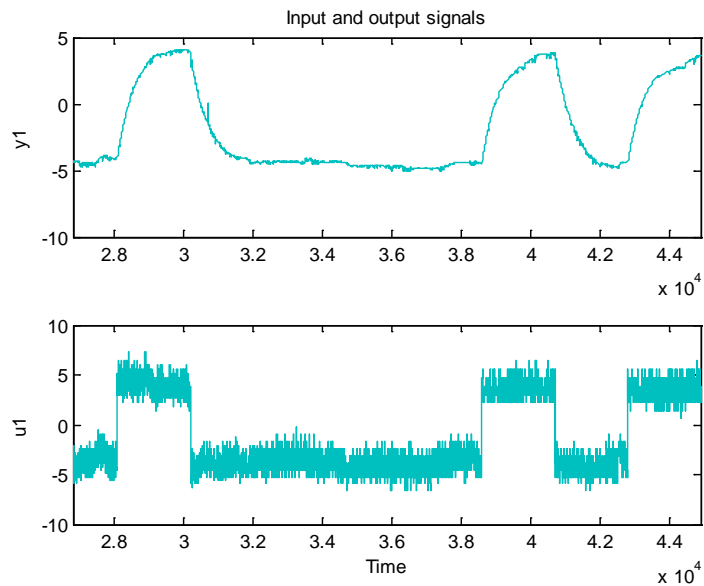
Para la identificación del modelo matemático de la planta se utilizó el toolbox de Matlab IDENT, en esta herramienta de Matlab primeramente se importan los datos desde el workspace y luego se debe seleccionar una parte para la identificación y otro la validación de los datos, la parte que se seleccionó para la identificación se muestran en la Figura que corresponde al nivel y caudal



Respuesta del sistema identificado para un P.O. de 17.5 cm

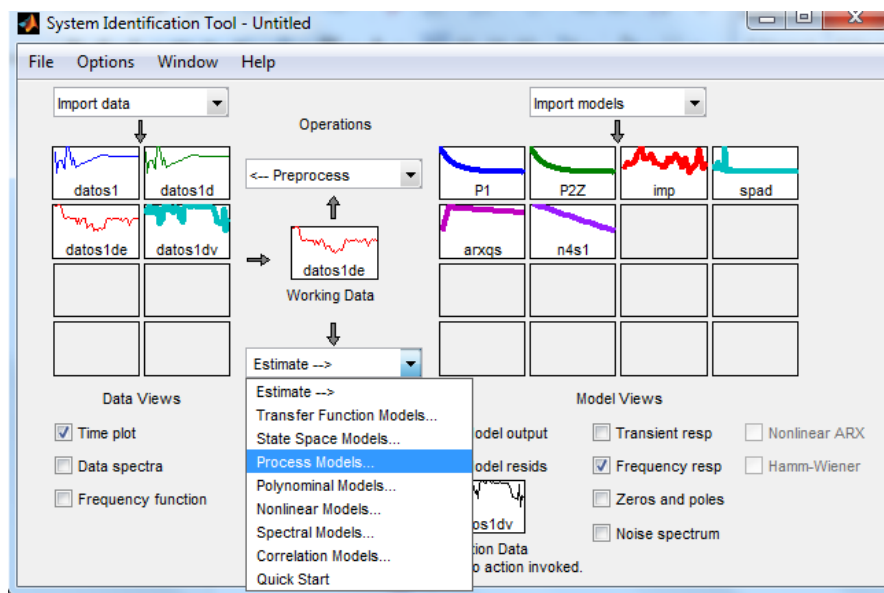
La parte seleccionada para la validación es la que se muestra en la figura

4.21



Selección de la señal de respuesta identificada validada.

Con estos datos se procedió a realizar la estimación utilizando varios modelos como se muestran en la Figura siguiente



Estimación del modelo utilizando Matlab

De todas la aproximaciones realizadas la mejor estimación la da el modelo P1 que es un polinomio de grado uno el cual da una eficiencia del 93.04 %

