



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC)

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL
Y REGULACIÓN DE NIVEL DE UN TANQUE APLICANDO
MATLAB**

TÓPICO DE GRADUCIÓN

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
INGENIERO ELÉCTRICO ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA**

Presentada por:

**WILLIAM LENIN CHENCHE JÁCOME
VICTOR FABRICIO URDIALES PONCE**

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2005

AGRADECIMIENTO

A los ingenieros JUAN DEL POZO Y SARA
RIOS, Directores del Tópico, por su
colaboración y ayuda incondicional en la
realización del mismo. A nuestras familias,
por su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

Es mi anhelo dedicar y agradecer este trabajo, producto de mucho sacrificio y esfuerzo:

A **Dios** por permitirme culminar una etapa muy importante en mi vida.

A mis padres: **Zoila** y **William**, por su amor, comprensión, y apoyo incondicional con el fin de lograr a alcanzar esta meta.

A mis hermanas: **Rosa, Silvana, Ginger** y **Yessenia**, quienes me brindaron todo su apoyo incondicional.

A mi novia: **Jéssica**, por ser mi fuente de comprensión, paciencia, y apoyo durante todo este tiempo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron para culminar mis estudios superiores.

William Lenin Chenche Jácome

GRACIAS

DEDICATORIA

Es mi anhelo dedicar y agradecer este trabajo, producto de mucho sacrificio y esfuerzo:

A Dios por permitirme culminar una etapa muy importante en mi vida.

Y en especial a mi esposa e hija: Margarita y Doménica, por ser mi fuente de comprensión, paciencia, y apoyo durante todo este tiempo.

A mis padres: Elizabeth y Hugo, por su amor, comprensión, y apoyo incondicional con el fin de lograr a alcanzar esta meta.

A mis hermanos: Marco y Paúl, quienes me brindaron todo su apoyo incondicional.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron para culminar mis estudios superiores, en especial para mi tía Carmela Urdiales de Martínez.

Víctor Fabricio Urdiales Ponce

GRACIAS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Carlos Monsalve.
DECANO DE LA FIEC
PRESIDENTE



Ing. Juan Del Pozo L.
DIRECTOR DE TÓPICO



Ing. Sara Ríos O.
VOCAL PRINCIPAL



Ing. Holger Cevallos.
VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"



William Lenin Chenche Jácome



Víctor Fabricio Urdiales Ponce

RESUMEN

La Tesis se basa en el Diseño e Implementación de un Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque Aplicando MATLAB, para el cual vamos a controlar el caudal que entra al tanque principal para obtener el nivel deseado.

Para mantener las condiciones de estabilidad, se actúa sobre el caudal de agua que ingresa al tanque principal del sistema donde se controla el nivel deseado. Controlaremos el voltaje de entrada a la bomba DC de succión y así poder dosificar la cantidad de agua a la entrada del tanque.

El sistema se compone de un tanque principal, un tanque de retroalimentación, una bomba DC, sensor ultrasónico de nivel, válvulas de compuerta y de encendido/apagado (ON/OFF), fuentes de poder, sistema de tuberías, software de MATLAB, tarjeta de adquisición 6024E, bloque conector CB-68LP, computador Host (Principal) y Target (Remoto) para la adquisición de la planta en tiempo real y protocolos de comunicación para el computador Host y Target del sistema.

Se involucrará el análisis de flujos, características de la bomba, respuesta del sensor ultrasónico de nivel, efectos de ruido, tiempo de retardo, consumo de poder, variación de voltaje para el control de la bomba y principios básicos de control automático.

Se analizarán los modelos matemáticos y ecuaciones en función del tiempo que describen los varios componentes del sistema y del proceso en términos de la altura del tanque. Estos se usarán primeramente en la especificación de los varios componentes del sistema y seguidamente usadas se procederá a ser linealizadas y luego llevarlas al campo de la frecuencia por medio de la Transformada de Laplace para obtener así el diagrama de bloque general del sistema.

Las simulaciones que se usarán verificarán la exactitud de las ecuaciones linealizadas, se plantea utilizar el software del MATLAB con las funciones como Simulink (Simulador), System Identification (Identificador de Sistemas) y el XPC Target para realizar la adquisición de la planta en tiempo real.

Una vez verificadas las simulaciones en tiempo real y no real, se obtendrán los modelos matemático y real del sistema. Se procederá a utilizar teoría de controladores, para realizar el análisis y ajuste del

controlador del sistema; ya sean proporcional, integral, derivativo o una combinación de ellos para determinar el mejor controlador de nuestro sistema que dará la estabilidad del proceso.

Se emprenderá pruebas, incluso para analizar la estabilidad y ajustes de control de la planta.

Además se hará una comparación de resultados entre la respuesta de la planta simulada y la respuesta de la planta real usando bloques y funciones de control del software de MATLAB.

Esto es el mayor trabajo de investigación para nuestro caso de control de regulación y nivel en nuestro tanque.

Finalmente, obteniendo el control total del sistema, aplicaremos análisis de teoría de control automático para elaborar prácticas teóricas-experimentales didácticas para los estudiantes que tomarán el Curso de Laboratorio de Control Automático aplicando MATLAB.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VII
ÍNDICE GENERAL.....	X
ABREVIATURAS.....	XVI
SIMBOLOGÍA.....	XVII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPITULO 1

1. DESCRIPCIÓN Y ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL Y

REGULACIÓN NIVEL DE UN TANQUE.....	4
1.1. Generalidades.....	4
1.2. Descripción y esquema del sistema.....	5
1.2.1. Característica del sistema de control.....	9
1.3. Elementos del sistema.....	12
1.3.1. Descripción del tanque principal.....	13
1.3.2. Descripción del tanque de retroalimentación.....	15
1.3.3. Descripción del sensor ultrasónico 873C.....	17
1.3.4. Descripción de la bomba DC.....	21
1.3.5. Descripción del programa Matlab.....	24

1.3.6. Soportes metálicos.....	26
1.3.7. Tuberías.....	26
1.3.8. Válvulas.....	27
1.4. Etapas de poder.....	30
1.4.1. Descripción de la fuente de poder de la bomba DC de succión.....	30
1.4.2. Descripción de la fuente de poder del sensor ultrasónico 873C.....	32
1.4.3. Descripción de la tarjeta electrónica de la válvula ON/OFF de descarga.....	33
1.4.4. Descripción de ajuste de la referencia del nivel en modo automático y manual.....	33

CAPITULO 2

2. MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA Y ESTRATEGIA DE AJUSTE PARA EL CONTROLADOR DEL SISTEMA.....	36
2.1. Generalidades.....	36
2.2. Modelo Matemático del Sistema.....	38
2.2.1. Ecuaciones generales del sistema en el tiempo.....	53
2.2.2. Toma de puntos de calibración para la evaluación las ecuaciones del sistema.....	55
2.2.3. Linealización de las ecuaciones del sistema.....	58

2.2.4. Transformada de Laplace de las ecuaciones del sistema.....	59
2.2.5. Diagrama de bloques del sistema.....	64
2.3. Estrategia de ajuste para el controlador del sistema.....	64
2.3.1. Análisis del Sistema con Perturbación.....	65
2.3.2. Análisis de Estabilidad del Sistema.....	74
2.3.2.1. Método de Routh Hurwitz.....	75
2.3.2.2. Análisis de Error de Estado Estacionario.....	83

CAPITULO 3

3. INTERFASE Y EQUIPOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE NIVEL Y SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA.....	88
3.1. Adquisición de datos del Sistema utilizando Matlab.....	88
3.1.1. Descripción de la tarjeta PCI-6024E de National Instruments.....	90
3.1.2. Descripción del bloque conector CB-68LP.....	92
3.1.3. Descripción del conector bus de datos Serie E.....	92
3.1.4. Descripción del xPC Target.....	93
3.1.5. Descripción del computador Host.....	94
3.1.6. Descripción del computador Target.....	95

3.1.7. Descripción de comunicación entre los computadores Host y Target para la adquisición de datos.....	97
3.2. Activación de la planta y circuitos auxiliares de control.....	98
3.2.1 Circuitos de encendido y apagado de la bomba.....	99
3.2.2 Circuito de encendido y apagado del sensor.....	101
3.2.3 Circuito de perturbación del sistema.....	101
3.3. Implantación del controlador en la operación de la planta.....	103
3.3.1. Identificación de la función de transferencia de la planta en tiempo real.....	105
3.3.2. Diseño del controlador del sistema.....	123
3.3.3. Ajuste del Controlador.....	125
3.3.3.1. Modelo Matemático.....	125
3.3.3.2. Modelo Real.....	150
3.3.4. Aplicación del Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) en la Adquisición de la Planta Real.....	166
3.4. Análisis Comparativo entre el Sistema Matemático y el Sistema Real.....	175
3.4.1. Con Perturbación.....	175
3.4.2. Sin Perturbación.....	182

CAPITULO 4

4. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PARA ESTUDIANTES.....	187
--	-----

4.1. Manejo general de la planta.....	187
4.2. Práctica 1: Identificación de Función de Transferencia de la Planta.....	192
4.2.1. Objetivos.....	192
4.2.2. Teoría.....	193
4.2.3. Por Métodos Teóricos.....	194
4.2.3.1 Pre-Práctica.....	196
4.2.4. Por Métodos Experimentales.....	215
4.2.4.1 Pre-Práctica.....	215
4.2.4.2 Práctica.....	231
4.2.5. Procedimientos.....	233
4.2.6. Cálculos.....	238
4.3. Práctica 2: Ajuste de Controlador.....	238
4.3.1. Objetivos.....	238
4.3.2. Teoría.....	239
4.3.3. Por Métodos Teóricos.....	249
4.3.3.1 Pre-Práctica.....	249
4.3.4. Por Métodos Experimentales.....	273
4.3.4.1 Pre-Práctica.....	274
4.3.4.2 Práctica.....	286
4.3.5. Procedimientos.....	287
4.3.6. Cálculos.....	290

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	292
-------------------------------------	-----

ANEXOS.

BIBLIOGRAFÍA.

ABREVIATURAS

cm.	Centímetros.
V	Voltaje.
Cm ²	Centímetros cuadrados.
Cm ³	Centímetros cúbicos.
m	Metros.
°C	Grados Celsius o Centígrados.
AC	Corriente alterna.
H.P.	Unidad de potencia de caballos fuerza.
Hz	Hertzios.
P.W.M.	Modulador por ancho de pulso (siglas en inglés).
R.P.M.	Revoluciones por minutos.
Amp.	Amperios.
g.	Galones.
s.	Segundo
s ²	Segundo al cuadrado.
l.	Litro.
Prom.	Promedio.
Min.	Minutos.
DC.	Voltaje Continuo.

SIMBOLOGÍA

T	Periodo de la señal generadora por el P.W.M.
T1	Tiempo del ancho del pulso del flanco positivo del P.W.M.
AREA1	Sección transversal del tubo de descarga.
R	Radio del tubo de descarga del tanque principal.
D	Diámetro del tubo de descarga.
$\frac{\partial}{\partial t}$	Derivada parcial.
ρ	Densidad de fluido.
Vr	Volumen del tanque en cm ³ .
qe	Caudal de entrada del tanque principal. [cm ³ /s].
A	Área de sección transversal del tanque principal.
h	Nivel de altura del tanque principal.
k	Coeficiente de descarga del tanque principal.
Cd	Coeficiente de rozamiento por tuberías.
g	Constante de la gravedad. 980 cm./s ² .
$\frac{\partial h}{\partial t}$	Derivada de la altura en función de t.
Vs	Voltaje del Sensor.
t1	tiempo de muestra 1
t2	tiempo de muestra 2
t3	tiempo de muestra 3
t4	tiempo de muestra 4
Vb	Voltaje aplicado a la bomba DC.
Vtarj	Voltaje aplicada a la tarjeta de Adquisición.
Q	Caudal de la tubería de ½ pulgada.
At	área de sección transversal interna de la tubería de ½ pulgada.
Vel	Velocidad que fluye el caudal en la tubería de ½ pulgada.
Dist	Distancia de la tubería de ½ pulgada.
t	Tiempo en que tarda el caudal en recorrer la tubería hasta el tanque principal.
tr	Tiempo de Retardo del Sistema.
Vc	Control de Nivel.
Vref	Voltaje referencial ingresado al sistema.
K	Constante de proporcionamiento del controlador de nivel.
Vso	Condiciones de Operación de Sensor.
ho	Condición de Operación del Nivel de tanque principal.
Vco	Condición de Operación del Controlador.
Vrefo	Condición de Operación del Volt. De referencia ingresada al sistema.

qso	Condición de Operación del Caudal de salida del tanque.
Vb0	Condición de Operación del Volt. Aplicado a la bomba DC.
Vtarj0	Condición de Operación del Volt. Aplicado a la tarjeta de Adquisición.
qe0	Condición de Operación del Caudal de entrada al tanque.
Ω	Omega: Función del qs y h.
$\frac{\partial \Omega}{\partial q_s}$	Derivada parcial del qs
$\frac{\partial \Omega}{\partial h}$	Derivada parcial de h.
K1	Constante en función de h.
e	Función exponencial.
$e^{-S\tau}$	Función de serie infinita en función del tiempo por el retardo del sistema.
β	Señal de perturbación del sistema.
qs1	Flujo o caudal a través de la válvula de compuerta.
°	Grados.
θ	Teta, es la perturbación de la válvula de compuerta de perturbación en vueltas.
e _{ss}	Error de Estado Estacionario
P(S)	Ecuación característica en lazo abierto del sistema.
S	Factor polinomio en función de la frecuencia.
T(S)	Función de Transferencia del sistema en lazo cerrado.
Gp	Función de Transferencia de la planta.
Gs	Función de Transferencia del sensor.
K	Ajuste del controlador proporcional.
$\lim_{s \rightarrow 0}$	Límite de la función, cuando se aproxima a un parámetro al valor de cero.
E(S)	Error actuante.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.2.1	Esquema del sistema de control. 6
Figura 1.2.2	Representación gráfica del sistema. 7
Figura 1.2.1.1	Tipos de Errores de un sistema de Control. 12
Figura 1.3.1.1	Dimensiones del tanque principal de vidrio. 14
Figura 1.3.1.2	Vista inferior del tanque principal de vidrio. 15
Figura 1.3.2.1	Dimensiones del tanque de suministro. 16
Figura 1.3.3.1	Angulo mínimo de detección del sensor. 19
Figura 1.3.3.2	Sensor Ultrasónico 873C. 20
Figura 1.3.4.1	Bomba Flojet de 12 Voltios DC. 24
Figura 1.3.8.1	Esquema de las válvulas de perturbación del sistema. 29
Figura 1.4.1.1	Modulación por ancho de pulso o PWM. 31
Figura 1.4.1.2	Fuente de Poder de la Bomba DC. 32
Figura 1.4.2.1	Fuente de Voltaje para el sensor 32
Figura 1.4.4.1	Ajuste manual del sistema. 35
Figura 2.1.1	Esquema del sistema de Regulación de nivel. 37
Figura 2.2.1	Gráfico de la Planta. 38
Figura 2.2.2	Vista Inferior del tanque Principal. 40
Figura 2.2.3	Curva Característica del sensor ultrasónico, relacionando voltaje versus nivel. 44
Figura 2.2.4	Curva característica del Caudal de entrada a diferentes voltajes de la bomba. 47
Figura 2.2.5	Curva característica del voltaje de la tarjeta PCI-6024E a la entrada de la bomba (etapa amplificadora). 50
Figura 2.2.6	Sección transversal y longitud de la tubería de ½ pulgada utilizada en la planta. 52
Figura 2.2.5.1	Diagrama de bloques del sistema sin perturbación. 64
Figura 2.3.1.1	Respuesta de un sistema al cambio en la entrada de perturbación y el punto de control. 65
Figura 2.3.1.2	Curva característica de la válvula de compuerta a diferentes niveles y a diferentes posiciones. 68
Figura 2.3.1.3	Diagrama de bloque del sistema con perturbación. 73
Figura 2.3.2.1.1	Diagrama de bloque reducido. 76
Figura 2.3.2.2.1.	Diagrama de bloque del sistema 83

Figura 3.1.1.1	Tarjeta PCI-6024E de National Instruments.	91
Figura 3.1.2.1	Bloque conector CB-68LP.	92
Figura 3.1.7.1	Conexión entre el Host y Target por medio del Protocolo TCP/IP.	98
Figura 3.2.1.1	Canales de entrada y salida de la etapa Amplificadora.	100
Figura 3.2.1.2	Circuito de activación de la etapa amplificadora para la bomba DC.	100
Figura 3.2.3.1	Activación de la válvula ENCENDIDO / APAGADO de perturbación del sistema.	102
Figura 3.3.1.1	Sistema en lazo abierto variando el voltaje de Entrada.	107
Figura 3.3.1.2	Gráfica de V_b (A), y H (B).	108
Figura 3.3.1.3	Ventana IDENT del Matlab.	109
Figura 3.3.1.4	Ventana IMPORT DATA.	110
Figura 3.3.1.5	Carga de datos en la ventana IDENT.	111
Figura 3.3.1.6	Proceso de Identificación.	112
Figura 3.3.1.7	Señal de Entrada (V_b) y Señal de Salida (H) en SYSTEM IDENTIFICATION.	113
Figura 3.3.1.8	A) Modelo estimados B) Porcentaje de aceptación de los modelos de Salida.	114
Figura 3.3.1.9	A) Selección de dato planta B) Selección de rango para mejora la identificación.	115
Figura 3.3.1.10	Selección del rango de las señales de entrada y Salida.	116
Figura 3.3.1.11	A) Selección del modelo ARX441. B) Estimación del modelo ARX441 en la venta IDENT.	117
Figura 3.3.1.12	Modelo de salida estimado ARX441.	118
Figura 3.3.1.13	Modelo ARX441	119
Figura 3.3.1.14	Función de Transferencia del modelo ARX441	119
Figura 3.3.1.15	Función de Transferencia del modelo en Z	120
Figura 3.3.1.16	Función de Transferencia en transformada de Laplace del modelo identificado.	121
Figura 3.3.1.17	Función de Transferencia del modelo matemático.	122
Figura 3.3.2.1	Herramienta SISO	124
Figura 3.3.3.1.1	Presentación del Programa de Matlab.	127
Figura 3.3.3.1.2	Ventana inicial del Simulink.	129
Figura 3.3.3.1.3	Diseño del sistema de Regulación y Control de nivel aplicando Simulink.	130
Figura 3.3.3.1.4	A) Aplicación del Editor de Matlab. B) Función de Transferencia del modelo matemático de la Planta.	135 136

Figura 3.3.3.1.5	A) Esquema básico SISO.	136
	B) Diagrama Reducido de nivel.	136
Figura 3.3.3.1.6	A) Ventana gráfica de SISO.	137
	B) Acercamiento de las raíces dominantes.	137
	C) F. T. de la planta reducida por el SISO.	137
	D) Polos y ceros de la F. T. de la planta	138
Figura 3.3.3.1.7	A) Limite del Sobrenivel Porcentual.	139
	B) Respuesta Escalón al ajuste de K.	139
Figura 3.3.3.1.8	Agregación de ceros en el Controlador.	141
Figura 3.3.3.1.9	A) Ajuste del segundo cero del controlado PID.	143
	B) Acercamiento del segundo cero agregado a la Raíces dominantes del sistema.	144
Figura 3.3.3.1.10	Respuesta del sistema en el ajuste del tiempo de estabilidad.	145
Figura 3.3.3.1.11	A) Límite de estabilidad del Lugar Geométrico de la Raíces.	146
	B) Acercamiento de la posición de los polos dominantes al limite de estabilidad.	146
Figura 3.3.3.1.12	Oscilación de la respuesta del sistema disminuyendo el tiempo de estabilidad < 8.8 s.	147
Figura 3.3.3.1.13	Respuesta al escalón del sistema en lazo cerrado Con el ajuste del controlador PID.	149
Figura 3.3.3.2.1	A) Función de transferencia real de la planta.	151
	B) Ceros y polos de la Planta	152
Figura 3.3.3.2.2	A) Trayectoria de las raíces del sistema H / Vb	152
	B) Acercamiento de las raíces dominantes del Sistema H / Vb.	153
Figura 3.3.3.2.3	A) Ajuste del Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$.	154
	B) Acercamiento del ajuste.	155
	C) Respuesta del sistema en el tiempo a una entrada Escalón.	155
Figura 3.3.3.2.4	Agregación de dos ceros al controlador.	156
Figura 3.3.3.2.5	A) Ajuste del segundo cero del controlador del Sistema.	159
	B) Acercamiento de la gráfica del ajuste del Segundo cero.	159
Figura 3.3.3.2.6	Respuesta a una entrada escalón del sistema con el ajuste del controlador PID.	160
Figura 3.3.3.2.7	A) Límite de estabilidad del sistema.	161
	B) Respuesta del sistema en el límite de Estabilidad.	162
Figura 3.3.3.2.8	A) Ajuste del controlador P. D. del sistema.	163
	B) Respuesta del sistema a una entrada Escalón con el controlador P. D.	164

Figura 3.3.4.1	Adquisición de datos entre el Host y el Target PC del sistema.	166
Figura 3.3.4.2	Modelo del sistema en tiempo Real.	168
Figura 3.3.4.3	A) Gráficas del Target PC en tiempo Real Sistema Estable.	170
	B) Perturbación.	170
Figura 3.3.4.4	A) Gráfica del Target PC sin perturbación.	172
	B) Acercamiento del punto de control de Nivel.	172
	C) Nivel de control en el tanque principal.	173
Figura 3.3.4.5	Ajuste Manual de la Planta.	174
Figura 3.4.1.1	A) Diseño del sistema matemático.	176
	B) Diseño del sistema real.	176
	C) Diseño de comparación del sistema real y Matemático.	177
Figura 3.4.1.2	Respuesta del sistema a 25 cm. de nivel.	178
Figura 3.4.1.3	A) Activación de la perturbación del sistema.	179
	B) Acercamiento de la variación de la respuesta del sistema.	180
Figura 3.4.2.1	Comparación de los sistemas matemático y real sin perturbación.	183
Figura 3.4.2.2	Respuesta del sistema sin perturbación.	184
Figura 3.4.2.3	Tiempo de estabilidad del sistema sin perturbación A 25 cm. de Nivel.	185
Figura 4.1.1	Sistema de control y regulación de nivel.	188
Figura 4.1.2	Componentes de la Planta.	191
Figura 4.2.3.1	Estrategia de identificación.	195
Figura 4.2.3.1.1	Identificación de variables de entrada y salida del sistema.	197
Figura 4.2.3.1.2	Sistema a Identificar.	198
Figura 4.2.3.1.3	Ingreso parámetros de las variables de entrada (Vb) y salida (H).	199
Figura 4.2.3.1.4	A) Habilidad del System Identification.	200
	B) Ventana Principal del System Identification.	201
Figura 4.2.3.1.5	A) Selección de opción IMPORT.	202
	B) Habilidad de la ventana IMPORT.	202
Figura 4.2.3.1.6	Asignación de datos en la ventana IDENT.	203
Figura 4.2.3.1.7	A) Procesos de Identificación.	204
	B) Señal de entrada Vb y salida H.	204
Figura 4.2.3.1.8	Selección de rango para validación.	205
Figura 4.2.3.1.9	Modelos de Estimación.	207
Figura 4.2.3.1.10	Porcentajes de aceptación de los modelos de salida.	208
Figura 4.2.3.1.11	Modelo ARXQS.	209
Figura 4.2.3.1.12	Función de transferencia del modelo ARXQS.	210

Figura 4.2.3.1.13	Función de transferencia en transformada de la Laplace del modelo identificado.	213
Figura 4.2.3.1.14	Función de transferencia del modelo final.	214
Figura 4.2.4.1.1	A) Habilitación de variables de I/O para Identificación.	217
	B) Ingreso de parámetros para las variables de I/O en tiempo real.	217
Figura 4.2.4.1.2	Habilitación del I/O del xPC Target.	218
Figura 4.2.4.1.3	Parámetros del I/O del xPC Target.	219
Figura 4.2.4.1.4	Habilitación del osciloscopio Target.	220
Figura 4.2.4.1.5	Ingreso de parámetros del osciloscopio Target.	221
Figura 4.2.4.1.6	Creación de la Aplicación xPC Target.	222
Figura 4.2.4.1.7	A) Gráfica de Vb.	223
	B) Gráfica H.	224
Figura 4.2.4.1.8	A) Variación de Vb.	225
	B) Respuesta del nivel a 25 cm.	225
Figura 4.2.4.1.9	Modelo de Identificación.	226
Figura 4.2.4.1.10	Modelo ARX441.	227
Figura 4.2.4.1.11	Función de transferencia del modelo ARX441.	228
Figura 4.2.4.1.12	Función de transferencia del modelo en Transformada Z.	229
Figura 4.2.4.1.13	Función de transferencia en transformada de Laplace del modelo identificado.	230
Figura 4.2.4.1.14	Función de transferencia del modelo matemático.	231
Figura 4.3.2.1	Sección transversal y longitud de la tubería de ½ pulgada utilizada en la planta.	242
Figura 4.3.2.2	Esquema del sistema.	247
Figura 4.3.2.3	Curva y parámetros característicos en función del tiempo.	248
Figura 4.3.3.1.1	Diagrama de bloque del sistema.	250
Figura 4.3.3.1.2	A) Aplicación del M-FILE para definir funciones de transferencia .	254
	B) Diagrama base SISO.	254
	C) Diagrama del sistema.	255
Figura 4.3.3.1.3	Ingreso del comando SISOTOOL en la ventana Principal de Matlab.	257
Figura 4.3.3.1.4	Asignación de funciones al diagrama de bloques Base de la herramienta SISO.	258
Figura 4.3.3.1.5	Ventana gráfica del SISO.	259
Figura 4.3.3.1.6	A) Ajuste del valor de Kp con un $SP \leq 5\%$.	260
	B) Acercamiento de los polos dominantes del Sistema.	260
	C) Respuesta del sistema.	261

Figura 4.3.3.1.7	A) Agregación del cero.	263
	B) Agregación del controlador PI.	263
	C) Acercamiento de los polos del sistema.	264
	D) Respuesta del sistema al ajuste del controlador PI.	264
Figura 4.3.3.1.8	A) Agregación de otro cero al sistema.	266
	B) Ajuste del controlador PID.	266
	C) Respuesta del sistema con el controlador PID.	267
Figura 4.3.3.1.9	A) Sistema en Simulink.	270
	B) Respuesta del sistema con el controlador PID sin perturbación.	271
	C) Respuesta del sistema con perturbación con el controlador PID.	271
Figura 4.3.4.1.1	Tanque de alimentación o suministros.	276
Figura 4.3.4.1.2	Fuente de activación del sistema .	278
Figura 4.3.4.1.3	Panel de Control.	279
Figura 4.3.5.1	A) Posición de válvula de perturbación.	282
	B) Válvula de Paso.	282
Figura 4.3.5.2	Sistema en tiempo real.	288
Figura 4.3.5.3	Respuesta del sistema en el Target PC.	289
Figura 4.3.4.2.3	A) Nivel de estabilidad en el Target.	
	B) Respuesta del sistema con un controlador PID.	290

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Voltaje del sensor a diferentes niveles.....45
Tabla 2	Voltaje aplicado a la bomba para proporcionar diferentes niveles.....48
Tabla 3	Perturbación a diferentes posiciones de la válvula de compuerta y a diferentes niveles.....69
Tabla 4	Posición de la válvula 2 de perturbación.....70
Tabla 5	Ceros y Polos de la función de transferencia de la planta82
Tabla 6	Parámetros de estabilidad del modelo matemático y del Modelo real de la Planta.....165
Tabla 7	Comparación de Métodos.....232
Tabla 8	Parámetros de estabilidad con diferentes tipos de ajuste de Controlador P, PI y PID.....269
Tabla 9	Diferentes tiempos de retardo del sistema.....273
Tabla 10	Canales de conexión de señales de entrada y salida del Sistema de la tarjeta PCI-6024E.....283
Tabla 11	Parámetros de estabilidad en tiempo real con diferentes Tipos de ajuste de controlador P, PI y PID.....285
Tabla 12	Parámetros de la Práctica.....287

INTRODUCCIÓN

La Escuela Superior Politécnica del Litoral, cumple con las demandas de desarrollo social, económico, industrial y tecnológico, ofertando diferentes carreras de formación académica y profesional.

En la especialización de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, los estudiantes para graduarse y obtener el Título de Ingenieros reglamentariamente, tienen que desarrollar un proyecto técnico, de contenido teórico-científico y de utilidad práctica. Cumpliendo con estas disposiciones legales y con la finalidad de aportar con el desarrollo del conocimiento técnico de los estudiantes y de la industria, nos hemos comprometido a realizar el Proyecto “Diseño e Implementación de un Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque Aplicando MATLAB”.

La tecnología del sistema de control es parte primordial en los procesos electromecánicos de la industria. El Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque Aplicando MATLAB, es un proyecto para la aplicación de los conocimientos teóricos fundamentados en:

Electrónica, Procesos Industriales y especialmente en Control Automático, con el fin de ejecutarlos de manera práctica en la perspectiva de satisfacer necesidades de controles automatizados en las industrias.

La Implementación del Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque Aplicando MATLAB, es un proyecto técnico didáctico, con los objetivos de fortalecer los procesos educativos y de investigación de los estudiantes en el área de Controles Automáticos.

Una de las ventajas del proyecto, es que se lo puede potencializar adaptándole equipos de mayor capacidad y con estas implementaciones las industrias obtendrían mejores resultados en la eficiencia y calidad en los procesos de elaboración de sus productos.

El funcionamiento de este sistema, consiste en el control y regulación del nivel de un tanque de agua, por medio de un sensor y una bomba DC. El caudal de entrada al tanque principal (tanque donde se controla el nivel de agua), es proporcionada por una bomba de succión DC, la misma que es controlada por variación de voltaje, controlando el caudal de la bomba, que succiona el agua desde el tanque de retroalimentación (tanque de alimentación de la bomba DC) hasta el

tanque principal y de esta manera se obtiene el control del caudal de agua de entrada al tanque principal.

El sistema tiene una válvula gradual en la parte inferior del tanque principal, que es la perturbación del sistema para alterar el nivel de agua del tanque principal, respecto al nivel deseado. El sensor de nivel transmite señales eléctricas (analógicas) al computador, que sirven para comparar y procesar con los algoritmos y simulaciones creados en el software de MATLAB, y por medio de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E transmite las señales eléctricas a la bomba y por ende controlar el caudal de entrada al tanque principal, hasta obtener el nivel deseado del sistema.

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN Y ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE NIVEL DE UN TANQUE.

1.1. Generalidades.

Esta planta fue construida con el propósito de estudiar algunos de los procesos más comunes en la industria como el control de nivel, además nos permite estudiar el método de funcionamiento de las nuevas tecnologías aplicadas al control por computadora, fue construida con el propósito de estudiar los criterios de estabilidad mediante la realización de prácticas de laboratorio dentro del curso de Control Automático. El sistema de control de nivel permite la interacción del estudiante con elementos reales de control e instrumentación, además ofrece un sistema de control que permite

la demostración de las teorías expuestas en clase. Se implementaron las más nuevas y versátiles tecnologías de adquisición y control por computadora, esta tecnología permitió controlar la planta desde el monitor de una computadora, a través de la programación de una interfase gráfica, además con la creación de un controlador virtual con las mismas características matemáticas de un controlador pero con la facilidad y permanencia de la calibración, que nos permite un software de computadora como el MATLAB, que con sus diversas funciones de simulación y adquisición de datos en tiempo real nos permite controlar la planta de nuestro sistema.

1.2. Descripción y esquema del sistema.

El sistema de control de nivel fue diseñado para trabajar en lazo cerrado, el lazo permite una mayor estabilidad para el control de nivel en el tanque principal. La Figura 1.2.1., presenta el esquema del sistema.

La función de este lazo es controlar el nivel de agua en el tanque principal, manteniéndolo lo más cercano al punto de operación (set point) a pesar de la perturbación que se le va infringir al sistema.

Cuando la bomba es encendida impulsa el agua desde el tanque de suministro hacia el tanque principal, donde el cambio de nivel del agua es proporcionado por el sensor.



FIGURA 1.2.1. ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL.

El caudal de agua que ingresa al tanque principal está en litros por minuto. En la parte superior del tanque principal se encuentra el sensor de nivel ultrasónico 873C el cual transmite una señal de voltaje analógica directamente proporcional al nivel del tanque principal y esta señal se habilita al bloque conector CB-68LP de entrada y salida de voltajes.

Al sistema ingresamos un punto de operación o nivel deseado, ya sea por software desde el programa MATLAB o manualmente por medio de un potenciómetro desde el panel de mando, que representa en escala el nivel de agua que se ingresa al sistema, el controlador debe procesar las variables para ajustar las condiciones de equilibrio del sistema para obtener en el tanque principal el nivel deseado de agua ante perturbaciones y sin perturbaciones, que lo llamaremos nivel obtenido (simulado).

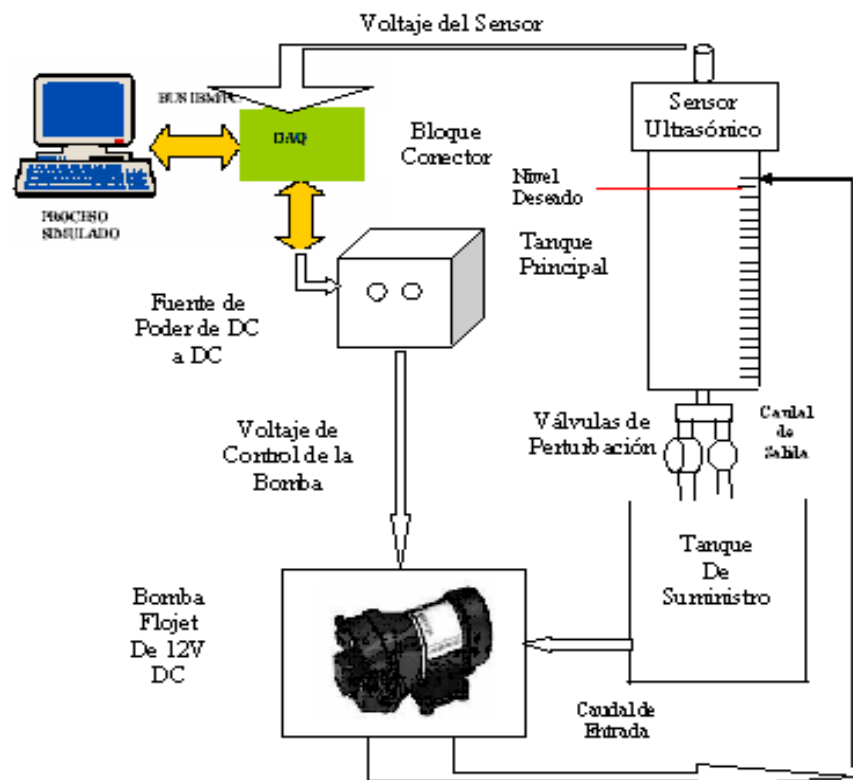


FIGURA 1.2.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL SISTEMA.

La Planta de Control y Regulación de Nivel funciona de la siguiente manera; la entrada de agua es suministrada por la bomba DC, la cual es controlada variando el voltaje de entrada a la bomba de succión, consiguiendo con esto una dosificación de agua a la entrada del tanque principal, proporcionando nivel de agua que será controlado continuamente por medio de un sensor de nivel ultrasónico, el que genera un voltaje que será suministrado a la computadora que realiza un proceso de comparación para estabilizar nuestro punto de operación.

La dinámica del controlador ya sea proporcional, integral o derivativo debe igualar el caudal de entrada del tanque principal con el caudal de salida de la válvula de compuerta abierta a dos vueltas fijas, más el caudal de la válvula ENCENDIDO/APAGADO de perturbación, para obtener el punto de operación del sistema estabilizado. En este instante el sistema se encuentra en equilibrio.

La válvula 2 de compuerta, es una válvula graduada en pasos de ángulos de 0 grados a 360 grados (1 vuelta), o por vueltas, por lo que posee una función de grados versus caudal.

Cuando el sistema se encuentra estabilizado en el punto de control, se aplica la perturbación al sistema por medio de un switch, la cual activa la válvula ENCENDIDO/APAGADO activándola o desactivándola dependiendo de la posición del switch.

En la activación de la perturbación del sistema el controlador debe estar bien diseñado estratégicamente para volver a estabilizar al sistema, es decir procesar las variables de entrada y salida para mantener el punto de operación.

1.2.1. Características del sistema de control.

La estabilidad, exactitud y rapidez de respuesta son características necesarias que debe tener todo sistema de control, los sistemas deben ser estables, y esto significa que la respuesta a una señal ya sea un cambio al punto de control o una perturbación, debe alcanzar y mantener un valor útil durante un período razonable.

Un sistema de control inestable producirá por ejemplo oscilaciones persistentes o de gran amplitud en la señal o

bien puede ser que la señal tome valores que corresponden a límites extremos.

En la planta hay límites extremos de inestabilidad definidos en el tanque principal; si el nivel deseado es mayor a 45 cm. el sistema se vuelve inestable y si el nivel es menor a 10 cm. el sistema también se torna inestable, porque la etapa amplificadora de voltaje DC a DC no tiene un comportamiento lineal en los valores límites de nivel descrito anteriormente que controla el voltaje de la bomba. Por lo que el rango de nivel de control para el punto de operación del tanque principal está entre los 15 cm. a 40 cm.

Cualquier tipo de respuesta característica de un sistema de control inestable es obviamente poco satisfactorio.

Uno de los objetivos de la mayoría de los sistemas de control es que la respuesta de salida del sistema siga una señal de referencia específica en forma exacta en el estado estable. La diferencia entre la salida y la referencia en estado estable se define como error en estado estable.

Un sistema de control es estable, partiendo de un estado de reposo definido, pasa a un nuevo estado de reposo bajo la acción de un cambio de su referencia. Además si las condiciones del sistema cambian, estos cambios o perturbaciones, no deberían afectar en su estado estable.

Para lograr este objetivo es necesario el dimensionamiento de un sistema controlador, que realice la acción correctiva, garantizando de acuerdo a las especificaciones del sistema, el obtener una situación estable deseada.

El error actuante es la comparación de la señal de entrada con la señal de salida más su retroalimentación, figura 1.2.1.1.

El error actuante como variable de comparación para el controlador de un sistema es una respuesta del cómo el sistema está respondiendo de acuerdo a la señal de entrada y salida, por lo que la estrategia de control es mantener la salida del sistema en el punto de operación según la señal de entrada, manteniendo el error del sistema a cero.

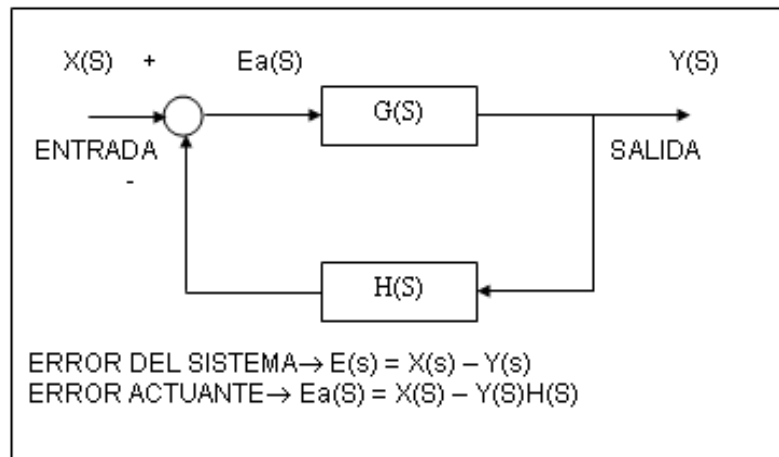


FIGURA 1.2.1.1. TIPOS DE ERRORES EN UN SISTEMA DE CONTROL.

El desarrollo y la disponibilidad de un software de computadora amigable y poderosa como MATLAB ha sido posible establecer los parámetros de ajuste para el controlador, la cual logre que el sistema se torne estable.

1.3. Elementos del sistema.

El sistema de control y regulación de nivel consta de las siguientes partes:

- Tanque principal.
- Tanque de retroalimentación o suministro.
- Sensor ultrasónico 873C de nivel.

- Bomba DC de 12 V DC de activación.
- Fuente de 12 V DC para la Bomba.
- Fuente regulable de 0 a 25 V DC para el Sensor ultrasónico.
- Soportes Metálicos.
- Tuberías, codos, uniones, abrazaderas y accesorios.
- Válvulas.
- Programa MATLAB.
- Tarjeta de adquisición PCI 6024-E de National Instruments.
- Bloque conector CB-68LP.
- Conector bus de datos Serie E.
- Computador Host.
- Computador Target.

1.3.1. Descripción del tanque principal.

En el tanque principal es donde se va a realizar el control del punto de operación del sistema, está hecho de vidrio. Para la construcción del tanque cúbico se utilizó las siguientes dimensiones:

- Ancho: 20 cm.
- Alto: 70 cm.
- Largo: 20 cm.

Con estas dimensiones el tanque principal tiene un área transversal de 400 cm^2 y un volumen de 28000 cm^3 , que es igual a 28 litros de capacidad.

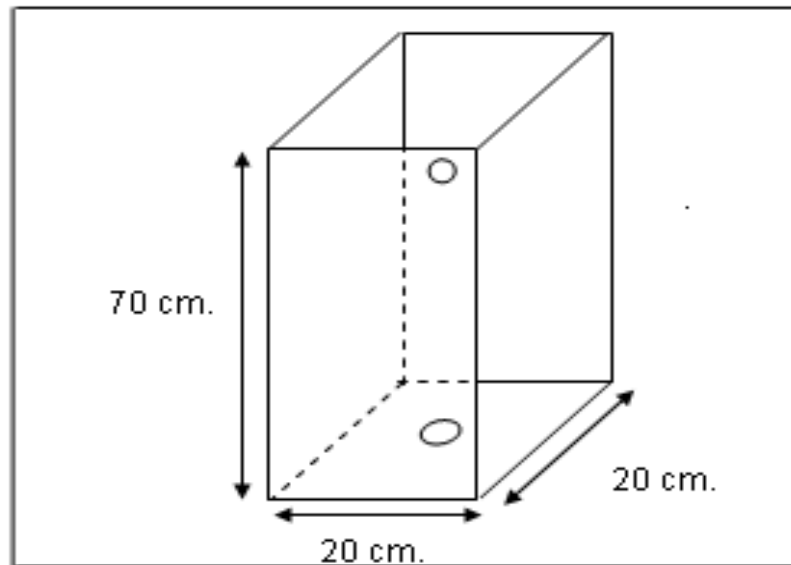


FIGURA 1.3.1.1. DIMENSIONES DEL TANQUE PRINCIPAL DE VIDRIO.

Realizamos dos orificios en este tanque, el uno de $\frac{1}{2}$ pulgada que se encuentra en la parte superior derecha que es por donde va a fluir el agua proporcionada por la bomba DC, y el otro de $\frac{1}{4}$ de pulgada en la parte inferior, por el cual se va a descargar el agua al tanque de suministro. En la parte superior del tanque colocamos un cubo igualmente de vidrio

para ubicar el sensor, ya que este necesita bastante estabilidad para su buen funcionamiento. (Ver anexo A).

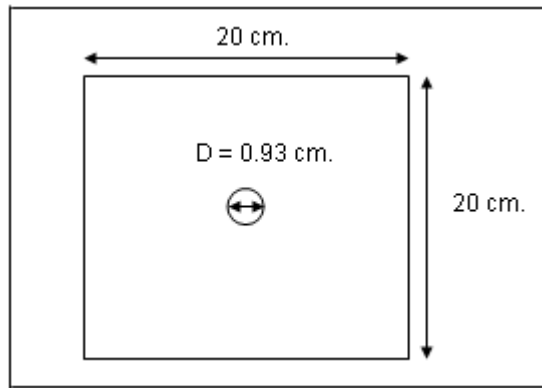


FIGURA 1.3.1.2. VISTA INFERIOR DEL TANQUE
PRINCIPAL DE VIDRIO.

1.3.2. Descripción del tanque de retroalimentación.

El tanque de retroalimentación o llamado el tanque de suministro, fue igualmente construido de vidrio con las siguientes dimensiones:

- Ancho: 25 cm.
- Alto: 50 cm.
- Largo: 25 cm.

Este a su vez sirve para cerrar el lazo de la planta, ya que este alimenta de agua a la bomba DC.

El diseño de las dimensiones del tanque de suministro, se la efectuó en función de la capacidad del tanque principal, ya que la capacidad del tanque de retroalimentación debe de ser mayor que la capacidad del tanque principal.

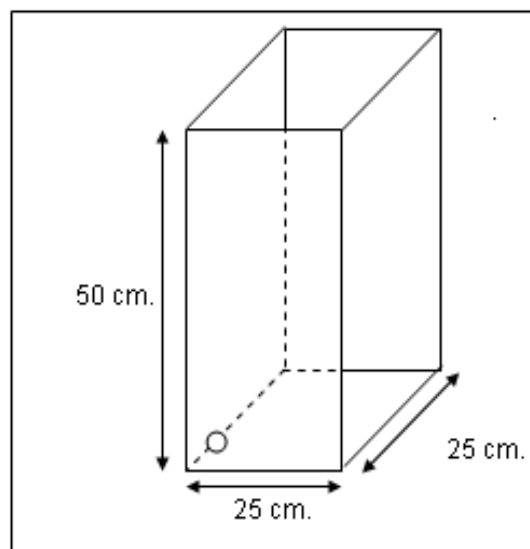


FIGURA 1.3.2.1. DIMENSIONES DEL TANQUE DE SUMINISTRO.

Donde el volumen del tanque de suministro es igual a 31250 cm^3 , que es igual a 31.25 litros de capacidad.

Este análisis se lo realizó basándose en el funcionamiento de la bomba DC para que en ningún momento absorba aire y cree perturbaciones al tanque principal y al sistema.

1.3.3. Descripción del sensor ultrasónico 873C.

Cuenta con un Sensor ultrasónico 873C eléctrico, el cual convierte la señal de variación de nivel en una señal de voltaje analógico entre 1 V DC a 10 V DC.

Tiene la capacidad de detectar objetos sólidos y líquidos desde una distancia de hasta 1 m y se encuentra en la parte superior del tanque principal.

Nuestro modelo es analógico el cual proporciona un voltaje de salida que varía linealmente con la distancia del objeto, la tecnología ultrasónica permite que un solo dispositivo haga el trabajo.

Debido a que el sensor ultrasónico depende de una onda de sonido reflejada para una correcta operación, tuvimos que considerar de suma importancia la forma, el material, la

temperatura y la posición del objeto. Estos deben seleccionarse para devolver el eco más fuerte posible.

La forma ideal del objeto que se va a detectar es una superficie lisa y plana. También pueden detectarse objetos redondos o dispares pero se reducirán las distancias de detección y/o los voltajes de salida analógica.

El objeto debe estar cerca al eje del cuerpo del sensor para ser detectado porque el emite pulsos ultrasónicos en un cono de 8 grados. Los objetos deben estar dentro del alcance de este cono para reflejar los impulsos y activar el interruptor.

La superficie del objeto también debe estar directamente frente al sensor para dar un eco apropiado, figura 1.3.3.1.

El sensor posee un LED indicador incorporado en la parte superior y a su lado posee un potenciómetro que sirve para realizar el ajuste de la posición adecuada para detectar el objeto con precisión, la cual el LED se enciende con una intensidad proporcional a la fuerza del eco del objeto que se está detectando.

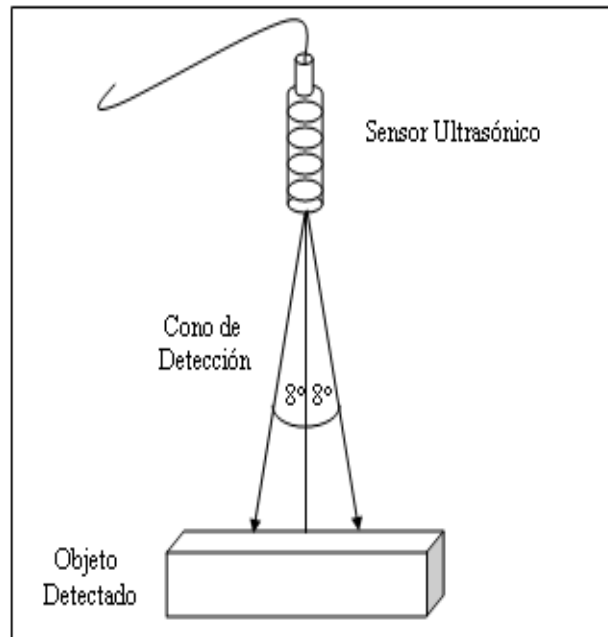


FIGURA 1.3.3.1. ÁNGULO MÍNIMO DE DETECCIÓN DEL SENSOR.

Simplemente colocamos el sensor en un punto de detección deseado, luego ajustamos la posición y ángulo del sensor para maximizar el brillo del LED y de esta manera obtener la mejor respuesta de señal del sensor. (Ver anexo A).

Los materiales suaves, tales como telas o caucho esponjoso, son difíciles de detectar por la tecnología ultrasónica porque no reflejan el sonido adecuadamente. Esto significa que los objetos que no son los que se desea detectar en el campo de detección pueden esconderse del sensor cubriéndolos con

material absorbente de sonido y/o colocándolos de manera que sus ecos no sean reflejados hacia el sensor. Para una detección confiable, la temperatura del objeto y del ambiente debe ser entre -25°C a 70°C , y este rango de temperatura es donde el sensor opera establemente (Ver anexo A).



FIGURA 1.3.3.2. SENSOR ULTRASÓNICO 873C.

El sensor ultrasónico 873C es de la marca Allen Brandley este es para una columna máxima de agua aproximadamente 1 m. de agua en el tanque principal, este sensor va acorde con las dimensiones del tanque principal, 70 cm. de alto, lo que nos permite tener una buena resolución en las lecturas de nivel del tanque principal.

1.3.4. Descripción de la bomba DC.

La bomba DC es la parte principal de nuestra planta, vamos a controlar su caudal haciendo variaciones de voltaje a la entrada de la misma.

Antes de elegir la bomba DC para el diseño de nuestra planta tuvimos algunas alternativas, pero por ser menos factibles, fueron rechazadas, las cuales se describirán a continuación:

1. Bomba monofásica 110 V AC y una válvula neumática con un sistema de abertura proporcional, la cual fue rechazada por su alto costo de operación que sobrepasaba los 1500 dólares.
2. Bomba monofásica 110 V AC y un variador de frecuencia trifásico, a pesar que su costo no era alto, no fue aceptada por la falta de compatibilidad entre la bomba y el variador, no se los pudo hacer trabajar.
3. Bomba trifásica de 2 HP y un variador de frecuencia, fue poco factible, ya que para la elaboración de una

planta, hubiera sido necesario comprar tanques con una capacidad mínima de 500 litros, la construcción hubiera sido sobredimensionada para nuestro interés de crear una práctica de laboratorio.

4. Bomba monofásica 110 V AC y un variador de frecuencia monofásico, fue complicado ya que en el mercado local no existe este tipo de variador, también las bombas que se venden, tienen a la entrada de conexión un condensador que hace imposible trabajar a frecuencias por debajo de 60 Hz.

Continuamos con nuestra investigación, por Internet, hasta que un proyecto de investigadores sobre diseño de control de nivel recomendaba la utilización de una bomba DC por su alta linealidad entre el voltaje de entrada y el caudal de salida que esta proporcionaba.

Nos encontramos con un problema que en el Ecuador no venden este tipo de bombas, entonces tuvimos que comunicarnos con un distribuidor en Buenos Aire - Argentina

llamado COSTANERA UNO, y la importamos por medio del departamento de suministro de la ESPOL.

En la actualidad existen distribuidores en Guayaquil que venden bombas DC a 12 V y 24 V, las cuales sirven para el desarrollo de proyectos de regadío, utilizando energía solar.

La Bomba FLOJET de 12 V DC posee un motor DC de imán permanente más un módulo de diafragmas, estas desplazan el agua por medio de diafragmas de un material flexible y resistente, comúnmente se fabrican de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo, dependiendo de la calidad del agua (Ver Anexo A, Bomba Flojet).

Cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de los diafragmas una vez cada dos o tres años. Más aún, muchas de estas bombas tienen un motor de corriente continua con escobillas. Las escobillas también deben cambiarse

periódicamente. Los juegos de reemplazo incluyen los diafragmas, escobillas, empaques y sellos. La vida útil de este tipo de bomba es aproximadamente 5 años del uso. (Ver Anexo A, Bomba Flojet).



FIGURA 1.3.4.1. BOMBA FLOJET DE 12 VOLTIOS DC.

1.3.5. Descripción del programa MATLAB.

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”, MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices.

Como caso particular puede también trabajar con números escalares, tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas.

Una de las capacidades más atractivas es la amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones que puede realizar. Además MATLAB posee un lenguaje de programación propio.

Es un entorno fácil de usar, donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional.

MATLAB se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales. MATLAB también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas TOOLBOXES. Estas son muy importantes para la mayoría de los usuarios de MATLAB y son conjuntos de funciones que extienden el entorno MATLAB para resolver clases particulares de problemas (Ver Anexo B, MATLAB).

En concreto encontramos las herramientas como el control System Toolbox, Simulink, xPC Target y otras funciones más de MATLAB que son herramientas fundamentales para

obtener el diseño y controlador del sistema en tiempo real. Cada una de estas funciones se tratará con más detalle en los capítulos números 3 y 4.

1.3.6. Soportes Metálicos.

En la estructura de la planta se utilizaron 6 soportes metálicos de una distancia de 2 m. de longitud cada uno, para diseñar la estructura y base de soporte para los tanques del sistema, para la bomba DC y para las etapas amplificadoras de la planta. Las dimensiones de la estructura metálica son:

Ancho: 37 cm.

Alto: 172 cm.

Largo: 37 cm.

1.3.7. Tuberías.

Los tanques de la planta están interconectados por una red de tuberías (mangueras de $\frac{1}{2}$ pulgada de plástico), y accesorios (neplos, conectores, abrazaderas, etc.).

Se ha utilizado mangueras de plástico transparente, por su facilidad de manejo, y presentación didáctica de la planta las cuales con la ayuda de accesorios como conectores, codos, neoplos, reductores, abrazaderas, y teflón a sido posible la implementación de la planta.

1.3.8. Válvulas.

La simulación del suministro de líquido del tanque principal al tanque de retroalimentación se la realiza mediante el ajuste de una válvula de compuerta a la salida del tanque principal.

La válvula seleccionada es una válvula de compuerta de $\frac{1}{2}$ pulgada con la cual se puede ajustar el punto de operación del tanque principal.

Para simular el efecto de una variación de carga en el caudal de salida del tanque principal, se conectó en paralelo a la anterior válvula una de tipo ENCENDIDO/APAGADO operada eléctricamente.

Para la elección de la válvula de compuerta se tuvo algunas alternativas, pero se escogió la que mejor se ajustaba a nuestro control y la que posee mejor linealidad en relación a la abertura de la válvula versus caudal proporcionado. Ya que muchas desarrollan inestabilidad al sistema. (Ver Anexo A, Válvulas).

Esta válvula de compuerta la definimos como válvula gradual, ya que posee en su rosca un graduador adaptado de 360 grados, para mostrar los pequeños grados o vueltas completas de ajuste que se realiza al sistema, como se muestra en la figura 1.3.8.1.

La válvula que se encuentra entre el tanque de suministro y la bomba DC es simplemente de paso, para habilitar el flujo de entrada a la bomba, no está dentro del análisis de control del sistema, ya que normalmente está abierta, para mantener cebada nuestra bomba DC y no absorba aire la cual produce problemas de retardo y funcionamiento y por ende al sistema.

Para activar la perturbación del sistema se colocó una válvula de ENCENDIDO / APAGADO de $\frac{1}{2}$ pulgada, en la tubería

paralela de la válvula gradual de compuerta para ejecutar la perturbación del sistema, por medio de un switch instalado en el panel de mando.

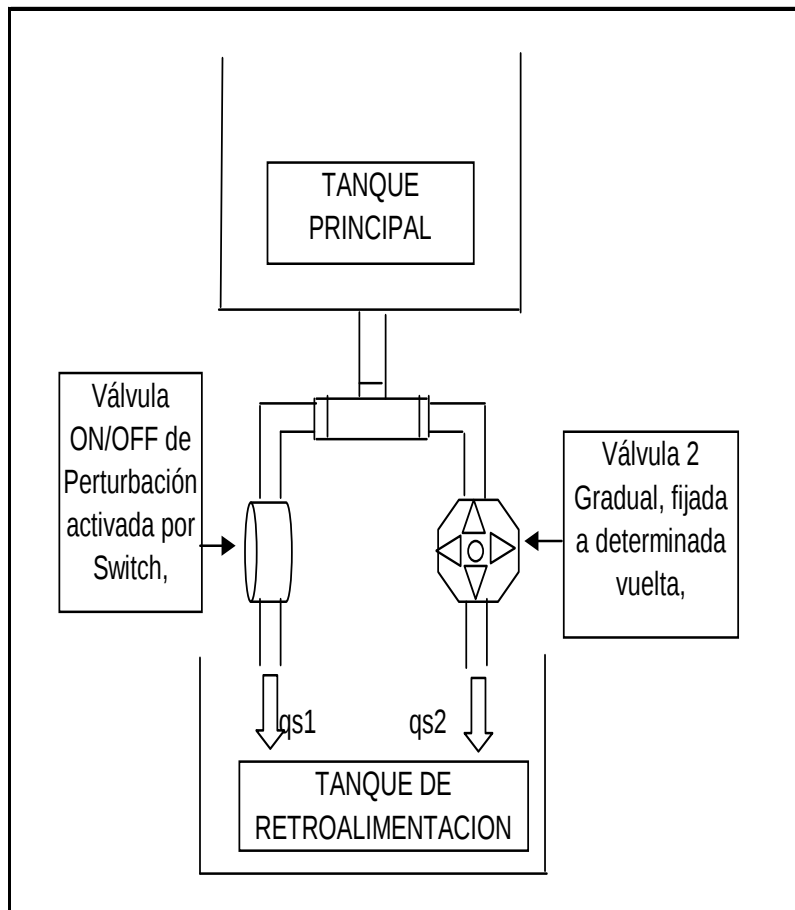


FIGURA 1.3.8.1. ESQUEMA DE LAS VÁLVULAS DE PERTURBACIÓN DEL SISTEMA.

1.4. Etapas de Poder.

1.4.1. Descripción de la fuente de poder de la bomba DC de succión.

Para acoplar la señal de salida de la tarjeta de adquisición de datos que maneja MATLAB y la bomba DC fue necesario adquirir una fuente de Poder o etapa amplificadora con señal de entrada 0 a 5 V DC y salida de 0 a 12 V DC y a 10 A. (Ver Anexo A, Fuente de poder de Bomba DC).

La técnica utilizada para controlar la variación de voltaje del amplificador de la bomba es el uso de la Modulación del Ancho de Pulso (PWM) para voltaje DC. Por medio de esta técnica controlar la variación de voltaje de la bomba y así poder controlar la velocidad de rotación, es decir que la tensión aplicada al motor será de 0 V ó 12 V DC de manera periódica de modo que las RPM del motor corresponderán (aproximadamente) a la siguiente fórmula:

$$\text{RPM} = (\text{DC} \times \text{RPM}_{12\text{VDC}}) / 100\%$$

Donde RPM 12 V DC = 1200 (la nominal del motor a 12 V DC), y DC es el "duty cycle" (en %) de la tensión (onda cuadrada periódica de 0 V y 12 V DC) aplicada al motor:

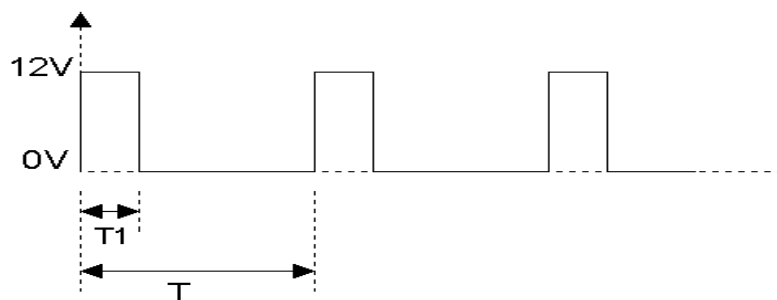


FIGURA 1.4.1.1. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO O PWM.

$$DC = (T1/T) \cdot 100\%$$

Donde:

T; es el período de la señal generada por el PWM.

Y T1; es el tiempo del ancho de pulso del flanco positivo.

Ejemplo: Si DC = 50%, las RPM serán 600. Casos extremos:

Si DC = 0 el motor esta apagado, DC = 100% el motor gira a 1200 RPM. Realmente no es una relación lineal entre el DC y

las RPM, pero eso se puede corregir experimentalmente modificando el programa de control del sistema.

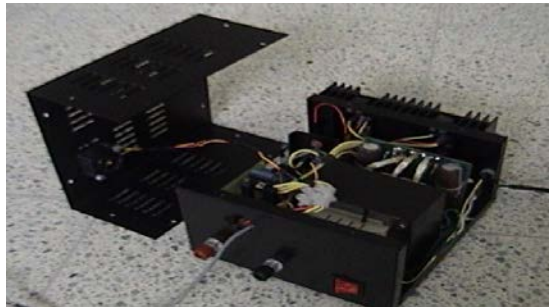


FIGURA 1.4.1.2. FUENTE DE PODER DE LA BOMBA DC.

1.4.2. Descripción de la fuente de poder del sensor ultrasónico 873C.

Para energizar el sensor ultrasónico 873C construimos una fuente de voltaje que se puede regular de 0 a 30 V DC, y para una carga de 1 A. Con esta fuente activamos el funcionamiento del sensor. (Ver Anexo A, Fuente de Alimentación Regulable de 25 V DC a 1 A.).



FIGURA 1.4.2.1. FUENTE DE VOLTAJE PARA EL SENSOR.

1.4.3. Descripción de la tarjeta electrónica para la activación de la válvula ENCENDIDO/APAGADO de descarga.

Para la activación de la válvula ENCENDIDO/APAGADO de perturbación a 110 V AC, se utilizó un switch de dos posiciones que se encuentra ubicado en el panel de controles, la cual se activa cuando el switch esta en posición ON y de igual manera la apagamos cuando el switch está en posición OFF. (Ver anexo A, Activación de la Válvula ENCENDIDO / APAGADO).

