



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

TESIS DE GRADO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODULO ORIENTADO AL
DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL
BAJO LA PLATAFORMA DE LABVIEW”**

Previa a la obtención del título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

PRESENTADA POR:

**JENIFFER BEATRIZ LEYES FRANCO
DARIO RAFAEL NAVARRETE DÍAZ**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2007

AGRADECIMIENTO

*A todos quienes
contribuyeron en el
desarrollo de este trabajo.*

DEDICATORIA

*A mis Padres, Hermanos y
Tíos por su apoyo
incondicional.*

Jeniffer.

A mis Padres y Hermanos.

Darío.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



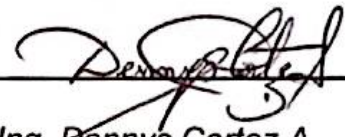
Ing. Holger Cevallos U.
SUBDECANO FIEC
PRESIDENTE



Ing. Holger Cevallos U.
DIRECTOR DE TESIS.



Ing. Alberto Manzur H.
MIEMBRO PRINCIPAL



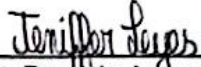
Ing. Dennys Cortez A.
MIEMBRO PRINCIPAL

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL ICA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
BIBLIOTECA
INV. No. ELET-EL-68-1

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)



Jeniffer Beatriz Leyes Franco



Darío Rafael Navarrete Díaz

RESUMEN

El diseño y construcción de este modulo se basa en una aplicación específica de control, que para el caso es la de control de nivel de un tanque. La realización de este control de nivel está orientada a la medición de una variable física, selección de un controlador y ajuste de sus parámetros, y uso de un actuador.

El diseño del controlador se realiza en un computador provisto del software LabVIEW, el cual gracias a su desempeño es ampliamente usado en la Instrumentación Virtual. El programa es de mucha utilidad debido a que cuenta con herramientas como identificación de sistemas, diseño de control, simulación, y un ambiente gráfico en donde se puede implementar un controlador real.

En el capítulo 1 se encuentra el contenido teórico de cada uno de los componentes de un sistema de control de nivel, es así que dentro de este capítulo se hace referencia a la medición de nivel, controladores PID , y al elemento regulador de nivel.

En el capítulo 2 se describe la planta de control de nivel en su totalidad, y luego se va detallando cada uno de los elementos constitutivos de dicha planta y sus respectivas características, desde el software hasta el recipiente que contiene el líquido.

En el capítulo 3 se describe el procedimiento llevado a cabo para la identificación de sistemas con la herramienta identificación de sistemas de LabVIEW, específicamente para una planta de control de nivel.

En el capítulo 4 se lleva a cabo la selección de un controlador para el modelo previamente identificado con LabVIEW, además se realiza la simulación del sistema.

En el capítulo 5 se detallan las aplicaciones de la planta con sus respectivos procedimientos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGÍA.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
1. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	3
1.1 Medición de Nivel.....	3
1.1.1 Medición de nivel de líquidos.....	4
1.1.1.1 Medición de nivel basada en presión hidrostática.....	5
1.2 Controladores PID.....	8
1.2.1 Estructura de un Controlador PID.....	10
1.2.1.1 Acción de control proporcional.....	10
1.2.1.2 Acción de control integral.....	11
1.2.1.3 Acción de control proporcional-integral.....	12
1.2.1.4 Acción de control proporcional-derivativa.....	13
1.2.1.5 Acción de control Proporcional-Integral-Derivativa.....	14
1.2.2 Estructura de un Controlador PID Digital.....	15
1.2.3 Métodos clásicos de ajuste de Ziegler y Nichols.....	20
1.3 Actuadores.....	29

1.3.1 Regulación de caudal mediante un Sistema Variador de Velocidad – Bomba.	31
CAPÍTULO 2.....	37
2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	37
2.1 Montaje de la Planta.....	37
2.2 Descripción de los componentes de la Planta.....	42
2.2.1 Software LabVIEW.....	42
2.2.1.1 System Identification.....	45
2.2.1.2 Control Design.	48
2.2.1.3 Simulation Module.	49
2.2.1.4 Workbench.....	50
2.2.2 Tarjeta PCI 6024E.....	52
2.2.3 Computador.....	55
2.2.4 Tanque.	56
2.2.5 Transmisor de Presión.	58
2.2.6 Sistema Variador de velocidad-Bomba.	67
2.2.7 Medidor de Caudal.....	73
2.2.8 Válvula Proporcional.	76
CAPÍTULO 3.....	79
3. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.....	79
3.1 Introducción a la Identificación de Sistemas.....	79
3.2 Adquisición de datos.	91
3.2.1 Señal estímulo aplicada al sistema.	98
3.2.2 Señal de respuesta del sistema.	100
3.3 Preprocesado de Datos.....	101
3.3.1 Escalamiento de datos.	111
3.4 Selección y Validación del Modelo.	112

3.4.1 Selección del modelo.	113
3.4.2 Simulación del modelo.	114
3.4.3 Predicción del modelo.	117
3.4.4 Análisis residual.	118
3.5 Modelo seleccionado para la planta.	118
CAPÍTULO 4.....	121
4. DISEÑO DE CONTROL Y SIMULACIÓN.	121
4.1 Criterios de Selección del Controlador.	122
4.2 Diseño del Controlador.	128
4.3 Simulación de la Planta con Controlador.....	153
CAPÍTULO 5.....	174
5. MANEJO DE LA PLANTA.....	174
5.1 Características Dinámicas y Estáticas de Transmisor de Presión.175	
5.2 Identificación de sistema Variador Bomba.	185
5.3 Sintonización de Parámetros del Controlador.	187
5.4 Sintonización de parámetros con un controlador externo.....	192
CONCLUSIONES	196
RECOMENDACIONES.....	198
ANEXOS.....	199
BIBLIOGRAFÍA.....	236

ABREVIATURAS.

ACH0	Canal Analógico de Entrada 0 de PCI6024E.
ACH1	Canal Analógico de Entrada 1 de PCI6024E.
ACH8	Canal Analógico de Entrada 8 de PCI6024E.
ACH9	Canal Analógico de Entrada 9 de PCI6024E.
AC	Corriente alterna.
ADC	Convertidor analógico digital.
ADC1	Entrada analógica variador de velocidad.
AI	Entrada analógica de PCI6024E.
AO	Salida analógica de PCI6024E.
AOGND	Referencia de salida analógica de PCI6024E.
ASCII	Código estándar americano de intercambio de datos.
Bar	Unidades de medida de presión.
BOP	Panel básico de operador.
CA	Corriente alterna.
CD	Conjunto de funciones de Diseño de Control.
cm	Centímetros.
cm ²	Centímetros cuadrados.
cm ³ /s	Centímetros cúbicos por segundo.
DAC	Convertidor digital analógico.
DAC0OUT	Salida analógica 0 de PCI6024E.
DAQ	Adquisición de datos.
DC	Corriente directa.
DGND	Referencia para entradas o salidas digitales PCI6024E.
DINO	Entrada digital variador de velocidad.
DIO	Entrada o salida digital de PCI6024E.
DIO0	Entrada o salida digital 0 de PCI6024E.
dt	Diferencial de tiempo.
FSO	Fondo de escala.
gal/min	Galones por minuto.
H	Altura.
Hg	Mercurio.
HP	Caballos potencia.
Hz	Hertzios.
IGBT	Transistores bipolares de compuerta aislada.
I	Corriente.
Inf	Infinito.
I/O	Entrada/Salida.
Kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado.
Kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico.
L.G.R.	Lugar geométrico de las raíces.
l/min	Litros por minuto.

Litros/min	Litros por minuto.
l/s	Litros por segundo.
mA	Miliamperios.
MHz	Mega Hertzios.
m ³ /h	Metros cúbicos por hora.
m/s ²	Metros por segundo cuadrados.
NI	National Instruments.
N/m ²	Newton por metros cuadrados.
NIDAQmx	Software manejador de dispositivos National Instruments.
P	Presión.
Pa	Pascal.
PCI	Componente periférico.
PD	Proporcional Derivativo.
PI	Proporcional Integral.
PID	Proporcional Integral Derivativo.
PSI	Libras por pulgada cuadrada.
Q	Caudal.
SI	Conjunto de funciones para Identificación de Sistemas.
SISO	Entrada simple salida simple.
Sub-VI	Subprograma, o sub. Instrumento Virtual.
V	Voltios.
VI	Instrumento virtual.
Z-N	Zieglers Nichols.
ZPK	Zero polo ganancia.
2D	2 dimensiones.
3D	3 dimensiones.

SIMBOLOGÍA

A	Área.
C	Constante relacionada con apertura válvula.
e_{ss}	Error de estado estacionario.
F_i	Flujo de entrada.
F_o	Flujo de salida.
F	Fuerza.
hcm	Nivel del tanque en centímetros.
hm	Nivel del tanque en metros.
h	Altura.
h_s	Nivel en estado estacionario.
I	Integral.
K_p	Constante proporcional.
M_{pt}	Valor pico de respuesta en el tiempo.
R_L	Resistencia de carga.
SP	Sobrenivel porcentual.
T_d	Tiempo derivativo.
T_i	Tiempo integral.
T_p	Tiempo de pico.
T_r	Tiempo de ascenso.
T_s	Tiempo de estabilización.
Vp	Apertura de válvula.
V_{TRANS}	Voltaje transmisor.
X_{mA}	Miliamperios a salida de transmisor.
Y_{PSI}	Medición en PSI de transmisor.
Y_{Pa}	Medición en Pascal de transmisor.
ω_n	Frecuencia natural.
ζ	Relación de amortiguación.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 ESQUEMA DE UN TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO.....	8
FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON CONTROLADOR PID.....	10
FIGURA 1.3 APROXIMACIÓN DE LA INTEGRAL POR REGLA DEL TRAPECIO.	17
FIGURA 1.4 APROXIMACIÓN DE LA DERIVADA.....	19
FIGURA 1.5 LAZO CERRADO SOLO CON GANANCIA PROPORCIONAL.	21
FIGURA 1.6 RESPUESTA DE PLANTA CON GANANCIA CRÍTICA.....	23
FIGURA 1.7 RESPUESTA DE UNA PLANTA ANTE APLICACIÓN DE SEÑAL ESCALÓN.....	25
FIGURA 1.8 DIAGRAMA DE LAZO CERRADO.....	27
FIGURA 1.9 ESTRUCTURA DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA.....	33
FIGURA 2.1 ESQUEMA DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.....	39
FIGURA 2.2 ESQUEMA EN BLOQUES GENERAL DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.....	40
FIGURA 2.3 DISPOSICIÓN FÍSICA DE EQUIPOS EN LA PLANTA.....	41
FIGURA 2.4 LECTURA DE SEÑAL DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN..	43
FIGURA 2.5 APLICACIÓN DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON EL ASISTENTE DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	46
FIGURA 2.6 PALETA DE FUNCIONES DE LA HERRAMIENTA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	47
FIGURA 2.7 PALETA DE FUNCIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO DE CONTROL.....	49
FIGURA 2.8 PALETA DE FUNCIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.....	50

FIGURA 2.9 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE FUNCIONES DE NI EXPRESS WORKBENCH.....	51
FIGURA 2.10 ACCESORIOS PCI6024E, R6868, CB-68LP.	53
FIGURA 2.11 TANQUE PARA EL CONTROL DE NIVEL.....	56
FIGURA 2.12 TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PT5.....	60
FIGURA 2.13 RANGO DE OPERACIÓN DE TRANSMISOR WINTERS PT5.	61
FIGURA 2.14 ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LAS SALIDAS DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.....	65
FIGURA 2.15 CONEXIÓN DE TRANSMISOR DE PRESIÓN AL TANQUE.	67
FIGURA 2.16 VARIADOR DE VELOCIDAD SINAMICS G110.	69
FIGURA 2.17 BOMBA CENTRÍFUGA WEG-GRUNDFOS.....	70
FIGURA 2.19 CONEXIÓN CIRCUITO DE CONTROL VARIADOR DE VELOCIDAD.....	73
FIGURA 2.20 MEDIDOR DE CAUDAL DPL-1E20 G4 L303.....	74
FIGURA 2.21 ESQUEMA DE CONEXIÓN ELÉCTRICA PARA MEDICIÓN DE CAUDAL.	74
FIGURA 2.22 VÁLVULA PROPORCIONAL EV260B.	77
FIGURA 3.1 ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN PARA EXPERIMENTO DE IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.....	82
FIGURA 3.3 CONEXIÓN DE MEDIDOR DE CAUDAL A ENTRADA DE TANQUE.....	89
FIGURA 3.4 PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN DE ENTRADA Y SALIDA PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS USANDO PCI 6024E.	93
FIGURA 3.5 PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS USANDO PCI 6024E.....	97
FIGURA 3.6 SEÑAL ESTÍMULO APLICADA A LA PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.	99

FIGURA 3.7 SEÑAL DE RESPUESTA DE LA PLANTA ANTE SEÑAL ESTÍMULO.	101
FIGURA 3.8 FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII DE LabVIEW.	102
FIGURA 3.9 CUADRO DE DIÁLOGO DE FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII, PRIMERA PESTAÑA.	103
FIGURA 3.10 CUADRO DE DIÁLOGO DE FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII, SEGUNDA PESTAÑA.	104
FIGURA 3.11 SEÑALES ESTÍMULO Y RESPUESTA a) DIAGRAMA DE BLOQUES b) PANEL FRONTAL.	105
FIGURA 3.12 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA OBTENCIÓN DE UNA PORCIÓN DE LA SEÑAL.	106
FIGURA 3.13 PORCIÓN SELECCIONADA DE SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.	107
FIGURA 3.14 REDUCCIÓN DEL VALOR DC DE LAS SEÑALES DE ESTÍMULO Y RESPUESTA.	108
FIGURA 3.15 SEÑALES ESTÍMULO Y RESPUESTA MENOS VALOR DC.	109
FIGURA 3.16 OBTENCIÓN DE UNA PORCIÓN DE LA SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.	110
FIGURA 3.17 GRÁFICO DE PORCIÓN SELECCIONADA DE LA SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.	111
FIGURA 3.18 ESTIMACIÓN DEL MODELO.	114
FIGURA 3.19 SIMULACIÓN DEL MODELO.	115
FIGURA 3.20 SEÑAL DE SIMULACIÓN DEL MODELO.	116
FIGURA 3.21 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA CÁLCULO DE SEÑAL DE ERROR.	116
FIGURA 3.22 SEÑAL DE ERROR, DIFERENCIA ENTRE SEÑAL SIMULADA Y SEÑAL DE RESPUESTA DE LA PLANTA.	117
FIGURA 3.23 ESCRITURA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.	119

FIGURA 3.24 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA IDENTIFICADA DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.....	119
FIGURA 4.1 RANGO DE IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.....	123
FIGURA 4.2 RESPUESTA DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN A UNA ENTRADA DE REFERENCIA TIPO ESCALÓN.....	125
FIGURA 4.3 ESQUEMA CON RETROALIMENTACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.....	129
FIGURA 4.4 ESQUEMA CON RETROALIMENTACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.....	131
FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GRAFICO DE TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES.....	132
FIGURA 4.6 TRAYECTORIA DE LAS RAICES PARA $K = 50$	133
FIGURA 4.7 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON RETROALIMENTACIÓN.....	133
FIGURA 4.8 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GRAFICAR RESPUESTA DEL SISTEMA A SEÑAL ESCALÓN UNITARIO.....	135
FIGURA 4.9 RESPUESTA DEL SISTEMA A ENTRADA DE REFERENCIA ESCALÓN UNITARIO CON $K = 1000$	136
FIGURA 4.10 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR CON GANANCIA PROPORCIONAL $K_p = 45$	137
FIGURA 4.11 TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES DEL SISTEMA CON UN CONTROLADOR PURAMENTE INTEGRAL.....	138
FIGURA 4.12 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTRALADOR CON GANANCIA PURAMENTE INTEGRAL.....	139
FIGURA 4.13 TRAYECTORIA DE LAS RAICES APLICANDO CONTROLADOR CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL.....	141
FIGURA 4.14 SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN.....	142
FIGURA 4.15 REGIÓN PARA LIMITES DE SOBRENIVEL PORCENTUAL SP Y TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN T_s	144

FIGURA 4.16 RESTRICCIONES PARA TS <200 Y SP < 4%.	145
FIGURA 4.17 RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA ENTRADA ESCALÓN.	147
FIGURA 4.18 SISTEMA DE CONTROL CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL PI.	148
FIGURA 4.19 SISTEMA DE CONTROL CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL PI.	148
FIGURA 4.20 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON FUNCIÓN F(S) A LA ENTRADA.	150
FIGURA 4.21 ADICIÓN DE FUNCIÓN F(S).	151
FIGURA 4.22 RESPUESTA DEL SISTEMA INCORPORANDO FUNCIÓN F(S).	152
FIGURA 4.23 ESQUEMA EN BLOQUES DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.	154
FIGURA 4.24 LAZO DE SIMULACIÓN.	156
FIGURA 4.25 CUADRO DE DIALOGO PARA CONFIGURACIÓN DE LAZO DE SIMULACIÓN.	157
FIGURA 4.26 ESQUEMA DE SIMULACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.	158
FIGURA 4.27 RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE UNA ENTRADA ESCALÓN CON VALOR FINAL 32cm.	159
FIGURA 4.28 SEÑAL DE SALIDA DEL CONTROLADOR PARA UNA REFERENCIA DE 32cm.	160
FIGURA 4.29 CUADRO DE DIALOGO PARA CONFIGURACIÓN DE LAZO DE SIMULACIÓN.	162
FIGURA 4.30 CONFIGURACIÓN INTERNA DE CADA VI DENTRO DEL LAZO DE SIMULACIÓN.	163
FIGURA 4.31 LECTURA O ADQUISICIÓN DE VARIABLE MEDIDA EN LA PLANTA.	164
FIGURA 4.32 FUNCIÓN PID.	165

FIGURA 4.33 SUBVI PID1	166
FIGURA 4.34 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SUB-VI PID1.	167
FIGURA 4.35 CONFIGURACIÓN DE CONTROLADOR PID.	168
FIGURA 4.36 ESCRITURA O GENERACIÓN DE SEÑAL DE CONTROL.	169
FIGURA 4.37 SEÑAL DIGITAL DE ENCENDIDO Y APAGADO DE VARIADOR DE VELOCIDAD.	170
FIGURA 4.38 RESPUESTA DE LA PLANTA DE CONTROL DE NIVEL IMPLEMENTADA CON LABVIEW.....	172
FIGURA 5.1 GRÁFICO DE HISTERESIS DE TRANSMISOR DE PRESIÓN.	182
FIGURA 5.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS.	184
FIGURA 5.3 ESQUEMA EN BLOQUES DE SISTEMA VARIADOR DE VELOCIDAD BOMBA.	185
FIGURA 5.4 SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA DE UN SISTEMA.....	189
FIGURA 5.6 CONTROLADOR ASCON XS.	193
FIGURA 5.7 A) CONEXIÓN DE SEÑAL DE ENTRADA EN mA B) CONEXIÓN DE SEÑAL DE SALIDA 0/10V CONTINUOS.....	194

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	PARÁMETROS DE AJUSTE DE ACUERDO AL MÉTODO DE OSCILACIÓN.....	22
Tabla 1.2	PARÁMETROS DE AJUSTE PARA MÉTODO DE CURVA DE REACCIÓN.....	26
Tabla 2.1	RANGO DE VOLTAJE DE ENTRADA Y PRECISIÓN ACORDE A LA GANANCIA SELECCIONADA.....	54
Tabla 3.1	RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CONTANTE C.....	90
Tabla 5.1	DATOS DE MEDICIONES DE TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PARA SU CALIBRACIÓN.....	178
Tabla 5.2	ERROR ALEATORIO Y SISTEMÁTICO.....	179
Tabla 5.3	DATOS DE CORRIENTE A LA SALIDA DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.....	181
Tabla 5.4	DATOS DE HISTERESIS.	181
Tabla 5.5	RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CONTROLADOR.....	192

INTRODUCCIÓN

A medida del paso de los años se ha hecho cada vez más imprescindible el estudio y la medición de las variables físicas que nos rodean, para su posterior tratamiento ya sea para la automatización o control de los sistemas. Pero más común y necesario aun se ha vuelto el uso de métodos basados en software ya sea para monitoreo o control de dichos sistemas. El tema que aquí presentamos se denomina diseño y construcción de un modulo orientado al desarrollo de prácticas de instrumentación industrial bajo la plataforma LabVIEW.

El objetivo principal de este trabajo es la creación de un modulo o equipo en el cual se facilite el estudio de sistemas reales de instrumentación y control mediante el uso de software. En este caso se selecciona el uso del software LabVIEW, por su amplio desempeño para el análisis, diseño y control de sistemas, y que además hoy en día se difunde ampliamente. Específicamente con este trabajo se pretende la implementación de medios para realizaciones de pruebas de adquisición y generación de datos, manejando interfases entre un medio real y un medio computarizado, lo cual permita el monitoreo y control de variables físicas reales, todo esto bajo el entorno de un software como es LabVIEW.

Para llevar a cabo estos objetivos planteamos la creación de una planta de control de nivel en la cual desarrollemos un ambiente propicio para la medición de una variable física, uso de controladores, y manejo de equipos para control.

El procedimiento que seguiremos dentro de la realización de este trabajo comprende la correcta selección de equipos para el diseño y construcción de la planta, el análisis del comportamiento de esta mediante la identificación del modelo que la rige, diseño de una estructura para controlar su funcionamiento y comprobación de esta, todo esto como ya se mencionó bajo un entorno basado en software.

CAPÍTULO 1

1. CONCEPTOS TEÓRICOS.

1.1 Medición de Nivel.

En la industria la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento correcto del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

La utilización de instrumentos electrónicos con microprocesadores en las medidas de otras variables, tales como presión y la temperatura, permite añadir “inteligencia” en la medida del nivel, y obtener precisión de lectura altas, del orden de $\pm 0,2\%$, en el inventario de materias primas o finales o en transformación en los tanques del proceso [1].

Los instrumentos de nivel pueden dividirse en medidores de nivel de líquidos y sólidos, que son dos mediciones claramente diferenciadas y que se deben estudiar separadamente por sus distintas peculiaridades y las aplicaciones particulares de las que son objeto.

1.1.1 Medición de nivel de líquidos.

Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo, bien directamente la altura de líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los primeros instrumentos de medida directa se dividen en: sonda, cinta y plomada, nivel de cristal e instrumentos de flotador [1].

Los aparatos que miden el nivel aprovechando la presión hidrostática se dividen en:

- Medidor manométrico.
- Medidor de membrana.
- Medido de tipo burbujeo.
- Medidor de presión diferencial de diafragma.

El empuje producido por el propio líquido lo aprovecha el medidor de desplazamiento a barra de torsión. Los instrumentos que utilizan características eléctricas del líquido se clasifican en:

- Medidor resistivo.
- Medidor conductivo.
- Medidor capacitivo.
- Medidor ultrasónico.
- Medidor de radiación.
- Medidor de láser.

1.1.1.1 Medición de nivel basada en presión hidrostática.

La presión es una fuerza aplicada a una superficie o distribuida sobre ella. La presión P ejercida por una

fuerza F y distribuida sobre un área A se define mediante la relación.

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

La presión podrá expresarse en muy diversas unidades, tales como: kg/cm^2 , psi, centímetros (cm) de columna de agua, pulgadas o cm de Mercurio (Hg), bar y como ha sido denominada en términos internacionales, en Pascales (Pa), como la medida estándar según la 3ra Conferencia General de la Organización de Metrología Legal.

Los elementos primarios de medición de presión son fundamentalmente de tres tipos: Elementos Mecánicos, Elementos Electromecánicos y Elementos Eléctricos.

Elementos electromecánicos.

Los elementos electromecánicos utilizan un elemento mecánico elástico en combinación con un transductor eléctrico el cual genera una señal eléctrica de salida. El

elemento mecánico convierte la presión a medir en una fuerza o en un desplazamiento el cual es detectado con el transductor eléctrico.

Dentro de la clasificación de los transductores y/o transmisores utilizados en los elementos electromecánicos se encuentran los Resistivos o Potenciométricos, Magnéticos, Capacitivos, Extensométricos, Piezoeléctricos, Transmisores de equilibrio de fuerza y de Estado sólido.

Transductores piezoeléctricos.

Estos elementos eléctricos, mostrados en la figura 1.1, son materiales cristalinos que al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. La señal de respuesta varía en forma lineal con la presión de entrada, son adecuados para medidas dinámicas ya que son capaces de responder a frecuencias del orden de 1MHz. Son elementos pequeños de construcción robusta sin embargo son

sensibles a cambios de temperatura; requiere de amplificadores.

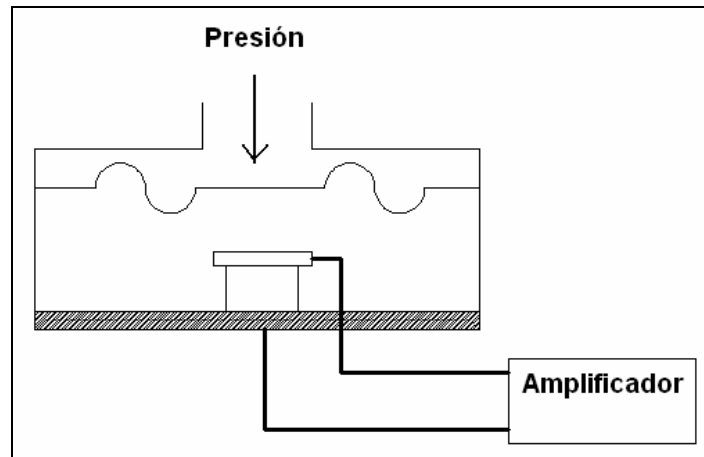


FIGURA 1.1 ESQUEMA DE UN TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO.

1.2 Controladores PID.

Las estrategias de control PID; Proporcional, Integral, Derivativa, se incorporan en el ambiente industrial en el primer cuarto de este siglo, con un esquema de ajuste puramente empírico. En la actualidad, y pese al sorprendente desarrollo de la teoría de control y del soporte tecnológico necesario para su implementación, el controlador de estructura PID se emplea casi con exclusividad en el ambiente

industrial de todo el mundo, en particular para controlar procesos térmicos y químicos.

La asimilación de los controladores PID en el ámbito industrial a llegado a un grado tal que permite observar el siguiente hecho en apariencia contradictorio: por una parte los usuarios se resisten a todo reemplazo del controlador PID por controladores que presenten una estructura diferente (por más simple y robusta que esta sea), y por otro lado se aceptan controladores adaptables sofisticados si estos vienen bajo una empaquetadura PID.

Probablemente es debido a esta razón que en los últimos años varios grupos que se encuentran en la vanguardia de la investigación han invertido un considerable esfuerzo en el desarrollo de nuevos algoritmos de control basados en estructuras PID.

El controlador PID surge como consecuencia de la combinación de tres acciones básicas de control; acción proporcional, integral y derivativa, cuyos efectos ya eran conocidos a principios de siglo.

1.2.1 Estructura de un Controlador PID.

El diagrama a continuación representa un lazo de control simple, de una entrada y una salida, en donde $G(s)$ representa la función de transferencia de la planta a controlar, y el bloque PID la función de transferencia del controlador; siendo $R(s)$ y $Y(s)$ las entradas y salidas respectiva de nuestro sistema.

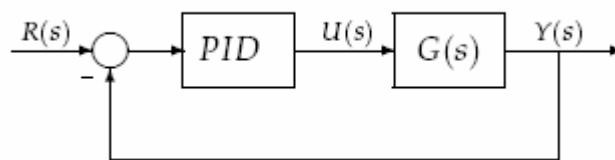


FIGURA 1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON CONTROLADOR PID.

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID [2].

1.2.1.1 Acción de control proporcional.

Da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir $u(t) = K_P \cdot e(t)$, que descripta desde su

función de transferencia queda como se muestra en la ecuación 1.2.

$$C_p(s) = K_p \quad (1.2)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente [2].

1.2.1.2 Acción de control integral.

La acción de control integral da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

$$C_i = \frac{K_i}{s} \quad (1.4)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se

concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero [2].

1.2.1.3 Acción de control proporcional-integral.

La acción de control proporcional-integral se define mediante la ecuación 1.5.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

Donde T_i se denomina tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta:

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.6)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si el error es negativo la señal de control será decreciente. Este

razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero [2].

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón.

1.2.1.4 Acción de control proporcional-derivativa.

La acción de control proporcional-derivativa se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.7)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante de que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La

acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (1.8)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error de estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable [2].

1.2.1.5 Acción de control Proporcional-Integral-Derivativa.

Las acciones de control proporcional, integral y derivativa combinadas reúnen las ventajas de cada una de las tres

acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.9)$$

Y su función de transferencia resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.10)$$

1.2.2 Estructura de un Controlador PID Digital.

El controlador digital es básicamente un procesador digital que cada segundo resuelve un algoritmo recursivo (ecuación de diferencias). El diseño del controlador digital suele ser realizado empleando técnicas propias de los sistemas muestreados.

Potencialmente, estas técnicas permiten obtener controles más versátiles que los que se pueden conseguir con compensadores analógicos. Sin embargo, existen aplicaciones donde los controladores analógicos han demostrado trabajar satisfactoriamente, razón por la cual en muchas de estas

aplicaciones se prefiere diseñar los controladores digitales directamente como una aproximación de los controladores analógicos. Este es, por ejemplo, el caso del controlador PID cuya implementación digital es solo una aproximación numérica de su ecuación integro-diferencial, ecuación 1.10.

Los controladores digitales se basan en aproximaciones numéricas más comúnmente empleadas para discretizar la ecuación diferencial de un sistema analógico son:

- Regla rectangular hacia adelante o de Euler.
- Regla rectangular hacia atrás.
- Regla trapezoidal o de Tustin.

Estas reglas pueden interpretarse directamente en relación con las acciones integral y derivativa del controlador PID.

En este capítulo se estudiarán los algoritmos utilizados por la plataforma LabVIEW para el control PID de procesos.