llevarlo este modelo al Workspace nos da la siguiente función de transferencia

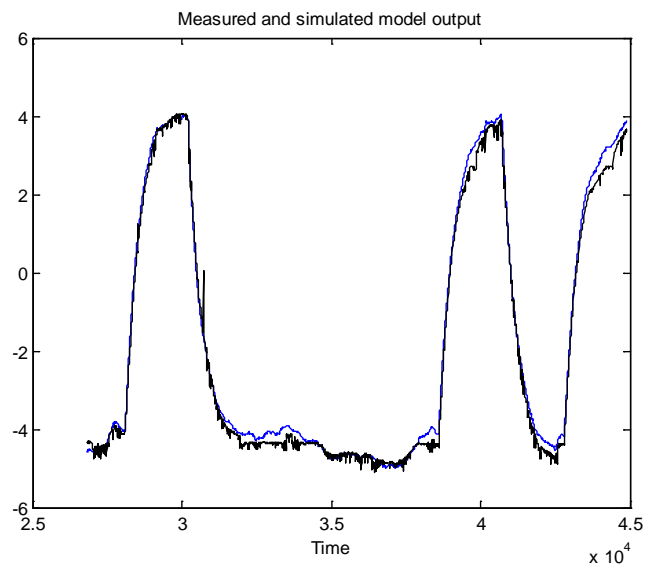
```
>> tf(P1)
```

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{1.108}{496.5 s + 1}$$

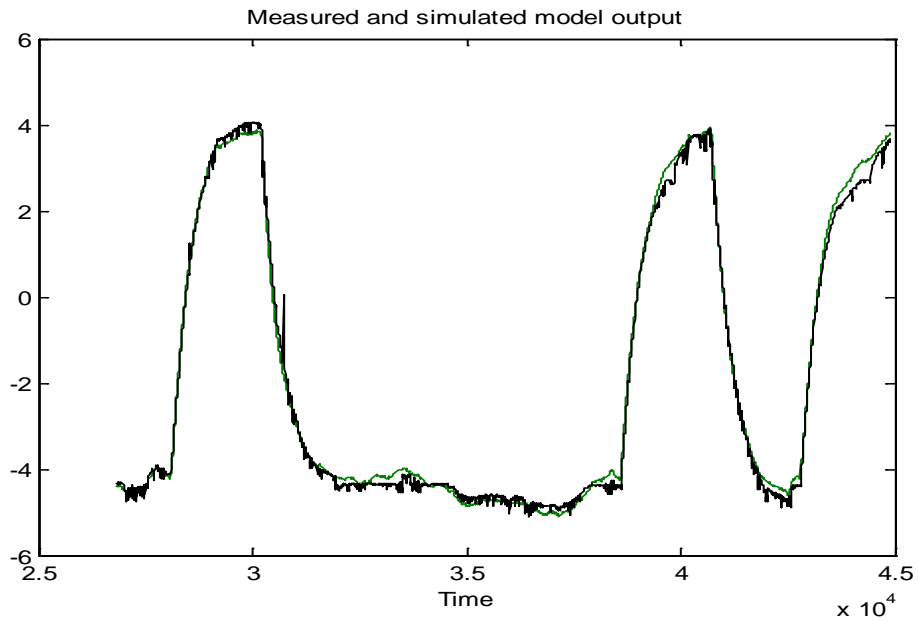
Name: P1

Continuous-time transfer function.



Estimación del modelo para un polinomio de grado 1

Otra aproximación muy buena es la de considerar el modelo con un cero y dos polos la cual da una eficiencia del 94.05 %, la señal estimada es aproximadamente igual a la señal real:



*Estimación del modelo para un polinomio de grado 1, añadiendo un cero y dos polos*

FUENTE: Los autores

```
>> tf(P2Z)
```

```
ans =
```

From input "u1" to output "y1":

$$\frac{6675 s + 1.136}{2.95e06 s^2 + 6573 s + 1}$$

Como se puede notar entre los dos mejores modelos hay una diferencia del 0.9% de diferencia; pero el modelo más fácil de tratar es el de grado uno con lo cual se selecciona el modelo de un solo polo.

## ANEXO 25

### IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL ESTIMADOR DE PARÁMETROS (NIVEL)

Con los datos de la Tabla 16 se implementa en simulink el controlador de ganancias programadas para esta planta, el diagrama de este controlador se muestra en la Figura, en donde en el estimador de parámetros se ha realizado la implementación del selector de ganancias dependiendo del setpoint (variable auxiliar) que se coloque en la simulación del controlador, dentro de este bloque hay tres sub bloques uno para la variable Kp otro para la variable Kd y el tercer bloque corresponde a Ki del control PID

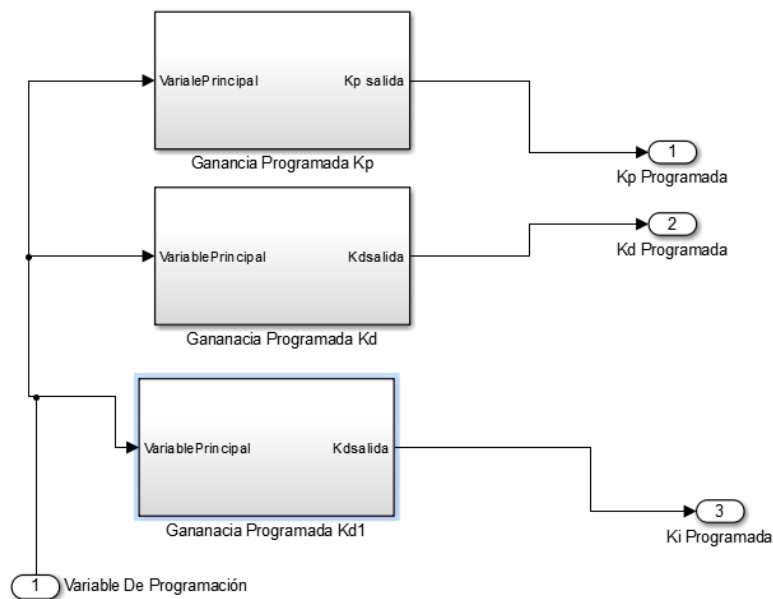


Diagrama de bloques con las constantes de ganancias programadas del controlador externo (nivel)

Dentro de los bloques ganancias programadas  $k_p$ ,  $K_d$  y  $k_i$  se han colocado los datos de la Tabla 16 y el elemento que seleccionara la constante es un switch como se muestra en las Figuras 5.23; 5.24 y 5.25

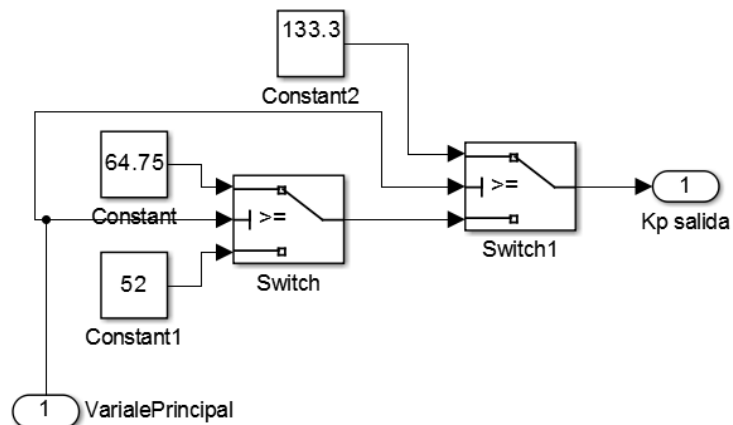


Diagrama de bloques con los switcheos de las constantes proporcionales ( $K_p$ ) programadas para las tres zonas de operación del controlador externo (nivel)