Esta tarjeta se diseño para la activación de la perturbación del sistema manualmente por medio de un switch, que abre o cierra la válvula creando así la variación de nivel del sistema.

1.4.4. Descripción de ajuste de la referencia de nivel en modo manual a automático.

Para realizar el ajuste de nivel en el tanque principal se lo realiza inicialmente de modo manual, haciendo la adquisición en lazo abierto, hasta llegar al nivel deseado.

Una vez obtenido el nivel de trabajo deseado se realiza la conmutación de modo manual a modo automático, cerrando el lazo del sistema.

Con esto protegemos el sistema de voltajes altos, evitando el daño de la tarjeta de adquisición, aunque nuestro diseño tiene limitadores de voltaje, para una mayor protección.

Para que nuestra planta sea lo más parecido a un proceso industrial, habilitamos una entrada más a nuestra adquisición, la cual enviará diferentes voltajes por medio de un potenciómetro instalado en el panel de mando de la planta, que sirve para ajustar diferentes niveles de agua en forma manual y desconectándonos por completo del computador Host (computador principal o controlador) por medio de este potenciómetro podemos trabajar y controlar de manera independiente la planta, como se muestra en la figura 1.4.4.1.



FIGURA 1.4.4.1. AJUSTE MANUAL DEL SISTEMA.

CAPÍTULO 2

2. ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA Y ESTRATEGÍA DE AJUSTE PARA EL CONTROLADOR DEL SISTEMA.

2.1. Generalidades.

El primer paso importante en el análisis y diseño de nuestro sistema de control y regulación de nivel fue el modelado matemático de cada una de las etapas que conformaban el sistema.

Se definió el conjunto de variables, que a su vez están interrelacionadas a través de leyes físicas establecidas. Los estudios de los sistemas de control dependen fuertemente del uso y aplicación de las matemáticas, y en nuestro caso no fue la excepción.

Por razones prácticas, para establecer una clase de análisis aplicable, se hicieron suposiciones y aproximaciones de forma que puedan ser estudiados utilizando la teoría de sistemas lineales.

A continuación detallaremos el esquema del sistema de regulación y control de nivel, figura 2.1.1.

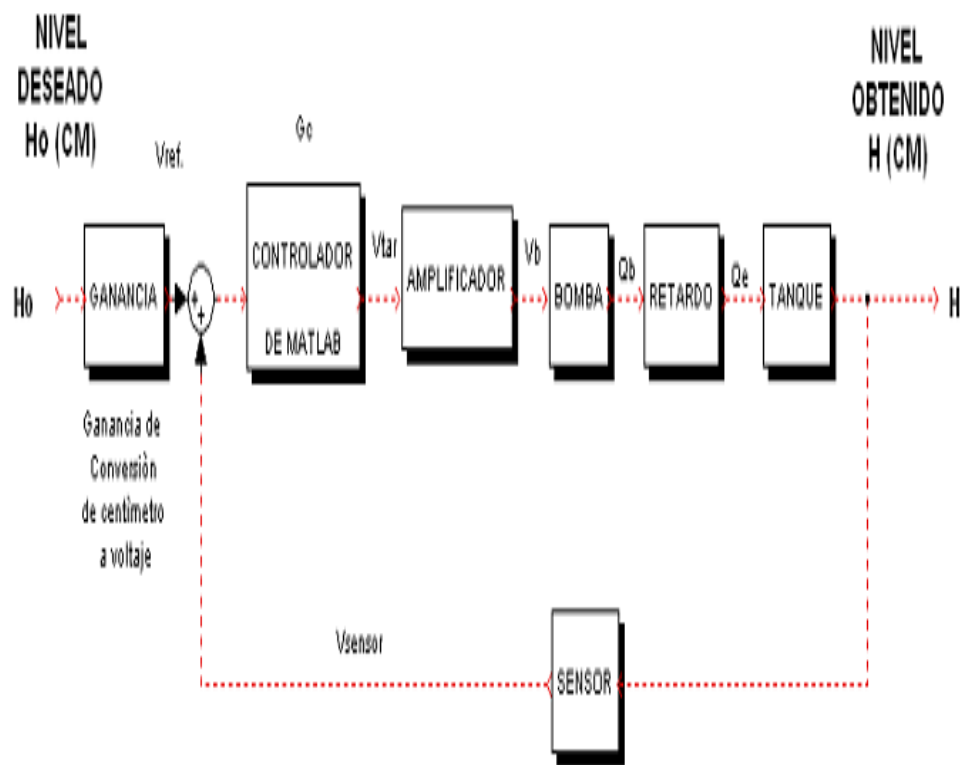


FIGURA 2.1.1. ESQUEMA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE NIVEL.

2.2. Modelo Matemático del Sistema.

Se ha comprobado que las técnicas de las transformadas de Laplace y linealización son particularmente útiles para el análisis de la dinámica de procesos y diseño de sistemas de control, debido a que proporcionan una visión general del comportamiento de gran variedad de procesos e instrumentos.

En la figura 2.2.1., que mostramos a continuación se detalla los componentes físicos de la planta.



FIGURA 2.2.1. GRÁFICO DE LA PLANTA.

MODELADO DEL TANQUE PRINCIPAL.

Nuestra planta está constituida de un tanque principal de vidrio de 0,6 cm. de grosor y con un volumen de 28 litros de capacidad, ubicado en la parte superior de la estructura metálica, el cual en su base tiene empotrado un tubo de plástico, cuyo diámetro interior es de 0.93 cm., que es por donde se va descargar el agua hacia el tanque de suministro.

La sección transversal del tubo de descarga está definida a continuación por *AREA1*:

$$AREA1 = R^2 \times \Pi \quad (2.1)$$

Donde R es el radio en centímetro del tubo de descarga del tanque principal, y $R = D/2$; donde D es el diámetro del tubo de descarga.

En la figura 2.2.2., se muestra la vista inferior de la base del tanque principal.

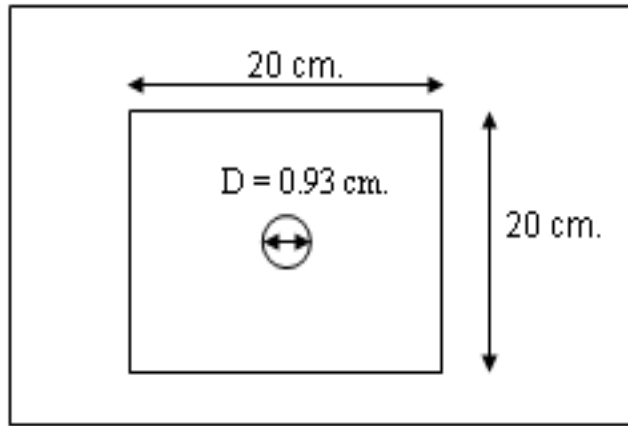


FIGURA 2.2.2. VISTA INFERIOR DEL TANQUE PRINCIPAL.

Donde $R = D / 2$; $R = 0.93 / 2$; por lo que $R = 0.465$ cm.

Reemplazando en la ecuación 2.1, se obtiene que:

$$AREA1 = R^2 \times 3.1416$$

$$AREA1 = (0.465)^2 \times 3.1416$$

$$AREA1 = 0.67929 \text{ cm}^2.$$

A continuación definiremos la ecuación que se ajusta a nuestro tanque principal:

$$\partial \frac{(\rho \times V_R)}{\partial t} = \rho \times q_e - \rho \times q_s \quad (2.2)$$

Ecuación de balance de masa total

Donde:

V_R : Volumen del tanque [cm³]

ρ : Densidad del fluido [g/cm³]

q_e : Caudal de entrada al tanque principal [cm³/s]

q_s : Caudal de salida del tanque principal [cm³/s]

Para facilidad de nuestro análisis convertimos la ecuación 2.2, utilizando la relación del volumen con el área (volumen = área x altura) y dividiendo ambos miembros de la ecuación para la densidad, obteniendo al final y de manera simplificada la siguiente ecuación.

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} = q_e - q_s \quad (2.3)$$

Donde:

A: Área de sección transversal del tanque principal.

En nuestro caso $A = 400 \text{ cm}^2$.

h: nivel de altura del tanque principal.

Reemplazando el valor de A en la ecuación 2.3 obtenemos:

$$q_e(t) - q_s(t) = 400 \times \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

Mediante la ecuación de Bernoulli (Referencia: Libro de Física fundamental de Michael Valero, mecánica de Fluidos) podemos definir que el q_s (caudal de salida del tanque) depende de la altura y de un coeficiente de descarga del tanque principal a la que llamaremos k .

$$q_s = k \times \sqrt{h} \quad (2.5a)$$

Donde k esta definido por:

$$k = C_d \times AREA1 \times \sqrt{2 \times g} \quad (2.6)$$

C_d : Es el coeficiente de rozamiento por tuberías, es nuestro caso es $C_d = 0.69$.

g : Es la constante de la gravedad (980 cm/s^2).

$AREA1$: Es el área de la sección transversal del tubo empotrado en la base del tanque principal.

Reemplazando la ecuación 2.6 en la ecuación 2.5a tenemos:

$$q_s = 0.69 \times 0.67929 \times \sqrt{2 \times 980 \times h}$$

$$q_s = 20.7509 \times \sqrt{h} \quad (2.5)$$

Reemplazando la ecuación 2.5 en 2.4 nos queda la siguiente expresión:

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} = q_e - k\sqrt{h} \quad (2.7)$$

Al despejar el q_e (caudal de entrada) nos queda la siguiente expresión:

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} + k\sqrt{h} = q_e \quad (2.8)$$

De esta manera relacionamos el caudal de entrada q_e y el caudal de salida q_s .

En la ecuación 2.8, se observa que la dinámica del tanque principal no es lineal, por lo que aplicaremos linealización en la ecuación diferencial.

Si el sistema se encuentra en equilibrio, se tiene que el caudal de entrada es igual al de salida, y por tanto el nivel de agua en el tanque principal se mantiene constante, por lo que tenemos:

$$q_e(t) - q_s(t) = 0 \quad (2.9)$$

MODELADO DEL SENSOR

Para obtener la ecuación que modela el sensor, se tuvo que hacer mediciones de voltaje para diferentes niveles de líquido en el tanque principal y se lo representó por V_s .

Esta tabla representa los datos obtenidos de voltaje del sensor a diferentes niveles de agua del tanque principal.

A partir de los datos de la tabla 1 obtenemos la siguiente gráfica.

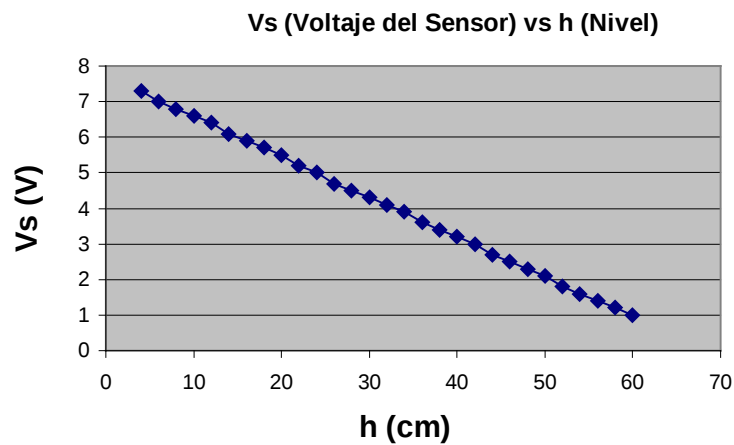


FIGURA 2.2.3. CURVA CARACTERÍSTICA DEL SENSOR ULTRASÓNICO, RELACIONANDO VOLTAJE VERSUS NIVEL.

De la figura 2.2.3., obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_s(t) = -0.1127h(t) + 7.7040 \quad [V] \quad (2.10)$$

Donde:

$v_s(t)$: es el voltaje del sensor. [V]

$h(t)$: altura del nivel del líquido. [cm.]

TABLA 1

VOLTAJE DEL SENSOR A DIFERENTES NIVELES.

h (Nivel en cm.)	vs (Voltaje del sensor en V.)
60	1,02
58	1,22
56	1,42
54	1,62
52	1,82
50	2,12
48	2,34
46	2,52
44	2,75
42	3,04
40	3,21
38	3,46
36	3,65
34	3,82
32	3,91
30	4,05
28	4,45
26	4,98
24	5,32
22	5,38
20	5,52
18	5,71
16	5,94
14	6,12
12	6,42
10	6,62
8	6,83
6	7,02
4	7,32

MODELADO DE BOMBA DC.

Ante la falta de información de las características internas de la bomba, nos vimos obligados a determinar la ecuación de la bomba de manera estática, y para esto aplicamos diferentes voltajes a la entrada de la bomba, obteniendo caudales diferentes.

Para obtener el caudal que proporciona la bomba, a diferentes valores de voltaje, por la falta de un instrumento de medición de flujo, se tomaron valores de tiempo que se tarda en llenar un recipiente de capacidad de un litro, a diferentes voltajes entre 1 V a 12 V DC.

Luego con esta información obtenida, dividimos el valor de 1 litro para cada uno de los tiempos promedios obtenidos a diferentes voltajes, ya que se hicieron 4 mediciones de tiempo por cada valor de voltaje y de esta manera obtenemos el caudal proporcionado por la bomba DC.

Donde:

$v_b(t)$: es el voltaje DC aplicado a la bomba

$q_e(t)$: caudal de entrada al tanque principal

Podemos decir que el caudal proporcionado por la bomba, es el caudal de entrada al tanque principal.

En la tabla 2, se describe las mediciones que se realizaron, respecto a los diferentes voltajes que se aplicó a la bomba DC, desde 2 V DC a 11.43 V DC en pasos de 0.5 V DC, y se realizaron cuatros mediciones de tiempo (t_1 , t_2 , t_3 y t_4), para obtener el tiempo promedio, y de esta manera obtener el caudal (Volumen/tiempo) a cada voltaje de ingreso a la bomba para una capacidad de 1litro.

A partir de tabla 2, graficamos los puntos de caudal de entrada q_e versus voltaje aplicado a la bomba v_b .

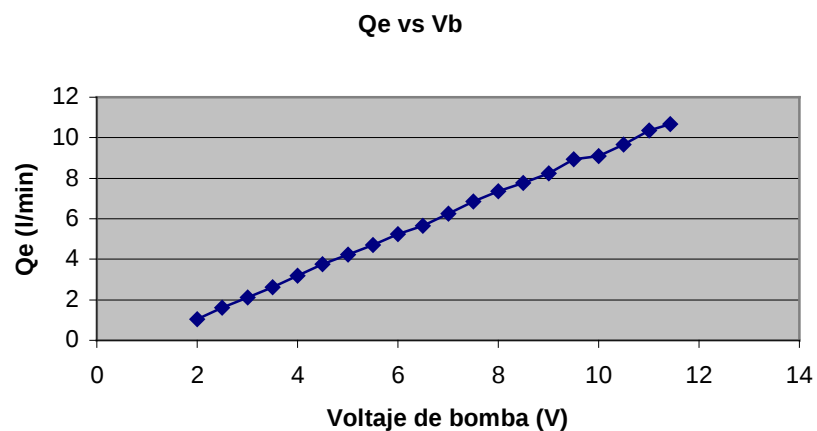


FIGURA 2.2.4. CURVA CARACTERÍSTICA DEL CAUDAL DE ENTRADA A DIFERENTES VOLTAJES DE LA BOMBA.

TABLA 2

VOLTAJE APLICADO A LA BOMBA PARA PROPORCIONAR

DIFERENTES NIVELES.

PARÁMETROS DE VOLTAJE APLICADO A LA BOMBA DC DE SUCCIÓN RESPECTO AL CUADAL QUE ENTREGA									
$V_{tarj.}$ (tarjeta)	V_b (bomba)	$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$t_4(s)$	Prom. t (s)	Prom. (min.)	q_e (l/min)	q_e (cm ³ /s)
4,83	11,43	5,81	5,5	5,53	5,66	5,63	0,09	10,67	177,78
4,63	11,0	5,41	5,9	5,9	5,94	5,79	0,10	10,37	172,79
4,43	10,5	6,19	6,35	6,28	6,05	6,22	0,10	9,65	160,84
4,21	10,0	6,5	6,75	6,65	6,53	6,61	0,11	9,08	151,34
3,96	9,5	6,63	6,93	6,59	6,75	6,73	0,11	8,92	148,70
3,63	9,0	7,43	7,04	7,22	7,38	7,27	0,12	8,26	137,60
3,33	8,5	7,72	7,88	7,43	7,87	7,73	0,13	7,77	129,45
3,04	8,0	8,43	8,32	8,00	7,88	8,16	0,14	7,36	122,59
2,8	7,5	8,75	9,03	8,81	8,5	8,77	0,15	6,84	113,99
2,55	7,0	9,72	9,5	9,47	9,66	9,59	0,16	6,26	104,30
2,35	6,5	10,69	10,78	10,25	10,63	10,59	0,18	5,67	94,45
2,15	6,0	11,44	11,22	11,59	11,56	11,45	0,19	5,24	87,32
1,96	5,5	12,81	12,78	12,47	12,9	12,74	0,21	4,71	78,49
1,77	5,0	14,32	14,25	14,1	14,22	14,22	0,24	4,22	70,31
1,61	4,5	16,03	15,97	16,19	15,94	16,03	0,27	3,74	62,37
1,44	4,0	18,75	18,6	18,8	18,78	18,73	0,31	3,20	53,38
1,29	3,5	22,34	23,32	22,94	22,91	22,88	0,38	2,62	43,71
1,14	3,0	28,0	28,5	28,69	29,00	28,55	0,48	2,10	35,03
1,01	2,5	37,12	37,75	37,06	36,72	37,16	0,62	1,61	26,91
0,87	2,0	56,85	55,29	58,22	57,0	56,84	0,95	1,06	17,59

De la figura 2.2.3 obtuvimos la siguiente ecuación:

$$q_e(t) = 1.0120v_b(t) - 0.055 \text{ [l/min]} \quad (2.11)$$

$$q_e(t) = 16.866v_b(t) - 0.9169 \text{ [cm}^3\text{/s]} \quad (2.12)$$

MODELADO DEL AMPLIFICADOR.

Desarrollamos una etapa amplificadora, con la cual podemos hacer funcionar la bomba, puesto que el amperaje proporcionado por la tarjeta de adquisición no tiene la capacidad de encender la bomba.

Para obtener la ecuación característica que relaciona el voltaje proporcionada por la tarjeta de adquisición PCI 6024E, y el voltaje a la entrada de la bomba, se tomo diferentes datos de voltajes de tarjeta de adquisición versus voltaje DC aplicado a la bomba.

En la tabla 2, se detalló los diferentes voltajes de la tarjeta de adquisición versus voltaje aplicado a la bomba, de estos datos obtenemos la figura 2.2.5, que describe la curva característica de la etapa amplificadora.

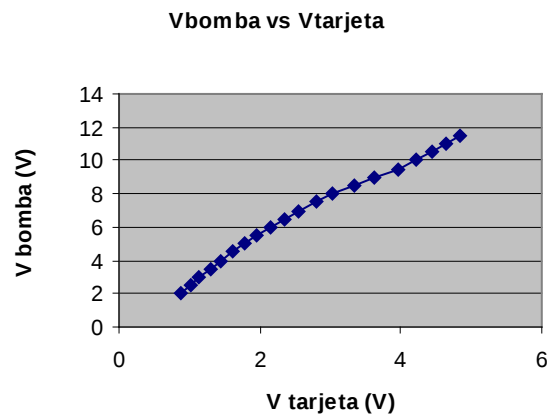


FIGURA 2.2.5. CURVA CARACTERÍSTICA DEL VOLTAJE DE LA TARJETA PCI6024E A LA ENTRADA DE LA BOMBA (ETAPA AMPLIFICADORA).

Voltaje de la tarjeta versus el voltaje aplicado a la bomba:

$$v_b(t) = 2.4096(v_{tarj.}(t)) + 0.7349 \quad [V] \quad (2.13)$$

Donde:

$v_b(t)$: es el voltaje DC aplicado a la bomba.

$V_{tarj.}(t)$: es el voltaje proporcionado por la tarjeta de adquisición que varía entre 0 a 5 V DC.

La ecuación 2.13, nos ayuda a obtener la ganancia de la etapa amplificadora que activa la bomba DC.

RETARDO

En nuestro sistema existe retardo, por lo que se debe tomar en cuenta en el análisis del sistema. El retardo se debe al tiempo en que tarda en recorrer el flujo desde la bomba al tanque principal a través de la tubería de ½ pulgada de ancho.

El tiempo de retardo de este sistema se define de la siguiente manera:

$$Q = A_t \times \text{Vel.} \quad (2.14)$$

Donde Q es el caudal a través de la tubería de ½ pulgada.

- A_t : es el área de la sección transversal interna de la tubería de ½ pulgada.
- Vel: es la velocidad con que fluye el caudal, y donde $\text{Vel} = \text{Dist.}/t$.
- Dist: es la distancia de la tubería de ½ pulgada.
- t: es el tiempo en que tarda el caudal en recorrer la tubería hasta el tanque principal, y es la variable que se va a determinar.

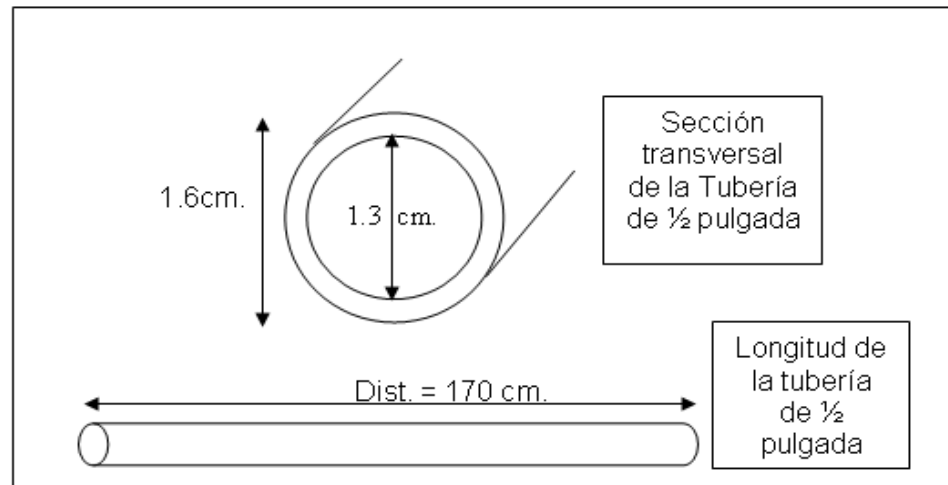


FIGURA 2.2.6. SECCIÓN TRANSVERSAL Y LONGITUD DE LA TUBERÍA DE 1/2 PULGADA UTILIZADA EN LA PLANTA.

$$A_t = \pi R^2$$

$$A_t = 3.1416 \times (0.65\text{cm})^2.$$

$$A_t = 1.3273\text{cm}^2$$

Utilizando la ecuación 2.14, y reemplazando $Vel = Dist./t$, tenemos:

$$Q = A_t \times (Dist./t) \quad (2.15)$$

Y con la ayuda de la tabla 2.2, seleccionamos el valor de caudal de entrada al sistema de la bomba que es 10 l/min. = 166.67 cm³/s, este

valor es el caudal de arranque de la bomba, reemplazando el valor en la ecuación 2.15, obtenemos:

$$Q = A_t \times (\text{Dist.} / t)$$

$$166.67 \text{ cm}^3/\text{s} = 1.3273 \text{ cm}^2 \times (170 \text{ cm}/t)$$

Despejando t, tenemos:

$$t = 1.3538 \text{ s.}$$

Entonces obtenemos el tiempo de retardo del sistema como:

$$q_e(t) = q_e \times (t - 1.3538) \quad (2.16)$$

2.2.1. Ecuaciones generales del sistema en el tiempo.

Las ecuaciones que definen nuestro sistema en función del tiempo son:

Análisis del Sistema:

Redefinimos las ecuaciones halladas como:

Caudal de Entrada q_e :

$$q_e(t) = 1.0120v_b(t) - 0.055 \quad [\text{l/min}] \quad (2.17)$$

$$q_e(t) = 16.866v_b(t) - 0.9169 \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (2.18)$$

Caudal de Salida q_s :

$$q_s(t) = 20.7509\sqrt{h(t)} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (2.19)$$

Sensor de Nivel v_s :

$$v_s(t) = -0.1127h(t) + 7.7040 \quad [\text{V/cm}] \quad (2.20)$$

Controlador de Nivel v_c :

$$V_c(t) = K [v_{\text{ref}}(t) - v_s(t)] \quad [\text{V}] \quad (2.21)$$

Donde:

v_{ref} : es el voltaje referencial aplicado al sistema en función del nivel deseado.

K: es la constante de proporcionalidad del controlador de nivel.

Voltaje de la Tarjeta aplicado a la Bomba v_{tarj} :

$$v_b(t) = 2.4096v_{tarj.}(t) + 0.7349 \quad [V] \quad (2.22)$$

2.2.2. Toma de puntos de calibración para la evaluación de las ecuaciones del sistema.

A continuación procedemos a evaluar las distintas variables en el punto de equilibrio, asumiendo que las derivadas de las ecuaciones son nulas.

$$(2.18) \quad q_e(t) = 16.866v_b(t) - 0.9169 \quad [cm^3/s]$$

$$(2.19) \quad q_s(t) = 20.7509\sqrt{h(t)} \quad [cm^3/s]$$

$$(2.20) \quad v_s(t) = -0.1127h(t) + 7.7040 \quad [V]$$

$$(2.21) \quad v_c(t) = K(v_{ref}(t) - v_s(t)) \quad [V]$$

$$(2.22) \quad v_b(t) = 2.4096v_{tarj.}(t) + 0.7349 \quad [V]$$

$$(2.10) \quad q_e(t) - q_s(t) = 0; \text{ punto de equilibrio.}$$

Con un nivel de $h_0 = 25$ cm., reemplazamos en las ecuaciones para obtener los puntos de equilibrio de las ecuaciones.

Reemplazando $h_0 = 25$ cm. en la ecuación 2.20 tenemos:

$$V_{s0}(t) = -0.1127h_0(t) + 7.7040$$

$$V_{s0}(t) = -0.1127 \times (25) + 7.7040$$

$$V_{s0}(t) = 4.8865 \text{ V DC.}$$

Ahora el valor de $v_{s0}(t)$ reemplazamos en la ecuación 2.21:

$$V_{co}(t) = K(v_{refo}(t) - v_{s0}(t)) ;$$

Donde: $v_{refo} = 5.22 \text{ V DC}$, del sensor a un nivel de 25 cm., respecto a los datos de la tabla 2.1.

$$V_{co}(t) = K(5.22 - 4.89)$$

$$V_{co}(t) = K(0.33 \text{ V DC})$$

Donde K es un valor real para el controlador.

Reemplazando $h_0 = 25 \text{ cm.}$, en la ecuación 2.19 tenemos:

$$q_{s0}(t) = 20.7509 \sqrt{h_0(t)}$$

$$q_{s0}(t) = 20.7509 \times \sqrt{25}$$

$$q_{s0}(t) = 103.7545 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Analizamos ahora la ecuación 2.9 de equilibrio del sistema:

$$q_{e0}(t) - q_{s0}(t) = 0$$

Esta ecuación nos indica que el caudal de entrada es igual al caudal de salida del tanque principal y por lo tanto el nivel de agua se mantiene constante.

Por lo que tenemos la siguiente ecuación:

$$q_{e0}(t) = q_{s0}(t) \quad (2.23)$$

Reemplazando la ecuación 2.18 en la ecuación 2.23 y reemplazando el valor de $q_{s10}(t)$ tenemos:

$$16.866v_{b0}(t) - 0.9169 = 103.4575$$

$$16.866v_{b0}(t) = 103.4575 + 0.9169$$

$$v_{b0}(t) = 6.188 \text{ V DC.}$$

Para que $v_{b0}(t)$ sea 6.188 V DC, reemplazando en la ecuación 2.21, tenemos que el valor de K es igual a:

$$K = 6.188 \text{ V DC} / 0.33 \text{ V DC};$$

$$K = 18.75$$

Reemplazando el valor de $v_{b0}(t)$ y despejando V_{tarjo} en la ecuación 2.22 tenemos:

$$v_{b0}(t) = 2.4096v_{\text{tarjo}}(t) + 0.7349$$

$$v_{\text{tarjo}}(t) = 2.25 \text{ V DC}$$

De donde obtenemos las soluciones de los puntos de equilibrio de los parámetros de las ecuaciones de cada uno de los componentes del sistema en función del tiempo a un nivel de estabilidad de 25 cm.

2.2.3. Linealización de las ecuaciones del sistema.

Las ecuaciones halladas según el análisis matemático, como la ecuación 2.19, es una ecuación no lineal, por lo que aplicaremos análisis de linealización para funciones no lineales, para de esta manera obtener la linealidad de todo el sistema, y responda sus ecuaciones características de manera más exactas y precisas.

$$q_{s0}(t) = 20.7509 \times \sqrt{h_0(t)} \quad (2.19)$$

Entonces tenemos:

$$q_{s0}(t) - 20.7509\sqrt{h(t)} = 0$$

$$\Omega(q_s, h) = q_{s0}(t) - 20.7509\sqrt{h(t)} = 0$$

$$\left. \frac{d\Omega}{dq_s} \right|_0 q_s + \left. \frac{d\Omega}{dh} \right|_0 h(t) = 0 \quad (2.24)$$

Derivamos la función Ω (omega) en función del caudal de salida q_s y del nivel h .

$$\left. \frac{d\Omega}{dq_s} \right|_0 = 1$$

$$\left. \frac{d\Omega}{dh} \right|_0 = -20.7509 * 0.5 * \frac{1}{\sqrt{ho}}$$

Reemplazamos estas derivadas en la ecuación 2.24 y tenemos:

$$q_s(t) - 20.7509 * 0.5 * \frac{1}{\sqrt{ho}} * h(t) = 0$$

Donde: $K_1 = 0.5 \frac{1}{\sqrt{ho}}$

Entonces tenemos la siguiente función linealizada:

$$q_s(t) - (20.7509) \times K_1 \times h(t) = 0 \quad (2.25)$$

2.2.4. Transformada de Laplace de las ecuaciones del sistema.

Con las ecuaciones linealizadas, ahora aplicamos la transformada de Laplace, trasladando el parámetro del tiempo a la frecuencia.

Caudal de Entrada Q_e :

$$Q_e(s) = 16.86 \times V_b(s) \quad [\text{cm}^3/\text{s}]; \quad (2.26)$$

La ecuación 2.26 especifica la función de transferencia estática de la bomba, pero para nuestro análisis aplicamos la función de transferencia dinámica de la bomba, ecuación 2.26a obtenida por medio de la aplicación de MATLAB con la ayuda de la herramienta System Identification en tiempo real, se identificó la función de transferencia, con los datos obtenidos en la tabla 2.2 (Ver Anexo F).

$$Q_e(s) = \frac{16.86}{2.25S + 1} V_b(s) \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (2.26a)$$

Caudal de Salida Q_s :

$$Q_s(s) = 20.7509 \times K_1 \times H(s) \quad [\text{cm}^3/\text{s}]; \text{ Sin Perturbación} \quad (2.27)$$

Sensor de Nivel V_s :

$$V_s(s) = -0.1127 H(s) \quad [\text{V/cm}] \quad (2.28)$$

Controlador de Nivel V_c :

$$V_c(s) = K_p (V_{ref}(s) - V_s(s)) \quad [V] \quad (2.29)$$

Donde; V_{ref} es el voltaje referencial aplicado al sistema en función del nivel deseado y K_p es la constante de proporcionalidad del controlador de nivel.

Voltaje aplicado a la Bomba V_b :

$$V_b(s) = 2.4096V_{tarj}(s) \quad [V] \quad (2.30)$$

Donde; V_b es el voltaje aplicado a la bomba en V DC, y V_{tarj} es el voltaje proporcionado por la tarjeta PCI 6024EC que varia entre 0 a 10 V DC.

Retardo del sistema:

$$Q_e(s) = e^{-1.3538 s} * Q_e(s) \quad (2.31a)$$

Un método clásico para tratar retardos puros fue utilizar un compensador de tiempo muerto. Esta idea fue introducida por Otto Smith en los años 50.

Para facilidad aproximamos la función de la ecuación 2.31a de retardo por una función racional, ya que $e^{-s\tau}$ es una

función de serie infinita en función del tiempo y una forma de aproximar la función exponencial es mediante Padé en función de la frecuencia. (Ver Anexo E); esto es:

$$e^{-1.3538 s} = (s^2 - 4.444s + 6.584) / (s^2 + 4.444s + 6.584)$$

Obteniendo con esto:

$$Q_e(s) = [(s^2 - 4.444s + 6.584) / (s^2 + 4.444s + 6.584)] Q_e \quad (2.31)$$

La selección del orden de la función de transferencia truncada de Padé se la realiza principalmente en cuenta por la parte del orden del proceso, en este caso el proceso del sistema es de segundo orden, y por tal motivo seleccionamos una aproximación de Padé de segundo orden. Otro argumento para la selección del orden de Padé, es el tipo de controlador que se utiliza en el modelo, y para un controlador Proporcional Integral Derivativo PID se utiliza una aproximación de Padé de segundo orden, por tales explicaciones hemos seleccionado una aproximación de Padé de segundo orden, como se muestra en la ecuación 2.31.

Ecuación de Continuidad del tanque Principal:

$$Q_e(s) - Q_s(s) = 400S \times H(s) \quad (2.32)$$

Se observa en la ecuación 2.32 que la dinámica del tanque principal no es lineal, y la variación de nivel del tanque también es no lineal, por lo que aplicaremos en los siguientes temas linealización de ecuaciones no lineal y diferencial.

$$Q_e(s) - Q_s(s) = 0 \quad (2.33)$$

La ecuación 2.33 representa el sistema en equilibrio, cuando el caudal de entrada es igual al caudal de salida y de esta manera se obtiene el nivel deseado del sistema.

Se tiene ahora todas las ecuaciones en el campo de las Transformadas de Laplace, para aplicar criterios y teoría de control automático.

2.2.5. Diagrama de bloques del sistema.

Definidas cada una de las funciones de transferencia de los componentes del sistema, y estableciendo las variables de entrada y salida a controlar, diseñamos el diagrama de bloque de nuestro sistema.

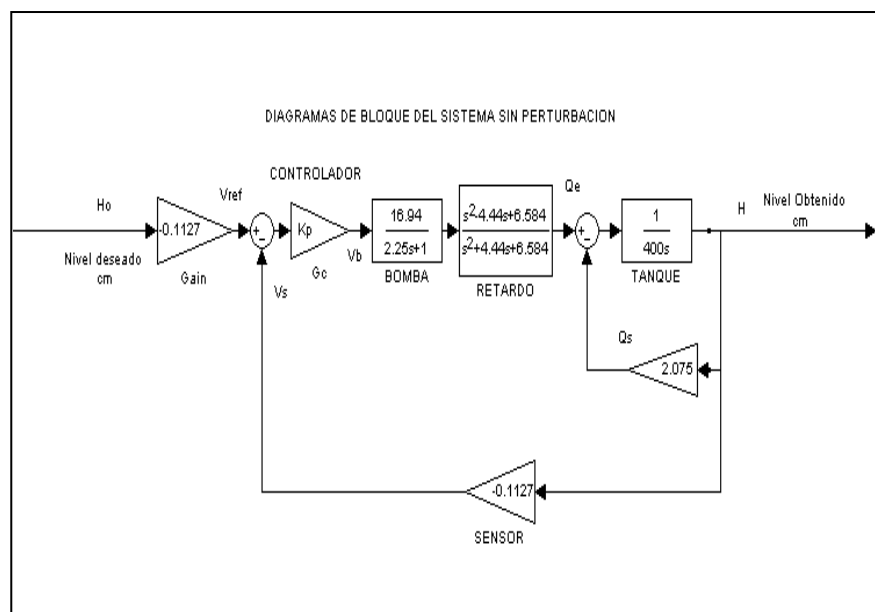


FIGURA 2.2.5.1. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA SIN PERTURBACIÓN.

2.3. Estrategia de ajuste para el controlador del sistema.

En la estrategia de ajuste del controlador del sistema, analizamos la perturbación del mismo, para detallar si esta variable afecta a nuestro sistema y en que proporción, y de esta manera aplicar métodos y criterios de estabilidad de sistemas, para proyectarnos si el sistema es estable o inestable, y que tipo de controlador se debe aplicar al modelo para obtener el control del sistema.

2.3.1. Análisis del Sistema con Perturbación.

La perturbación de un sistema se define como una señal que ingresa a un sistema alterando la estabilidad del mismo. En todo diseño de control siempre se debe tener presente el análisis de señales perturbadoras, porque en la mayoría de casos no se puede controlar la perturbación y generan sistemas totalmente inestables.

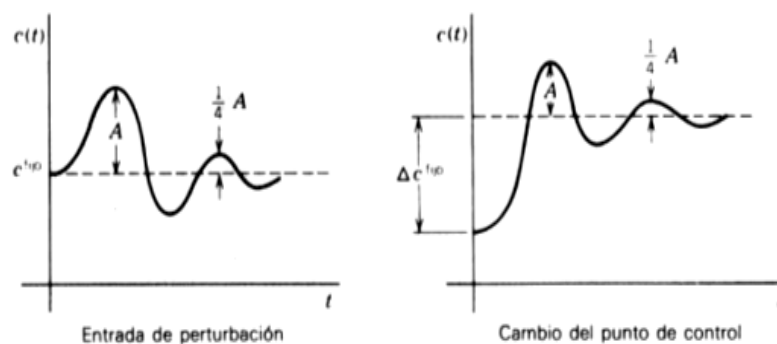


FIGURA 2.3.1.1. RESPUESTA DE UN SISTEMA AL
CAMBIO EN LA ENTRADA DE PERTURBACIÓN Y EL
PUNTO DE CONTROL.

En nuestro sistema la perturbación se genera por las válvulas que se encuentran conectadas al tubo empotrado en la base inferior del tanque principal, en este caso mantenemos constante la señal de nivel deseado y variamos la señal de perturbación llamada β , y observamos el cambio del punto de control del sistema. El controlador que se determina para este tipo de sistema debe de mantener como estrategia el punto de control estable, es decir el nivel deseado ante perturbación creada por la válvula de encendido/apagado y de compuerta.

En el análisis del sistema con perturbación, se toma en cuenta la curva característica de la válvula de compuerta, relacionando la posición de la válvula en grados o vueltas versus el caudal que proporciona.

La perturbación del sistema se define como la diferencia entre el caudal que fluye a través de la válvula de compuerta llamada q_{s1} cuando la válvula de compuerta está totalmente

abierta y el caudal que fluye llamado q_s cuando la válvula está a un número de vueltas cerrada, como se define en la ecuación 2.34.

$$Q_{\text{perturbación}} = q_{s1} - q_s \quad (2.34)$$

Donde:

q_{s1} : es el caudal que fluye en la válvula 2 de compuerta totalmente abierta.

q_s : es el caudal que se genera al cerrar la válvula de compuerta a un número determinado de vueltas.

El análisis de perturbación la realizamos a partir de la válvula de compuerta abierta en su totalidad y de esa posición hacemos las variaciones de perturbación, por medio de aplicaciones de vueltas a la válvula.

Calculamos a 1 vuelta, 1 ½ vuelta, 2 vueltas, 2 ½ vueltas, 3 vueltas, 3 ½ vueltas y 4 vueltas el caudal de perturbación del sistema. La válvula de compuerta tiene un máximo de giro de 4 vueltas.

Respecto a los datos de la tabla 3, obtenemos la ecuación matemática de la perturbación del sistema, relacionando la posición de la válvula de compuerta en pasos de 180° (π) con el caudal de perturbación en cm^3/s . En la ecuación 2.19, tenemos el caudal de salida q_s del sistema sin perturbación, ahora analizaremos la perturbación adicionando la función $q_{\text{perturbación}}$, según las curvas características de perturbación, mostradas en la figura 2.3.1.2.

Con Perturbación:

$$q_s = 20.7509 \times \sqrt{h(t)} - q_{\text{perturbación}} \quad [\text{cm}^3/\text{s}]; \quad (2.35)$$

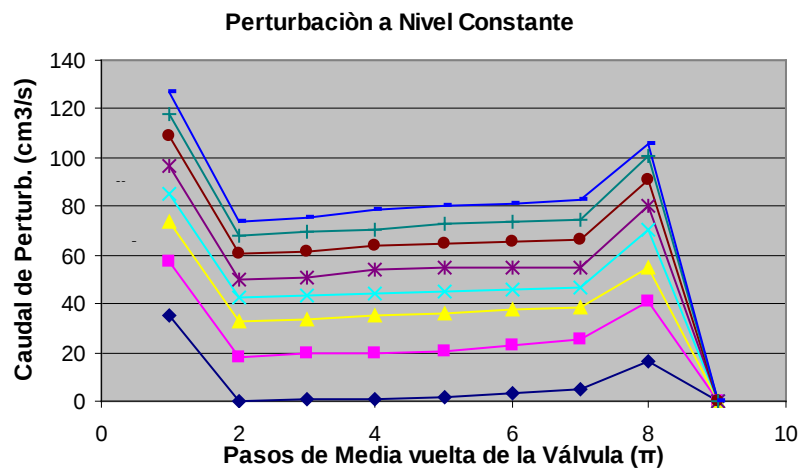


FIGURA 2.3.1.2. CURVA CARACTERÍSTICA DE LA VÁLVULA DE COMPUERTA A DIFERENTES NIVELES Y A DIFERENTES POSICIONES.

Se observa en la figura 2.3.1.2, que las curvas son lineales entre una vuelta a tres vueltas, y entre 3.5 vueltas a totalmente cerrada las curvas se disparan. Así mismo se observa que se disparan las curvas entre totalmente abierta a 1 vuelta.

TABLA 3

PERTURBACIÓN A DIFERENTES POSICIONES DE LA VÁLVULA DE COMPUERTA Y A DIFERENTES NIVELES

CAUDAL DE PERTURBACIÓN (cm ³ /s) A DIFERENTES VUELTAS DE LA VÁLVULA DE COMPUERTA.									
ABIERTA	½ VUELTA	1 VUELTA	3/2 VUELTAS	2 VUELTAS	5/2 VUELTAS	3 VUELTAS	7/2 VUELTAS	4 VUELTAS	NIVEL (cm.)
0	π	2π	3π	4π	5π	6π	7π	8π	
34,8	0,168	1,06	1,12	2,04	3,52	4,84	16,32	0	5
57,5	17,97	19,34	19,46	20,41	23,20	25,70	40,85	0	10
73,5	32,58	33,36	35,35	36,12	37,45	38,11	55,23	0	15
85,5	42,47	43,69	43,92	45,07	46,05	46,78	70,34	0	20
96,5	50,17	50,99	53,66	54,70	54,82	54,93	80,42	0	25
108,5	60,53	61,62	63,93	64,33	65,25	66,06	90,75	0	30
117,5	67,74	69,46	70,43	72,77	73,65	74,39	100,34	0	35
126,5	73,65	75,61	78,34	80,00	81,44	82,64	105,95	0	40

TABLA 4

POSICIÓN DE LA VÁLVULA 2 DE

PERTURBACIÓN

POSICIÓN DE LA VÁLVULA 2		
POSICIÓN	GRADOS (°)	VUELTAS
0	0	0 (ABIERTA)
1π	180	0.5
2π	360	1
3π	540	1.5
4π	720	2
5π	900	2.5
6π	1080	3
7π	1220	3.5
8π	1440	4 (CERRADA)

Por lo que linealizamos la perturbación entre una vuelta a tres vueltas para obtener la ecuación que represente la mejor característica de perturbación.

Para el análisis de perturbación, siempre se debe mantener constante un parámetro, en este caso el nivel del tanque principal y la posición de la válvula de compuerta es variable, para determinar la perturbación del sistema.

$$q_{\text{perturbación}} = 1.03137 \cdot \theta(t) + 49.5911 \quad [\text{cm}^3/\text{s}] ; \quad (2.36)$$

Donde:

$\theta(t)$: es la posición de la válvula de compuerta de perturbación en vueltas.

$q_{\text{perturbación}}$: es la perturbación del sistema.

La ecuación 2.36, es la perturbación del sistema con un nivel constante de $h = 25$ cm.

Reemplazando la ecuación 2.36, en la ecuación 2.35, tenemos la siguiente ecuación:

Con Perturbación:

$$q_s(t) = 20.7509 * \sqrt{h(t)} - q_{\text{perturbacion}} \quad [\text{cm}^3/\text{s}]; \quad (2.35)$$

$$q_s(t) = 20.7509\sqrt{h(t)} - (1.03137\theta(t) + 49.5911) \quad [\text{cm}^3/\text{s}]; \quad (2.37)$$

Para $h = 25$ cm.

La ecuación 2.37 representa el caudal de salida q_s con perturbación a un nivel constante de 25 cm., en función del tiempo.

Aplicamos Transformada de Laplace, para obtener la función de transferencia de la perturbación del sistema.

$$q_{\text{perturbación}} = 1.03137 \cdot \theta(s) \text{ [cm}^3/\text{s]}; \quad (2.38)$$

Reemplazando la ecuación 2.38, en la ecuación 2.39, tenemos:

Con Perturbación:

$$Q_s(s) = 20.7509 K_1 x H(s) - q_{\text{perturbación}}(s) \text{ [cm}^3/\text{s]}; \quad (2.39)$$

$$Q_s(s) = 20.7509 K_1 x H(s) - (1.03137 \theta(s)) \text{ [cm}^3/\text{s]}; \quad (2.40)$$

Hallando cada una de las funciones de transferencia del sistema, que relacionan una variable con otra variable, podemos detallar el Diagrama de Bloque de nuestro sistema sin perturbación y con perturbación.

Así finalizamos el análisis de perturbación de la válvula de compuerta, y se debe recordar que no toda válvula es lineal respecto al caudal que proporciona en función de su abertura (Ver Anexo A, Válvulas). Por lo que hemos determinado la función de transferencia de esta válvula con el propósito de tener de una manera matemática el caudal aproximado a 2 vueltas, ya que el análisis del sistema ante perturbación se lo realizará con la válvula de compuerta fija a 2 vueltas y

activando o desactivando la válvula encendido/apagado, y por medio de la función de transferencia obtenida modelar el sistema, para de esta manera obtener el controlador estratégico y apropiado del sistema.

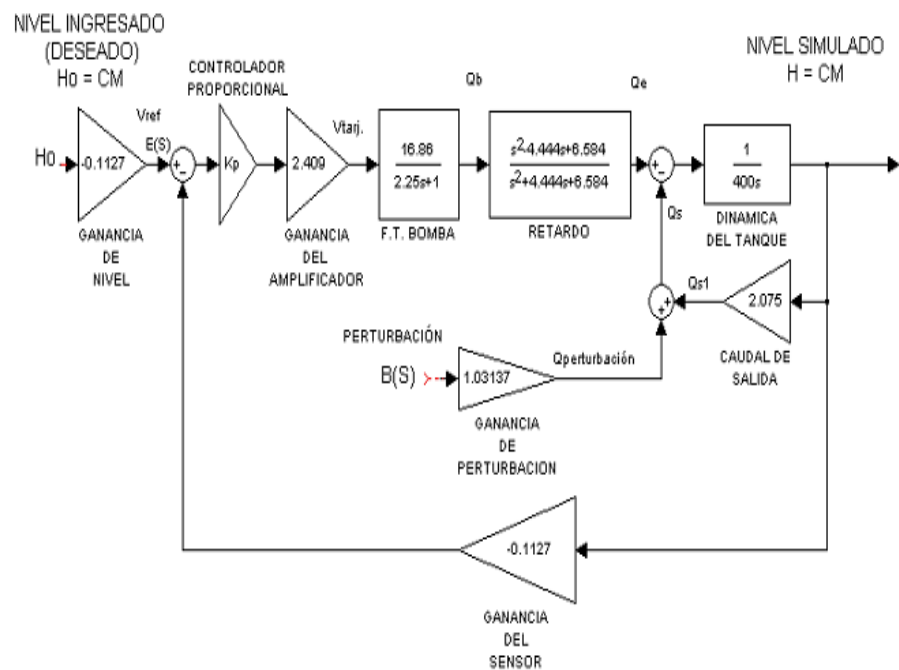


FIGURA 2.3.1.3. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA CON PERTURBACIÓN.

En la figura 2.3.1.3, se define el diagrama de bloques del sistema con perturbación, y mediante este análisis matemático hemos definido los parámetros de cada uno de los bloques que conforman el diagrama de bloque del sistema.

2.3.2. Análisis de estabilidad del sistema.

Para sistemas lineales invariantes en el tiempo la estabilidad es una propiedad del sistema y no de una solución particular.

La estabilidad se puede determinar por diferentes métodos, algunos más generales que otros.

Existe la estabilidad robusta en los sistemas y un sistema es robusto si el análisis de estabilidad a partir del modelo matemático nominal se conserva en el sistema real, a pesar de las inexactitudes del modelo y de la influencia de perturbaciones, por lo que en el análisis de estabilidad aplicamos dos métodos de estabilidad; el método de Routh Hurwitz y el Error de Estado Estacionario expresado como " e_{ss} ". Para tener un enfoque general de la estabilidad del modelo matemático del sistema y de esta manera tener bases para iniciar el ajuste del controlador analíticamente en el capítulo 3.

2.3.2.1. Método de Routh Hurwitz.

En el análisis de estabilidad del sistema diseñado, aplicamos el método de Routh-Hurwitz, que es un procedimiento para determinar el número de raíces de un polinomio con parte real positiva sin necesidad de encontrar realmente las raíces por métodos iterativos. Puesto para que un sistema sea estable se requiere que ninguna de las raíces de su ecuación característica tenga parte real positiva, la prueba de Routh es bastante útil para determinar estabilidad.

A partir de la figura 2.2.5.1., reducimos el diagrama de bloques como se muestra en la figura 2.3.2.1.1, para determinar la ecuación característica del sistema en lazo abierto.

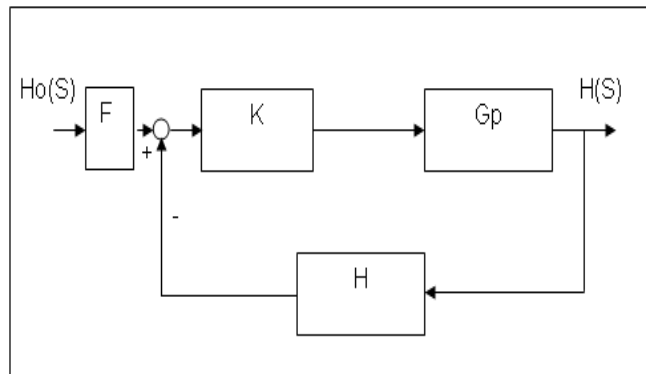


FIGURA 2.3.2.1.1. DIAGRAMA DE BLOQUE REDUCIDO.

La ecuación característica en lazo abierto la definimos como:

$$T(S) = K.F.Gp$$

Donde:

F: Es el prefiltro del sistema igual a 0.1127.

K: Es la ganancia del controlador del sistema.

Gp: Es la función de transferencia de la planta

igual a:

$$Gp = \frac{0.018733}{(S + 0.444)(S + 0.01155)} e^{-1.3538s}$$

H: Es la ganancia de retroalimentación, en nuestro caso es la ganancia del sensor igual a 0.1127.

$$T(S) = K * 0.1127 * \left(\frac{0.018733(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)} \right)$$

$$P(S) = S^4 + 1.548S^3 + 3.403S^2 + 0.526S + 0.0124 = 0$$

Entonces se define como P(S) la ecuación característica en lazo abierto del sistema:

Aplicando el método de Routh-Hurwitz tenemos:

S ⁴	1	3.403	0.0124
S ³	1.548	0.5267	0
S ²	3.062	0.0124	
S	0.52	0	
1	0.0124		

Observamos en la matriz de Routh Hurwitz, que los signos de los términos de la primera columna son todos positivos, cumpliendo la

condición de estabilidad, para todo valor de $K > 0$.

Además posee 2 raíces reales en el semi-plano izquierdo, y 2 raíces en el eje imaginario en el semi-plano izquierdo, por lo que concluimos que el sistema es estable en lazo abierto.

En el análisis del sistema en lazo cerrado tenemos:

$$T(S) = \frac{K.Gp.G1}{1 + K.Gp.Gs}$$

$$P(S) = 1 + K.Gp.Gs = 0$$

$$1 + K \left(\frac{0.018733(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)} \right) * 0.1127 = 0$$

$$S^4 + 1.548S^3 + 3.403S^2 + 0.5267S + 0.0124 +$$

$$K * 0.1127 * (0.00562S^2 - 0.007813S + 0.0463) = 0$$

$$P(S): S^4 + 1.548S^3 + S^2(3.403 + K * 0.000633) + S(0.5267 - K * 0.00088) + (0.0124 + K * 0.0052) = 0$$

Entonces se define como $P(S)$ la ecuación característica en lazo cerrado del sistema:

Aplicando el método de Routh-Hurwitz tenemos:

$$\begin{array}{r|rrrr}
 S^4 & 1 & (3.403+K*0.00063) & (0.0124+K*0.0052) & \\
 S^3 & 1.548 & (0.5267-K*0.00088) & 0 & \\
 S^2 & a1 & b1 & & \\
 S & c1 & 0 & & \\
 1 & d1 & & &
 \end{array}$$

Donde:

$$a = \frac{4.74114 + 0.00186K}{1.548} ; a > 0$$

$$b = 0.0124 + 0.00522K ; b > 0$$

$$c = \frac{-2.467 + 0.01569K + 0.00000163K^2}{-4.74114 - 0.00186K} ; c > 0$$

$$d = -0.0124 - 0.00522K ; d > 0$$

Para $a > 0$ entonces el valor de $K > -2548.97$, para cumplir la condición de estabilidad.

Para $b > 0$, se cumple que $K > -2.37$ y se mantiene la condición de estabilidad.

En cambio para $c > 0$, no se cumple para toda K , sino se cumple para un rango determinado entre $K < 154.72$, la condición de estabilidad.

Para $d > 0$, posee la misma característica que b , es decir $K > -2.37$.

En el análisis del método de Routh Hurwitz, concluimos que el valor de K para que cumpla la condición de estabilidad del sistema en lazo cerrado debe ser mayor que 0 hasta $+\infty$ (más infinito), entonces observamos que el sistema en lazo abierto y cerrado es estable.

Mientras que en el sistema en lazo cerrado el valor debe estar en el siguiente rango $0 < K < 154.72$, para mantener la condición de estabilidad.

La función de transferencia de la planta, realmente es una función de segundo orden con retardo como:

$$Gp = \frac{0.018733}{(S + 0.444)(S + 0.01155)} e^{-1.3538r}, \text{ la función}$$

no posee ceros, en cambio tiene dos polos reales en la parte negativa del semi-plano izquierdo, demostrando que la planta cumple con las condiciones de estabilidad.

Al aplicar la aproximación de Padé la función de transferencia de la planta se convierte en una función de cuarto orden como:

$$Gp = \frac{0.018733(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)},$$

con dos ceros imaginarios en la parte positiva del semi-plano derecho, estos ceros lo provoca el retardo del sistema. Y con cuatro polos; dos polos reales en la parte negativa del semi-plano izquierdo y dos polos imaginarios en la parte negativa del semi-plano izquierdo a causa del retardo, de esta manera definimos los ceros y polos de la función de transferencia de la planta.

TABLA 5

**CEROS Y POLOS DE LA FUNCIÓN DE
TRANSFERENCIA DE LA PLANTA**

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA (Gp)	CEROS	POLOS
$\frac{0.018733}{(S + 0.444)(S + 0.01155)} e^{-1.3538\tau}$	No tiene	-0.444 -0.0115
$Gp = \frac{0.018733(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)}$	-2.22±1.28i	-2.22±1.28i -0.444 -0.01155

En la tabla 5, definimos los valores de los
ceros y polos de la función de transferencia de
la planta.

2.3.2.2. Análisis de Error de Estado Estacionario.

En sí el Error es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida. El análisis de Error de Estado Estacionario, se basa en que la respuesta del sistema a una entrada Escalón Unitario debe de ser igual a cero.

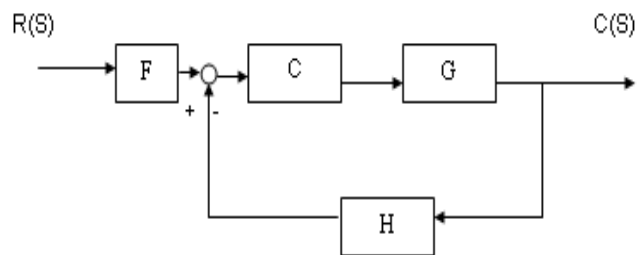


FIGURA 2.3.2.2.1. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL SISTEMA.

Definimos los valores de la gráfica 2.3.2.2.1.:

F: Prefiltro del sistema, y $F = 0.1127$

C: Controlador del sistema, en este caso es una constante igual a K.

G: Función de transferencia de la planta del modelo matemático, en este caso es;

$$G = \frac{0.018733(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)}$$

H: Es la retroalimentación del sistema, en este caso: $H = 0.1127$

R(S): Es el nivel de ingreso al sistema en centímetros, y en nuestro caso es una señal Escalón Unitario.

C(s): Es el nivel obtenido o resultante del sistema en centímetros.

Donde $H = F$.

Vamos analizar el error de estado estacionario

“ e_{ss} ” del sistema como:

$$T(S) = \frac{C(S)}{R(S)}$$

Donde T(S) es la función de transferencia resultante del sistema en lazo cerrado:

$$T(S) = \frac{F * C * G}{1 + C * H * G}$$

Entonces “ e_{ss} ”:

$$E(S) = R(S) - R(S)T(S)$$

$$E(S) = R(S) * [1 - T(S)]$$

$$E(S) = R(S) * \left[\frac{1 + H * G * C - H * G * C}{1 + H * C * G} \right]$$

$$E(S) = R(S) * \left[\frac{1}{1 + H * C * G} \right]$$

Y el Error de Estado Estacionario se define como:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * E(S), \quad \text{reemplazando } E(S)$$

tenemos:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \left[\frac{1}{1 + H * C * G} \right] * R(S)$$

Donde R(S) es la entrada Escalón: R(S)=A/S

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s * \frac{A}{S} \left[\frac{1}{1 + 0.1127 \frac{K * 0.01873(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.0115)(S^2 + 4.432S + 6.547)}} \right]$$

$$e_{ss} = \frac{A}{1 + 0.41163 * K} ; \text{ y donde } K > 0 \text{ y } A = 1.$$

$$e_{ss} = 0.709 \text{ cm.}$$

Entonces concluimos que el sistema es de tipo cero, por el motivo que el Error de Estado Estacionario no es diferente a cero, es decir no posee un polo en el origen, por lo que en el capítulo 3, realizaremos el análisis del ajuste de controlador para obtener un sistema tipo uno, y de esta manera conseguir que el sistema tenga un Error de Estado Estacionario igual a cero, incorporando en su función de transferencia un polo en el origen para convertir la planta en tipo uno, para cumplir este cometido.

En cuanto a la respuesta dinámica del sistema, este se deberá comportar con una marcada dominancia de segundo orden con el fin de que responda con un Sobrenivel porcentual de un 5%.

Con relación al tiempo de estabilización, la estrategia de control a aplicarse deberá lograr que la respuesta en el tiempo sea lo más

rápido posible (esto dependerá de la posición de los polos y ceros de la función de transferencia de lazo abierto en lo que se ha incluido el efecto del retardo). En el próximo capítulo detallaremos el procedimiento que se ha adaptado a este trabajo para cumplir estos requerimientos impuestos.

CAPITULO 3

3. INTERFASE Y EQUIPOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE NIVEL Y SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA.

3.1. Adquisición de datos del Sistema utilizando Matlab.

MATLAB mantiene un ambiente de la informática poderoso de análisis, de proceso de señales, de modelos de sistemas, diseño de controles de sistemas y desarrollo de algoritmos.

El Control System Toolbox es un conjunto de rutinas para MATLAB dedicadas a aplicar las distintas herramientas de la teoría de control clásico para sistemas lineales.

El MATLAB toolbox ofrece funciones especializadas que aceleran la solución de problemas de aplicación específicos. Los Datos para la adquisición Toolbox extiende el ambiente de MATLAB proporcionando el acceso directo a los sistemas en tiempo real, calculando y adquiriendo señales y parámetros, como datos de MATLAB. La Adquisición de Datos Toolbox (Ver anexo D), permite personalizar los sistemas por software y de esta manera obtener un mejor control de variables, parámetros y señales en tiempo real, habilitando dispositivos de hardware externos, e incorpora el análisis de los dispositivos y equipos como entrada y salida de sistemas, para visualizar las características de estos en tiempo real a través del MATLAB y su toolbox.

Los programas y equipos que se utilizan para la adquisición de datos del sistema son: el programa de MATLAB, con las funciones Simulink (programa simulador), el Real-Time- Workshop (programa de ejecución en tiempo real), el C Compiler (Compilador en lenguaje de programación C) y la aplicación del xPC Target (Activación del computador remoto).

Así mismo se seleccionó la tarjeta PCI-6024E de National Instruments debido que cumple los requisitos didácticos para crear

sistemas de control, el bloque conector CB-68LP, bus de datos de conexión entre la tarjeta PCI-6024E y el bloque conector CB-68LP, el programa xPC Target de MATLAB, Computador Host (computador principal), Computador Target (computador remoto), y Comunicación para la adquisición de datos entre el computador Host y Target.

3.1.1. Descripción de la tarjeta PCI-6024E de National Instrument

La tarjeta PCI-6024E de National Instruments es una arquitectura completa para adquisición de datos (Ver anexo D).

Es un sistema modular que permite la comunicación entre la computadora y los procesos, es un sistema de entrada y salida de datos, la principal característica de este sistema es trabajar en el campo cerca de los procesos dejando el monitoreo y control en posiciones remotas.

Esta interfase convierte a la computadora en importante instrumento de análisis de datos, control y monitoreo, en tiempo real.