El control Integral se realiza a través de la regla trapezoidal, según esta regla, la integral es aproximada por la ecuación 1.11, observar figura 1.3.

$$u_{nT} \cong \left(\frac{T}{2}\right) \sum_{i=0}^n [e_{(i-1)T} + e_{iT}] \quad (1.11)$$

Luego:

$$u_{nT} \cong u_{(n-1)T} + \frac{T}{2} [e_{nT} + e_{(n-1)T}] \quad (1.12)$$

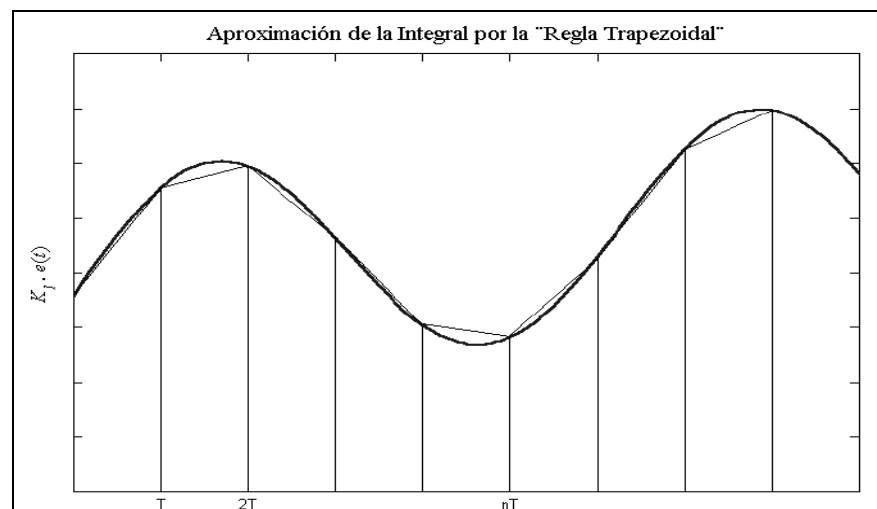


FIGURA 1.3 APROXIMACIÓN DE LA INTEGRAL POR REGLA DEL TRAPECIO.

Esta regla, ecuación 1.12, utiliza para el cálculo de la integral en el instante actual, el resultado de la integral en el paso previo

$(u(n-1)T)$ y los valores actual (enT) y previo $(e(n-1)T)$ de la señal.

El control de nivel aquí implementado será desarrollado bajo la plataforma de LabVIEW, el cual es un revolucionario entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida y presentaciones de datos. Además presenta la flexibilidad de un potente ambiente de programación, pero mucho más sencillo que los entornos tradicionales. En el caso del control diferencial, LabVIEW se basa en la diferencia hacia atrás, esta es la aproximación más difundida para aproximar la derivada de una señal. La misma que está dada por la ecuación 1.13.

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e(t) - e(t-T)}{T} \quad (1.13)$$

$$\left. \frac{de(t)}{dt} \right|_{t=nT} \cong \frac{e_{nT} - e_{(n-1)T}}{T} \quad (1.14)$$

La expresión de la ecuación 1.14 solo requiere, para aproximar el valor de la derivada de una señal en un dado instante de

A partir de las expresiones anteriores puede obtenerse la función de transferencia aproximada del sistema a discretizar y a partir de ésta la ecuación de diferencias del sistema digital.

Obviamente, todas las aproximaciones son válidas y presentan un comportamiento similar en la medida que el período de muestreo es chico frente a la dinámica del proceso a controlar; condición que suele verificarse en procesos industriales.

1.2.3 Métodos clásicos de ajuste de Ziegler y Nichols.

En esta sección se describen dos métodos de ajuste de las ganancias de un controlador PID, el Método de Oscilación o Método de Respuesta en Frecuencia y el Método Basado en la Curva Reacción o Método de Respuesta al Escalón. El primer método se basa en un lazo de control sólo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al período de esas oscilaciones, podemos establecer las ganancias del controlador PID. El segundo método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto aplicando una señal de referencia de tipo escalón

unitario. Así se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos se establecen las ganancias del controlador PID. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler y Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos [2].

Método de Oscilación.

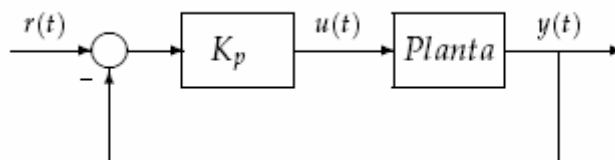


FIGURA 1.5 LAZO CERRADO SOLO CON GANANCIA PROPORCIONAL.

Este procedimiento es válido solo para plantas estables a lazo abierto y se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Utilizando sólo control proporcional, comenzando con un valor de ganancia pequeño, incrementar la ganancia hasta que el lazo comience a oscilar. Notar que se requieren oscilaciones lineales y que éstas deben ser observadas en la salida del controlador.

- Registrar la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación de la salida del controlador, P_c . (en el diagrama de Nyquist, corresponde a que $K_c G(j)$ cruza el punto $(-1, 0)$ cuando $K_p = K_c$).
- Ajustar los parámetros del controlador según la Tabla 1.

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$		
PI	$0.45K_c$	$\frac{P_c}{1.2}$	
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Tabla 1.1 PARÁMETROS DE AJUSTE DE ACUERDO AL MÉTODO DE OSCILACIÓN.

Los datos mostrados en la Tabla 1.1 fueron obtenidos por Ziegler y Nichols quienes buscaban una respuesta al escalón de bajo amortiguamiento para plantas que puedan describirse satisfactoriamente por un modelo de la forma:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-st_0}}{v_0 s + 1} \quad (1.18)$$

Donde $v_0 > 0$

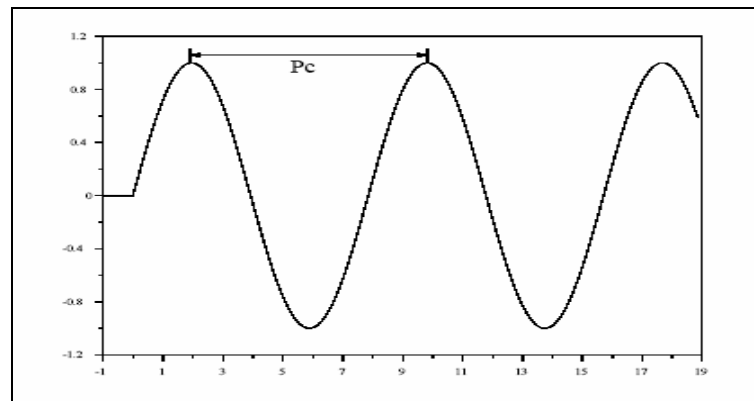


FIGURA 1.6 RESPUESTA DE PLANTA CON GANANCIA CRÍTICA.

Método basado en la curva de reacción.

Muchas plantas, pueden ser descritas satisfactoriamente por el modelo:

$$G_0(s) = \frac{K_0 e^{-st_0}}{v_0 s + 1} \quad (1.19)$$

Donde $v_0 > 0$

Una versión cuantitativa lineal de este modelo puede ser obtenida mediante un experimento a lazo abierto, utilizando el siguiente procedimiento:

- Con la planta a lazo abierto, llevar a la planta a un punto de operación normal. Digamos que la salida de la planta se estabiliza en $y(t) = y_0$ para una entrada constante $u(t) = u_0$.
- En el instante inicial t_0 , aplicar un cambio en la entrada escalón, desde u_0 a u_1 (esto debería ser en un rango de 10% al 20% de rango completo).
- Registrar la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación. Supongamos que la curva que se obtiene es la que se muestra en la Figura 1.2.6. Esta curva se llama curva de reacción del proceso.

Calcular los parámetros del modelo de la siguiente forma:

$$K_0 = \frac{y_\infty - y_0}{y_\infty - u_0} \qquad \tau_0 = t_1 - t_0 \qquad v_0 = t_2 - t_1$$

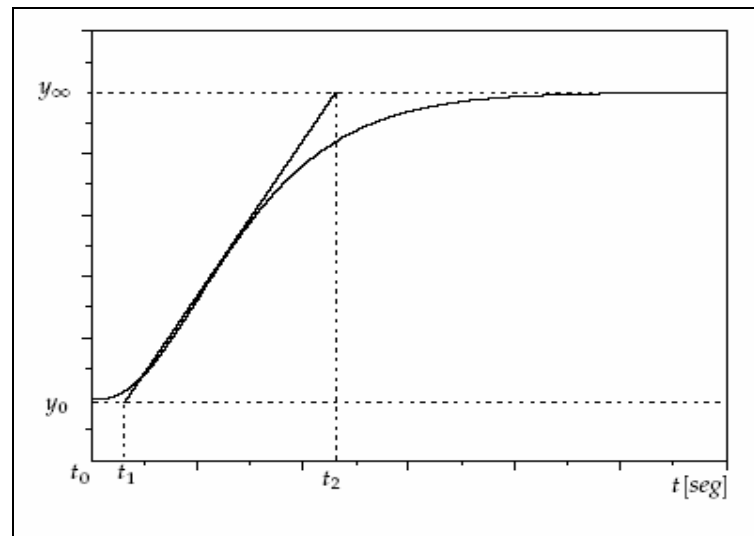


FIGURA 1.7 RESPUESTA DE UNA PLANTA ANTE APLICACIÓN DE SEÑAL ESCALÓN.

El modelo obtenido puede ser utilizado para varios métodos de ajuste de controladores PID. Uno de estos también fue propuesto por Ziegler y Nichols. El objetivo de diseño es alcanzar un amortiguamiento tal que exista una relación de 4:1 para el primer y segundo pico de la respuesta a una referencia escalón. Los parámetros sugeridos por Ziegler y Nichols son los que se muestran en la Tabla 1.2.

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{v_0}{K_0\tau_0}$		
PI	$\frac{0.9v_0}{K_0\tau_0}$	$3\tau_0$	
PID	$\frac{1.2v_0}{K_0\tau_0}$	$2\tau_0$	$0.5\tau_0$

Tabla 1.2 PARÁMETROS DE AJUSTE PARA MÉTODO DE CURVA DE REACCIÓN.

Método Lugar geométrico de las raíces (LGR).

El lugar geométrico de las raíces, es el lugar geométrico de valores de s para el cual $1 + K.G(s) = 0$ se cumple, ya que el parámetro K (real) varía desde cero a infinito. Por lo general, $1 + K.G(s)$ es el denominador de una función de transferencia de interés, de modo que las raíces en el lugar geométrico son polos en lazo cerrado del sistema [4].

Consideremos una función de lazo cerrado $G(s)$ representa todas las posiciones posibles de los polos de lazo cerrado de un sistema con ganancia proporcional K y realimentación unitaria.

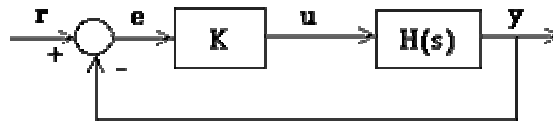


FIGURA 1.8 DIAGRAMA DE LAZO CERRADO.

La función de transferencia de lazo cerrado será así:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)} \quad (1.20)$$

De este modo, los polos de lazo cerrado del sistema son aquellos que verifican la ecuación $1 + KG(s) = 0$. Si se expresa $G(s) = b(s)/a(s)$, la ecuación anterior tendrá la forma:

$$a(s) + Kb(s) = 0 \quad (1.21)$$

Donde n es el orden de $a(s)$ y m el orden de $b(s)$.

Serán considerados todos los valores positivos de K . En el límite, a medida que K tiende a cero, los polos del sistema de lazo cerrado son $a(s) = 0$, es decir, los polos de $G(s)$ (polos de lazo abierto). Cuando K tiende a infinito, los polos de lazo cerrado verifican $b(s) = 0$, es decir, son los ceros de $G(s)$ (ceros de lazo cerrado).

Independientemente del valor de K seleccionado, el sistema de lazo cerrado deberá poseer siempre n polos, donde n es el número de polos de $G(s)$. El L.G.R. deberá tener n ramas, y cada una de ellas se inicia en un polo de $G(s)$ y termina en un cero de $G(s)$. Si $G(s)$ posee mayor cantidad de polos que ceros (como a menudo es el caso), $m < n$ y decimos así que $G(s)$ posee ceros en el infinito. En este caso, el límite de $G(s)$ cuando s tiende a infinito es igual a cero. El número de ceros en el infinito es igual a $n-m$, la diferencia entre los números de polos y ceros, y corresponde al número de ramas del L.G.R. que van hacia el infinito (asíntotas).

Considerando que el L.G.R. indica en realidad todas las posibles ubicaciones de los polos de lazo cerrado, del mismo podríamos seleccionar una ganancia tal de modo que nuestro sistema de lazo cerrado se comporte del modo deseado. Si alguno de los polos seleccionados se encuentra en el semiplano derecho, el sistema será inestable. Los polos que se encuentran más cercanos al eje imaginario poseen gran influencia en la respuesta de lazo cerrado, de modo tal que, aun cuando un sistema posea 3 o 4 polos, el mismo podría comportarse como

un sistema de primer o segundo orden, dependiendo de la ubicación de los polos (o el polo) dominante.

1.3 Actuadores.

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica o gaseosa. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da una salida necesaria para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas.

Existen tres tipos de actuadores:

- Hidráulicos
- Neumáticos
- Eléctricos

Los actuadores hidráulicos, neumáticos y eléctricos son usados para manejar aparatos mecatrónicos. Por lo general, los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, y los neumáticos son simplemente posicionamientos. Sin embargo, los hidráulicos requieren de demasiado equipo para suministro de energía, así como de mantenimiento periódico. Por otro lado, las

aplicaciones de los modelos neumáticos también son limitadas desde el punto de vista de precisión y mantenimiento.

Los actuadores eléctricos también son muy utilizados en los aparatos mecatrónicos como por ejemplo, en los robots. Los servomotores de corriente alterna CA sin escobillas se utilizarán en el futuro como actuadores de posicionamiento preciso debido a la demanda de funcionamiento sin tantas horas de mantenimiento.

Por todo esto, es necesario conocer muy bien las características de cada actuador para utilizarlo correctamente de acuerdo a su aplicación específica.

En el caso de la planta que aquí implementamos, el tipo de actuador que se utiliza es eléctrico, ya que se trata de un pequeño motor trifásico el cual se comportará como Bomba de agua, y se controlará el caudal de este a través de la conexión del motor con un variador de velocidad.

La estructura de un actuador eléctrico es simple en comparación con la de los actuadores hidráulicos y neumáticos, ya que sólo se requieren de energía eléctrica como fuente de poder. Como se utilizan cables eléctricos para transmitir electricidad y las señales, es altamente versátil y prácticamente no hay restricciones respecto a la distancia entre la fuente de poder y el actuador.

1.3.1 Regulación de caudal mediante un Sistema Variador de Velocidad – Bomba.

El sistema centrífugo presenta infinidad de ventajas con respecto a los otros tipos de bombeo; aseguran un tamaño reducido, un servicio relativamente silencioso y un fácil accionamiento con todos los tipos de motores eléctricos que se encuentran en plaza. Además presenta una fácil adaptación a todos los problemas del tratamiento de líquidos ya que, por medio de adaptaciones a las determinadas condiciones de uso, es capaz de responder a las exigencias de las instalaciones destinadas.

La característica principal de la bomba centrífuga es la de convertir la energía de una fuente de movimiento, el motor, primero en velocidad o energía cinética y después en energía de presión. El rol de una bomba es el aporte de energía al líquido bombeado (energía transformada luego en caudal y altura de elevación), según las características constructivas de la bomba misma y en relación con las necesidades específicas de la instalación. El funcionamiento es simple; dichas bombas usan el efecto centrífugo para mover el líquido y aumentar su presión. Dentro de una cámara hermética dotada de entrada y salida (tornillo sin fin o voluta) gira una rueda con paleta (rodete), el verdadero corazón de la bomba. El rodete es el elemento rodante de la bomba que convierte la energía del motor en energía cinética (la parte estática de la bomba, o sea la voluta, convierte, en cambio, la energía cinética en energía de presión). El rodete está, a su vez, fijado al eje bomba, ensamblado directamente al eje de transmisión del motor o acoplado a él por medio de acoplado rígido [5].

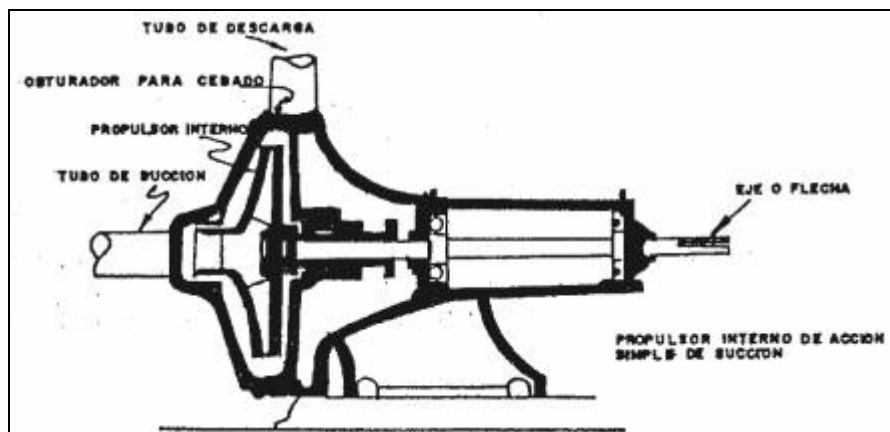


FIGURA 1.9 ESTRUCTURA DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA.

Cuando entra líquido dentro del cuerpo de la bomba, el rodete alimentado por el motor, proyecta el fluido a la zona externa del cuerpo-bomba debido a la fuerza centrífuga producida por la velocidad del rodete; el líquido, de esta manera, almacena una energía (potencial) que se transformará en caudal y altura de elevación o energía cinética. Este movimiento centrífugo provoca, al mismo tiempo, una depresión capaz de aspirar el fluido que se debe bombear. Conectando después la bomba con la tubería de descarga, el líquido se encanalará fácilmente, llegando fuera de la bomba.

Es necesario tener muy claro los siguientes términos al momento de hablar de sistemas centrífugos:

Caudal.- Cantidad de líquido (en volumen o en peso) que se debe bombear, trasladar o elevar en un cierto intervalo de tiempo por una bomba, normalmente expresada en litros por segundo (l/s), litros por minuto (l/min) o metros cúbicos por hora (m^3/h). Símbolo: Q.

Altura de elevación.- Altura de elevación de un líquido. El bombeo sobreentiende la elevación de un líquido de un nivel más bajo a un nivel más alto. Expresado en metros de columna de líquido o en Bar (presión). En este último caso el líquido bombeado no supera ningún desnivel, sino que va erogado exclusivamente a nivel del suelo a una presión determinada. Símbolo: H.

Pero ahora, el motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asíncrono depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia. El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia. No se requieren motores especiales, son mucho más eficientes y tienen precios cada vez más competitivos.

El variador de velocidad regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

Los variadores de velocidad están compuestos por una etapa rectificadora, la cual convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc. Luego pasa por un filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

El Inversor, convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Transistores Bipolares de compuerta aislada) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador.

CAPÍTULO 2

2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

2.1 Montaje de la Planta.

La operación de la planta de control de nivel consiste en el control de nivel de un líquido en un tanque por medio de un controlador diseñado con las herramientas del software LabVIEW. El controlador esta diseñado para ejecutarse en un computador mediante el uso de las herramientas del software LabVIEW.

El tanque en el cual se va a realizar el control de nivel es alimentado a través de una bomba centrífuga, la cual esta conectada con un variador de velocidad que a su vez permite variar el caudal que esta bomba entrega al tanque. La medición del nivel de líquido en el tanque es realizada a través de un transmisor de presión, la señal emitida por el transmisor de presión se realimenta al controlador

cargado en el computador mediante una tarjeta de adquisición de datos.

El controlador al recibir la señal de medición de nivel, compara el valor de esta señal con una señal de referencia establecida por el usuario mediante software, realiza la operación de control necesaria de acuerdo al resultado obtenido por la comparación y envía una señal de control hacia el actuador de la planta. El actuador de la planta esta representado por la combinación de la bomba con el variador de velocidad, es así que el controlador actúa directamente sobre una entrada de control de el variador de velocidad para de este modo variar el caudal de entrega al tanque y por consiguiente el nivel de líquido en el mismo.

La perturbación del sistema, que sirve para observar la capacidad de respuesta de la planta, esta a cargo de una válvula proporcional que simula el caudal de consumo del tanque. Variando la apertura de esta válvula logramos perturbar el sistema, y observar la respuesta del mismo. La figura 2.1 muestra el esquema de la planta de control de nivel.

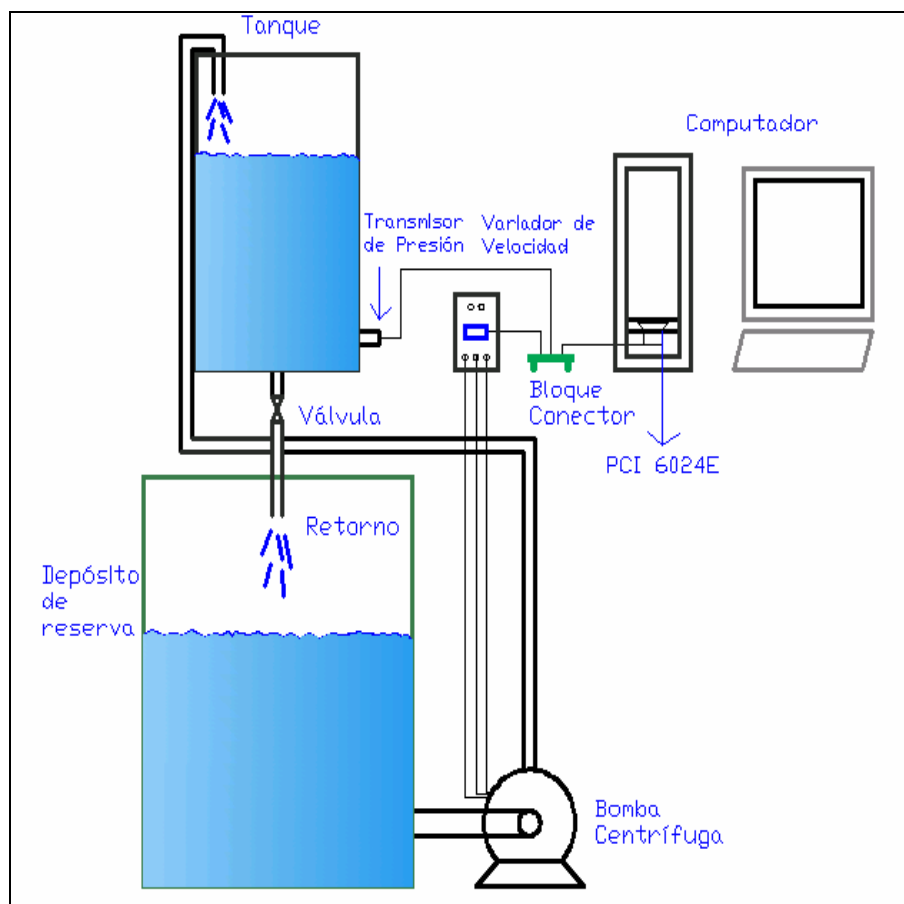


FIGURA 2.1 ESQUEMA DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

En la figura 2.2 podemos observar un diagrama de bloques general de la planta de control de nivel. En el lado izquierdo tenemos la señal de Referencia la cual nos indica el valor al cual deseamos opere la planta, e representa la diferencia entre la señal de Referencia y la variable real medida, u representa la señal actuante sobre la planta, H_P representa la variable que medimos en la planta que en este caso es la presión manométrica y que es proporcional al nivel de líquido en el tanque, H_I representa la señal de corriente que genera el

transmisor de presión y que es proporcional al nivel de líquido en el tanque.

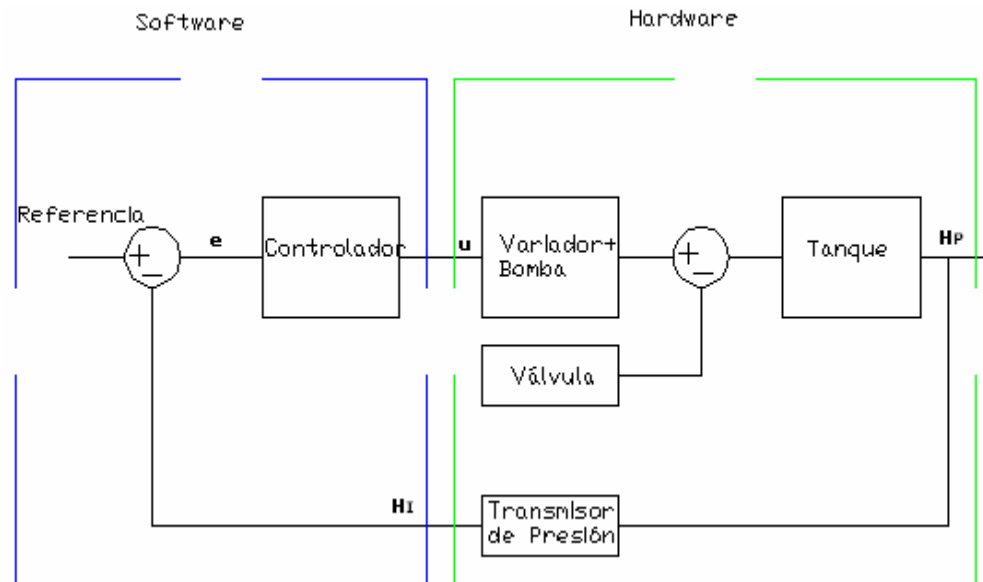


FIGURA 2.2 ESQUEMA EN BLOQUES GENERAL DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

Para el montaje de la planta de control de nivel se diseñó una estructura metálica con forma de mesa, la que llamaremos mesa de trabajo, que cuenta con un compartimiento en su parte inferior para así lograr ubicar los equipos tanto en la parte superior como inferior del mismo. Tanto el depósito de reserva como la bomba se encuentran ubicados en la parte inferior de la mesa de trabajo, mientras que el variador de velocidad y el tanque en conjunto con el transmisor de presión se encuentran ubicados en la parte superior de

la mesa de trabajo. En la figura 2.3 podemos observar la ubicación de los equipos de medición, control y demás accesorios de la planta.



FIGURA 2.3 DISPOSICIÓN FÍSICA DE EQUIPOS EN LA PLANTA.

2.2 Descripción de los componentes de la Planta.

2.2.1 Software LabVIEW.

LabVIEW es la plataforma bajo la cual se desarrolla el controlador de la planta de control de nivel, y además se realizan otras aplicaciones previas a la selección y ejecución del controlador. Dichas aplicaciones incluyen adquisición de datos, identificación de la planta, simulación, entre otras.

LabVIEW es un ambiente abierto diseñado para crear interfaces con hardware de medición simple, adquirir y generar datos desde dispositivos, entre otras aplicaciones que en conjunto con funciones especiales de análisis permiten realizar las mediciones necesarias desde distintos tipos de sensores. Es así que LabVIEW permite desarrollar una amplia gama de mediciones que van desde mediciones de Temperatura, Voltaje, Resistencia, Presión, y Corrientes. En la figura 2.4 se observa el panel frontal de una aplicación para la medición de la señal de voltaje proporcionada por un transmisor de presión.

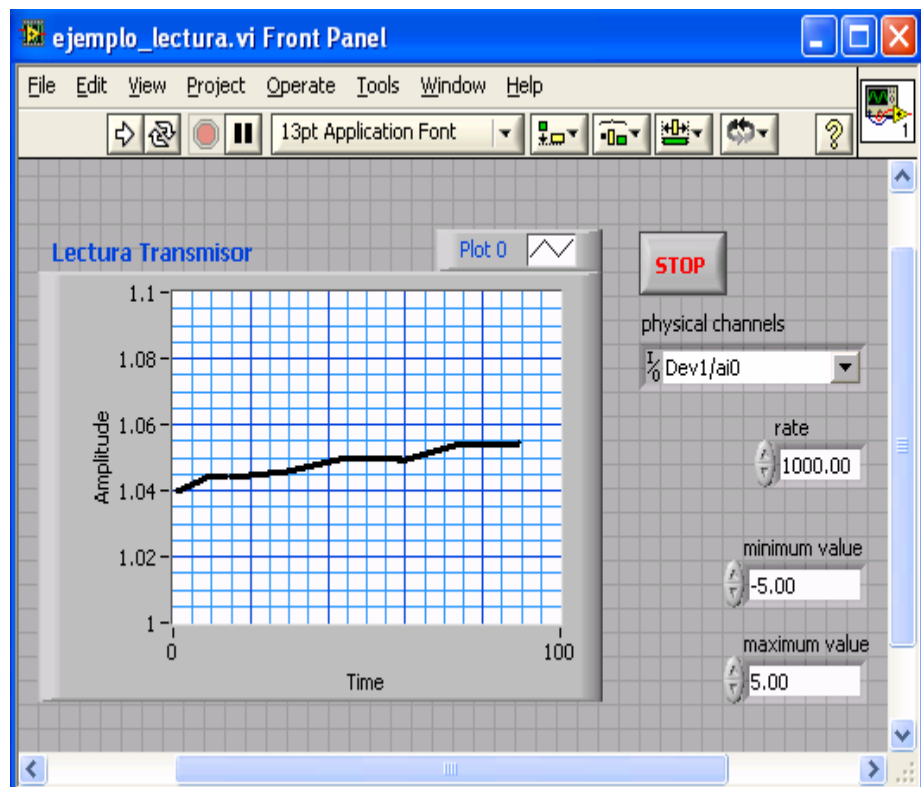


FIGURA 2.4 LECTURA DE SEÑAL DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN.

El software LabVIEW es de gran ayuda para el desarrollo de este proyecto ya que provee funciones que permiten manipular, procesar, analizar señales, acciones básicas que forman parte de los principales requerimientos para las aplicaciones más modernas de control hoy en día.

LabVIEW también posee la capacidad de presentar los datos previamente adquiridos y analizados de una manera mucho

más eficiente y útil. Usando LabVIEW se pueden presentar los datos gráficamente de una manera muy diversa, por ejemplo usando indicadores gráficos, termómetros, visualizaciones 2D o 3D, se puede además configurar colores, tamaños de fuente, tipos de gráficos y más.

LabVIEW fue escogido para el desarrollo de este proyecto principalmente por ser un software flexible que sirve para diseñar y probar fácilmente aplicaciones, por su probada capacidad para aplicaciones en el área de monitoreo y control de instrumentos, conectividad, adquisición de datos entre otros. Por su facilidad de programación, al poseer un tipo de programación gráfica se facilita y ahorra mucho tiempo en programación. La facilidad con que se manejan los datos, al ser adquiridos, almacenados, y cargados dentro de las distintas aplicaciones es otra de las ventajas de usar LabVIEW. Sus asistentes y librerías con los denominados Instrumentos Virtuales, VI, facilitan en un gran porcentaje el trabajo en diferentes aplicaciones, ya que muchas funciones vienen completamente desarrolladas y listas para ser usadas.

2.2.1.1 System Identification.

El conjunto de herramientas de Identificación de Sistemas de LabVIEW provee librerías que contienen VI's y un asistente para desarrollar modelos de sistemas basados en un gran conjunto de datos. Los VI's y el asistente permiten completar un proceso real de identificación de sistemas, desde el análisis del set de datos hasta la validación del modelo identificado.