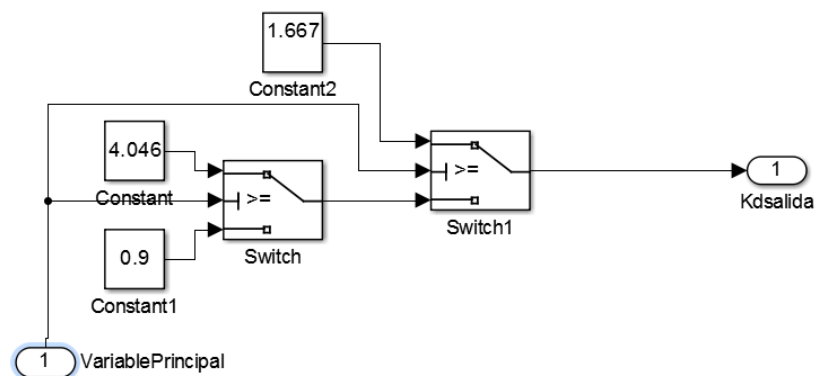


Diagrama de bloques con los switcheos de las constantes integrales ( $K_i$ ) programadas para las tres zonas de operación del controlador externo (nivel)

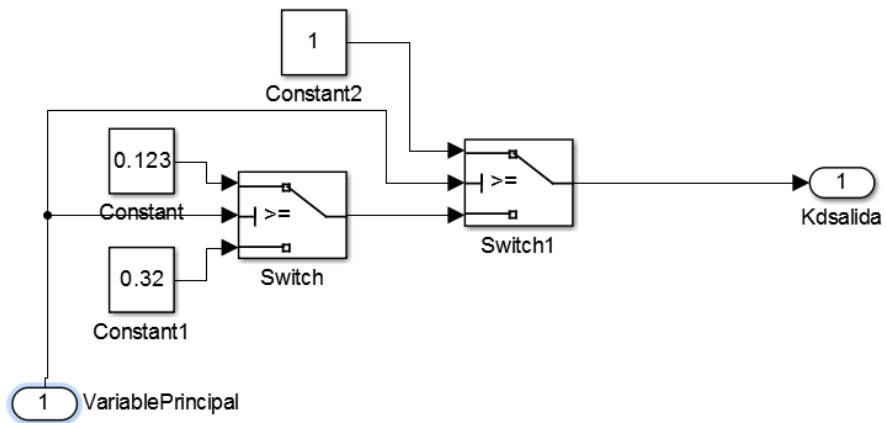


Diagrama de bloques con los switcheos de las constantes derivativas ( $K_d$ ) programadas para las tres zonas de operación del controlador externo (nivel)

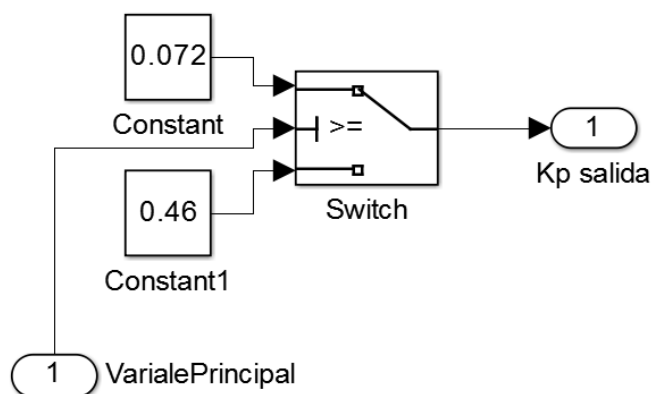


## ANEXO 26

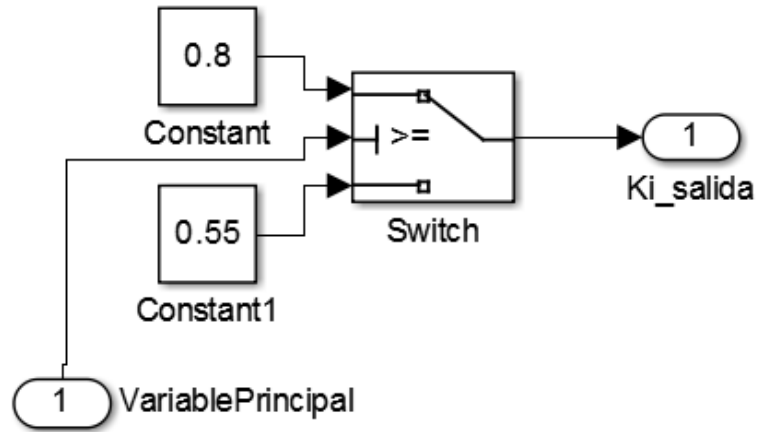
### IMPLEMENTACIÓN EN SIMULINK DEL ESTIMADOR DE PARÁMETROS (CAUDAL)

Como se muestra en la sección 5.1.1 y 5.2.1 se utiliza el caudal (u1) como variable auxiliar para la implementación de este controlador, entonces el caudal es el setpoint del lazo externo, con esta variable el controlador programa las variables a utilizar dependiendo de la zona de operación de la planta, en la sección 5.2.1 se describe los pasos que se deben realizar para el diseño del controlador de ganancias programadas de las cuales los pasos 1,2,3,4,5 se han desarrollado en la sección 5.1 los ítems 6,7,8 se desarrollan a continuación:

Los datos de la tabla 14 (ganancias  $k_p$ ,  $k_i$  del control PI) se utilizan en el bloque de programación de ganancias en simulink como se muestran en las Figuras siguientes.