Dispone de: entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, disparo digital, contadores y temporizadores.

La tarjeta de adquisición de datos toma 200.000 muestras por segundo (200Ks/s), además la adquisición se inicia por software.



FIGURA 3.1.1.1. TARJETA PCI – 6024E DE NATIONAL INSTRUMENTS.

Los canales analógicos trabajan con voltajes desde -10 V DC a +10 V DC, los canales digitales con voltajes de -5 V DC y +5 V DC; y la corriente de salida de la tarjeta es de 65 mA máximo.

3.1.2. Descripción del bloque conector CB-68LP.

El bloque conector CB-68LP cuenta con una gran variedad de borneras de entrada y salida, tanto analógicas como digitales, que permite efectuar conexiones con una gran gama de sensores para adquisición de datos, como termocúplas, sensores transductores eléctricos de nivel, presión, flujo, y así mismo con una gran variedad de elementos de control como transductores de corriente a presión válvulas de control, etc., mediante módulos de salidas analógicas y digitales.

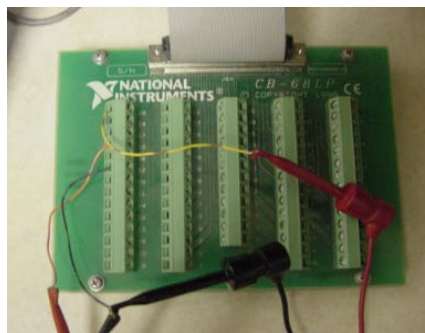


FIGURA 3.1.2.1. BLOQUE CONECTOR CB – 68LP.

3.1.3. Descripción del conector Bus de Datos Serie E.

El Bus de datos de 68 pines Serie E, es elemental para comunicar el bloque conector CB-68LP con la tarjeta de adquisición PCI-6024E, además permite la comunicación entre

la computadora remota (Target) y los demás módulos del sistema.

Características Técnicas:

Bus plano de 68 pines y terminales para el bloque conector y la computadora.

El largo del bus de datos es de 1 m.

Cable para trabajar con la serie E.

3.1.4. Descripción del xPC Target.

El xPC Target es una solución para prototipos, probando, y desplegando sistemas en tiempo real, que usan el hardware de PC estándar.

Es un ambiente que utiliza un Target PC (computador remoto), controlado desde un Host PC (computador principal o controlador), para ejecutar las aplicaciones en tiempo real.

En este ambiente usted usa su computadora de escritorio como un Host PC con el programa de MATLAB, Simulink, y Stateflow (función optativa de asignaciones y creaciones de

variables de estado), para crear modelos usando bloques de Simulink. Después de crear su modelo, usted puede ejecutar las simulaciones en tiempo no real.

El xPC Target permite agregar bloques de entrada y salida al modelo, y utiliza el Host PC con el Real-Time del Workshop (opción de ejecución en tiempo real) y un recopilador de C/C++ para crear el código ejecutable (Ver Anexo C).

El código ejecutable se descarga al Host PC y al Target PC, en el cual ejecuta el xPC kernel (parte principal del software del Target PC) en tiempo real del xPC Target. Después de descargar el código ejecutable, se puede correr y probar la aplicación Target en tiempo real:

3.1.5. Descripción del computador Host.

Usted puede usar cualquier PC que ejecuta una plataforma de Microsoft Windows apoyado por MathWorks (empresa dueña de la licencia y productos de MATLAB) como el Host PC (Ver Anexo C).

También debe contener una disquetera de 3.5 pulgada, y un puerto serial libre o una tarjeta Ethernet de red.

El Host PC puede ser uno de lo siguientes PC: un computador de escritorio estándar o un computador de notas.

El Host PC normalmente es su computadora de escritorio donde usted instala MATLAB, Simulink, Stateflow, Stateflow Coder, Workshop de Tiempo-Real, el xPC Target, y la opción xPC Target Embedded. Una computadora de notas también es un Host PC viable.

3.1.6. Descripción del computador Target.

El xPC Target apoya a uno o más Target PCs con un Host. Un Target PC puede ser cualquier PC con un Intel 386/486/Pentium o AMD, el procesador de K5/K6/Athlon como computadora Target. También debe contener una disquetera libre para disquete de 3.5 pulgada, y un puerto serial libre o una tarjeta de red Ethernet. Usando el xPC Target Embedded Option, se puede transferir los archivos del disquete de 3.5 pulgada a un disco duro o memoria flash.

Un Target PC puede ser uno de los siguientes computadores:

PC de Escritorio: esta computadora es inicializada desde un disco especial creado por el xPC Target.

Cuando usted inicializa o arranca el Target PC, desde el disco target de booteo (Ver anexo D la creación del disco de booteo o arranque para el Target PC) se describe la creación del disco de booteo Target, el xPC Target usa los recursos en el Target PC (CPU, RAM, y puerto serial o tarjeta de red) sin cambiar los archivos guardados en la unidad de disco duro.

Después de que se usa la computadora de escritorio como un Target PC, y ya no se desea realizar más aplicaciones se hace lo siguiente; usted reinicia su computadora sin el disco Target de booteo (arranque) y el computador se inicializa normalmente con su aplicación de origen, para cualquier tarea que desea realizar (Ver Anexo C).

3.1.7. Descripción de comunicación entre los computadores Host y Target para la adquisición de datos.

El xPC Target proporciona dos tipos de conexión y protocolos de comunicación entre el Host PC y el Target PC y son por puerto serial y red. (Ver Anexo C, creación del disco de booteo).

Por Red: El computador Host y Target se conectan a través de una red. La red puede ser un LAN (red de área local), Internet, o una conexión directa que usa una tarjeta de Ethernet. Tanto el Host como el Target son conectados a la red con la tarjeta Ethernet usando el protocolo de TCP/IP (Protocolo de Control y Transporte de Datos sobre Internet) para la comunicación.

Al usar una conexión de la red, el Target PC puede usar la tarjeta Ethernet de red, proporcionada con el xPC Target o una de las tarjetas apoyadas. Los datos pueden transferirse a una tasa de 10 mega-bits/segundo o 100 mega-bits/segundo.

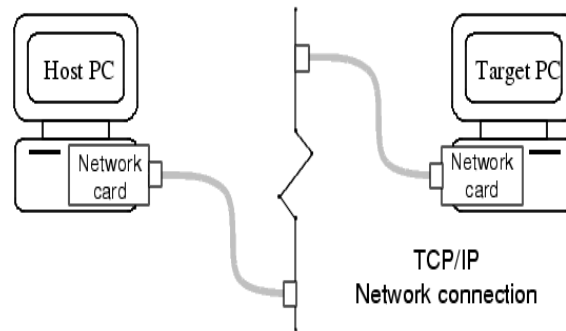


FIGURA 3.1.7.1. CONEXIÓN ENTRE EL HOST Y EL TARGET PC POR MEDIO DEL PROTOCOLO TCP/IP.

3.2. Activación de la planta y circuitos auxiliares de control.

Para la ejecución del Sistema de Control y Regulación de Nivel de un tanque aplicando MATLAB se crearon dispositivos, que proporcionan la capacidad de activación y desactivación de algunas de las funciones de la planta, a través de la computadora.

Estas interfases fueron creadas con la finalidad de que la bomba DC, el sensor de nivel, y la válvula ENCENDIDO/APAGADO, sean operados desde la computadora que controla los procesos.

La principal aplicación de estas interfases en el sistema de control y regulación de nivel es la protección de la tarjeta de adquisición.

3.2.1. Circuitos de encendido y apagado de la bomba.

La activación de la bomba se la realiza desde el panel principal de control como desde el computador Host y de igual manera es posible desactivarla a través de la tarjeta PCI-6024E, conectada al bloque conector CB-68LP.

Cuando la bomba es activada, una señal de 10 V DC es enviada desde el programa de Simulink a la tarjeta de adquisición, al bloque conector CB-68LP y de allí a la fuente de amplificación de 12 V DC a 10 A de carga máxima, que soporta la carga de corriente de la bomba DC al momento que es activada.

Así mismo, se envía un voltaje de 0 V DC desde el programa Simulink, y la bomba se apaga, dejando de enviar agua al tanque principal.

La fuente de amplificación posee dos canales, uno de entrada y otro canal de salida. Y es un simple amplificador de voltaje DC a DC.

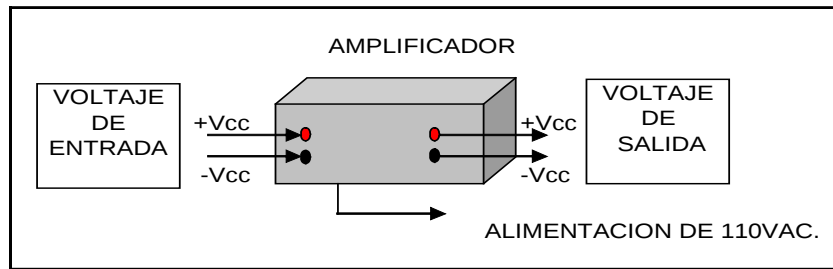


FIGURA 3.2.1.1. CANALES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA ETAPA AMPLIFICADORA.

El canal de entrada de la fuente soporta voltaje entre 0 V DC a 5 V DC, que permite la activación y desactivación de la bomba DC, proporcionada desde el bloque conector CB-68LP.

Mientras que el canal de salida entrega un voltaje entre 0 V DC a 12 V DC, y soporta la carga de corrientes máxima de la bomba, manteniéndola así en funcionamiento.



FIGURA 3.2.1.2. CIRCUITO DE ACTIVACIÓN DE LA ETAPA AMPLIFICADORA PARA LA BOMBA DC.

3.2.2. Circuito de encendido y apagado del sensor.

El sensor ultrasónico 873C, posee una fuente de alimentación variable entre 18 V DC a 30 V DC a 1 A de carga máxima, la característica técnica del sensor exige estos rangos de voltaje de alimentación.

La fuente de alimentación variable del sensor posee un potenciómetro, que lo ajustamos a un voltaje de 22 V DC entre los cables de color marrón y negro del sensor como alimentación, la cual activa el funcionamiento del sensor (Ver anexo A).

3.2.3. Circuito de perturbación del sistema.

El circuito de perturbación de nuestro sistema, está diseñado para la activación de la válvula abierto/cerrado de $\frac{1}{2}$ pulgada que se activa con 110 V AC, por lo que se colocó un switch de encendido y apagado en el panel de control de la planta para la activación de la perturbación del sistema.

El switch está conectado a un tomacorriente de 110 V AC y funciona de la siguiente manera:

- Cuando el switch está en posición off (apagado) en el panel de control la válvula de perturbación está desactivada.
- Cuando el switch está en posición on (encendido) en el panel de control la válvula de perturbación se activa, creando así la perturbación al sistema.

Por medio de este switch creamos la activación de la perturbación del sistema de una manera manual.



FIGURA 3.2.3.1. ACTIVACIÓN DE LA VÁLVULA
ENCENDIDO/APAGADO DE PERTURBACIÓN DEL
SISTEMA.

Todas las tarjetas diseñadas para la etapa de amplificación de la bomba, sensor, válvula de perturbación y otros equipos,

fueron diseñadas con la finalidad de protección de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E, por lo que soporta un máximo de 65 mA, y los equipos conectados al sistema poseen cargas que sobrepasan los 8 A de corriente máxima y pueden averiar la tarjeta de adquisición de datos.

3.3. Implantación del controlador en la operación de la planta.

Para determinar el controlador de nuestro sistema utilizamos la herramienta SISO (single in - single out, en español simple entrada – simple salida) de MATLAB, esta herramienta es una interfaz gráfica (GUI) que nos ayuda analizar sistemas de control con retroalimentación.

Con la ayuda del Lugar Geométrico de las Raíces que nos proporciona el SISO de una manera gráfica, se puede utilizar el criterio del Lugar Geométrico de las Raíces para estabilizar el lazo de retroalimentación, para aplicar criterios de amortiguamiento y estabilidad. Además con la utilización de los diagramas de Bode se puede ajustar el ancho de banda del sistema, así mismo definir la ganancia y los márgenes de fase.

Antes de determinar el controlador del sistema vamos a realizar la identificación de la planta en lazo abierto.

Efectuamos la identificación de la planta por medio del System Identification (Identificador de Sistemas), por la razón que deseamos comparar con criterios de estabilidad y de respuesta el modelo matemático obtenido por leyes y ecuaciones físicas con el modelo real identificado, ya que la dinámica del modelo matemático a partir de leyes físicas no posee una aproximación real, ya que los cálculos se lo realiza a través de tablas, gráficas y asunciones, y en consecuencia los parámetros hallados del modelo matemático es una aproximación no real del sistema, con un margen de error mínimo. En cambio con la aplicación del System Identification de MATLAB, se obtiene un modelo real. En sí, la identificación de sistemas se enfoca en la modelización de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales, con la utilización de algoritmos, recolección de datos y cálculo a la vez en la aplicación a sistemas variables en el tiempo, obteniendo modelos continuos o discretos.

Con la aplicación de esta herramienta se tiene en cuenta las perturbaciones, y ruido del sistema, hallando así la función de transferencia real que modela la planta.

3.3.1. Identificación de la función de transferencia de la planta en tiempo real.

Con la utilización del toolbox de System Identification (Identificador de Sistemas) vamos a determinar la función de transferencia de la planta, que nos permite construir de forma exacta modelos simplificados de sistemas complejos.

El System Identification posee herramientas para crear modelos matemáticos de los sistemas dinámicos basados en datos observados en la entrada-salida en tiempo real. El System Identification proporciona una interfaz gráfica amigable que ayuda en la organización de datos y de modelos.

El sistema que vamos a identificar posee dos variables a controlar una de entrada y otra de salida. El análisis se la realiza con el sistema a lazo abierto, sin la aplicación de controlador y desarrollamos adquisición de datos, (Ver anexo D), como se define en la figura 3.3.1.1.

Para obtener la función de transferencia de la planta se mantiene el voltaje aplicado a la bomba constante a la

entrada, hasta que el sistema en lazo abierto se estabilice a un nivel de 25 cm. y al observar la estabilidad del sistema constante, generamos por medio de un switch una señal cuadrada con amplitud de 6.35 V DC a 7.35 V DC y un período de 1600s definido por simulaciones y pruebas, con la finalidad de variar el nivel del agua cercano al punto de control en nuestro caso de 25 cm., obteniendo de esta manera la función de transferencia que modela la salida del sistema ante diferentes variaciones al punto de control.

En la figura 3.3.1.1, los datos de las variables Vb (voltaje de entrada a la bomba) y H (nivel proporcionado por el sensor), son adquiridos por medio del bloque 1 y 2, llamados variables de entrada y salida respectivamente.

Para almacenar datos en las variables se debe escribir en la ventana de comandos de MATLAB el siguiente comando:

```
>>Vb = tg.outputlog;
```

```
>>H = tg.outputlog;
```

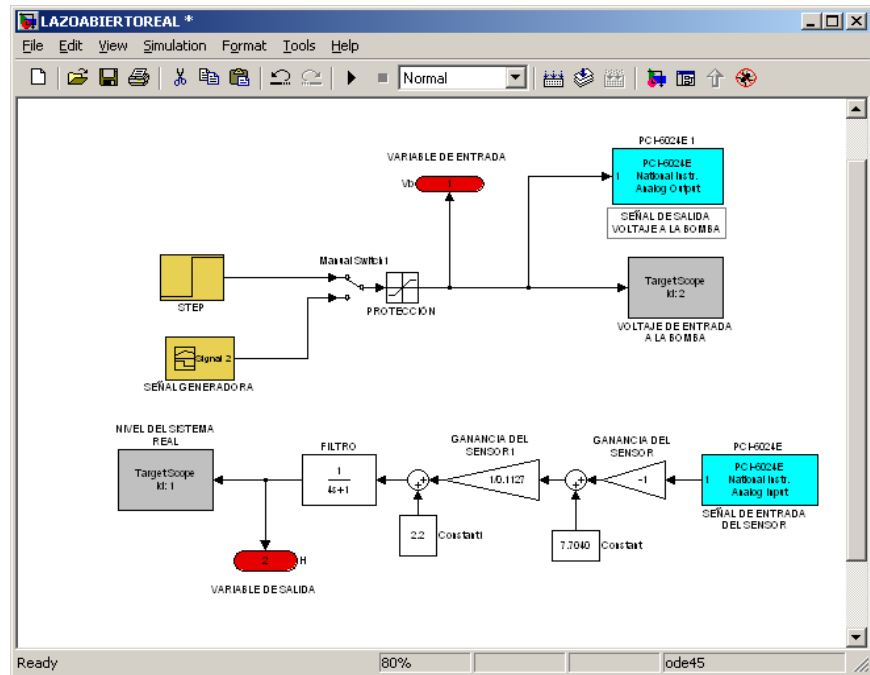
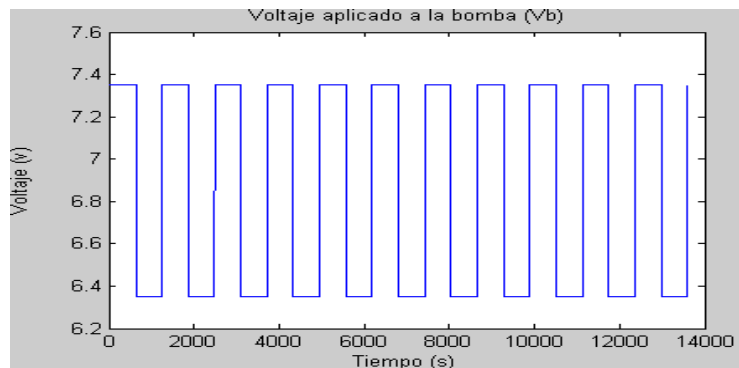


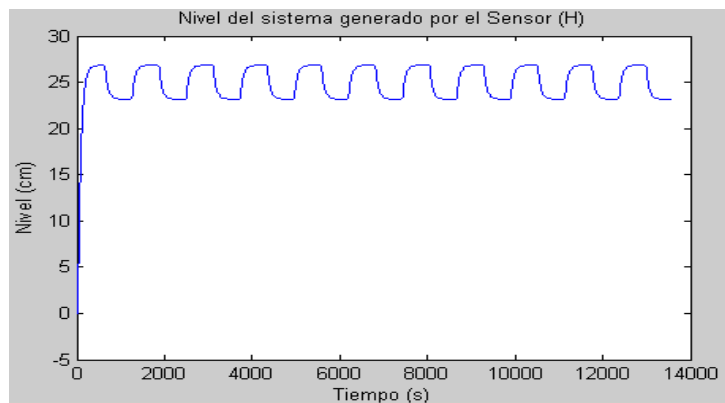
FIGURA 3.3.1.1 SISTEMA EN LAZO ABIERTO VARIANDO EL VOLTAJE DE ENTRADA.

El comando `tg.outputlog`, almacena y recupera los datos de la variable de entrada (V_b) y salida (H). Estos datos almacenados están en forma de matrices.

En la figura 3.3.1.2, se muestra las gráficas de las variables entrada y salida adquiridas (V_b, H), en tiempo real.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.1.2. GRÁFICA DE Vb (A), y H (B).

Los datos que se van a utilizar para las muestras están entre 0:17600 segundos, que corresponde a 11 períodos de variación de la respuesta del sistema y para ello se define los siguientes comandos:

```
>>Vb=Vb(0:17600);
```

```
>>H=H(0:17600);
```

Las variables Vb y H adquiridas en tiempo real, nos ayudan a obtener la función de transferencia de nuestro sistema con la aplicación del System Identification.

Para identificar el sistema realizamos los siguientes pasos:

En la pantalla de comandos de MATLAB se escribe:

```
>>Ident
```

Este comando Ident (Identificador), abre la ventana del Identificador de Sistemas, figura 3.3.1.3.

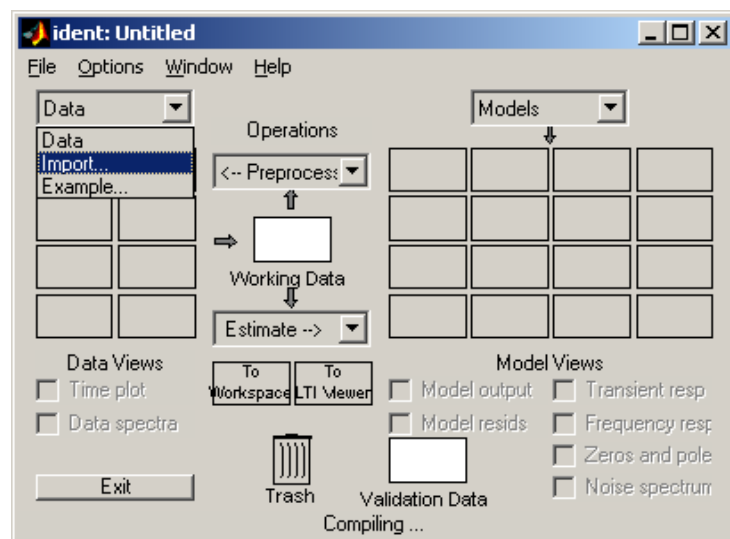


FIGURA 3.3.1.3. VENTANA IDENT DEL MATLAB.

Al desplegar la pestaña de la lista Data (Datos), seleccionamos Import (Importar), donde aparece la siguiente ventana, como se muestra en la figura 3.3.1.4.

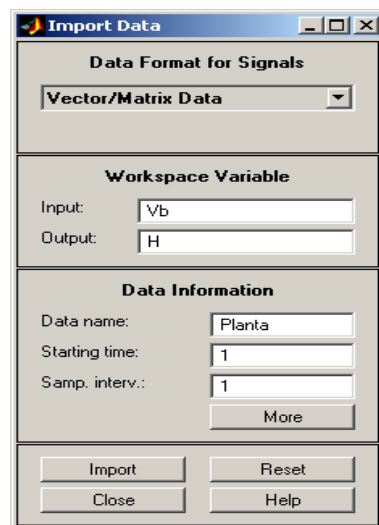


FIGURA 3.3.1.4. VENTANA IMPORT DATA.

En la casilla Input (entrada) colocamos el nombre de la variable de entrada, que es Vb, y en Output (salida) la variable de salida H, en Samp. Inter. (Intervalo de Muestreo), que es el tiempo de muestreo y que para nuestra identificación es 1s. Entonces hacemos click en el botón Import y se cargan los datos en la pantalla Ident como se muestra en la figura 3.3.1.5.

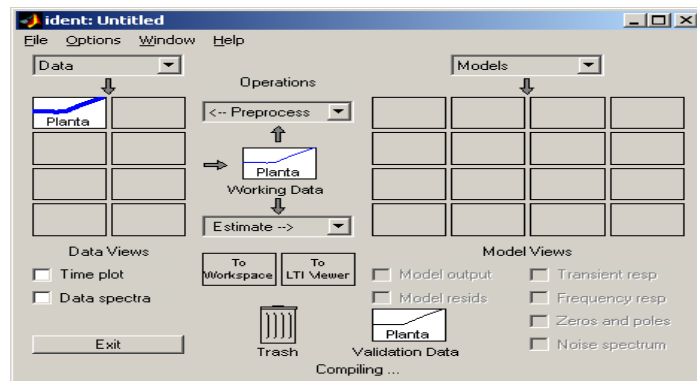


FIGURA 3.3.1.5. CARGA DE DATOS EN LA VENTANA IDENT.

En la ventana Ident, en la pestaña de operación en Preprocess (preprocesos), seleccionamos la opción Quick Start, donde la cual en los casilleros llamados Data View (vista de datos) se cargan los datos: Plantad, que son los datos sin constante de nivel; Plantade que es una porción de los datos los cuales System Identification los va a utilizar para la estimación del modelo; Plantadv que es la siguiente porción de datos, con los cuales se va a realizar la validación del modelo que genera el System Identification. En la figura 3.3.1.6., observamos los procesos de identificación.

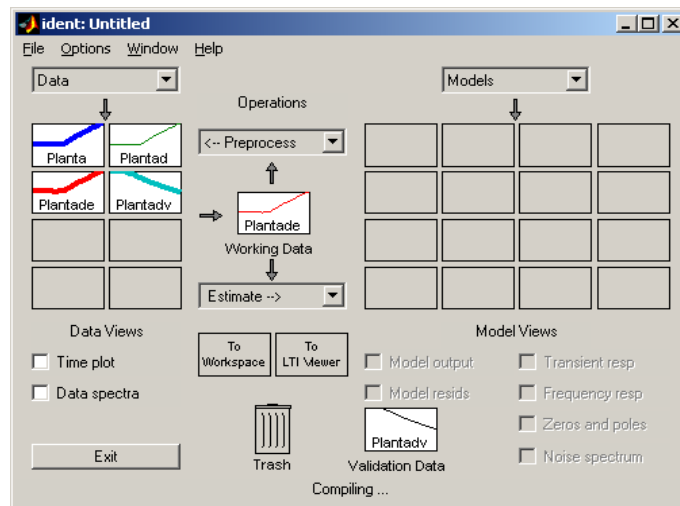


FIGURA 3.3.1.6. PROCESOS DE IDENTIFICACIÓN.

Al iniciar el proceso de identificación, el System Identification muestra las señales de entrada y salida que se están cargando y validando como se detalla en la figura 3.3.1.7.

Desde la ventana Ident, figura 3.3.1.6, escogemos la pestaña Estimate (estimar), y seleccionamos la opción Quick Start, esta opción realiza la estimación de los modelos matemáticos del sistema, y los carga en los casilleros llamados Model View (vista de modelo), y se observa los modelos de la respuesta al impulso (imp), la respuesta de frecuencia del sistema (spad) y los modelos para un sistema en tiempo discreto (arxqs) y para un sistema continuo (n4s1).

En la figura 3.3.1.8, se especifica los modelos que proporciona el System Identification.

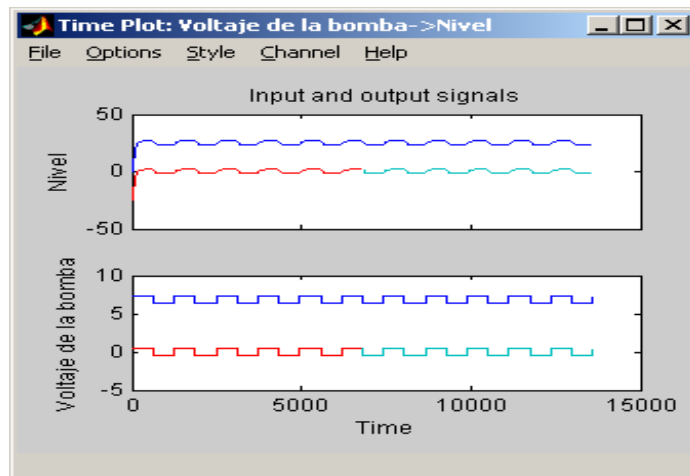
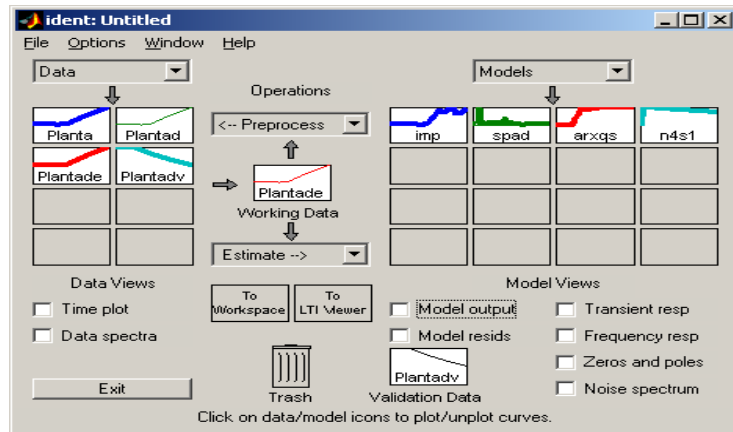
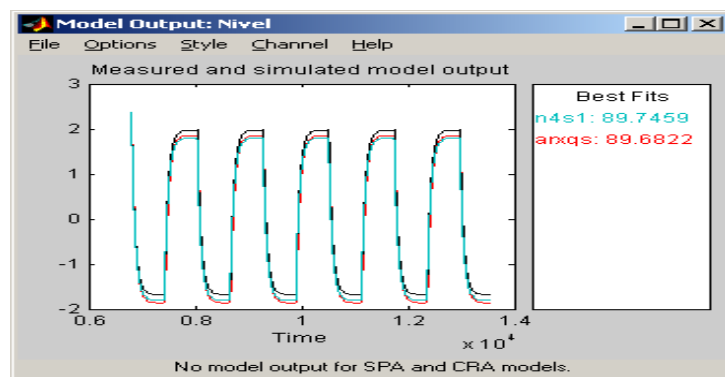


FIGURA 3.3.1.7. SEÑAL DE ENTRADA (Vb) Y SEÑAL DE SALIDA (H) EN SYSTEM IDENTIFICACIÓN.

En la ventana llamada Model Output (modelo de salida) de la figura 3.3.1.8 (B), observamos que el mejor porcentaje de aceptación es del 89.7459 % con el modelo n4s1, según las variables de entradas y salidas definidas. Para mejorar el porcentaje de aceptación del modelo, seleccionamos solo el rango de variación en el punto de control de 25 cm. de nivel y procedemos a identificar nuestra planta.



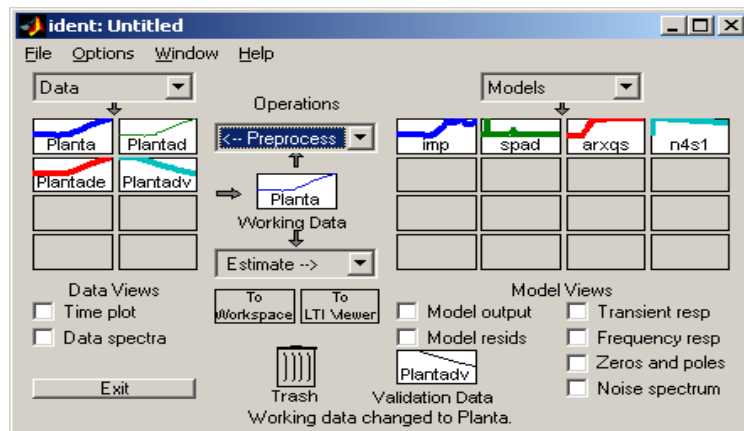
(A)



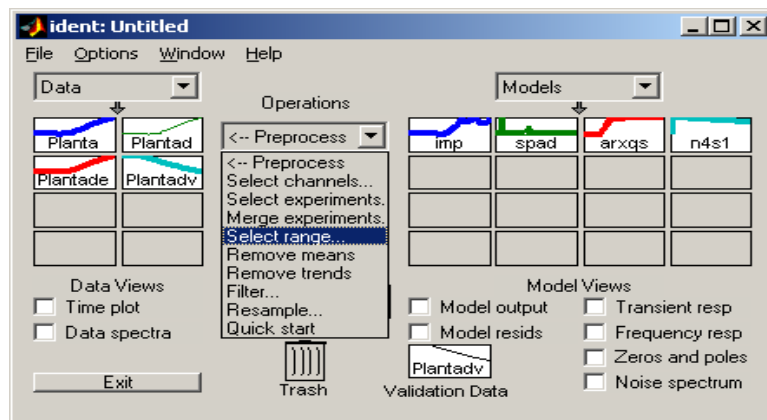
(B)

FIGURA 3.3.1.8. A) MODELOS ESTIMADOS; B) % DE ACEPTACIÓN DE LOS MODELOS DE SALIDA.

Como se muestra en la figura 3.3.1.9 (A), seleccionamos la casilla llamada Planta del Data Views (Vista de datos) y la arrastramos a la casilla Working Data (Dato de trabajo), para reiniciar la identificación de la planta, como se observa en la figura 3.3.1.1.0.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.1.9. A) SELECCIÓN DE DATO PLANTA; B) SELECCIÓN DE RANGO PARA MEJORAR LA IDENTIFICACIÓN.

En la pestaña Preprocess (preprocesos), escogemos la opción Select range (selección de rango), y el identificador nos presenta la siguiente pantalla como se detalla en la figura 3.3.1.10.

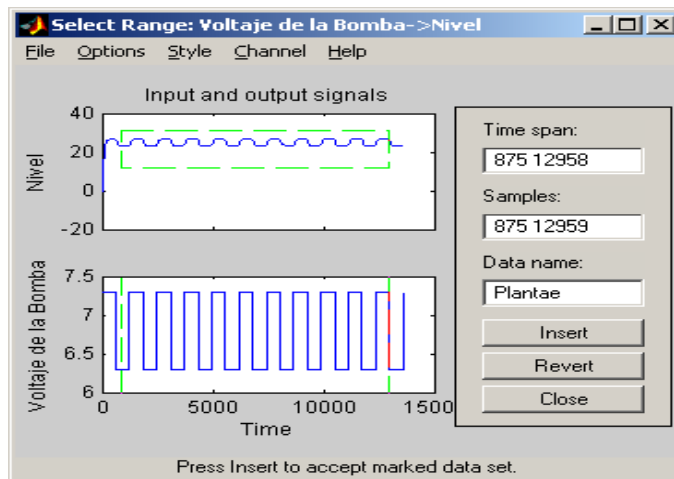
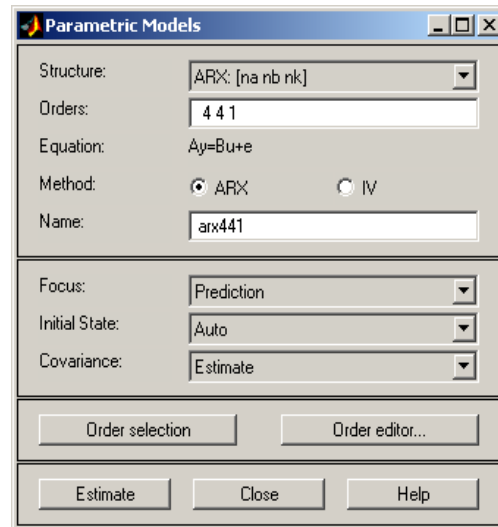


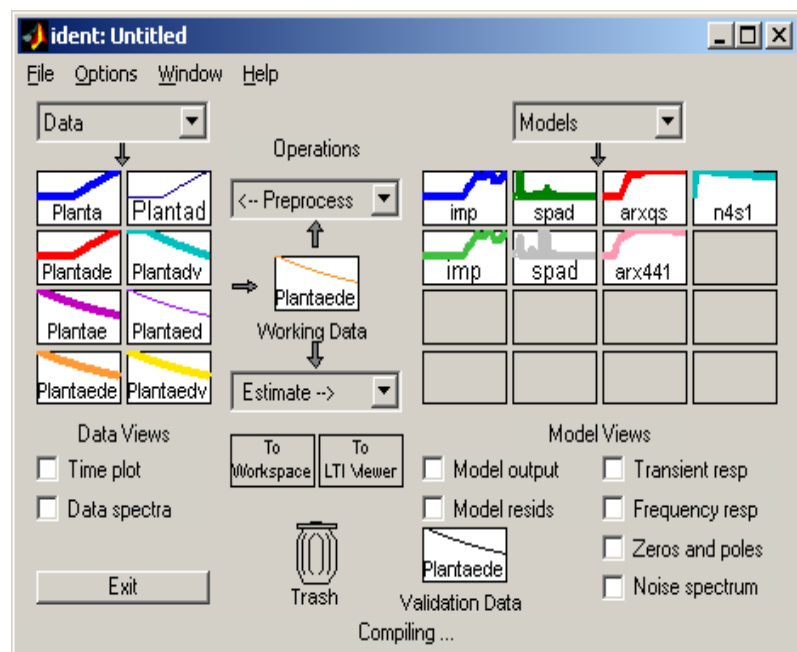
FIGURA 3.3.1.10. SELECCIÓN DE RANGO EN LAS SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA.

Seleccionando el rango de las señales de entrada y salida entre 875s a 12958s, figura 3.3.1.10, hacemos click en la pestaña Insert (insertar) y se carga el nuevo dato llamado Plantae en las casillas Data View. De igual manera reiniciamos la identificación con el nuevo dato Plantae.

Desde la ventana Ident, nuevamente escogemos la pestaña Estimate (estimar), seleccionamos la opción Parametrics models (Modelos paramétricos) y escogemos el modelo ARX441 y hacemos click en el botón Estimate (estimar), entonces estimamos y se carga el modelo matemático ARX441, como se muestra en la figura 3.3.1.11(A) y (B).



(A)



(B)

FIGURA 3.3.1.11. A) SELECCIÓN DEL MODELO ARX441;
B) ESTIMACIÓN DEL MODELO ARX441 EN LA VENTANA
IDENT.

Con esta nueva identificación presentamos el modelo de salida, para observar el mejor porcentaje de aceptación (Best Fits) del modelo estimado que se aproxime a lo real.

En el sistema vamos a usar el modelo ARX441, ya que es el modelo para un sistema continuo, y tiene un porcentaje de aceptación del 98.6713%, que es un porcentaje excelente en el proceso de identificación.

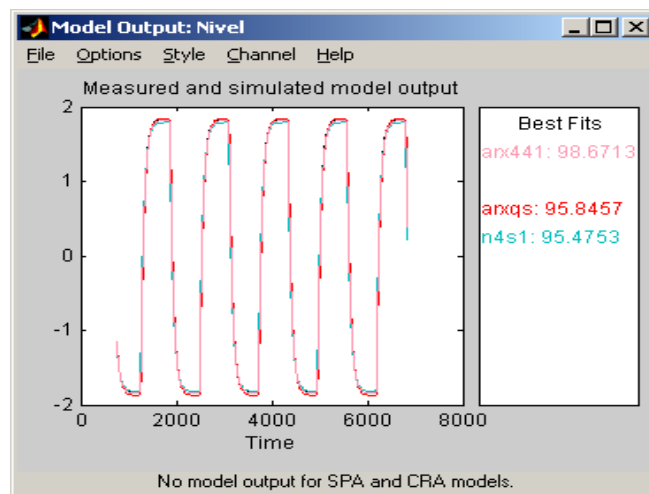
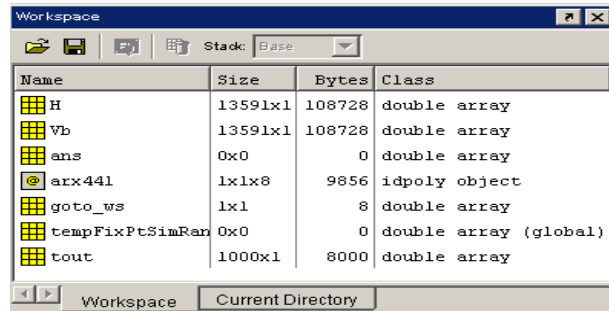


FIGURA 3.3.1.12. MODELO DE SALIDA ESTIMADO ARX441.

Para trasladar el modelo ARX441 al workspace del MATLAB, se debe arrastrar el modelo al icono To Workspace, el cual carga el modelo en el workspace de MATLAB, como se detalla en la figura 3.3.1.13.



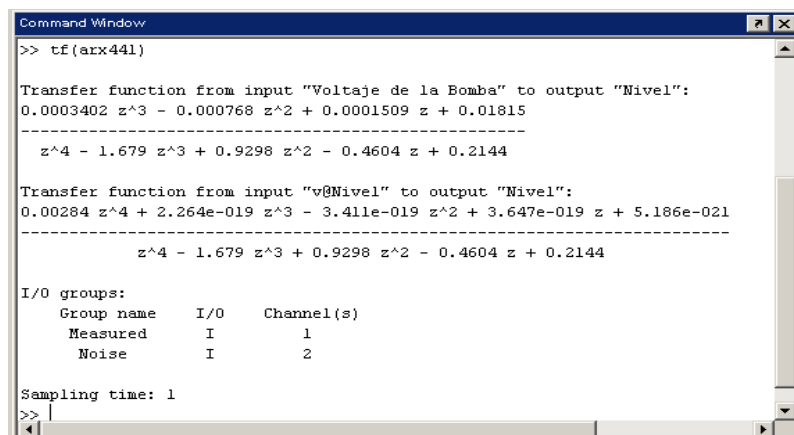
Name	Size	Bytes	Class
H	13591x1	108728	double array
Vb	13591x1	108728	double array
ans	0x0	0	double array
arx441	1x1x8	9856	idpoly object
goto_ws	1x1	8	double array
tempFixPtSimRan	0x0	0	double array (global)
tout	1000x1	8000	double array

FIGURA 3.3.1.13. MODELO ARX441.

Definido el modelo en el workspace, y para trabajar con el mismo se escribe en la ventana de comandos, lo siguiente:

```
>>tf(arx441)
```

Por lo que se muestra en la ventana de comando la función de transferencia del modelo en Transformada Z (discreta), figura 3.3.1.14.



```
>> tf(arx441)

Transfer function from input "Voltaje de la Bomba" to output "Nivel":
0.0003402 z^3 - 0.000768 z^2 + 0.0001509 z + 0.01815
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

Transfer function from input "v@Nivel" to output "Nivel":
0.00284 z^4 + 2.264e-019 z^3 - 3.411e-019 z^2 + 3.647e-019 z + 5.186e-021
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

I/O groups:
Group name    I/O    Channel(s)
Measured      I       1
Noise         I       2

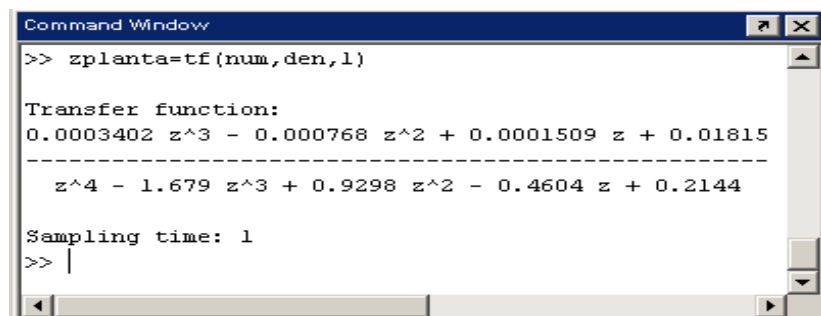
Sampling time: 1
>>
```

FIGURA 3.3.1.14. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO ARX441.

En la figura 3.3.1.14, la primera función de transferencia que se observa es la relacionada al sistema de acuerdo a la señal de entrada y salida, y la segunda es respecto al error del modelo estimado con respecto al real. Almacenamos estas funciones de transferencias mostradas en la figura 3.3.1.13, en una variable de la siguiente manera: en la ventana de comandos de MATLAB se escribe el nombre de la función de transferencia:

```
>>zplanta=tf(num,den,1);
```

Donde la variable de almacenamiento es zplanta, y donde num, y den es el numerador y denominador respectivamente de la función de transferencia que se necesita almacenar. El tiempo de muestreo para la transformada Z es de 1s.

A screenshot of the MATLAB Command Window. The title bar says "Command Window". The command prompt shows the command `>> zplanta=tf(num,den,1)` being executed. Below the command, the output displays the transfer function in a standard form: the numerator is $0.0003402 z^3 - 0.000768 z^2 + 0.0001509 z + 0.01815$ and the denominator is $z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144$. Below the transfer function, it states "Sampling time: 1". The command prompt is ready for the next input with `>> |`.

```
Command Window
>> zplanta=tf(num,den,1)

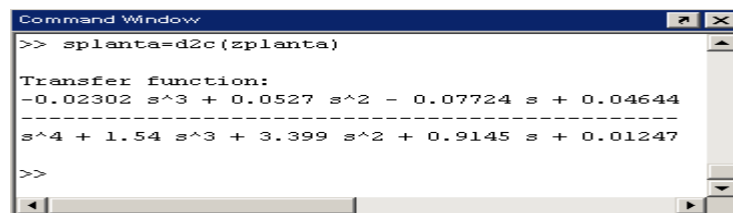
Transfer function:
0.0003402 z^3 - 0.000768 z^2 + 0.0001509 z + 0.01815
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

Sampling time: 1
>> |
```

FIGURA 3.3.1.15. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO EN TRANSFORMADA Z.

En la figura 3.3.1.15, se muestra la ventana de comandos de MATLAB con los procedimientos para determinar la función de transferencia en forma discreta.

La función de transferencia del modelo final que se requiere debe de estar en la Transformada de Laplace para realizar los respectivos análisis, por lo que utilizamos el comando `d2c`, el cual nos permite pasar del campo discreto a continuo, como se define en la figura 3.3.1.16.



```
Command Window
>> splanta=d2c(zplanta)

Transfer function:
-0.02302 s^3 + 0.0527 s^2 - 0.07724 s + 0.04644
-----
s^4 + 1.54 s^3 + 3.399 s^2 + 0.9145 s + 0.01247

>>
```

FIGURA 3.3.1.16. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN TRANSFORMADA DE LAPLACE DEL MODELO IDENTIFICADO.

En la figura 3.3.1.16, hemos definido la variable `splanta` como la función de transferencia del modelo ARX441 que modela la planta de nuestro sistema identificado a partir del modelo real en tiempo continuo. Así se concluye con la obtención de la función de transferencia del modelo identificado.

Podemos concluir que la función de transferencia obtenida con el identificador de sistema es muy aproximada a la función de transferencia obtenida matemáticamente en el capítulo 2, como se detalla en la figura 3.3.1.17. La diferencia entre estas dos funciones es que el modelo identificado nos proporciona una función de transferencia con tres ceros mientras que el modelo matemático posee dos ceros.

$$\begin{array}{l} \text{Transfer function:} \\ 0.00562 s^2 - 0.007813 s + 0.0453 \\ \hline s^4 + 1.548 s^3 + 3.403 s^2 + 0.5267 s + 0.0124 \end{array}$$

FIGURA 3.3.1.17. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO.

A pesar que en la función de transferencia obtenida matemáticamente posee 2 ceros y 4 polos, comparada con la función de transferencia identificada que posee un cero más, podemos decir que son relativamente iguales. Esto sucede porque el identificador de sistemas para modelar un sistema siempre proporciona una función de transferencia de la forma $n/(n+1)$, ó n/n , para tratar de que el modelo identificado converja con el modelo matemático, ante variaciones de señal

a la entrada del sistema, ya que la estrategia del identificador de sistemas es mostrar una función de transferencia que modele nuestro sistema matemático con el mínimo error posible entre ambos modelos.

3.3.2. Diseño del Controlador del Sistema.

Para determinar el controlador de nuestro sistema de manera analítica utilizamos la herramienta SISO de MATLAB, la misma es una interfaz gráfica (GUI) que nos ayuda analizar sistemas de control retroalimentado, es decir en lazo cerrado. En este punto analizaremos y compararemos el diseño del controlador del sistema matemático y real.

Aplicando la herramienta SISO, se puede ajustar de una manera gráfica las variaciones y la dinámica del compensador, que SISO lo define con la letra C y del prefiltro definido como F.

Con la ayuda del Lugar Geométrico de las Raíces que nos proporciona el SISO de una manera gráfica, se puede utilizar el criterio del Lugar Geométrico de las Raíces para estabilizar

el lazo de retroalimentación, y aplicar criterios de la calidad de la respuesta del sistema en el dominio del tiempo. Además con la utilización de los diagramas de Bode se puede ajustar el ancho de banda del sistema, así mismo definir la ganancia y los márgenes de fase.

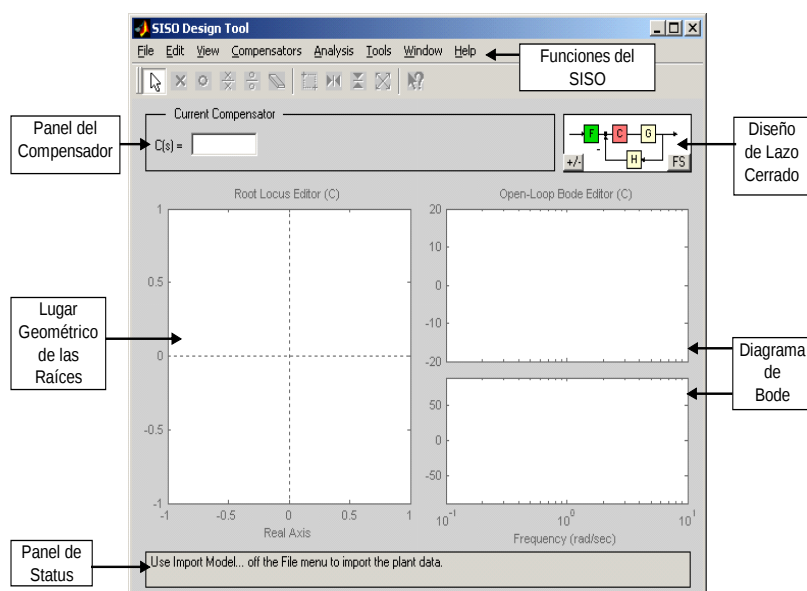


FIGURA 3.3.2.1. HERRAMIENTA SISO.

Con la utilización de algunas funciones del SISO, se puede observar el comportamiento del sistema, al ajustar el compensador y el prefiltro, con una señal Escalón a la entrada del lazo de retroalimentación.

Esta herramienta nos ofrece el criterio de diagrama de Nichols a lazo abierto o el diagrama de Bode, que se puede seleccionar desde el menú View (Ver). Las funciones que proporciona el SISO, están ligadas entre sí de una forma dinámica, es decir, si se cambia un parámetro en el Lugar Geométrico de las Raíces afecta inmediatamente los diagramas de Bode, Nichols y al análisis de la respuesta al Escalón, por lo que todas estas funciones nos ayudan a definir y elegir el controlador apropiado para que nuestro sistema responda de una manera dinámica, rápida y precisa según las condiciones establecidas en nuestro sistema.

3.3.3. Ajuste del Controlador.

3.3.3.1. Modelo Matemático.

Partimos de nuestro modelo matemático para cumplir las expectativas del modelo que nos hemos impuesto, al resolver nuestro problema utilizando el modelo matemático también nos proporciona un mayor conocimiento del comportamiento del sistema, ganaremos experiencia y confianza para luego

trabajar en el modelo real del cual obtendremos su función de transferencia mediante la utilización de la herramienta de MATLAB System Identification.

En la parte final realizaremos una comparación de los resultados obtenidos por utilizar el modelo matemático de los resultados del sistema real identificado, comparación que nos permitirá establecer las ventajas y desventajas de nuestra estrategia de control.

En el capítulo 2, realizamos la identificación de la función de transferencia de la planta con la aplicación de conceptos básicos de control automático de manera matemática, ahora lo creamos en un programa que nos facilita el cálculo y simulación de sistemas de control.

El programa de aplicación para la simulación del sistema se llama MATLAB, este programa posee varias herramientas matemáticas, la cual es amigable su aplicación y ejecución, para procesos

matemáticos y de control; por medio de diagramas de bloques, podemos obtener las diferentes simulaciones del sistema aplicando diferentes tipos de controladores, y así obtener la mejor respuesta de estabilidad de nuestro diseño.

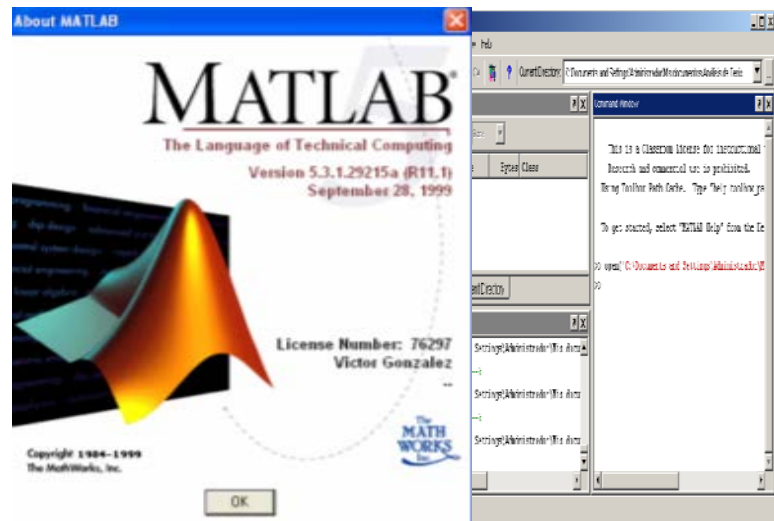


FIGURA 3.3.3.1.1. PRESENTACION DEL PROGRAMA DE MATLAB.

MATLAB se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales. MATLAB también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas TOOLBOXES. Estas son muy importantes para la mayoría de los usuarios de

MATLAB y son conjuntos de funciones que extienden el entorno MATLAB para resolver clases particulares de problemas.

Una de las herramientas importantes del MATLAB es Simulink (Ver Anexo B), y es en esta herramienta donde se crean y ejecutan las simulaciones de los sistemas.

Diagrama de bloques del sistema en SIMULINK.

Con la aplicación de la herramienta básica de MATLAB, Simulink, vamos a diseñar el diagrama de bloques del sistema, para simular y observar la respuesta de nuestro sistema a diversas condiciones.

Simulink posee varias categorías de bloques que se muestran en la ventana inicial. El procedimiento de trabajo para la creación de un modelo será seleccionar los elementos adecuados entre las categorías que presenta Simulink, colocarlos sobre la ventana de diseño y establecer las conexiones entre

ellos. La figura 3.3.3.1.2 muestra la ventana inicial de Simulink.

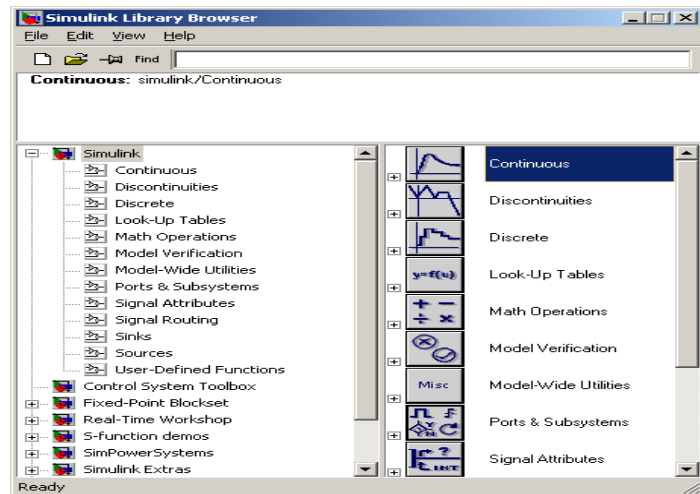


FIGURA 3.3.3.1.2. VENTANA INICIAL DEL
SIMULINK.

En la herramienta Simulink diseñamos el diagrama de bloque de nuestro sistema, agregando cada uno de los parámetros que se necesita para el diseño del sistema. (Ver Anexo B, Simulink).

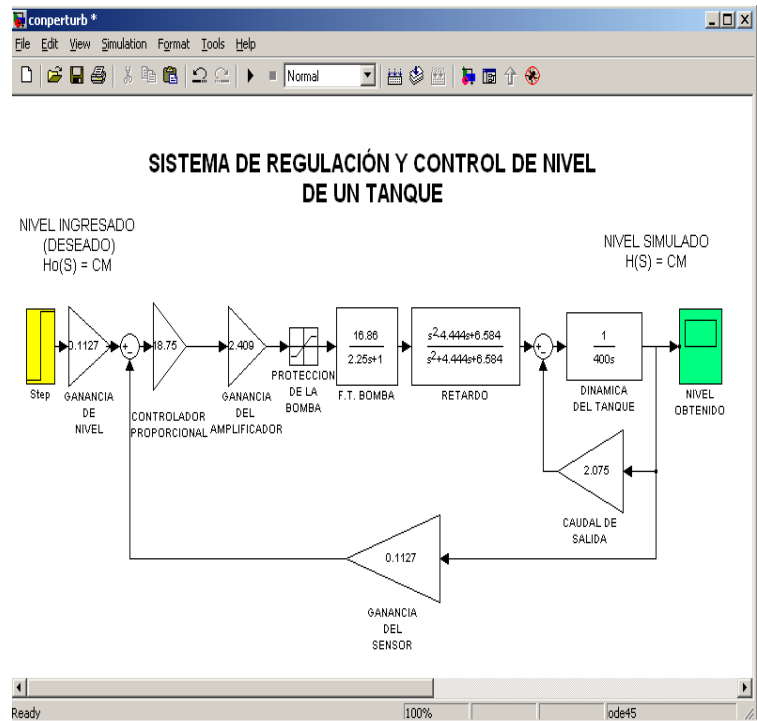
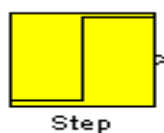


FIGURA 3.3.3.1.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE NIVEL APLICANDO SIMULINK.

En la figura 3.3.3.1.3, mostramos el diseño del sistema requerido, ahora definiremos cada uno de los bloques del sistema en Simulink.



Bloque de la función STEP que representa el nivel deseado de 25 cm.



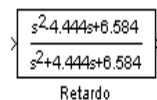
Bloque de ganancia de nivel, es la conversión de nivel deseado a voltaje.



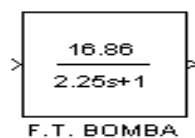
Bloque de la constante del controlador proporcional del sistema, K_p y es una constante de posición porque es un sistema de tipo cero.



Bloque de ganancia de la etapa amplificadora del sistema.



Bloque de retardo del sistema, en nuestro caso es de 1.3538 segundos. Esta función de transferencia se la determinó con la aplicación del criterio de Padé.



Bloque de función de transferencia dinámica de la bomba DC.



Bloque de comparación de dos señales continuamente.



Bloque de la dinámica del tanque principal.

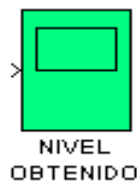


Bloque de caudal de salida del tanque principal proporcionada por la válvula de compuerta y donde $K1 = \frac{0.5}{\sqrt{h(s)}}$, es

la linealización del nivel que proporciona el tanque principal. Con $h = 25 \text{ cm.}$ y $Qs = 2.075 \text{ cm}^3/\text{s.}$



Bloque de ganancia del sensor ultrasónico de nivel.



Bloque llamado nivel obtenido, es un osciloscopio donde se genera la gráfica de respuesta del sistema en el tiempo.



Bloque de protección en caso de sobrevoltaje para la bomba DC.

Finalizando la descripción de cada uno de los bloques que compone el sistema, se concluye el diseño del sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque aplicando Simulink.

Análisis de la Estabilidad según el Lugar Geométrico de las Raíces.

La herramienta gráfica SISO (Ver Anexo B, SISO), la cual nos ayuda a analizar la estabilidad del sistema según el Lugar Geométrico de las Raíces y por medio de sus funciones determinar el controlador de sistemas en lazo cerrado que permita cumplir con las especificaciones de comportamiento para el sistema.

Una característica importante de esta herramienta es que nos proporciona la posibilidad de analizar el comportamiento del sistema al ir variando los parámetros de ajuste del controlador, mediante por ejemplo, la respuesta dinámica de la señal de salida al aplicar una señal tipo Escalón en la referencia.

La gráfica de la señal de salida nos permite visualizar el cumplimiento con las especificaciones de respuesta en el dominio del tiempo: como el Tiempo de Estabilización y el Sobrenivel Porcentual.

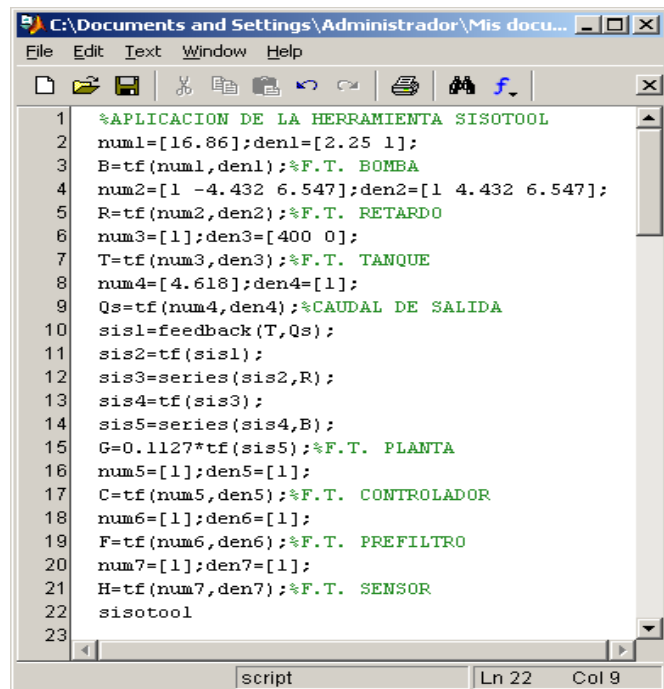
Para aplicar la herramienta SISO necesitamos desarrollar un archivo editor en la herramienta m-file (archivo editor de MATLAB), para establecer e ingresar los parámetros de cada una de las funciones de transferencia que conforman nuestro sistema, está definidos como:

C: Función de transferencia del Controlador.

G: Función de Transferencia de la Planta.

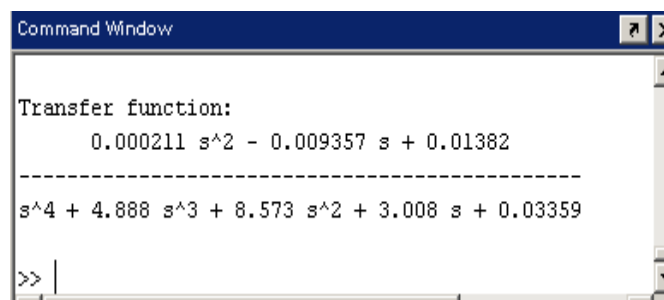
H: Función de Transferencia de Retroalimentación.