Sin necesidad de poseer un conocimiento básico de la programación en LabVIEW, se puede usar el Asistente de Identificación de Sistemas para identificar y validar modelos de sistemas de tiempo invariante partiendo de datos empíricos. Haciendo uso del Asistente de Identificación de Sistemas de LabVIEW, se puede cargar o adquirir un set de datos dentro del asistente, preprocesar los datos, estimar un modelo que describa el sistema, y luego validar la exactitud de dicho modelo. El Asistente de Identificación de Sistemas tiene ventanas en las cuales se puede inmediatamente visualizar el set de datos, los datos de respuesta, el

modelo estimado, los resultados de la validación y las ecuaciones matemáticas que describen el modelo. En la figura 2.5 podemos observar un ejemplo de una aplicación de identificación de sistema usando el Asistente de Identificación de Sistemas [6].

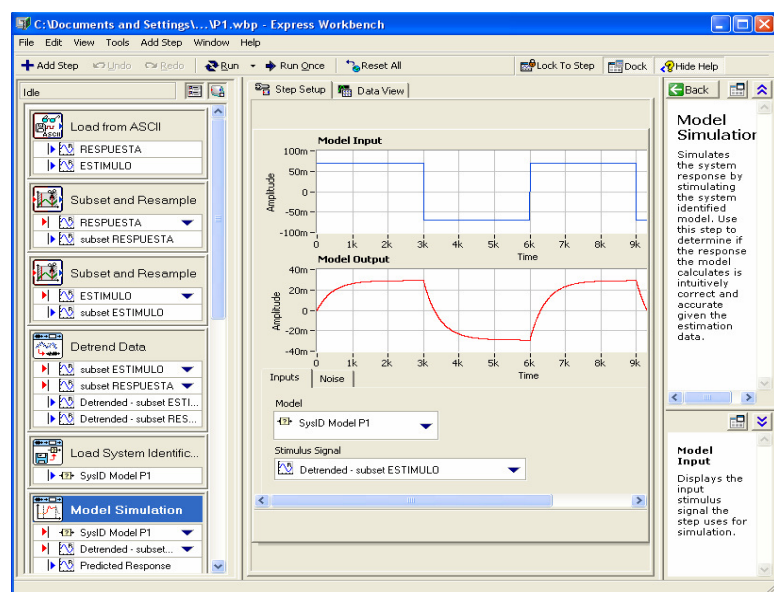


FIGURA 2.5 APLICACIÓN DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS CON EL ASISTENTE DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.

El conjunto de herramientas para Identificación de Sistemas también proveen VI's que se pueden utilizar para preprocesar un set de datos de un sistema dinámico, construir un modelo matemático que refleje el

comportamiento del sistema, y validar el modelo identificado. Los VI's del conjunto de herramientas de Identificación de Sistemas permiten personalizar un diagrama de bloques dentro del software LabVIEW. Además se pueden usar otros VI's y funciones de LabVIEW para mejorar la funcionalidad de la aplicación. A diferencia de crear un proyecto con el asistente, crear una aplicación con LabVIEW usando estos VI's requiere un conocimiento básico sobre la programación en LabVIEW. En la figura 2.6 podemos observar el conjunto de VI's para identificación de sistemas disponibles en el diagrama de bloques de LabVIEW.

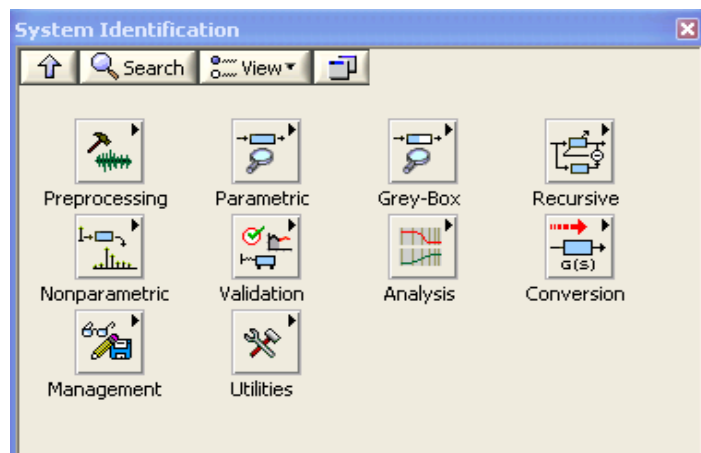


FIGURA 2.6 PALETA DE FUNCIONES DE LA HERRAMIENTA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.

2.2.1.2 Control Design.

El conjunto de herramientas de Diseño de Control provee VI's para técnicas de análisis y diseño de controles lineales clásicos y modernos. Con estos VI's se pueden crear y analizar modelos de sistemas lineales de tiempo invariante y además diseñar sistemas de control automático.

El conjunto de herramientas de Diseño de Control provee VI's que pueden ser usados para desarrollar modelos matemáticos, analizar los modelos para aprender acerca de las características dinámicas, y crear controladores para alcanzar ciertas características dinámicas. Al igual que las herramientas para Identificación de Sistemas las de Diseño de Control permiten personalizar diagramas de bloques para alcanzar objetivos específicos. En la figura 2.7 podemos observar el conjunto de VI's para Diseño de Control disponibles en el diagrama de bloques de LabVIEW [7].

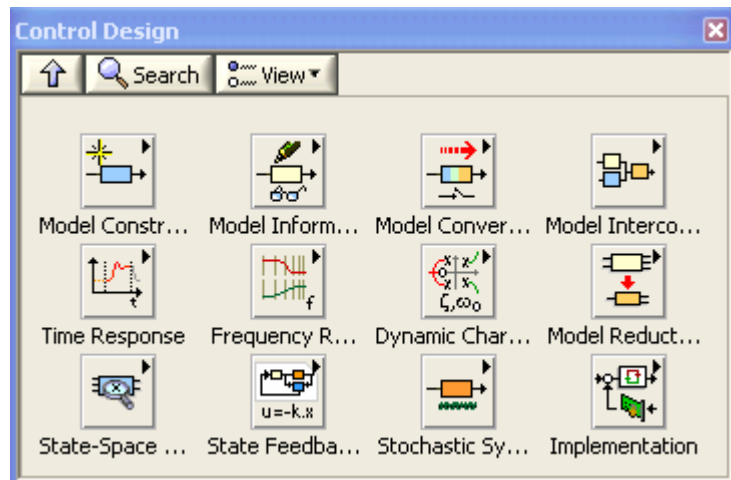


FIGURA 2.7 PALETA DE FUNCIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO DE CONTROL.

2.2.1.3 Simulation Module.

El conjunto de herramientas de Simulación integra simulación de sistemas con el ambiente de LabVIEW. Se pueden modelar sistemas lineales, no lineales, discretos y continuos. Crear modelos de bloques como integrales, derivadas y bloques de funciones de transferencia, además añadir gráficos y controles para probar los modelos. En la figura 2.8 podemos observar un ejemplo de las funciones y características de las funciones de la librería de Simulación [8].

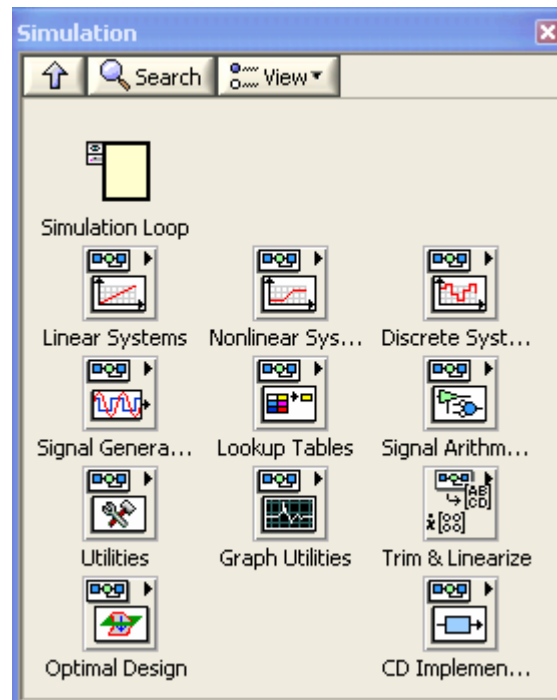


FIGURA 2.8 PALETA DE FUNCIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.

2.2.1.4 Workbench.

Workbench o NI Express Workbench es una ventana interactiva usada para medición y automatización. NI Express Workbench sirve para diseñar proyectos a base de escalones, que son diferentes funciones que varían de acuerdo a los asistentes instalados dentro de NI Express Workbench. Dos de los principales asistentes instalados son los de Identificación de

Sistemas y Diseño de Control, con estos asistentes instalados podemos ejecutar acciones como: Cargar o Guardar Señales, Escalar y Convertir Señales, Estimar un modelo matemático, Validar un modelo matemático, entre otras aplicaciones. En la figura 2.9 podemos observar un ejemplo de las funciones y características de la ventana de NI Express Workbench.

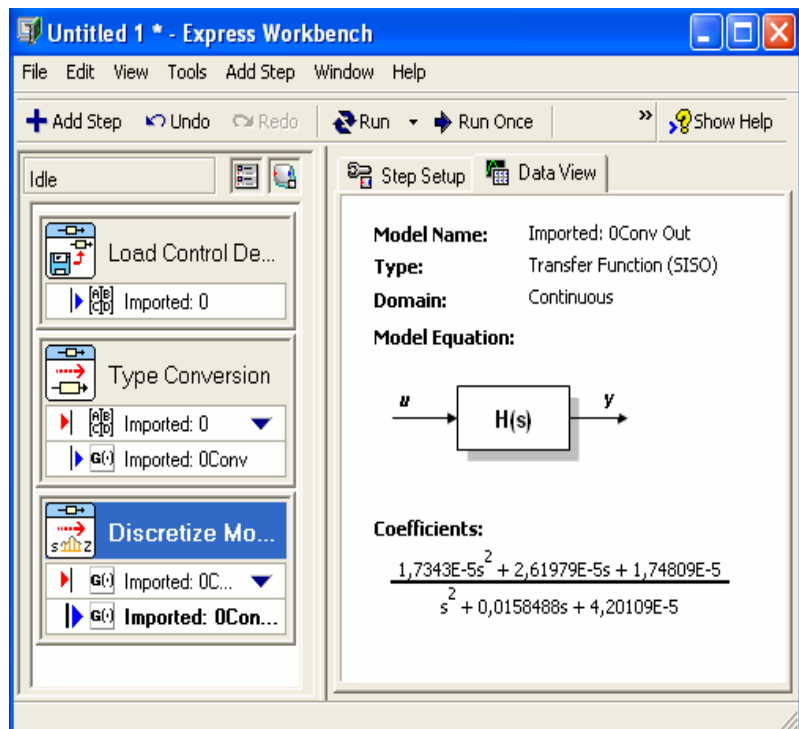


FIGURA 2.9 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE FUNCIONES DE NI EXPRESS WORKBENCH.

2.2.2 Tarjeta PCI 6024E.

La tarjeta PCI 6024E pertenece a las opciones de herramientas académicas que ofrece LabVIEW, está diseñada para aplicaciones de laboratorio y pruebas, sin embargo proporciona gran confiabilidad al alcanzar grandes tasas de velocidad de adquisición de datos. Estas tarjetas representan una opción económica para la puesta en uso dentro de laboratorios y para el desarrollo de aplicaciones a nivel estudiantil. Son compatibles con todos los sistemas operativos, además son de fácil instalación, requieren poco mantenimiento, solo se requiere un puerto PCI disponible dentro del computador para su instalación. La tarjeta PCI 6024E viene equipada con un bus de datos para transportación de las señales, y con un bloque conector CB-68LP para facilitar las conexiones externas. En la figura 2.10 observamos el juego completo que incluye la tarjeta de adquisición PCI 6024E, el cable R6868, y el bloque conector CB-68LP [9].

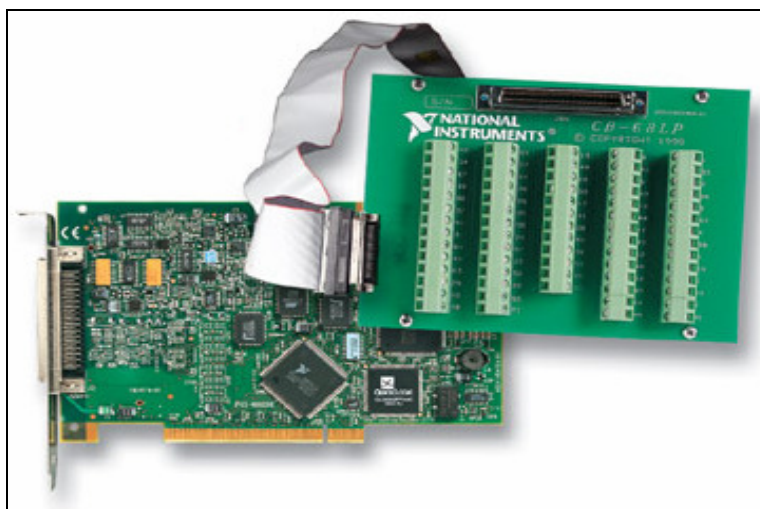


FIGURA 2.10 ACCESORIOS PCI6024E, R6868, CB-68LP.

La tarjeta PCI 6024E es una tarjeta de adquisición de datos que alcanza velocidades de hasta 200000 muestras por segundo, posee 16 canales de entrada analógica de 12 Bits, 2 canales de salida analógica, 8 líneas Entrada / Salida digital [9].

Estas tarjetas de adquisición de datos tienen un rango de entrada bipolar que cambia de acuerdo a una ganancia programada. Cada canal puede ser programado con una ganancia única de 0.5, 1.0, 10, o 100 para maximizar la resolución del convertidor análogo-digital de 12 bits. Con la configuración de ganancia apropiada se puede hacer uso de la resolución completa del convertidor analógico a digital ADC

para medir las señales de entrada. La Tabla 2.1 muestra el rango de entrada y la precisión de acuerdo a la ganancia usada.

Ganancia	Rango de Voltaje de Entrada	Precisión
0.5	-10 a 10 V	4.88 mV
1	-5 a 5 V	2.44 mV
10	-500 a 500 mV	244.14 μ V
100	-50 a 50 mV	24.41 μ V

Tabla 2.1 RANGO DE VOLTAJE DE ENTRADA Y PRECISIÓN ACORDE A GANANCIA SELECCIONADA.

Los tarjetas suministran 2 canales de salida de voltaje analógico en el conector de Entrada / Salida. El rango bipolar es de -10V hasta +10V. Los datos escritos al DAC, convertidor digital-analógico son interpretados en formato de complemento de dos.

Adicionalmente las tarjetas contienen 8 líneas de Entrada / Salida digital (DIO<0...7>) de propósito general. Individualmente se puede configurar cada línea ya sea como entrada o salida digital.

La tarjeta de adquisición de datos dentro de la planta de control de nivel se encarga de adquirir la señal que representa el valor de nivel de líquido en el tanque, y que es proporcionada por el transmisor de presión. Del mismo modo la tarjeta de adquisición de datos se encarga de generar la señal de salida del controlador ejecutado con el programa LabVIEW. Físicamente la tarjeta PCI 6024E esta alojada en el puerto PCI del computador. Las conexiones desde y hacia los distintos dispositivos se realizan en el bloque conector y las señales son enviadas hasta la tarjeta por medio del cable R6868. La equivalencia de los terminales de la tarjeta PCI 6024 E en el bloque conector CB68LP se muestran en el anexo A.

2.2.3 Computador.

Se trata de un computador de escritorio con los requerimientos básicos para la instalación del software LabVIEW versión 8.2, y los programas manejadores para el manejo de la tarjeta de adquisición PCI 6024E. En este computador se lleva a cabo la ejecución del programa de LabVIEW que contiene el controlador para la planta de control de nivel.

2.2.4 Tanque.

Se trata del tanque en el cual se va a realizar el control de nivel de un líquido. Este tanque está construido de vidrio de 6mm de espesor. Posee una base cuadrada de dimensión 30cm y una altura de 50cm. En la base se aplicó un orificio de $\frac{1}{2}$ " de diámetro para la conexión de una válvula, figura 2.11, que se utiliza para realizar las perturbaciones al sistema y para la recirculación del líquido. Del mismo modo en la cara lateral derecha, ubicada en la parte inferior de la misma se ha realizado un agujero de $\frac{1}{2}$ " de diámetro para la conexión del transmisor de presión, que es el encargado de realizar la medición de nivel en el tanque.



FIGURA 2.11 TANQUE PARA EL CONTROL DE NIVEL.

El líquido ingresa al tanque por la parte superior del mismo a través de una tubería de $\frac{1}{2}$ ", que transporta líquido desde un depósito de reserva ubicado en la parte inferior de la mesa. El líquido desalojado a través de la válvula conectada a la parte inferior del tanque, se hace retornar al depósito de reserva, de este modo se hace recircular el agua continuamente. Para asegurar el tanque a la mesa de trabajo se diseñaron soportes metálicos para el mismo, los cuales van atornillados a la mesa para prevenir una posible caída.

El material de este tanque fue escogido para realizarse en vidrio para visualmente tener una representación del nivel y de este modo poder hacer una mejor comparación de los datos obtenidos con el transmisor y lo que se observa, además al ser utilizado con un fin académico da una mejor presentación estética al sistema.

Las dimensiones del tanque se ajustaron tratando de cubrir el rango de operación de la bomba, pero al mismo tiempo existieron factores que influyeron como lo fueron el espacio, costo de fabricación del mismo y el hecho de ser un elemento

para uso didáctico. Si se sobredimensionaba el tanque ocuparía mucho espacio y además se incomodaría su traslado y uso.

Una de las limitaciones del uso de vidrio para la elaboración del tanque son las temperaturas de trabajo del líquido, la incomodidad al realizar el traslado del tanque fuera de la mesa ya que hay que tener mucha precaución y evitar una posible caída del mismo ya que sería peligroso el esparcimiento del vidrio en el lugar.

2.2.5 Transmisor de Presión.

Dentro de las soluciones para medición de nivel se cuenta en el mercado con una amplia variedad de sensores bien sean tipo ultrasónicos, medidores tipo capacitivos, transmisores de presión. Ya sea para cualquiera de estas soluciones se realizó un análisis comparativo entre las ventajas de los productos disponibles localmente, y a partir de eso se seleccionó un transmisor de presión para realizar la medición indirecta del nivel.

Entre las opciones se encontraba un medidor de nivel ultrasónico marca Omega, con muchas ventajas en cuanto a precisión y exactitud, con un rango de medición de 10 a 140 centímetros. Otra de las opciones disponibles era un transmisor de presión marca Siemens de la serie Sitrans P, con un rango de medición de 0 a 100 milibar. En ambos casos una de las principales desventajas era la no disponibilidad de los equipos localmente lo que aumentaba el ya elevado precio de los mismos al incluir gastos de importación.

Finalmente luego de realizar la búsqueda de más opciones se realizó la compra de un transmisor de presión PT5, marca WINTERS, Figura 2.12. Principalmente se escogió este transmisor por estar disponible localmente, y por el costo. Este transmisor es de fácil instalación, no requiere una circuitería de acondicionamiento complicada, una vez obtenida la señal de medición de presión a través de formulas matemáticas sencillas que relacionan la presión hidrostática con el nivel se calcula la medición en centímetros de nivel en el tanque.



FIGURA 2.12 TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PT5.

Conversión de la señal de corriente a la salida del transmisor de presión a unidades de longitud en centímetros.

Para hallar una relación matemática entre el valor de corriente transmitida por el transmisor de presión y el nivel del tanque debemos conocer el rango de trabajo del transmisor, el cual de acuerdo a los datos del fabricante [10], es como se observa en la figura 2.13.

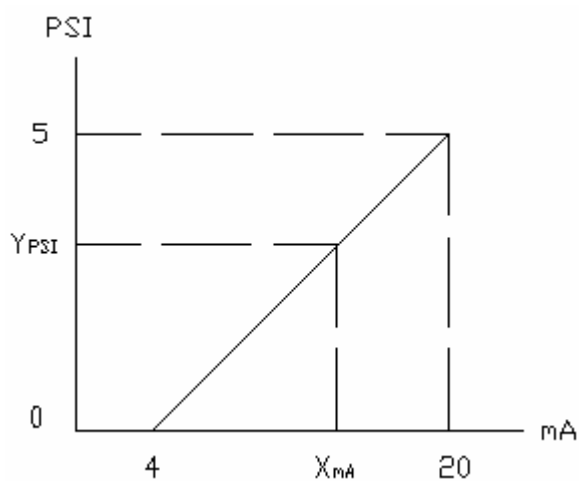


FIGURA 2.13 RANGO DE OPERACIÓN DE TRANSMISOR
WINTERS PT5.

De acuerdo a los datos de la figura 2.13 a un valor de 0 PSI de presión, lo que representa físicamente un nivel de 0cm, el transmisor debe marcar un valor de 4mA; y a un valor de 5 PSI de presión la salida del transmisor debe ser 20mA. Sin embargo al realizar la medición de este valor para las condiciones previamente descritas obtenemos una medición de 4.76mA y 20.81mA como valores mínimo y máximo de salida del transmisor. Esto quiere decir que para la conversión de miliamperios a centímetros debemos tomar en cuenta estos valores de medición.

Considerando dos puntos X_{mA} , y Y_{PSI} en los ejes de las ordenadas y las abscisas de la figura 2.13, y sacando una relación de pendientes tenemos lo siguiente:

$$\frac{Y_{PSI} - 0}{X_{mA} - 4.76} = \frac{5 - 0}{20.81 - 4.76} \quad (2.1)$$

Donde:

Y_{PSI} es el valor de presión en PSI medido por el transmisor, y X_{mA} es el valor de corriente en mA transmitido por el dispositivo.

Partiendo de la ecuación 2.1 tenemos que:

$$Y_{PSI} = \frac{5 * (X_{mA} - 4.76)}{(20.81 - 4.76)} \text{ [PSI]} \quad (2.2)$$

Llevando la ecuación 2.2 desde escala de PSI hasta escala de Pascal, N/m^2 , tenemos:

$$Y_{Pa} = \frac{5 * (X_{mA} - 4.76)}{(20.81 - 4.76)} \times \frac{10000}{1.45} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

Donde:

Y_{Pa} es el valor de presión medido en escala de Pascal.

Conociendo que la presión producida por una columna de un líquido de altura h , es igual al la densidad del líquido por la gravedad, por la altura de la columna del líquido tenemos que [11]:

$$Y_{pa} = \rho \times g \times h \quad (2.4)$$

Donde:

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, densidad del agua.

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$, gravedad.

$h =$ altura de columna de líquido en metros

Reemplazando estos valores dentro de la ecuación 2.4 obtenemos:

$$Y_{pa} = 1000 \times 9.8 \times h \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2] \quad (2.5)$$

Igualando la ecuación 2.3 con la ecuación 2.5 tenemos que :

$$1000 \times 9.8 \times h \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2] = \frac{5 * (X_{mA} - 4.76)}{(20.81 - 4.76)} \times \frac{10000}{1.45} \text{ [N/m}^2]$$

Resolviendo:

$$h = \frac{(X_{mA} - 4.76)}{(20.81 - 4.76)} \times 3.5186 \text{ [m]} \quad (2.6)$$

Resolviendo la ecuación 2.6 para llevarla a escala de centímetros tenemos:

$$h_{cm} = \frac{(X_{mA} - 4.76)}{(20.81 - 4.76)} \times 351.86 \text{ [cm]} \quad (2.7)$$

Donde h_{cm} representa la lectura del nivel en el tanque en cm.

Ya que la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E posee entradas de lectura de voltaje debemos convertir la medición de la señal de corriente a voltios, lo cual realizamos a través de la conexión de una resistencia R_L de valor 220 ohmios, lo cual se encuentra dentro del rango recomendado por el fabricante [10]. Adicionalmente el transmisor de presión requiere de una fuente externa de alimentación DC, que puede poseer un valor dentro del rango de 8 a 36 V, para la aplicación usamos una fuente externa de 12 V [10]. La terminal positiva de la fuente de alimentación se conecta al terminal numero 1 del transmisor de presión, mientras que la resistencia R_L de 220 ohmios se conecta entre la terminal numero 2 del transmisor de presión y el terminal negativo de la fuente de alimentación. La lectura de voltaje se realiza entre las terminales de la resistencia R_L , los

cuales conectamos a los terminales ACH0 y ACH8 de la tarjeta PCI 6024E. Finalmente la conexión del circuito del transmisor de presión a la tarjeta PCI 6024E queda como muestra la figura 2.14.

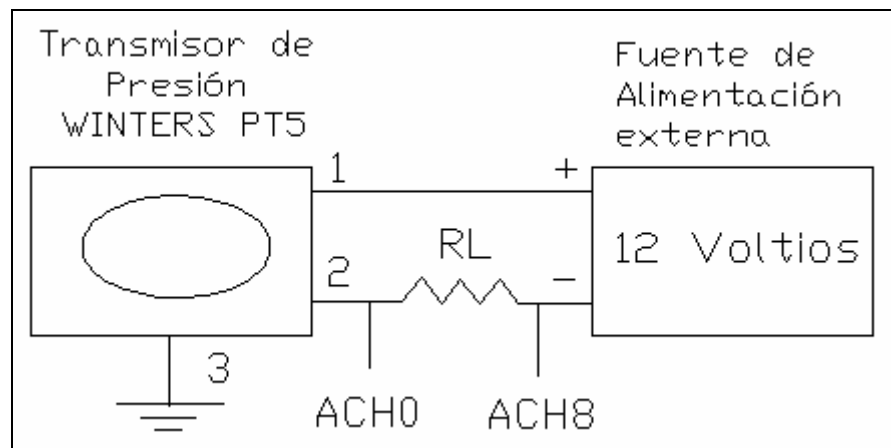


FIGURA 2.14 ESQUEMA DE CONEXIÓN DE LAS SALIDAS DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.

Así:

$$X_{mA} = \frac{V_{TRANS}}{R_L} \text{ [mA]} \quad (2.8)$$

Donde:

V_{TRANS} , es la lectura en voltios realizada en la resistencia, y

R_L , es la resistencia de realimentación del transmisor, cuyo valor es de 220 ohmios.

Entonces reemplazando la ecuación 2.8 en la ecuación 2.7 tenemos:

$$h_{cm} = \left[\frac{V_{TRANS}}{R_L} - 4.76 \right] \times \frac{351,86}{(20.81 - 4.76)} [\text{cm}] \quad (2.9)$$

Resolviendo la ecuación 2.9 y reemplazando R_L por el valor de 0.22kohm tenemos:

$$h_{cm} = 99.65V_{TRANS} - 104.35 [\text{cm}] \quad (2.10)$$

El transmisor de presión dentro de la planta de control de nivel es el encargado de censar y transmitir la señal de medición de nivel en el tanque. Se encuentra conectado a la parte inferior del tanque, figura 2.15. La señal de corriente proporcionada por el transmisor se hace pasar por una resistencia de 220 ohmios para la respectiva conversión de miliamperios a voltios, luego se envía al bloque conector CB68LP para así ser transmitida a la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E y procesada por el programa de control en el computador.



FIGURA 2.15 CONEXIÓN DE TRANSMISOR DE PRESIÓN AL TANQUE.

2.2.6 Sistema Variador de velocidad-Bomba.

Dentro de las soluciones disponibles para control el nivel del tanque escogimos la combinación de una bomba centrífuga con un variador de velocidad, para de este modo lograr la variación del caudal de entrada al tanque y con el la variación del nivel del mismo.

El costo de este sistema es relativamente alto, ya que al tratar de conseguir una bomba centrífuga adecuada surgieron algunos inconvenientes, primero debimos considerar la potencia de esta bomba, ya que no se podía considerar bombas que

manejaran un caudal muy grande debido a que el objetivo era alimentar un tanque de una capacidad limitada, un tanque para demostraciones y pruebas. De este modo se decidió buscar alternativas con bombas monofásicas, las cuales tienen un precio reducido, pero en el mercado no existe un controlador de velocidad para los mismos debido a la popularidad de los motores trifásicos. Finalmente optamos por la búsqueda de un bomba trifásica de poca capacidad que se ajuste a las necesidades, se realizó la compra de una bomba centrífuga trifásica de 0.5 HP, que es una de las de menores potencia a nivel comercial. Con esto en mente se realizó la búsqueda de un variador de velocidad que posea entrada de control para así realizar el control desde el computador.

El variador de velocidad SINAMICS G110 de la marca SIEMENS trabaja con control de tensión-frecuencia conectado a redes monofásicas desde 200 a 240 voltios [12]. La etapa de control de este variador de velocidad se compone de un accesorio denominado BOP (panel básico de operación) y de un bloque de terminales de control para distintos propósitos, figura 2.16. Para iniciar el trabajo con el variador de velocidad, por medio del BOP se deben configurar los datos de placa del

motor al cual se va a conectar el variador de velocidad. Además se deben configurar parámetros como la fuente de comandos, que especifica desde donde el variador de velocidad va a recibir los comandos para su operación. Dentro de las opciones de fuentes de comandos tenemos: enviar comandos desde el BOP, enviar los comandos desde el bloque de terminales de control y finalmente enviar los comandos desde una interfase [12]. Para el desarrollo de esta aplicación seleccionaremos la opción de enviar los comandos desde el bloque de terminales de control. Para mayor información de cómo configurar el variador de velocidad SINAMICS G110 revisar el anexo A.



FIGURA 2.16 VARIADOR DE VELOCIDAD SINAMICS G110.

La bomba a ser manejada con el variador de velocidad es una bomba centrífuga de la marca WEG-GRUNDFOS. La bomba centrífuga WEG-GRUNDFOS posee una potencia de 0.5 HP, alimentación trifásica de 220 V o 440V, y un caudal máximo de 18 galones por minuto, figura 2.17.



FIGURA 2.17 BOMBA CENTRÍFUGA WEG-GRUNDFOS.

Para llevar a cabo el accionamiento de la bomba manejada por el variador de velocidad, procedemos a alimentar el variador de velocidad con 220 V de línea a línea en las terminales L1 y L2/N, las terminales de salida U, V y W del variador de velocidad se conectan a las terminales de la bomba centrífuga. En este punto vale mencionar que la bomba centrífuga debe tener una conexión de sus bobinas en delta-delta menor, revisar

anexo A, conexión que corresponde a una alimentación de 220 V.

Una vez realizada las conexiones anteriores que corresponden a los circuitos de fuerza, figura 2.18, procedemos a las conexiones de los circuitos de control, las cuales involucran conexiones en el variador de velocidad procedentes de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E.