Bloque de programacion de ganancias PROPORCIONALES de SIMIULINK



Bloque de programacion de ganancias INTEGRALES de SIMIULINK

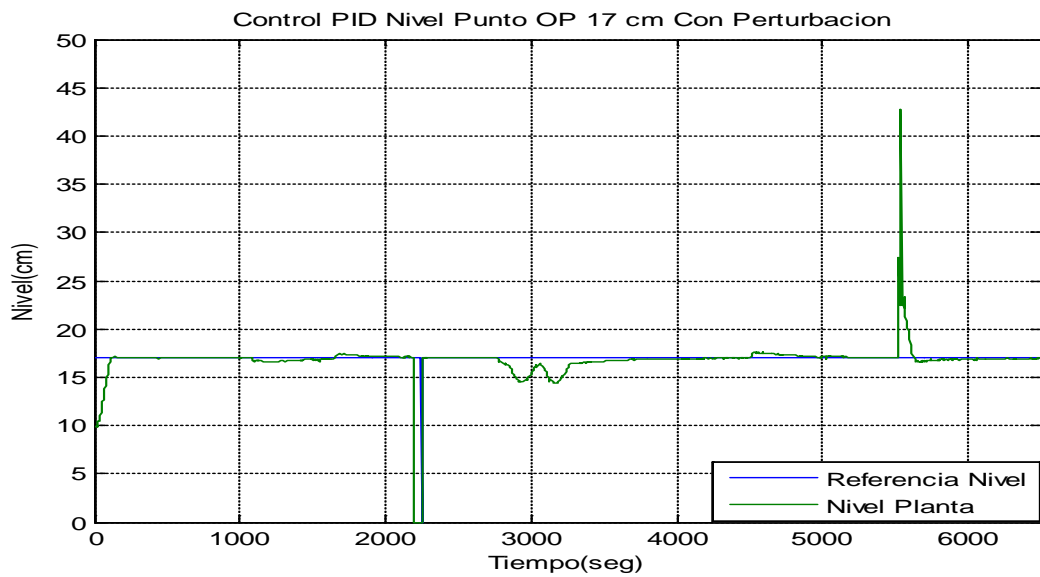
## **ANEXO 27**

### **PRUEBAS DE REGULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PID EN DISTINTOS PUNTOS DE OPERACIÓN**

#### **Prueba de Regulación Controlador PID Nivel en un Punto de Operación 17 Centímetro con Perturbación**

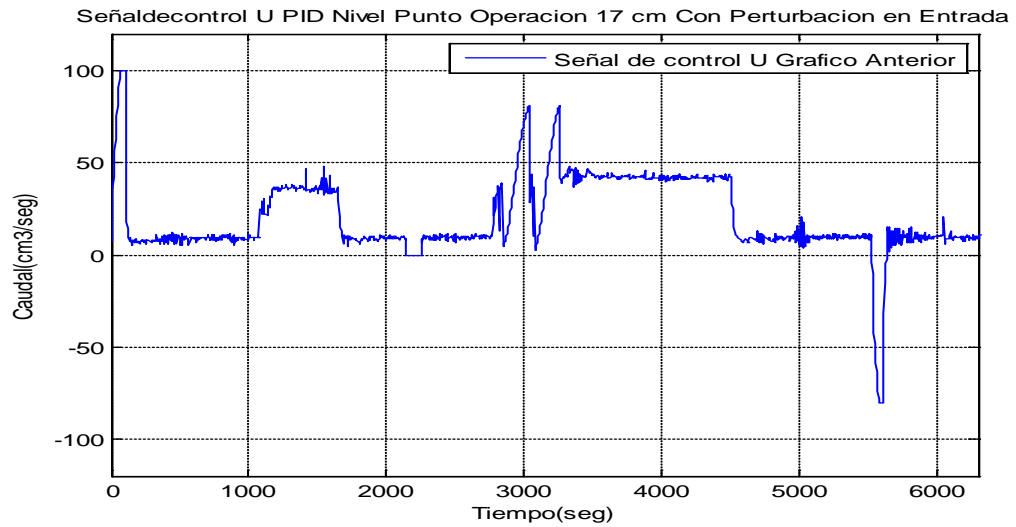
Se realizó prueba de funcionamiento del controlador PID de la variable nivel y se obtiene la respuesta de este controlador para el punto de operación 17 cm, en el gráfico se muestran dos señales: la referencia del nivel y el nivel en la planta, la señal que da el controlador PID ( $u$ ), se realizaron cinco perturbaciones, una a los 1100 s aproximadamente la cual se mantuvo hasta los 1700 s y el efecto que produce esta perturbación es casi despreciable como se observa en la Figura la segunda perturbación se produce a los 2200 s, la cual fue realizada por la pérdida de comunicación entre el SCADA y el controlador arduino, la tercera perturbación se la realiza con una apertura al 100% de la válvula adicional de la salida, esta provoca que el nivel del tanque sea oscilatorio por lo que se realiza el cierre de la misma y la planta recupera su punto de operación, la cuarta perturbación se la realiza a los 5000 s aproximadamente abriendo la válvula de salida en un porcentaje bajo y nuevamente esta perturbación provoca pequeño desvío de operación el cual puede ser considerado despreciable, finalmente se realiza la quinta perturbación a los 5500 segundos aproximadamente con el ingreso adicional de agua al tanque principal, pero de igual forma que en las perturbaciones

anteriores la planta recupera nuevamente su punto de trabajo, por tal motivo se puede concluir que el controlador PID de la variable nivel para el punto de operación de 17 cm cumple efectivamente la función de mantener en el punto de trabajo a la planta a pesar de la perturbaciones externa que puedan existir



*Respuesta de regulación para el controlador PID de nivel para un P.O. de 17 cm con perturbaciones*