F: Función de Transferencia de entrada (Prefiltro).



```
1 %APLICACION DE LA HERRAMIENTA SISOTOOL
2 num1=[16.86];den1=[2.25 1];
3 B=tf(num1,den1);%F.T. BOMBA
4 num2=[1 -4.432 6.547];den2=[1 4.432 6.547];
5 R=tf(num2,den2);%F.T. RETARDO
6 num3=[1];den3=[400 0];
7 T=tf(num3,den3);%F.T. TANQUE
8 num4=[4.618];den4=[1];
9 Qs=tf(num4,den4);%CAUDAL DE SALIDA
10 sis1=feedback(T,Qs);
11 sis2=tf(sis1);
12 sis3=series(sis2,R);
13 sis4=tf(sis3);
14 sis5=series(sis4,B);
15 G=0.1127*tf(sis5);%F.T. PLANTA
16 num5=[1];den5=[1];
17 C=tf(num5,den5);%F.T. CONTROLADOR
18 num6=[1];den6=[1];
19 F=tf(num6,den6);%F.T. PREFILTRO
20 num7=[1];den7=[1];
21 H=tf(num7,den7);%F.T. SENSOR
22 sisotool
23
```

(A)



```
Command Window

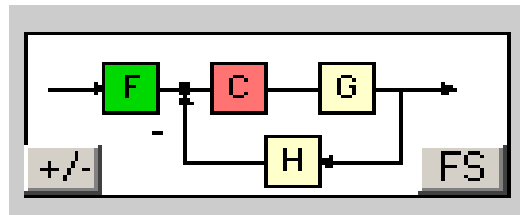
Transfer function:
      0.000211 s^2 - 0.009357 s + 0.01382
-----
s^4 + 4.888 s^3 + 8.573 s^2 + 3.008 s + 0.03359

>> |
```

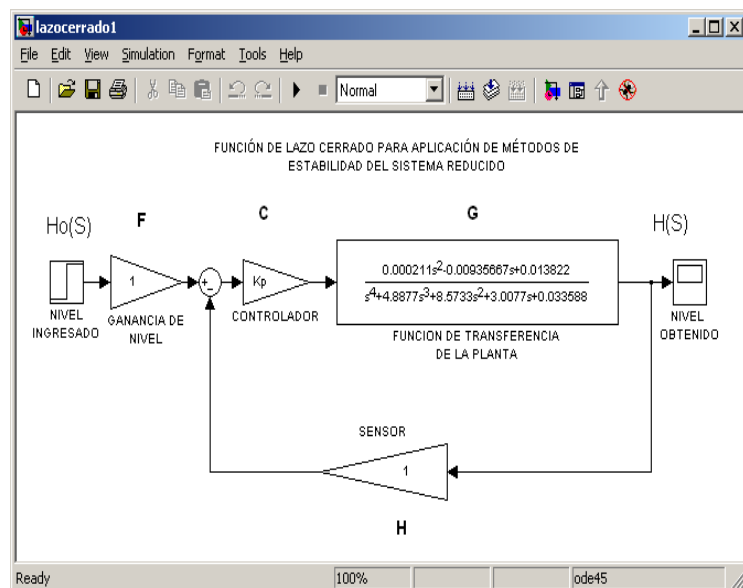
FIGURA 3.3.3.1.4. A) APLICACIÓN DEL EDITOR DE MATLAB; B) FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA PLANTA.

Se definen los parámetros de las funciones de transferencia como F, C, G y H, por la estrategia que exige la herramienta SISO, ya que tiene un esquema

básico, como se muestra en la figura 3.3.3.1.5, para iniciar la aplicación de sus funciones.



(A)

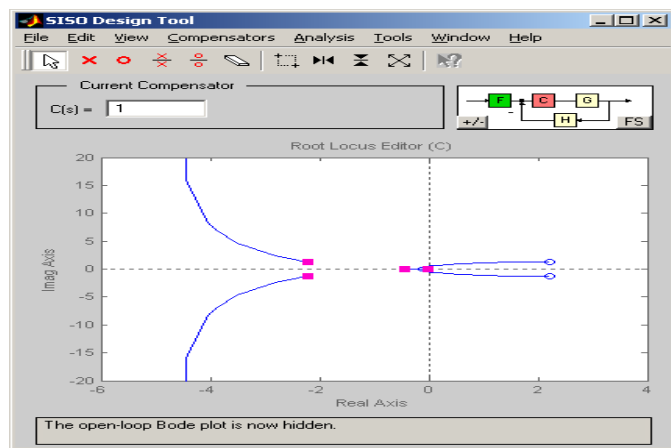


(B)

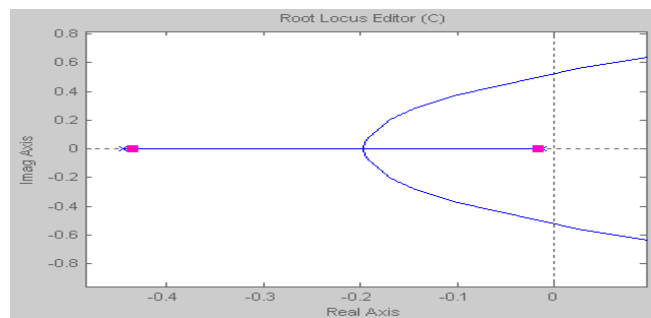
FIGURA 3.3.3.1.5. A) ESQUEMA BÁSICO SISO; B) DIAGRAMA REDUCIDO DE NIVEL.

De la figura 3.3.3.1.4 (A), copiamos del editor de MATLAB las funciones de transferencia definidas, cargamos y ejecutamos en la ventana llamada

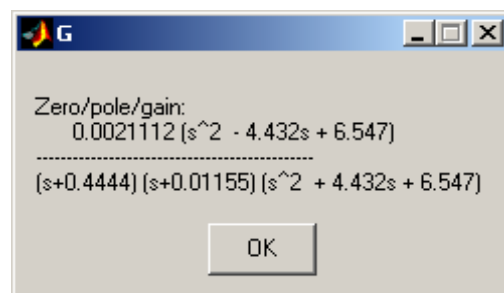
Workshop (ventana de comandos del MATLAB), la aplicación SISO, figura 3.3.3.1.6.



(A)



(B)



(C)

Plant Model: G	
Zeros:	Poles:
$2.22 \pm 1.28i$	$-2.22 \pm 1.28i$
	-0.444
	-0.0115

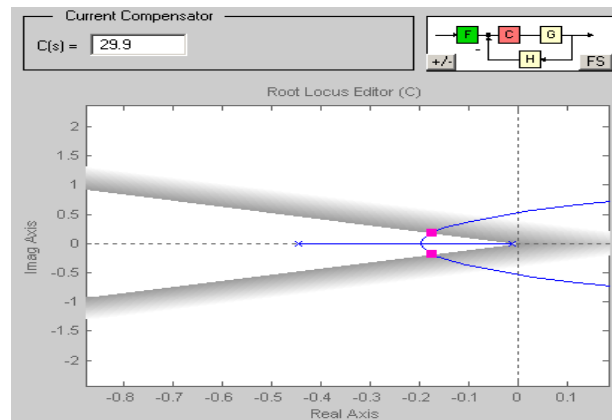
(D)

FIGURA 3.3.3.1.6. A) VENTANA GRÁFICA DE SISO;
B) ACERCAMIENTO DE LAS RAÍCES
DOMINANTES; C) F. T. DE LA PLANTA REDUCIDA
POR EL SISO; D) POLOS Y CEROS DE LA F. T. DE
LA PLANTA.

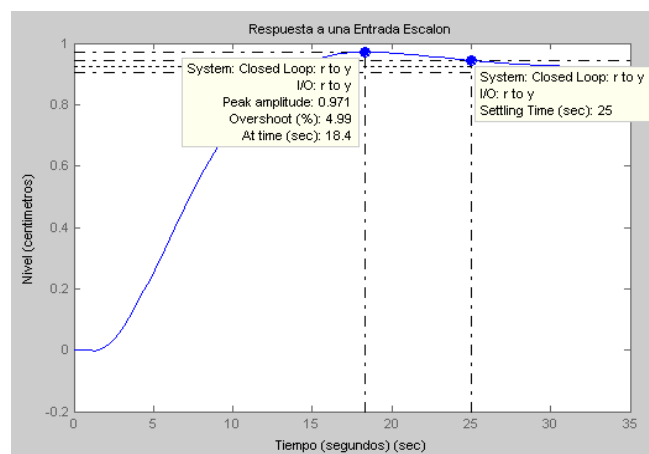
Con la aplicación SISO, figura 3.3.3.1.6, se observa el Lugar Geométrico de las Raíces del sistema, y el sistema tiene un par de raíces dominantes, las mismas que al aumentar la ganancia conducen el sistema a la inestabilidad.

Según la herramienta SISO, el valor de K (ganancia del controlador proporcional) que vuelve inestable el sistema es cuando $K > 157$, y es aproximado al valor que se obtuvo en el capítulo 2 con el método de Routh Hurwitz.

Como primer paso de ajuste de nuestro sistema en lazo cerrado, quisiéramos que la respuesta del sistema a un cambio de referencia tipo Escalón, tenga un Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.1.7. A) LÍMITE DEL SOBRENIVEL PORCENTUAL; B) RESPUESTA ESCALÓN AL AJUSTE DE K.

Aplicando la herramienta SISO en la que hemos demarcado la zona límite que cumple con la condición de Sobrenivel Porcentual “SP” deseado, y mostrando un acercamiento de las raíces dominantes, figura 3.3.3.1.7, podemos encontrar que el valor de la ganancia es 29.9, y este valor de ganancia se define como la constante de proporcionalidad de posición K_p , ya que la función de transferencia de la planta es de tipo cero.

Analizando la Respuesta Escalón, figura 3.3.3.1.7 (B), con el valor de $K = 29.9$, observamos que el tiempo de estabilidad es de 25s.

Si quisiéramos mejorar el tiempo de estabilización, llego a la conclusión que no me es posible, porque para tener un menor tiempo de estabilización deberían desplazarse las raíces dominantes más a la izquierda en el plano S . Por esta razón se debe intentar utilizar otro modelo de controlador. En nuestro caso el modelo apropiado sería un controlador Proporcional Integral Derivativo

(PID). Como demostraremos a continuación, se introduce dos ceros y un polo al controlador; el primer cero que se introduce al controlador es para eliminar el polo dominante de la planta, y el segundo cero que se coloca es para halar las trayectorias de las raíces, para disminuir el tiempo de respuesta. Mientras que el polo que agregamos, lo ubicamos en el origen para mantener la estabilidad del sistema, y el Error de Estado Estacionario “ess” sea igual a 0.

El controlador Proporcional Integral Derivativo, deformará el gráfico del Lugar Geométrico de las Raíces de tal forma que las raíces dominantes se desplacen en el sentido deseado más hacia a la izquierda del plano S, figura 3.3.3.1.8.

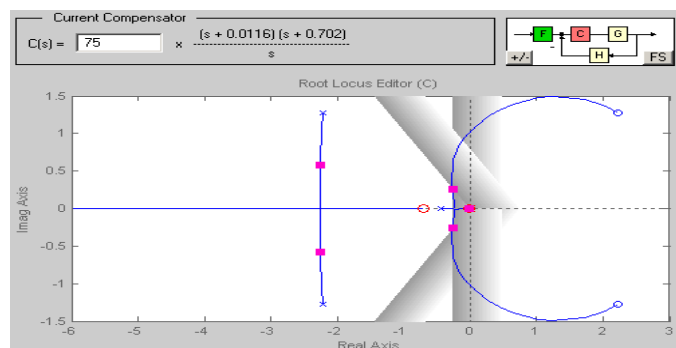


FIGURA 3.3.3.1.8. AGREGACIÓN DE CEROS EN EL CONTROLADOR.

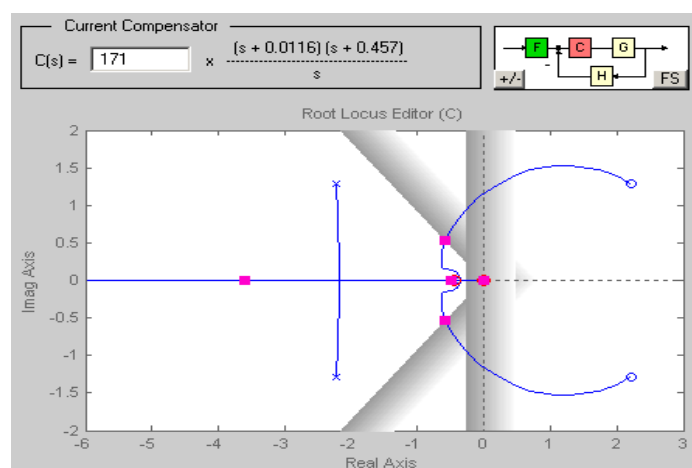
Se puede observar el efecto de los dos ceros del controlador Proporcional Integral Derivativo en el gráfico del Lugar Geométrico de las Raíces.

El efecto deseado se logra cuando ubicamos el primer cero con la misma magnitud del polo dominante del sistema en -0.01155 del plano S y el segundo cero se ubica en -0.702 para estabilizar el sistema en menor tiempo. Esto se puede observar en un acercamiento del gráfico del Lugar Geométrico de las Raíces, figura 3.3.3.1.9. Ahora es cuestión de un ajuste fino del cero de tal manera que las raíces dominantes cumplan con las especificaciones del Sobrenivel Porcentual “SP” y del Tiempo de Estabilización “ts” deseado. En nuestro caso particular, deseamos un Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$ y un tiempo de estabilización aproximado a 15s.

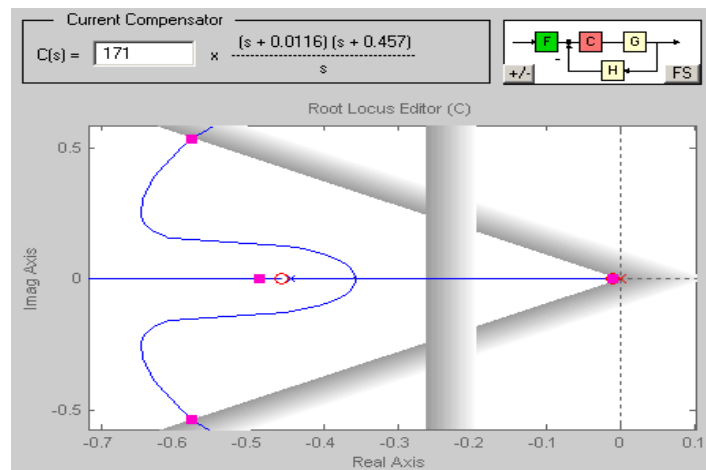
Se selecciona como estrategia de tiempo de estabilidad aproximado de 15s en el sistema, figura 3.3.3.1.9., por la circunstancia que al agregar el cero en -0.702 del plano S en el controlador, y al moverlo

justamente en la posición del segundo polo dominante de la planta en -0.444 , el sistema tiene un tiempo de estabilidad aproximado de $15s$ y este es un tiempo aceptable para iniciar el ajuste del sistema. Al mover el cero a la derecha de este polo el sistema aumenta el tiempo de estabilidad a más de $20s$, mientras que al mover levemente el cero del controlador a la izquierda del polo dominante en -0.457 del plano S , el tiempo de estabilidad disminuye a $8.7s$, figura 3.3.3.1.10.

A continuación mostraremos la figura 3.3.3.1.9, la cual muestra una posición más adecuada para los ceros y el polo agregado al sistema.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.1.9. A) AJUSTE DEL SEGUNDO CERO DEL CONTROLADOR PID; B) ACERCAMIENTO DEL SEGUNDO CERO AGREGADO A LAS RAÍCES DOMINANTES DEL SISTEMA.

Este es el menor tiempo de estabilidad que se obtiene en el sistema, manteniendo los parámetros de estabilidad propuestos, si el cero se continua moviendo más a la izquierda, el Sobrenivel Porcentual aumenta a más de 10% y el sistema tiende a oscilar, y si aumentamos la ganancia el sistema se vuelve inestable, figura 3.3.3.1.11.

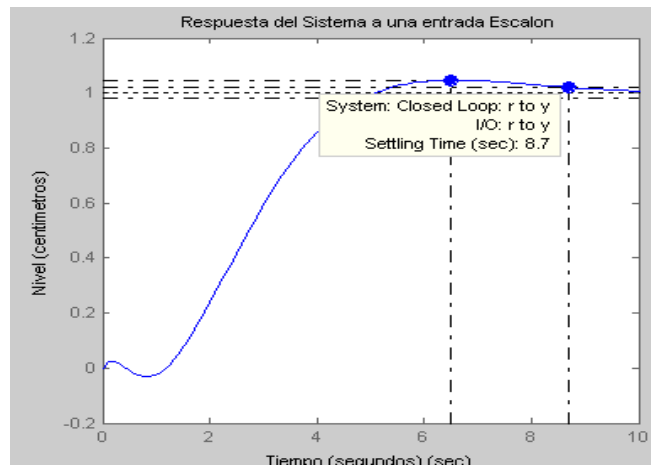
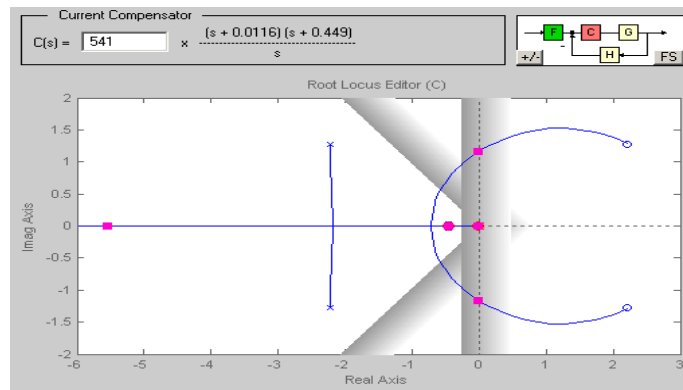
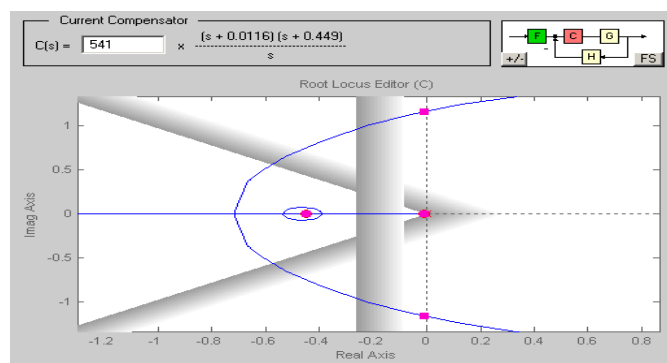


FIGURA 3.3.3.1.10. RESPUESTA DEL SISTEMA EN EL AJUSTE DEL TIEMPO DE ESTABILIDAD.

En la figura 3.3.3.1.11, se muestra el Lugar Geométrico de las Raíces del sistema en el instante que movemos los polos al límite de estabilidad e ingresan al rango de inestabilidad. Se observa que el segundo cero agregado al controlador al moverlo a un valor mayor de -0.449 y si el valor de la ganancia aumenta a un valor mayor que 541 el sistema se vuelve totalmente inestable.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.1.11. A) LÍMITE DE ESTABILIDAD DEL LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES; B) ACERCAMIENTO DE LA POSICIÓN DE LOS POLOS DOMINANTES AL LÍMITE DE ESTABILIDAD.

Cuando los polos entran al rango de inestabilidad, la respuesta del sistema comienza a oscilar y el sistema se vuelve inestable, figura 3.3.3.1.12.



FIGURA 3.3.3.1.12. OSCILACIÓN DE LA
RESPUESTA DEL SISTEMA DISMINUYENDO EL
TIEMPO DE ESTABILIDAD < 8.8S.

Entonces definimos el controlador del sistema como un controlador Proporcional Integral Derivativo PID, ya que el controlador PID estabiliza el sistema en menor tiempo, comparándolo al controlador Proporcional P, en el ajuste aceptado.

Los ceros se encuentran ubicados en -0.01155 y en -0.457 en el plano S , con una Ganancia de 171, y con un polo en el origen. Para eliminar el efecto en la magnitud de la respuesta al cambio de la referencia en forma de Escalón Unitario producido por el cero del controlador, aplicamos un prefiltro con

un polo de magnitud igual al cero del controlador, pero en nuestro caso no es necesario ya que se mantiene la magnitud establecida de control de nivel en centímetros. A continuación definimos el controlador PID como lo muestra la herramienta SISO:

$$PID = 171 * \left(\frac{(S + 0.01155)(S + 0.457)}{S} \right)$$

Al desarrollar este producto, obtenemos los parámetros del controlador PID como:

$$PID = 80.1220 + \frac{0.902589}{S} + 171S$$

La figura 3.3.3.1.13, corresponde a la Respuesta al Escalón Unitario con el ajuste del controlador Proporcional Integral Derivativo del sistema.

La gráfica 3.3.3.1.13, el eje de las abscisas corresponde al tiempo de estabilidad en segundos y el eje de las ordenadas corresponde el nivel del sistema en centímetros.

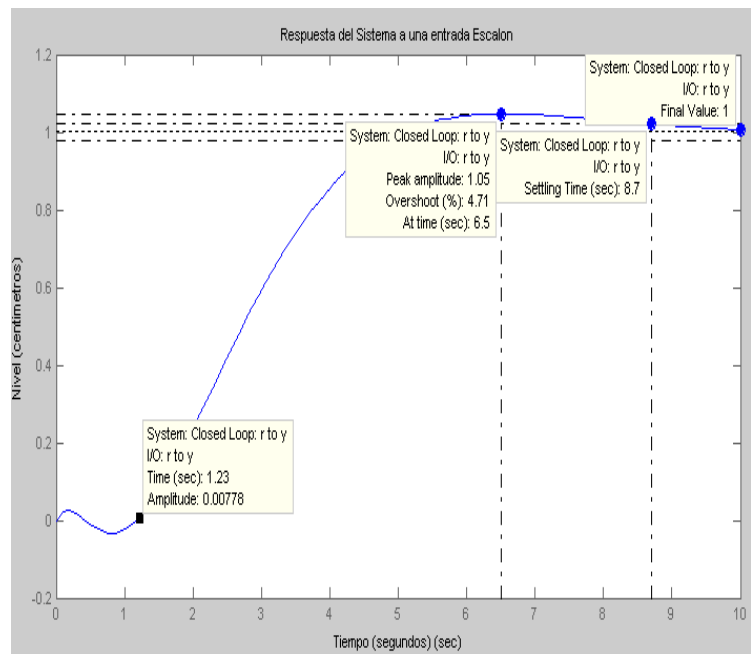


FIGURA 3.3.3.1.13. RESPUESTA A ESCALÓN DEL SISTEMA EN LAZO CERRADO CON EL AJUSTE DEL CONTROLADOR PID.

Esta gráfica, figura 3.3.3.1.13, nos muestra los valores de estabilidad en el punto de control de 1cm. de nivel a una entrada Escalón Unitaria como: el Sobrenivel Porcentual de 4.71%, el tiempo de estabilidad de 8.7s, con error de estado estacionario de 0.0 cm., y un retardo de 1.23s.

Nuestro sistema tiene error de estado estacionario “ $ess = 0$ ”, ya que el modelo matemático de la planta

con el controlador es de tipo uno, y se demostró en el capítulo 2.

3.3.3.2. Modelo Real.

Con esta experiencia lograda, en la cual hemos encontrado una estrategia de control que nos ha permitido acelerar el proceso de respuesta del sistema a un valor aproximado de 8.7s y un Sobrenivel porcentual aproximado de 4.71%, pasamos a aplicar la misma estrategia, pero en este caso el modelo que hemos podido identificar para nuestra planta real.

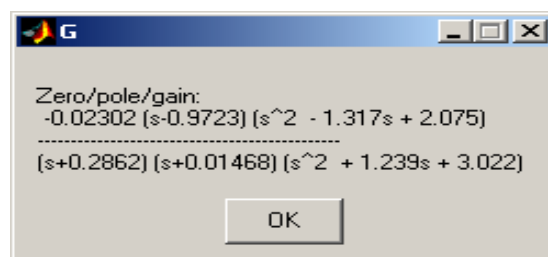
Para definir el controlador del sistema del modelo real de la planta, vamos a utilizar la función de transferencia real identificada de la planta: H/V_b (Nivel / Voltaje de entrada a la bomba), la cual fue estimada e identificada por medio del Identificador de Sistemas (System Identification) como s_{planta} . Por lo que utilizaremos esta variable en la herramienta

SISO, entonces en la ventana de comandos de MATLAB escribimos lo siguiente:

```
>>sisotool(splanta)
```

Aplicando este comando se ejecuta la herramienta SISO, mostrando la ventana de SISO, figura 3.3.3.2.2, con el Lugar Geométrico de las Raíces.

En la figura 3.3.3.2.1 (A), se observa la función de transferencia identificada de la planta en tiempo real y es de cuarto orden con cuatros polos, dos complejos y 2 reales en el lado negativo ($-0.62 \pm 1.62i$, -0.286 y -0.0147) y con tres ceros, dos complejos y uno real en el lado positivo ($0.658 \pm 1.28i$, y 0.972), figura 3.3.3.2.1 (B).



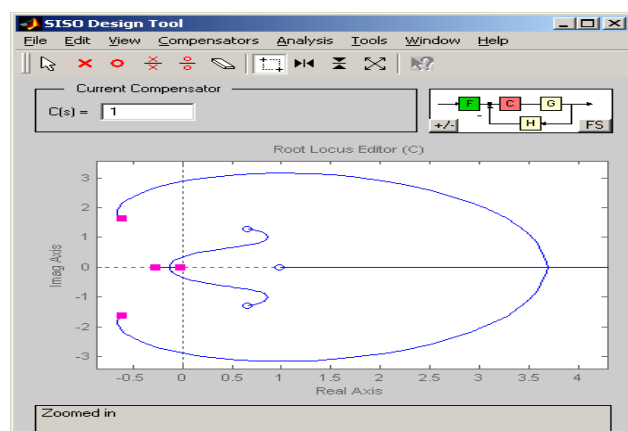
(A)

Plant Model: G	
Zeros:	Poles:
$0.658 \pm 1.28i$	$-0.62 \pm 1.62i$
0.972	-0.286
	-0.0147

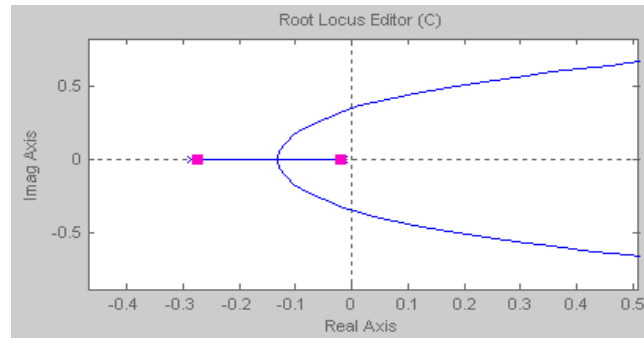
(B)

FIGURA 3.3.3.2.1. A) FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA REAL DE LA PLANTA; B) CEROS Y POLOS DE LA PLANTA.

Se observa en la figura 3.3.3.2.2 (A) que los ceros en el lado positivo del plano S, significan que en algún instante el sistema se hace inestable, esto es debido al análisis del retardo del sistema por la aproximación de Padé.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.2.2. A) TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES DEL SISTEMA H/Vb; B) ACERCAMIENTO DE LAS RAÍCES DOMINANTES DEL SISTEMA H/Vb.

Se muestra las trayectorias de las raíces sin ajuste del controlador, figura 3.3.3.2.2 (A), por lo que realizamos un acercamiento de las trayectorias de las raíces, figura 3.3.3.2.2 (B), para observar los polos dominantes del sistema en el semi-plano izquierdo de la gráfica en -0.0215 y en -0.275, que se encuentran cercanos al origen.

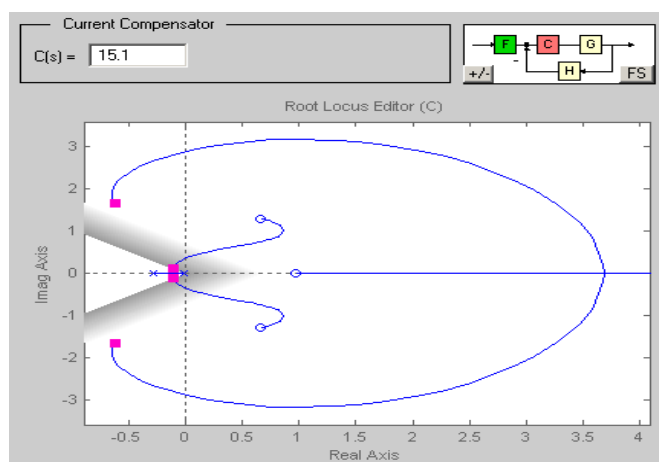
Además, el tiempo de estabilidad del sistema sin ajuste del controlador es aproximadamente 300s, y el

eje de las ordenadas corresponde al nivel del sistema.

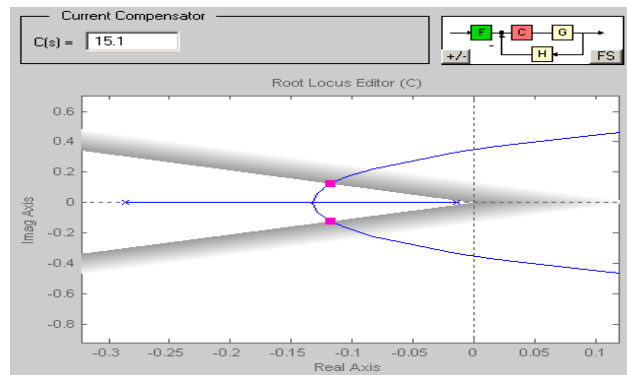
Se observa que al aumentar el valor de la ganancia K > 86.5 el sistema se hará inestable.

Como fase inicial, ajusto el valor de la ganancia para que la respuesta presente un Sobrenivel Porcentual “SP” $\leq 5\%$, como valor aceptable.

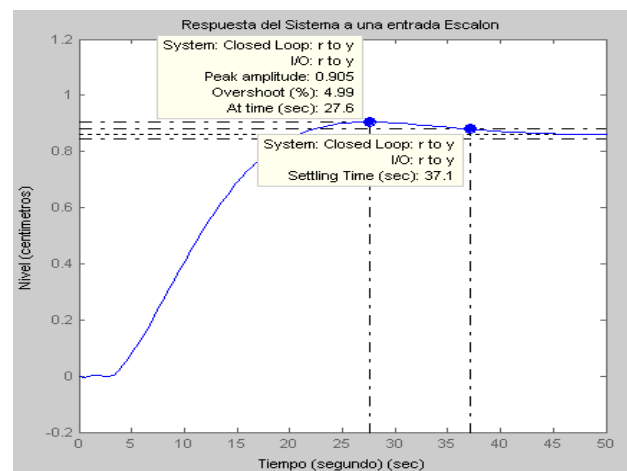
Esto lo hacemos bajo la asunción de que el sistema posee una dominancia de segundo orden.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.3.3.2.3. A) AJUSTE DEL SOBRENIVEL PORCENTUAL A $\leq 5\%$; B) ACERCAMIENTO DEL AJUSTE; C) RESPUESTA DEL SISTEMA EN EL TIEMPO A UNA ENTRADA ESCALÓN.

La respuesta del sistema en el tiempo a una entrada Escalón Unitaria, con un Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$, figura 3.3.3.2.3 (C), en esta gráfica observamos que

el tiempo de estabilidad es de 37.1s, y con una ganancia de 15.3, además se observa en la gráfica el retardo del sistema que es 2.5s aproximadamente.

En la segunda fase, como paso siguiente quisiéramos que el tiempo de estabilidad de 37.1s se reduzca, haciendo que los polos dominantes los ubiquemos a la izquierda en el plano S y con la agregación de dos ceros tratamos de eliminar un polo dominante del sistema y con el otro cero disminuir el tiempo de estabilidad, pero manteniendo la especificación del Sobrenivel Porcentual “SP” menor al 5% y el tiempo de estabilización aproximado a 15s.

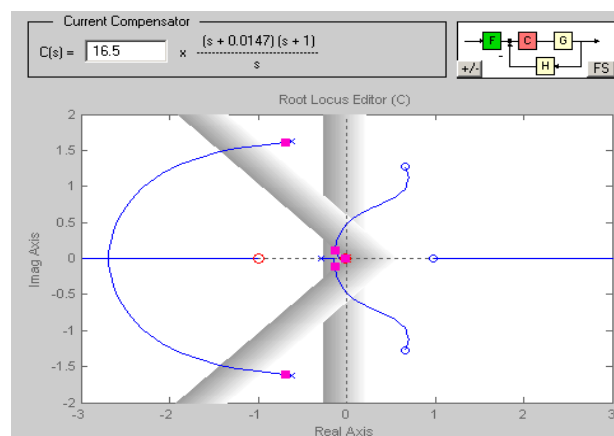


FIGURA 3.3.3.2.4. AGREGACIÓN DE DOS CEROS AL CONTROLADOR.

En la figura 3.3.3.2.4, se observa que la agregación del cero transforma el controlador de un Proporcional a un Proporcional Integral Derivativo PID, un cero lo ubicamos en -0.0147 para eliminar el polo del sistema y el otro cero inicialmente es ubicado en -1 del plano S , y vamos ajustando el valor del cero con la ayuda de la gráfica del Lugar Geométrico de las Raíces, reduciendo el tiempo de estabilidad del sistema.

Se debe tomar en cuenta que la curva del Lugar Geométrico se deforma desplazando el cero a la izquierda.

Desde el punto de vista práctico se observa que el desplazamiento a la izquierda adquiere un máximo, luego de la cual la figura 3.3.3.2.2 se deforma. El rango de estabilidad según el ajuste del controlador en un acercamiento gráfico de los polos dominantes, figura 3.3.3.2.5, está entre -0.289 a 0 en el eje real y de allí en adelante el sistema se vuelve inestable de una manera que no nos es útil para nuestro propósito.

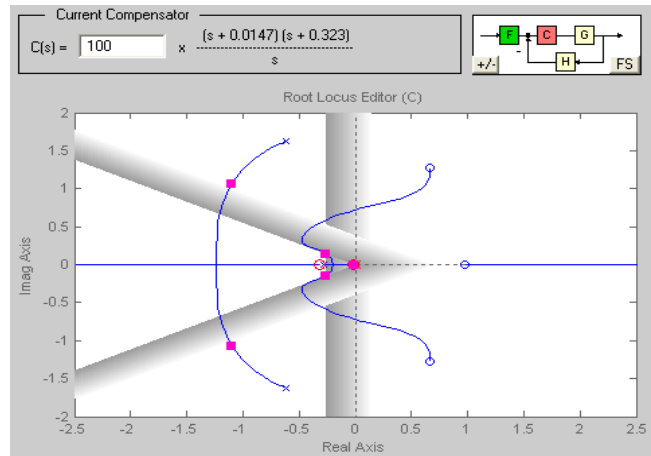
En nuestro análisis, la estrategia de agregar dos ceros además de estabilizar el sistema en menor tiempo, también eliminamos la inestabilidad provocada por el cero ubicado en +0.972 en el eje real del plano S, y con la adición de este cero en el controlador debemos de compensar la ganancia del prefiltro (F), para mantener la estabilidad del sistema en el punto de control, en nuestro caso de 1 cm. de nivel a una entrada Escalón Unitario, pero en este análisis no es necesario.

El controlador que se está aplicando en el sistema es Proporcional Integral Derivativo PID; tiene dos ceros reales en -0.0147 y en -0.323, un polo en el origen y una ganancia de 100, que es una constante de posición Kp, ya que la función de transferencia del modelo real es de tipo cero. El controlador de nuestro sistema se define como:

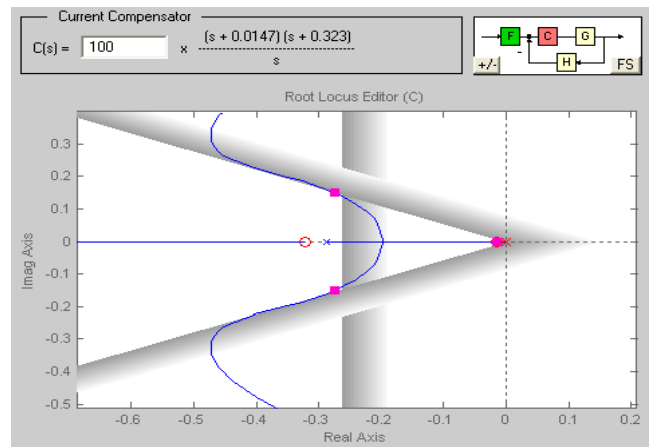
$$PID = 100 \left(\frac{(S + 0.0147)(S + 0.323)}{S} \right)$$

Desarrollando el producto tenemos:

$$PID = 33.77 + \frac{0.4748}{S} + 100S$$



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.2.5. A) AJUSTE DEL SEGUNDO CERO DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA; B) ACERCAMIENTO DE LA GRÁFICA DEL AJUSTE DEL SEGUNDO CERO.

Con la aplicación del controlador Proporcional Integral Derivativo hallado en el sistema real,

obtenemos en la figura 3.3.3.2.6, la Respuesta al Escalón del sistema y obtenemos los valores de estabilidad como: el Sobrenivel Porcentual de 4.97%, el tiempo de estabilización es de 13.5s, con un retardo de 2.5s aproximadamente y con un Error de Estado Estacionario de “ $ess = 0.0 \text{ cm}$ ”.

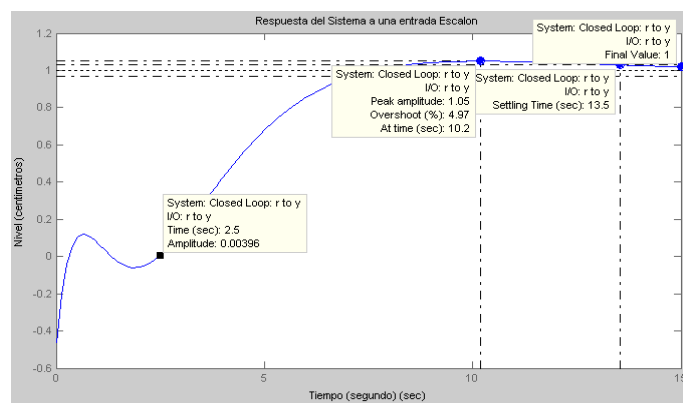
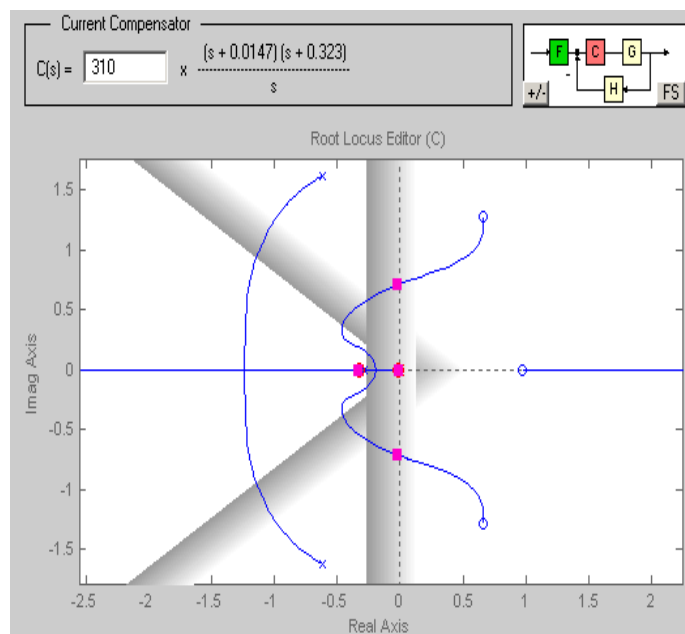


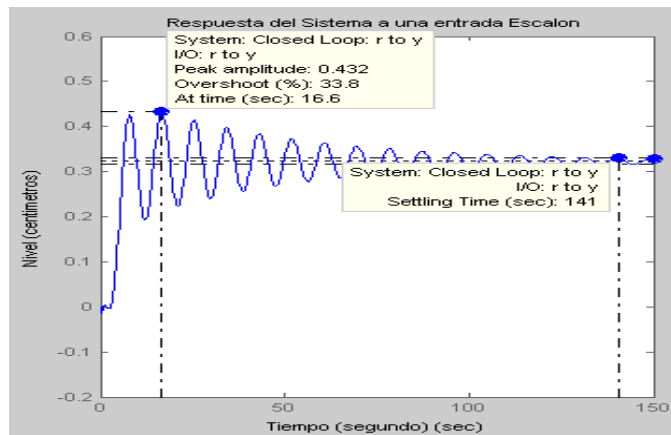
FIGURA 3.3.3.2.6. RESPUESTA A UNA ENTRADA ESCALÓN DEL SISTEMA CON EL AJUSTE DEL CONTROLADOR PID.

Claramente, se observa en la figura 3.3.3.2.6 el retardo del sistema y este incluye el tiempo de ejecución del Host PC al Target PC y el tiempo que tarda el flujo en recorrer a través de la tubería del sistema.

Se puede obtener un mejor ajuste del controlador para la respuesta del sistema con menor tiempo de estabilidad, pero esta mejora en el tiempo influye en los parámetros de estabilidad establecidos, en este caso el Sobrenivel Porcentual se dispara a valores mayores del 5% y el sistema tiende a oscilar hasta que se desestabiliza, y así no se cumple con las estrategias establecidas de control. Con un valor mayor de $K = 310$, el sistema se vuelve inestable, figura 3.3.3.2.7.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.2.7. A) LÍMITE DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA; B) RESPUESTA DEL SISTEMA EN EL LÍMITE DE ESTABILIDAD.

Así de una manera gráfica y analítica hemos obtenido el ajuste del controlador del sistema real identificado y notamos que los valores de estabilidad son muy aproximados a los valores del sistema matemático.

Debemos tener muy en cuenta el análisis del ajuste del controlador de la planta en tiempo real, por la razón que la función de transferencia de la planta identificada en tiempo real posee un polo muy cercano al origen en -0.01468 y el controlador en la adquisición de la planta en tiempo real puede trabajar

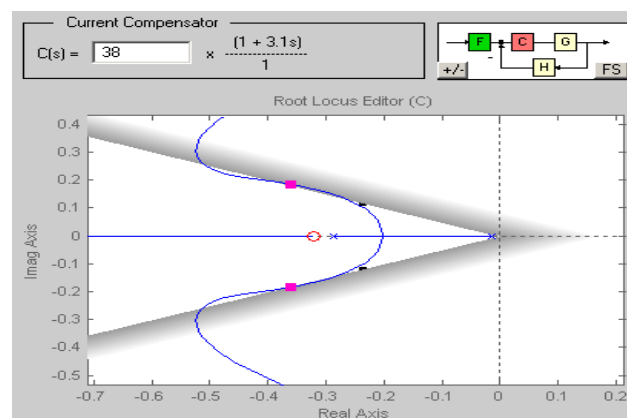
además del PID con un PD normalmente, ya que el polo que posee la planta cercano al origen logra el Error de Estado Estacionario “ess = 0”, y realizando el mismo análisis del ajuste del controlador PID, obtuvimos los parámetros para un Controlador Proporcional Derivativo PD como:

$$PD = 38(1 + 3.1S)$$

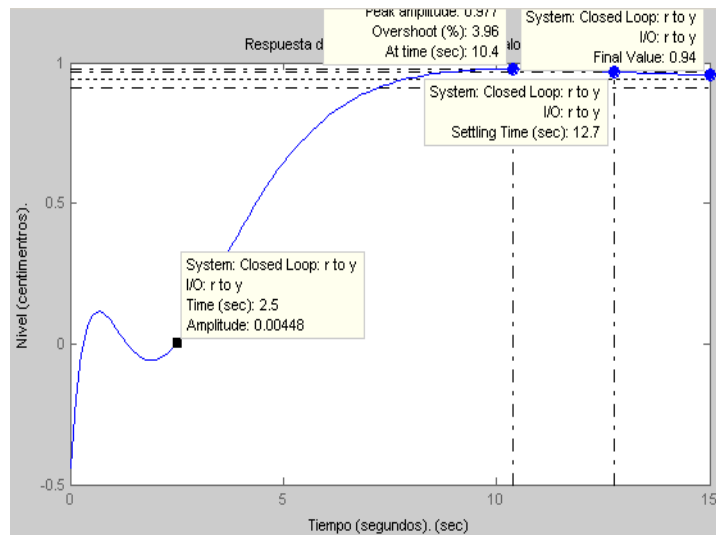
Desarrollando los productos y dejándolos en los parámetros del controlador Proporcional Derivativo PD tenemos:

$$PD = 38 + 117.8S$$

En la figura 3.3.3.2.8., se detalla el ajuste del controlador PD, y la respuesta del sistema.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.3.2.8. A) AJUSTE DEL CONTROLADOR PD DEL SISTEMA; B) RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA ENTRADA ESCALÓN CON EL CONTROLADOR PD.

En la figura 3.3.3.2.8. (B), se detalla los parámetros de estabilidad de la respuesta del sistema con el controlador PD.

En los puntos siguientes aplicaremos el controlador hallado al sistema real identificado en la ejecución de la planta.

TABLA 6
PARÁMETROS DE ESTABILIDAD DEL MODELO
MATEMÁTICO Y DEL MODELO REAL DE LA
PLANTA

MODELO MATEMÁTICO		MODELO REAL	
$\frac{0.002112(S^2 - 4.432S + 6.547)}{(S + 0.444)(S + 0.01155)(S^2 + 4.432S + 6.547)}$		$\frac{-0.02302(S - 0.9723)(S^2 - 1.317S + 2.075)}{(S + 0.2862)(S + 0.01468)(S^2 + 1.239S + 3.022)}$	
CEROS:	POLOS:	CEROS:	POLOS:
2.22±1.28i	-2.22±1.28i	0.658±1.28i	-0.62±1.62i
	-0.444	0.972	-0.286
	-0.01155		-0.0147
PID: 171(S+0.01155)(S+0.457)/S PID: $80.122 + \frac{0.90259}{S} + 171S$		PID: 100(S+0.0147)(S+0.323)/S PID: $33.77 + \frac{0.4748}{S} + 100S$	
TIEMPO DE ESTABILIDAD: ts = 8.7s		TIEMPO DE ESTABILIDAD: ts = 13.5s	
ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO e _{ss} = 0.0cm.		ERROR DE ESTADO ESTACIONARIO e _{ss} = 0.0cm.	
TIEMPO DE RETARDO: tr = 1.3538s		TIEMPO DE RETARDO: tr = 2.5s	
SOBRE NIVEL PORCENTUAL: SP = 4.71%		SOBRE NIVEL PORCENTUAL: SP = 4.97 %	

3.3.4. Aplicación del Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) en la Adquisición de la Planta real.

En la adquisición de la planta en tiempo real con la aplicación del controlador Proporcional Integral Derivativo, debemos de obtener los parámetros de estabilidad similares a los hallados en forma simulada por el modelo real.

En el análisis del sistema, habilitamos el Host PC, el Target PC, la planta, la aplicación del xPC Target, y la comunicación entre el Host y el Target PC (Anexo C), para iniciar la adquisición de datos del sistema en tiempo real, figura 3.3.4.1, para observar la dinámica de respuesta del sistema.

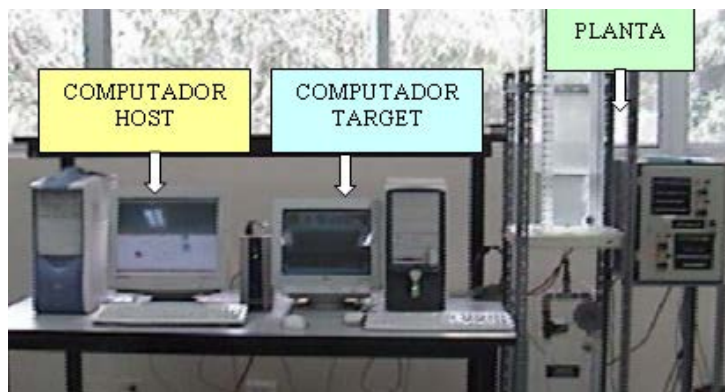


FIGURA 3.3.4.1. ADQUISICIÓN DE DATOS ENTRE EL HOST Y EL TARGET PC DEL SISTEMA.

En el Host PC cargamos el archivo del sistema con su respectivo controlador PID del sistema real, figura 3.3.4.1, y habilitamos los bloques de entradas y salidas analógicas de las señales del xPC Target en tiempo real (Ver Anexo D, habilitación de entradas y salidas en tiempo real), e iniciamos la creación de la aplicación Target (Ver Anexo D, adquisición de datos de la planta), para un nivel de control de 25 cm.

Además habilitando los respectivos Osciloscopios Target (Ver Anexo D, habilitación del Osciloscopio Target), para monitorear las señales de entrada y salida del sistema.

En la puesta en marcha de la planta, la válvula de compuerta (gradual) se encuentra abierta a 2 vueltas de manera fija, y la válvula encendido/apagado de perturbación está desactivada.

En el diseño del sistema de la figura 3.3.4.2, primeramente activamos el switch que proporciona voltaje DC a la bomba por medio de un Dial que se lo llama activación manual, para evitar sobre nivel de voltaje a la bomba en el arranque del sistema.

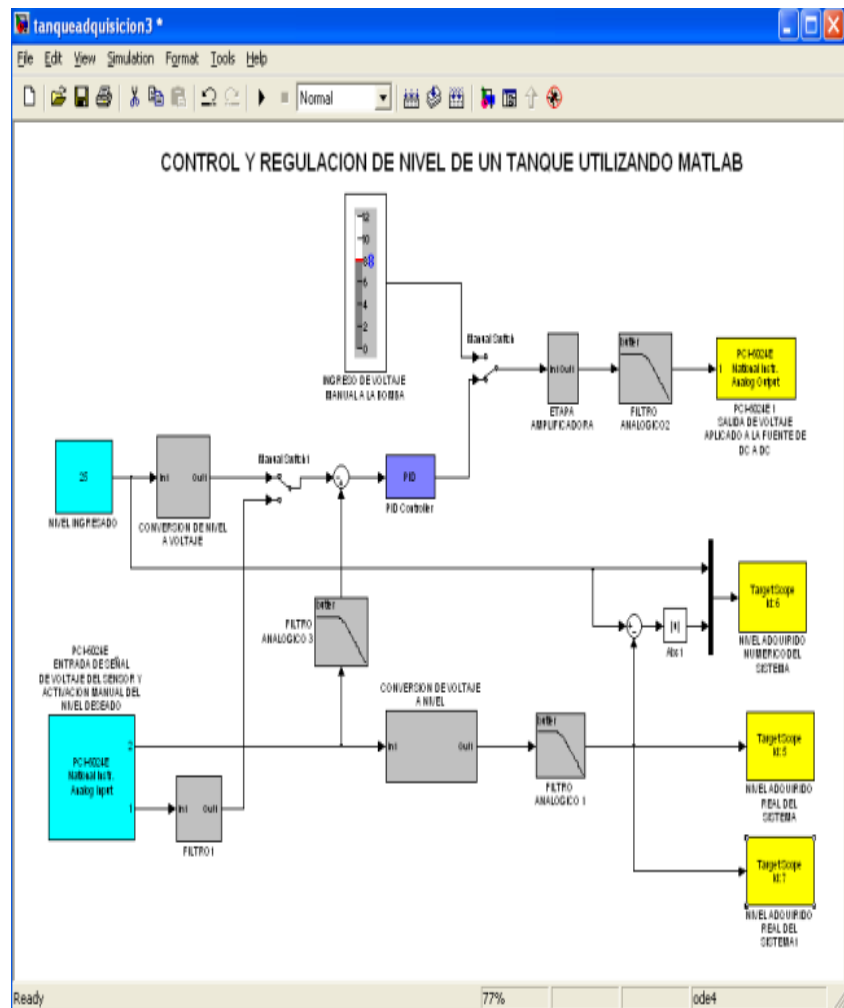


FIGURA 3.3.4.2. MODELO DEL SISTEMA EN TIEMPO REAL.

De esta manera la bomba DC se activa y envía flujo de agua al tanque principal de control, llenándolo paulatinamente y acercándose al punto de control en nuestro caso de 25 cm. de nivel.

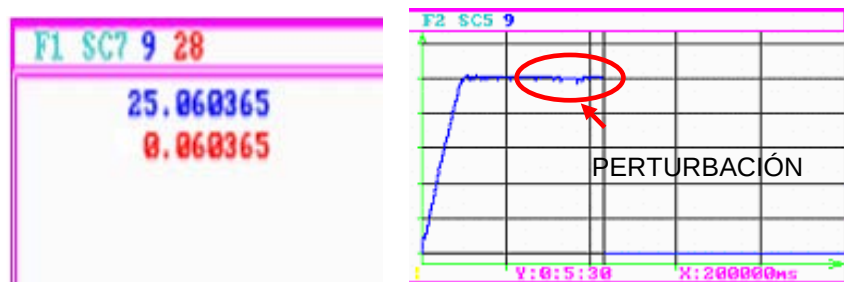
En el momento que el nivel de agua se encuentra cercano al punto de control; activamos el switch en posición automática, y entra la aplicación del modelo del sistema para controlar la planta. Entonces observamos tanto en la planta como en el Target PC la estabilidad del sistema en el punto de control de 25 cm. de nivel.

Cuando el sistema se encuentra estabilizado, activamos la válvula de perturbación por medio de un switch colocado en el panel de control en posición ON y se activa la misma creando variación de nivel en el tanque, en este caso el caudal de salida del tanque principal aumenta y el nivel del líquido disminuye.

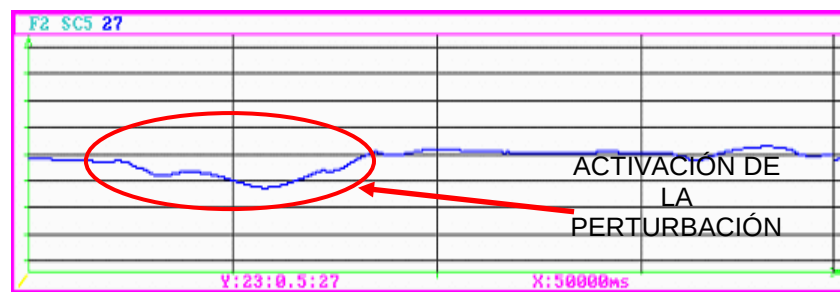
Observamos que automáticamente el sistema controla el nivel del tanque principal, aumentando el voltaje a la bomba DC, para recuperar el nivel del tanque principal y así mantener estabilizado el sistema en el punto de control en 25 cm. de nivel, figura 3.3.4.3.

Se concluye que el controlador Proporcional Integral Derivativo hallado por el SISO del modelo real de la planta,

trabaja correctamente en la puesta en marcha de la misma, cumpliendo con el objetivo de controlar y estabilizar el sistema dentro del punto de operación establecido.



(A)



(B)

FIGURA 3.3.4.3. A) GRÁFICAS DEL TARGET PC EN TIEMPO REAL SISTEMA ESTABLE; B) PERTURBACIÓN.

La gráfica (B) de la figura 3.3.4.3, es un acercamiento de la gráfica (A), para observar la estabilidad del sistema. Las variaciones que se muestra en la gráfica (B), es el efecto del ruido del sistema pero se observa que el sistema nuevamente se estabiliza en el punto de 25.06 cm., con un tiempo de

estabilidad de 15s aproximadamente y con un Error de Estado Estacionario de 0.060365 cm., es decir aproximadamente a cero, se tiene este valor mínimo del “ess” por efecto de ruido en el sistema.

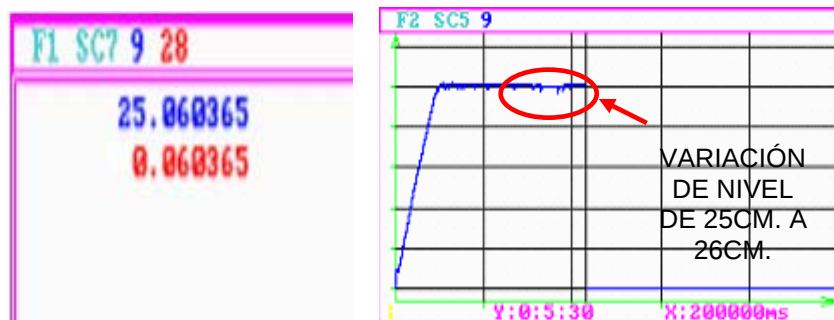
Sin Perturbación.

En el análisis del sistema sin perturbación, así mismo habilitamos el Host PC, el Target PC, la planta, la aplicación del xPC Target, y la comunicación entre el Host y el Target PC, para ejecutar la adquisición de datos del sistema en tiempo real. En el Host PC cargamos el archivo del sistema con su respectivo controlador PID, figura 3.3.3.2.6; e iniciamos la creación de la aplicación Target en tiempo real.

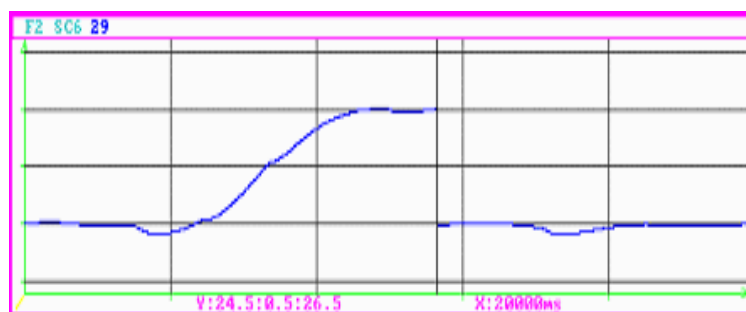
La figura 3.3.3.2.6, muestra el diseño del sistema, entonces activamos el switch que proporciona voltaje DC a la bomba. Por lo que la bomba DC se activa y envía agua al tanque principal de control, llenándolo y acercándose al punto de control de 25 cm. de nivel. El sistema se encuentra con la válvula encendido/apagado desactivada (sin perturbación), y

con la válvula de compuerta abierta a 2 vueltas de manera fija.

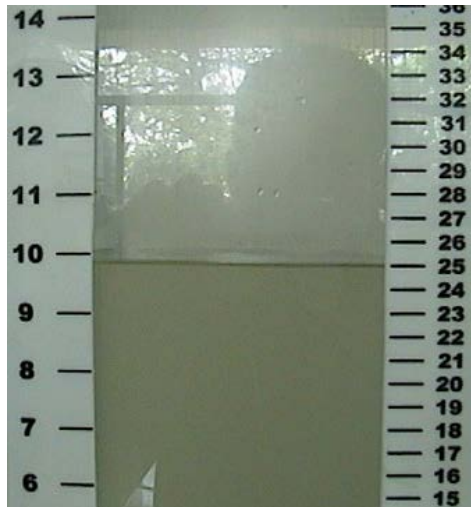
En el instante que el nivel se encuentra cercano al punto de control; activamos el switch en posición automática, y entra la aplicación del modelo del sistema para controlar la planta. Observamos tanto en la planta como en el Target PC la estabilidad del sistema en el punto de control de 25 cm. de nivel, figura 3.3.4.4, el tiempo de estabilidad desde el nivel de 0 cm., hasta obtener el punto de control es de 120s aproximadamente, observándolo en el Target PC.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.3.4.4. A) GRÁFICA DEL TARGET PC SIN PERTURBACIÓN; B) ACERCAMIENTO DEL PUNTO DE CONTROL DE NIVEL; C) NIVEL DE CONTROL EN EL TANQUE PRINCIPAL.

La figura 3.3.4.4. (B) es la variación de un punto de control a otro punto de control, en nuestro caso de 25 cm. a 26 cm. de nivel, y observamos que el tiempo de estabilidad es de 11s aproximadamente. Cuando el sistema se encuentra estabilizado, activamos el switch de ingreso manual del punto de control que se desea estabilizar, desde el diseño del sistema en el Host PC, de esta manera habilitamos el potenciómetro de control de nivel ubicado en el panel de control, figura 3.3.4.5.



FIGURA 3.3.4.5. AJUSTE MANUAL DE LA PLANTA.

Por lo que desactivamos el Host PC y podemos controlar la planta de manera manual por medio del potenciómetro de control de nivel, y observando la respuesta del sistema en el Target PC.

Finalizamos, indicando que el controlador Proporcional Integral Derivativo hallado por la herramienta SISO, y adicionándolo en la puesta en marcha del sistema en tiempo real, tanto con perturbación y sin perturbación cumple con la estrategia de control establecidas.

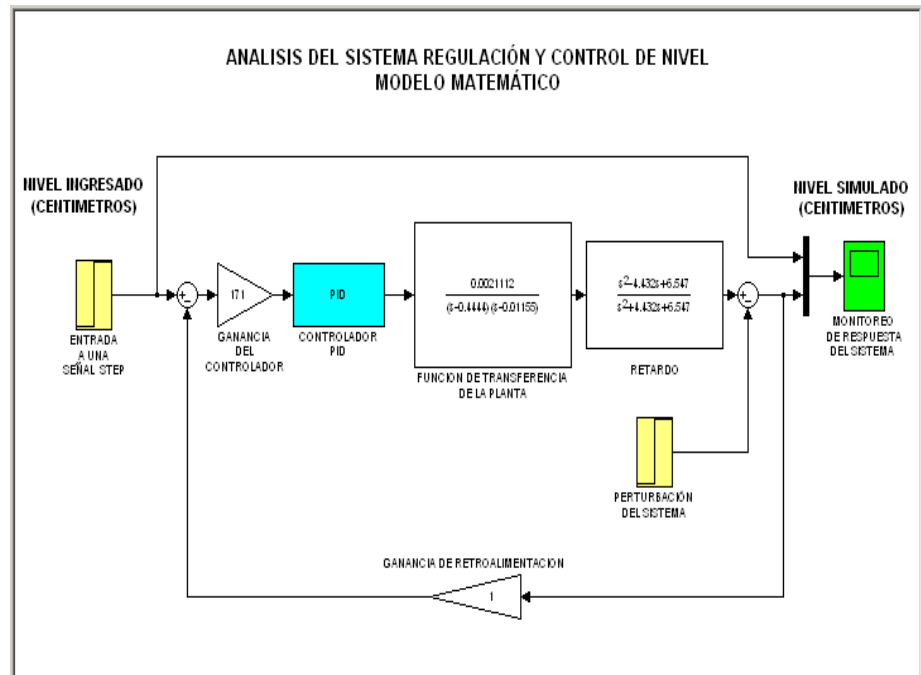
3.4. Análisis comparativo entre el sistema Matemático y el Sistema Real.

En este punto analizaremos el sistema matemático con el sistema real, con la aplicación del Simulink. Realizaremos comparaciones de los sistemas ante perturbación y sin perturbación, observando la dinámica de respuestas de ambos sistemas.