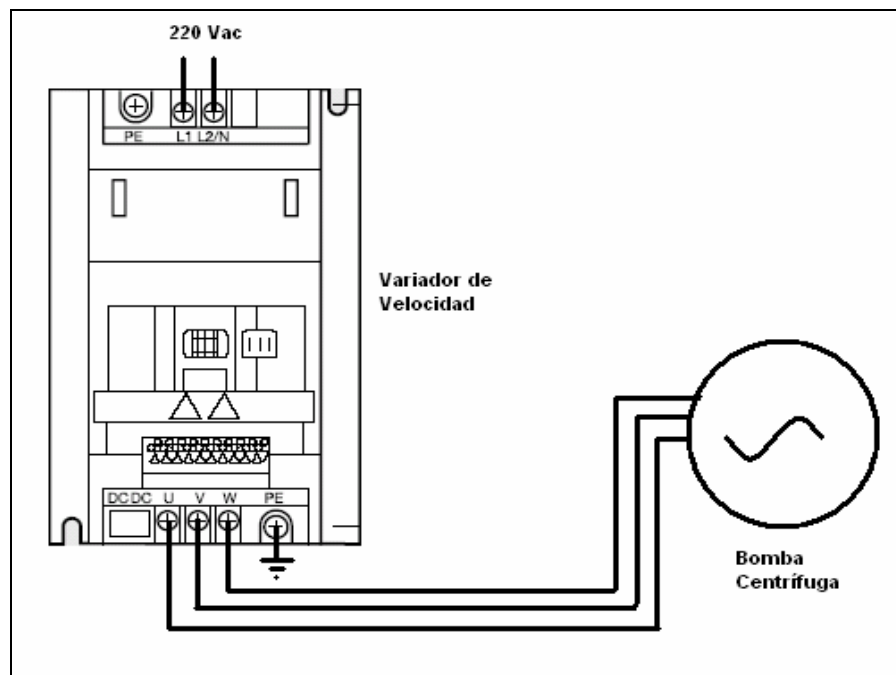


FIGURA 2.18 CONEXIÓN CIRCUITO DE FUERZA DE VARIADOR DE VELOCIDAD-BOMBA.

Los terminales DIN0 y +24V del bloque de terminales de control del variador de velocidad se conectan a través del contacto normalmente abierto de un relé de 24 V. La bobina de este relé es activada mediante una salida digital de la PCI 6024E, la cual no se conecta directamente a la bobina del relé sino que se hace a través de un optoacoplador 4N25, en la configuración que se muestra en la figura 2.19. La salida digital utilizada es específicamente la salida digital 0 cuyos terminales son los DIO0 y DGND [9]. Con la conexión anterior se logra prender y apagar el variador de velocidad desde el programa ejecutado en el computador.

Adicionalmente debemos especificar la frecuencia con que se desea opere la bomba centrífuga, este propósito lo logramos a través de la entrada analógica ADC1 del variador de velocidad, la cual acepta un rango de voltaje desde 0 V DC hasta 10V DC [12]. Variando esta entrada analógica se logra variar la frecuencia de operación de trabajo de la bomba desde la 0 hasta 60 Hz. Los terminales ADC1 y 0V del variador de velocidad se conectan a los terminales DAC0OUT y AOGND de la tarjeta de adquisición PCI 6042E. El esquema de conexión completo de circuitos de control se muestra en la figura 2.19.

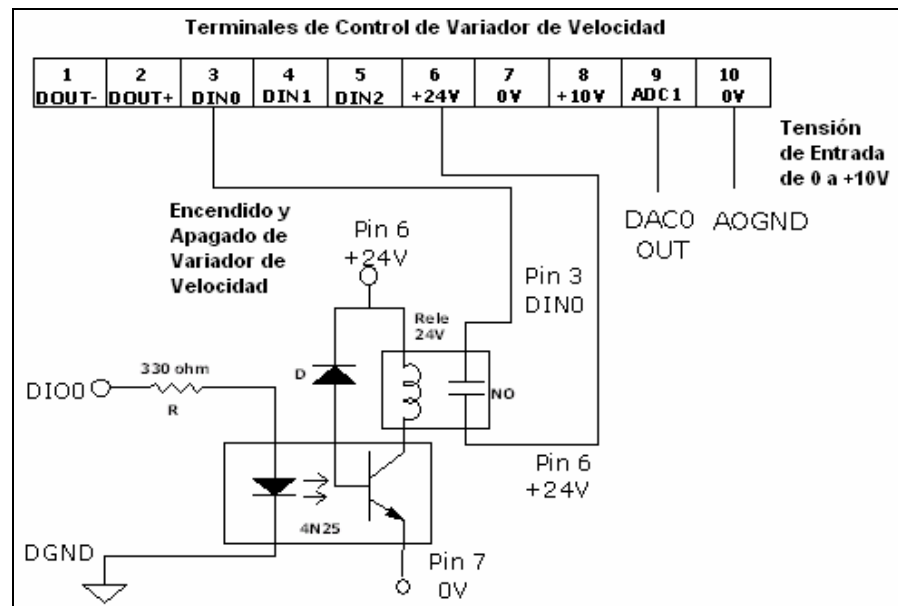


FIGURA 2.19 CONEXIÓN CIRCUITO DE CONTROL
VARIADOR DE VELOCIDAD.

2.2.7 Medidor de Caudal.

Se trata de un medidor de caudal de la marca KOBOLD, serie DPL-1E20 G4 L303 [13]. De forma general el funcionamiento de este medidor de caudal se basa en que el líquido que fluye a través de una cubierta de caudal hace girar una paleta cuyo movimiento rotatorio es censado a través de opto electrónica de una manera sin contacto, y es convertido a una señal de frecuencia o a una señal análoga. Esta frecuencia es

proporcional a la velocidad del caudal. El medidor de caudal se puede observar en la figura 2.20.



FIGURA 2.20 MEDIDOR DE CAUDAL DPL-1E20 G4 L303.

Este medidor de caudal mide caudales desde 0.4 hasta 12 litros por minuto, posee una salida proporcional a este caudal de 0 a 20mA. Su salida se conecta a una configuración con un amplificador de modo tal que se realiza la conversión de la señal desde mA a voltios.

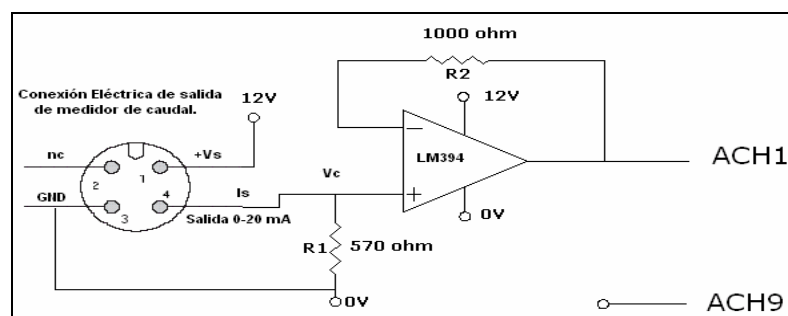


FIGURA 2.21 ESQUEMA DE CONEXIÓN ELÉCTRICA PARA MEDICIÓN DE CAUDAL.

En la figura 2.21 observamos el conector de salida del medidor de caudal, en el terminal 1 se conecta un voltaje de 12 V para la polarización, el terminal 3 se conecta la referencia, y en el terminal 4 tenemos la salida de corriente 0 a 20mA la cual se hace pasar a través de una resistencia R1 de 570 ohmios, es así que se produce una caída de voltaje V_c que es conectado a la terminal positiva de un amplificador LM394, este voltaje es reflejado a la salida del amplificador, así si deseamos medir el valor de este voltaje con la tarjeta PCI 6024E usando la entrada analógica 1, conectamos la salida a los terminales ACH1 y ACH9 de la tarjeta.

Si sacamos una relación entre el caudal medido y la corriente a la salida del medidor de caudal tenemos que:

$$Q_m = 0.6 I_s \text{ [litros/min]} \quad (2.11)$$

Donde:

Q_m representa el caudal medido en litros por minuto,

I_s = corriente en mA a la salida del medidor de caudal.

Ahora como sabemos:

$$V_c = I_s \times 0.57 \text{ [V]} \quad (2.12)$$

Reemplazando la ecuación 2.12 en 2.11 tenemos que el valor de caudal medido esta representado por:

$$Q_m = (0.6/0.57) V_c \text{ [litros/min]} \quad (2.13)$$

Vale recalcar que este medidor de caudal no fue comprado especialmente para la utilización dentro de la aplicación aquí realizada, este nos fue facilitado por uno de los laboratorios para llevar a cabo nuestras mediciones. Por esta razón se tuvo que tomar en cuenta el hecho de que el rango de medición del medidor de caudal no cubría en su totalidad los rangos de caudales de operación con los que trabaja la planta de control de nivel. Para poder llevar a cabo las mediciones necesarias debimos ajustar la operación de la planta de control de nivel a valores de caudales más bajos en los cuales se pudiera hacer uso del medidor de caudal.

2.2.8 Válvula Proporcional.

Se trata de una válvula proporcional accionada electrónicamente de 2 vías modelo EV260B de la marca Danfoss, figura 2.22. Esta válvula posee la característica de que

su apertura y cierre se regula proporcionalmente mediante la regulación progresiva ya sea de corriente o voltaje. La señal de control de la apertura de esta válvula puede ser una señal de corriente o de voltaje.



FIGURA 2.22 VÁLVULA PROPORCIONAL EV260B.

Una de las aplicaciones de esta válvula proporcional es conectada a la parte inferior del tanque para así regular el caudal de salida del tanque. Así simulamos las perturbaciones de la planta de control de nivel, teniendo un control sobre la apertura de la válvula podemos realizar las perturbaciones de una manera mas inspeccionada, a diferencia de una válvula manual con la cual sería difícil tener un conocimiento de que apertura tiene dicha válvula en un momento determinado.

En este capítulo se describió la operación de la planta de control de nivel, en que consiste el proceso de control de nivel y mediante el uso de que equipos se implementará. A continuación se describió el funcionamiento y por que se seleccionó cada uno de los componentes o equipos. Se empezó por dar una breve reseña del software a utilizarse en este caso del software LabVIEW, además se mencionaron las librerías pertenecientes a este software y que serán utilizadas dentro de la realización de este proyecto. Así se describió las librerías de Identificación de Sistemas, de Diseño de Control, de Simulación, y Workbench. Posteriormente se procedió a describir la parte de hardware del modulo o planta, dentro de las cuales constan la tarjeta de adquisición de datos, el computador, el tanque. Así mismo se explicaron los elementos principales de la planta que son el equipo de medición de la variable, transmisor de presión, el sistema actuador, variador de velocidad mas la bomba centrífuga. Otros equipos adicionales usados también fueron tomados en cuenta como lo son un medidor de caudal y una válvula proporcional.

CAPÍTULO 3

3. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.

3.1 Introducción a la Identificación de Sistemas.

La identificación de sistemas lidia con el problema de construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos basados en datos observados del sistema. Debido a que los sistemas dinámicos son abundantes en nuestro medio, las técnicas de identificación de sistemas tienen una amplia área de aplicación [14].

Hoy en día muchos problemas en diferentes campos de estudio son resueltos orientándolos desde un punto de vista de sistema. Es por eso que es muy importante tener un conocimiento acerca de la identificación de sistemas y todas las etapas que esta conlleva para su realización.

Por medio de la identificación de sistemas en lugar de hacer uso de ecuaciones matemáticas o leyes físicas previamente comprobadas, se hace uso de la experimentación. Es así que a través de señales de entrada y salida de un sistema, las cuales son sujetas a un análisis se infiere un modelo de dicho sistema.

Un modelo nunca puede ser aceptado como una verdadera descripción del sistema. Sin embargo puede ser reconocido como una descripción lo suficientemente buena de ciertos aspectos que son de particular interés para el usuario [14].

Para la realización de este proyecto se prefiere la identificación de la planta por medio de software en lugar de la utilización de leyes físicas, por el hecho de que la primera envuelve la experimentación, sin dejar de lado que necesariamente para realizar la identificación de la planta se debe tener un conocimiento previo de las leyes que rigen el comportamiento de la misma. Al estar la identificación de la planta estrechamente ligada con la experimentación, se hace uso de las herramientas de adquisición de datos, acondicionamiento de señales, uso de equipos de medición, y aplicación de teoría de control.

Lo que se espera con la identificación de la planta es obtener un modelo que represente las características de la misma para las condiciones en las cuales esta va a trabajar. Una vez hallado un modelo se procederá a trabajar con este para así predecir el comportamiento de la planta ante ciertas situaciones.

Para la identificación de la planta de control de nivel se tuvo que llevar a cabo el diseño de una etapa de experimentación, en la cual se definió la variable a medirse, la señal estímulo a ser aplicada al sistema, el periodo de experimentación, las asunciones a realizarse, en fin las condiciones bajo las cuales se realizaría el experimento.

El experimento consiste en la aplicación de una señal de estímulo a la planta en lazo abierto, y la lectura de la señal de respuesta de la planta hacia esa señal estímulo. La señal estímulo se aplica al variador de velocidad SINAMICS G110, y la respuesta de la planta se mide en la salida del transmisor de presión WINTERS PT5. Además se observa el efecto de la no linealidad de la planta de control de nivel. La configuración del experimento queda como se muestra en la figura 3.1. La etapa del software consiste en la programación adecuada en LabVIEW para la realización de la generación

de datos, y adquisición de los datos, mientras que la etapa de hardware se refiere a la planta en si.

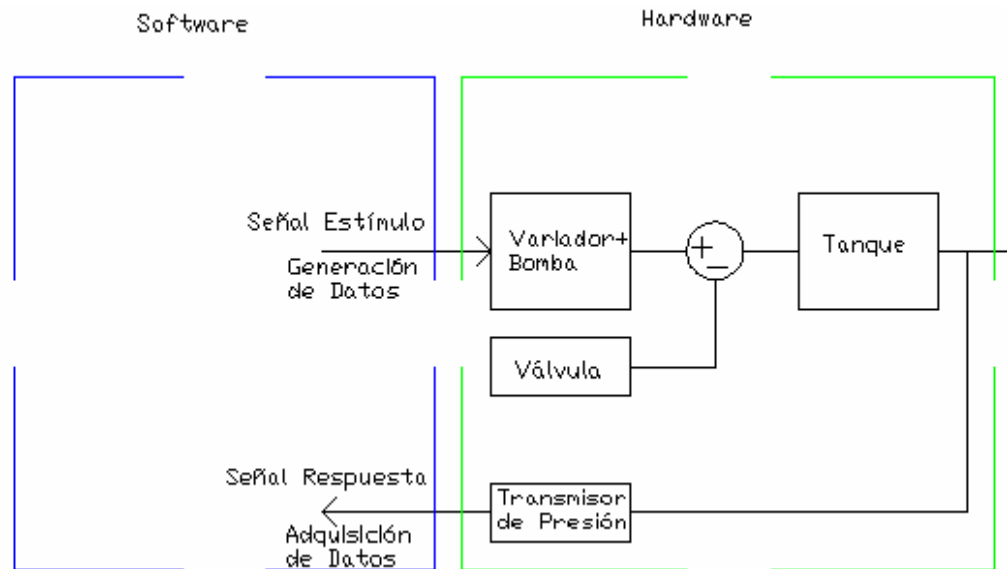


FIGURA 3.1 ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN PARA EXPERIMENTO DE IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.

Debemos tener en cuenta el efecto de la no linealidad de la planta de control de nivel. Sin embargo dentro de las asunciones realizadas para la implementación de este experimento tenemos que:

- Se escogerá un rango alrededor de un punto de operación, rango sobre el cual se tomaran las mediciones.
- La apertura de la válvula de salida se mantendrá constante a lo largo de la realización del experimento.

El análisis del modelo teórico de la planta de nivel es muy importante ya que nos sirve de apoyo o guía dentro del proceso de la identificación de la planta. Además nos da un conocimiento previo de las leyes que rigen el comportamiento de dicha planta, lo que nos ayuda a mejorar el proceso de identificación. Por este motivo, a continuación revisaremos el modelo teórico de la planta de control de nivel.

Modelo teórico de planta de control de nivel.

Considérese el esquema de proceso que se muestra en la figura 3.2, en el cual se tiene interés en saber como varía el nivel, h , de líquido en el tanque con respecto a los cambios del caudal de líquido de entrada, F_i , y de la apertura V_p de la válvula de salida.

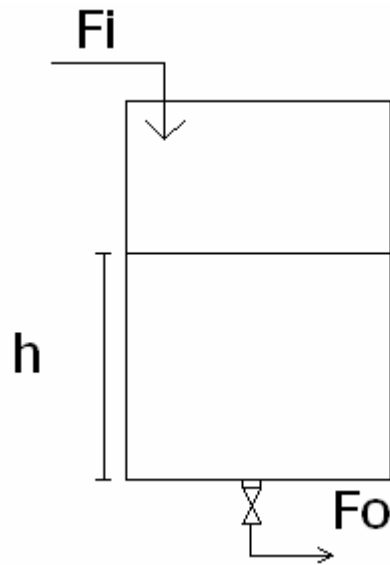


FIGURA 3.2 PROCESO NIVEL DE UN TANQUE.

Sin importar que geometría posea el tanque, el caudal a través de la válvula de salida será proporcional a la raíz cuadrada del nivel del líquido directamente sobre la válvula. De este modo el caudal de salida del tanque, F_o , será:

$$F_o = C \times \sqrt{h} \quad (3.1)$$

Donde:

C = una constante que involucra el coeficiente de la válvula y que además está relacionado con la apertura de la misma.

h = nivel de líquido en el tanque.

De este modo tenemos que el modelo del proceso de nivel en un tanque es como se expresa a continuación:

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} = F_i - C \times \sqrt{h} \quad (3.2)$$

Donde:

A = área del tanque.

F_i = Flujo de entrada de líquido al tanque.

El primer término de la ecuación 3.2 representa el diferencial de caudal en el tanque, considerando que el área del tanque es uniforme, es decir se mantiene constante, a lo largo de todo el tanque. Observando la ecuación 3.2 podemos ya decir que el modelo representa a un proceso no lineal. La no linealidad es debido a la presencia del término de raíz cuadrada en la ecuación 3.2. Una opción para poder trabajar con este modelo es linealizar el término no lineal de dicha ecuación [16]. La función no lineal queda definida como:

$$f(h) = \sqrt{h} \quad (3.3)$$

Usando la expansión de series de Taylor alrededor de un punto de estado estable, h_s , obtenemos:

$$\sqrt{h} = h_s^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \times h_s^{-\frac{1}{2}} \times (h - h_s) \quad (3.4)$$

Donde:

h_s = valor de h en estado estable.

Entonces reemplazando la ecuación 3.4 en la ecuación 3.2 obtenemos:

$$A \times \frac{\partial h}{\partial t} = F_i - C \times \left[h_s^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \times h_s^{-\frac{1}{2}} \times (h - h_s) \right] \quad (3.5)$$

Así en la ecuación 3.5 tenemos la ecuación del modelo de nivel del tanque linealizada en un punto de estado estable h_s . Ahora definiremos la variable $y = (h - h_s)$ e introduciremos la variable $u = (F_i - F_{is})$.

Donde:

F_{is} = valor de caudal de entrada en estado estable.

Adicionalmente debemos recordar que en estado estable $dh/dt = 0$, entonces aplicando esta condición a la ecuación 3.2 tenemos que:

$$F_{is} = C \times \sqrt{h_s} \quad (3.6)$$

De este modo la ecuación 3.5 se convierte en:

$$\tau \times \frac{\partial y}{\partial t} = K \times u - y \quad (3.7)$$

Donde se define los valores de las constantes τ y K como sigue a continuación:

$$\tau = A \frac{2(hs)^{\frac{1}{2}}}{C} \quad (3.8)$$

$$K = \frac{2(hs)^{\frac{1}{2}}}{C} \quad (3.9)$$

La constante τ es denominada constante de tiempo mientras que la constante K ganancia de estado estable. Aplicando a la ecuación 3.7 la transformada de La Place obtenemos la siguiente función de transferencia, la cual representa teóricamente el modelo del nivel del tanque en un punto de estado estable h_s [16].

$$y(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} u(s) \quad (3.10)$$

Debemos recordar que la ecuación 3.10 es valida solo para el punto de estabilización h_s , para un nuevo punto de estabilización h_{s2} los valores de las constantes τ y K serán diferentes.

Medición de valor de constante de tiempo τ .

En este punto realizaremos el cálculo del valor de la constante de tiempo, τ . Consideramos un valor de estado estable h_s de 29cm, conocemos el área del tanque A la cual es $30 \times 30 \text{cm}^2$, un valor desconocido es el valor de la constante C que depende de las características de la válvula colocada a la salida del tanque. Sin embargo podemos calcular el valor de esta constante experimentalmente y calcular un valor aproximado de τ .

El procedimiento que llevaremos a cabo es el siguiente, necesitamos medir el caudal a la salida de la válvula conectada a la parte inferior del tanque, esta medición se realizará haciendo uso del medidor de caudal KOBOLD DPL. La primera limitación de este procedimiento es que no disponemos de espacio físico para la conexión del medidor de caudal directamente después de la válvula, la segunda limitación es el rango de medida que posee el medidor de caudal el cual es hasta 12 litros/min y que está muy por debajo del máximo caudal que puede generar la bomba aquí utilizada que es de 18 galones por minuto o 72 litros/min.

Para solucionar este problema haremos trabajar la planta con la bomba a un valor de alimentación bajo para que de esta manera el caudal no sobrepase el rango del medidor de caudal. El medidor de caudal lo colocaremos en la tubería de entrada de líquido, figura 3.3; haremos trabajar la bomba a voltaje constante para que de esta manera el caudal de entrada sea constante. Debemos tener en cuenta que en estado estable el caudal de entrada será igual al caudal de salida por lo tanto una vez que se alcance el estado estable el caudal que medimos a la entrada será igual al caudal que existe a la salida de la válvula.



FIGURA 3.3 CONEXIÓN DE MEDIDOR DE CAUDAL A ENTRADA DE TANQUE.

Una vez que se alcance el estado estable, registraremos los valores de salida del medidor de caudal, y altura o nivel de líquido en el tanque. Estos valores servirán para calcular el valor de la constante

C descrita con anterioridad en la ecuación 3.1. Los valores registrados en conjunto con el valor de caudal en litros/min y cm^3/s y el valor calculado para C se muestran en la Tabla 3.1.

Altura medida en tanque (ht)	Voltaje de Caudalimetro V_c	Caudal (litros/min)	Caudal (cm^3/sec)	$C = \text{Caudal} / \text{RAIZ}(ht)$ Constante Válvula
14 cm	7,19 V	7,56	126,14	33,71

Tabla 3.1 RESULTADOS DE MEDICIÓN DE CONTANTE C.

Recordemos que la señal a la que tenemos acceso luego del acondicionamiento del medidor de caudal es una señal en voltios que es la que se muestra en la tabla 3.1 como V_c . Además con el valor de V_c podemos calcular el caudal que este representa por medio de la ecuación 2.13, la cual podemos observar nuevamente en la ecuación 3.11. Así finalmente calculamos C reemplazando los valores de ht y caudal en la ecuación 3.1.

$$Q_m = (0.6/0.57) V_c \text{ [litros/min]} \quad (3.11)$$

En la tabla 3.1 se muestra el valor del cálculo de la constante C, con el cual los valores necesarios para calcular la constante τ ya están completos. Reemplazando los valores de A, h_s y C en la ecuación 3.8 tenemos como resultado:

$$\tau = 30 \times 30 \frac{2(29)^{\frac{1}{2}}}{33.71}$$

$$\tau = 287.55 \text{ s}$$

Así el valor obtenido para τ es de 287.55s, este valor puede compararse mas adelante con los resultados de la identificación de la planta.

3.2 Adquisición de datos.

El primer paso para llevar a cabo la identificación de la planta es la adquisición de los datos provenientes del experimento. El experimento consiste en generar una señal estímulo al sistema, y adquirir la respuesta del mismo ante dicho estímulo. Una buena identificación de la planta depende básicamente de la correcta aplicación de una señal estímulo para de este modo obtener una señal de respuesta que nos proporcione la información mas útil posible de la misma. Resta decir que a partir de una buena adquisición de datos, lo que significa tener una buena representación del sistema, tenemos casi asegurada una buena identificación de la planta.

La señal estímulo se aplicará al variador de velocidad, para de este modo lograr variar el caudal de entrada de líquido al tanque. La señal de respuesta será proporcionada por el transmisor de presión, el cual nos entrega una señal proporcional al nivel de líquido en el tanque.

Para la realización de la adquisición y generación de datos se usa la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E en conjunto con un programa elaborado con el software LabVIEW y su librería NI-DAQmx. La librería NI-DAQmx proporciona funciones para leer, escribir, temporizar mediciones en dispositivos como la PCI 6024E. En el programa se deben especificar la velocidad con que se va a adquirir y generar los datos, las entradas y salidas a las cuales se va a leer y escribir respectivamente, y un destino para grabar los datos generados por el experimento.

En la figura 3.4 podemos observar parte del diagrama de bloques del programa usado para la adquisición y generación de datos para el experimento. La figura 3.4 específicamente muestra como se configuran la entrada y salida del dispositivo PCI 6024E para llevar a cabo la generación y adquisición de datos.

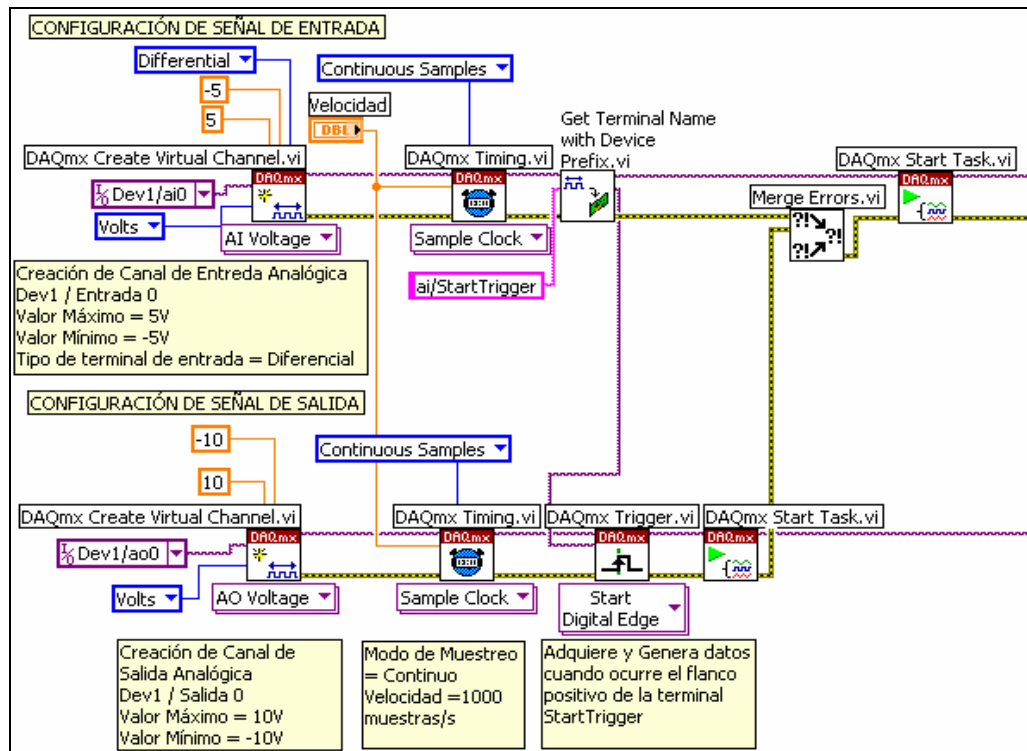


FIGURA 3.4 PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN DE ENTRADA Y SALIDA PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS USANDO PCI 6024E.

En el programa de la figura 3.4 se utiliza la función DAQmx Create Channel para crear un canal de entrada analógica de voltaje, para lo cual seleccionamos AI Voltaje en el selector de la función; así mismo se utiliza un VI similar para crear un canal de salida analógica de voltaje, pero esta vez seleccionamos AO Voltaje en el selector de la función. AI Voltaje se refiere por sus siglas en inglés a entrada analógica de voltaje, y AO Voltaje se refiere a salida analógica de voltaje. En ambos VI's debemos configurar: el valor mínimo y máximo

de lectura o escritura de voltaje, el canal físico que representa el terminal en el cual se lee o se escriben los datos, las unidades de la medición que en ambos casos es voltios, y en el canal de entrada debemos establecer el tipo de configuración de la entrada.

Una vez configurados estos VI's se procede a la conexión de cada VI con la función DAQmx Timing, que se encarga de configurar la fuente de reloj para la temporización, la velocidad de adquisición o generación de los datos, y el modo en que las muestras van a ser adquiridas o generadas. En el programa mostrado en la figura 3.4, seleccionamos la opción Sample Clock en el selector de la función, este sirve para controlar la velocidad a la cual las muestras son adquiridas o generadas. Ya sea para la adquisición o generación se configura la entrada Velocidad en el valor 1000, lo que equivale a una velocidad de 1000 muestras por segundo; se configura el modo de muestreo (Sample Mode) para que sea un muestreo continuo seleccionando la entrada Continuous Samples.

Ahora solo enfocándonos en el segmento de adquisición o lectura de datos vamos a colocar a continuación del VI DAQmx Timing el VI denominado Get Terminal Name with Device Prefix para crear en un

formato apropiado un nombre que involucre el dispositivo de medición y el nombre del terminal para así usarlo mas adelante como fuente de inicio de la medición.

Ahora del mismo modo solo enfocándonos en el segmento de generación o escritura de datos vamos a colocar a continuación del VI DAQmx Timing el VI de la función DAQmx Start Trigger (Digital Edge), esta función logra que la adquisición o generación de datos empiece a realizarse con un pulso de subida o bajada de una señal digital, que para esta aplicación viene cableado desde la salida de la función Get Terminal Name with Device Prefix que se explico anteriormente. Con el procedimiento anteriormente descrito se logra sincronizar la adquisición con la generación de datos. Finalmente procedemos a colocar a continuación la función DAQmx Start Task que se encarga de iniciar las tareas previamente configuradas para cada uno de los segmentos, de generación y luego de adquisición de datos.

Una vez realizadas las configuraciones tal como se muestra en la figura 3.4 resta realizar las operaciones de adquisición o lectura y generación o escritura de datos. En la figura 3.5 podemos observar

ya la función de lectura y escritura o adquisición y generación de datos ejecutada dentro de un lazo continuo,(While). Primero se realiza la lectura de la entrada a una velocidad de 1000 muestras por segundo y promediando cada 1000 muestras, lo que equivale a 1 muestra por segundo. Seguidamente se procede a la escritura sobre la salida. El valor escrito en la salida dependerá del valor en la entrada denominada Manual; la cual si es verdadera mandara a la salida un valor de voltaje DC constante, el cual se especifica en la entrada Voltaje DC en el panel frontal del programa; si la entrada en Manual es falsa se aplicara una señal de onda cuadrada cuya configuración quedara determinada por los valores en las entradas valor DC, amplitud y periodo.