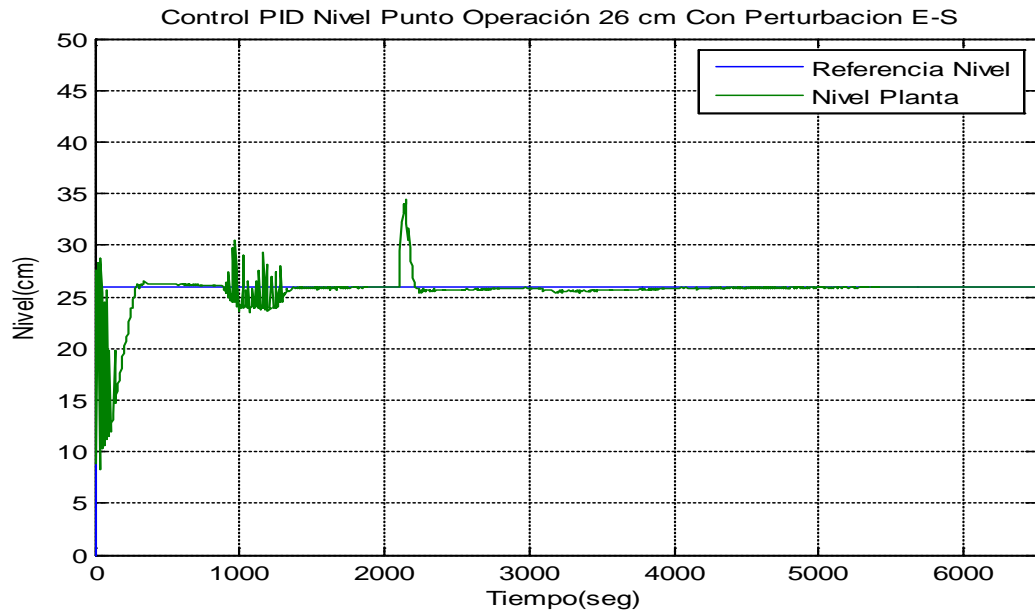
En la siguiente figura se muestra la señal de control para un controlador PID de nivel para un P.O. de 17 cm con perturbaciones



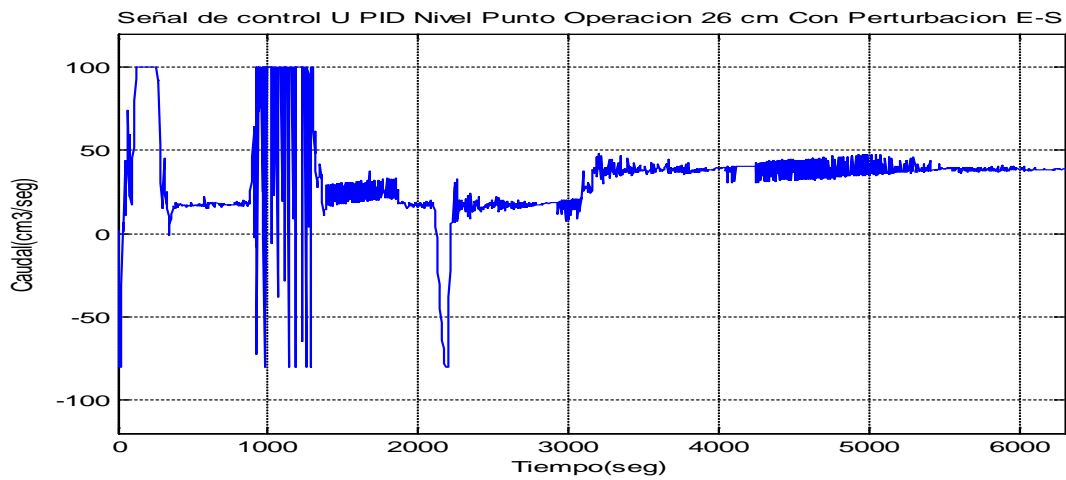
Señal de control del regulador PID de nivel para un P.O. de 17 cm con perturbaciones

### **Prueba de Regulación Controlador PID Nivel en un Punto de Operación 26 CM con Perturbación en la entrada y Salida de la Planta**

En las Figuras siguientes se muestran la salida de la planta y su referencia para un punto de operación de 26 cm. Para generar estas señales se ha colocado a la planta un controlador PID, al igual que en la prueba del punto de operación de 17 cm, este controlador mantiene el punto de trabajo a pesar de las perturbaciones que se realicen tanto en la entrada como en la salida de la planta, también se pueden observar los instante en que se han realizado las perturbaciones para este punto de prueba a través de los incrementos o decrementos que tiene esta variable.



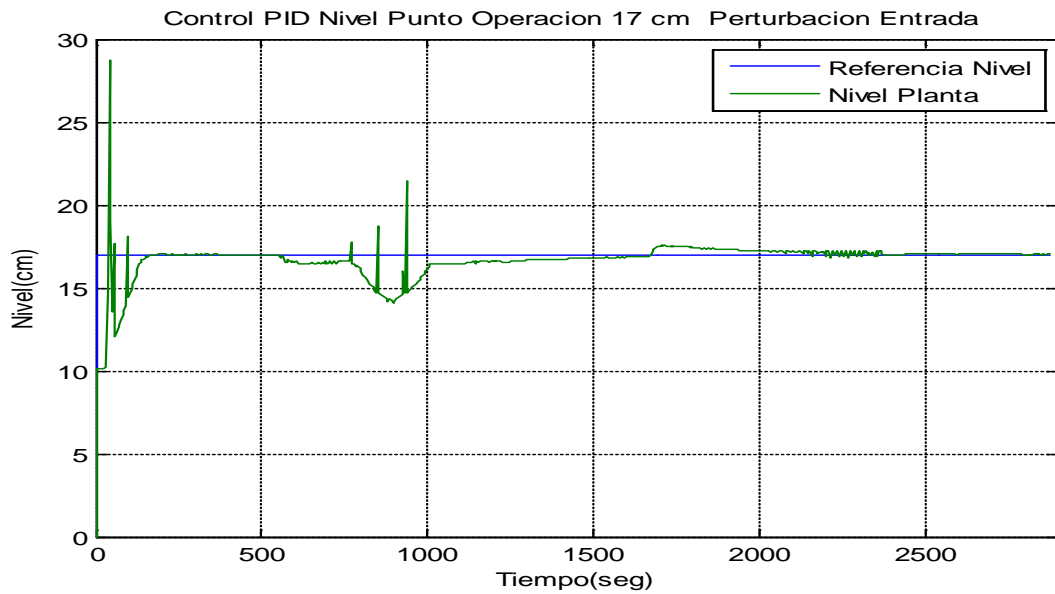
*Respuesta de regulación para el controlador PID de nivel para un P.O. de 26 cm con perturbaciones a la entrada y salida de la planta*