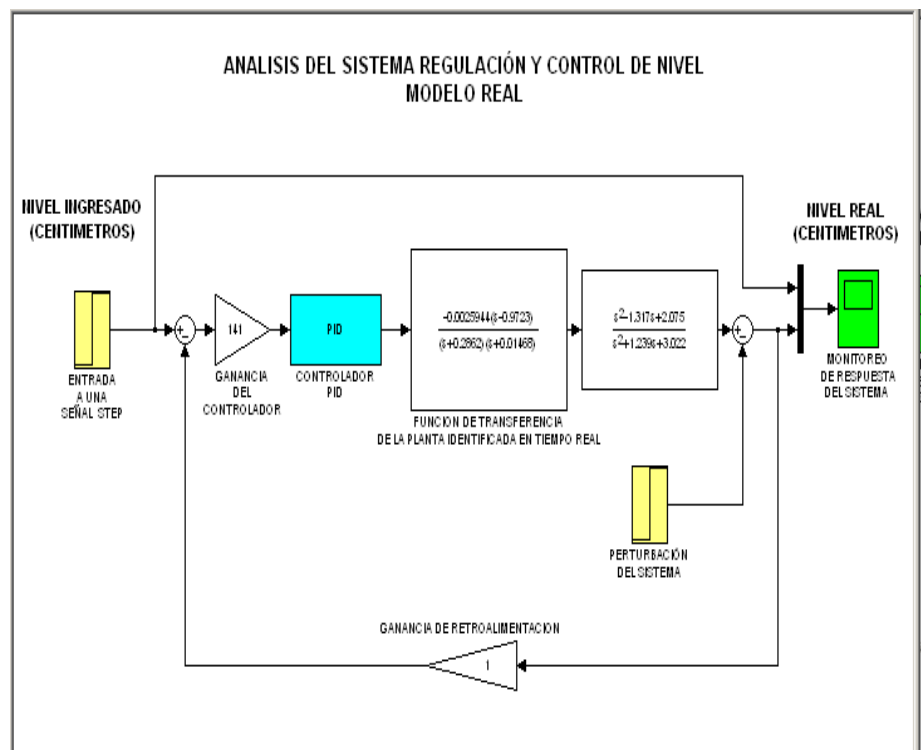
3.4.1. Con Perturbación.

En Simulink diseñamos tanto el sistema matemático con el sistema real, ingresando los parámetros correctos de cada modelo, como se muestra en la figura 3.4.1.1.

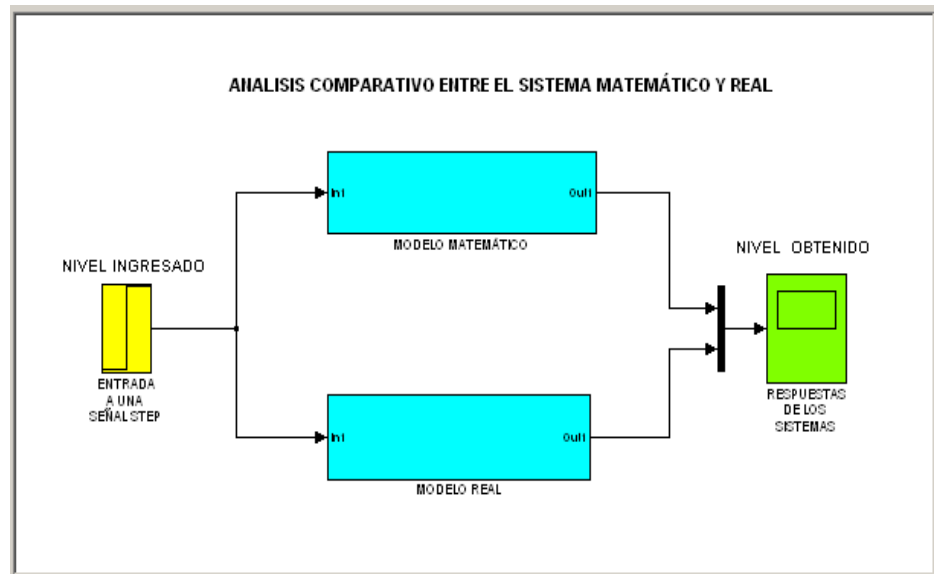
Finalizando el diseño de los modelos iniciamos la simulación de los sistemas, para observar las respuestas comparativas de salida de los sistemas.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 3.4.1.1. A) DISEÑO DEL SISTEMA MATEMÁTICO;
B) DISEÑO DEL SISTEMA REAL; (C), DISEÑO DE
COMPARACIÓN DEL SISTEMA MATEMÁTICO Y REAL.

La figura 3.4.1.1 (C), es un diseño estratégico para poder comparar a través de la Respuesta del Sistema a una entrada Escalón, el modelo matemático (casillero superior de color azul) y real (casillero inferior de color azul), en lazo cerrado con la adición del controlador PID y obtenemos la Respuesta de los sistemas a un nivel de 1 cm., figura 3.4.1.2.

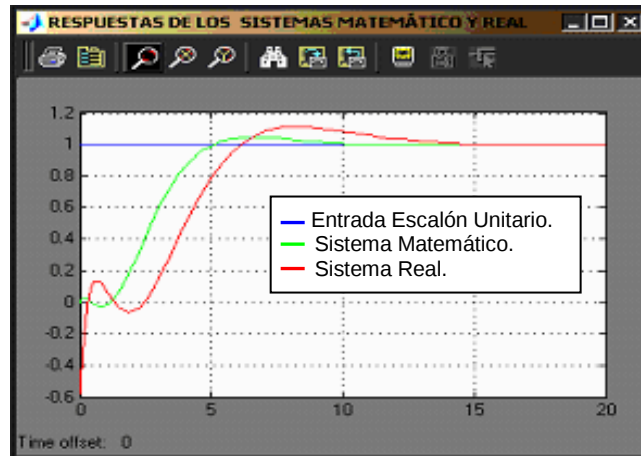
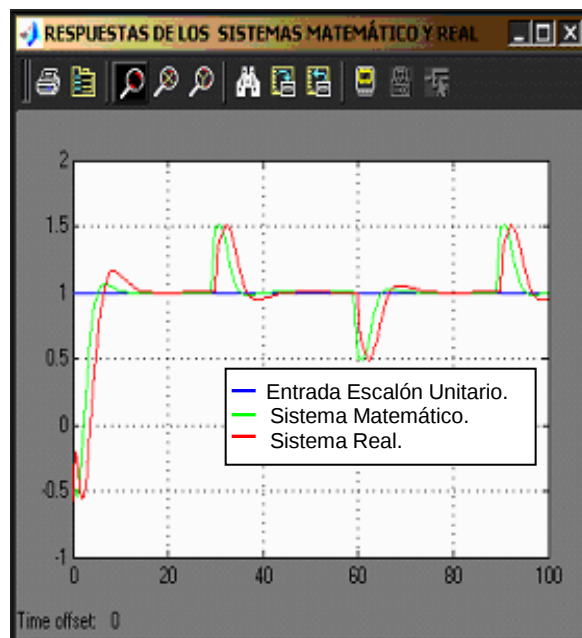


FIGURA 3.4.1.2. RESPUESTA DEL SISTEMA A 25 CM. DE NIVEL.

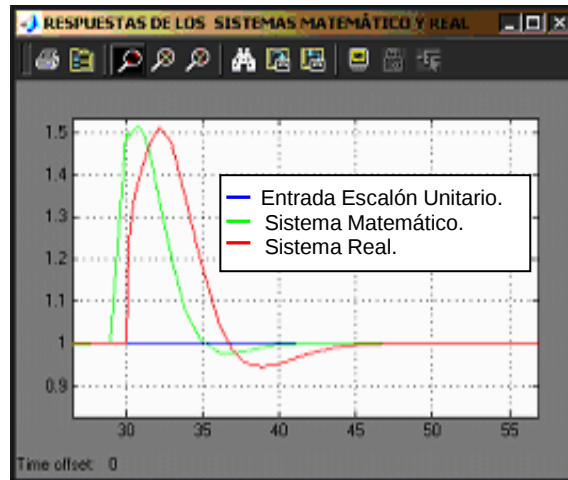
En la figura 3.4.1.2, se observa las respuestas de los sistemas; la curva de color azul representa la entrada Escalón Unitario que en nuestro caso es el nivel de control a 25 cm., la curva de color verde es el sistema matemático, mientras que la curva de color rojo representa el sistema real. El eje de las abscisas representa el tiempo en segundos, en tanto que el eje de las ordenadas representa el nivel en centímetros.

Observamos que el tiempo de estabilidad del sistema desde 24 cm. (0 cm.) a 25 cm. (1 cm.), es de 10s para el sistema matemático, en tanto que el sistema real tiene un tiempo de estabilidad de 15s aproximadamente.

En la figura 3.4.1.2, se muestra que los sistemas a partir de 20s se encuentran totalmente estabilizados, por lo que en el tiempo de 30s, activamos la perturbación a ambos sistema, y analizamos la respuesta de control ante perturbación, figura 3.4.1.3.



(A)



(B)

FIGURA 3.4.1.3. A) ACTIVACIÓN DE LA PERTURBACIÓN DEL SISTEMA; B) ACERCAMIENTO DE LA VARIACIÓN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA.

Se observa una leve variación de la señal de respuesta a partir de 30s, figura 3.4.1.3 (A), por lo que aplicamos un acercamiento de la gráfica de la respuesta de ambos sistemas, figura 3.4.1.3 (B), para observar la estabilidad del sistema en ese punto.

La curva de color verde es la respuesta del sistema matemático ante perturbación, figura 3.52 (B), la curva llega a 25.5 cm. de nivel (1.5 cm.), en un tiempo de 1s (tomando referencia 30s como el tiempo de activación de la

perturbación) el sistema se estabiliza en 12s (42s) aproximadamente con un error de estado estacionario de 0.0 cm. Mientras que la curva de color rojo representa la respuesta del sistema real ante perturbación, figura 3.4.1.3 (B), observamos que la curva llega a 25.5 cm. de nivel (1.5 cm.), en un tiempo de 3s (33s) y se estabiliza en 16s (46s) aproximadamente, por lo que el controlador PID de ambos sistemas cumplen con las estrategias de control detalladas con anterioridad.

En conclusión, podemos acotar que el sistema real es más lento, respecto al sistema matemático en 4s aproximadamente, con las mismas condiciones de señales de entrada y de perturbación. En el análisis gráfico de la respuesta de ambos sistemas se observa la diferencia de tiempo de estabilidad. Y con un modelo identificado de la planta real con un 98.6713 % de aceptación no hemos logrado que este sistema converja respecto al sistema matemático. Pero el modelo identificado de la planta real es excelente en la puesta en marcha del sistema, ya que cumple con las condiciones de estabilidad, proporcionando la respuesta deseada del sistema.

La diferencia entre la Respuestas de estos dos modelos se encuentra esencialmente en el retardo de cada sistema, y por ello el sistema real es más lento que el matemático.

3.4.2. Sin Perturbación.

En la estrategia de control clásico, para los diseñadores de control obtener un sistema sin perturbación es lo más idealizado y sencillo. En nuestro caso realizaremos el análisis comparativo del sistema matemático y el sistema real sin perturbación, observando que nuestro sistema responde correctamente, y ágilmente a nuestras condiciones.

En la figura 3.4.2.1, detallamos en Simulink la comparación del sistema matemático con el real sin perturbación. En este caso no se activará la válvula encendido/apagado de perturbación del sistema; sólo ingresaremos en la simulación, el nivel deseado de 25 cm. (1 cm.), para que el sistema controle el nivel del tanque al punto ingresado.

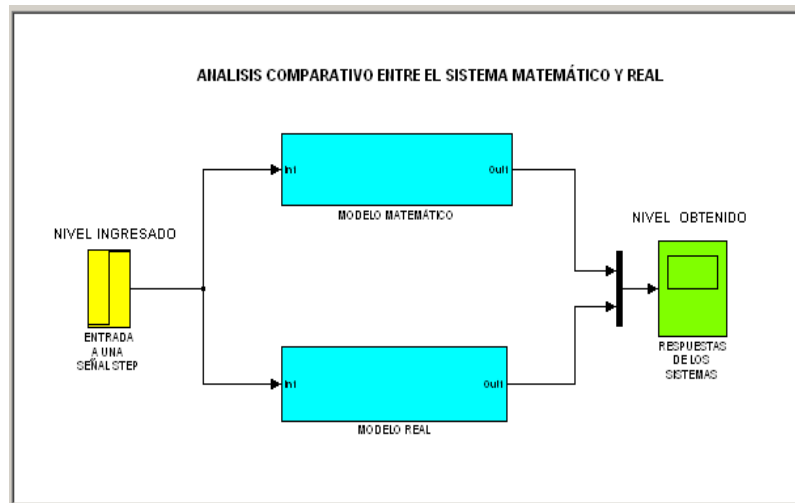


FIGURA 3.4.2.1. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS MATEMÁTICO Y REAL SIN PERTURBACIÓN.

Tanto en el análisis comparativo para el sistema con perturbación y sin perturbación, las funciones de transferencias de la planta matemática y real son las mismas, ya que el control en lazo cerrado lo cumple el controlador PID.

Simulamos el sistema de la figura 3.4.2.1., y obtenemos la respuesta de salida, figura 3.4.2.2.

La señal de salida de color azul que se muestra en la figura 3.4.2.2., es la señal de referencia y en nuestro caso 25 cm. de nivel (1 cm.). La señal de salida de color verde es el sistema matemático, y la señal de salida de color rojo es el

sistema real, de esta manera definimos las señales de respuestas que se están analizando.

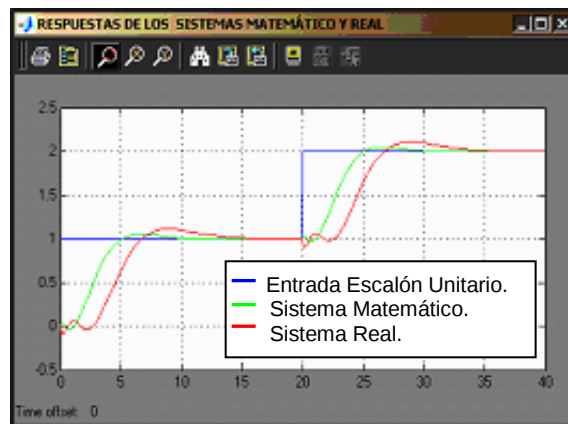


FIGURA 3.4.2.2. RESPUESTA DEL SISTEMA SIN PERTURBACIÓN.

En la figura 3.4.2.2, notamos que el sistema matemático se estabiliza en el punto deseado de 25 cm. de nivel, en un tiempo de 11s, mientras que el sistema real se estabiliza en un tiempo de 15s, en ambos sistema el Error de Estado Estacionario es 0 cm.

La figura 3.4.1.5, muestra el cambio de referencia de un punto de control a otro, en este caso de 25 cm. (1 cm.) a 26 cm. (2 cm.) de nivel.

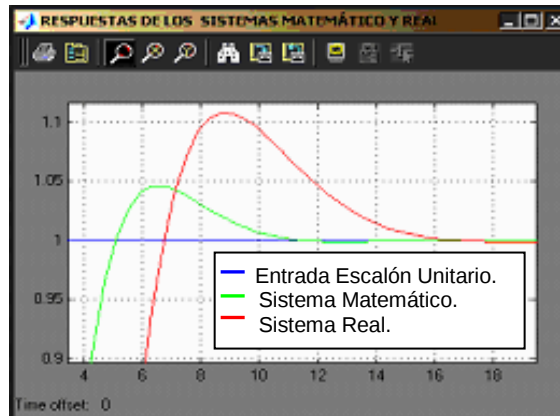


FIGURA 3.4.2.3. TIEMPO DE ESTABILIDAD DEL SISTEMA SIN PERTURBACIÓN A 25 CM. DE NIVEL.

A partir de la figura 3.4.2.3, aplicamos un acercamiento a la gráfica para observar con más detalle los parámetros de estabilidad de ambos sistemas. En la figura 3.4.2.3, se observa que el pico de la respuesta del sistema matemático llega a un nivel de 25.05 cm. en 6.5s, y luego decae para estabilizar el sistema a 25 cm., en un tiempo de 11s. En tanto que el sistema real el pico de respuesta llega a un nivel de 25.11 cm. en 9s para luego estabilizarse en 25.0 cm. de nivel en un tiempo de 15s.

Así concluimos, indicando que tanto el sistema matemático como el sistema real son sistemas estables y lineales, y responde de manera rápida, ágil a la dinámica de control. Y

como el sistema de regulación y control de nivel es lineal, podemos estabilizar el sistema a diferentes puntos de control, entre 20 cm., a 30 cm. de nivel, sin inconvenientes.

Además concluimos que nuestra planta, también puede ser controlada por un controlador Proporcional Derivativo PD en tiempo real, sin ningún problema respecto al controlador Proporcional Integral Derivativo PID, ya que la función de transferencia de la planta real en sí tiene un polo muy cercano en el origen (-0.01468), y lo estabiliza aproximadamente en el tiempo de 12.7s, pero con un Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0.06$ cm.

Por lo que, con el controlador PD disminuimos el tiempo de estabilidad respecto al controlador PID, pero existe un Error de Estado Estacionario mínimo respecto al PID que en teoría es igual a cero.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DE PRÁCTICAS PARA ESTUDIANTES

4.1. Manejo General de la Planta.

El Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque aplicando MATLAB, para iniciar la operación del sistema requiere revisar algunos parámetros. Este punto esta dedicado al manejo general del equipo desde su estado de desconexión hasta su arranque y puesta en línea.

- El sistema es un módulo compuesto por 2 computadores que administran el software y el controlador por medio del programa de MATLAB y por una estructura metálica que contiene los

tanques de control de nivel y los dispositivos electrónicos la cual denominamos la planta del sistema, figura 4.1.1.

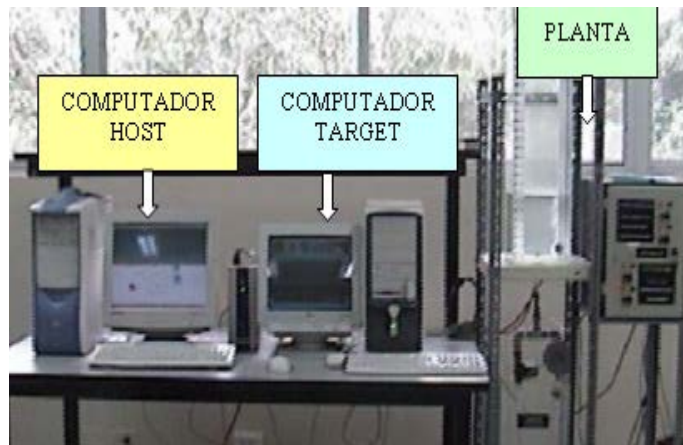


FIGURA 4.1.1. SISTEMA DE CONTROL Y REGULACIÓN DE NIVEL.

- El computador donde se almacena el sistema de control de la planta se llama Computador Administrador o Controlador (Host), y el computador que adquiere los datos de las señales de entrada y salida de la planta en tiempo real es llamado Computador Remoto (Target) y este computador se lo habilita por medio de un disquete que posee las propiedades de control desde el computador administrador. Estos computadores a la vez están conectados vía serial o por protocolo de TCP/IP para mantenerlos comunicados entre sí y transferir datos de control para la planta.

- Para mantener activado el sistema, habilitamos ambos computadores de control (Host y Target) y la planta. En el computador Host se debe abrir el programa de MATLAB con el diseño de control del sistema y la aplicación del xPC Target para adquirir información del computador Target en tiempo real.

- La planta posee una bomba DC de succión instalada estratégicamente en la parte inferior de la estructura, que proporciona el caudal de entrada al tanque superior de vidrio llamado tanque principal por medio de una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada. El control del voltaje de la bomba se la realiza por medio de una etapa amplificadora de voltaje DC a DC. La entrada de la etapa amplificadora está conectada al bloque CB-68LP que proporciona voltaje DC de control desde el computador Target, y en tanto que la salida está conectada a la bomba y de esta manera se controla el caudal entregado por la bomba.

- Para la puesta en marcha del sistema se debe llenar el tanque de retroalimentación con agua a un 80% de su totalidad, es decir 25 litros de agua aproximadamente, para la succión de

agua por parte de la bomba, este tanque es el suministrador de caudal a la bomba para todo nivel deseado en el tanque principal.

- La válvula de compuerta de la planta ubicada en la parte inferior del tanque principal debe estar abierta a 2 vueltas y la válvula de encendido/apagado debe estar desactivada, para mantener la recirculación del agua entre los dos tanques. Se debe verificar el auto-cebado de la bomba por medio de la válvula de paso de $\frac{1}{2}$ pulgada que debe estar abierta y se encuentra ubicada en la parte inferior del tanque de retroalimentación a la entrada de la bomba.

- Se debe activar la etapa amplificadora DC a DC que posee un switch en su propia estructura, la fuente del sensor ultrasónico, el circuito de activación de la válvula encendido/apagado de perturbación, y se debe activar el potenciómetro de $1K\Omega$ para la activación del ingreso manual de nivel al sistema. De esta manera los dispositivos de la planta se encuentran operando dentro de los valores normales fijados.

- La planta posee un panel metálico, en el interior del mismo se encuentran ubicadas las fuentes de los dispositivos de la planta. En la parte frontal de la puerta del panel metálico, colocamos borneras de medición de las señales de entrada y salida de la planta para que los estudiantes realicen toma de valores de señales en tiempo real. Así mismo está ubicado el switch de activación de perturbación y el potenciómetro de ingreso manual de nivel del sistema, figura 4.1.2.

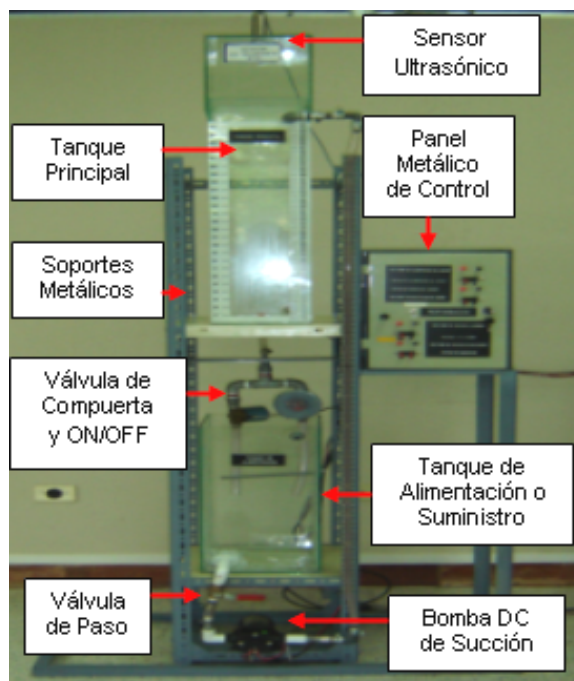


FIGURA 4.1.2. COMPONENTES DE LA PLANTA.

4.2. Práctica 1: Identificación de Función de Transferencia de la Planta.

4.2.1. Objetivos.

- Que el alumno adquiriera un panorama general de los métodos de identificación clásicos y avanzados más importantes y difundidos en la práctica, centrándose en el denominado enfoque de Error de Predicción, pero considerando también otros métodos alternativos de identificación paramétricos y no paramétricos, a partir de datos de entrada-salida en el dominio frecuencial y temporal, y métodos recursivos y no-recursivos; así como algunas técnicas de identificación de clases de sistemas no lineales.
- Transmitir al alumno la fundamentación matemática rigurosa de los métodos mencionados que permitirá un análisis comparativo de las distintas técnicas.

- Introducir al alumno en el manejo de software interactivo para identificación de sistemas dinámicos (en particular, el System Identification Toolbox de MATLAB).

4.2.2. Teoría.

La Identificación de Sistemas puede definirse como el área de Teoría de Sistemas que estudia metodologías para la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones sobre el sistema. La identificación de sistemas se ha convertido en una herramienta fundamental en muchas ramas de la ingeniería y otras áreas tan diversas como bio-tecnología y economía, que requieren la existencia de modelos precisos del sistema que posibiliten el análisis, la simulación y el diseño e implementación de estrategias de control. En aplicaciones de Control, la obtención de un modelo matemático más o menos preciso del sistema es fundamental ya que la mayoría de los métodos de diseño de controladores parten de la hipótesis de que un modelo parametrizado del proceso está disponible. En esta práctica se pretende dar un panorama general de los métodos más difundidos para la Identificación de Sistemas Dinámicos, tanto en sus aspectos

teóricos como en los de implementación mediante el uso de software interactivo. Los distintos métodos se ilustrarán con ejemplos de aplicación a partir de datos reales.

Los modelos que proporciona el System Identification son: Modelos de Sistemas Lineales Estacionarios: Modelos Entrada-Salida: Caracterización de las perturbaciones. Modelos de Ecuación de Error, AR, ARX, Regresor Lineal, ARMAX, de Error de Salida, Box-Jenkins, Modelo Autoregresivo Generalizado. Todas estas alternativas, ofrece el identificador para modelar los sistemas, por lo que concluimos que el System Identification es una de las herramienta más importante del MATLAB para el control de procesos.

4.2.3. Por Métodos Teóricos.

Para realizar la práctica de identificación de funciones de transferencia de forma teórica, el estudiante debe identificar las variables de entrada y salida que compone un sistema, saber relacionar las variables de un bloque con otro bloque

para establecer la función de transferencia que modela un sistema.

En esta práctica el estudiante debe de tener conocimientos fundamentales de la herramienta System Identification (Identificador de Sistemas) de MATLAB, ya que con esta herramienta puede identificar la función de transferencia de un sistema desconocido, con tan sólo habilitar la señal de entrada y salida del sistema que se desea identificar, figura 4.2.3.1. En sí la identificación es la determinación, sobre la base de una entrada y una salida de un sistema dentro de una clase especificada de sistemas, para el cual el sistema bajo prueba es equivalente a la figura 4.2.3.1.

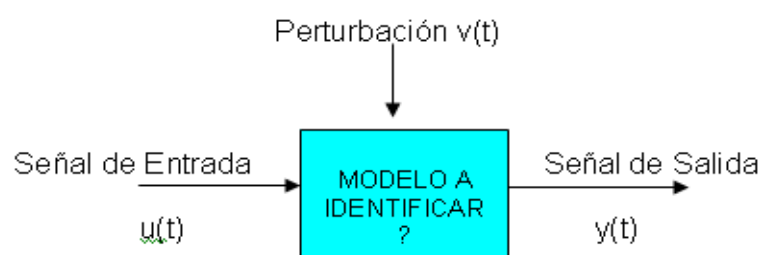


FIGURA 4.2.3.1. ESTRATÉGIA DE IDENTIFICACIÓN.

La identificación de sistemas se enfoca en la modelización de sistemas dinámicos a partir de datos experimentales.

4.2.3.1. Pre-Práctica

El System Identification posee varios modelos matemáticos de identificación que modela el sistema, asignando el mejor porcentaje de aceptación al modelo que más se encaje a la característica del sistema ante las señales de entrada, salida y de perturbación. Los pasos para realizar la identificación de funciones de transferencia por método teórico son:

1. El estudiante debe de definir las variables de entrada y salida del sistema, y saber que tipo de respuesta debe entregar la señal de salida respecto a la señal de entrada.

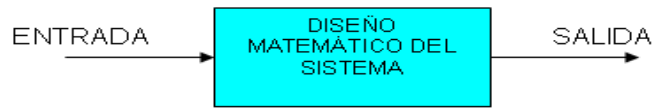


FIGURA 4.2.3.1.1. IDENTIFICACIÓN DE
VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DEL
SISTEMA.

2. Se va a identificar la función de transferencia de la planta de manera teórica con el modelo del sistema en Simulink, figura 4.2.3.1.2., llamado **Planta** y con el System Identification en tiempo no real, es decir sin la utilización del computador remoto (Target), para que el estudiante se familiarice con el identificador de sistemas, antes de identificar en tiempo real con la aplicación del xPC Target.

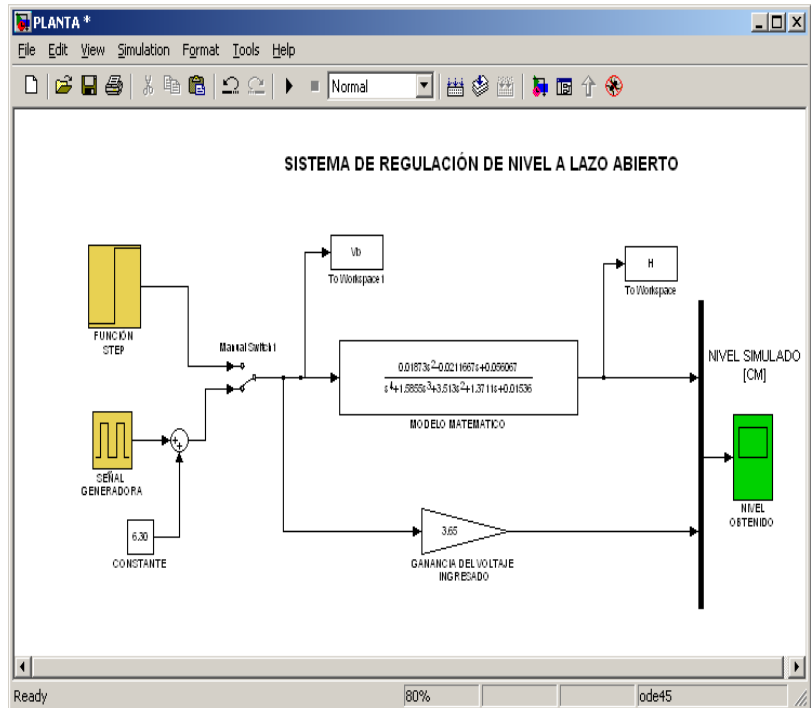


FIGURA 4.2.3.1.2. SISTEMA A IDENTIFICAR.

3. A partir del modelo en Simulink en lazo abierto, se debe habilitar las variables o señal de entrada y salida del sistema, como el voltaje que se proporciona a la bomba DC llamado Vb, mientras que la variable de salida es el nivel obtenido de agua en centímetros proporcionado por el sensor llamado H, figura 4.2.3.1.2.

4. Se deben asignar los parámetros de las variables de entrada y salida como matrices, figura 4.2.3.1.3., para almacenar los datos que se van adquiriendo en la simulación.

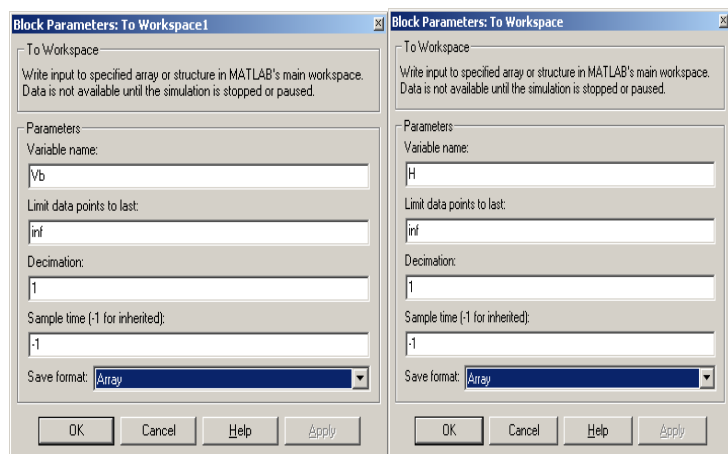


FIGURA 4.2.3.1.3. INGRESO PARÁMETROS DE LAS VARIABLES DE ENTRADA (Vb) Y SALIDA (H).

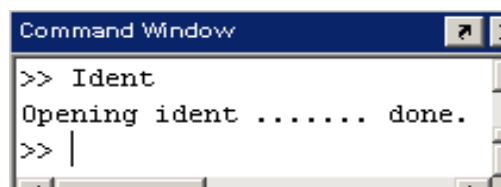
5. Generamos y creamos una señal cuadrada de entrada al sistema, para estabilizar a un nivel de 25 cm., y cuando se encuentra estable el nivel hacemos variaciones de voltaje a la bomba Vb, para variar el punto de control entre el rango de 25

cm., para obtener valores variantes y proceder habilitar el System Identification.

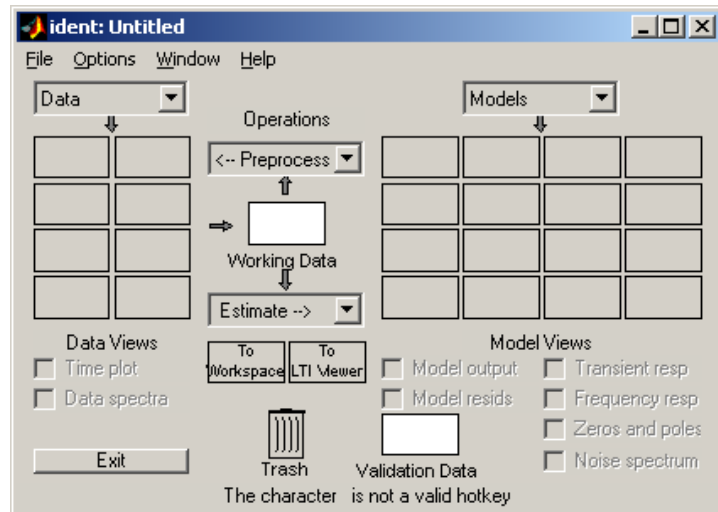
La señal que se genera es una señal cuadrada de 6.35 V DC a 7.35 V DC con un periodo de 1600s, que satisface la estrategia de estabilidad y variación en el punto de control de 25 cm. de nivel.

Entonces iniciamos el proceso de simulación del archivo **Planta**.

6. Se debe habilitar la herramienta System Identification, en la ventana de comandos de MATLAB (Command Windows), escribiendo el comando **Ident**, figura 4.2.3.1.4. (A), y se habilita la pantalla principal del System Identification, figura 4.2.3.1.4. (B).



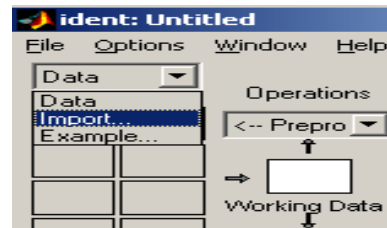
(A)



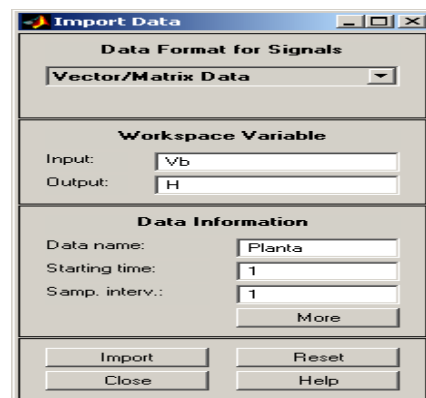
(B)

FIGURA 4.2.3.1.4. A) HABILITACIÓN DEL SYSTEM IDENTIFICATION; B) VENTANA PRINCIPAL DEL SYSTEM IDENTIFICATION.

7. El estudiante debe de hacer click en la pestaña Data (Dato) y seleccionar la opción Import (Importar), figura 4.2.3.1.5. (A), y se abre la ventana de importación, figura 4.2.3.1.5. (B), para importar las variables de entrada y salida del sistema a identificar, en este caso asignamos las variables de entrada como Vb y la de salida como H, y el tiempo de muestreo (Samp. Inter.) es de 1s.



(A)



(B)

FIGURA 4.2.3.1.5. A) SELECCIÓN DE OPCIÓN IMPORT; B) HABILITACIÓN DE LA VENTANA IMPORT.

Ingresadas las variables de entrada y salida, se debe hacer click en el botón Import, figura 4.2.3.1.5. (A), para importar y cargar los datos almacenados de las variables a la ventana principal del System Identification, figura 4.2.3.1.6.

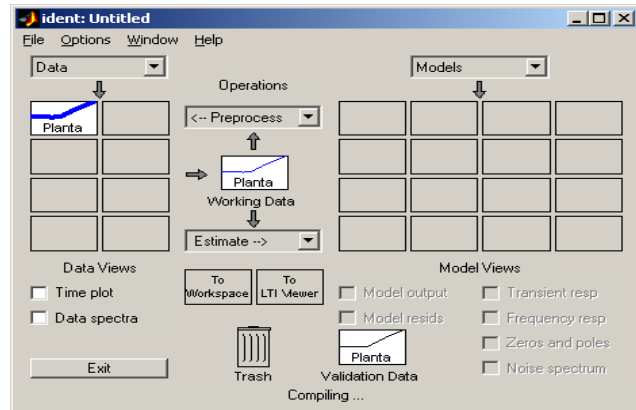
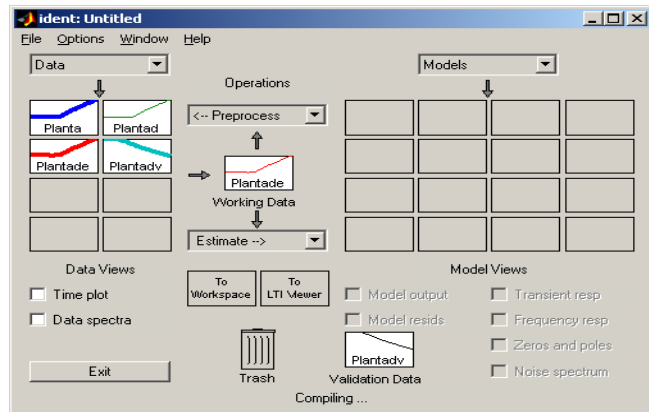
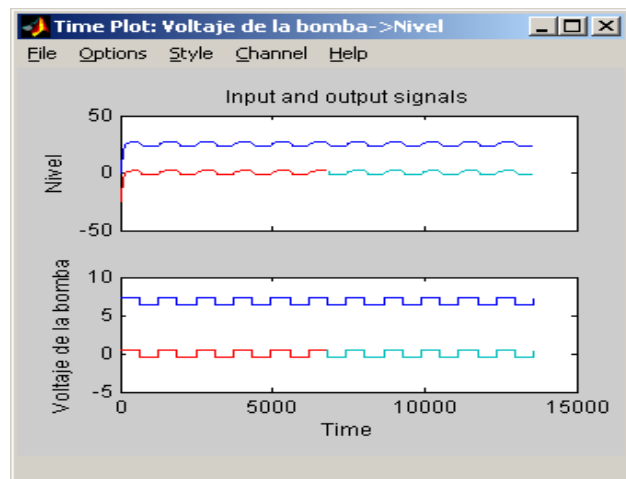


FIGURA 4.2.3.1.6. ASIGNACIÓN DE DATOS EN LA VENTANA IDENT.

8. En la ventana Ident, en la pestaña de operación en Preprocess (preprocesos), seleccionamos la opción Quick Start hacemos click, y en los casilleros llamados Data Views (vista de datos) se cargan los datos: Plantad, Plantade, Plantadv, con los cuales se va a realizar la validación del modelo que genera System Identification. En la figura 4.2.3.1.7. (A) observamos los procesos de identificación.



(A)



(B)

FIGURA 4.2.3.1.7. A) PROCESOS DE IDENTIFICACIÓN; B) SEÑAL DE ENTRADA V_b Y SALIDA H .

Al iniciar el proceso de identificación, el System Identification muestra las señales de entrada y

salida que se están cargando y validando, figura 4.2.3.1.7. (B).

9. En la ventana Ident, figura 4.2.3.1.7. (A), escogemos la pestaña Preprocess (preprocesos), y seleccionamos la opción Select Range (Selección de Rango), para obtener la validación de datos, sólo en el rango de variación de nivel en el punto a controlar, y de esta manera obtener un mejor porcentaje de aceptación del modelo identificado, figura 4.2.3.1.8.

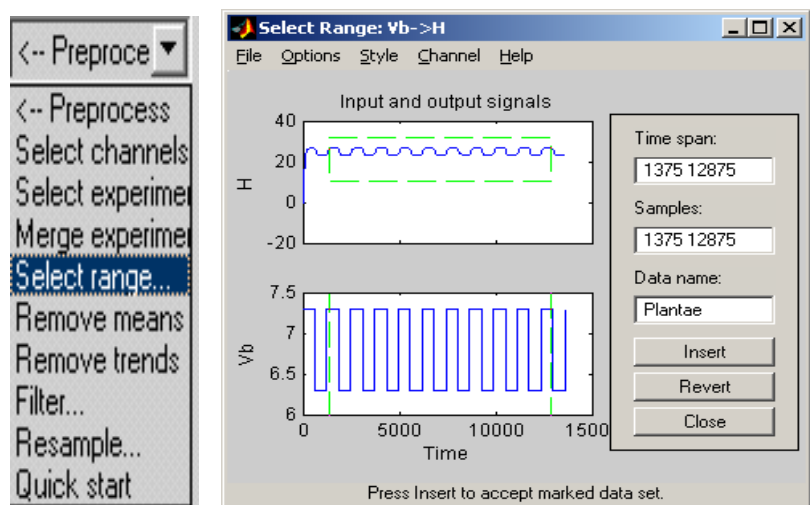


FIGURA 4.2.3.1.8. SELECCIÓN DE RANGO
PARA VALIDACIÓN.

Hacemos click en el botón Insert (Insertar), y se almacena los nuevos datos del rango seleccionado y en la pestaña Estimate (Estimar), se escoge la opción Quick Start y se inicia la estimación de los modelos matemáticos del sistema, y los carga en los casilleros llamados Model View (vista de modelo), y se observan los modelos de la respuesta al impulso (imp), la respuesta de frecuencia del sistema (spad) y los modelos para un sistema en tiempo discreto (arxqs) y para un sistema continuo (n4s1), figura 4.2.3.1.9., además se seleccionan tres modelos más de estimación; el n4s4, el pss4, y el arxqs, para obtener más alternativas de modelos de estimación y seleccionar el de mejor porcentaje de aceptación.

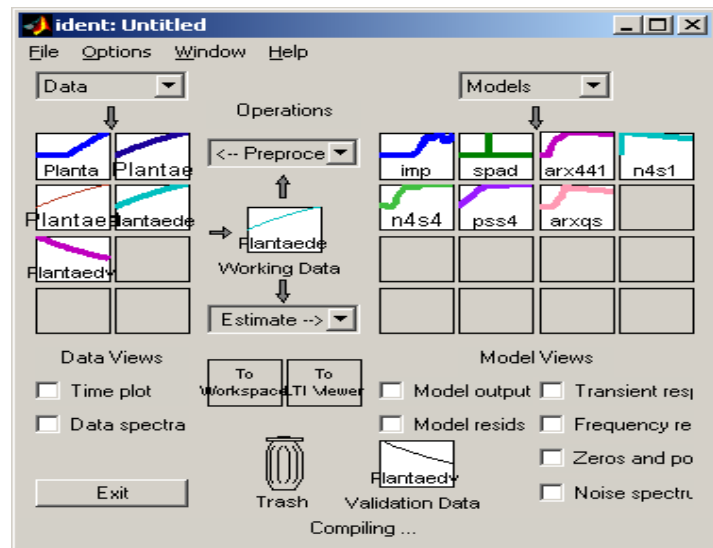


FIGURA 4.2.3.1.9. MODELOS DE ESTIMACIÓN.

10. En la figura 4.2.3.1.9., el estudiante debe de hacer click en la opción Model Output (modelo de salida) para abrir la ventana de los modelos estimados, figura 4.2.3.1.10., observando que el mejor porcentaje de aceptación es del 99.1016% con el modelo arxqs, según las variables de entradas y salidas definidas.

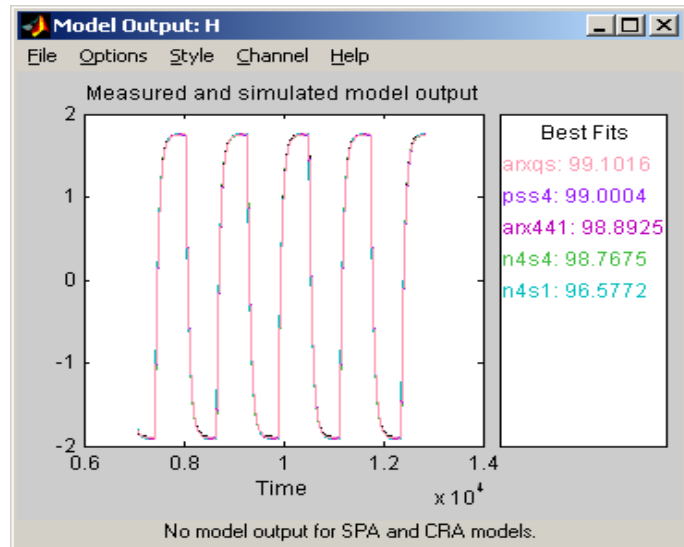
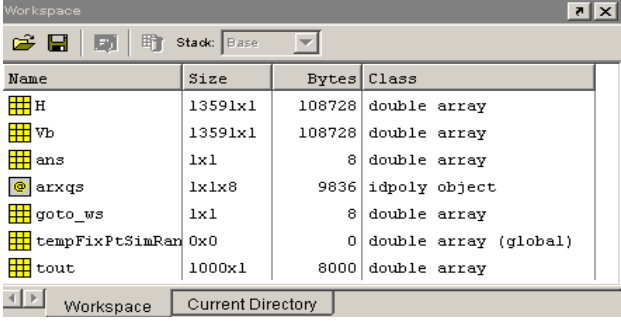


FIGURA 4.2.3.1.10. PORCENTAJE DE
ACEPTACIÓN DE LOS MODELOS DE SALIDA.

11. Para trasladar el modelo ARXQS al workspace del MATLAB, se debe arrastrar el modelo al icono To Workspace de la ventana principal del System Identification, la cual carga el modelo en el workspace de MATLAB, como se detalla en la figura 4.2.3.1.11.



Name	Size	Bytes	Class
H	13591x1	108728	double array
Vb	13591x1	108728	double array
ans	1x1	8	double array
arxqs	1x1x8	9836	idpoly object
goto_ws	1x1	8	double array
tempFixPtSimRan	0x0	0	double array (global)
tout	1000x1	8000	double array

FIGURA 4.2.3.1.11. MODELO ARXQS.

12. Definido el modelo en el workspace, y para trabajar con el mismo se debe escribir en la ventana de comandos de MATLAB, lo siguiente:

```
>>tf(arxqs)
```

Y se muestra en la ventana de comando la función de transferencia del modelo en Transformada Z (discreta), figura 4.2.3.1.12.

```

Command Window

Transfer function from input "VOLTAJE DE BOMBA" to output "NIVEL":
0.01068 z^3 + 0.007649 z^2 - 0.003427 z + 0.01726
-----
z^7 - 1.874 z^6 + 1.583 z^5 - 1.085 z^4 + 0.3846 z^3

Transfer function from input "v@NIVEL" to output "NIVEL":
0.001181 z^4 + 1.582e-018 z^3 - 9.135e-019 z^2
- 6.058e-019 z - 5.994e-020
-----
z^4 - 1.874 z^3 + 1.583 z^2 - 1.085 z + 0.3846

I/O groups:
Group name    I/O    Channel(s)
Measured      I       1
Noise         I       2

Sampling time: 1
>>

```

FIGURA 4.2.3.1.12. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO ARXQS.

La primera función de transferencia que se observa, figura 4.2.3.1.12., es la relacionada al sistema de acuerdo a la señal de entrada y salida, y la segunda es respecto al error del modelo estimado con respecto al real.

13. Almacenamos estas funciones de transferencias mostradas en la figura 4.2.3.1.12., en una variable de la siguiente manera: en la ventana de comandos de MATLAB se escribe el nombre de la función de transferencia:

```
>>zplanta1=tf(num,den,1);  
>>zplanta=d2c(zplanta1)
```

Donde la variable de almacenamiento es `zplanta`, y donde `num`, y `den` es el numerador y denominador respectivamente de la función de transferencia que se necesita almacenar. El tiempo de muestreo de la transformada Z es de 1s.

La función de transferencia del modelo final que se requiere debe de estar en la Transformada de Laplace para realizar los respectivos análisis, por lo que utilizamos el comando **d2c**, la cual nos permite pasar del campo discreto a continuo, la figura 4.2.3.1.13.

En la figura 4.2.3.1.13., hemos definido la variable **splanta** como la función de transferencia del modelo ARXQS que modela la planta de nuestro sistema identificado a partir del modelo matemático en tiempo continuo con el mejor porcentaje de aceptación. El estudiante debe

tener presente, que no todo modelo que tenga el mejor porcentaje de aceptación es la mejor identificación del sistema, ya que el modelo **ARXQS** proporciona una función de transferencia de octavo orden, con siete ceros y ocho polos. Por lo que la identificación en sí, no garantiza el mejor modelo, más bien el estudiante debe seleccionar el modelo que se adapte a la característica de su sistema y en este caso es un sistema de cuarto orden. En sí el sistema originalmente es de segundo orden, sino que se convierte en cuarto orden por la agregación del retardo en función de Padé, que agrega dos ceros y dos polos.

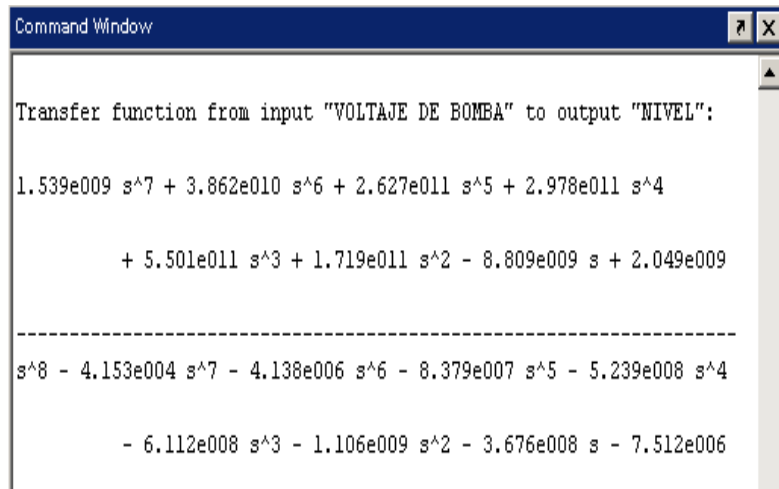


FIGURA 4.2.3.1.13. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN TRANSFORMADA DE LAPLACE DEL MODELO IDENTIFICADO.

14. Se debe repetir los pasos 11, 12 y 13, para obtener el modelo que cumpla con la característica (orden de la función de transferencia) del sistema y con el mejor porcentaje de aceptación, y en este caso es el modelo **ARX441** con un porcentaje del 98.8925%. Así se concluye con la obtención de la función de transferencia del modelo identificado, figura 4.2.3.1.14.

```

Command Window
>> splanta2=d2c(tf(arx441))

Transfer function from input "VOLTAJE DE BOMBA" to output "NIVEL":
-0.02297 s^3 + 0.05269 s^2 - 0.07727 s + 0.04648
-----
s^4 + 1.535 s^3 + 3.384 s^2 + 0.9152 s + 0.01269

Transfer function from input "v@NIVEL" to output "NIVEL":
0.002872 s^4 + 0.008589 s^3 + 0.01808 s^2 + 0.01753 s + 0.007441
-----
s^4 + 1.535 s^3 + 3.384 s^2 + 0.9152 s + 0.01269

I/O groups:
Group name    I/O    Channel(s)
Measured      I       1
Noise         I       2

```

FIGURA 4.2.3.1.14. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO DEL FINAL.

Podemos concluir que la función de transferencia obtenida con el identificador de sistema es muy aproximada a la función de transferencia obtenida matemáticamente en el capítulo 2. La diferencia entre estas dos funciones es que el modelo identificado nos proporciona una función de transferencia con tres ceros mientras que el modelo matemático posee dos ceros. A pesar que en la función de transferencia obtenida matemáticamente posee 2 ceros y 4 polos,

comparada con la función de transferencia identificada que posee un cero más, podemos decir que son relativamente iguales. La estrategia del identificador de sistemas es mostrar una función de transferencia que modele nuestro sistema con el mínimo error posible entre la respuesta de ambos modelos.

4.2.4. Por Métodos Experimentales.

Con el identificador de Sistemas el estudiante puede hallar la función de transferencia de dispositivos sin conocer su modelo matemático y características, lo único que se debe definir son las variables de entrada y salida del dispositivo y el identificador se encarga en definir el modelo de la función de transferencia del sistema.

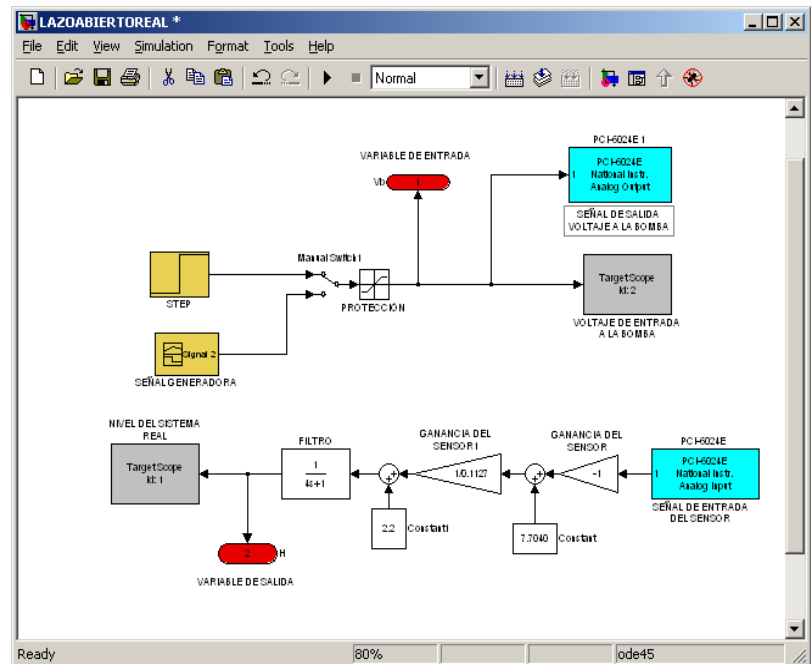
4.2.4.1. Pre-Práctica.

Esta práctica consideramos es una de las más importante, porque con la herramienta del System Identification podemos modelar y definir cualquier tipo

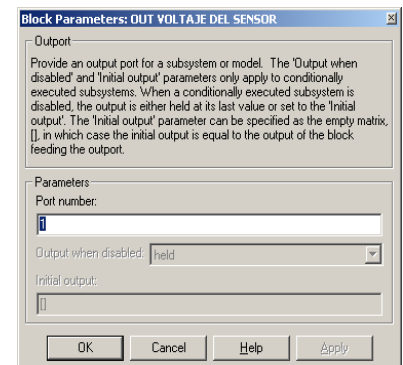
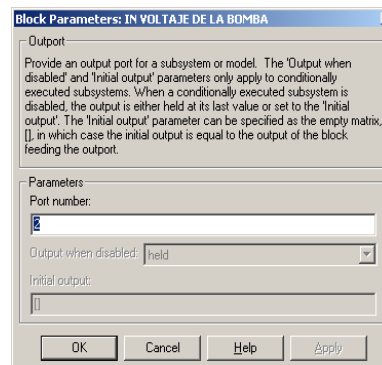
de planta en tiempo real con la aplicación del xPC Target. A continuación se definen los pasos para el método experimental que son similares al método teórico en algunos puntos:

1. El estudiante debe definir que parte del sistema va a identificar, es nuestro caso se va a identificar la planta del sistema. Entonces se define la entrada y salida en el diseño en Simulink y el sistema debe estar en lazo abierto.

En la figura 4.2.4.1.1. (A), se define las variables de entrada y salida, además se observa la habilitación de los bloques osciloscopios Target. Así mismo ingresamos los parámetros de las variables de entrada, figura 4.2.4.1.1. (B).



(A)



(B)

FIGURA 4.2.4.1.1. A) HABILITACIÓN DE VARIABLES DE I/O PARA IDENTIFICACIÓN; B) INGRESO DE PARÁMETROS PARA LAS VARIABLES DE I/O EN TIEMPO REAL.

2. Habilitar las entradas y salidas para la adquisición de datos en tiempo real por medio del computador Target. En la librería del Simulink, se selecciona la opción xPC Target, y dentro de esta opción escogemos la casilla D/A, donde se encuentra el bloque de la tarjeta de salida analógica de National Instruments PCI-6024E, figura 4.2.4.1.2.

Seleccionamos este bloque para habilitar la salida analógica del sistema, de igual manera se habilita la entrada analógica, con la única diferencia que se la selecciona en la casilla A/D.

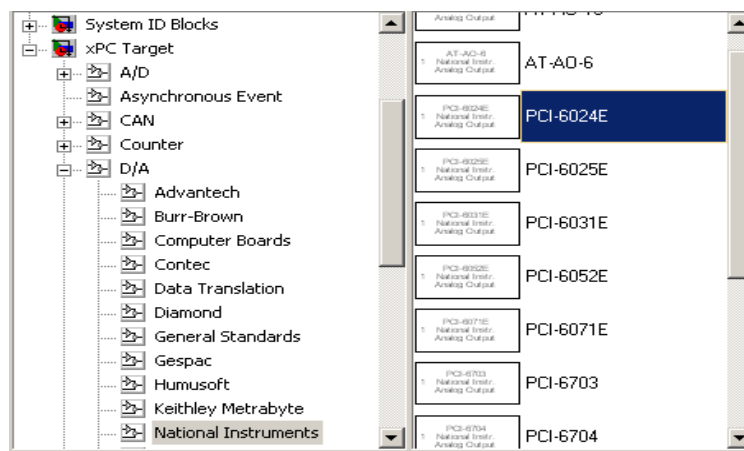


FIGURA 4.2.4.1.2. HABILITACIÓN DE I/O DEL
xPC TARGET.

3. Ingresamos los parámetros para los bloques de entrada y salida del xPC Target, figura 4.2.4.1.3. La entrada corresponde al voltaje que proporciona el sensor ultrasónico y la salida corresponde al voltaje que se envía a la bomba.

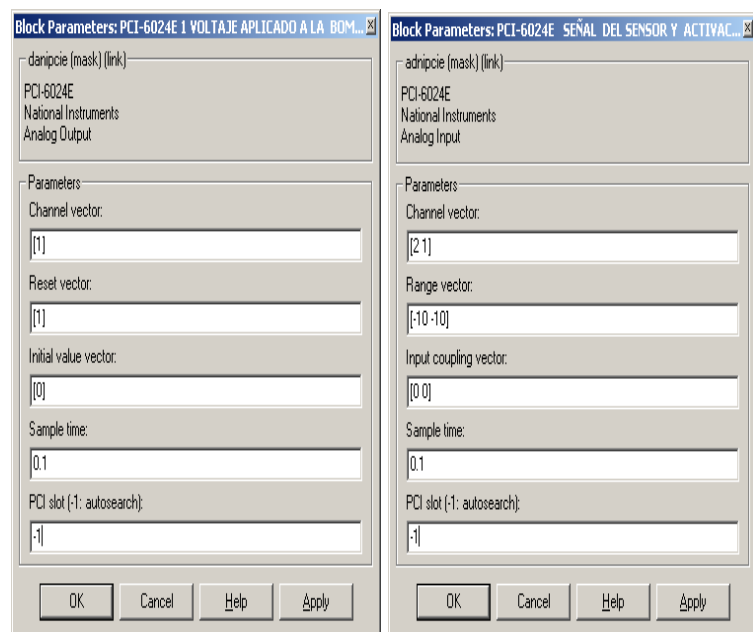


FIGURA 4.2.4.1.3. PARÁMETROS DE I/O DEL xPC TARGET.

En los parámetros de entrada y salida del xPC Target, se ingresa el número de canal del bloque conector, y el tiempo de muestreo del xPC Target, en este caso es de 0.1s y los demás parámetros el

xPC Target los asigna directamente. Se hace click en el botón OK y se guardan los datos ingresados.

4. Habilitamos los bloques de osciloscopios Target, de las señales que se necesitan monitorear, figura 4.2.4.1.4. En la opción del xPC Target, se selecciona la pestaña Misc. (Miscelánea), y se cargan algunos bloques y entre ellos el bloque Scope (xPC), hacemos click para seleccionar. Se habilitan 2 osciloscopios Target; uno para el voltaje de la bomba y el segundo para el voltaje del sensor.

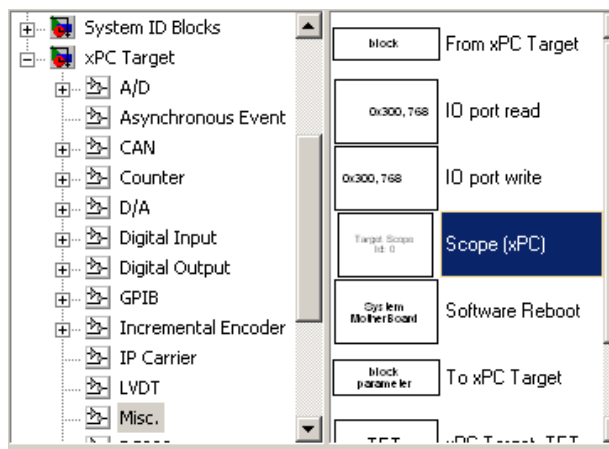


FIGURA 4.2.4.1.4. HABILITACIÓN DEL
OSCILOSCOPIO TARGET.

5. Ingresamos los parámetros de los bloques de osciloscopio Target, figura 4.2.4.1.5. Se ingresa la escala gráfica, el tipo de señal de muestreo en este caso Sliding (escala móvil), el número de muestreo y los demás parámetros se cargan automáticamente.

Block Parameters: VALOR NUMERICO DEL NIVEL ADQUIRIDO

xpscopeblock (mask) (link)

Parameters:

Scope number: 1

Scope type: Target

Scope mode: Graphical sliding

☒ Grid

Y-axis limits: [0,10]

☒ Start scope after download

Number of samples: 1000

Number of pre/post samples: 0

Interleave: 1

Trigger mode: FreeRun

Trigger signal: 1

Trigger level: 0.0

Trigger slope: either

Trigger scope number: 1

Sample to trigger on (-1 for end of acquisition): 0

OK Cancel Help Apply

FIGURA 4.2.4.1.5. INGRESO DE PARÁMETROS DEL OSCILOSCOPIO TARGET.

6. Verificar que todos los dispositivos del sistema estén activos, como el computador, Host, Target y la planta, para iniciar la adquisición de señal en tiempo real.
7. Cargar el sistema para la aplicación del xPC Target en tiempo real desde el Simulink.