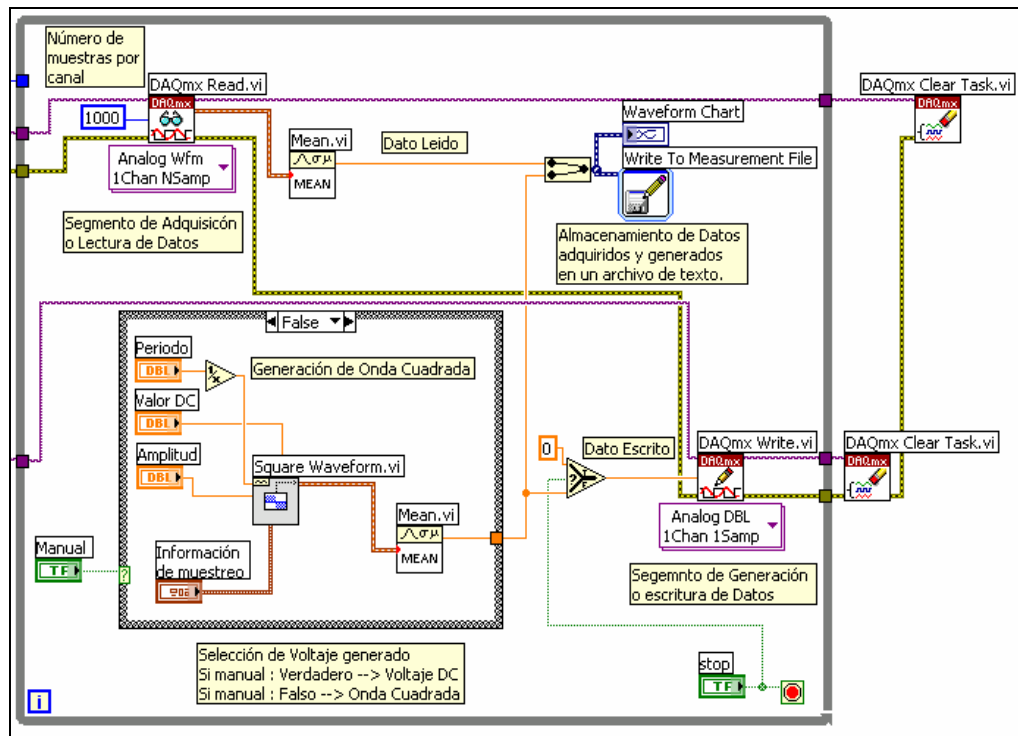


FIGURA 3.5 PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS USANDO PCI 6024E.

En este punto es importante destacar que se debe elegir la frecuencia con que se va a adquirir y generar la muestra de datos. Este factor es muy importante ya que la mala elección de la frecuencia de muestreo podría conllevar a una mala representación de las señales adquiridas y generadas. Para obtener una buena representación de la señal hacemos un muestreo y cada cierto número de muestras promediamos la muestra. Esta técnica es denominada promediado de la señal.

3.2.1 Señal estímulo aplicada al sistema.

Al ser la planta de control de nivel no lineal, lo ideal es aplicar una señal estímulo dentro de un rango de operación en cual los resultados obtenidos se aproximen lo mejor posible a un sistema lineal. Es así que se aplica un voltaje fijo DC para buscar un punto de estabilización de la planta. A partir de ese punto de estabilización se aplica una señal cuadrada aplicando hacia arriba y hacia abajo el mismo nivel de voltaje. Este nivel de voltaje debe ser aplicado de modo tal que se logre obtener a la salida un comportamiento casi lineal. Es decir que el aumento de voltaje a la señal de estímulo nos provoque un incremento en igual magnitud al decremento que se producirá en la señal de respuesta al disminuir el voltaje de estímulo aplicado.

Es así que luego de realizar varias pruebas sobre la planta se determinó que se aplicaría un voltaje fijo DC de 3.81 voltios durante un tiempo estimado de 4000 segundos durante el cual se lleva la planta a la estabilización. Una vez transcurridos los primeros 4000 segundos se aplica una señal de onda cuadrada con una amplitud de 0.07 voltios, es decir se aplican dos niveles de voltaje de valor 3,74 y 3,88 voltios. En la figura 3.6 podemos

observar la forma de onda aplicada como señal estímulo al sistema.

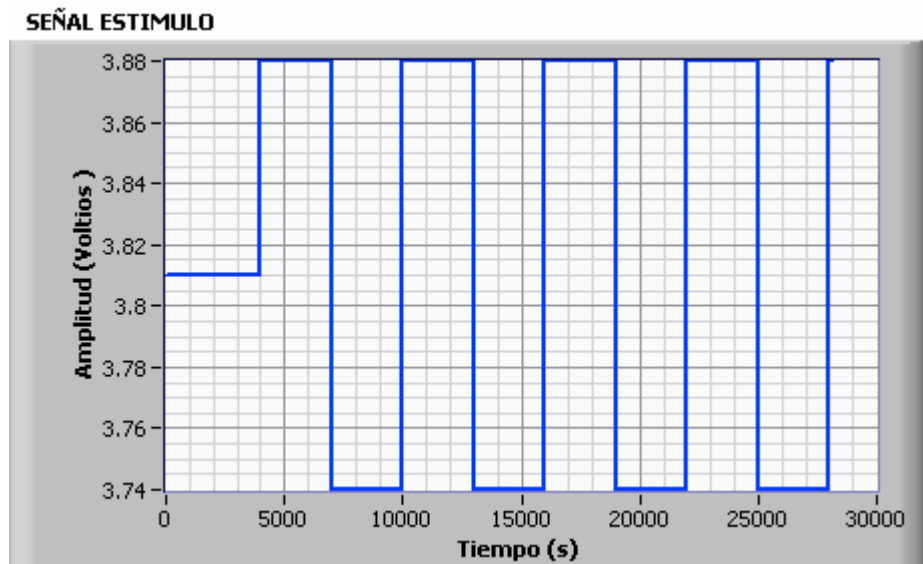


FIGURA 3.6 SEÑAL ESTÍMULO APLICADA A LA PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

Otro valor muy importante que será fijado a base de la experimentación es el periodo de la onda cuadrada aplicada como señal estímulo. Debe lograrse con cada nivel de voltaje llevar la planta a un estado de estabilización, es decir la planta estará oscilando entre dos niveles de estabilización. Es así que se determino que el valor del periodo de la onda es de 6000 segundos con un ciclo de trabajo de 50%.

Esta señal fue seleccionada principalmente para obtener una característica de la planta dentro de un rango en el cual podamos hacer una aproximación a un comportamiento lineal. Los niveles de voltaje se seleccionan en base a pruebas previas que se realizan en la planta para así obtener la información del punto de interés en el cual realizaremos la identificación. A menudo es el usuario quien fija el punto de operación en cual desea trabajar la planta, a partir de esta información se realizan las pruebas en la misma para determinar los niveles de voltaje apropiados.

La señal de perturbación, que está representada por la válvula colocada a la salida del tanque; se establece para que sea constante, es decir la apertura de la válvula se mantiene en una sola posición a lo largo de la toma de datos.

3.2.2 Señal de respuesta del sistema.

Una vez aplicada la señal de estímulo a la planta debemos verificar que la señal que obtenemos por respuesta proporciona la información necesaria para la identificación. Se debe

confirmar que esta señal está dentro de un rango muy cercano al punto de operación. En la figura 3.7 podemos observar la señal de respuesta en voltios de la planta.

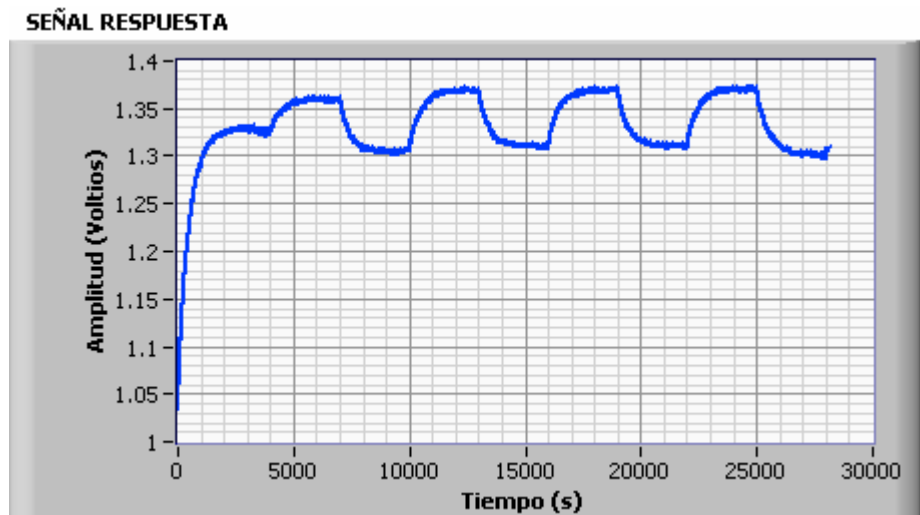


FIGURA 3.7 SEÑAL DE RESPUESTA DE LA PLANTA ANTE SEÑAL ESTÍMULO.

3.3 Preprocesado de Datos.

Una vez adquiridos los datos del experimento es preciso realizar el preprocesado de los mismos, ya que debido a fallas de hardware o software se pueden presentar imperfecciones en los datos las cuales conllevan a inexactitudes en la identificación. Estas fallas pueden ser debidas a ruidos externos, problemas en los equipos de medición. El primer procedimiento recomendado es inspeccionar visualmente los

datos, en busca de datos erróneos o alguna cierta característica que demuestre la existencia de alguna anomalía en el conjunto de datos [6].

Para llevar a cabo este procedimiento abrimos un nuevo VI en el programa LabVIEW. En la ventana de diagrama de bloques colocamos la función cargar desde ASCII (Load from ASCII), figura 3.8, la cual se encuentra en la paleta de funciones en Signal Express - Analog - Signal I/O - Load ASCII. Esta función es un VI Express, el cual es configurado a través de cuadros de diálogo y no cableando entradas o salidas como los VI's normales. Las entradas y salidas de los VI's Express depende de cómo se configuren.



FIGURA 3.8 FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII DE LabVIEW.

Al colocar la función cargar desde ASCII automáticamente se abre un cuadro de diálogo como el que se muestra en la figura 3.9. En la primera pestaña denominada Parse File tenemos la opciones: Import file path, que sirve para especificar la ruta en donde se encuentra el archivo que contiene el set de datos usado para la identificación; File

preview, donde podemos observar los datos que han sido cargados; File Parsing Settings, donde especificamos el delimitador de los datos, punto decimal a usarse y desde que fila del set de datos empieza la lectura de los datos.

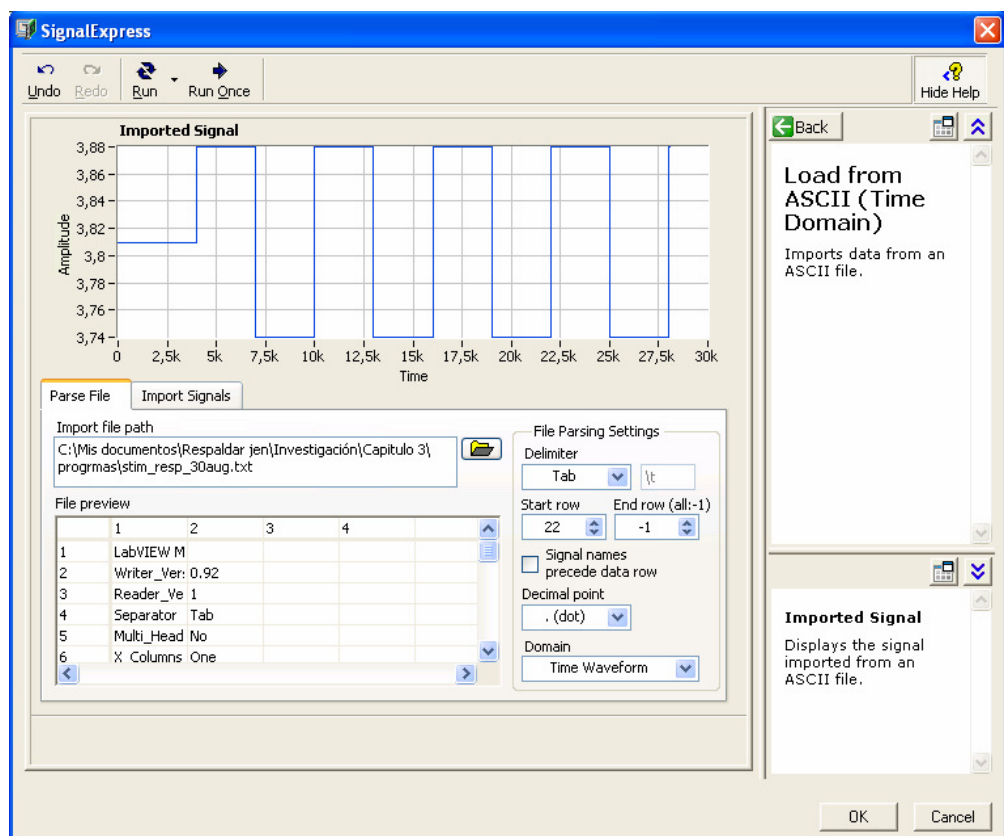


FIGURA 3.9 CUADRO DE DIÁLOGO DE FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII, PRIMERA PESTAÑA.

En la segunda pestaña denominada Import Signals, figura 3.10, seleccionamos cuales son las columnas que deseamos importar desde el archivo que contiene el set de datos dando un clic sobre las

columnas. Aquí seleccionamos las columnas 2 y 3 que son las que contienen la señal respuesta y estímulo respectivamente. En esta pestaña además podemos especificar el dt, que es el intervalo de tiempo existente entre cada muestra de la señal. Una vez especificada la configuración damos clic en OK para guardar dicha configuración.

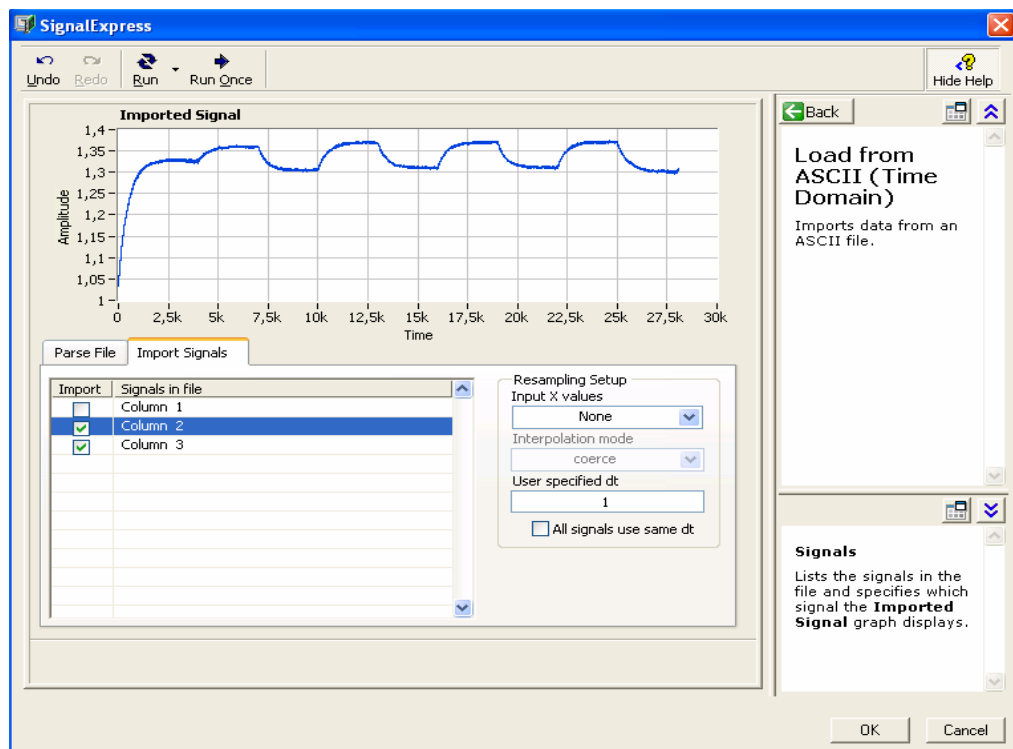


FIGURA 3.10 CUADRO DE DIÁLOGO DE FUNCIÓN CARGAR DESDE ASCII, SEGUNDA PESTAÑA.

Una vez de regreso al diagrama de bloques a través de la función Split Signal, la cual sirve para separar señales de un grupo de

señales, y un indicador gráfico; graficamos las señales de estímulo y respuesta obtenidas, figura 3.11.

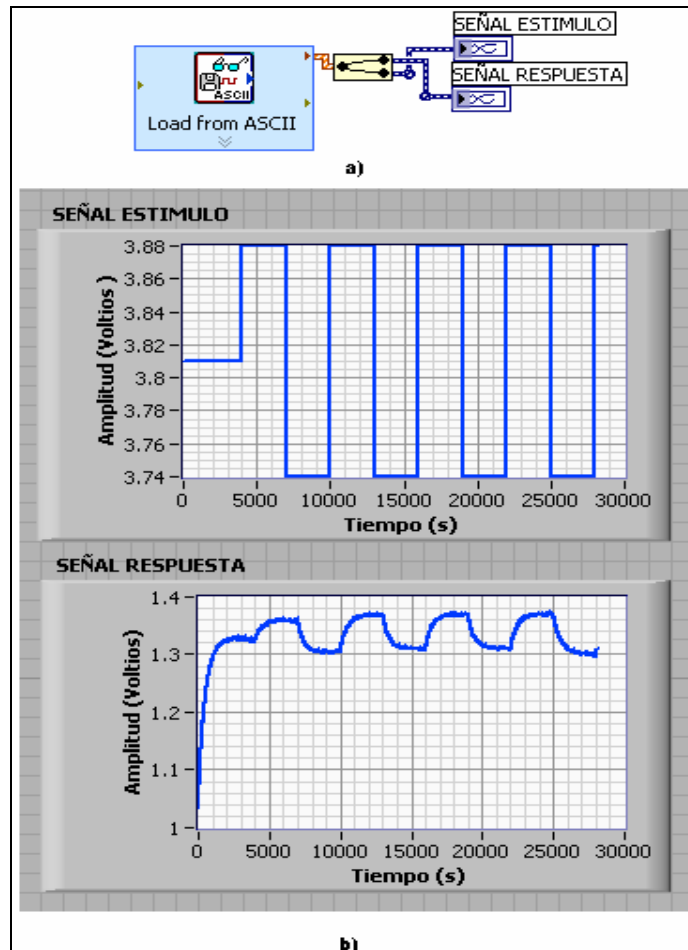


FIGURA 3.11 SEÑALES ESTÍMULO Y RESPUESTA a) DIAGRAMA DE BLOQUES b) PANEL FRONTAL.

Una vez inspeccionado los gráficos de la figura 3.11 y al no encontrar ningún aparente error en los datos procederemos a eliminar la porción de las señales que corresponde a la parte transitoria de la

señal, estos datos son los correspondientes a los 4000 primeros puntos de las señales.

Para este propósito usaremos la función obtener porción de señal (Get Waveform Subset), la cual se encuentra en la paleta de funciones en Waveform - Get Waveform Subset. Esta función se encarga de obtener una porción de la señal que empieza desde el valor especificado por la entrada Tiempo Inicial y tiene una duración especificado por el valor de la entrada Duración.

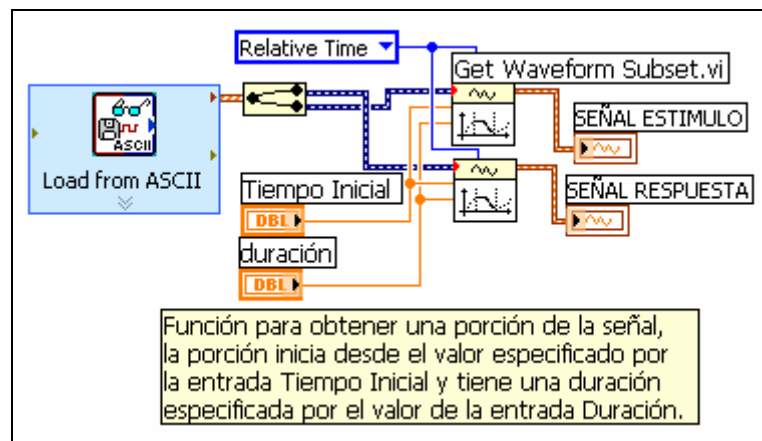


FIGURA 3.12 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA OBTENCIÓN DE UNA PORCIÓN DE LA SEÑAL.

Ahora haciendo uso de esta función fijaremos las entradas Tiempo Inicial y Duración en 4000 y 24000 respectivamente, para tomar las porciones de las señales que van desde el punto 4000 hasta el

28000 de las señales en la figura 3.11. La figura 3.12 muestra el diagrama de bloques resultante agregando la función para obtener una porción de las señales. De esta manera las porciones seleccionadas de la señal estímulo y respuesta ahora son las mostradas en la figura 3.13.

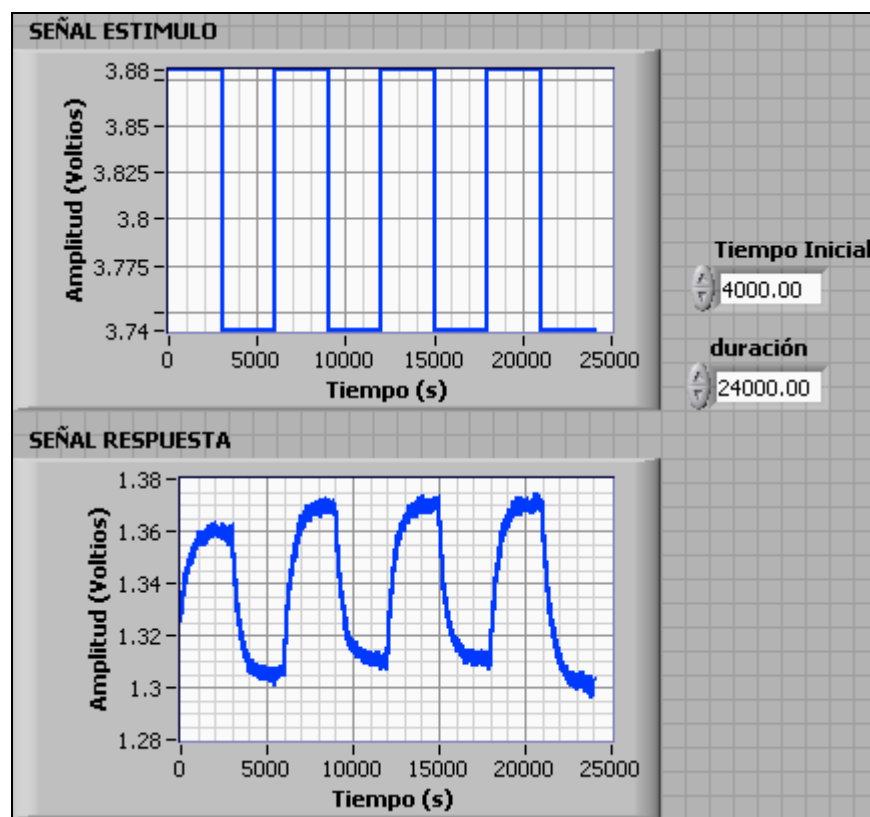


FIGURA 3.13 PORCIÓN SELECCIONADA DE SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.

Continuando con la etapa de preprocesado de datos, procedemos a restar el nivel DC de las señales. Esto lo llevamos a cabo por medio

de la función SI Remove Trend, como se muestra en la figura 3.14. La función SI Remove Trend la encontramos en la paleta de funciones en Control Design and Simulation - System ID - Preprocessing - Remove Trend. Esta función se encarga de remover el nivel DC de la señal de estímulo y respuesta, se debe especificar la entrada Trend Type para que sea Mean. En la figura 3.15 podemos observar el gráfico de las señales de estímulo y respuesta a las cuales previamente se les ha disminuido el valor DC de cada señal.

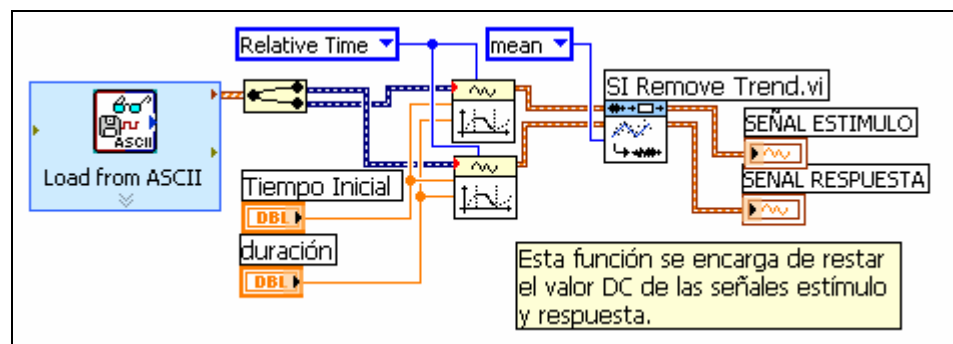


FIGURA 3.14 REDUCCIÓN DEL VALOR DC DE LAS SEÑALES DE ESTÍMULO Y RESPUESTA.

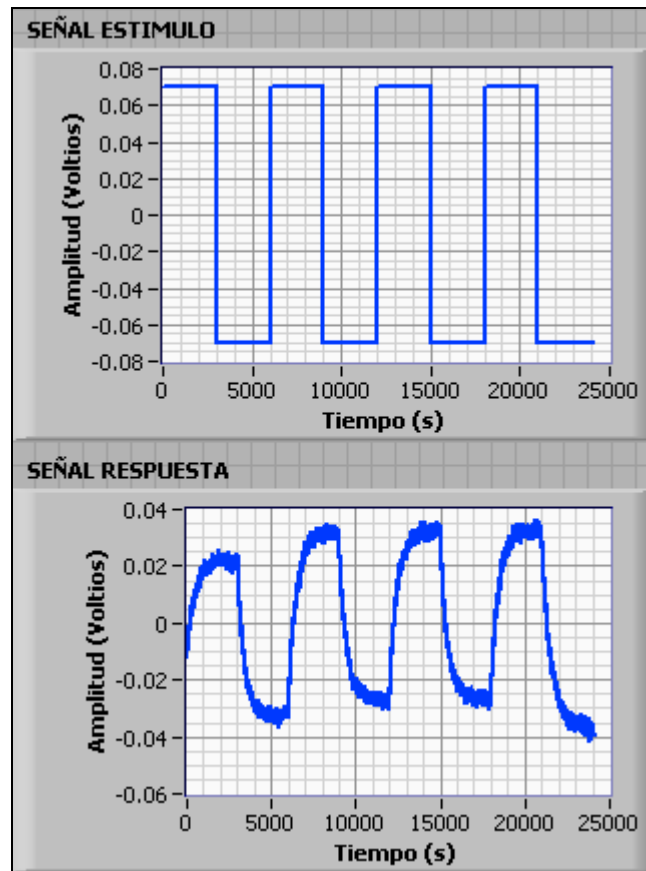


FIGURA 3.15 SEÑALES ESTÍMULO Y RESPUESTA MENOS VALOR DC.

Además para la identificación de la planta tomamos solo una porción de los datos, aquellos en donde se refleja el punto de operación de la planta y que además creamos son los más convenientes. Teniendo en consideración lo anterior tomamos dos ciclos de las señales y utilizamos solo aquella porción de la señal para la identificación.

Para realizar la obtención de una porción de la señal hacemos

nuevamente uso de la función Get Waveform Subset. De la figura 3.15 seleccionamos la muestra que va desde el valor de tiempo igual a 6330 segundos y que tiene una duración de 2 períodos, es decir 12000 segundos. Por lo tanto fijamos el valor de la entrada Tiempo Inicial 2 en 6330, y el valor de la entrada Duración 2 en 12000. El gráfico de la muestra seleccionada se puede observar en la figura 3.17.

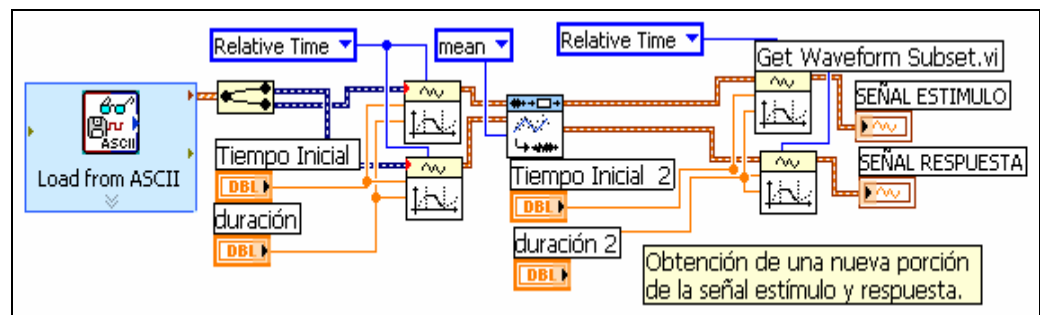


FIGURA 3.16 OBTENCIÓN DE UNA PORCIÓN DE LA SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.