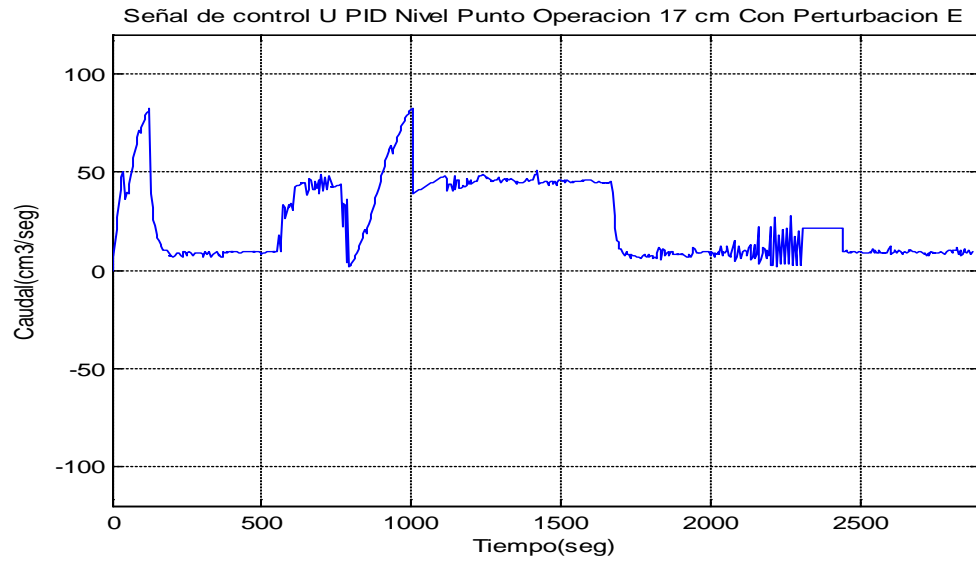
*Señal de control del regulador PID de nivel para un P.O. de 26 cm con perturbaciones a la entrada y salida de la planta*

## **Prueba de Regulación Controlador PID Nivel en un Punto de Operación 17 CM con Perturbación en la Entrada**

En las Figuras siguientes se muestran la salida de la planta y su referencia para un punto de operación de 17 cm con perturbaciones solo en la entrada de la planta. Para generar estas señales se ha colocado a la planta un controlador PID y al igual que para el caso de prueba del punto de operación de 17 cm y 26 cm también mantiene el punto de trabajo a pesar de las perturbaciones que se realicen en la entrada, también se puede observar los instantes en que se han realizado las perturbaciones para este punto de prueba a través de los incrementos o decrementos que tiene esta variable, se puede decir que para perturbaciones pequeñas del caudal en la entrada de la planta provoca pequeñas desviaciones del punto de operación del nivel mientras que para perturbaciones grandes, el nivel de la planta se ve afectado significativamente pero igualmente el controlador PID lo lleva nuevamente a su punto de operación.



*Respuesta de regulación para el controlador PID de nivel para un P.O. de 17 cm con perturbaciones a la entrada*



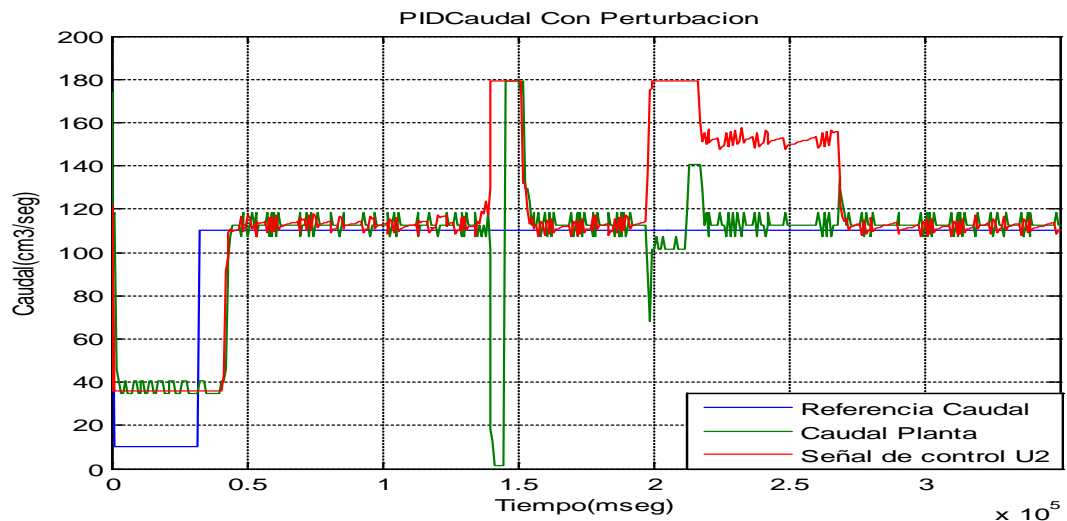
*Señal de control del regulador PID de nivel para un P.O. de 17 cm con perturbaciones a la entrada de la planta*



## **PRUEBA DE REGULACIÓN DEL CONTROLADOR PI CAUDAL**

### **Controlador PI Caudal con Perturbación salida**

Se realiza la prueba de funcionamiento del controlador PI de la variable caudal, el mismo que fue desarrollado en la sección 5.2. En la Figura se muestra la respuesta de este controlador para el punto de operación 110  $\text{cm}^3/\text{s}$ , en el gráfico se muestran tres señales: la referencia del caudal, el caudal en la planta y la señal  $u_2$  que da el controlador PI, en la gráfica se observa que se realizaron dos perturbaciones, una a los 150 s aproximadamente y otra a los 200 s, en estos tiempos se nota que el controlador PI al aplicar la ley de control hace que la señal  $u_2$  aumente a valores de 180  $\text{cm}^3/\text{s}$  o 150  $\text{cm}^3/\text{s}$  respectivamente para compensar las pérdidas producidas por la perturbación externa realizada al sistema y de esta manera mantener el valor del caudal constante en la planta, por tal motivo se puede decir que el controlador PI responde de manera efectiva a las perturbaciones realizadas manteniendo el setpoint dado en la salida de la planta.