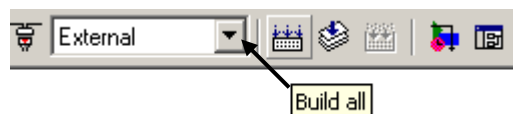


FIGURA 4.2.4.1.6. CREACIÓN DE LA APLICACIÓN xPC TARGET.

Se hace click en la casilla Build all (Construir todo), y se construye el sistema para adquirir datos en tiempo real.

8. Se realiza la simulación del sistema, para adquirir datos en tiempo real. En la figura 4.2.4.1.1 (A), los datos de las variables Vb y H son adquiridos por medio del bloque 1 y 2 respectivamente.

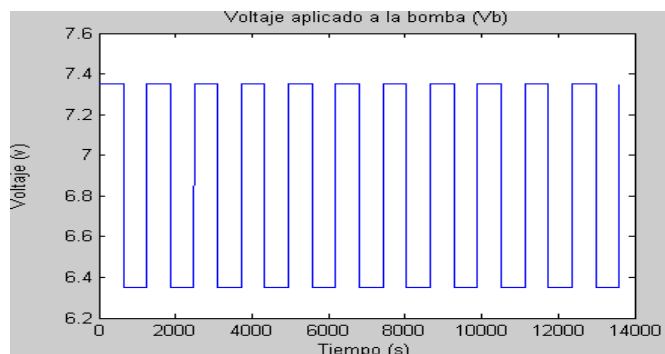
9. Para almacenar datos en las variables se debe escribir en la ventana de comandos de MATLAB el siguiente comando:

```
>>Vb = tg.outputlog;
```

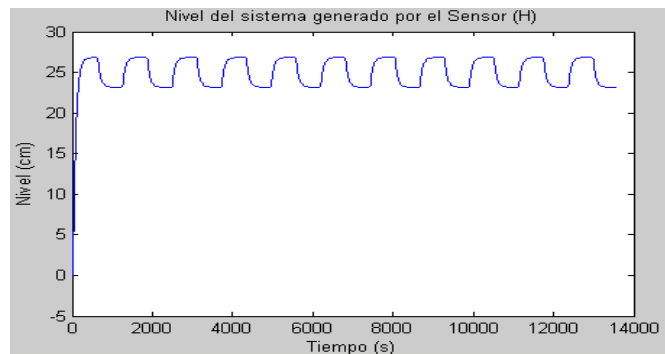
```
>>H = tg.outputlog;
```

El comando `tg.outputlog`, almacena y recupera los datos de la variable de entrada (V_b) y salida (H). Estos datos almacenados están en forma de matrices.

En la figura 4.2.4.1.7., se muestra las gráficas de las variables entrada y salida adquiridas (V_b, H), en tiempo real.



(A)



(B)

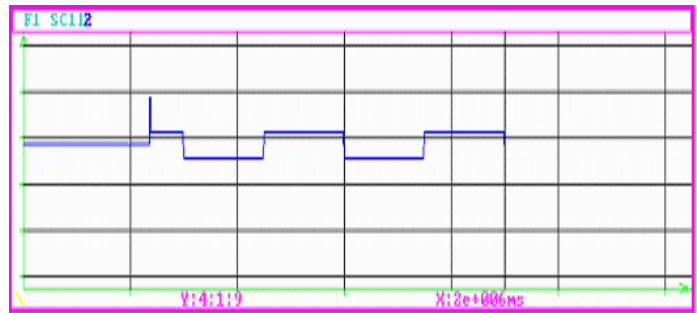
FIGURA 4.2.4.1.7. GRÁFICA DE Vb (A), y H (B).

Los datos que se van a utilizar para las muestras están entre 0:17600, que corresponde a 11 períodos de variación de la respuesta del sistema y para ello se define los siguientes comandos:

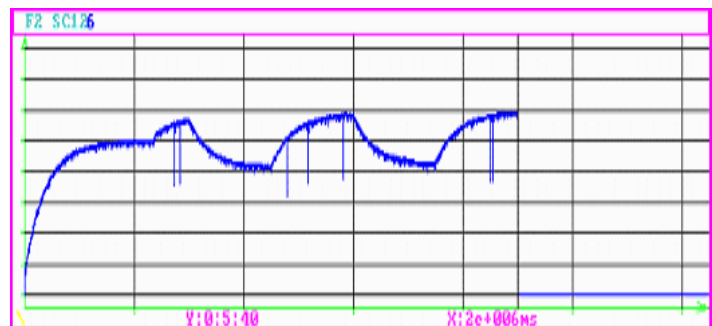
```
>>Vb=Vb(0:17600);
```

```
>>H=H(0:17600);
```

Las variables Vb y H adquiridas en tiempo real y nos ayudan a obtener la función de transferencia de nuestra planta con la aplicación del System Identification, figura 4.2.4.1.8.



(A)



(B)

FIGURA 4.2.4.1.8. A) VARIACIÓN DE V_b ; B) RESPUESTA DEL NIVEL A 25 CM.

10. Identificamos el sistema y en la pantalla de comandos de MATLAB se escribe:

>>Ident

Este comando Ident, abre la ventana del Identificador de Sistemas, y aplicamos los pasos 7, 8, 9, 10 y 11 del método teórico y obtenemos los

siguientes métodos de identificación, figura 4.2.4.1.9.

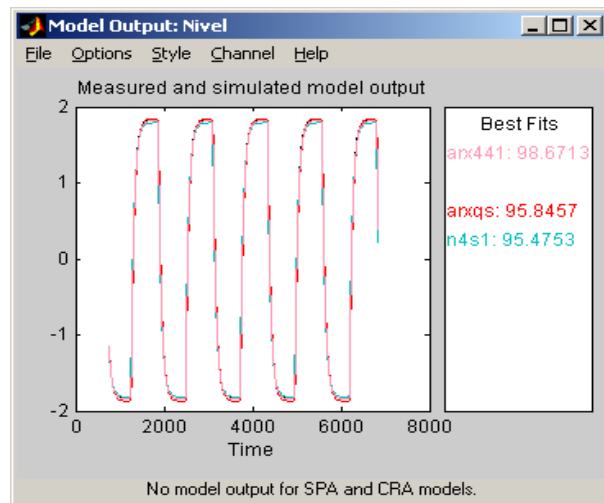


FIGURA 4.2.4.1.9. MODELOS DE IDENTIFICACIÓN.

Con esta nueva identificación presentamos el modelo de salida, para observar el mejor porcentaje de aceptación (Best Fits) del modelo estimado que se aproxime a lo real.

En el sistema vamos a usar el modelo ARX441, ya que es el modelo para un sistema continuo, y tiene un porcentaje de aceptación del 98.6713%, que es un porcentaje excelente en el proceso de identificación.

11. Trasladar el modelo ARX441 al workspace del MATLAB, arrastramos el modelo al icono To Workspace, el cual carga el modelo en el workspace de MATLAB, figura 4.2.4.1.10.

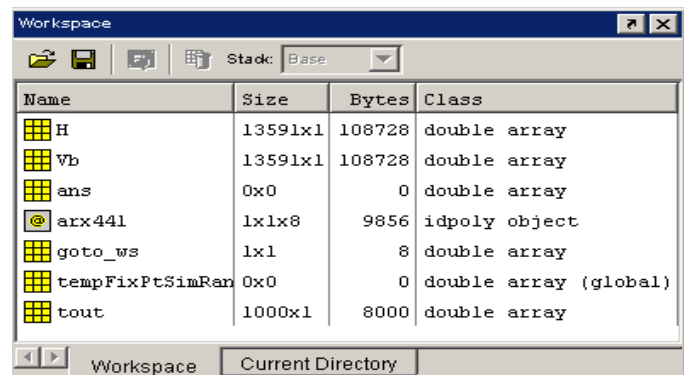


FIGURA 4.2.4.1.10. MODELO ARX441.

Definido el modelo en el workspace, se debe escribir en la ventana de comandos de MATLAB, lo siguiente:

```
>>tf(arx441)
```

Por lo que se muestra en la ventana de comando la función de transferencia del modelo en Transformada Z (discreta), figura 4.2.4.1.11.

```
Command Window
>> tf(arx441)

Transfer function from input "Voltaje de la Bomba" to output "Nivel":
0.0003402 z^3 - 0.000768 z^2 + 0.0001509 z + 0.01815
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

Transfer function from input "v@Nivel" to output "Nivel":
0.00284 z^4 + 2.264e-019 z^3 - 3.411e-019 z^2 + 3.647e-019 z + 5.186e-021
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

I/O groups:
  Group name  I/O  Channel(s)
  Measured    I     1
  Noise       I     2

Sampling time: 1
>> |
```

FIGURA 4.2.4.1.11. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO ARX441.

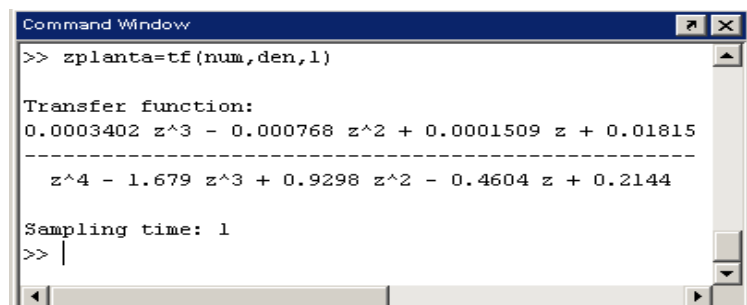
En la figura 4.2.4.1.11., la primera función de transferencia que se observa es la relacionada al sistema de acuerdo a la señal de entrada y salida, y la segunda es respecto al error del modelo estimado con respecto al real.

Almacenamos estas funciones de transferencias mostradas en la figura 4.2.4.1.11., en una variable y se escribe el nombre de la función de transferencia en la ventana de comandos como:

```
>>zplanta=tf(num,den,1);
```

Donde la variable de almacenamiento es zplanta, y donde num, y den es el numerador y denominador respectivamente de la función de transferencia que se necesita almacenar. El tiempo de muestreo para la transformada Z es de 1s.

En la figura 4.2.4.1.12., se muestra la ventana de comandos de MATLAB con los procedimientos para determinar la función de transferencia en forma discreta.



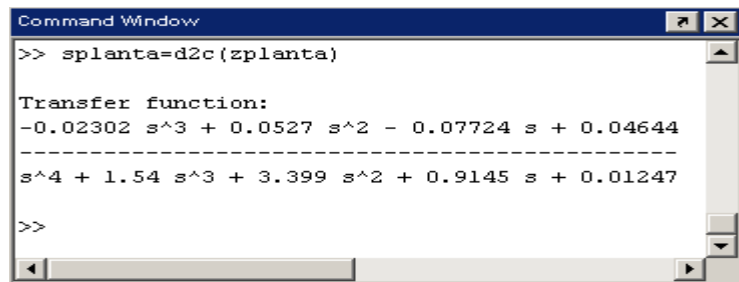
```
Command Window
>> zplanta=tf(num,den,1)

Transfer function:
0.0003402 z^3 - 0.000768 z^2 + 0.0001509 z + 0.01815
-----
z^4 - 1.679 z^3 + 0.9298 z^2 - 0.4604 z + 0.2144

Sampling time: 1
>> |
```

FIGURA 4.2.4.1.12. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO EN TRANSFORMADA Z.

La función de transferencia del modelo final que se requiere debe estar en la Transformada de Laplace, por lo que utilizamos el comando **d2c**, el cual nos permite pasar del campo discreto a continuo, figura 4.2.4.1.13.



```
Command Window
>> splanta=d2c(zplanta)

Transfer function:
-0.02302 s^3 + 0.0527 s^2 - 0.07724 s + 0.04644
-----
s^4 + 1.54 s^3 + 3.399 s^2 + 0.9145 s + 0.01247
>>
```

FIGURA 4.2.4.1.13. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN TRANSFORMADA DE LAPLACE DEL MODELO IDENTIFICADO.

En la figura 4.2.4.1.13., hemos definido la variable *splanta* como la función de transferencia del modelo ARX441 que modela la planta de nuestro sistema identificado en tiempo continuo. Así se concluye con la obtención de la función de transferencia del modelo identificado de la planta real.

Podemos concluir que la función de transferencia de la planta real es muy aproximada a la función de transferencia obtenida teóricamente y al modelo matemático. La diferencia entre estas tres funciones es que el modelo identificado nos proporciona una función de transferencia con tres ceros mientras que el modelo matemático posee dos ceros.

Transfer function:

$$\frac{0.00562 s^2 - 0.007813 s + 0.0453}{s^4 + 1.548 s^3 + 3.403 s^2 + 0.5267 s + 0.0124}$$

FIGURA 4.2.4.1.14. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO.

4.2.4.2. Práctica.

1. El estudiante debe de llenar la tabla 4.1, con la función de transferencia del modelo teórico y experimental de la planta identificada.

TABLA 7
COMPARACIÓN DE MÉTODOS.

<u>MÉTODO TEÓRICO</u>			<u>MÉTODO EXPERIMENTAL</u>		
FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA			FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA		
$\frac{-0.02297S^3 + 0.0527S^2 - 0.07727S + 0.0465}{S^4 + 1.535S^3 + 3.39S^2 + 0.9145S + 0.01247}$			$\frac{-0.02302S^3 + 0.0527S^2 - 0.07724S + 0.0464}{S^4 + 1.54S^3 + 3.399S^2 + 0.9145S + 0.01247}$		
CEROS	Y	POLOS	CEROS	Y	POLOS
0.66±1.28i		-0.616±1.62i	0.658±1.28i		-0.62±1.62i
0.974		-0.288	0.972		-0.287
		-0.0147			-0.0144
MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN			MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN		
ARX441			ARX441		
PORCENTAJE DE IDENTIFICACIÓN			PORCENTAJE DE IDENTIFICACIÓN		
98.8925%			98.6713%		

2. El estudiante debe de realizar comparaciones de los modelos (teórico y experimental), con la aplicación del SISO, para observar el Lugar Geométrico de las Raíces.
3. Realizar un análisis y observación de los métodos aplicados.

4.2.5. Procedimiento.

Práctica 1:

Para la práctica de manera teórica el estudiante debe de realizar los siguientes procedimientos:

1. Activar el computador Host y habilitar el diseño del sistema en Simulink.
2. Reconocer en el sistema la etapa que se desea identificar.

3. Habilitar y asignar los parámetros de las variables de entrada y salida del sistema que se desea identificar.
4. Ejecutar la simulación para la adquisición de señal.
5. Almacenar los datos en las matrices de entrada y salida habilitadas en el Workshop del MATLAB.
6. Abrir y cargar la herramienta del System Identification e importar las matrices de entrada y salida asignadas en la adquisición de señal.
7. Iniciar la identificación del sistema desde el System Identification, mostrando varios métodos de identificación.
8. Seleccionar el mejor método de identificación y añadir el método al workspace de MATLAB.
9. Aplicar los respectivos comandos para obtener la función de transferencia identificada de la planta.

10. Comparar el sistema matemático con el sistema identificado y observar la estabilidad del sistema, y verificar si la función identificada responde a los parámetros de entrada y salida.
11. Si la función identificada no cumple con los parámetros de entrada y salida del sistema, el estudiante debe de identificar nuevamente el sistema, partiendo del primer punto del procedimiento, hasta hallar la función de transferencia que cumpla con las condiciones del sistema.
12. Analizar la función de transferencia identificada.

Práctica 2:

Para la práctica de manera experimental el estudiante debe de realizar los siguientes procedimientos:

1. Activar el computador Host, Target y la planta de regulación y control de nivel.
2. Reconocer en el sistema la etapa que se desea identificar.

3. Habilitar y asignar los parámetros de las variables de entrada y salida del sistema que se desea identificar en tiempo real.
4. Habilitar las señales de entrada y salida de los bloques xPC Target, y los osciloscopios Target.
5. Cargar y crear la aplicación del xPC Target en tiempo real, para la comunicación entre el computador Host, Target y planta.
6. Iniciar la adquisición del sistema, por medio de ejecución de la simulación.
7. Almacenar los datos en las matrices de entrada y salida habilitadas en el Workshop del MATLAB.
8. Abrir y cargar la herramienta del System Identification e importar las matrices de entrada y salida asignadas en la adquisición de señal.

9. Iniciar la identificación del sistema desde el System Identification, mostrando varios métodos de identificación.
10. Seleccionar el mejor método de identificación y añadir el método al workspace de MATLAB.
11. Aplicar los respectivos comandos para obtener la función de transferencia identificada de la planta.
12. Comparar el sistema matemático con el sistema identificado y observar la estabilidad del sistema, y verificar si la función identificada responde a los parámetros de entrada y salida.
13. Si la función identificada no cumple con los parámetros de entrada y salida del sistema, el estudiante debe de identificar nuevamente el sistema, partiendo del primer punto del procedimiento, hasta hallar la función de transferencia que cumpla con las condiciones del sistema.
14. Analizar la función de transferencia identificada.

4.3.6. Cálculos.

En esta práctica no se realizaron cálculos teóricos, ya que todos los cálculos los realizó la herramienta System Identification internamente en su base de datos, por medio de recolección de datos, utilización de algoritmos recursivos y cálculos a la vez, proporcionándonos los modelos matemáticos estimados en tiempo real y no real.

4.3. Práctica 2: Ajuste de Controlador.

4.3.1. Objetivos.

- Recaltar que el ajuste del controlador es el procedimiento mediante el cual se adecuan los parámetros del controlador por retroalimentación para obtener una respuesta específica para nuestro sistema.
- Conocer como realizar una simulación con ayuda de la herramienta SIMULINK de un sistema matemático y real.

- Aplicar y dominar la herramienta SISO para el análisis de la obtención de controladores de sistemas con la ayuda del Lugar Geométrico de las Raíces y la Respuesta del sistema.
- Saber interpretar las curvas obtenidas del sistema simulado, conociendo sus diferencias aplicando la herramienta SISO.

4.3.2. Teoría.

El sistema de control y regulación de nivel de un tanque aplicando MATLAB fue diseñado con la finalidad de crear prácticas teóricas y experimentales-didácticas para los estudiantes que cursan el Laboratorio de Control Automático. La función del diseño del sistema es mantener el caudal lo más cercano al punto de control, sin importar las perturbaciones a las cuales el sistema sea sometido e identificar el retardo mínimo y máximo del sistema; y verificar que el retardo está en función del caudal que proporciona la bomba. A continuación definimos el retardo del sistema:

$$Q = A_t \times (\text{Dist.} / t_r)$$

Donde:

Q: Es el caudal proporcionado por la bomba DC en cm³/s.

A_t: Es el área transversal de la sección interna de la tubería en cm²., y donde A_t = 1.3273 cm².

Dist.: Es la distancia de la tubería de ½ pulgada del tanque de alimentación al tanque principal en cm., y donde Dist. = 170 cm.

t_r: Es el tiempo de retardo del sistema en segundos.

Despejando el tiempo de retardo t_r tenemos:

$$t_r = \frac{A_t * Dist.}{Q} \quad (4.1)$$

En la ecuación 4.1, reemplazamos los variables por valores, para determinar el tiempo de retardo mínimo y máximo del sistema.

Con Q = 166.67 cm³/s, como caudal máximo entregado por la bomba a 12 V DC aproximadamente, tenemos el tiempo de retardo mínimo como:

$$t_r = \frac{1.3273 \text{ cm}^2 * 170 \text{ cm}}{166.67 \text{ cm}^3 / \text{s}}$$

$$t_r(\text{mín}) = 1.3538 \text{ s}$$

Ahora con $Q = 35.03 \text{ cm}^3/\text{s}$, como caudal mínimo entregado por la bomba a 3 V DC aproximadamente, tenemos el tiempo de retardo máximo como:

$$t_r = \frac{1.3273 \text{ cm}^2 * 170 \text{ cm}}{35.03 \text{ cm}^3 / \text{s}}$$

$$t_r(\text{máx}) = 6.4413 \text{ s}$$

De igual manera calculamos dos tiempos de retardos más para el desarrollo de la práctica como:

$$t_{r2} = 1.6398 \text{ s}; \text{ con un } Q = 137.60 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ a } 9 \text{ V DC.}$$

$$t_{r3} = 2.5840 \text{ s}; \text{ con un } Q = 87.32 \text{ cm}^3/\text{s} \text{ a } 6 \text{ V DC.}$$

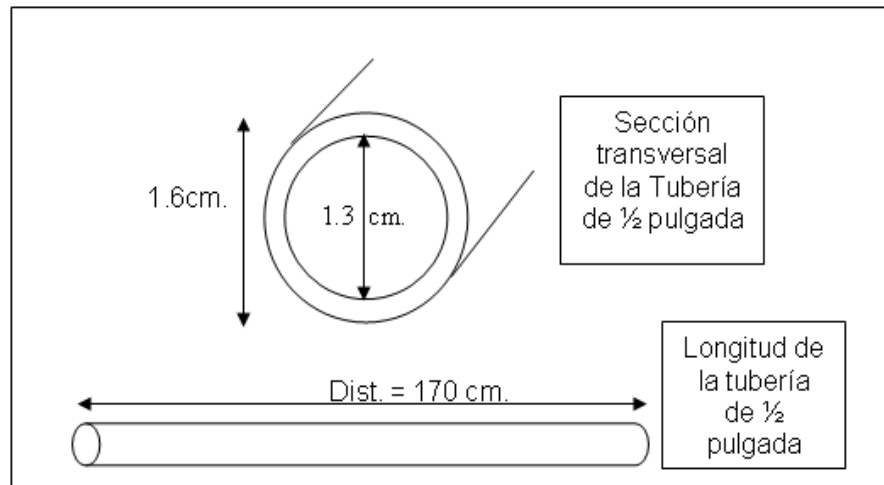


FIGURA 4.3.2.1. SECCIÓN TRANSVERSAL Y LONGITUD DE LA TUBERÍA DE 1/2 PULGADA UTILIZADA EN LA PLANTA.

Así detallamos cuatros valores de tiempo de retardo para el análisis de la práctica.

El control se aplica al voltaje que se ingresa a la bomba DC, para de esta manera controlar el caudal que proporciona la bomba y así mantener el nivel del tanque estable en un punto determinado de control.

En este tipo de práctica el estudiante debe tener en cuenta los conceptos básicos de clases de controladores que existe para el control de procesos industriales automático. La precisión de

la respuesta del sistema a los cambios del mismo depende de la calibración del controlador.

La planta es controlada por un programa de computadora creado bajo el software de MATLAB. Este programa contiene el controlador proporcional, integral y derivativo. El control opera en forma de bloque, la ventaja de este sistema contra los controladores neumáticos son amplias, principalmente en la facilidad y permanencia de la calibración y ajuste del controlador analizando la estabilidad y respuesta del sistema por medio de diagramas y gráficos.

En la realización de esta práctica el estudiante previamente debe de haber cursado la asignatura de control automático y manejar las funciones principales del programa de MATLAB, para aplicar y desarrollar criterios de control para procesos en lazo abierto o cerrado.

Los valores de los parámetros de ajuste dependen de la respuesta del circuito cerrado que se desea, así como de las características dinámicas o personalidad de los otros elementos del circuito de control y, particularmente del

proceso. Se vio anteriormente que, si el proceso no es lineal, como generalmente ocurre, estas características cambian de un punto de operación al siguiente, lo cual significa que un conjunto particular de parámetros de ajuste puede producir la respuesta que se desea únicamente en un punto de operación, debido a que los controladores con retroalimentación estándar son dispositivos básicamente lineales.

La función del controlador es, basándose en el error entre el punto de control y la respuesta del sistema, corregir la variable controlada de tal modo que compense el error y la respuesta del sistema se aproxime más al valor deseado o punto de control.

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (4.2)$$

$$m(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int e(t) dt + k_c \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.3)$$

La ecuación 4.3, define los parámetros característicos matemáticos de un controlador proporcional integral derivativo conocido como PID, y a continuación definimos sus parámetros:

$e(t)$: Error del sistema.

$m(t)$ = Salida del controlador.

$r(t)$ = Punto de control o set point.

$c(t)$ = Variable que se controla, señal que llega del sensor.

K_c = Ganancia del controlador.

τ_i = Tiempo de integración.

τ_d = Tiempo de derivación.

La ecuación 4.2 es el algoritmo matemático que rige el comportamiento del controlador, esta ecuación muestra la relación entre la salida del controlador $m(t)$ y el error $e(t)$, generado por la diferencia entre el punto de control y la variable del proceso con respecto al tiempo.

La ecuación 4.3 es el algoritmo matemático típico para un controlador Proporcional Integral Diferencial (PID), con la

suma de estas tres componentes se consigue una respuesta del sistema al controlador, la respuesta depende del ajuste de las constantes del controlador:

k_c P constante proporcional

$\frac{k_c}{\tau_i}$ I constante de integración

$k_c \tau_d$ D constante derivativa

Existen varios métodos empíricos de ajuste de controladores, no todos los métodos pueden ser válidos para cada caso, debiendo el estudiante buscar el que mejor se adapte a la personalidad del sistema.

Para el ajuste del controlador del sistema, especificamos el bloque de control, el bloque de la planta y el bloque de retroalimentación, como se detalla en la figura 4.3.2.2.

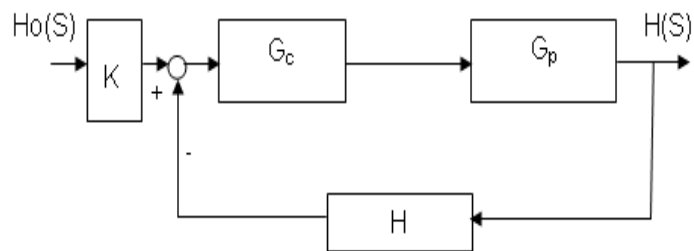


FIGURA 4.3.2.2. ESQUEMA DEL SISTEMA.

Definimos los parámetros de cada bloque como:

K: es el bloque de conversión de nivel (cm.) a voltaje, o prefiltro.

Gc: es el bloque del controlador.

Gp: es el bloque de la planta.

H: es el bloque de retroalimentación del sistema.

Recordemos que la función de transferencia teórica se obtiene relacionando la salida con la entrada del sistema, como nuestro sistema tiene una variable a controlar (nivel), por medio de una variable de control, debemos tener relaciones de variables y relación de perturbación que nos producirán las diferentes etapas de nuestro sistema.

Cuando existe varias variables la mejor forma de identificar el comportamiento del sistema, es realizarla modificando una variable y manteniendo constante la otra. Así podemos obtener la curva característica entre ellas, dichas curvas serán observadas para determinar sus parámetros de control como son: Tiempo de Estabilización, Tiempo de Subida, Estabilidad de la señal, Sobrenivel Porcentual, etc., como se muestra en la siguiente figura 4.3.2.3.

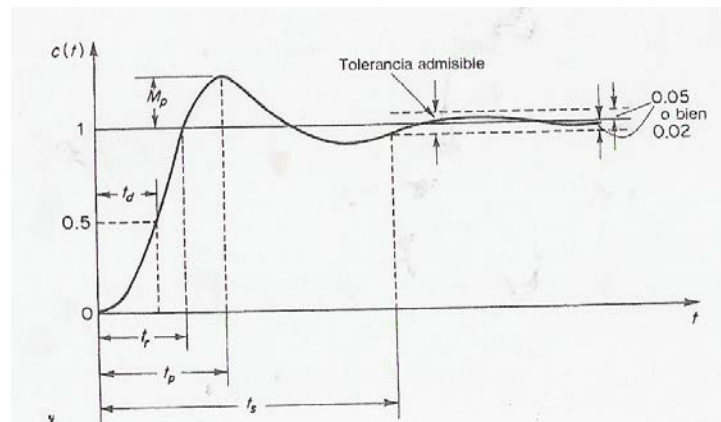


FIGURA 4.3.2.3. CURVA Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.

Donde:

T_d : Tiempo de retardo.

T_r : Tiempo de crecimiento (time rise).

T_p : Tiempo pico (time settling).

M_p : Sobreimpulso máximo (over shoot).

T_s : Tiempo de estabilización, cuando los valores están $\pm 5\%$ / $\pm 2\%$ del valor seteado (ingresado).

4.3.3. Por Métodos Teóricos.

4.3.3.1. Pre-Práctica:

El estudiante debe diseñar la dinámica del sistema utilizando diagramas de bloques, para aplicar la función SISO del programa de MATLAB y de esta manera determinar y ajustar el mejor controlador del sistema. Los pasos que se deben seguir para el desarrollo de esta pre-práctica teórica por medio del MATLAB son:

1. Partiendo del análisis matemático de cada uno de los parámetros y funciones que componen el sistema, como se determinó en el capítulo 2, en el campo de la frecuencia por medio de la Transformada de Laplace, el estudiante debe

diseñar el diagrama de bloques de su sistema en la herramienta SIMULINK (Simulador) del programa de MATLAB.

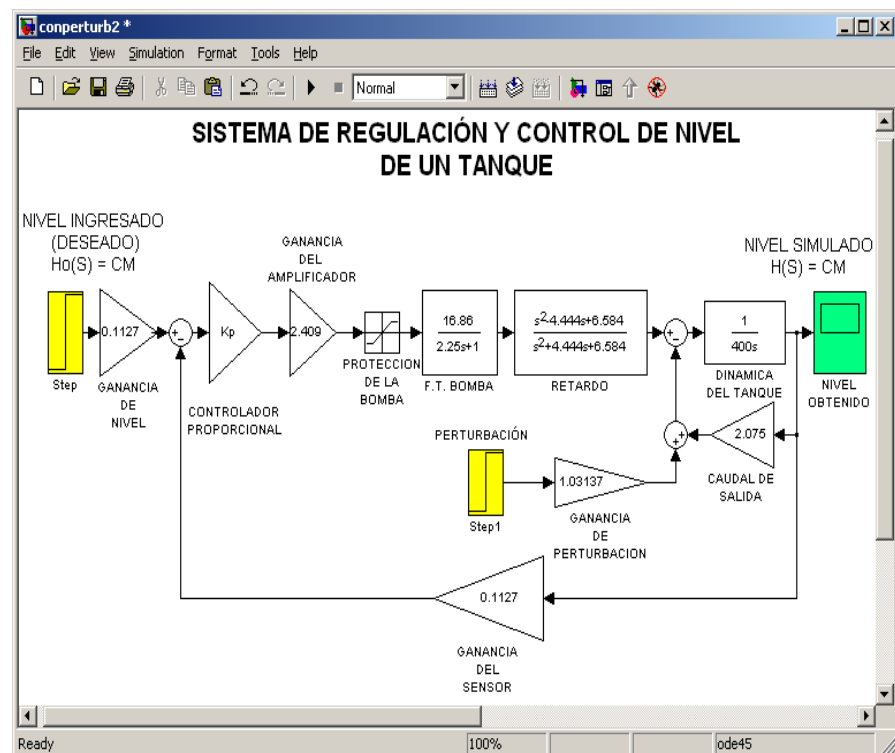
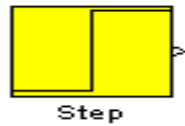


FIGURA 4.3.3.1.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.

En la figura 4.3.3.1.1., mostramos el diagrama de bloque del sistema, ahora definiremos cada uno de los bloques del sistema en Simulink.



Bloque de la función STEP que representa la señal de entrada Escalón de nivel deseado del sistema.



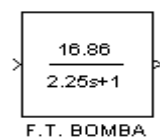
Bloque de ganancia de nivel, es la conversión de nivel deseado a voltaje.



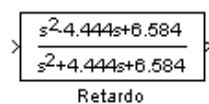
Bloque del controlador del sistema que puede ser un controlador Proporcional, Integral, Derivativo o Proporcional Integral Derivativo, y K_p es una constante de posición.



Bloque de ganancia de la etapa amplificadora del sistema.



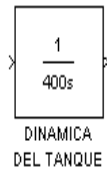
Bloque de función de transferencia dinámica de la bomba DC.



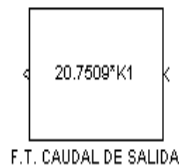
Bloque de retardo del sistema, en nuestro caso es de 1.3538 segundos. Esta función de transferencia se la determinó con la aplicación del criterio de Padé.



Bloque de comparación de dos señales continuamente.



Bloque de la dinámica del tanque principal.



Bloque de caudal de salida del tanque principal proporcionada por la válvula de compuerta y

donde $K1 = \frac{0.5}{\sqrt{h(s)}}$, es la linealización del nivel que proporciona el tanque principal. Con $h = 25$ cm. y $Qs = 2.075$ cm³/s.

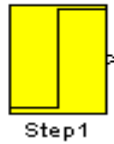


Bloque de ganancia del sensor ultrasónico de nivel.

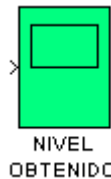


Bloque de ganancia de Perturbación del sistema.

PERTURBACION



Bloque de la función STEP que modela la señal de perturbación del sistema, como una función Escalón.



Bloque llamado nivel obtenido, es un osciloscopio donde se genera la gráfica de respuesta del sistema en el tiempo.



Bloque de protección en caso de sobrevoltaje para la bomba DC.

Finalizando la descripción de cada uno de los bloques que compone el sistema, se concluye el diseño del sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque aplicando Simulink.

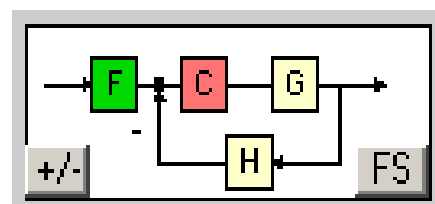
Partiendo del diseño del sistema en Simulink (Simulador), el estudiante por medio del archivo editor (M-file) de MATLAB debe registrar cada una de las funciones de transferencia del sistema, como se detalla en la figura 4.3.3.1.2. (A), y redefinirlas de acuerdo al diagrama de

bloques básico que exige la herramienta SISO,
 figura 4.3.3.1.2. (B).

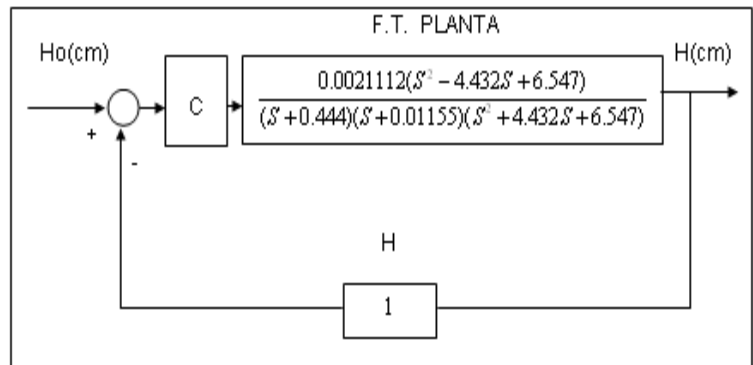
```

1  %APLICACION DE LA HERRAMIENTA SISOTOOL
2  num1=[16.86];den1=[2.25 1];
3  B=tf(num1,den1);%F.T. BOMBA
4  num2=[1 -4.444 6.584];den2=[1 4.444 6.584];
5  R=tf(num2,den2);%F.T. RETARDO
6  num3=[1];den3=[400 0];
7  T=tf(num3,den3);%F.T. TANQUE
8  num4=[2.075];den4=[1];
9  Qs=tf(num4,den4);%CAUDAL DE SALIDA
10 sis1=feedback(T,Qs);
11 sis2=tf(sis1);
12 sis3=series(sis2,R);
13 sis4=tf(sis3);
14 sis5=series(sis4,B);
15 G=tf(sis5);%F.T. PLANTA
16 num5=[1];den5=[1];
17 C=tf(num5,den5);%F.T. CONTROLADOR
18 num6=[0.1127];den6=[1];
19 F=tf(num6,den6);%F.T. PREFILTRO
20 num7=[0.1127];den7=[1];
21 H=tf(num7,den7);%F.T. SENSOR
22 sisotool
    
```

(A)



(B)



(C)

FIGURA 4.3.3.1.2. A) APLICACIÓN DEL M-FILE
PARA DEFINIR FUNCIONES DE
TRANSFERENCIA; B) DIAGRAMA BASE SISO;
C) DIAGRAMA DEL SISTEMA.

Según la figura 4.3.3.1.2. (B), definimos cada uno de los bloques del diagrama base de aplicación de la herramienta SISO y a continuación especificamos cada bloque como:

F: este bloque corresponde al prefiltro del sistema, en nuestro caso es la conversión de nivel (cm.) a voltaje (V).

C: es el bloque del controlador del sistema.

G: es el bloque de la función de transferencia total de la planta, y en este caso con un tiempo de retardo de 1.3538s.

H: es el bloque de retroalimentación del sistema y en nuestro caso corresponde a la función de transferencia del sensor ultrasónico.

2. El estudiante debe editar el comando Sisotool (comando de habilitación de la herramienta SISO), para ejecutarlo en la ventana de comandos de MATLAB (Command Window), para habilitar la herramienta SISO y hallar el controlador del sistema, figura 4.3.3.1.3.

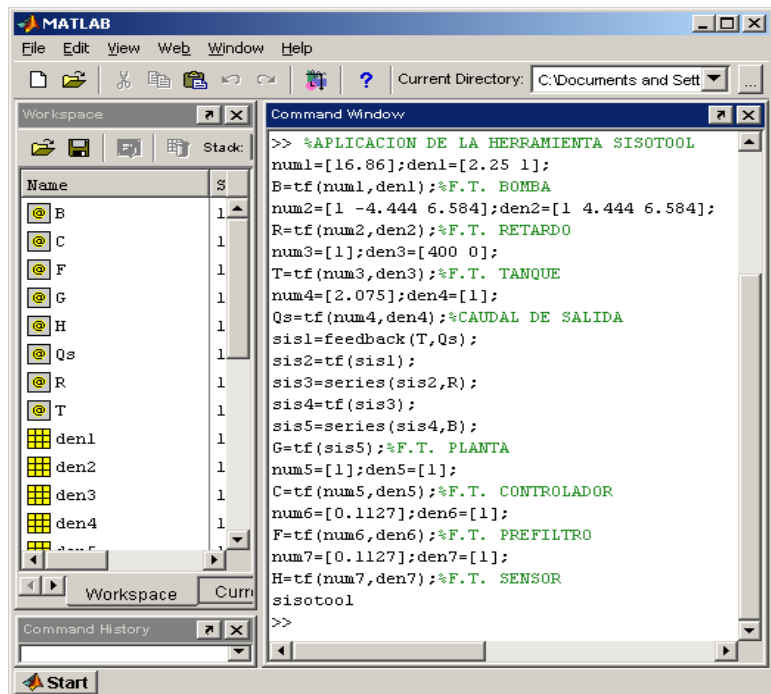


FIGURA 4.3.3.1.3. INGRESO DEL COMANDO
SISOTOOL EN LA VENTANA PRINCIPAL DE
MATLAB.

3. El estudiante debe asignar cada uno de los bloques del sistema al esquema base del SISO, importando los bloques, como se muestra en la figura 4.3.3.1.4., para adquirir las características de cada función de transferencia de los bloques del sistema.

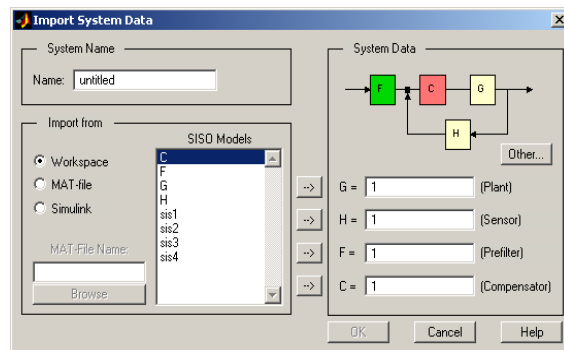


FIGURA 4.3.3.1.4. ASIGNACIÓN DE FUNCIONES AL DIAGRAMA DE BLOQUES BASE DE LA HERRAMIENTA SISO.

4. Definiendo las funciones de transferencia del sistema, la herramienta SISO gráfica el Lugar Geométrico de las Raíces, figura 4.3.3.1.5. De esta manera el estudiante obtiene el Lugar Geométrico de las Raíces del sistema sin el ajuste del controlador.

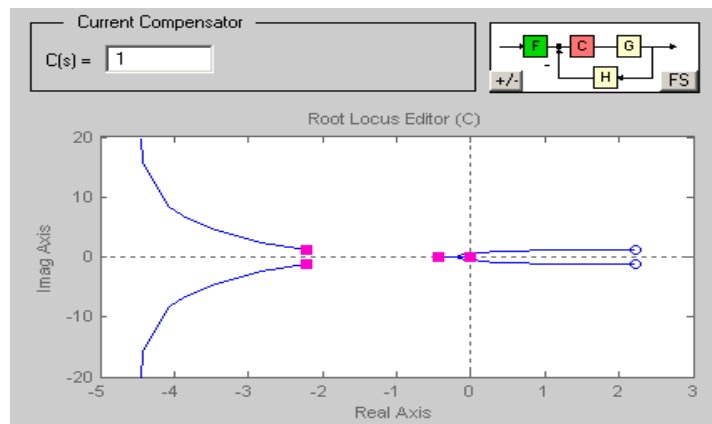


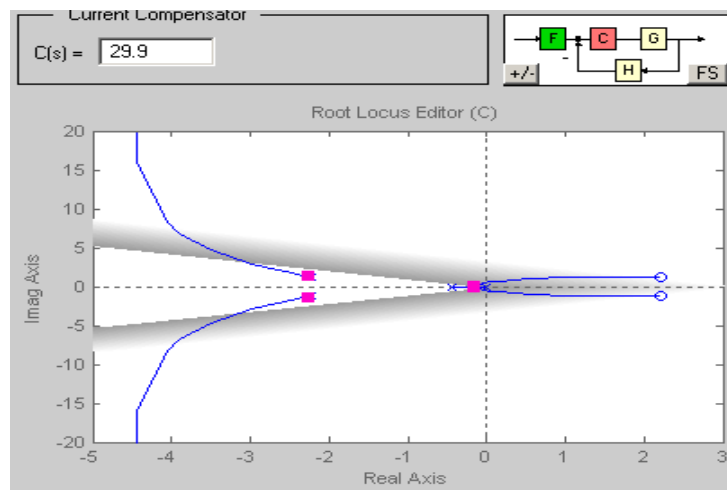
FIGURA 4.3.3.1.5. VENTANA GRÁFICA DEL
SISO.

Con las propiedades que posee la herramienta SISO, el estudiante puede hallar el tipo y característica del controlador que proporciona mejor estabilidad al sistema y analizar si al sistema se agrega compensadores, con la ayuda de las gráficas dinámicas del Lugar Geométrico de las Raíces y la Respuesta del sistema en lazo cerrado.

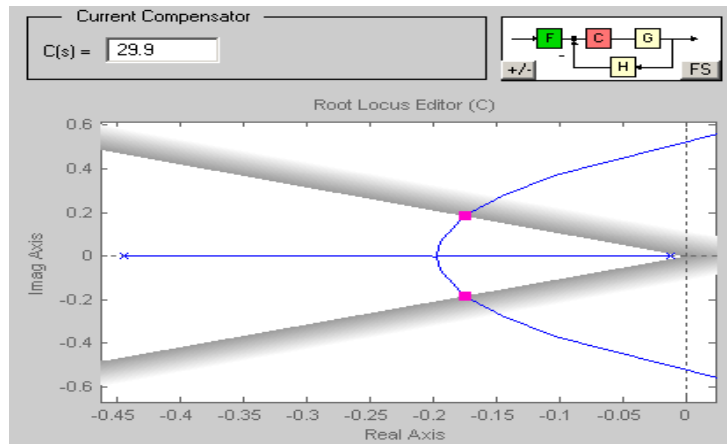
Primer Parte:

Como segundo paso a partir de la figura 4.3.3.1.5., el estudiante debe de seleccionar el valor de la ganancia

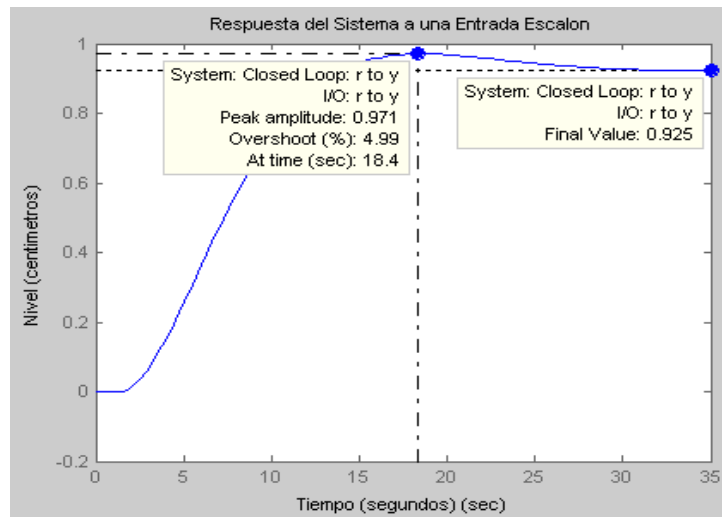
para tener un Sobrenivel Porcentual “SP” $\leq 5\%$, figura 4.3.3.1.6. (A), para ajustar el valor de la constante de posición K_p .



(A)



(B)



(C)

FIGURA 4.3.3.1.6. A) AJUSTE DEL VALOR DE K_p
CON UN $SP \leq 5\%$; B) ACERCAMIENTO DE LOS
POLOS DOMINANTES DEL SISTEMA; C)
RESPUESTA DEL SISTEMA.

La figura 4.3.3.1.6. (C), muestra la Respuesta del sistema con el ajuste requerido del Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$, con una ganancia de $K_p = 29.9$; obteniendo como característica el Tiempo de Estabilidad del sistema de 35s aproximadamente, y el Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0.075$ cm. de nivel a una entrada Escalón Unitario.

Segunda Parte:

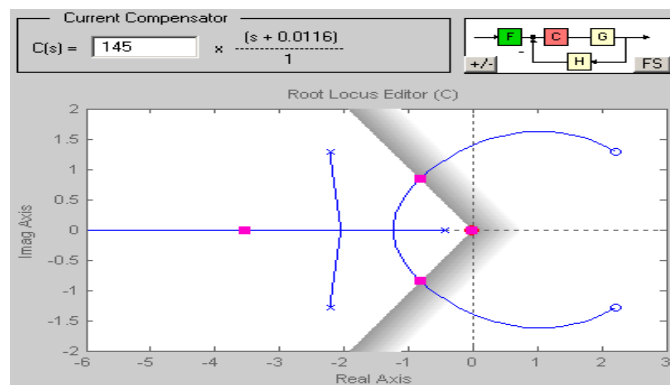
Se desea que el Error de Estado Estacionario " e_{ss} " sea igual a cero. El estudiante debe seleccionar que tipo de controlador trabajaría para cumplir este objetivo.

Primero: Ubique el cero del controlador Proporcional Integral PI, para cancelar la acción del polo dominante de lazo abierto del sistema y además se debe agregar la acción integral en el origen, para obtener el $e_{ss} = 0$ cm.

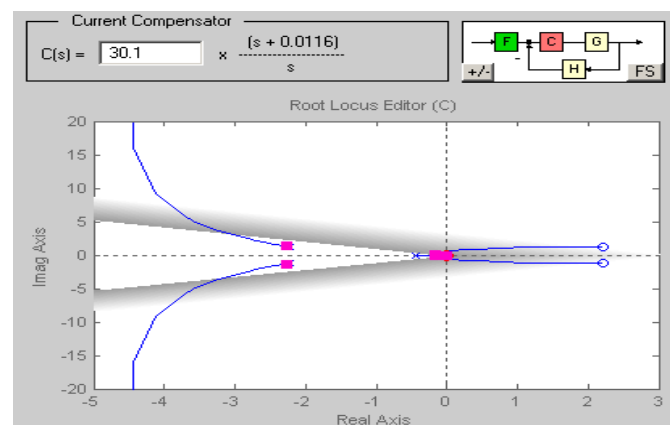
El cero se ubica en el punto -0.01155, figura 4.3.3.1.7., ya que este es el valor de la posición del polo dominante de la planta.

- Bajo estas condiciones proporcione el Lugar Geométrico de las Raíces y el valor de la ganancia para una Respuesta del Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$.
- Establezca el Tiempo de Estabilidad bajo estas condiciones.

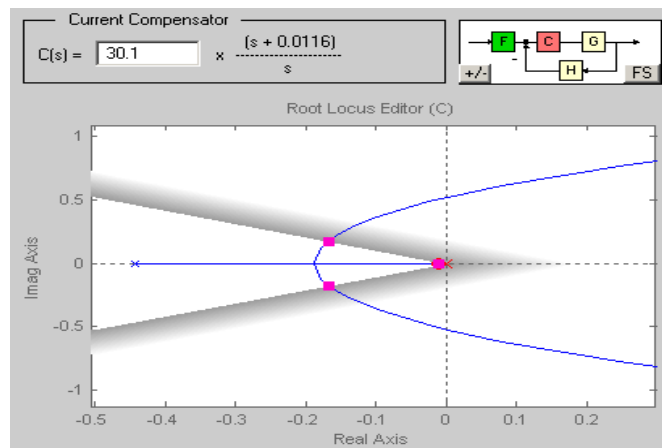
El estudiante obtiene los parámetros de estabilidad del sistema de manera grafica. Se observa en la figura 4.3.3.1.7. (A), que el Lugar Geométrico de las Raíces se modifica al agregar el cero, y se observa que las trayectorias son empujadas hacia la izquierda del plano S. Ahora el estudiante debe ajustar el valor de la ganancia para un Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$.



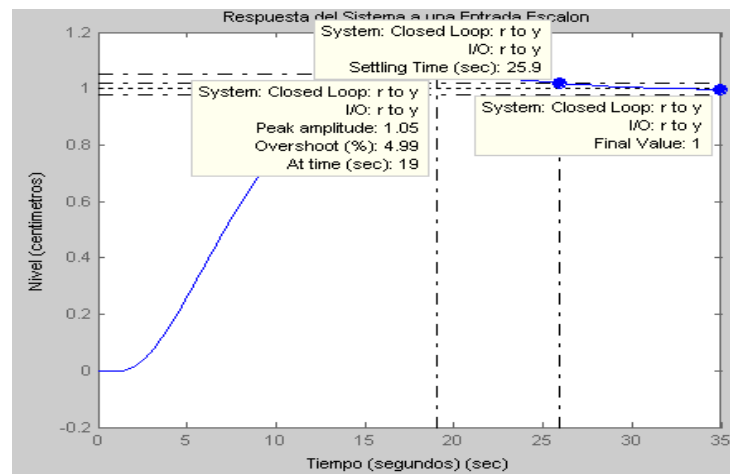
(A)



(B)



(C)



(D)

FIGURA 4.3.3.1.7. A) AGREGACIÓN DEL CERO; B)
AGREGACIÓN DEL CONTROLADOR PI; C)
ACERCAMIENTO DE LOS POLOS DEL SISTEMA; D)
RESPUESTA DEL SISTEMA AL AJUSTE DEL
CONTROLADOR PI.

En la figura 4.3.3.1.7. (C), mostramos la Respuesta del sistema con el ajuste del controlador PI y con un Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$ y el Tiempo de Estabilidad obtenido en este caso es de 25.9s, con una ganancia de $K_p = 30.1$, con Sobrenivel Porcentual de 4.99% y con un $e_{ss} = 0$ cm.

Tercera Parte:

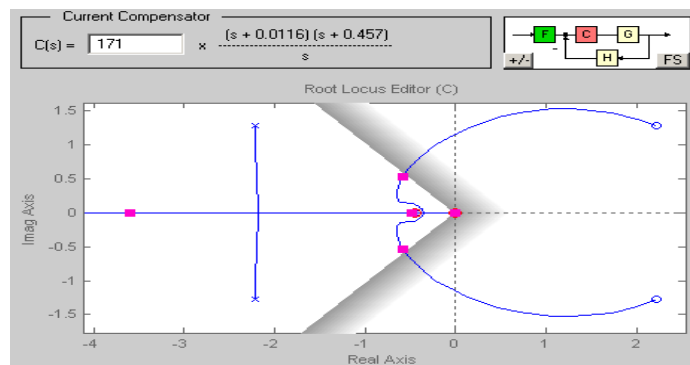
Primero: Se desea que la Respuesta del sistema sea menor a la encontrada anteriormente, es decir 25.9s.

➤ Utilizando la herramienta SISO ubique la posición adecuada para el otro cero, que proporcionaría un control PID; de tal manera de lograr una Respuesta Escalón Unitaria que mantenga el Sobrenivel Porcentual $\leq 5\%$.

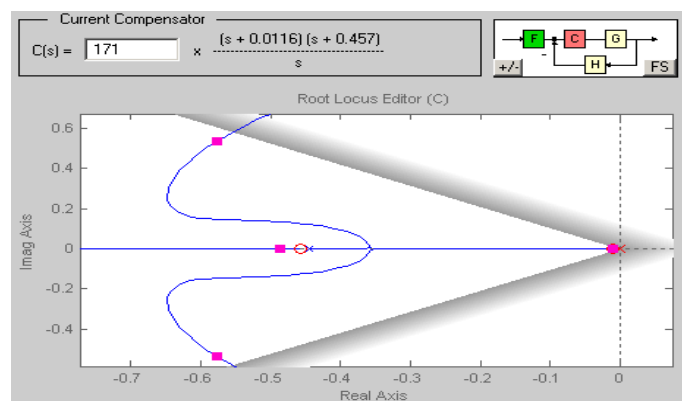
Inicialmente colocamos el cero en -1 del plano S, y el estudiante debe de mover el cero en el punto apropiado para que la Respuesta del sistema sea lo

más rápida posible y se mantenga el Sobrenivel Porcentual.

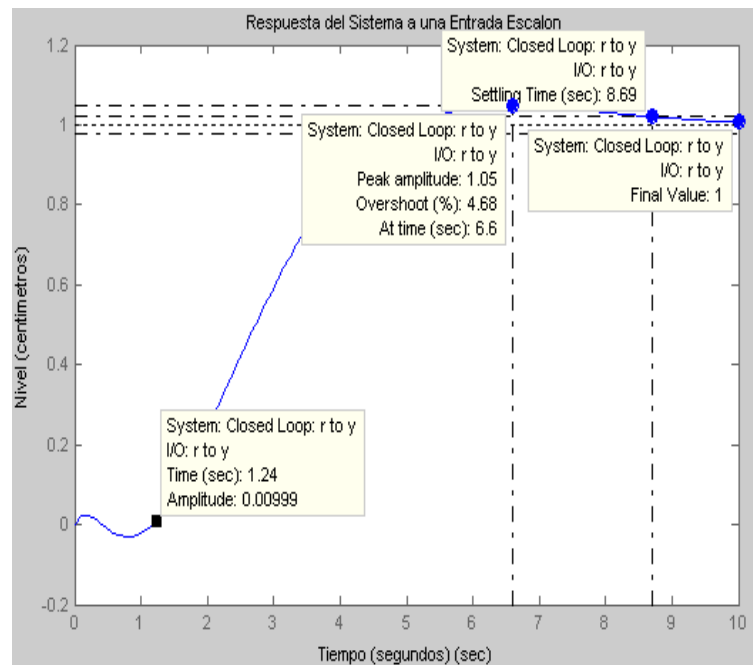
La figura 4.3.3.1.8. (A), muestra el ajuste del cero y se observa el cambio del Lugar Geométrico de las Raíces del sistema.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 4.3.3.1.8. A) AGREGACIÓN DE OTRO CERO AL SISTEMA; B) AJUSTE DEL CONTROLADOR PID; C) RESPUESTA DEL SISTEMA CON EL CONTROLADOR PID.

En la figura 4.3.3.1.8. (B) se observa el ajuste del controlador Proporcional Integral Derivativo PID como: $\frac{171(S + 0.01155)(S + 0.457)}{S}$. Mientras que en la

figura 4.3.3.1.8. (C), observamos la Respuesta del sistema con el ajuste del controlador Proporcional Integral Derivativo PID a una entrada Escalón

Unitario, y el estudiante puede observar en la gráfica los parámetros de estabilidad como; el Sobrenivel Porcentual $SP = 4.68\%$, la constante de posición $K_p = 171$, el Tiempo de Estabilidad $t_s = 8.69s$, el tiempo de retardo del sistema de $1.24s$ aproximadamente y el Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0$.

Por lo que hemos mejorado el Tiempo de Estabilidad del sistema, y hallado el mejor controlador que se ajuste a las características de estabilidad de nuestra planta.

- El estudiante debe generar una tabla con los parámetros de estabilidad del primer caso, segundo caso y tercer caso.

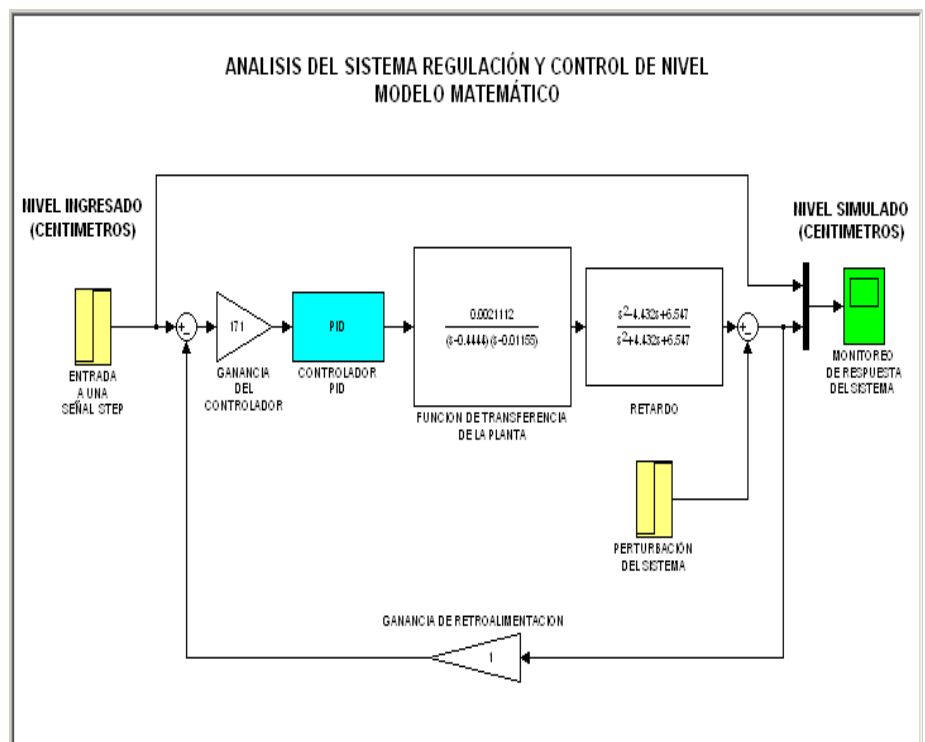
TABLA 8

PARÁMETROS DE ESTABILIDAD CON DIFERENTES TIPOS DE AJUSTE

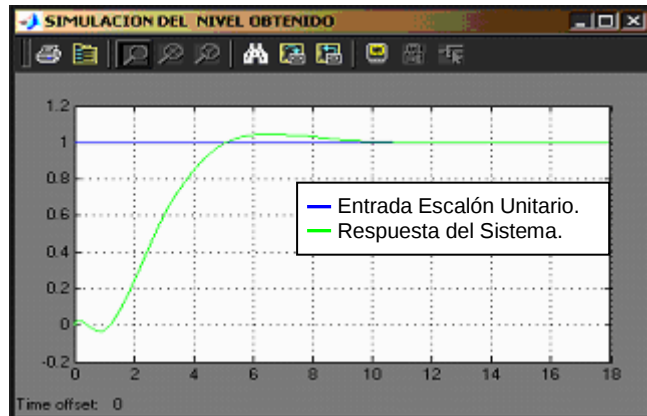
DE CONTROLADOR, P, PI Y PID.

Primera Parte	Segunda Parte	Tercera Parte
Controlador P P = 29.9	Controlador PI $\frac{30.1(S + 0.01155)}{S}$ P = 30.1 $I = \frac{0.347655}{S}$	Controlador PID $\frac{171(S + 0.01155)(S + 0.457)}{S}$ P = 80.122 $I = \frac{0.902597}{S}$ D = 171S
Sobrenivel Porcentual SP = 4.99%	Sobrenivel Porcentual SP = 4.99%	Sobrenivel Porcentual SP = 4.68%
Tiempo de Estabilidad Ts = 35s	Tiempo de Estabilidad Ts = 25.9s	Tiempo de Estabilidad Ts = 8.69s
Error de Estado Estacionario e _{ss} = 0.075cm.	Error de Estado Estacionario e _{ss} = 0cm.	Error de Estado Estacionario e _{ss} = 0cm.
Tiempo de Retardo tr = 1.3538s	Tiempo de Retardo tr = 1.3538s	Tiempo de Retardo tr = 1.24s

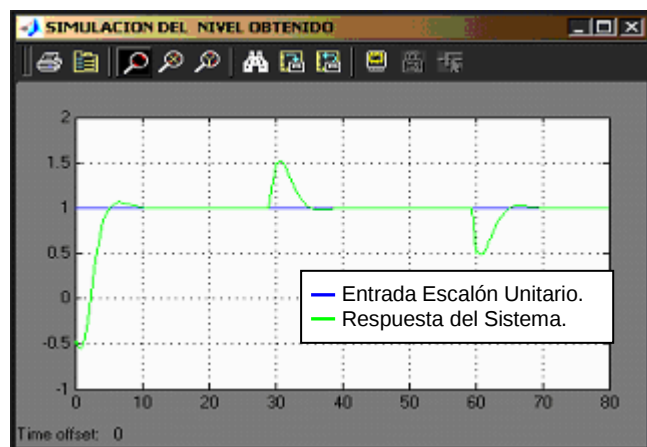
5. Con la aplicación del diseño del sistema en el SIMULINK, figura 4.3.3.1.9. (A), se debe simular el sistema adicionando el bloque del controlador determinado por el SISO, observando la Respuesta del sistema, figura 4.3.3.1.9. (B), en función del tiempo y del punto de control de acuerdo a las señales de entrada y salida.



(A)



(B)



(C)

FIGURA 4.3.3.1.9. A) SISTEMA EN SIMULINK;
 B) RESPUESTA DEL SISTEMA CON EL
 CONTROLADOR PID SIN PERTURBACIÓN; C)
 RESPUESTA DEL SISTEMA CON
 PERTURBACIÓN CON EL CONTROLADOR
 PID.