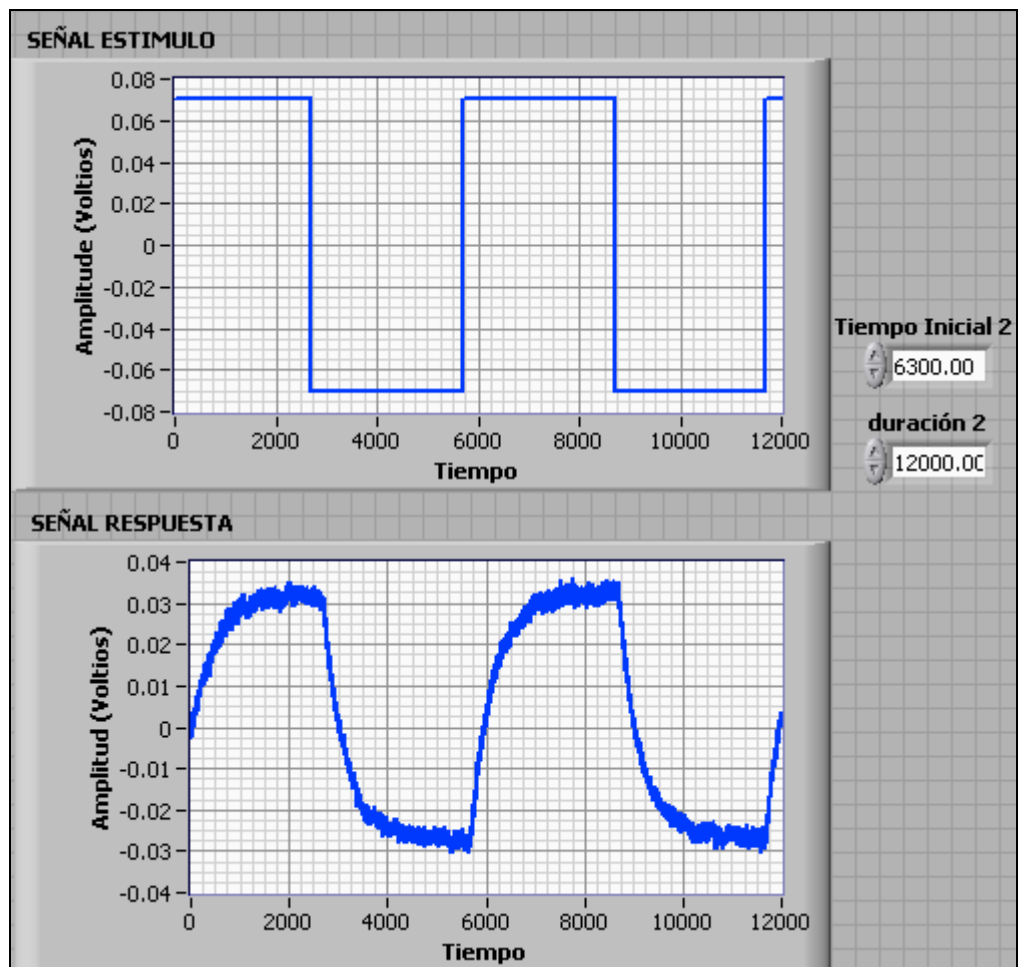


FIGURA 3.17 GRÁFICO DE PORCIÓN SELECCIONADA DE LA SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA.

3.3.1 Escalamiento de datos.

El escalamiento de datos es un procedimiento que se lleva a cabo cuando se poseen sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas, y que además tienen rangos de operación

diferentes. Siempre se trata de llevar los datos a una escala de manera que en el momento de la identificación todas las entradas y salidas tengan la misma importancia desde el punto de vista numérico [6]. En nuestra aplicación no es necesario ya que nuestro sistema es de una sola entrada y una sola salida por lo que no realizamos escalamiento de datos.

3.4 Selección y Validación del Modelo.

La selección de una estructura apropiada para el modelo es el paso más importante para una correcta identificación de la planta. La selección debe estar basada en una correcta comprensión del proceso de identificación y de la planta a ser identificada. Una vez seleccionada la estructura o modelo debe comprobarse que esta es la mejor selección, este procedimiento se conoce como validación del modelo [14]. La validación del modelo se basa en procedimientos como la simulación del modelo, predicción del modelo o análisis residual.

3.4.1 Selección del modelo.

En la librería de identificación de sistemas de LabVIEW contamos con la función SI Estimate Transfer Function Model que se encarga de estimar una función de transferencia entre la señal de estímulo y la de respuesta, y no modela la señal de ruido la cual considera de un valor igual a 1 [6].

En este punto del proceso de la identificación y luego de haber probado con muchas estructuras, se decide hacer uso de la función SI Estimate Transfer Function Model, en la cual se establece el orden del numerador y el orden del denominador que deseamos posea la función de transferencia del modelo identificado. Al programa de la figura 3.16 añadimos la función SI Estimate Transfer Function Model, conectando como entrada la señal estímulo y respuesta, previamente preprocesadas, y además el orden del numerador y denominador, los cuales se fijaron con los valores de 0 y 1 respectivamente, figura 3.18.

planta y la señal simulada del modelo de función de transferencia. En la figura 3.20 podemos observar la gráfica que contiene la señal de respuesta de la planta y la señal simulada del modelo de función de transferencia.

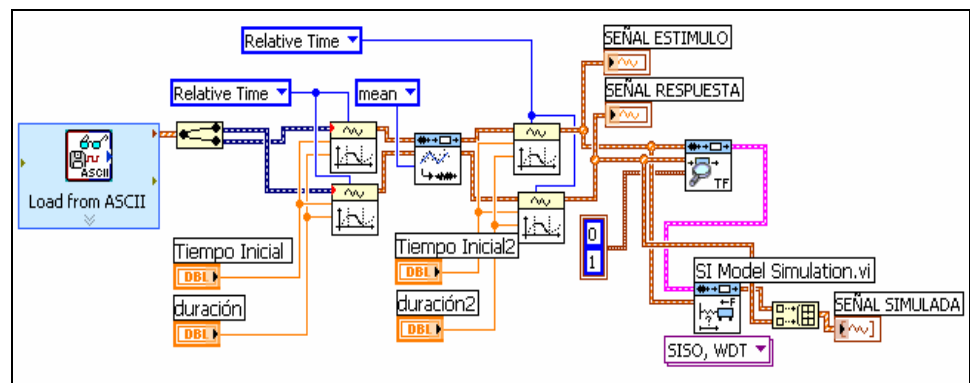


FIGURA 3.19 SIMULACIÓN DEL MODELO

Adicionalmente podemos agregar una función de resta entre la Señal simulada y la Señal de respuesta de la planta para observar la magnitud del error entre estas dos señales. Además haciendo uso de la función Waveform Min Max podemos ver cuales son los valores mínimos y máximos de esta señal de error. La figura 3.21 muestra el diagrama de bloques en donde se incluye la función de resta entre la Señal respuesta y la Señal simulada, y la figura 3.22 muestra el grafico de la señal de error.

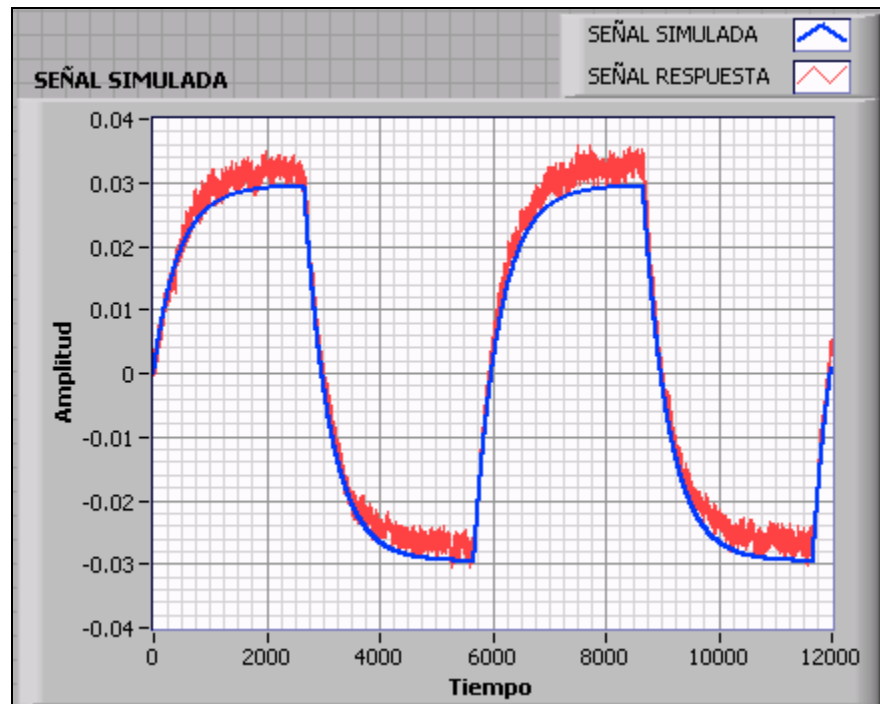


FIGURA 3.20 SEÑAL DE SIMULACIÓN DEL MODELO.

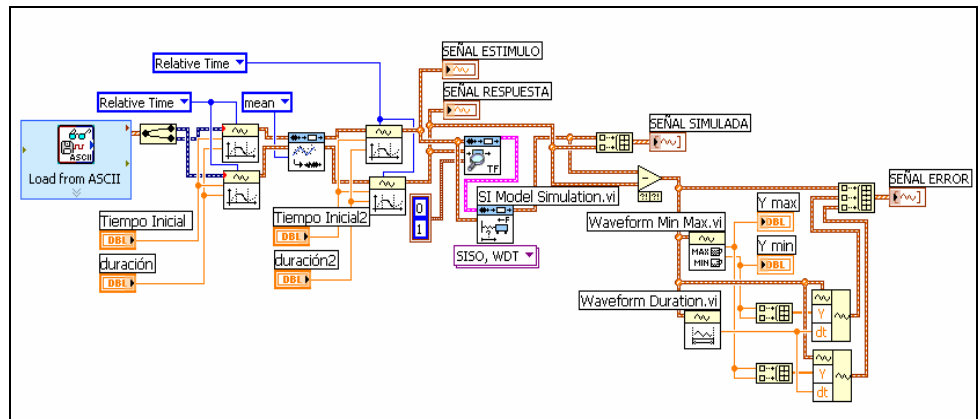


FIGURA 3.21 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA CÁLCULO DE SEÑAL DE ERROR.

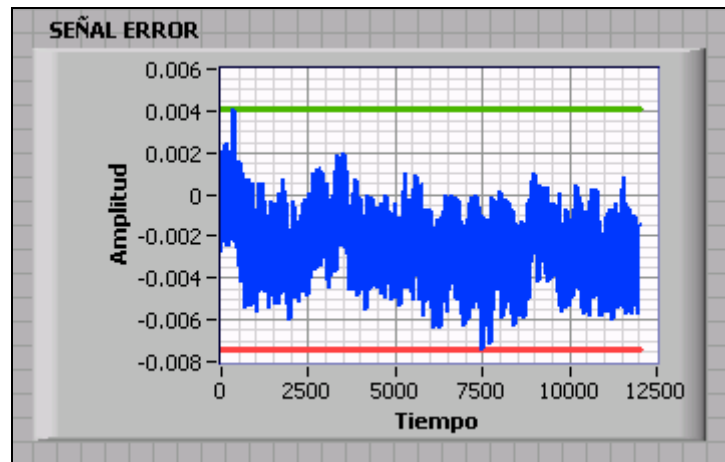


FIGURA 3.22 SEÑAL DE ERROR, DIFERENCIA ENTRE SEÑAL SIMULADA Y SEÑAL DE RESPUESTA DE LA PLANTA.

Observando la figura 3.22 que muestra la señal de error, o la diferencia entre la señal simulada y la señal de respuesta de la planta, notamos que el error no sobrepasa un límite máximo de 0.008 voltios.

3.4.3 Predicción del modelo.

La predicción del modelo se basa en que tan bueno es el modelo para representar valores futuros de salida del modelo haciendo uso de datos pasados [14]. Haciendo uso de la función predicción de modelo (SI Model Prediction), se puede

graficar la señal de salida de la planta real mas la señal generada por la predicción.

3.4.4 Análisis residual.

El análisis residual se enfoca en el error producido por la diferencia entre la señal de salida medida y la señal predicha. Por residual podemos entender que son la parte de los datos que no se pueden reproducir, los residuos [14].

3.5 Modelo seleccionado para la planta.

Finalmente una vez validado el modelo, hacemos uso de las funciones de conversión para escribir la función de transferencia del modelo que hemos seleccionado, figura 3.23.

El modelo seleccionado fue una función de transferencia cuyo numerador es de orden 0 y denominador de orden 1, si observamos la ecuación 3.10 vamos a notar que es el mismo orden del numerador y denominador de dicha ecuación. Finalmente la función de transferencia resultante se puede observar en la figura 3.24.

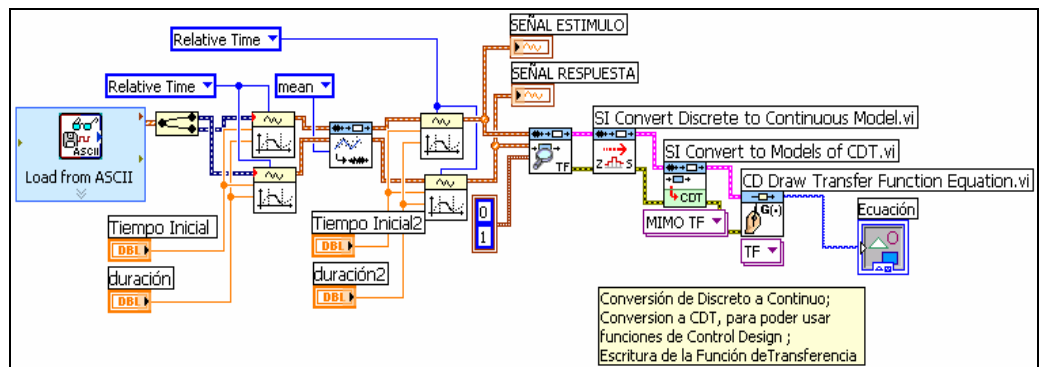


FIGURA 3.23 ESCRITURA DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.

$$\frac{0.000937871}{s + 0.00222254}$$

FIGURA 3.24 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA IDENTIFICADA DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

Debemos en este punto recalcar que esta función de transferencia o modelo identificado tiene una entrada de voltaje y una salida de voltaje, la entrada de voltaje representa el valor de voltaje ingresado al variador de velocidad que en conjunto con la bomba varían el caudal de entrada de líquido al tanque, la salida en voltios representa la señal en voltios que se adquiere del transmisor de presión y que es proporcional al nivel de líquido en el tanque. Esto se debe tener en cuenta mas adelante para el uso de esta función para análisis posteriores.

En este capítulo se desarrolló una aplicación de identificación de sistemas para la planta de control de nivel, se empezó planteando el experimento y las condiciones bajo las cuales se realizaría la identificación. Se explicó el uso de las herramientas de adquisición de datos de LabVIEW para la adquisición y generación de la señal respuesta y estímulo para la identificación de la planta. Una vez adquiridos los datos se explicó el desarrollo del preprocesado de datos que se trata de un tipo de acondicionamiento de los datos previo a la identificación. Luego se realizó la selección del modelo y se verificó que este fuera el apropiado de acuerdo a los resultados obtenidos mediante la simulación del modelo. Con este modelo posteriormente se puede realizar el diseño de un controlador para la planta, es ahí cuando también se verifica que tan buena y útil fue la identificación de la planta.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DE CONTROL Y SIMULACIÓN.

El objetivo de llevar a cabo la identificación de la planta en el capítulo 3 fue específicamente diseñar un controlador para la misma. El controlador será seleccionado de la familia de controladores PID, de la cual se adoptará la mejor combinación que cumpla los requerimientos establecidos. La familia de controladores PID pertenece a los métodos clásicos de control sin embargo existen muchos tipos de configuraciones de controladores que pueden ser estudiados y aplicados a partir de la identificación ya realizada.

En este capítulo nos enfocaremos en el modelo identificado de la planta, para en base a este diseñar un controlador que se ajuste a los requerimientos que detallaremos mas adelante, mostraremos como implementar dicho controlador haciendo uso del conjunto de

herramientas PID de LabVIEW, el cual posee las funciones básicas relacionadas con el uso de controladores PID.

Básicamente usando el modelo de la planta identificada encontraremos los parámetros de un controlador de la familia PID para la misma, y comparamos los resultados de las simulaciones con las implementaciones reales en la planta, para verificar que tan útil y buena fue la identificación realizada con anterioridad.

4.1 Criterios de Selección del Controlador.

Tal como se especificó en el apartado anterior se hará uso de una de las variantes de controlador PID para el control de la planta de control de nivel, sin embargo para la correcta selección del mismo debemos tener claros los criterios o parámetros de diseño y además las condiciones bajo las cuales es válido este diseño.

Ya que para el diseño del controlador utilizaremos como modelo de la planta aquel que ya fue identificado en el capítulo 3, la validez del mismo se encuentra limitado al rango para el cual se realizó la identificación de la planta. En la parte superior de la figura 4.1

observamos la señal de respuesta de la planta en voltios obtenida del experimento realizado para la identificación de la planta. En la parte inferior de la figura 4.1 también observamos esta misma señal de respuesta de la planta pero en términos de nivel de líquido en el tanque en unidades de centímetros.

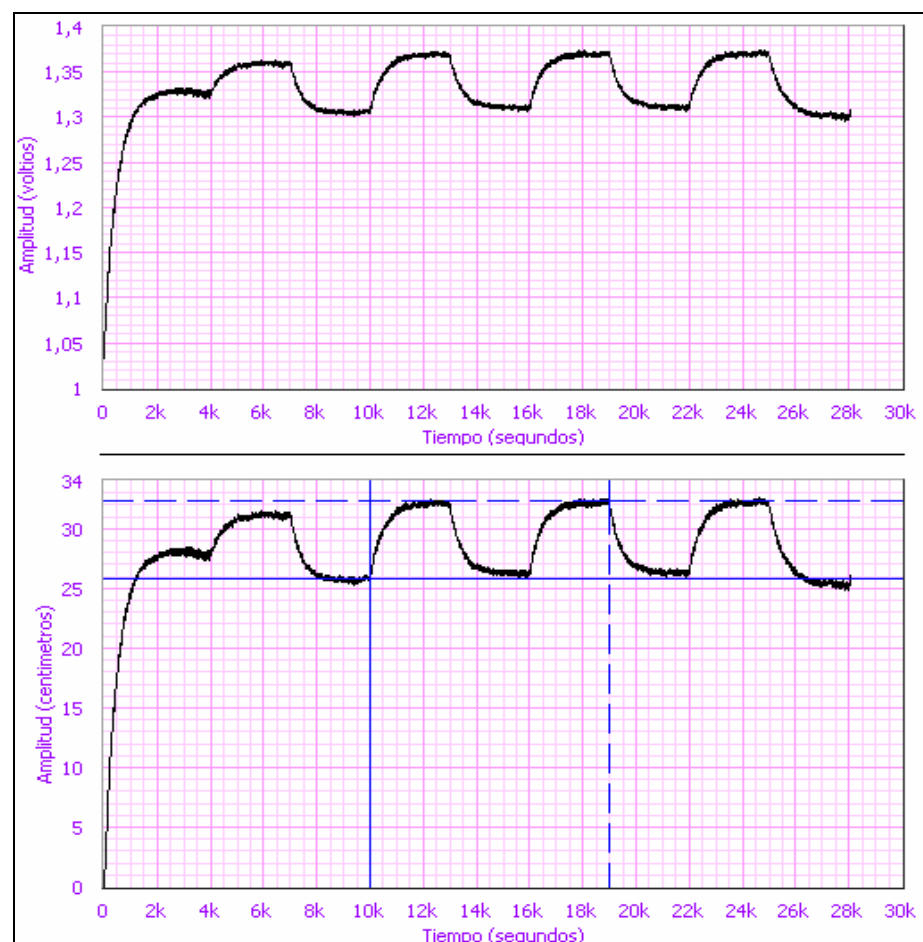


FIGURA 4.1 RANGO DE IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA.

La conversión de los datos obtenidos en la respuesta de la planta en voltios se pueden transformar a términos de nivel en el tanque

mediante la aplicación de la fórmula 2.10, la cual fue explicada en el capítulo 2 para conversión de la señal de salida del transmisor de presión a unidades de centímetros. La ecuación 2.10 se re-escribe a continuación en la ecuación 4.1.

$$h_{cm} = 99.65V_{TRANS} - 104.35 \quad (4.1)$$

Donde:

V_{TRANS} es el voltaje de respuesta de la planta.

Observando los datos de la figura 4.1, verificamos que la identificación de la planta fue realizada dentro del rango de 26cm hasta 32cm de nivel en el tanque, por lo que se concluye que el controlador que aquí se diseñe podrá ser válido dentro de este rango. Además tomamos un punto medio de 29cm como el punto de operación en el cual se realizó la identificación de la planta.

Otro punto importante a tener en cuenta dentro del diseño del controlador son las especificaciones de funcionamiento deseadas para la planta, las cuales por lo general están definidas en términos de la respuesta en el tiempo para una señal específica de entrada y del error resultante en estado estacionario, e_{SS} .

Para entender de qué se tratan estas especificaciones de funcionamiento nos enfocaremos ahora en la figura 4.2, en donde podemos observar la respuesta en el tiempo de un sistema de control ante una entrada de referencia tipo escalón.

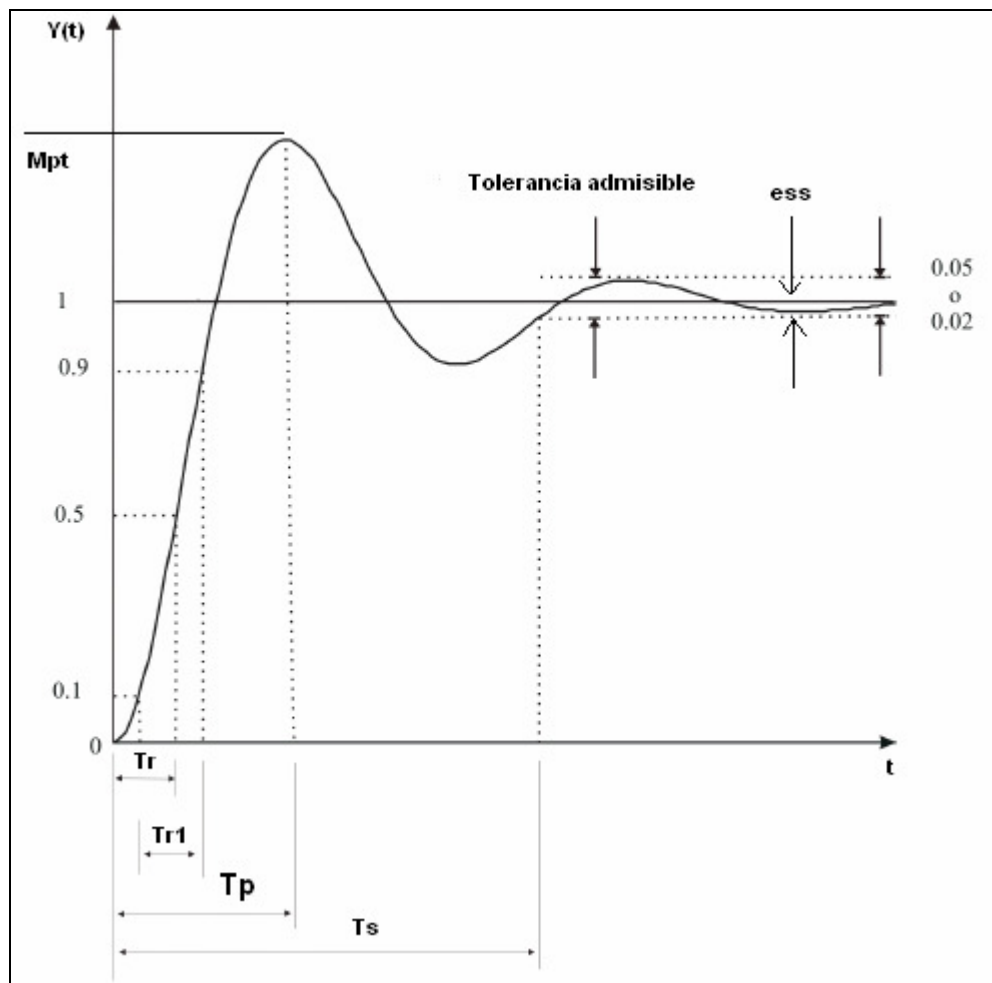


FIGURA 4.2 RESPUESTA DE UN SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN A UNA ENTRADA DE REFERENCIA TIPO ESCALÓN.

Se definirá el tiempo de ascenso T_r , el cual mide la rapidez de la respuesta. Adicionalmente, la rapidez de la respuesta también se puede determinar en términos del tiempo de pico, T_p . Sin embargo si el sistema es sobreamortiguado, el tiempo de pico T_p no está definido, en su lugar se usa el tiempo de ascenso T_{r1} , definido entre 10% y 90% de la respuesta. La semejanza con que la respuesta real iguala a la entrada escalón se mide mediante el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización T_S . El sobrenivel porcentual se define a través de [4]:

$$SP = \frac{M_{Pt} - 1}{1} \times 100\% \quad (4.2)$$

Donde:

SP es el sobrenivel porcentual para una entrada escalón unitaria.

M_{Pt} es el valor pico de la respuesta en el tiempo.

Se definirá el tiempo de estabilización, T_S , como el tiempo necesario para que el sistema se estabilice dentro de cierto porcentaje $\pm \delta$ de la amplitud de entrada. Finalmente la respuesta transitoria del sistema puede ser descrita en términos de la rapidez de la respuesta; a través de T_r y T_p , y en términos de la proximidad de la respuesta a los valores deseados de M_{Pt} y T_S [4].

Una vez definidos estos términos resta decir que para el diseño del controlador de la planta tomaremos como parámetros de diseño el sobrenivel porcentual M_{Pt} y el tiempo de estabilización T_S .

Con esto en mente fijaremos los valores numéricos de los parámetros SP y T_S para nuestro diseño, los cuales no necesariamente son un conjunto estricto de requerimientos sino que forman parte de una primera prueba para establecer un funcionamiento deseado. De este modo trabajaremos como primera prueba con un valor de sobrenivel porcentual $SP < 4\%$.

Para tener una mejor comprensión del significado del requerimiento de sobrenivel porcentual menor a 4%, supongamos que para el sistema de control de nivel fijamos un nivel de referencia de 28cm. Reemplazando estos valores en la ecuación 4.2 tenemos que:

$$4\% = \frac{M_{Pt} - 28}{28} \times 100\% \quad (4.3)$$

Donde despejando el valor de M_{Pt} encontramos que para un sobrenivel porcentual menor a 4% y una señal de referencia de valor 28, $M_{Pt} = 29,12$. Recordando que la señal de referencia representa un valor en centímetros, de lo anterior concluimos que el valor pico

de la respuesta en el tiempo no sobrepasará de los 29,12cm. Igualmente calculamos los valores de M_{Pt} para el nivel de referencia 29 y 30cm, con lo que obtuvimos valores picos de 30,16 y 31,2cm respectivamente.

Luego de haber establecido el valor de diseño del SP como 4%, falta establecer el valor del tiempo de estabilización. Tomaremos en consideración un $T_{S1} = 200$ s, sin embargo como se explicó anteriormente este valor no es un valor estático, se puede cambiar de modo tal que se obtenga otro diseño para otro valor de sobrenivel porcentual. Tomaremos este valor como referencia para el diseño y analizaremos los resultados correspondientes.

4.2 Diseño del Controlador.

Consideremos el esquema mostrado en la figura 4.3, el cual representa el sistema con retroalimentación de la planta de control de nivel. Definiremos $C(s)$ como la función de transferencia del controlador de la planta, $G(s)$ como la función de transferencia de la Planta, $H(s)$ como la función de transferencia del sensor, $R(s)$ como

la señal de referencia aplicada al sistema, $Y(s)$ la respuesta de la planta, $E(s)$ como el error, y $u(s)$ como la señal actuante.

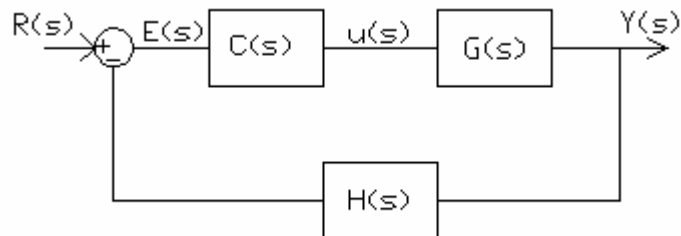


FIGURA 4.3 ESQUEMA CON RETROALIMENTACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

Para el esquema en la figura 4.3, consideramos los siguientes valores:

$$G(s) = \frac{0.00095}{s + 0.0022} \quad (4.4)$$

Recordando que el valor de $G(s)$ fue el encontrado durante la identificación de la planta en el capítulo 3, y además involucra el modelado de la planta incluyendo variador, bomba, tanque y transmisor. Entonces el valor de $H(s)$ se define a continuación como:

$$H(s) = 1 \quad (4.5)$$

Adicionalmente recordaremos la estructura de un controlador proporcional, integral y derivativo PID, la ecuación de este controlador se muestra a continuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.6)$$

Donde:

$u(t)$ representa la salida del controlador PID.

K_p es la ganancia proporcional.

T_i es la constante de tiempo integral en minutos.

T_d es la constante tiempo derivativo en minutos.

$e(t)$ la señal de error.

La función de transferencia de la ecuación 4.6, que representa la acción de control de una estructura PID es :

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.7)$$

Para el diseño del controlador de la planta partiremos graficando el lugar geométrico o trayectoria de las raíces en lazo cerrado. Para este propósito haremos uso de las funciones de la librería de Diseño de Control de LabVIEW. Consideremos el sistema en lazo cerrado de la planta como se muestra en la figura 4.4, donde $C(s)$ se ha

reemplazado por una constante K y $H(s)$ vale 1. Mediante la variación del parámetro K se halla la trayectoria de las raíces para este sistema, el valor de K puede variar desde 0 hasta un valor infinitamente grande.

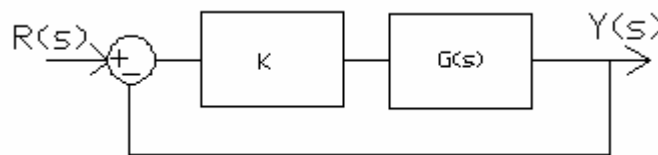


FIGURA 4.4 ESQUEMA CON RETROALIMENTACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

Para graficar la trayectoria de las raíces de la planta $G(s)$, primero en el diagrama de bloques de LabVIEW construiremos el modelo de la planta $G(s)$ por medio de la función CD Construct Zero-Pole-Gain Model, función que se encuentra alojada en la librería de Diseño de Control en la paleta de funciones de LabVIEW. Esta función construye un modelo del tipo cero polo ganancia de acuerdo a los parámetros que se conecten a sus entradas, seguidamente conectamos la función CD Draw Zero-Pole-Gain Equation, que se encarga de graficar el modelo construido en un indicador en el diagrama frontal del programa. Para observar el gráfico de la trayectoria de las raíces utilizamos la función CD Root Locus, la cual requiere que se conecte a sus entrada el modelo de la función a la

cual deseamos graficar la trayectoria y además requiere que se conecte la entrada numérica K, que es el valor del parámetro que se variará para obtener la trayectoria de las raíces. En la figura 4.5 observamos el diagrama de bloques con la disposición de las funciones antes mencionadas.