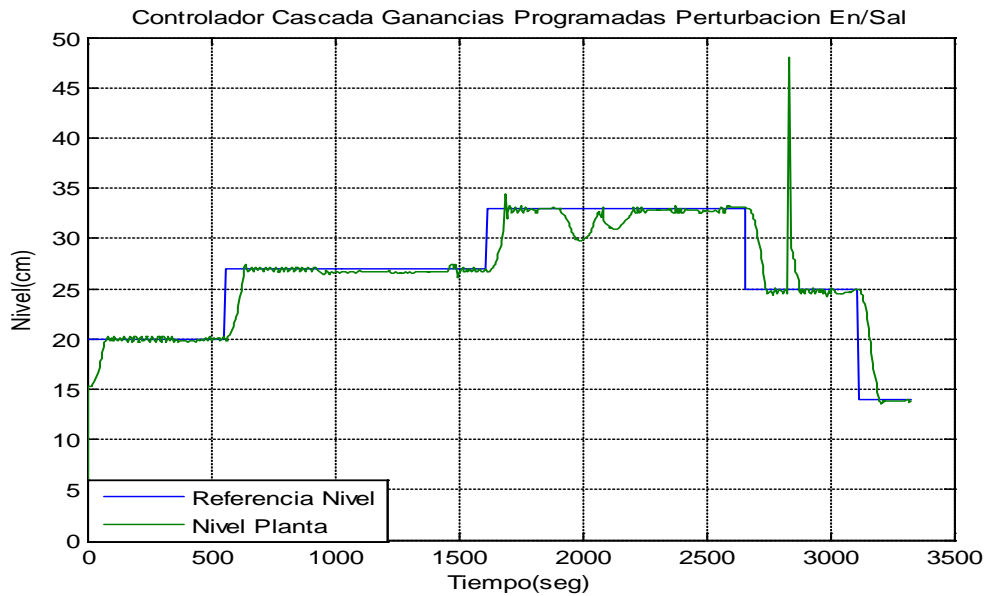


*Señal de control del regulador PID de nivel para un P.O. de 26 cm con perturbaciones a la entrada y salida de la planta*

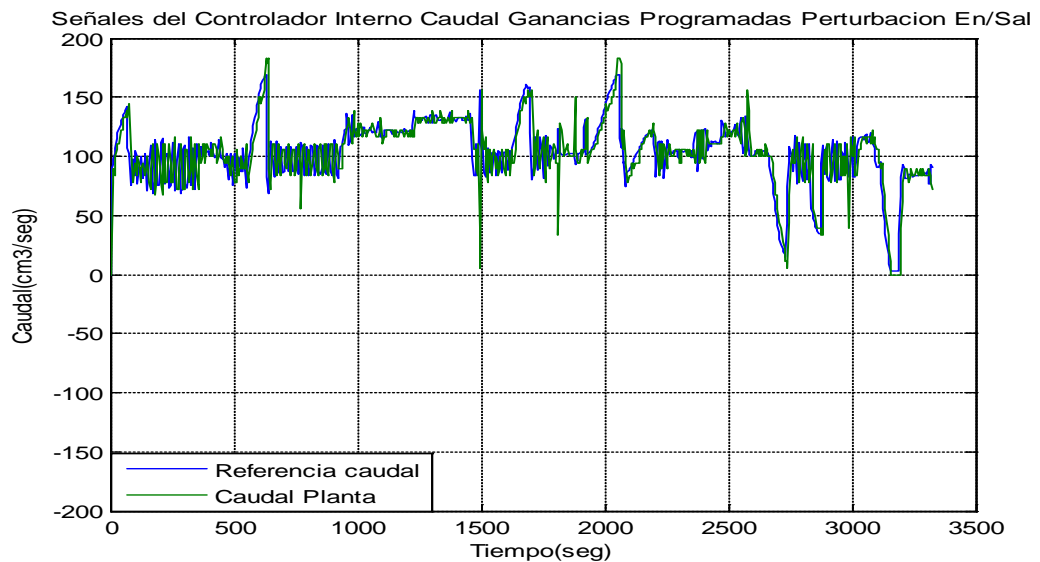
### **CONTROLADOR EN CASCADA CON PERTURBACIÓN ENTRADA-SALIDA PARA UN CONTROLADOR DE GANANCIAS PROGRAMADAS**

En la Figura 6.15 se muestran las respuestas que genera la planta, al colocar en la tarjeta arduino mega 256 el controlador en lazo cascada de ganancias programadas, en esta grafica se muestra la respuesta del controlador externo en donde aparecen el setpoint de nivel dado a la planta y el nivel real que se lee, mientras que en la Figura se observan el setpoint caudal y la lectura del sensor de caudal, en estas figuras se puede observar que se ha realizado cuatro perturbaciones en la salida de la planta: la primera se la realiza en el rango de 200 a 300 segundos, y consiste en abrir de válvula de salida adicional al 20%, la misma que provoca una cantidad mínima de oscilaciones en el nivel, las cuales pueden ser consideradas como despreciables, la segunda perturbación se aplica en el intervalo de 900 a