En la figura 4.3.3.1.9. (B) y (C) la curva de color azul es la entrada de la señal Escalón Unitario y la curva de color verde es la Respuesta o salida del sistema. El eje de las ordenadas corresponde al nivel de estabilidad en este caso de 25 cm., y en la gráfica indica 1 cm., mientras que el eje de las abscisas corresponde el tiempo de estabilidad en segundos.

Aplicando la función SISO hemos explicado a determinar el controlador del sistema de manera teórica a partir del modelo matemático de la planta utilizando aplicaciones de funciones del MATLAB, con un tiempo de retardo de 1.3537s.

6. Repetir los pasos 2, 3, 4,5 y 6 con diferentes tiempo de retardo en el sistema, como se especifica en la tabla 4.3.

TABLA 9

DIFERENTES TIEMPOS DE RETARDO DEL SISTEMA

Tiempo de Retardo mínimo 1:	$t_r(\text{mín}) = 1.3538\text{s}$ con Caudal máximo.
Tiempo de Retardo 2:	$t_{r2} = 1.6398\text{s}$
Tiempo de Retardo 3:	$t_{r3} = 2.5840\text{s}$
Tiempo de Retardo máximo 4:	$t_r(\text{máx}) = 6.42\text{s}$ con Caudal mínimo.

4.3.4. Por Métodos Experimentales.

El ajuste del controlador de manera experimental permite establecer una relación entre la función de transferencia del proceso y de los modos de un controlador PID debido a que, para funciones de transferencia simple, sin tiempo muerto, el controlador se puede expresar en términos de los modos proporcional, integral y derivativo. Además del controlador, se obtienen las relaciones para los parámetros de ajuste en términos de la constante de tiempo, a fin de que el sistema opere en un rango de condiciones estable de operaciones. Se debe establecer un arreglo para lograr un conjunto aceptable

de parámetros de ajuste, ya que la respuesta puede ser lenta en un extremo del rango, y oscilatoria en el otro. A continuación se exponen los pasos para el ajuste del controlador experimental o real.

4.3.4.1. Pre-Práctica.

La pre-práctica que se detalla es similar al método teórico; en este caso ajustaremos el controlador del sistema partiendo de la función de transferencia identificada de la planta en tiempo real. La solución consiste en realizar algunas pruebas dinámicas en el sistema real con la aplicación del xPC Target de MATLAB y se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. El Sistema de Control y Regulación de Nivel de un Tanque aplicando MATLAB, para iniciar la operación del sistema requiere revisar algunos parámetros. El sistema está físicamente constituido por 2 computadores que administran el software y el controlador del sistema por medio del programa de MATLAB con sus diversas funciones

de control, y la estructura metálica de la planta. El computador donde se archiva el sistema de control de la planta se llama Computador Administrador o Controlador (Host), este computador a la vez está conectado vía serial o por protocolo de TCP/IP a otro computador llamado Computador Remoto (Target) y este computador se habilita por medio de un disquete que posee las propiedades de control desde el computador administrador.

2. Se debe habilitar la planta del sistema. La planta posee una bomba DC de succión instalada en la parte inferior de la estructura, que proporciona el caudal de entrada al tanque superior de vidrio de la estructura llamado tanque principal. El control del voltaje de la bomba DC se la realiza por medio de una etapa amplificadora de voltaje DC a DC, que es controlada por el bloque conector CB-68LP del computador remoto, que proporciona el voltaje indicado para mantener el caudal de entrada constante y de esta manera controlar el nivel.

3. Para arrancar el sistema, se debe llenar el tanque de suministro (retroalimentación) con agua a un 80% de su totalidad (aproximadamente 28 litros). Este tanque es el alimentador de flujo a la bomba para todo nivel deseado, pero en nuestro caso trabajará en un rango entre 20 cm. a 35 cm. de nivel. Se debe tener en la planta la válvula 2 de compuerta abierta a 2 vueltas.



FIGURA 4.3.4.1.1 TANQUE DE ALIMENTACIÓN
O SUMINISTRO.

4. Para la activación de los componentes eléctricos del lazo de control de nivel, se cuenta con un enchufe de 110 V AC para una toma de corriente de pared para energizar la planta, que posee una regleta de 4 tomas de corrientes polarizadas, ubicada en la parte posterior e inferior de los soportes metálicos de la planta.
5. Se debe activar la etapa amplificadora de voltaje DC a DC que posee un switch en su propia estructura, la fuente del sensor ultrasónico, el circuito de activación de la válvula encendido/apagado de perturbación, y se debe activar el potenciómetro de $1K\Omega$ para la activación del ingreso manual de nivel al sistema. De esta manera los dispositivos de la planta se encuentran operando dentro de los valores normales fijados.

El sistema cuenta con un panel metálico de control, en el interior del mismo se encuentran ubicadas las fuentes de los dispositivos de la planta, figura 4.3.4.1.2.



FIGURA 4.3.4.1.2 FUENTE DE ACTIVACIÓN
DEL SISTEMA.

6. En la parte frontal de la puerta del panel metálico de la planta, se colocaron borneras de medición con sus respectivas etiquetas indicadoras de señales, para que los estudiantes realicen toma de valores de señales en tiempo real, figura 4.3.4.1.3



FIGURA 4.3.4.1.3. PANEL DE CONTROL.

- Las dos primeras borneras del panel de control son el Test Point o punto de prueba de alimentación del sensor. Los conectores siguientes son el voltaje de alimentación del sensor.
- Las dos segundas borneras son el punto de prueba del voltaje de salida del sensor a medida que varía el nivel de agua del tanque principal. Los conectores siguientes son el voltaje de salida del sensor que se conecta a la entrada del bloque conector CB-68LP.

En la parte inferior de estas borneras se encuentra colocado un switch que es la activación de la perturbación provocada por la válvula encendido/apagado, y a lado de este swicht se encuentra ubicado un potenciómetro que sirve para el ajuste manual de nivel del sistema.

- La tercera fila de borneras son el punto de prueba del voltaje de entrada a la bomba DC, los conectores siguientes son el voltaje de entrada a la bomba DC proporcionado por la etapa amplificadora DC a DC.

- La cuarta fila de bornera es el punto de prueba del voltaje de alimentación entregado por la tarjeta de adquisición PCI-6024E. Y los conectores siguientes son el voltaje de alimentación de la tarjeta PCI-6024E a la etapa amplificadora DC a DC.

Así describimos las borneras de prueba del panel de control de la planta.

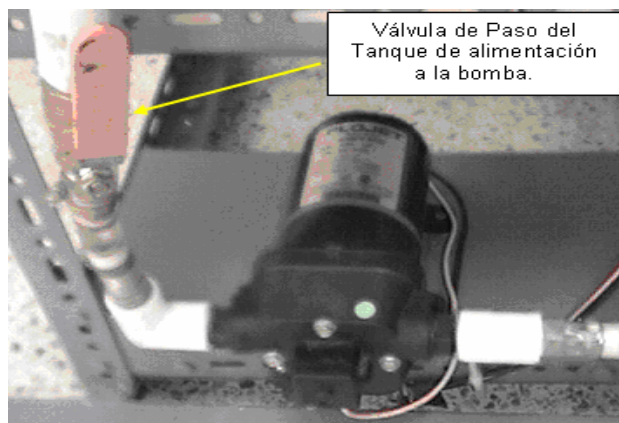
El sistema de encendido de la bomba se la realiza automáticamente por el computador administrador o de control, al inicio de la ejecución del programa Simulink.

7. La posición de las válvulas que permiten el paso de agua desde el tanque principal al tanque de retroalimentación debe de ser tomado en cuenta y asegurarse que la válvula 2 de compuerta se encuentre abierta a 2 vueltas y la válvula encendido/apagado se encuentre desactivada. Además la válvula 1 de descarga del tanque de retroalimentación, figura 4.3.4.1.4 (B) debe de estar abierta, ya que esta permite la recirculación de agua en el sistema.

Todas estas disposiciones de válvulas deben de ser tomadas en cuenta para el arranque de la planta.



(A)



(B)

FIGURA 4.3.4.1.4 A) POSICIÓN DE VÁLVULA DE PERTURBACIÓN; B) VÁLVULA DE PASO.

8. Finalmente faltaría la revisión de conexiones entre el bloque conector CB-68LP y las entradas y salidas de señales de la planta.

Se debe observar con cuidado la tabla característica de conexión del bloque CB-68LP para la tarjeta PCI-6024E, para habilitar los canales respectivos con su determinada polaridad, como se detalla en la tabla 10.

TABLA 10
CANALES DE CONEXIÓN DE SEÑALES DE ENTRADA
Y SALIDA DEL SISTEMA DE LA TARJETA PCI-6024E.

NÚMERO DE CANAL	POLARIDAD	TIPO DE SEÑAL
22	POSITIVO	Voltaje de salida de la bomba
55	NEGATIVO	Voltaje de salida de la bomba
33	POSITIVO	Voltaje de entrada al sensor
32	NEGATIVO	Voltaje de entrada al sensor
68	POSITIVO	Ajuste de entrada de Nivel manual
67	NEGATIVO	Ajuste de entrada de Nivel manual

9. Realizar los pasos 2, 3, 4, 5 y 6 por el Método Teórico del ajuste de controlador, pero la diferencia es que se trabaja con la función de transferencia del modelo de la planta real identificada.
10. Registrar los parámetros de ajuste del controlador en la tabla 11.

TABLA 11

**PARÁMETROS DE ESTABILIDAD EN TIEMPO REAL CON DIFERENTES
TIPOS DE AJUSTE DE CONTROLADOR, P, PI Y PID.**

Primera Parte	Segunda Parte	Tercera Parte
Controlador P $P = 20$	Controlador PD $73.8(S + 0.271)$ $P = 20$ $D = 73.8S$	Controlador PID $\frac{100(S + 0.0147)(S + 0.323)}{S}$ $P = 33.77$ $I = \frac{0.4748}{S}$ $D = 100S$
Sobrenivel Porcentual $SP = 4.99\%$	Sobrenivel Porcentual $SP = 4.99\%$	Sobrenivel Porcentual $SP = 4.95\%$
Tiempo de Estabilidad $T_s = 35s$	Tiempo de Estabilidad $T_s = 25.9s$	Tiempo de Estabilidad $T_s = 8.69s$
Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0.075 \text{ cm.}$	Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0 \text{ cm.}$	Error de Estado Estacionario $e_{ss} = 0 \text{ cm.}$
Tiempo de Retardo $t_r = 1.3538s$	Tiempo de Retardo $t_r = 1.3538s$	Tiempo de Retardo $t_r = 1.24s$

4.3.4.2. Práctica

Materiales:

- Un computador principal (Sistema de Control MATLAB llamado Host PC).
- Un computador secundario (Sistema de adquisición de la planta llamado Target PC o Remoto PC).
- Activación de la planta de Control y Regulación de Nivel.
- Multímetro y cables eléctricos para medición.

Parámetros de ajustes de equipos a utilizar.

Para realizar un trabajo experimental-didáctico se ha decidido utilizar los siguientes parámetros reales de cada equipo.

TABLA 12
PARÁMETROS DE LA PRÁCTICA

DISPOSITIVO	PARÁMETROS	TIPO DE SEÑAL
Bomba	0 a 12 V	DC
Sensor	22 V	DC
Ajuste Manual de Nivel	10 V	DC

4.3.5. Procedimiento.

1. En esta práctica el estudiante debe habilitar el computador principal (Host), el computador remoto (Target) y activar la planta. En el computador Host se debe habilitar el programa del sistema de adquisición de datos en tiempo real en lazo cerrado con las entradas y salidas habilitadas respectivamente en el programa de MATLAB llamado ControlNivel, figura 4.3.5.1., la cual tiene incluido la habilitación del bloque controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) del sistema determinado en la pre-práctica.

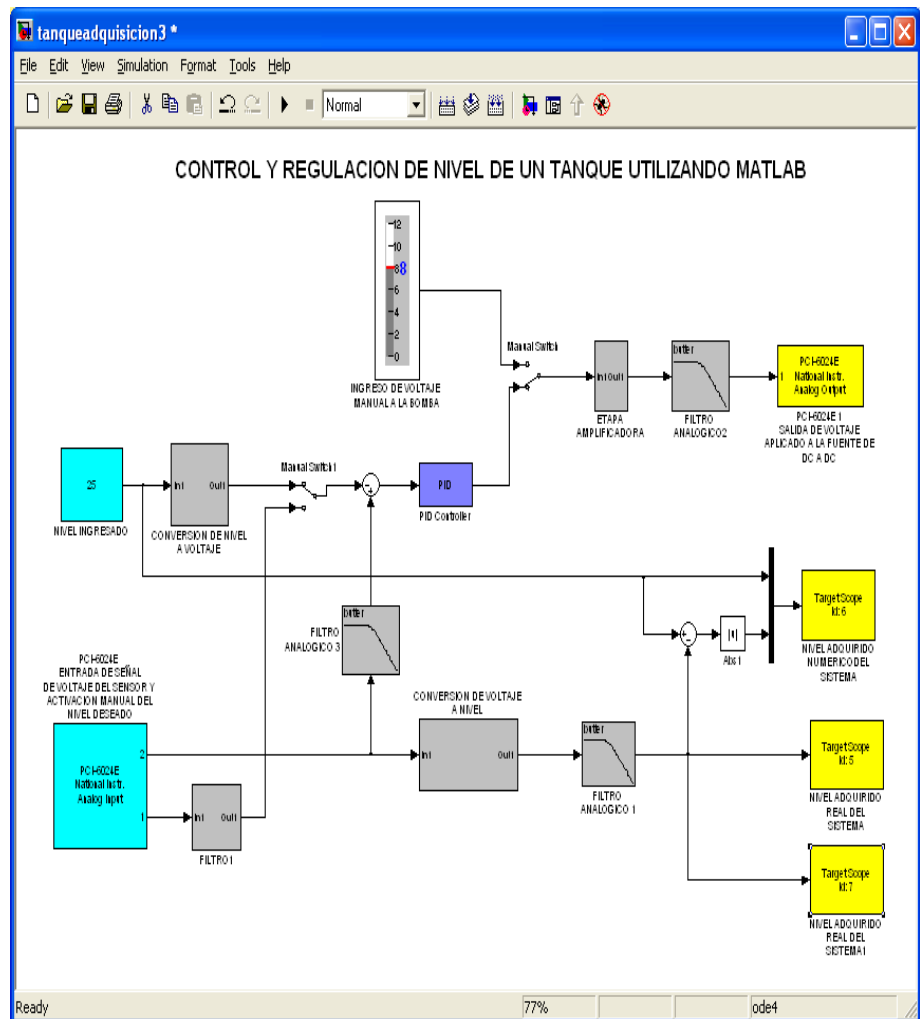


FIGURA 4.3.5.1. SISTEMA EN TIEMPO REAL.

2. Habilitado el sistema en tiempo real, el estudiante debe de cargar la aplicación del xPC Target, para comunicar el computador Host con el computador Target y a la vez controlar la planta.

3. Si el sistema se compila con éxito, el estudiante tiene activo el sistema para iniciar el proceso de adquisición de datos y obtener las respuestas del mismo.
4. Para obtener la respuesta del sistema a 25 cm. de nivel, el estudiante debe ingresar al sistema de la figura 4.3.5.1., un voltaje de 6.35 V DC a la bomba, figura 4.3.5.2.

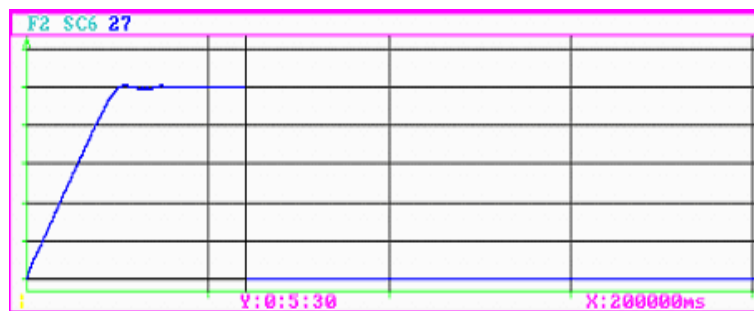
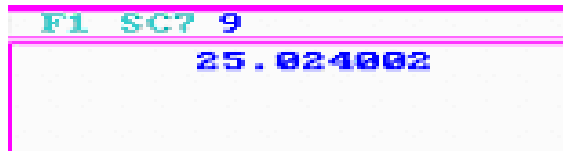


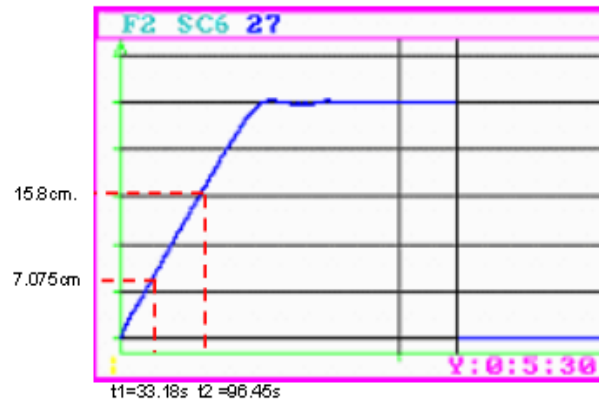
FIGURA 4.3.5.2.

RESPUESTA DEL SISTEMA EN EL TARGET PC.

5. Observando la respuesta del sistema, figura 4.3.5.3., se puede verificar en el computador Target, que el controlador Proporcional Integral Derivativo, está trabajando correctamente de acuerdo al ajuste de estabilidad que planteamos en la pre-práctica.



(A)



(B)

FIGURA 4.3.5.3. A) NIVEL DE ESTABILIDAD EN EL TARGET; B) RESPUESTA DEL SISTEMA CON UN CONTROLADOR PID.

4.3.6. Cálculos.

En este punto detallamos los cálculos que se realizaron en la práctica experimental y comparamos los resultados del controlador determinado experimentalmente con el controlador de la práctica teórica con la aplicación del Simulink y el SISO.

Basándonos en los datos de la figura 4.3.5.2., y aplicando la simulación del sistema del ajuste teórico con el experimental obtenemos la Respuesta de ambos sistemas y comparamos los tiempos de estabilidad del sistema, figura 4.3.5.3.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proyecto expuesto produjo una solución innovadora y de última tecnología, para el mejoramiento del laboratorio de Control Automático ya que el mismo servirá como práctica para los estudiantes.

Con la implementación de un sistema, la creación de un controlador digital virtual, y software que se encarga de la tarea controlar y comandar a la planta de control de nivel, convirtiéndose en una herramienta valiosa para el estudio de los sistemas de control e instrumentación Industrial.

El uso de tecnología de última generación en el campo de la adquisición de datos y programación, facilitó los estudios y cálculos necesarios para la implementación del sistema de control y se logró reemplazar dispositivos convencionales, demostrando que es posible, mediante software mejorar sistemas tradicionales y alcanzar alta confiabilidad y eficiencia.

El programa de control creado bajo Matlab, para el control de la planta, permitiendo un fácil acceso y manejo de las operaciones desde una computadora, se implementaron etapas de fuerza, un sensor para el control de la velocidad de la bomba que conforman el sistema, protecciones tanto para el programa como para los equipos, lo que se convirtió en un robusto sistema de adquisición y control.

Los controladores virtuales creados para la planta de control de nivel, con las mismas características matemáticas expuestas en las teorías de controladores, pero con la facilidad y permanencia de la calibración, que nos permite un software de computadora, nos provee de un satisfactorio control de los procesos del módulo.

El resultado del proyecto es un equipo dotado de las últimas tecnologías capaz de ser utilizado como una herramienta de estudio y experimentación en el campo de la automatización e instrumentación industrial. La aplicación de este tipo de tecnologías es amplia en la industria y debería ser más desarrollada en nuestro medio.

Al desarrollar las prácticas los estudiantes serán capaces de comparar la teoría revisada en el curso de Control Automático con lo que sucede en realidad.

Recomendaciones:

En base a los resultados obtenidos en este proyecto se podría pensar la posibilidad de aplicar este tipo de tecnologías en otros equipos y sistemas de los laboratorios de la FIEC, Incluso es posible seguir desarrollando aplicaciones para el módulo de nivel, como enlazarlo a la red informática de la facultad lo que permitiría controlar el módulo desde un salón de clase por ejemplo.

La planta no solo ofrece la posibilidad de ejecutar prácticas de calibración de controladores sino de una gama de instrumentos que se encuentran operando en el módulo, lo que podría ser aprovechado por los estudiantes de electrónica industrial.

También en un futuro se podría mejorar la planta, ya que además de hacerse el control de nivel, se podría desarrollar el control de caudal, teniendo con esto la necesidad de adquirir por parte de la FIEC un medidor de caudal.

ANEXOS

ANEXO A

Diseño Estructural

Cubo Superior del Tanque Principal

El tanque principal posee en la parte superior un cubo de vidrio, diseñado para ubicar el sensor ultrasónico del sistema, para obtener la mejor eficiencia de lectura de voltaje de salida del sensor respecto a la variación de nivel de agua en el tanque principal. La distancia entre la parte inferior del tanque principal y la cara superior del cubo es de 85 cm., y está en el rango de detección del sensor, y el rango de detección está dentro de la cobertura del cono de 8°.

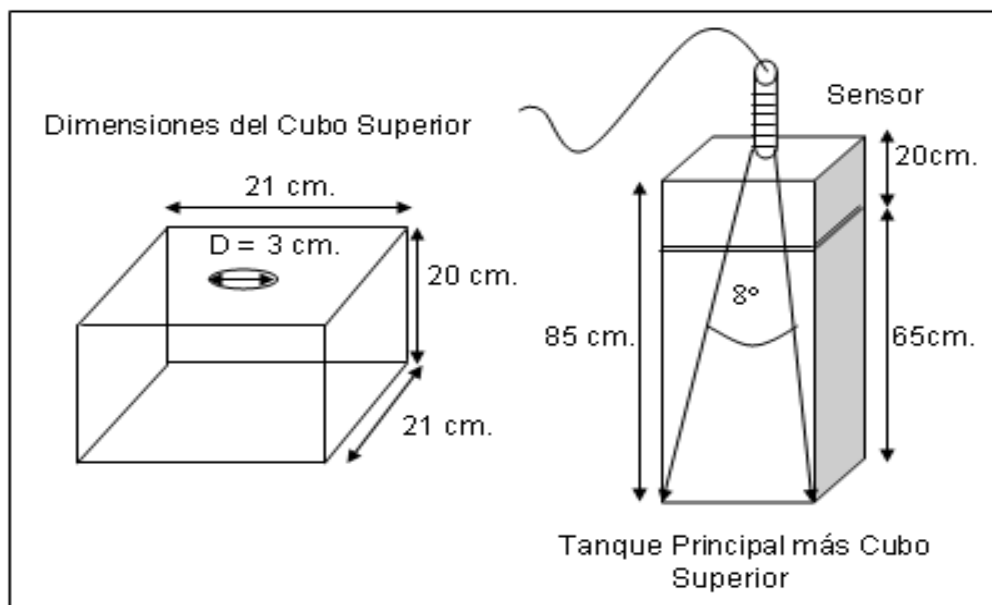
Las dimensiones del cubo superior del tanque principal son:

Ancho: 21 cm.

Alto: 20 cm.

Largo: 21 cm.

En la parte superior del cubo hicimos un orificio de diámetro de 3 cm., que es el diámetro del sensor. Este orificio se lo diseñó con el fin de introducir el sensor y por medio de los anillos que posee ajustarlo y colocarlo de una manera perpendicular, en una posición determinada para obtener la mejor lectura de voltaje de acuerdo al nivel del tanque principal desde la parte inferior que es de 1 cm. hasta la parte superior que es 60 cm. de nivel, ya que este es el rango de operación de nivel del tanque principal.



El sensor ultrasónico Boletín 873C tiene la capacidad de detectar objetos sólidos y líquidos desde una distancia de hasta 1 m (3.3 pies).

Sensor Ultrasónico 873C

El Boletín 873C viene en una de dos versiones: una unidad de supresión de fondo con salida de voltaje analógico o un modelo difuso estándar con una salida digital.

El modelo analógico proporciona un voltaje de salida que varía linealmente con la distancia del objeto y una función de supresión de fondo ajustable. Para muchas aplicaciones, tal como monitoreo del nivel de agua en un tanque, la tecnología ultrasónica permite que un solo dispositivo haga el trabajo que de otro modo requeriría múltiples sensores.



873C CC, tipo cable
30 mm
página 3-6

Especificaciones:

- Operación por 3 hilos.
- Conexión por 3 hilos.
- Voltaje de alimentación entre 18-30 V DC.
- Salida analógica entre 1V a 10V DC.
- Capacidad de detección de metales, no metales, sólidos o líquidos.

- Protección contra cortocircuito, impulsos falsos, inversión de polaridad, sobrecarga y ruido transitorio.
- Distancia de detección ajustable (modelo de salida digital/discreta).
- Supresión de fondo ajustable (modelo analógico).
- Marca CE para todas las directivas aplicables.

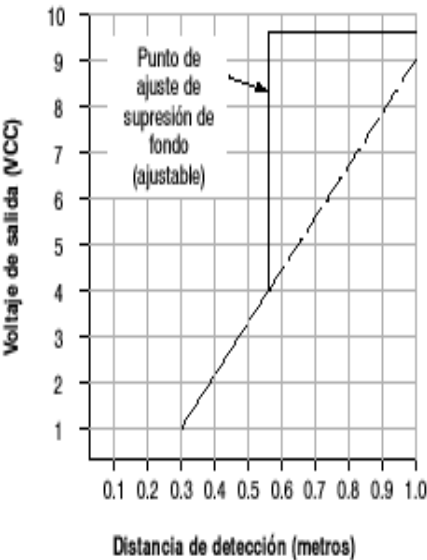
Consideraciones sobre el objeto:

Debido a que los sensores ultrasónicos dependen de una onda de sonido reflejada para una correcta operación, la forma, el material, la temperatura y la posición del objeto son importantes. Estos deben seleccionarse para devolver el eco más fuerte posible.

La forma ideal del objeto es una superficie lisa y plana. También pueden detectarse objetos redondos o dispares pero se reducirán las distancias de detección y/o los voltajes de salida analógica. El objeto debe estar cerca al eje del cuerpo del sensor para ser detectado porque el 873C emite pulsos ultra-sónicos en un cono de 8 grados. Los objetos deben estar dentro del alcance de este cono para reflejar los impulsos y activar el interruptor. La superficie del objeto también debe estar directamente frente al sensor para dar un eco apropiado. El sensor puede colocarse con precisión usando el indicador LED que se encuentra en su extremo, el cual se enciende con una intensidad proporcional a la fuerza del eco.

Simplemente coloque un objeto en el punto de detección deseado, luego ajuste la posición y ángulo del sensor para maximizar el brillo de los materiales suaves, tales como telas o caucho esponjoso, son difíciles de detectar por la tecnología ultrasónica porque no reflejan el sonido adecuadamente. Esto significa que los objetos que no son los que se desea detectar en el campo de detección pueden esconderse del sensor cubriéndolos con material absorbente de sonido y/o colocándolos de manera que sus ecos no sean reflejados hacia el sensor. Para una detección confiable, la temperatura del objeto debe ser de 100° C (212° F) o menor.

A continuación se describe las especificaciones y condiciones técnicas del sensor.



Especificaciones

Corriente de carga	Salida digital/discreta: ≤400 mA Salida analógica: ≤5 mA
Corriente mínima de carga	1 mA
Corriente de fuga	≤10 µA
Tensión de trabajo	18-30 VCC
Caída de tensión	≤2.4 V
Tensión de salida analógica	1-10 VCC
Repetibilidad	±5 mm en dirección axial
Histeresis	±15 mm típico
Frecuencia ultrasónica	200 kHz
Ángulo cono imp. ultrasón.	8° (ángulo completo)
Protecciones	Pulsos falsos, fenómenos transi., inv. de pol.d, cortocircuito, sobrecarga
Homologaciones	Marca CE para todas las directivas aplicables
Envoltorio	NEMA 12 y IP65 (IEC 529) Cuerpo de latón niquelado con cara de plástico
Conexión	Cable: 2 m (6.5 pies) de longitud 3 hilos PVC
Indicador LED	Modelo digital: Salida energizada Modelo analógico: Eco detectado
Temperatura de operación	-10 °C a +60 °C (+14 °F a +140 °F)
Choques y vibraciones	30 g, 10-55 Hz

En las características técnicas del sensor ultrasónico, viene especificado la conexión de cableado de energía, para la alimentación de voltaje y la obtención de voltaje de salida que proporciona el sensor.

Sensores ultrasónicos

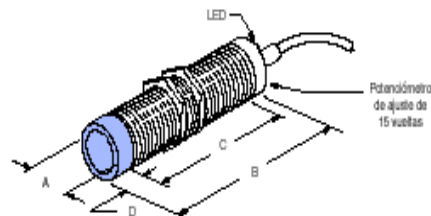
873C 3 hilos CC, tipo cable

Cara activa de plástico/cuerpo roscado de latón niquelado

Guía de selección

Diámetro del cilindro	Distancia de detección nominal mm (pulgadas)	Configuración de salida		Frecuencia de conmutación (Hz)	Número de catálogo
		Análogica	PNP		
50 mm	900 (11.81) a 1000 (50.37)	N.A. digital	PNP	5	873C-DDAV1000E2
					873C-DDNP1000E2

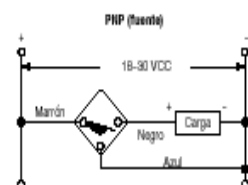
Dimensiones—mm (pulgadas)



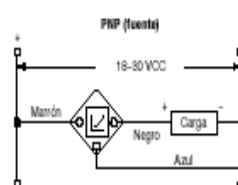
Tamaño de la rosca	mm (pulgadas)			
	A	B	C	D
M80 X 1.5	80.0 (1.18)	117.0 (4.61)	95.0 (3.74)	12.0 (0.47)

Diagrama de cableado

Digital discreta normalmente abierta



Análogica



Accesorios

Descripción	Número de página
Cajas de terminales	5-19
Soportes de montaje	2-188 - 2-192
Tuercas de montaje adicionales	2-190 - 2-200

Bomba Flojet

La bomba de diafragma FLOJET 4405-143 SERIES, con número de serie: 04F13728; combinan un gran número de características que las hacen

particularmente apropiadas para un amplio rango de aplicaciones industriales y no industriales.

La bomba se puede colocar hasta un metro sobre el nivel del agua, no habrá problemas con el aire: puede bombear líquidos que contengan aire. Pueden trabajar en seco durante largos períodos sin daño alguno. Esto simplifica la instalación y elimina el coste de la colocación de sondas o boyas de nivel.

La cámara de impulsión esta completamente aislada del motor. Esto permite el bombeo de líquidos tóxicos o abrasivos con el mínimo riesgo de fugas. La presencia de pequeñas partículas ajenas al agua no hace que la bomba sufra gasto interno ni pérdida de presión o flujo.

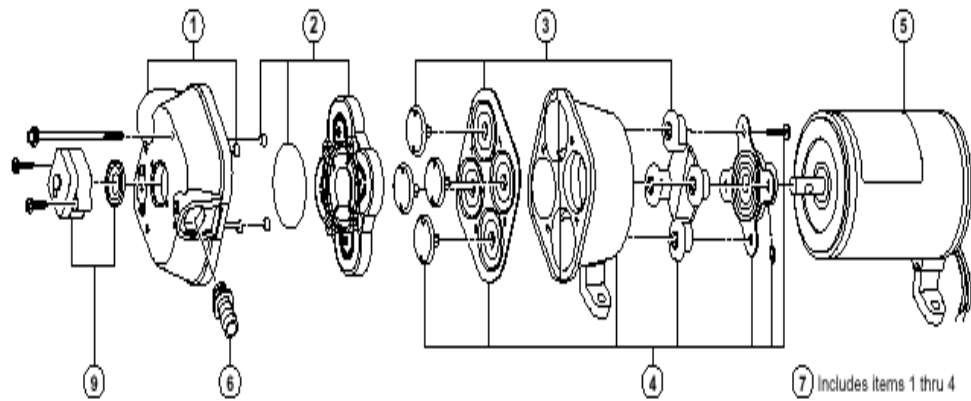
La Bomba flojet es de reducido tamaño y pequeños consumos, adecuadas para desarrollar presiones notablemente altas con caudales modestos.

Aplicaciones:

Embarcaciones marinas, energía solar, casas de campo como pequeño grupo de presión hidro-neumático, vaciado y llenado de depósitos, para proyectos didácticos de manejo de bajos caudales, etc.

Motor:

Posee un motor de imán permanente de presión circular.



Un motor de corriente continua está compuesto de un estator y un rotor, en muchos motores c.c., generalmente los más pequeños, el estator está compuesto de imanes para crear un campo magnético. En motores c.c. más grandes este campo magnético se logra con devanados de excitación de campo.

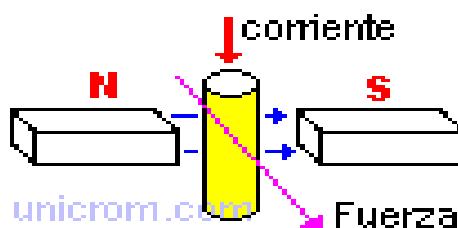
El rotor es el dispositivo que gira en el centro del motor y está compuesto de arrollados de cable conductores de corriente continua, esta corriente continua es suministrada al rotor por medio de las "escobillas" generalmente fabricadas de carbón.

Nota: un devanado es un arrollado compuesto de cables conductores que tiene un propósito específico dentro de un motor.

Principio básico de funcionamiento:

Cuando un conductor por el que fluye una corriente continua es colocado bajo la influencia de un campo magnético, se induce sobre él (el conductor) una fuerza que es perpendicular tanto a las líneas de campo magnético como al sentido del flujo de la corriente. Ver la figura en la parte inferior.

- Campo magnético en azul.
- Corriente continua en rojo.
- Dirección de la fuerza en violeta.
- Imanes: N (norte) y S (sur).



Para que se entienda mejor, ver como se tiene que colocar este conductor con respecto al eje de rotación del rotor para que exista movimiento.

En este caso la corriente por el conductor fluye introduciéndose.

- Par motor en azul.
- Fuerza en violeta.
- Conductor con corriente entrante en el gráfico azul y rojo.
- Imanes: N (norte) y S (sur).

Pero en el rotor de un motor cc no hay solamente un conductor sino muchos. Si se incluye otro conductor exactamente al otro lado del rotor y con la corriente fluyendo en el mismo sentido, el motor no girará pues las dos fuerzas ejercidas para el giro del motor se cancelan.



Es por esta razón que las corrientes que circulan por conductores opuestos deben tener sentidos de circulación opuestos.

Si se hace lo anterior el motor girará por la suma de la fuerza ejercida en los dos conductores. Para controlar el sentido del flujo de la corriente en los conductores se usa un conmutador que realiza la inversión del sentido de la corriente cuando el conductor pasa por la línea muerta del campo magnético.

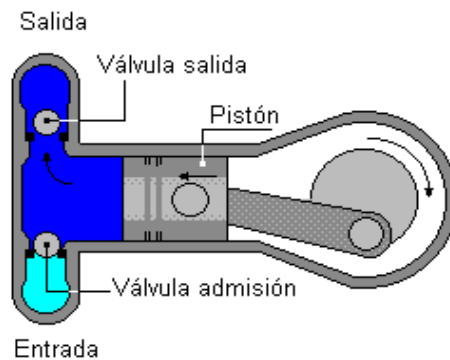
La fuerza con la que el motor gira (el par motor) es proporcional a la corriente que hay por los conductores. A mayor tensión, mayor corriente y mayor par motor.

Características:

- Incorporan presostato (variador de presión) regulable entre 1÷1,9 bar (paro-marcha).
- Temperatura máx. del fluido: 55 °C.
- Autocebante 1,5 m.c.a.
- Internamente está constituido por 4 diafragma.

La bomba Flojet internamente está constituida por un motor de imán permanente más un diafragma. Ocasionalmente, las bombas están provistas de un diafragma flexible reciprocante en vez de un émbolo o pistón reciprocante, con lo cual se elimina la fricción y las fugas en el punto donde el émbolo atraviesa la caja de empaque. Un ejemplo de esta bomba queda ilustrado en la figura en la cual el movimiento del diafragma es obtenido mediante una cama excéntrica y una palanca; las válvulas de succión y de descarga trabajan en forma ordinaria. Tales bombas son muy comunes en la actualidad para levantar combustible de los tanques posteriores de los automóviles a los carburadores de los mismos.

La bomba Flojet seleccionada posee un pistón en el diafragma como se muestra en la figura de la página siguiente.



Materiales:

Membrana y válvulas: Neopreno sanitario, sobre demanda vitón para este tipo de bomba.

- Cuerpo: Polipropileno
- Juntas: Neopreno y nitrilo.

Tensiones disponibles:

Se aplica voltaje de 12 V DC y 24 V DC, según el modelo de la bomba flojet, y en nuestro caso utiliza 12V DC.

Dimensiones:

- Ancho: 10 cm.
- Alto: 9.2 cm.
- Longitud: 20.3 cm.
- Aspiración-Impulsión: 3/8" NPT.
- Peso: 1,7 Kg.



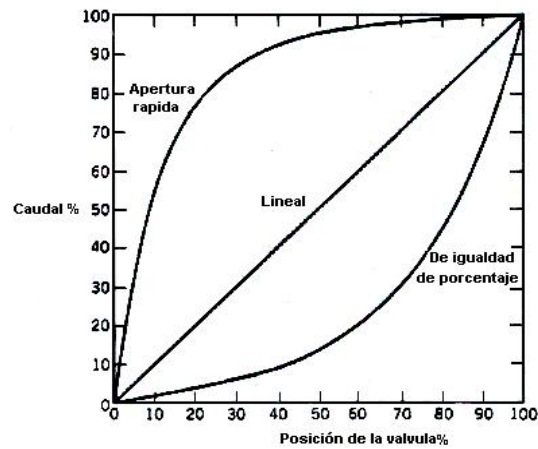
Válvulas

En nuestro sistema seleccionamos una válvula de compuerta porque es la que tiene mejor linealidad a diferentes aberturas de la válvula respecto a su caudal de salida.

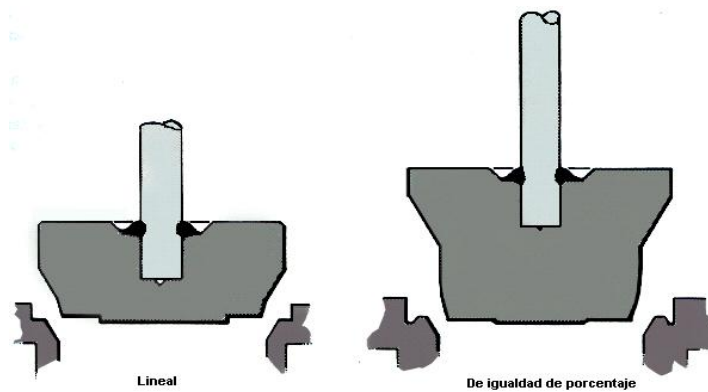
La característica de flujo de la válvula se define como la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de la misma conforme varía la posición de 0% a 100%. Se debe distinguir entre la "característica de flujo inherente" y la "característica de flujo en instalación".

La primera se refiere a la característica que se observa cuando existe una caída de presión constante a través de la válvula. La segunda se refiere a la característica que se observa cuando la válvula está en servicio y hay variaciones en la caída de presión, así como otros cambios en el sistema. Primero se abordará la característica de flujo inherente.

Se muestran tres de las curvas más comunes de característica de flujo inherente. La forma de la curva se logra mediante el contorno de la superficie del émbolo cuando pasa cerca del asiento de la válvula.



Se muestra el émbolo típico para la válvula lineal y la de porcentaje igual.



La característica de flujo lineal produce un flujo directamente proporcional al desplazamiento de la válvula, o posición de la válvula; con un 50% de desplazamiento, el flujo es el 50% del flujo máximo.

La característica de flujo de porcentaje igual produce un cambio muy pequeño en el flujo al inicio del desplazamiento de la válvula, pero conforme

éste se abre hasta la posición de abertura máxima, el flujo aumenta considerablemente.

El término porcentaje igual proviene del hecho de que, para incrementos iguales en el desplazamiento de la válvula, el cambio de flujo respecto al desplazamiento de la válvula es un porcentaje constante de la tasa de flujo en el momento del cambio.

Nuestro sistema está constituido por válvulas de compuerta y ENCENDIDO/APAGADO de $\frac{1}{2}$ pulgadas cada una. Mediante la elección de la correcta personalidad de la válvula, se puede lograr que se reduzcan las características no lineales del proceso; si esto se hace de manera correcta, se puede conseguir que la válvula tenga una ganancia constante.

La personalidad de la válvula se conoce comúnmente como la característica de flujo de la válvula y, por tanto, se puede decir que el propósito de la caracterización del flujo es obtener en el proceso completo una ganancia relativamente constante para la mayoría de las condiciones de operación del proceso. En nuestro sistema seleccionamos una válvula de compuerta porque es la que tiene mejor linealidad a diferentes aberturas de la válvula respecto a su caudal de salida.

La característica de flujo de la válvula se define como la relación entre el flujo a través de la válvula y la posición de la misma conforme varía la posición de 0% a 100%. Se debe distinguir entre la "característica de flujo inherente" y la "característica de flujo en instalación".

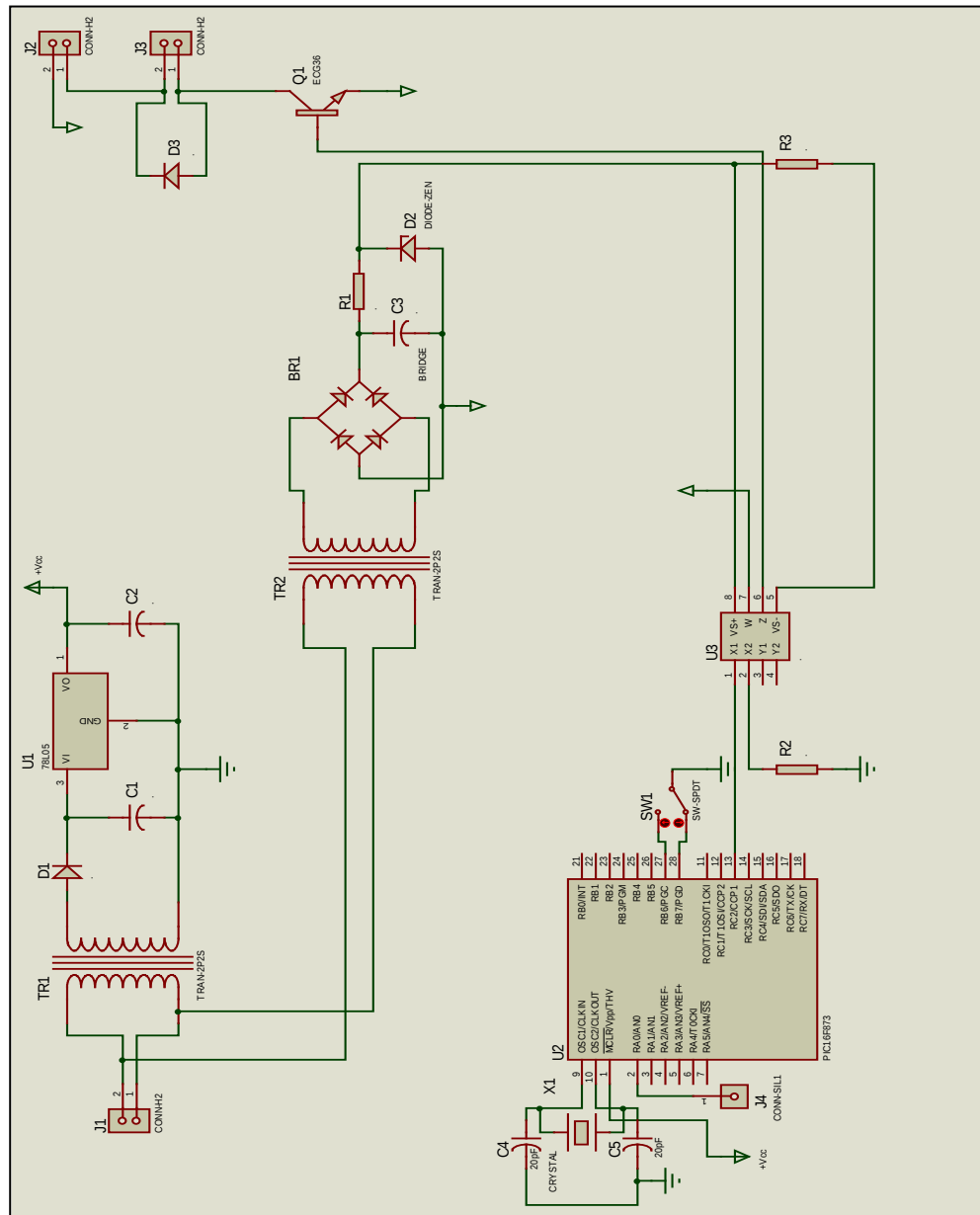
La primera se refiere a la característica que se observa cuando existe una caída de presión constante a través de la válvula. La segunda se refiere a la característica que se observa cuando la válvula está en servicio y hay variaciones en la caída de presión, así como otros cambios en el sistema.

Diagrama Eléctrico de fuerza del proyecto.

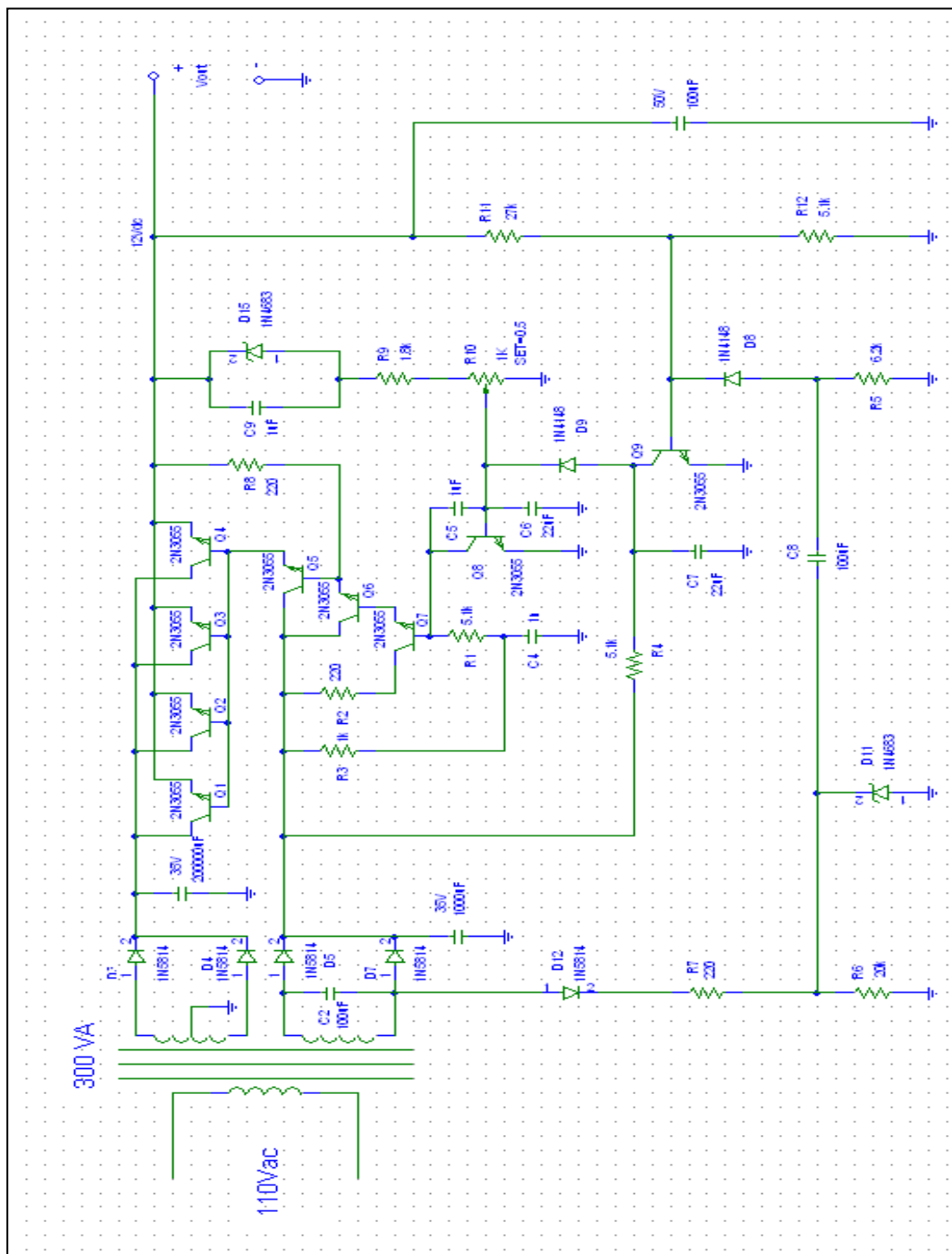
El proyecto consta e ciertos circuitos eléctricos de fuerza que nos han permitido controlar el sistema y poder manejar corrientes de hasta 10 amperios. A continuación enlistaremos los circuitos de fuerza que encontramos dentro de la tesis.

Fuente de poder de la Bomba DC.

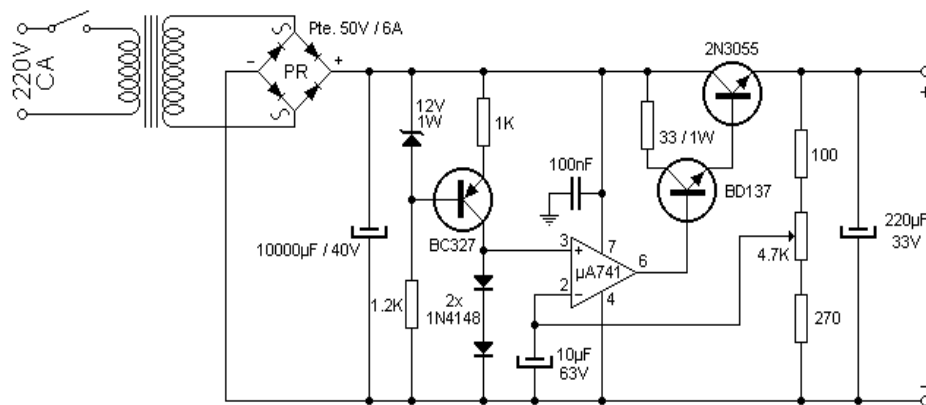
Mostramos el circuito esquemático en la página siguiente de la etapa amplificadora de la bomba DC.



Mostramos el circuito esquemático del diseño de la fuente de la etapa amplificadora, que soporta una carga de corriente de 10 A como máximo.



Fuente alimentación regulable 25V 1A



La figura, que observamos es el circuito esquemático de la fuente de alimentación variable del sensor y esta fuente es capaz de suministrar suficiente tensión y corriente como para permitir funcionar al sensor en los parámetros establecidos.

Como se observa en el circuito se puede decir que consta de tres etapas. La primera (formada por el transformador, el puente rectificador y el condensador electrolítico de 10000 µF) se encarga de aislar y reducir la tensión de red, rectificar y filtrar. La segunda etapa (formada por el transistor de **BC327**, el circuito integrado y los componentes anexos) se encarga de proporcionar una tensión de referencia la cual será empleada para determinar, junto con el potenciómetro y sus resistencias de tope, la tensión

a aplicar sobre el transistor driver (manejador) y éste sobre el de potencia. La tercera etapa (formada por los transistores **BD137** y **2N3055**) se encarga de dejar pasar la corriente en forma controlada, por así decirlo, haciendo las veces de reguladores serie.

Cabe aclarar que éstos efectúan una regulación resistiva y no conmutada (switching) por lo que la tensión en el emisor no es pulsante. Luego tenemos un pequeño filtro de salida formado por el condensador electrolítico y los bornes.

El transformador debe proporcionar una tensión de 25V con una capacidad de corriente de 1A y la tensión de su primario deberá ser escogida de acuerdo a la red eléctrica y en nuestro caso de 110V AC. El transistor **2N3055** deberá estar montado sobre un buen radiador de calor, mientras que para el **BD137** bastará con un radiador del tipo clip. El condensador de 100 nF, conectado en paralelo con la alimentación del **LM741** deberá estar lo mas próximo posible a éste para optimizar el filtrado de la fuente.

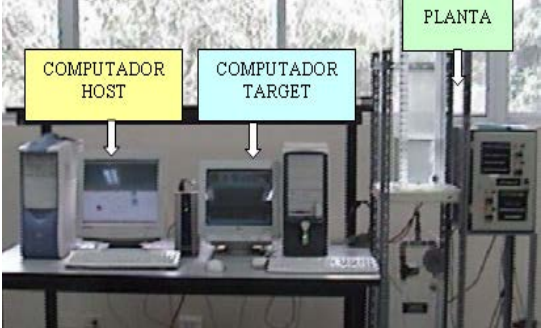
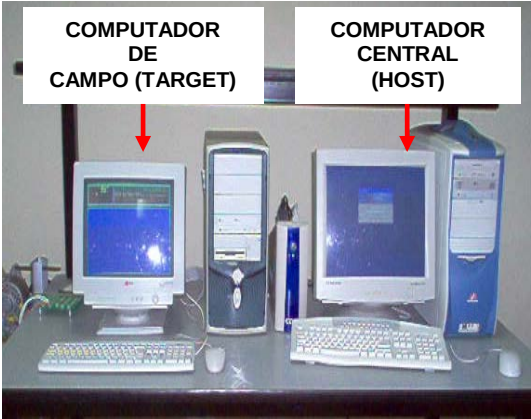
Recuerde que la actual salida ingresa al terminal negativo del instrumento y el terminal positivo del instrumento representa la nueva salida. Si en alguno de los medidores (o en ambos) optase por colocar instrumental electrónico (que requiera alimentación) ésta deberá ser tomada siguiendo el siguiente

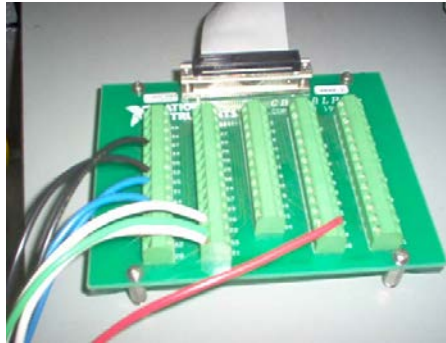
esquema teórico: a la salida del transformador colocar un pequeño puente de diodos con capacidad para 1A. Filtrar la continua resultante con un electrolítico de 4700 μ F y con un cerámico de 100 nF. Colocar un regulador de tensión en serie de la línea **78xx** de acuerdo a la tensión requerida por el o los instrumentos. Es aconsejable, a la salida del regulador de tensión, colocar otro condensador cerámico de 100 nF en paralelo para filtrar el posible rizado que genere el circuito regulador. Si bien era más fácil colocar un regulador a la salida del puente rectificador de potencia; si la fuente fuese cargada al límite de su capacidad el puente entraría en calor, haciendo caer ligeramente la tensión continua y esto puede afectar la operación de los instrumentos. Recordad que la mayoría de estos instrumentos utilizan tensiones de referencia que cogen desde la línea de alimentación y no desde la vía a medir.

Activación de la válvula ENCENDIDO/APAGADO.

Nuestra planta consta de una válvula solenoide la cual se activa con 110 voltios, cuya activación se lo realiza por medio de un switch el cual se encuentra en el panel de control de la planta.

En este anexo realizaremos un registro fotográfico de todas las partes del sistema, para el fácil reconocimiento de los próximos usuarios.

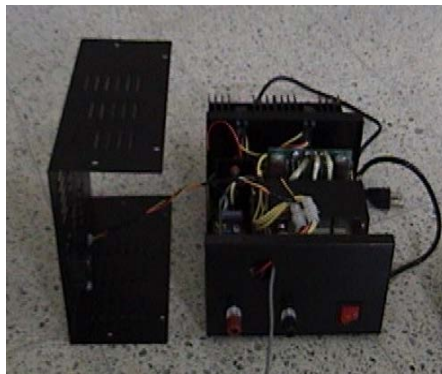
EQUIPO	DESCRIPCIÓN
	Lo que se observa es el proyecto completo que consta de: dos computadores, un juego de borneras, el sistema físico.
	El sistema lógico consta de dos computadores. En el computador del lado derecho es donde se encuentra el sistema lógico y está encargado de controlar todo el proyecto. El computador del lado izquierdo el computador de campo, quién toma los datos de campo y los envía por vía de TCP/IP al computador central.



Tarjeta y borneras que permite conectar las señales de campo hacia el computador, se comunica con el computador por un bus de datos de 25 hilos, hacia la tarjeta Pc – Target.

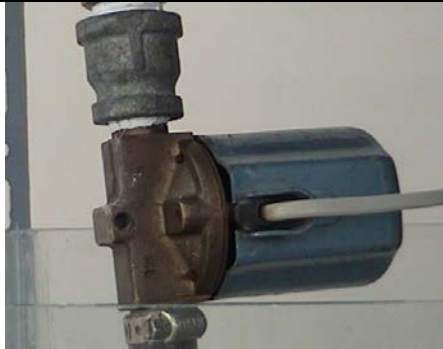


Sensor ultrasónico, el cual hace posible la conversión de nivel de líquido en el tanque a una señal analógica.



Etapas de poder, y amplificador la cual hace posible encender la bomba DC a 12 voltios desde el Host Pc.

Válvula encendido/apagado la que nos permite desarrollar



la perturbación del sistema.



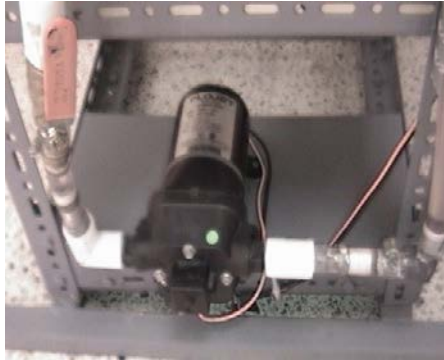
Válvula de compuerta, la misma que se puede regular la abertura, por la cual sale el líquido, y desarrollar la perturbación.



Fuente regulable, para el encendido del sensor ultrasónico.



Panel de control, donde consta el cableado para el control de la planta, monitoreo, toma de mediciones.



Bomba DC de 12 voltios, que hace fluir el agua desde el tanque de suministro al tanque de principal.



Tanque principal, donde se hace el control de nivel de agua.

Estos son los equipos y elementos que trabajan en nuestro proyecto, las características físicas de cada uno y el funcionamiento global del sistema se encuentra en el capítulo 1.

ANEXO B

Matlab & Simulink

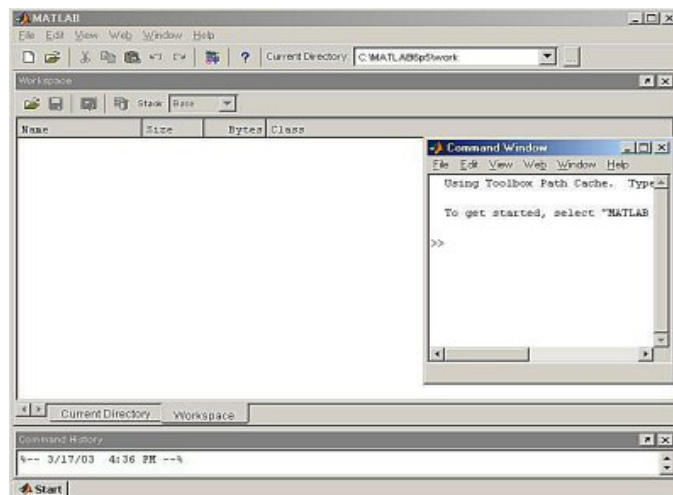
MATLAB

Matlab significa en inglés Matrix Laboratory fue inicialmente concebido para proporcionar fácil acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial. Éste programa fue creado para trabajar principalmente con matrices aunque también permite la posibilidad de trabajar con números reales y complejos.

A Matlab se le puede considerar como un lenguaje de programación (como C++) enfocado hacia el análisis numérico y matemático, y cuenta con características muy especiales como por ejemplo: la continuidad entre valores enteros, reales y complejos. Lo anterior significa que no hay necesidad de declarar las variables antes de ser utilizadas, ya que todas son tratadas por igual. También la biblioteca de funciones que está incluida con

MatLab es mucho más amplia que la de cualquier otro lenguaje de programación; incluye abundantes herramientas gráficas, incluido una GUI y también se puede vincular con otros lenguajes de programación: Todo lo anterior son sólo algunas de las características de MatLab.

Ha llegado el momento de iniciar el Matlab en su ordenador. Observará una pantalla similar a la siguiente (esta pantalla puede variar un poco dependiendo de la versión):



En la figura superior, se pueden observar los siguientes elementos:

La ventana del área de trabajo (workspace): en ella se muestran las variables con las que estamos trabajando actualmente. Esta ventana tiene en su parte inferior una pestaña llamada directorio actual (Current Directory) que nos mostrará nuestro directorio actual de trabajo y los archivos que contiene.

La ventana del historial de comandos (command history): es la ventana en la cual se almacenan los comandos que hemos introducido de manera cronológica.

La ventana de comandos (command window): es por medio de la cual introducimos los datos y observamos los resultados. Cuando se muestra el símbolo " » " en esta ventana, significa que el programa está listo para que empecemos a introducir comandos.

Siendo MatLab la plataforma de trabajo se ha utilizado el **Simulink** para poder realizar las simulaciones por medio de diagrama de bloque.

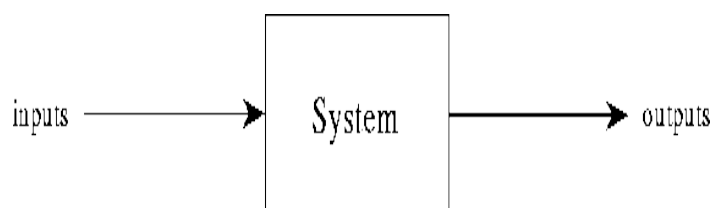
SIMULINK

Es una extensión de MATLAB que usa una interfaz manejo de icono para la construcción de una representación de diagrama de bloque de un proceso.