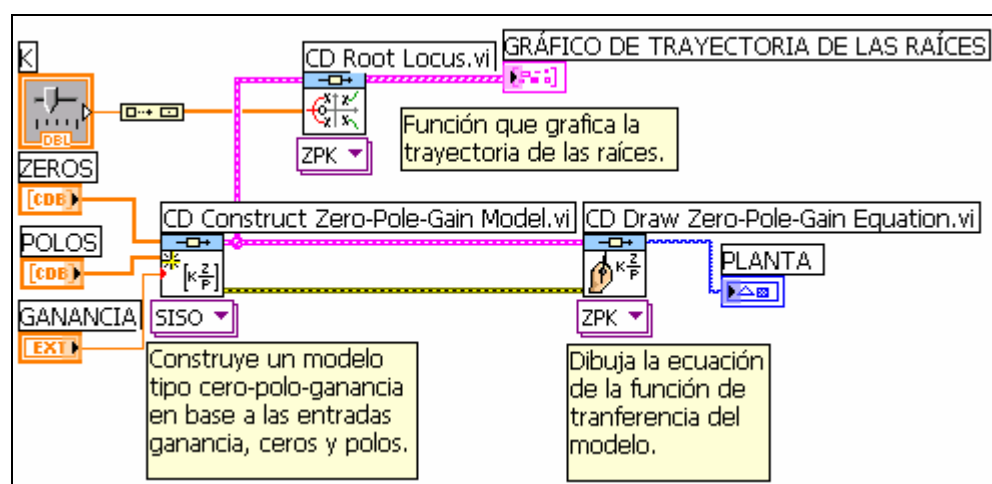


FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GRÁFICO DE TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES.

Ingresando los valores de ganancia igual a 0.00095 y un polo real en -0.0022 tal como se muestra en la ecuación 4.4 para la construcción del modelo de la planta $G(s)$, y con un valor de ganancia K de 50 tenemos que el gráfico de la trayectoria de las raíces es como se muestra en la figura 4.6.

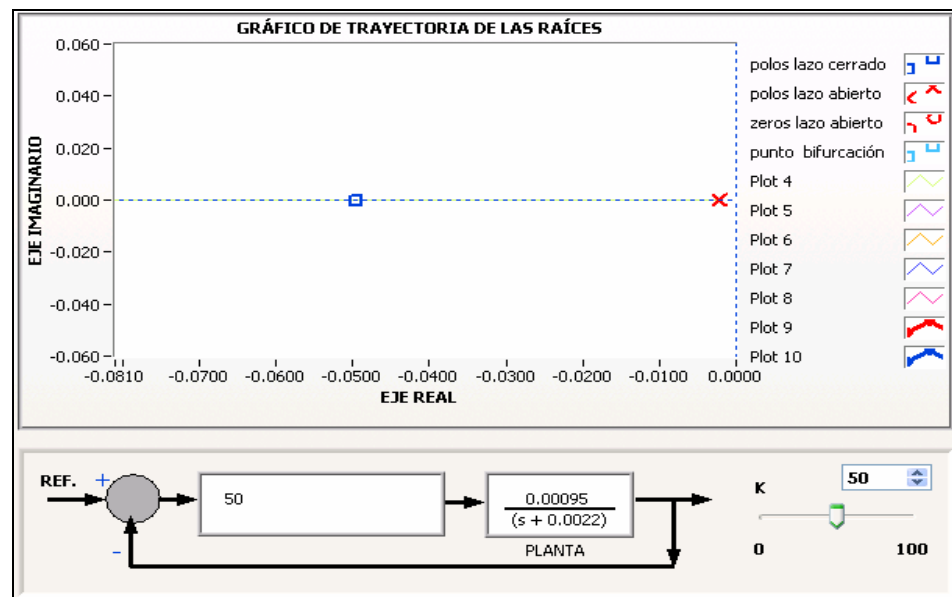


FIGURA 4.6 TRAYECTORIA DE LAS RAICES PARA $K = 50$.

Si comparamos el diagrama de bloques de la figura 4.3 con el de la figura 4.4 nos daremos cuenta que al momento de realizar la variación del parámetro K , estamos realizando la variación de la ganancia del controlador $C(s)$, por lo que finalmente vamos a estar trabajando con un sistema de lazo cerrado como el que se muestra en la figura 4.7.

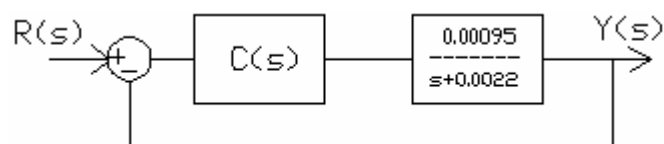


FIGURA 4.7 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON RETROALIMENTACIÓN.

Una vez graficada la trayectoria de las raíces, trataremos de hacer uso del método de Ziegler y Nichols para ajuste de los parámetros de un controlador PID. Ya que $C(s)$ será un controlador de la familia de controladores PID, este método puede ser aplicable. El método requiere que utilizando solo control proporcional, comencemos aplicando un valor pequeño de ganancia proporcional $K = K_p$, el cual debemos incrementar hasta que el sistema comience a oscilar. Para esto debemos observar la respuesta del sistema a una entrada de referencia tipo escalón unitario.

Para observar la respuesta en el tiempo del sistema ante una entrada de referencia tipo escalón unitario haremos uso de la función CD Step Response, la cual calcula la salida de un sistema cuando una señal tipo escalón unitario lo excita. La entrada de esta función requiere que se conecte el sistema completo, por lo que previamente se construye un modelo para el controlador $C(s)$, se lo conecta en serie con el modelo de la planta $G(s)$ usando la función CD Series. Una vez conectado en serie $C(s)$ con $G(s)$, el modelo resultante lo conectamos en una configuración con retroalimentación unitaria, por medio de la función CD Feedback. El esquema de conexiones en el diagrama de bloques se muestra en la figura 4.8.

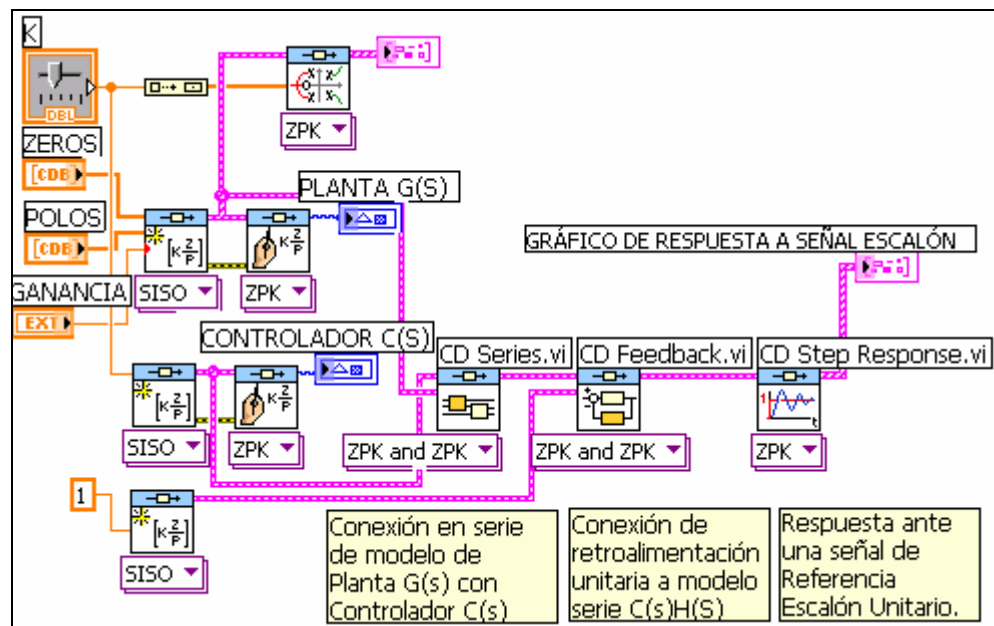


FIGURA 4.8 DIAGRAMA DE BLOQUES PARA GRAFICAR RESPUESTA DEL SISTEMA A SEÑAL ESCALÓN UNITARIO.

Realizando la variación del parámetro $K = K_p$ hasta valores muy grandes la respuesta del sistema a una entrada escalón no oscila por lo que se imposibilita el uso del método de Ziegler y Nichols. El resultado de la respuesta del sistema ante la entrada de referencia escalón unitario se observa en la figura 4.9.

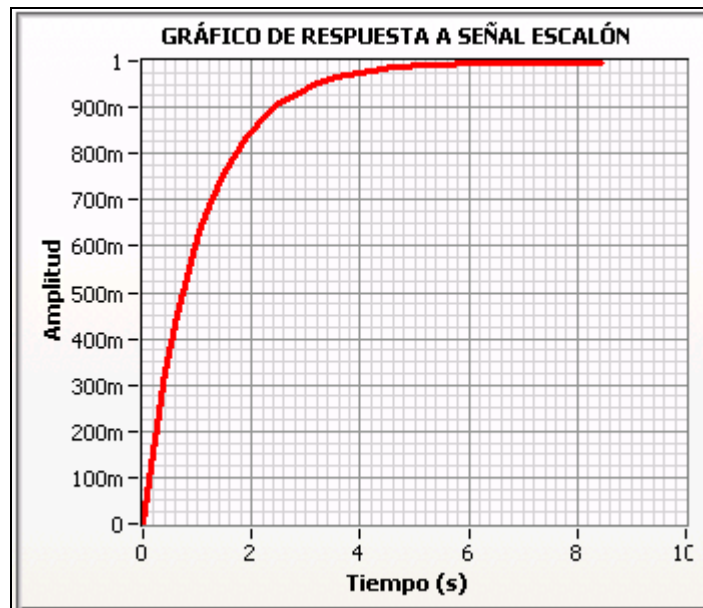


FIGURA 4.9 RESPUESTA DEL SISTEMA A ENTRADA DE REFERENCIA ESCALÓN UNITARIO CON $K = 1000$.

Al no ser aplicable el método de Ziegler y Nichols recurriremos al análisis probando con diferentes estructuras de controladores PID. Iniciaremos probando con un controlador con solo ganancia proporcional. La respuesta del sistema ante una entrada escalón con un controlador con ganancia proporcional K_p produce un tiempo de estabilización $T_s = 150$ segundos, figura 4.10. Utilizar un controlador con solo ganancia proporcional produce una buena respuesta del sistema con respecto al tiempo de estabilización, sin embargo la desventaja es que siempre existirá un valor finito de error de estado estacionario e_{ss} .

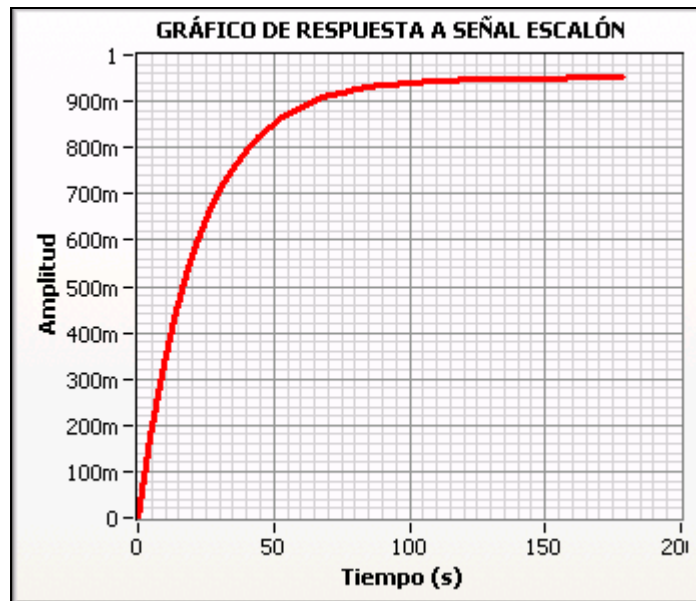


FIGURA 4.10 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROLADOR
CON GANANCIA PROPORCIONAL $K_p = 45$.

A continuación procedemos a hacer uso de un controlador con solo ganancia integral, para lo cual agregamos un polo en el origen al controlador $C(s)$. La trayectoria de las raíces del sistema cambia a la mostrada en la figura 4.11.

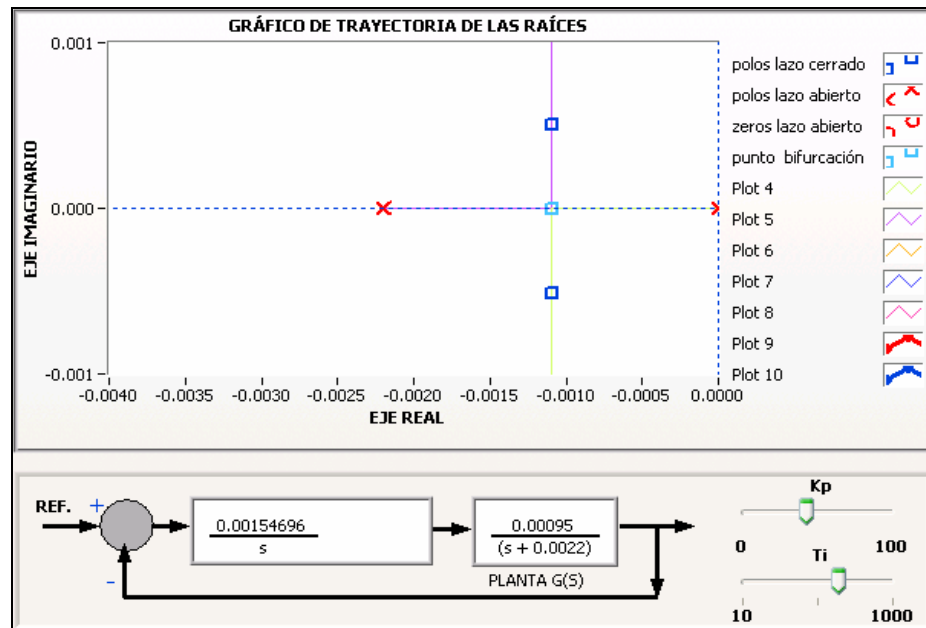


FIGURA 4.11 TRAYECTORIA DE LAS RAÍCES DEL SISTEMA CON UN CONTROLADOR PURAMENTE INTEGRAL.

Desplazándonos a lo largo de la trayectoria de las raíces para de este modo variar el tiempo integral T_i , obtenemos buenos resultados de la respuesta del sistema con respecto al sobrenivel porcentual SP , sin embargo no obtenemos los mismos buenos resultados con respecto al tiempo de estabilización T_s el cual se encuentra dentro del rango de los 5000 y 6000 segundos, figura 4.12.

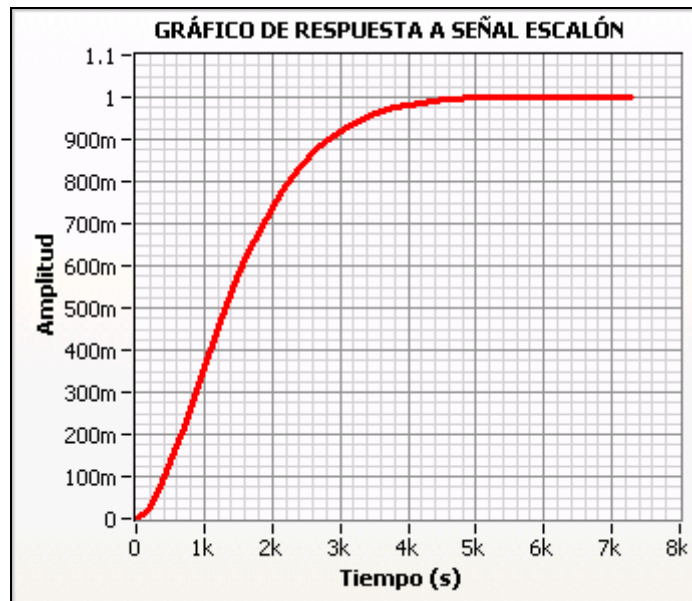


FIGURA 4.12 RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTRALADOR CON GANANCIA PURAMENTE INTEGRAL.

La respuesta del sistema se puede mejorar uniendo las características de cada uno de los controles, proporcional e integral. A pesar de unir las ventajas del control proporcional y del control integral lograr buenos resultados con respecto al sobrenivel porcentual SP y el tiempo de estabilización T_S es una tarea un poco dificultosa, ya que ambos parámetros están relacionados indirectamente, mejorar uno conlleva a desmejorar la medida del otro. No obstante se debe encontrar el diseño apropiado para obtener una respuesta en el tiempo con valores efectivos de estos dos parámetros.

Si para la función de transferencia del controlador PID en la ecuación 4.7 hacemos valer la constante T_d cero, y reordenamos la ecuación 4.7 tenemos el siguiente resultado:

$$C_{PI} = K_p \left(\frac{s + 1/T_i}{s} \right) \quad (4.8)$$

Donde:

C_{PI} representa la función de transferencia de un controlador con solo ganancia proporcional e integral.

De la ecuación 4.8 notamos que para lograr la acción proporcional mas integral en el controlador $C(s)$, a la trayectoria de las raíces de la figura 4.11 debemos agregarle un cero en la ubicación $-1/T_i$, cuyo valor numérico será manipulado hasta encontrar el punto optimo que proporcione los resultados requeridos. Agregando el valor del cero a la función del controlador tenemos que la trayectoria de las raíces cambia a la mostrada en la figura 4.13.

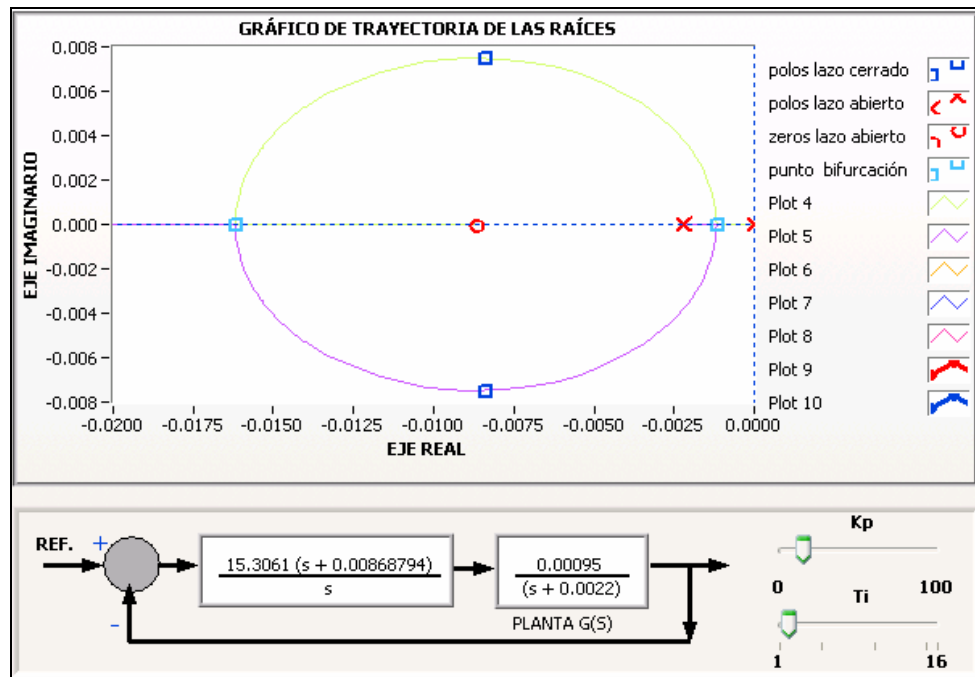


FIGURA 4.13 TRAYECTORIA DE LAS RAICES APLICANDO CONTROLADOR CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL.

Ahora resta buscar el ajuste óptimo del controlador, para lo cual definiremos dos restricciones, las cuales son sobrenivel porcentual $SP < 4\%$ y tiempo de estabilización $T_s < 200$ s. Para esto recurriremos a las ecuaciones que definen estos parámetros en un sistema de segundo orden, pero primero analizaremos brevemente el comportamiento de un sistema de segundo orden para poder comprender mejor de que se trata.

Análisis de un sistema de segundo orden.

Consideraremos un sistema de segundo orden como el que se muestra en la figura 4.14.

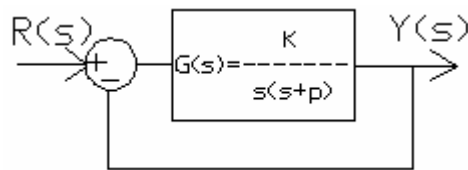


FIGURA 4.14 SISTEMA DE SEGUNDO ORDEN.

Para el sistema de segundo orden que se muestra en la figura 4.14 la salida de circuito cerrado $Y(s)$ es:

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} R(s) \quad (4.9)$$

$$Y(s) = \frac{K}{s^2 + ps + K} R(s) \quad (4.10)$$

Ahora utilizando una notación general y definiendo la función de transferencia $T(s) = Y(s)/R(s)$ tenemos que:

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.11)$$

Donde:

ζ es la relación de amortiguación .

ω_n es la frecuencia natural.

Las raíces de este sistema son:

$$r(1,2) = -\omega_n \zeta \pm \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.12)$$

Además para este tipo de sistema se demuestra que el sobrenivel porcentual SP y el tiempo de estabilización T_s son como se muestra a continuación [4]:

$$SP = 100e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4.13)$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (4.14)$$

Entonces para un SP y T_s establecidos se deben de cumplir las siguientes condiciones:

$$\tan \theta = \frac{\pi}{\ln(SP/100)} = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \quad (4.15)$$

$$\zeta\omega = \frac{4}{T_s} \quad (4.16)$$

Donde:

θ es el ángulo formado entre la parte real y compleja de las raíces del sistema.

Así para cumplir las restricciones dadas para SP y T_s , gráficamente la trayectoria de las raíces debe estar ubicada en la intersección de la línea vertical azul, condición para T_s y las líneas rojas, condición para SP [4], figura 4.15.

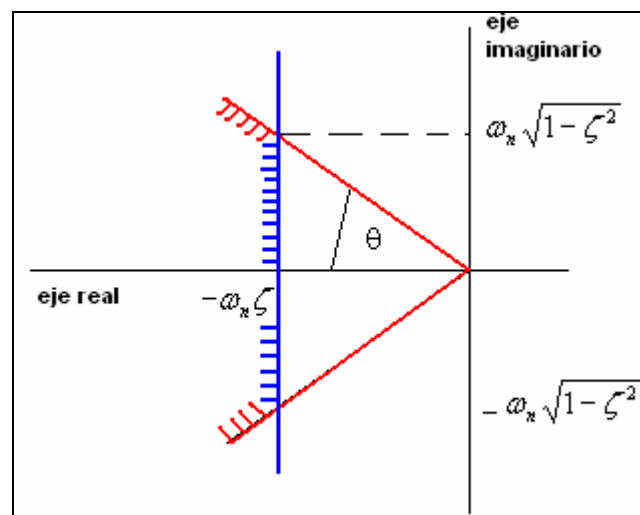


FIGURA 4.15 REGIÓN PARA LIMITES DE SOBRENIVEL PORCENTUAL SP Y TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN T_s .

Retornando al diseño del controlador para la planta de control de nivel, podemos hacer uso de estas restricciones para en base a los parámetros SP y T_s que deseamos alcanzar, graficar estas curvas y

tener una referencia de en donde debería estar ubicada la trayectoria real de modo tal que alcancemos estas especificaciones.

El gráfico de estas restricciones no afecta en nada a la trayectoria de las raíces pero marcan límites que sirven para tener una referencia de sobre que rango debemos desplazarnos en la trayectoria de las raíces para obtener los valores indicados de SP y T_s . Así si verificamos ahora la pantalla con la grafica de la trayectoria de las raíces tenemos el resultado que se muestra en la figura 4.16.

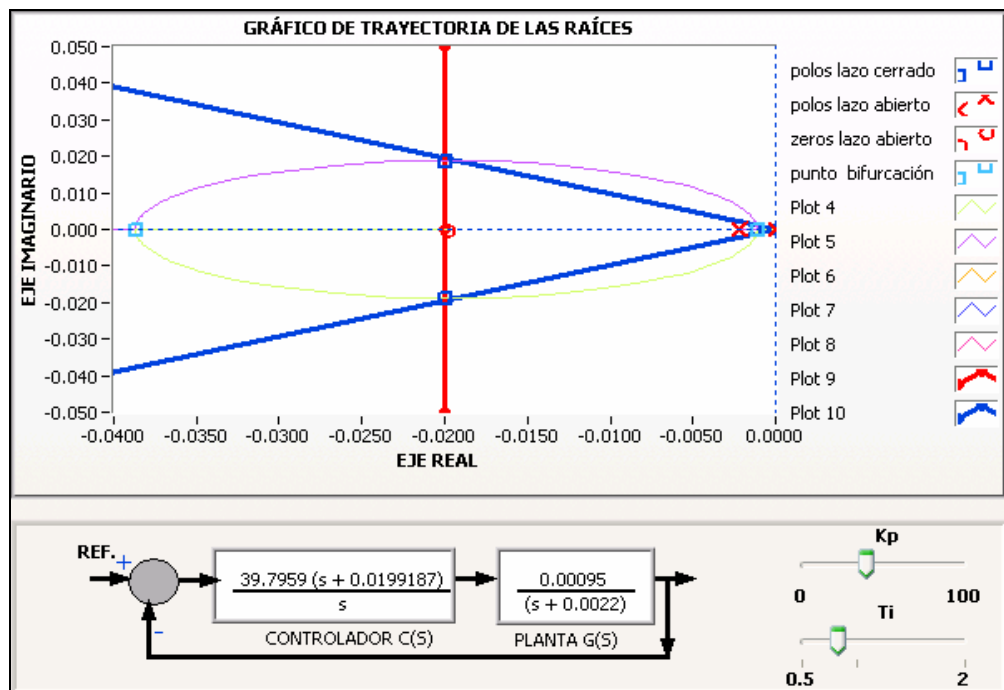


FIGURA 4.16 RESTRICCIONES PARA $T_s < 200$ Y $SP < 4\%$.

Ubicando el cero y desplazando la trayectoria hasta la intersección de los dos límites de las restricciones o condicionamientos obtenemos el mejor resultado con respecto a los dos parámetros SP y T_s .

A pesar de esto si observamos la respuesta del sistema a una entrada de referencia tipo escalón en la figura 4.17, nos daremos cuenta que los valores de respuesta obtenidos para estos dos parámetros no son completamente los deseados. Se obtiene un tiempo de estabilización aceptable dentro del rango que fijamos de 194.7 segundos, pero un sobrenivel porcentual de 17.9 % muy arriba de lo establecido.

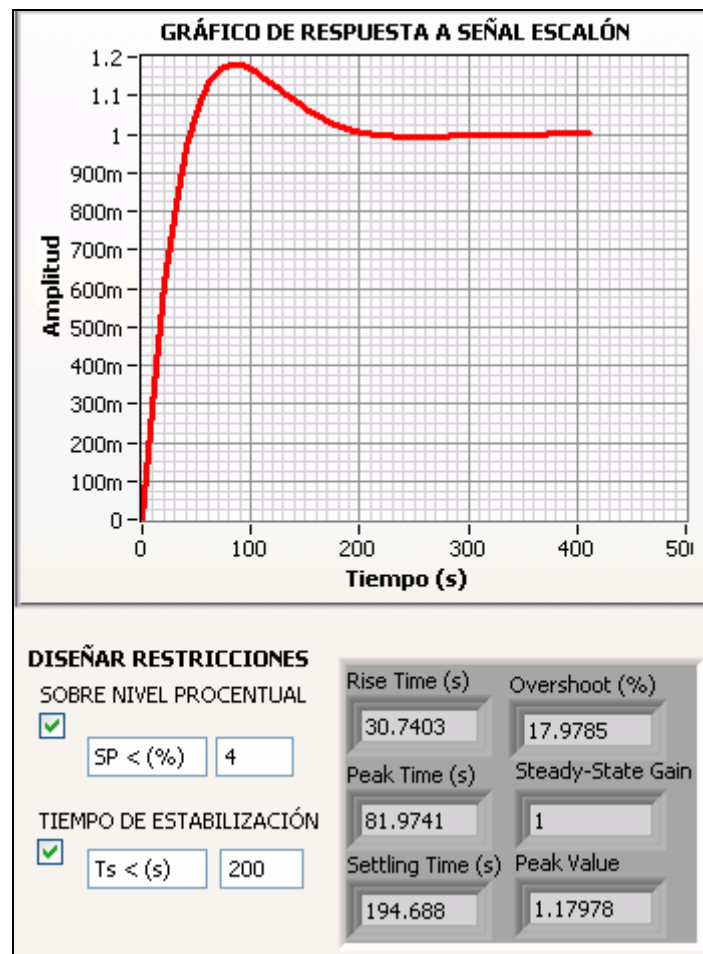


FIGURA 4.17 RESPUESTA DEL SISTEMA A UNA ENTRADA ESCALÓN.

Para mejorar la característica de la respuesta en el tiempo de este sistema recurrimos al uso de un artificio, colocando una función de transferencia a la entrada del sistema justo después de la aplicación de $R(s)$ este sirve para compensar la presencia de un cero en la función de transferencia total del sistema el cual surge debido al uso del controlador proporcional integral PI. A continuación veremos el desarrollo de este procedimiento.

Si reemplazamos los valores hasta ahora encontrados para el controlador, los cuales pueden ser observados en la parte inferior de la figura 4.16 y reemplazamos en el diagrama de bloques de la figura 4.7 obtenemos el resultado mostrado en el diagrama de la figura 4.18.

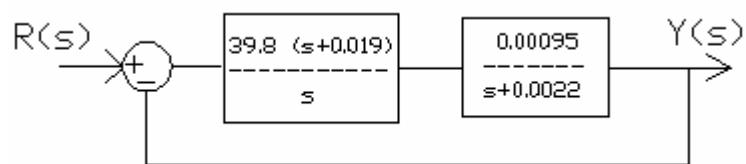


FIGURA 4.18 SISTEMA DE CONTROL CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL PI.

Ahora si dibujamos nuevamente el diagrama de bloques de la figura 4.18 pero esta vez en términos generales obtenemos el diagrama de la figura 4.19. Donde P y K_1 son el polo y ganancia de la planta, y Z y K_2 son el cero y la ganancia debida a la función de transferencia del controlador PI.

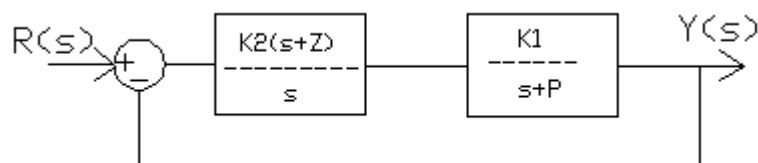


FIGURA 4.19 SISTEMA DE CONTROL CON GANANCIA PROPORCIONAL E INTEGRAL PI.