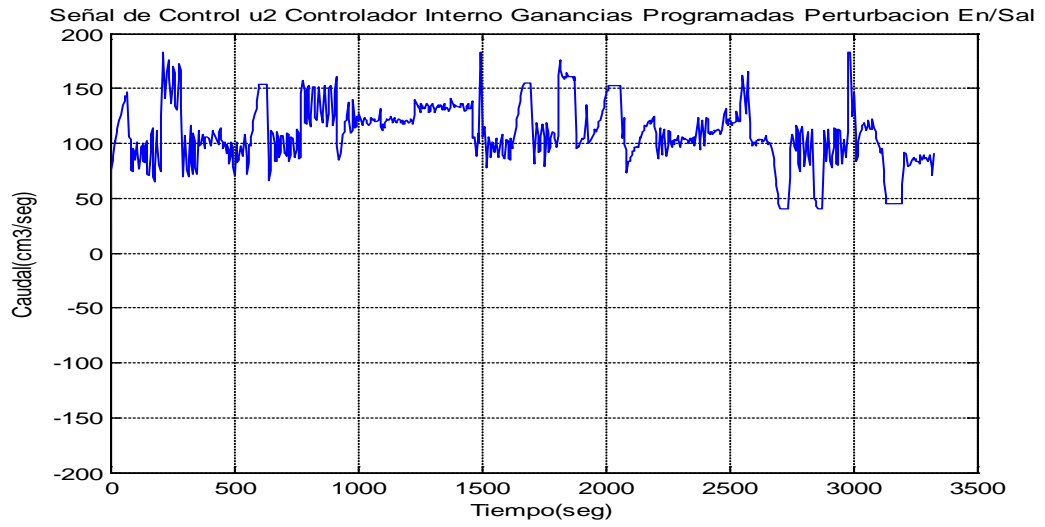
1480 segundos con una apertura que provoca una salida adicional de caudal de aproximadamente  $20 \text{ cm}^3/\text{s}$  el mismo que se mantiene hasta los 1250 segundos aproximadamente, a partir de este momento se realiza una apertura adicional de la válvula con lo que se produce una salida extra del caudal de aproximadamente  $30 \text{ cm}^3/\text{s}$ , el efecto de esta perturbación en la salida de la planta es casi despreciable, la tercera perturbación se la realiza desde los 1900 a los 220 segundos con una apertura del 100% de la válvula de salida, esta perturbación provoca una caída del nivel de 3 cm, tardándose en recuperar la planta en aproximadamente 220 segundos, la cuarta perturbación se la realiza ingresando agua al tanque principal con un recipiente aproximadamente a los 2800 segundos observándose en la figura un pico de aproximadamente 48 cm y al igual que en los casos anteriores ante esta perturbación la planta responde correctamente llevando nuevamente la planta a su punto de operación, en las Figuras siguientes se muestran las señal del controlador interno  $u$  y la señal que genera el controlador interno  $u_2$  respectivamente, se puede observar en esta señal el efecto que provocan las perturbaciones realizadas, estas aumentan o disminuyen el ingreso de agua al tanque principal en los tiempos en los cuales se aplica la perturbación, con lo cual el controlador permite mantener el punto de operación establecido en la planta.



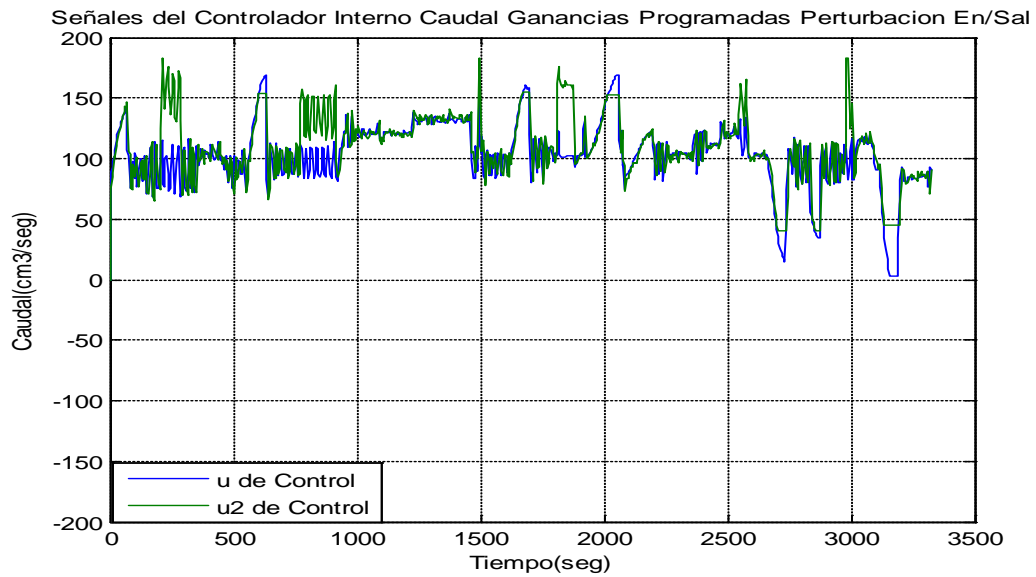
*Respuesta del regulador PID en cascada de ganancias programadas para Nivel (lazo externo) para cambios en la consigna y con perturbaciones en la entrada y la salida*



*Respuesta del regulador PID en cascada de ganancias programadas para Caudal (lazo interno) para cambios en la consigna y con perturbaciones en la entrada y la salida*



*Señal de control del regulador PID en cascada de ganancias programadas para Caudal (lazo interno) y con perturbaciones en la entrada y la salida*



*Señales de control del regulador PID en cascada de ganancias programadas para Nivel (lazo externo) y Caudal (lazo interno) para cambios en la consigna y con perturbaciones en la entrada y la salida*

## ANEXO 28

La ecuación determinada con estos datos del anexo 12 en matlab genera el polinomio de grado n que relaciona estos datos, en esta aproximación se ha tomado como señal de salida el PWM y como entrada el valor del caudal Q  
Las líneas de código que permiten realizar esta aproximación son: [20]

**% Aproximación de datos a polinomios**

```
x=a(:,1);y=a(:,2);
```

```
p=polyfit(x,y,n)
```

```
ps=poly2sym(p)
```

```
pe=inline(ps)
```

```
pe(1.5)
```

En la variable 'a' del código de Matlab se coloca en la segunda columna el valor de PWM, en la primera columna el valor del caudal (Q), en la variable 'n' se coloca el grado del polinomio con el cual se quiere realizar la aproximación. La función polyfit aproxima utilizando mínimos cuadrados, la función, poly2sym convierte la aproximación realizada por polyfit a polinomio simbólico con la variable x como entrada, la función inline convierte el polinomio simbólico a función polinómica. La ecuación que aproxima estos valores es:

$$Pwm=q_i*(-24.9585)+4130.1087$$