Un diagrama del bloque simplemente es una representación gráfica de un proceso (qué está compuesto de una entrada, el sistema, y un rendimiento).

Típicamente, MATLAB se usa para resolver ecuaciones diferencial ordinarias lineal y no lineal.

Una de las razones por qué MATLAB es relativamente fácil usar, es que los “elementos de solución de la ecuación” se proporciona para nosotros, y nosotros accedemos a éstos a través de una interfaz de línea de orden (CLI); sin embargo, SIMULINK usa una interfaz del usuario gráfica (GUI) que nos ayuda a resolver las simulaciones de un proceso.



En lugar de que se codifique en MATLAB, nosotros conectamos simplemente “los iconos” juntos para construir el diagrama del bloque. El “los iconos” representa las posibles entradas al sistema, las partes de los sistemas, o rendimientos del sistema.

SIMULINK le permite al usuario simular los sistemas fácilmente de lineal y nonlinear, las ecuaciones del diferencial ordinarias.

La simulación dinámica empaqueta (como MATLAB, SIMULINK, etc.) está usándose cada vez más frecuentemente en las industrias del proceso químicas para la simulación del proceso y plan de sistema de mando.

SIMULINK trabaja bajo programación de iconos (programación orientada a objetos) lo cuál permite una simulación dinámica al usuario, realizando una representación de diagrama de bloque de un proceso.

Las secciones del diagrama del bloque son representadas por iconos que están disponible en varias "ventanas" que el usuario abre (a través del pulsar el botón doble en el icono).

El diagrama del bloque está compuesto de iconos que representan secciones diferentes del proceso (las entradas, modelos del estado-espacio, funciones de transferencia, rendimientos, etc.) y conexiones entre los iconos (qué se hace dibujando una línea que conecta los iconos).

Una vez el diagrama del bloque es construido, uno tiene que especificar los parámetros en los varios bloques, por ejemplo la ganancia de una función del traslado.

Para usar SIMULINK el estudiante debe comenzar una sesión de MATLAB (pulse el botón en el botón de MATLAB).

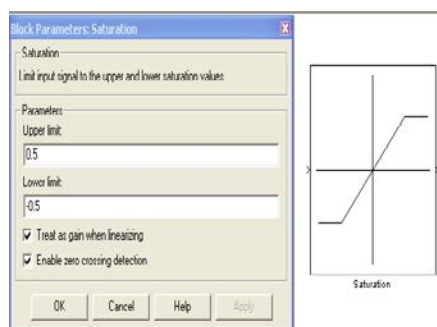
Una vez MATLAB ha puesto en marcha, se puede escribir simulink (letras minúsculas) en la línea de comando de MATLAB seguido por ENTER;

también puede dar click directo en el icono de Simulink que se encuentra en la barra superior de trabajo de MATLAB.

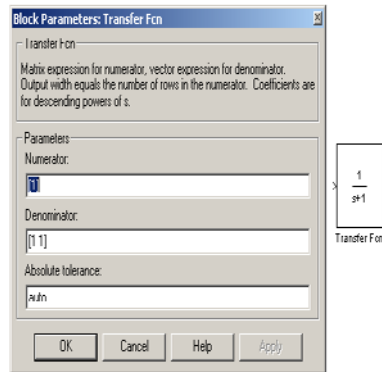
Una ventana de SIMULINK debe aparecer brevemente, con los iconos siguientes: Fuentes, Fregaderos, Discreto, Lineal, Nonlinear, Conexiones, los Extras (dependerá si existe más ventana de la versión del programa).

Después se va al menú archivo, en esta ventana se escoge Nuevo para empezar construyendo la representación de diagrama de bloque del sistema de interés.

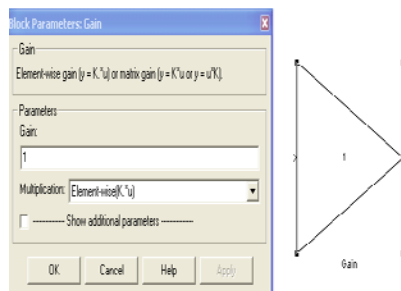
Acontinuación detallaremos cada icono utilizado en nuestro diagrama de bloque, espeificando su funcionamiento y principal parámetro de control.



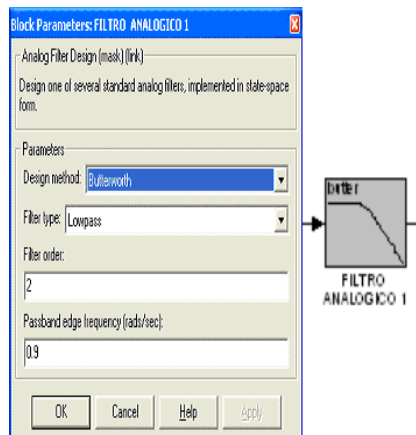
Saturation: Es usado con la finalidad que la salida no sea superior e inferior a los valores pre – establecidos. Los parámetros principales de configuración de este bloque son: límite superior y límite inferior que son los máximos valores permitidos de salida.



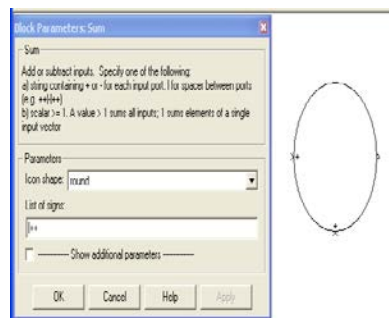
Transfer Fcn: Este bloque nos facilita una Función de transferencia con una ganancia K y un polo. Los parámetros principales de este bloque son la ganancia del numerador K, y los dos valores del denominador que selecciona la posición del polo. Este bloque ha sido utilizado en la tesis con dos finalidad: controlador PI y filtro de señales de entrada.



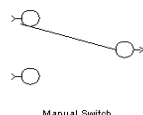
Gain: Este bloque multiplica la señal del entrada por el valor que haya sido predeterminado. El parámetro principal de este bloque es la ganancia que puede ser: positiva, negativa o quebrados. En la tesis es utilizada en muchos casos como: adaptación de señales, amplificaciones de señales, conversiones y ajustes.



Analog Filter Design: Este bloque tiene similar característica Transfer Fcn, trabaja como un filtro, pero tiene una característica especial que es un filtro analógico Butterworth de segundo orden, y es pasabajo (Lowpass). Este bloque es utilizado con la finalidad de eliminar ruidos de baja frecuencia en las señales de entrada y salida del sistema, como la del sensor y la del amplificador de voltaje DC a DC de la bomba.



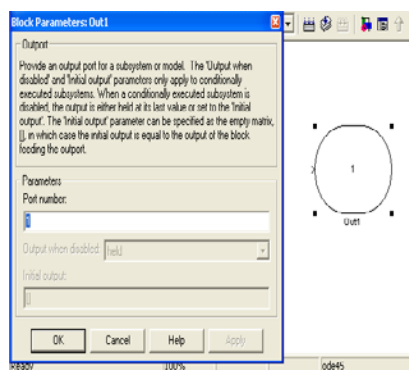
Sum: El bloque sum es usado para sumar dos señales. Su principal parámetro de modificación es la cantidad de sumatorias que se desea, esto se especifica colocando la cantidad de signos + (más) como sumando se tenga dentro del sistema; también se puede colocar signos - (menos). En la tesis es utilizado como sumador y comparador.



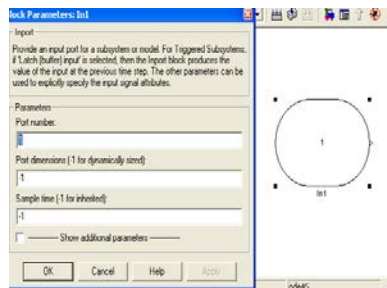
Switch: Este es un selector de señales manual, elige entre dos señales y el cambio

se realiza dando doble clic sobre el mismo on – line. No tiene parámetros de modificación y es usado en la tesis para seleccionar entre manual y automático.

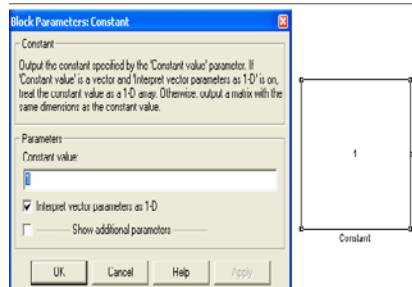
Output: Es un puerto de salida muy utilizado para realizar bloques de agrupaciones. El puerto de salida siempre trabaja junto con un puerto de entrada en los bloques de agrupación y el parámetro a modificarse es precisamente el número del puerto.



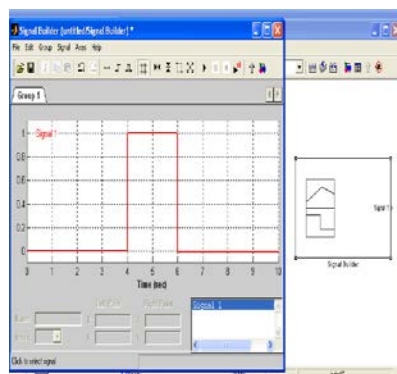
Inport: Es una entrada para sub – subsistema y modelos, es el complemento del output y es usado en nuestra tesis en los bloques de agrupación. Su parámetro de modificación principal es el número del puerto.

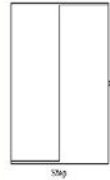
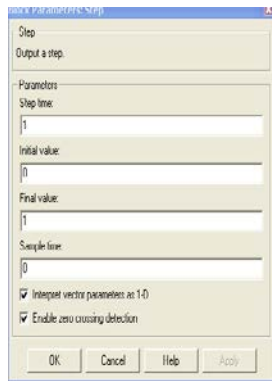


Constant: Este bloque entrega un valor constante que puede ser utilizada en cualquier operación matemática o como valores especificados de algún sistema. Su principal parámetro de modificación es el valor de la constante que puede ser cualquier número real. En nuestra tesis es el nivel ingresado en centímetros.

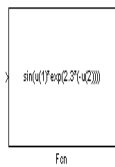
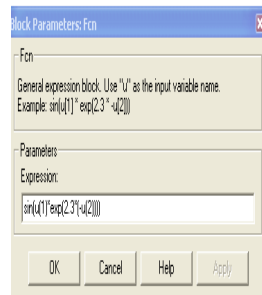


Signal Builder: Este es un constructor de señales, es muy utilizado para simular perturbaciones, variando tiempo y amplitud de la perturbación. Su parámetro principal es la curva de señal que se puede construir con la ventana de ayuda que se muestra junto al bloque donde se define tiempo y amplitud de la perturbación. En la tesis es usada para simular una perturbación con la finalidad de poder obtener la función de transferencia del sistema bajo variación del mismo.

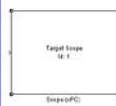




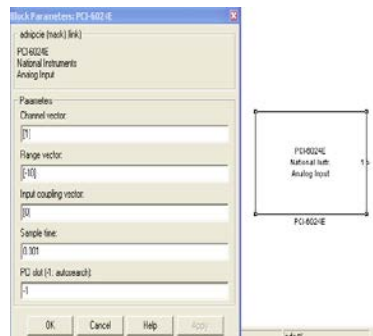
Step: Este bloque envía una señal tipo escalón. Sus parámetros principales de modificación son: el tiempo de ingreso de la señal y la amplitud del mismo (valor máximo y valor mínimo). Es usado también como perturbación pero de un sólo paso.



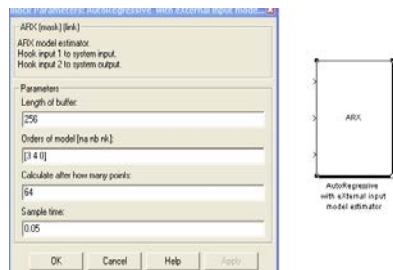
Fcn: Este bloque es utilizado para escribir funciones matemáticas, el cuál toma como valor de la variable la señal que ingresa al bloque. El parámetro principal de modificación es la función, que puede ser cualquier (incluso trigonométricas) y es usada dentro de la tesis para realizar conversión de señales.



Slope: El bloque del Osciloscopio, nos permite visualizar una señal de Simulink. Los parámetros principales de modificación son: forma de presentar la señal, número de muestra tomadas, modo de disparo.



PCI-6024E: Este bloque simula la tarjeta de ingreso y salida de señales National Instrument 6024E. Por medio de este bloque se realiza la interface de entrada y salida de señales entre Simulink y el sistema físico. Sus principales parámetros son el canal o puerto y el rango de trabajo.



ARX: Este bloque nos permite identificar la función de transferencia de un sistema, tomando datos de entrada y salida del mismo al momento de variaciones de la variable de control. El bloque es el método por auto – regresión, obteniéndose la función de transferencia y el ruido del sistema.

Adjunto encontrará unas tablas que les permitirá conocer los bloques que se encuentran dentro de la librería de Simulink, este listado puede variar dependiendo de la versión del programa que se esté utilizando y de la licencia que se haya comprado.

ANEXO C

Herramientas de Matlab

El programa de MATLAB, posee varias funciones elementales para el desarrollo y análisis de procesos de control en tiempo real y no real. Las funciones que nos proporciona el MATLAB son: el xPC Target, Real Time Workshop, y el C Compiler.

xPC Target

El xPC Target es una solución para el control de procesos y plantas, probando, y desplegando sistemas en tiempo-real, que usan el hardware de PC normal. Es un ambiente que utiliza un Target PC (computador de aplicación o remoto), controlado desde un Host PC (computador administrador o controlador), para ejecutar las aplicaciones en tiempo-real.

En este ambiente usted usa su computadora de escritorio como un Host PC con MATLAB, Simulink.

Después de crear su modelo, usted puede ejecutar las simulaciones en tiempo no real.

El xPC Target permite agregar bloques de entrada y salida a su modelo y entonces usa el Host PC con el Time-Real del Workshop (opción de ejecución en Tiempo-Real) y un compilador de C/C++ (lenguaje de programación) para crear el código ejecutable. El código ejecutable se transmite o descarga desde el Host PC al Target PC, que ejecuta el xPC kernel (esencia del xPC) del Tiempo-Real Target. Después de transmitir el código ejecutable, usted puede correr y probar su aplicación Target en el tiempo real:

Requisitos del hardware: el software del xPC Target requiere un Host PC, un Target PC, y, para la habilitación de entradas y salidas, el Target PC debe tener conectado y habilitado el Bloque conector CB-68LP con la tabla característica de las borneras de conexión. Sin embargo, el Target PC puede ser un PC de escritorio normal, PC industrial, PC/104, PC/104+, o computadora de Compact PCI.

Requisitos del software: el software del xPC Target requiere el compilador de C/C++ Visual a un Microsoft (Versión 5.0, 6.0, o 7.0) o un Watcom compilador de C/C++ (la Versión 10.6 o 11.0). Además, el xPC Target requiere MATLAB, Simulink, y el Workshop de Tiempo-Real.

Características del xPC Target

El ambiente del software del xPC Target incluye muchas características para el control de planta, test, y desplegar los sistemas en tiempo-real.

Este punto incluye los temas siguientes:

El Kernel (software que administra y descarga la aplicación Target) del Real-Time BIOS, BIOS-extensión, kernel, y cargador.

La Aplicación del modelo en Tiempo-Real de Memoria y tiempo de ejecución de tarea (task).

Adquisición de señal: monitoreo de señal, señal que registra el Workspace (ventana de ejecución) de MATLAB, y trazado de señal en el Host PC o en la pantalla del Target PC.

Cambio de parámetros en tiempo real o tuning: Cuando se ejecuta la simulación del sistema, se puede variar los parámetros, las escrituras interactivas y procedimientos del sistema con esta opción.

Aplicación del Real-Time o Tiempo-Real: el Workshop del Tiempo-Real, el Workshop de Real-Time, el xPC Target, y un compilador de C, crean una aplicación de Tiempo-Real (Aplicación Target) desde Simulink.

Las aplicaciones Target crearon ejecutar en un PC normal sin usar un sistema operativo de Windows, solo con la utilización del Workshop y el xPC Target en Tiempo-Real ejecutar la Aplicación Target.

La Aplicación Target en el tiempo real en el Target PC tiene las siguientes características:

Modelo de memoria: la aplicación Target se compila la aplicación como un Windows NT con el modelo de memoria plana. Este ejecutable se convierte entonces a una imagen conveniente para el xPC Target, y proporciona totalmente 32-bit de poder sin consumir tiempo, el segmento de 16-bit que cambia y extiende el DOS (Sistema Operativo de Microsoft).

Además no confía en el DOS o cualquier otro sistema operativo de Microsoft.

Tiempo de ejecución de tarea: la aplicación Target posee una gran velocidad para la ejecución de tarea del tiempo-real.

Un diagrama de bloque pequeño puede correr con un tiempo de la muestra tan rápido como 10 μ s (100 kHz), el tamaño del modelo, complejidad, y el hardware del Target PC afectan la velocidad máxima (el tiempo de la muestra mínimo) de ejecución.

El Ambiente del hardware: consiste de un computador Host, la computadora Target, la entrada y salida del bloque conector en la computadora Target, y un cable serial o conexión de la red entre el Host y las computadoras Target, apoyados por el xPC Target ayudarán que usted prepare un ambiente de desarrollo que satisface sus necesidades.

Computador Host.

Usted puede usar cualquier PC que ejecuta una plataforma de Microsoft Windows apoyado por MathWorks como el Host PC.

También debe contener una disquetera de 3.5 pulgada, y un puerto serial libre o una tarjeta Ethernet de red.

El Host PC puede ser uno de lo siguientes PC: un PC de escritorio o un PC de notas.

El Host PC normalmente es su computadora de escritorio donde usted instala MATLAB, Simulink, Workshop de Tiempo-Real, el xPC Target, y la opción xPC Target Embedded. Una computadora de notas también es un Host PC viable.

Requisitos del software para el Host PC:

La tabla siguiente lista el mínimo software requerido para el xPC Target sobre su Host PC.

SFTWARE	DESCRIPCIÓN
Sistema de Operación: MATLAB, Simulink, Real Time Workshop	Plataforma de Microsoft Windows, suministrado por MathWorks MATLAB versión 7.0.1 Simulink Versión 6.1
Lenguaje C como compilador.	Microsoft Visual C/C++ Versión profesional 5.0, 6.0 o 7.0. Watcom C/C++ Versión 11.0.
xPC Target.	xPC Target Versión 2.6.1.

Requisitos del hardware para el Host PC:

La tabla siguiente lista los recursos mínimos que requiere el xPC Target sobre el Host PC.

HARDWARE	DESCRIPCIÓN
Comunicación.	Un puerto serial libre (COM1 o COM2) con conector de 9 o 25 pin, o un tarjeta de red Ethernet.
CPU.	Pentium, Athlon, u otra.
Periféricos.	Un drive de disco duro con 60MB de espacio libre. Un drive de disquetera de 3.5 pulgadas, y un drive de Cd-Rom.
RAM.	128MB o más.

Computador Target.

El xPC Target apoya a uno o más Target PCs con un Host. Un Target PC puede ser cualquier PC con un Intel 386/486/Pentium o AMD, el procesador de K5/K6/Athlon como computadora Target. También debe contener una

disquetera libre para disquete de 3.5 pulgada, y un puerto serial libre o una tarjeta Ethernet de red. Usando el xPC Target Embedded Option, se puede transferir los archivos del disco duro a un disquete de 3.5 pulgada o memoria flash.

Un Target PC puede ser uno de los siguientes computadores:

PC de Escritorio: esta computadora es inicializada desde un disco especial creado por el xPC Target. Cuando usted inicializa o arranca el Target PC, desde el disco target de booteo, el xPC Target usa los recursos en el Target PC (CPU, RAM, y puerto serial o tarjeta de red) sin cambiar los archivos guardados en la unidad de disco duro.

Después de que se usa la computadora de escritorio como un Target PC, y ya no se desea realizar más aplicaciones se hace lo siguiente; usted reinicia su computadora sin el disco target de booteo (arranque) y el computador se inicializa normalmente con su aplicación de origen, para cualquier tarea que desea realizar.

PC industrial: esta computadora se inicializa o arranca desde un disco especial Target de booteo creado, o, usando el xPC Target Embedded Opción, desde un disco duro o memoria flash. Al usar un Target PC

industrial, usted puede seleccionar PC104, PC104+, Compact PCI, o computadora de simpli-board (SBC) como el hardware.

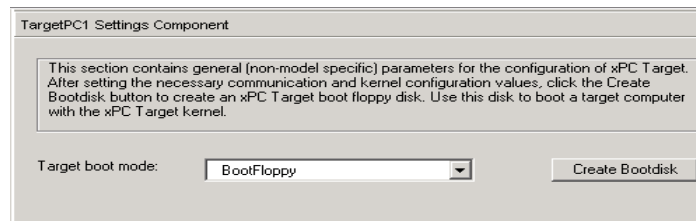
Usted no necesita ningún hardware Target especial. Sin embargo, el Target PC debe ser un sistema totalmente compatible y debe contener un puerto serial o una tarjeta de Ethernet compatible con el xPC Target.

Creación del Disco de Arranque del Computador Target.

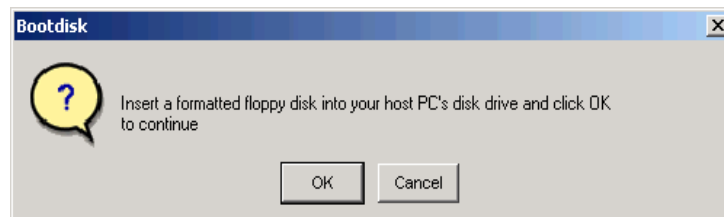
Creamos el disco de booteo o arranque para el Target PC desde el Host PC. El disco de booteo Target incluye las especificaciones del xPC Target kernel para comunicación serial o TCP/IP. Con este disco damos arranque a nuestro Target PC.

Primeramente, en MATLAB Command Window (Ventana de Comandos) se escribe: `xpcsetup` (Comando de habilitación del Setup del MATLAB), entonces la ventana del xPC Target Setup se abre.

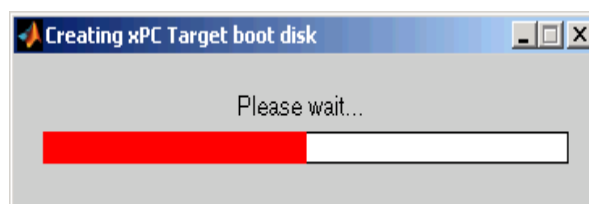
Segundo, se hace click en el botón Create BootDisk (Creación de disquete de booteo).



El siguiente mensaje se muestra:



Tercero, se ingresa un disquete de 3.5 pulgadas formateado en la disquetera del host PC, se hace click en el botón OK. El xPC Target muestra la siguiente ventana mientras crea el disquete de booteo. El proceso tarda cerca de 1 a 2 minutos.



Cuarto, se cierra la ventana del xPC Target Setup y se retira el disquete de booteo del xPC Target del host PC insertamos este disquete de booteo al target PC para activar el computador Target con las características de nuestro sistema.

ANEXO D

Tarjeta de Adquisición de Datos

Tarjeta PCI-6024E

La tarjeta PCI-6024E de National Instruments es una arquitectura completa para adquisición de datos.

Es un sistema modular que permite la comunicación entre la computadora y los procesos, es un sistema de entrada y salida de datos, la principal característica de este sistema es trabajar en el campo cerca de los procesos dejando el monitoreo y control en posiciones remotas.

Esta interfase convierte a la computadora en importante instrumento de análisis de datos, control y monitoreo, en tiempo real.

Dispone de entradas y salidas analógicas, entradas y salidas digitales, disparo digital, contadores y temporizadores.

Características técnicas:

- 200 K s/s, 12 bits de resolución, 16 entradas analógicas de tierra común.
- 2 salidas analógicas.
- 2 contadores timer de 24 bits.
- 8 líneas digitales de I/O de 5V/TTL.
- Disparo Digital.
- Configurable por software.
- Disponible para PCI, PCMCIA, PXI y SCXI.

La tarjeta de adquisición de datos toma 200.000 muestras por segundo (200Ks/s), además la adquisición se inicia por software.



Esta tarjeta opera con los siguientes sistemas: Windows 2000/NT/XP, el Real Time funcionando con el programa de LabVIEW o con el programa de MATLAB, o con Linux.

Además esta tarjeta es compatible con los lenguajes de programación de Visual Basic y C/C++.

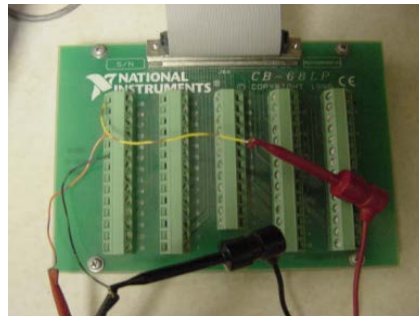
El voltaje de entrada y salida analógico que soporta la tarjeta PCI-6024E está en el rango entre 0 a 10V DC, y la corriente que soporta está en el rango de 250 a 750mA.

La tarjeta PCI-6024E posee el bloque conector CB-68LP y el bus conector de datos Serie E, para la comunicación de datos entre la tarjeta y el bloque conector.

Bloque conector CB-68LP

El bloque conector CB-68LP cuenta con una gran variedad de borneras de entrada y salida (I/O), tanto analógicos como digitales, que permite efectuar conexiones con una gran gama de sensores para adquisición de datos, como termocúplas, RTD, sensores transductores eléctricos de nivel, presión, flujo, y asimismo con una gran variedad de elementos de control como

transductores de corriente a presión válvulas de control, etc., mediante módulos de salidas analógicas y digitales.



Características Técnicas:

- Tiene 68 terminales por bornera.
- Soporta flujo de corrientes máxima de 160 mA por bornera.
- Soporta voltaje de I/O entre 0 V a 10 V por bornera.
- El voltaje máximo de I/O es de 10 V.
- Esta montada en una placa para fácil montaje de campo.
- No se encuentra blindado, como ocurre con otros modelos.
- Dimensiones del bloque conector: 14.35 cm. por 10.74 cm.

El bloque conector posee una tabla de descripción de cada una de las 68 borneras, para la habilitación correcta de cada entrada y salida.

*Do not connect to boards that do not support A/D or use as external reference with the SH90C92B cable.

AJ 0	34	68	AJ 0
AJ 1	33	67	AJ GND
AJ GND	32	66	AJ 9
AJ 10	31	65	AJ 2
AJ 3	30	64	AJ GND
AJ GND	29	63	AJ 11
AJ 4	28	62	AJ SENSE
AJ GND	27	61	AJ 12
AJCH13	26	60	AJ 5
AJCH6	25	59	AJ GND
AJ GND	24	58	AJ 14
AJCH15	23	57	AJ 7
AJ 0*	22	56	AJ GND
AJ 1*	21	55	AJ GND
EXT REF*	20	54	AJ GND
PE4	19	53	D GND
D GND	18	52	PO0
PE1	17	51	PO5
PE6	16	50	D GND
D GND	15	49	PO2
+5 V	14	48	PO7
D GND	13	47	PO3
D GND	12	46	AJ HOLD
PR 0V4 START	11	45	EXT STROBE
PR 1/REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PR 30V1 CONV
+5 V	8	42	PR 30V1 CTR1 SRC
D GND	7	41	PR 40V1 CTR1 GATE
PR 50V0 SAAMP	6	40	CTR1 DOUT
PR 60V0 START	5	39	D GND
D GND	4	38	PR 10V1 SAAMP
PR 5VCTR0 GATE	3	37	PR 5VCTR0 SRC
CTR0 DOUT	2	36	D GND
F OUT	1	35	D GND

Figure 3. I/O Connector for 16-Channel E Series and Basic Multifunction DAQ Devices, except NI-6025E

Bus de Datos Serie E.

El Bus de datos de 68 pines Serie E, sirve para intercomunicar el bloque conector CB-68LP con la tarjeta de adquisición PCI-6024E, además permite la comunicación entre la computadora y los demás módulos del sistema.

Características Técnicas:

- Bus plano de 68 pines y terminales para el bloque conector y la PC.

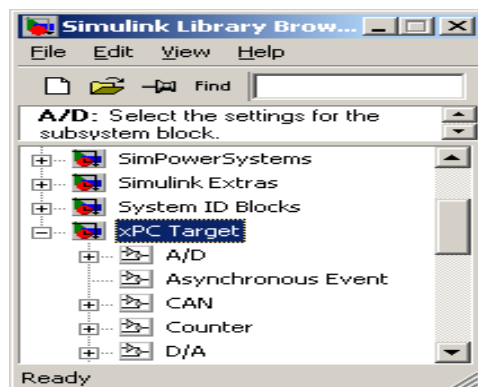
- El largo del bus de datos es de 1 m.
- Cable para trabajar con la serie E.

Adquisición de Datos del Sistema

Para iniciar la adquisición de datos del sistema, se procede desde el diseño del sistema en Simulink, en este caso no detallaremos los pasos para diseñar el sistema en Simulink, por lo que explicaremos los procedimientos del diseño a partir del diseño del sistema en Simulink. Los pasos para la adquisición de datos de la planta son los siguientes:

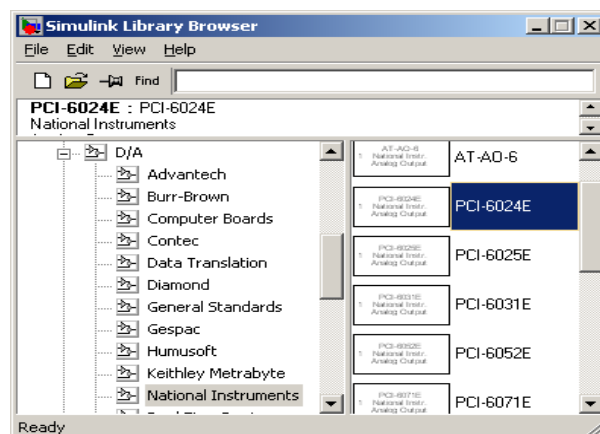
Paso 1:

Desde la ventana del Simulink Library Browser, se selecciona la función del xPC Target para habilitarla los diferentes bloques del xPC Target.

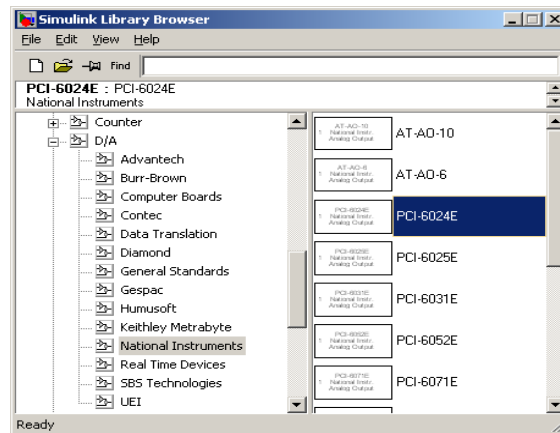


Paso 2:

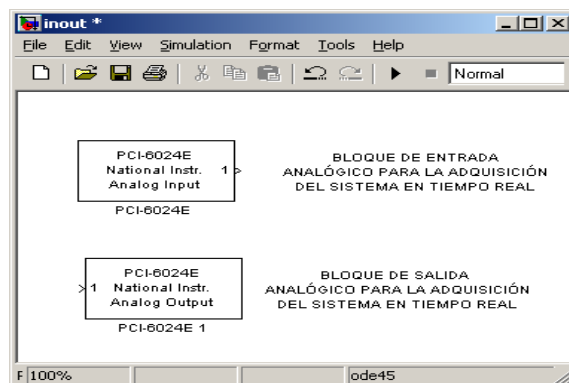
La librería del xPC Target posee varias funciones. Seleccionamos el bloque para habilitar las entradas y salidas analógicas de nuestro sistema, los dispositivos conectados al sistema son: la bomba DC, el sensor ultrasónico y la referencia manual de nivel del sistema. El bloque D/A del xPC Target, sirve para habilitar la entrada analógica, y se escoge el bloque de National Instruments, para seleccionar la opción PCI-6024E, este bloque es para la habilitación del sensor ultrasónico.



Así mismo seleccionamos el bloque para habilitar la salida analógica, en este caso es el voltaje de control de la bomba que va a la entrada de la etapa amplificadora y de allí a la bomba.



Cada uno de los bloques seleccionados como entrada y salida analógica del sistema se los conecta al diagrama de bloque del Simulink.

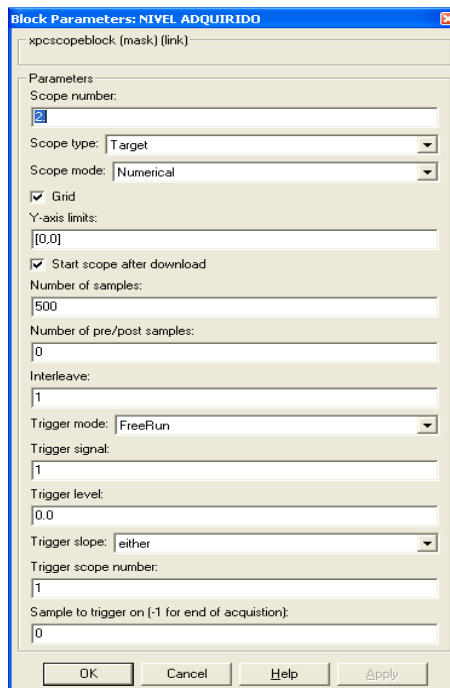


Paso 3:

Conexión de los bloques de entrada y salida analógica al sistema, y habilitación de los osciloscopio xPC Target para el monitoreo de las señales de entrada y salida.

Paso 4:

Ingresamos los parámetros para los bloques de osciloscopios xPC Target. De igual manera se ingresa los parámetros para los demás bloques de los osciloscopios Target, que muestrean las señales del sistema en tiempo real, acorde a la escala que se desea observar la señal adquirida.



Paso 5:

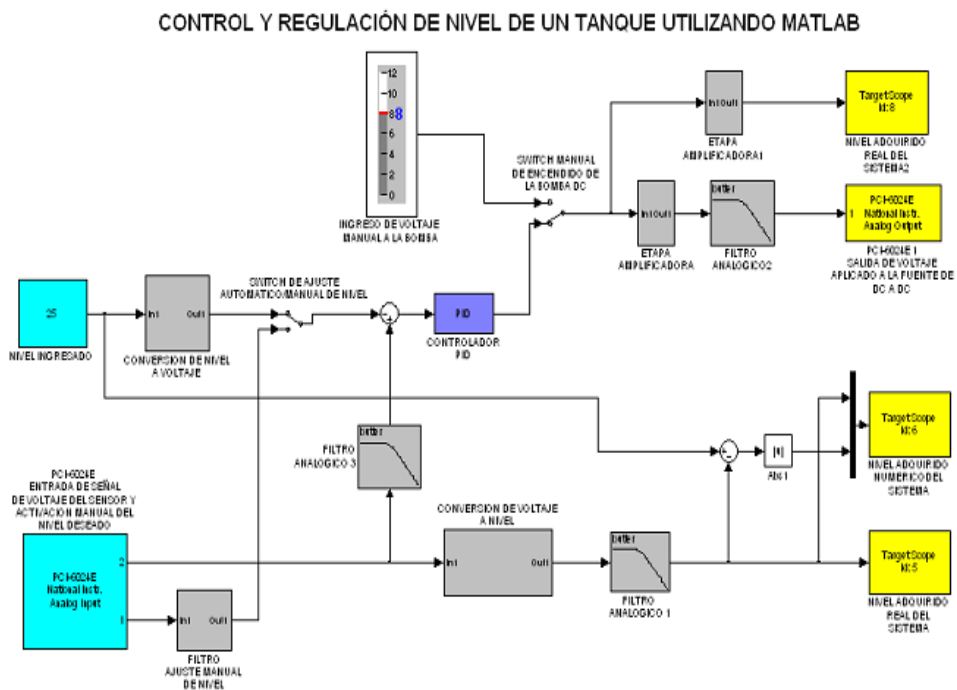
El diseño del sistema para la adquisición de datos se lo tiene definido, y ahora habilitamos el Host PC y el Target PC, para iniciar la adquisición de datos del sistema en tiempo real, por medio de la comunicación entre ambos PC.

Paso 6:

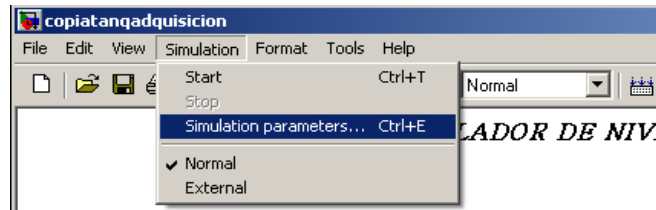
Creamos el disco de booteo o arranque para el target PC desde el host PC. El disco de booteo Target incluye las especificaciones del xPC Target kernel para comunicación serial o TCP/IP. Y con este disquete de booteo lo insertamos al target PC, para habilitar el computador con las características de nuestro sistema.

Paso 7:

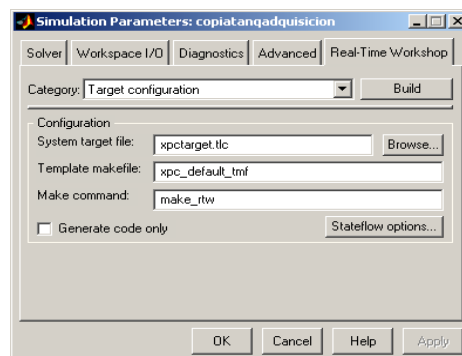
En el sistema diseñado habilitando las entradas y salidas analógicas correctamente, y estableciendo comunicación entre el Host PC con el Target PC, iniciamos la adquisición del sistema de la siguiente manera:



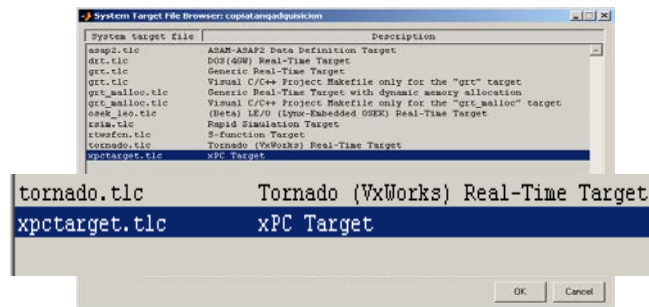
En el Host PC, en la pantalla del sistema creado en Simulink, se hace click en la pestaña Simulation (Simulación) y se escoge la opción Simulation Parameters (Parámetros de Simulación), y se abre la ventana de Simulación de Parámetros.



En esta ventana se escoge la opción de Real-Time Workshop, y dentro de este menú en la pestaña Category (Categoría), se escoge la opción Target Configuration (Configuración Target).

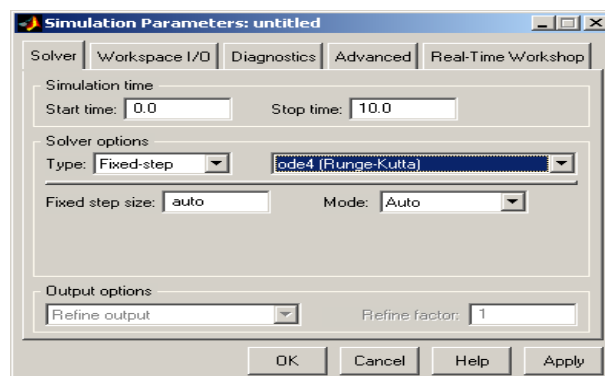


En la ventana mostrada, se hace click en el botón Browse y se escoge la opción xPC Target. Se hace click en el botón OK, y se carga los parámetros del archivo del xPC Target.



Paso 8:

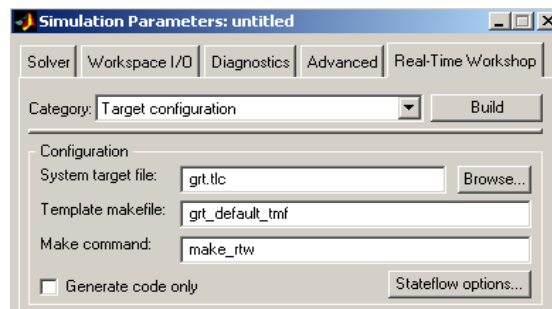
En la ventana de Simulación de Parámetros, se hace click en la opción Solver (Resolver), para escoger los parámetros y métodos de adquisición, para observar las señales en el osciloscopio Target.



En la ventana de la figura se ingresa los parámetros necesarios para la adquisición de datos del sistema en tiempo real. En la pestaña type (tipo) seleccionamos Fixed-Step y se escoge el método matemático ode4 (Runge Kutta). Hacemos click en el botón OK y la función xPC Target acepta los parámetros.

Paso 9:

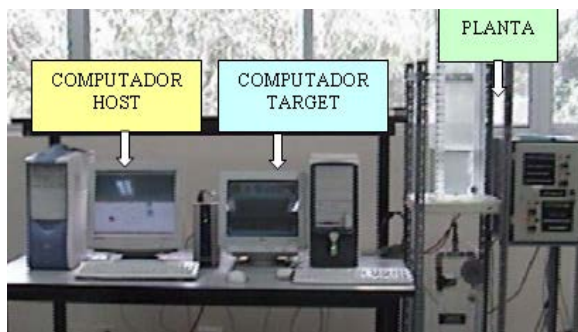
Se escoge nuevamente la opción Real-Time Workshop, y hacemos click en el botón Build (Construir).



Se construye el proceso para generar el C code, compila, enlaza y descarga la Aplicación Target al Target PC.

Paso 10:

Finalizando la carga de la Aplicación Target, hacemos click en la pestaña Simulation (Simulación), y simulamos en tiempo real nuestro sistema, observando en el Target PC las gráficas de las señales de entradas y salidas del sistema en tiempo real.



ANEXO E

Retardo

Retardo

Todos los sistemas considerados tienen funciones de transferencia que son el cociente de los polinomios. En la práctica, se pueden encontrar retrasos puros en varios tipos de sistemas, especialmente en sistemas con transmisores hidráulicos, neumáticos o mecánicos.

En nuestro caso el sistema está compuesto por tuberías, y el flujo a través de la tubería proporciona retardo al sistema. Y el retardo de nuestro sistema está en función del caudal que proporciona la bomba DC de succión y la longitud de la tubería utilizada. En el capítulo 2 se analizó el retardo, y en este caso explicaremos la aproximación de funciones con retardo mediante funciones racionales.

Existen muchas formas de aproximar a e^{-TS} por una función racional.

Una forma de aproximar la función exponencial es mediante una serie de Maclaurin, esto es:

$$e^{-TS} \cong 1 - TS + \frac{T^2 S^2}{2} \quad \text{ó;}$$

$$e^{-TS} \cong \frac{1}{1 + TS + T^2 S^2 / 2}$$

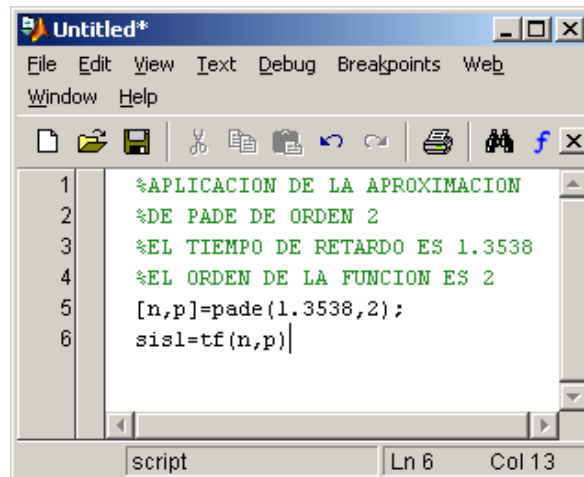
Donde se utilizan tres términos de la serie, ya que la serie es infinita. Aparentemente, las aproximaciones no son válidas cuando la magnitud de TS es grande.

Una mejor aproximación es la de Padé, por lo que Padé traslada la función de retardo del tiempo a la frecuencia, para realizar de una manera más sencilla el análisis del retardo, ya que en el campo del tiempo tenemos una función exponencial infinita. Padé está dado por una aproximación de serie como:

$$e^{-TS} \cong 1 - TS + \frac{1(TS)^2}{2!} + \dots \cong \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(S)}$$

Aplicando la función de Padé en MATLAB tenemos:

$[num,den] = \text{pade}(T,n)$



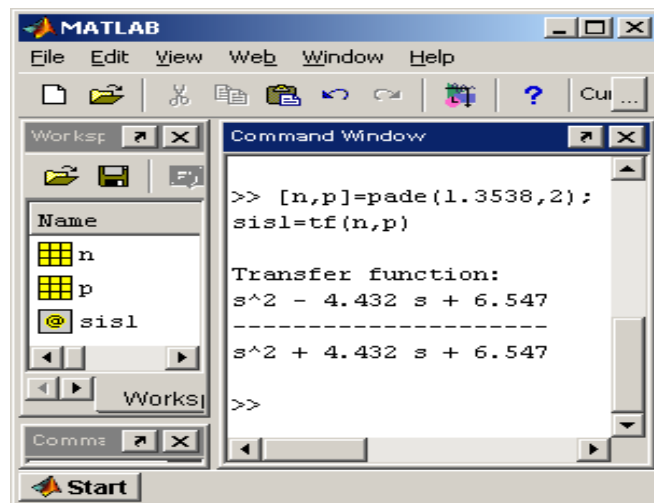
```
1 %APLICACION DE LA APROXIMACION
2 %DE PADE DE ORDEN 2
3 %EL TIEMPO DE RETARDO ES 1.3538
4 %EL ORDEN DE LA FUNCION ES 2
5 [n,p]=pade(1.3538,2);
6 sisl=tf(n,p)
```

APLICACIÓN DE LA APROXIMACIÓN DE PADÉ DE SEGUNDO ORDEN.

Donde T es el tiempo de retardo y n es el orden de aproximación de la función de transferencia. En el análisis de nuestra tesis utilizamos una aproximación de Padé de segundo orden, es decir $n = 2$. Se utilizó de segundo orden, por la razón de que la aproximación de primer orden por expansión de Taylor sólo es valida mientras el tiempo muerto es pequeño en comparación con velocidad de respuesta de circuito cerrado.

En nuestro caso el tiempo de respuesta del sistema es de 9 segundos aproximadamente (8.7s) con un controlador PID, y el tiempo de retardo del sistema es de 1.3538 segundos que corresponde al 15% del tiempo de estabilidad del sistema; por tal análisis nuestro retardo no es mínimo es decir

es significativo, por lo que hemos aplicado una aproximación de segundo orden de Padé para obtener mayor precisión en el ajuste del controlador.



OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE RETARDO DEL SISTEMA APLICANDO PADE EN MATLAB.

En la figura, obtenemos la función de transferencia de retardo del sistema, y es una función de segundo orden con un tiempo de 1.3538s, y esta función de transferencia la aplicamos en el diseño del sistema.

Así hemos explicado como hallar la función de transferencia del retardo y de esta manera podemos obtener el retardo de cualquier sistema, ya que el análisis del retardo es un factor crítico en la estabilidad de los sistemas, provocando inestabilidad y respuestas lentas en los sistemas, por tal razón siempre se debe considerar este efecto en los sistemas hidráulicos.

ANEXO F

Prácticas de Laboratorio

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO

SISTEMAS RETROALIMENTADOS

PREPRÁCTICA 1

Antecedentes

En esta práctica se analizará una planta con dominancia de segundo orden y el del retardo del sistema. Además se aplicará el uso de controladores para ajustar la respuesta de un sistema de control retroalimentado a un comportamiento deseado.

Objetivos:

- Estimar la función de transferencia de la planta a partir de su respuesta a un cambio de entrada de referencia de tipo escalón.
- Determinar el tipo de controlador necesario para ajustar el comportamiento de un sistema a un error de estado estacionario deseado distinto de 0%, para una entrada tipo escalón.
- Establecer un controlador para un sistema que permita tener un error de estado estacionario de 0% y una dinámica del sistema deseada.

Teoría:

Uno de los mecanismos para identificar la función de transferencia de una planta o de un sistema es analizar su respuesta a una entrada Escalón.

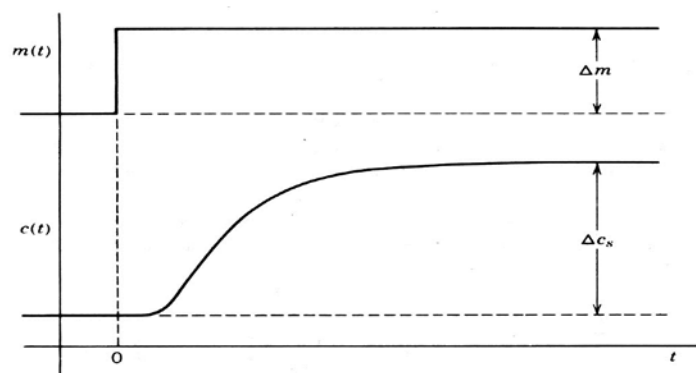


Figura 1. Respuesta a la entrada Escalón.

Así, si observamos la Figura1 podemos darnos cuenta de que la salida o la respuesta a Escalón es una función exponencial del siguiente tipo:

$$C(t) = A * K \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega_0 (t - \tau)} \text{sen}(\omega_1 (t - \tau) + \varphi) \right] \mu(t - T)$$

Ecuación 1

Donde:

$\mu(t - \tau)$: Respuesta a Escalón.

K: Ganancia del sistema.

t: Tiempo del sistema.

τ : Retardo o retraso puro del sistema.

ω_0 : frecuencia natural (no amortiguada) del sistema.

ω_1 : Frecuencia amortiguada del sistema.

ζ : Coeficiente de amortiguamiento ($0 < \zeta < 1$).

A: Amplitud de la entrada Escalón del sistema.

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \qquad \varphi = \arccos(\zeta)$$

Ecuación 2

Retraso:

Es la diferencia de tiempo entre el instante en que cambia la entrada y empieza a cambiar la salida.

Constante de tiempo:

Es el valor que multiplica la variable de tiempo y nos indica la velocidad con la que el sistema reacciona.

Ganancia:

Es la relación entre el cambio en la entrada y el valor estado estable en la salida.

A partir de aquí de estos parámetros se puede determinar también la función de transferencia de segundo orden en el dominio de la frecuencia, que es:

$$G(s) = e^{-sT} \left(\frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \right)$$

Ecuación 3

Para estimar estos parámetros necesitamos los siguientes datos: la magnitud de la entrada escalón (Δu), el valor de estado estable ($\Delta c = \Delta y$), el tiempo que tarda en empezar a cambiar la salida (T) y el tiempo que tarda en llegar a la mitad del valor de estado estable ($t_{K/2}$). Además, se requiere de las siguientes fórmulas:

$$\tau = \frac{\ln 2}{t_{K/2} - T}$$

Ecuación 4

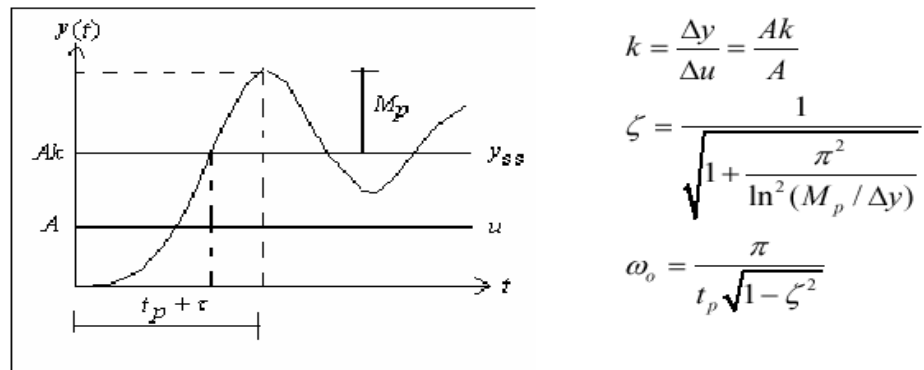


Figura 2. Método de Respuesta Transitoria. Modelo General de Segundo Orden.

Para poder manejar la salida se necesita de un lazo cerrado de control como el mostrado en la Figura 3, donde:

F es la preamplificación,

C es el controlador,

G es la función de transferencia de la planta,

H es la retroalimentación.

R(S) es la entrada Escalón del sistema.

C(S) es la Respuesta del sistema.

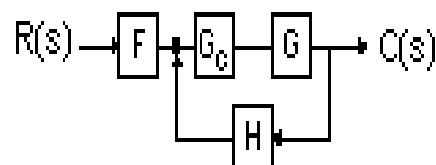


Figura 3

Los controladores pueden ser básicamente de los siguientes tipos:

Proporcional $G_c(s) = K_1$ Ecuación 2	Integrador $G_c(s) = \frac{K_1}{s}$ Ecuación 3	Diferenciador $G_c(s) = K_1 s$ Ecuación 4
Proporcional Integrador $G_c(s) = K_1 + \frac{K_2}{s}$ Ecuación 5	Proporcional Diferenciador $G_c(s) = K_1 + K_2 s$ Ecuación 6	Proporcional Integrador Diferenciador $G_c(s) = K_1 + \frac{K_2}{s} + K_3 s$ Ecuación 7

Por otra parte, al tener un sistema de control podemos establecer que si $R(s)$ y $C(s)$ están en las mismas unidades el error del sistema ($E(s)$) es:

$$E(s) = R(s) - C(s)$$

Ecuación 8

Además sabemos que:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{FG_cG(s)}{1 + G_cGH(s)}$$

Ecuación 9

Entonces:

$$E(s) = R(s) \left[1 - \frac{FGcG(s)}{1 + GcGH(s)} \right]$$

Ecuación 10

Si además, $F(s) = H(s)$ nos queda:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + GcGH(s)}$$

Ecuación 11

Si el sistema es estable, entonces el error de estado estacionario (E_{ss}) es:

$$E_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s)$$

Ecuación 12

Por otra parte, si revisamos la Ecuación 12 podemos ver que los polos de la función de transferencia están dados por la ecuación:

$$1 + GcGH(s) = 0$$

Ecuación 13

A la que se conoce como ecuación característica del sistema y nos permite trazar el lugar geométrico de las raíces de lazo cerrado del sistema. Cuando se trabaja con el programa MATLAB para encontrar controladores a partir del

lugar geométrico de las raíces lo que necesitamos conocer es: $F(s)$, $G(s)$, $H(s)$; porque el controlador lo diseñamos usando la herramienta SISOTOOL.

Equipos

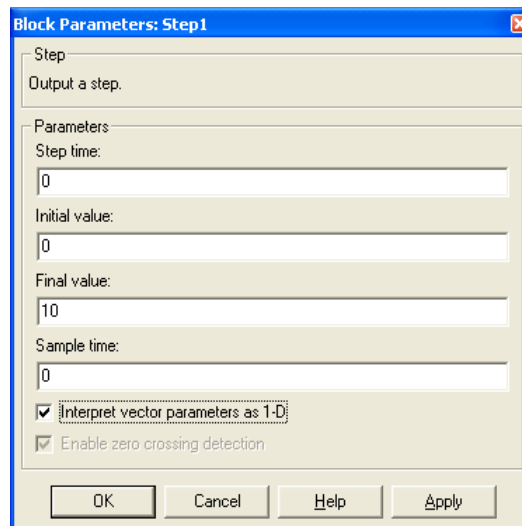
- Un disquete de xPC Target para el computador designado como “ESTACION03”
- Un disquete en blanco para grabar los datos.

Parte I

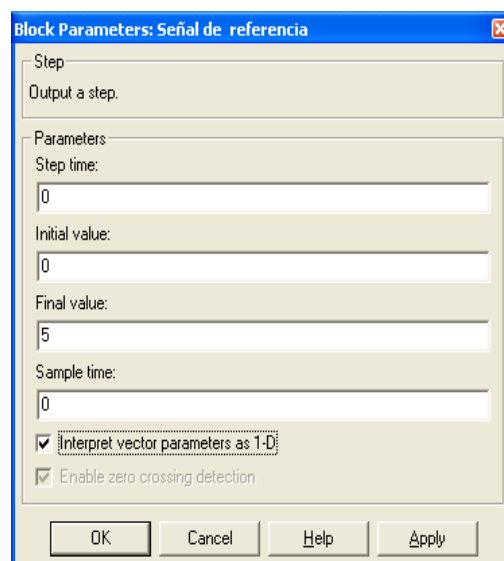
1. En la parte uno de la práctica tratamos de determinar la función de transferencia de la planta que está constituida por una etapa amplificadora de corriente, una bomba DC de succión, tanques y sensor ultrasónico. Además, se usa Matlab para la adquisición de datos, y la generación de señales.
2. Encender el computador “ESTACION03” con el disquete de xPC Target puesto en la disquetera.
3. Encender el computador “ESTACION06” y ejecutar Matlab.

4. Abrir el archivo de Simulink “planta1”

5. Verificar que los parámetros del bloque “Señal de alimentación al Set Point” estén configurados de la siguiente manera:



6. Confirmar que los parámetros del bloque “Señal de referencia” sean los siguientes:



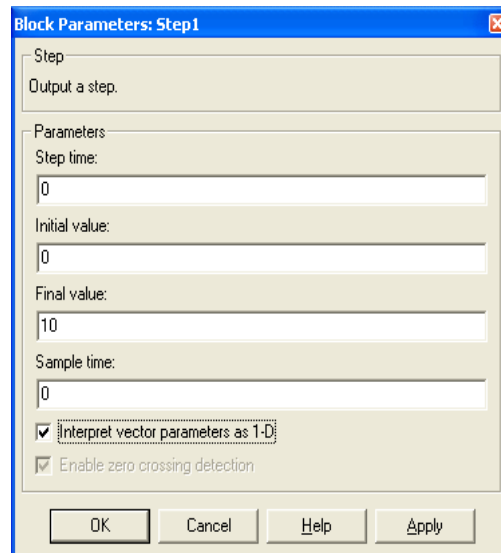
7. Hacer click en el botón “build all”.
8. Ejecutar la herramienta xpcrctool.
9. En la ventana del xpcrctool hacer click en el botón “start target application”.
10. Cuando haya terminado la aplicación, pasar los datos de tiempo(en segundos) y el nivel (en cm.) a variables de Matlab usando: tg.timelog y tg.outputlog respectivamente.
11. Grabar los datos para en un disquete para poder hacer los cálculos posteriores de: K y Δ .
12. Cerrar la ventana del xpcrctool y el archivo “planta1” del simulink.

Parte II

En el computador Host:

1. Abrir el archivo de Simulink “planta1”.

2. Verificar que los parámetros del bloque “Señal de alimentación al Set Point” estén configurados de la siguiente manera:



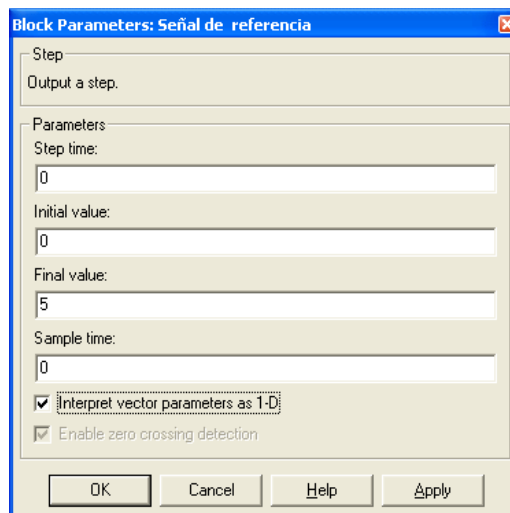
Block Parameters: Step1

Step
Output a step.

Parameters
Step time:
0
Initial value:
0
Final value:
10
Sample time:
0
☒ Interpret vector parameters as 1-D
☒ Enable zero crossing detection

OK Cancel Help Apply

3. Confirmar que los parámetros del bloque “Señal de referencia” sean los siguientes:



Block Parameters: Señal de referencia

Step
Output a step.

Parameters
Step time:
0
Initial value:
0
Final value:
5
Sample time:
0
☒ Interpret vector parameters as 1-D
☒ Enable zero crossing detection

OK Cancel Help Apply

4. Ingresar la ganancia calculada para el controlador.

5. Hacer click en el botón “build all”.
6. Ejecutar la herramienta xpcrctool.
7. En la ventana del xpcrctool hacer clic en el botón “start target application”
8. Cuando haya terminado la aplicación, pasar los datos de tiempo(en segundos) y el nivel(en cm.) a variables de Matlab usando: tg.timelog y tg.outputlog respectivamente.
9. Grabar los datos para en un disquete para poder hacer calcular el error de estado estacionario y compararlo con el teórico.
10. Cerrar la ventana del xpcrctool y el archivo “planta1” del simulink.

BIBLIOGRAFIA

1. DORF RICHARD C. & BISHOP ROBERT H, Modern Control Systems, Novena Edición, Prentice Hall.
2. B. KUO, Sistemas Automáticos de Control (Prentice Hall).
3. SMITH CORRIPIO, Control automático de procesos, teoría y práctica, Editorial Limaza.
4. OGATA, PRENTICE HALL, Ingeniería de control moderna.
5. CHAPMAN STEPHEN J., Máquinas Eléctricas. Tercera Edición, Mc. Graw Hill.
6. Simulink user guide, The MathWorks.
7. Power System Blockset for use with Simulink; The MathWorks.
8. The Real-Time Workshop for use with Simulink; The MathWorks.
9. xPC Target for use with Real-Time Workshop; The MathWorks.

10. System Identifications user guide; The MathWorks.
11. SMITH CORRIPIO, Control automático de procesos, teoría y práctica, Editorial Limaza.
12. OGATA, PRENTICE HALL, Ingeniería de control moderna.
13. CHAPMAN STEPHEN J., Máquinas Eléctricas. Tercera Edición, Mc. Graw Hill.
14. Low-Cost E Series Multifunction DAQ 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs, www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc202-04_ETC_212-213.pdf.
14. MANUAL BÁSICO DE MATLAB, www.mat.ucm.es/deptos/maq/docencia/calcnun/matlab.pdf.
15. System Identification Toolbox, www-ccs.ucsd.edu/matlab/pdf_doc/ident/ident.pdf.
16. xPC Target, www.mtsac.edu/~gwkamin/Matlab_5-3-1_Pro/help/pdf_doc/xpc/xpc_target_ug.pdf

17. xPC Target, Modeling, Simulation, Implementation; The mathwork,
www.mathworks.ch/support/product/XP/productnews/xpc_target_gs_2001_July_02.pdf