Si encontramos la función de transferencia del sistema $Y(s)/R(s)$ obtenemos que:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_1 K_2 (s + Z)}{s^2 + s(P + K_1 K_2) + K_1 K_2 Z} \quad (4.17)$$

De este modo la salida $Y(s)$ de este sistema cuando se aplica una entrada escalón unitario es:

$$Y(s) = \frac{K_1 K_2 (s + Z)}{s^2 + s(P + K_1 K_2) + K_1 K_2 Z} \times \frac{1}{s} \quad (4.18)$$

Para mejorar la característica de la respuesta en el tiempo de este sistema podemos tratar de aproximar la ecuación 4.18 a la de un sistema de segundo orden cuya respuesta, como observamos en la ecuación 4.11, cuando se aplica una entrada escalón unitario es de la forma de acuerdo a la ecuación 4.19 [4] :

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \times \frac{1}{s} \quad (4.19)$$

Si comparamos las dos funciones 4.18 y 4.19 notamos que el término que en forma las diferencia es el cero que se encuentra en la ecuación 4.18. Para aproximarlas entonces aplicaremos la función $F(s)$ después de la entrada $R(s)$ donde:

$$F(s) = \frac{Z}{(s+Z)} \quad (4.20)$$

Donde:

Z es la ubicación del polo debido al controlador PI.

De este modo el diagrama de bloques de la figura 4.19 se convierte en el mostrado a continuación en la figura 4.20.

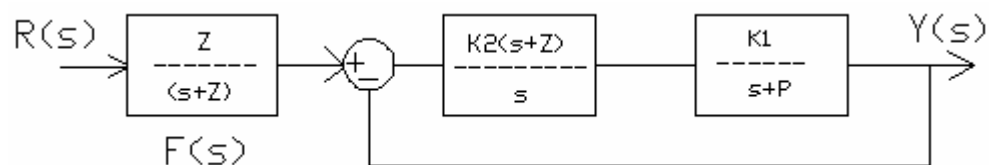


FIGURA 4.20 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SISTEMA CON FUNCIÓN F(S) A LA ENTRADA.

Con esta nueva función agregada a la entrada tenemos que la salida del sistema ahora es:

$$Y(s) = \frac{K_1 K_2 (s+Z)}{s^2 + s(P + K_1 K_2) + K_1 K_2 Z} \times \frac{1}{s} \times \frac{Z}{(s+Z)} \quad (4.21)$$

Con esto se logra mejorar la respuesta en el tiempo del sistema, aproximándola a la de un sistema de segundo orden, sin embargo la incorporación de esta función no afecta la característica de la planta, pero si su respuesta en el tiempo.

Explicado lo anterior resta identificar el valor Z del cero de la función del controlador PI, y agregarlo como valor de un polo a la función $F(s)$ a la entrada del sistema. El valor numérico del cero en el controlador lo podemos observar en la parte inferior de la figura 4.16, el cual corresponde a -0.019 . Ahora procedemos a colocarlo dentro del programa de diseño para poder observar la nueva respuesta de la planta o sistema ante una entrada de referencia escalón.

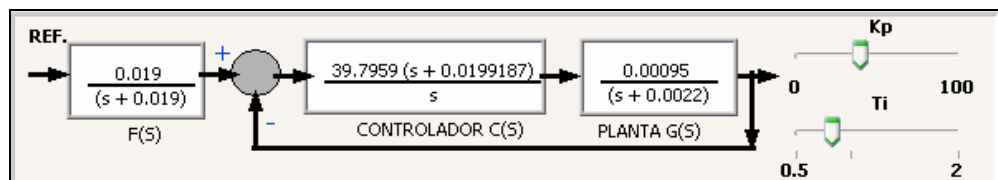


FIGURA 4.21 ADICIÓN DE FUNCIÓN $F(S)$.

Habiendo realizado estos cambios la respuesta en el tiempo del sistema cambia al de la figura 4.22 en el cual podemos notar que el sobrenivel porcentual ha disminuido de un 17.9 % a un 2.79 %, mientras que el tiempo de estabilización esta cerca de los 239.9 s.

Podemos de estos resultados concluir que la planta de control de nivel funcionará correctamente con la aplicación de un controlador PI de la familia de controladores PID. Para verificar estos resultados

deberemos realizar simulaciones y la respectiva implementación del controlador en la planta real de control de nivel.

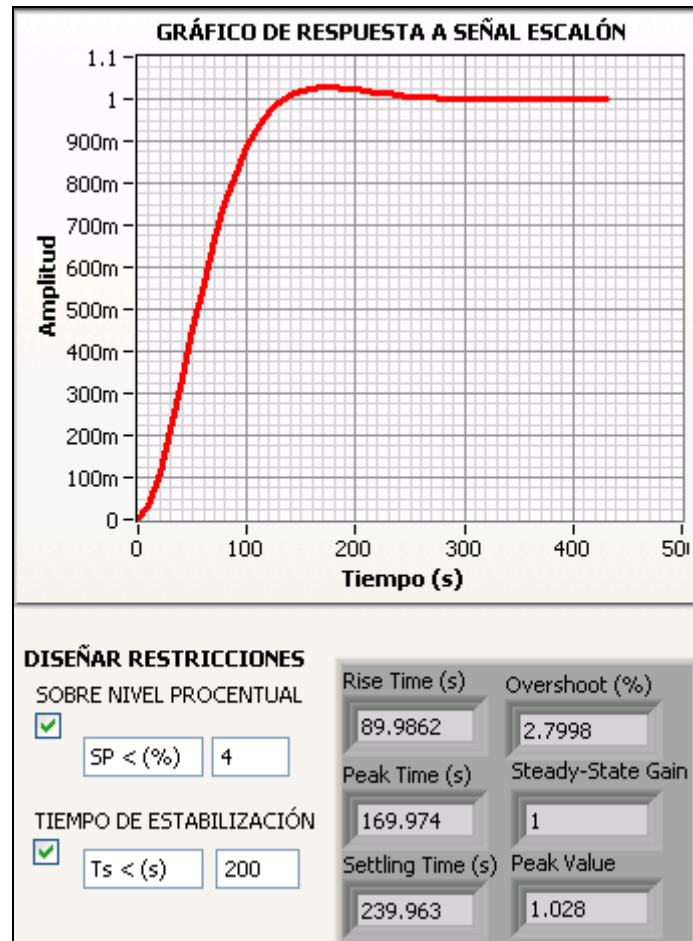


FIGURA 4.22 RESPUESTA DEL SISTEMA INCORPORANDO FUNCIÓN $F(S)$.

A continuación se muestra la simulación y resultados de la implementación del controlador PI en la planta real de control de nivel.

4.3 Simulación de la Planta con Controlador.

Una vez que en el numeral anterior se realizó el análisis del comportamiento de la planta basado en el modelo identificado de la planta, ahora implementaremos esos resultados con un controlador real. Pero antes se realizará la simulación la planta de control de nivel y luego realizaremos la implementación del controlador en la planta real. Esta aplicación de control será desarrollada con las herramientas del software LabVIEW, para ello usaremos librerías como la de Simulación y la librería de Control PID. Estas librerías proporcionan funciones como lazos de simulación, funciones para control PID.

El programa de aplicación que realizaremos en LabVIEW consiste en una implementación de control para un sistema SISO, los sistemas SISO son denominados así por que poseen una sola entrada y una sola salida.

Tanto para la simulación como para la implementación del controlador primero debemos tener claro en que consiste la planta de control de nivel, para este propósito haremos referencia al esquema

en la figura 2.2 en donde se mostró el esquema en bloques de la planta real de control de nivel. Ahora redefiniendo dicho esquema y dando valor físico a sus componentes tenemos que el diagrama de bloques de la planta de control de nivel queda como se muestra a continuación en la figura 4.23.

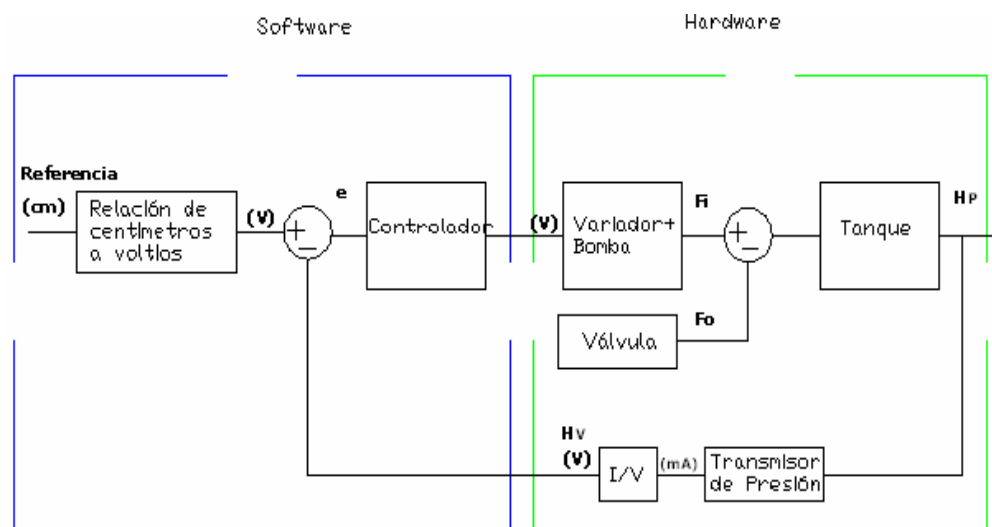


FIGURA 4.23 ESQUEMA EN BLOQUES DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

El esquema en la figura 4.23 muestra el diagrama en bloques de la planta de control de nivel en donde a la entrada tenemos la señal Referencia la cual está dada en centímetros, seguida de un bloque de conversión en el cual esta señal de referencia en centímetros es llevada a una señal correspondiente en voltios. La señal de referencia representa el nivel al cual deseamos opere la planta. La

señal e representa la diferencia entre la señal Referencia y la medición proporcionada por el sensor en este caso, el transmisor de presión que da una señal en mA pero que se convierte a voltios y representa la medición verdadera de nivel en la planta. H_v representa la señal en voltios medida desde el transmisor de presión. A la salida del controlador esta la señal u , que representa la señal que actúa sobre la planta, está en unidades de voltios. H_p representa la variable que se mide en la planta, la presión manométrica. F_i representa el flujo de líquido que ingresa al tanque y F_o el flujo que se desaloja mediante la válvula.

Para llevar a cabo una simulación de la planta de control de nivel haremos uso del lazo de simulación de LabVIEW. El lazo de simulación lo encontramos en la paleta de funciones de LabVIEW en la ubicación Control Design and Simulation – Simulation – Simulation Loop [8]. Este lazo de simulación ejecuta las funciones colocadas dentro de el hasta que se alcanza el tiempo final de ejecución o hasta que una botonera finaliza la ejecución. En la figura 4.24 observamos el lazo de simulación.



FIGURA 4.24 LAZO DE SIMULACIÓN.

El lazo de simulación debe ser configurado previamente antes de ser utilizado, esta configuración se realiza en un cuadro de dialogo al cual se tiene acceso haciendo clic derecho sobre el borde del lazo y seleccionando Configurar Parámetros de Simulación. En el cuadro de diálogo para la configuración del lazo de simulaciones se fijan parámetros de simulación y temporización, entre ellos el tiempo inicial y final de la simulación, el método usado para los cálculos, tolerancia, entre otros. En la figura 4.25 observamos el cuadro de diálogo para la configuración de los parámetros del lazo de simulación, en él fijamos el tiempo inicial con 0 y el tiempo final con 300, para observar la simulación desde un tiempo igual 0 hasta tiempo igual 300 segundos.

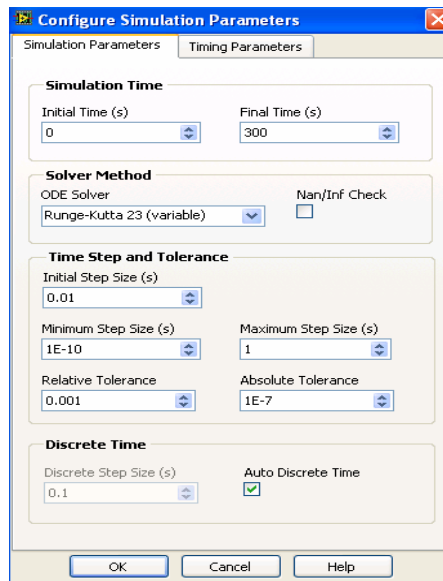


FIGURA 4.25 CUADRO DE DIALOGO PARA CONFIGURACIÓN DE LAZO DE SIMULACIÓN.

En la figura 4.26 observamos el lazo de simulación para la planta de control de nivel. En el lado izquierdo observamos una función escalón con valor inicial de 29cm, valor de estabilización de la planta, y valor alrededor del cual se realizó la identificación de la planta, es decir este punto será el punto inicial o valor cero desde el cual aplicaremos el controlador. En otras palabras la planta debe estar estable alrededor de este punto de operación, y a partir de ahí una distancia hacia arriba y hacia abajo podemos aplicar el controlador diseñado. El valor final de la función escalón es 32cm es decir el valor al cual deseamos opere la planta de control de nivel. Seguidamente tenemos la función de conversión de esta señal en cm

a voltios. A continuación la función de transferencia del controlador PI diseñado, conectado directamente después la función de transferencia del modelo identificado. A este modelo se le suma el valor en voltios del nivel promedio ya que en la vida real esta debería estar operando en el punto de operación, el cual podemos comprobar observando la figura 4.1, y ubicando el valor en voltios del punto de operación. Finalmente esta salida se retro alimenta a la entrada para de este modo crear un lazo de control re alimentado. Ya que la señal de salida la tenemos en voltios colocamos una función para conversión de la salida desde voltios a centímetros, y usamos funciones para graficar, la señal de referencia y la variable medida, y la salida del controlador.

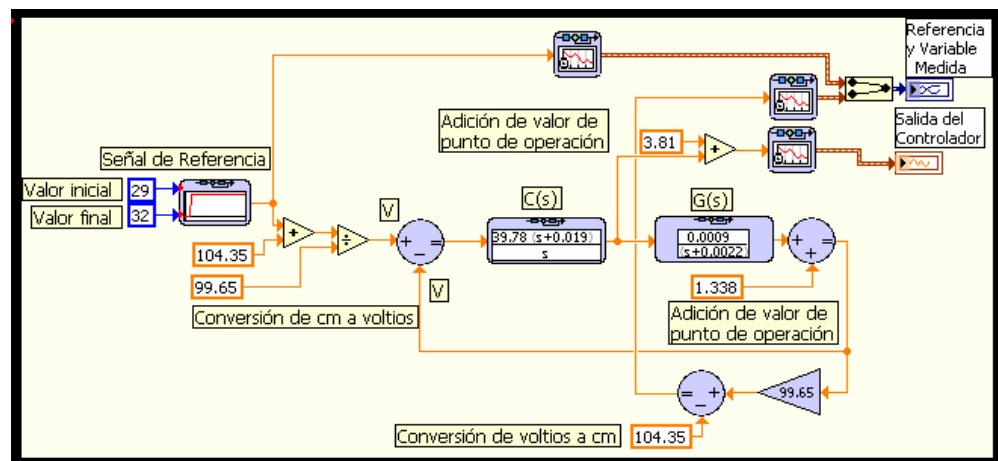


FIGURA 4.26 ESQUEMA DE SIMULACIÓN DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

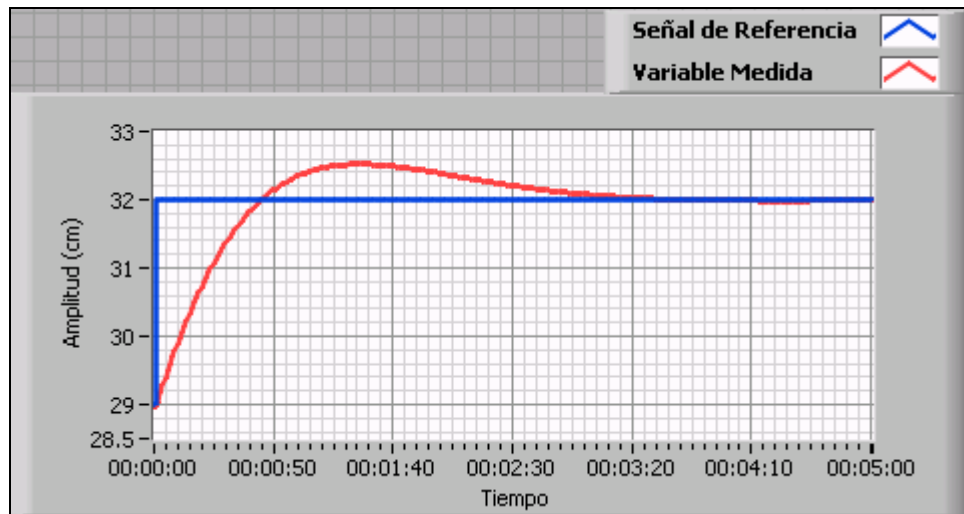


FIGURA 4.27 RESPUESTA DEL SISTEMA ANTE UNA ENTRADA ESCALÓN CON VALOR FINAL 32cm.

En la figura 4.27 observamos la respuesta en el tiempo de la señal de salida de la planta de control de nivel en centímetros, observamos que la señal de nivel en el tanque, fijando una señal de referencia de 32cm llega hasta un valor máximo de 32,6cm en un tiempo de 85 segundos, y se estabiliza en un tiempo aproximadamente 200 segundos.

Adicionalmente en la figura 4.28 observamos la señal de salida del controlador, a la cual si nos fijamos en la figura 4.26, se le ha sumado el valor del punto de operación ya que en la implementación de la planta real deberá sumársele este valor para que así la planta este en su punto de operación.

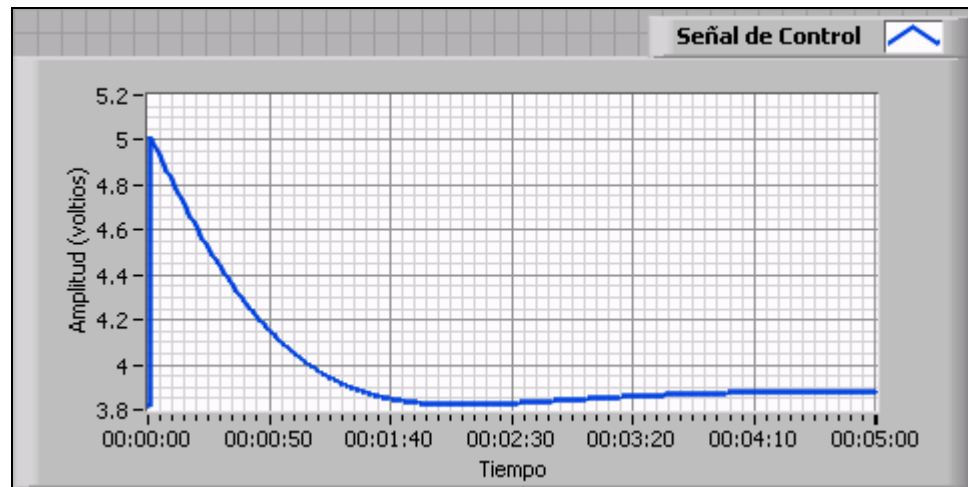


FIGURA 4.28 SEÑAL DE SALIDA DEL CONTROLADOR PARA UNA REFERENCIA DE 32cm.

Debemos recalcar que la salida del controlador, una señal en voltios, es aplicada directamente a un equipo variador de velocidad, el rango de voltaje aplicable es de 2 a 8 voltios. El valor límite de 8 voltios no se puede sobrepasar ya que podríamos causar daños a los equipos, especialmente a la tarjeta de adquisición de datos.

Así una vez realizada la simulación tenemos una idea de el comportamiento que debemos esperar de la planta real, a continuación procedemos a realizar la implementación del controlador real en la planta de control de nivel.

Implementación del controlador en la planta de control de nivel.

Si analizamos el esquema en la figura 4.23 notamos que la parte de la programación encuadrada en azul y denominada software se encarga básicamente de tres pasos. Primero, en el punto donde se encuentra la señal Hv el programa realiza la lectura de esta señal proveniente de la parte del hardware o la planta de control de nivel propiamente. Segundo, una vez leída la señal el programa realiza la comparación de esta con la Referencia y calcula la acción correspondiente. Y tercero, envía o escribe hacia la planta en el punto de la señal u el valor de la acción previamente calculada. Estos tres pasos se repiten continuamente en esa secuencia.

Así el programa de aplicación de control realizado en LabVIEW constara de tres pasos básicos: lectura de una señal desde la planta, calculo de una acción de control y escritura de una señal hacia la planta. Esta acción deberá realizarse continuamente para ello haremos uso nuevamente de un lazo de simulación.

El lazo de simulación debe ser configurado previamente antes de ser utilizado, esta configuración se realiza en un cuadro de dialogo al

cual se tiene acceso haciendo clic derecho sobre el borde del lazo y seleccionando Configurar Parámetros de Simulación. En la figura 4.29 observamos el cuadro de diálogo para la configuración de los parámetros del lazo de simulación, en él fijamos el tiempo inicial con 0 y el tiempo final con Inf para que el lazo se ejecute continuamente hasta que lo detengamos con la botonera de paro, además fijamos un tiempo discreto de 1 s para que el lazo se ejecute cada segundo.

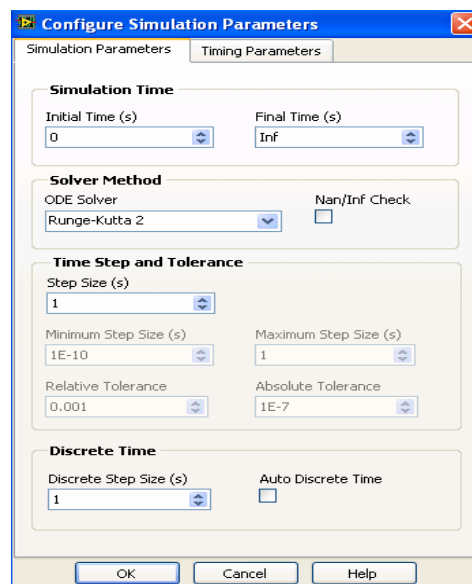


FIGURA 4.29 CUADRO DE DIALOGO PARA CONFIGURACIÓN DE LAZO DE SIMULACIÓN.

Adicionalmente para que todas las funciones colocadas dentro del lazo de simulación se ejecuten también en forma discreta, debemos hacer clic derecho sobre el VI de la función y seleccionar

Configuración del Nodo del VI, elegir la opción Discreto. Además en la opción Periodo seleccionamos -1 para que dicha función se ejecute por defecto bajo lo especificado en la configuración del lazo de simulación [8], figura 4.30.

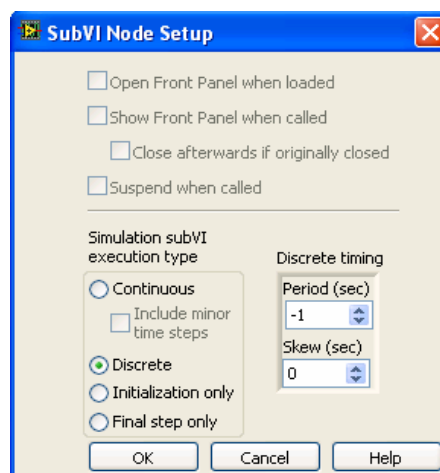


FIGURA 4.30 CONFIGURACIÓN INTERNA DE CADA VI DENTRO DEL LAZO DE SIMULACIÓN.

Una vez configurados los parámetros del lazo de simulación procedemos a realizar el primer paso del programa que consiste en la lectura de la señal proveniente de la planta. Para este propósito, en la parte exterior del lazo y con la ayuda de las funciones de la librería DAQmx realizaremos la configuración para crear un canal de entrada analógico. Una vez realizada la configuración del canal de entrada analógico, ubicamos dentro de lazo de simulación la función de lectura de un canal analógico, la cual al igual que las funciones de

configuración se encuentra ubicada en la paleta de funciones en Measurement I/O – NI-DAQmx. El canal analógico sobre el cual realizaremos la lectura es el canal ai0, cuyos terminales en el bloque conector CB68LP son ACH0 y ACH8, figura 4.31.

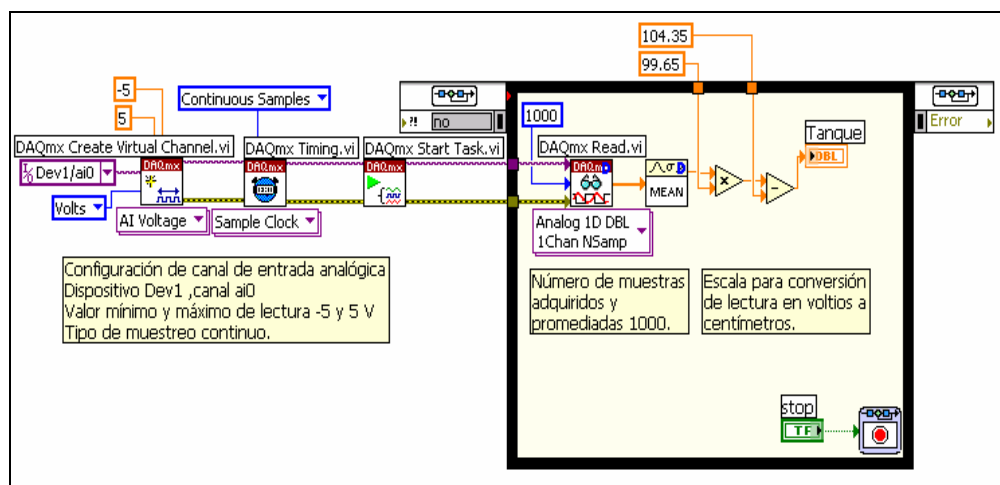


FIGURA 4.31 LECTURA O ADQUISICIÓN DE VARIABLE MEDIDA EN LA PLANTA.

El número de muestras a leerse por canal es de 1000, luego de adquirir este número de muestras se procede al promediado de estas para obtener un solo valor. El valor obtenido de la lectura o adquisición es un valor en unidades de voltios, entonces procedemos a realizar la conversión de este valor a unidades de centímetros, multiplicando la señal por 99,65 y restando a este resultado el valor de 104.35. Una vez realizada esta conversión el valor que obtenemos es la lectura del nivel del tanque en centímetros,

colocamos a la salida de este resultado un indicador denominado Tanque.

Una vez con la señal que representa el valor del nivel en el tanque, procedemos a realizar la acción de control pertinente. Para esto haremos uso de la función PID, figura 4.32, la cual se encuentra disponible gracias al conjunto de herramientas PID que contiene LabVIEW. Esta función la encontramos en la paleta de funciones en Control Design and Simulation – PID.

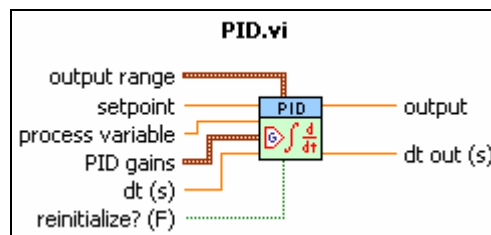


FIGURA 4.32 FUNCIÓN PID.

Debemos recordar que como el controlador diseñado fue encontrado mediante el uso de un modelo identificado para un punto de operación, este debe ser aplicado para dicho punto de operación. En este caso antes de aplicar el controlador debemos hacer que la planta llegue hasta la cercanías de este punto de operación, mientras esto sucede la función PID no puede estar funcionando ya que estaría internamente calculando la suma de los errores entre la señal

de referencia y la variable medida, y esto afectaría la respuesta de la planta una vez que se active el controlador. Por este motivo se creó un sub-VI, que es un subsistema dentro de un programa de LabVIEW en este caso dentro del lazo de simulación, en el cual tenemos la oportunidad de elegir si deseamos operar en modo automático. Si no seleccionamos modo automático, debemos fijar un valor de ajuste manual, en el cual la planta opera en lazo abierto con la salida del controlador fijada al valor de ajuste manual, esto nos sirve para enviar a la planta a su punto de operación. Una vez que la planta este dentro de su punto de operación seleccionamos modo automático y este empezará a trabajar aplicando la acción del controlador. Este sub-VI se ha denominado PID1, figura 4.33, la explicación se detalla a continuación.

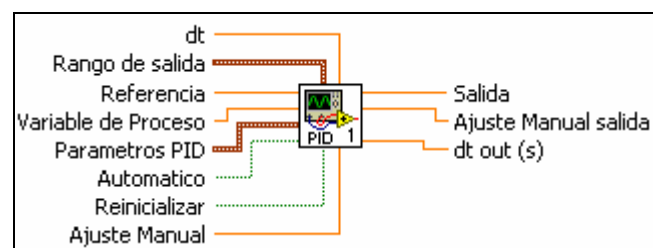


FIGURA 4.33 SUBVI PID1.

Este sub-VI consiste en una estructura de caso la cual posee dos casos, en donde solo se ejecuta uno de los casos a la vez dependiendo del valor lógico de la entrada Automático cableada en el

selector de casos. Si la entrada Automático es verdadera estaremos ejecutando la función PID normal, y la salida será de acuerdo a los parámetros cableados a la entrada de la misma, pero si la entrada Automático es falsa la salida de esta función es igual a la entrada Ajuste Manual, es decir ahí la salida al controlador estará dada por un valor que ajuste el usuario.

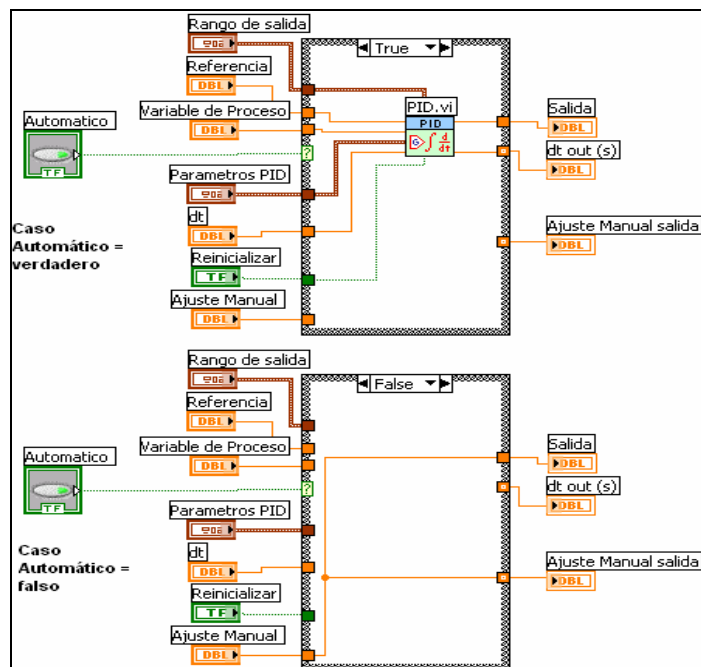


FIGURA 4.34 DIAGRAMA DE BLOQUES DE SUB-VI PID1.

A continuación detallaremos cada una de las entradas conectadas a la función PID1 dentro del lazo de simulación. La entrada rango de salida esta fijada en los valores mínimo y máximo de -100% y 100%. La entrada punto de Referencia esta conectada a una función que

genera una señal escalón la cual tiene un valor final que esta establecido por el valor de la entrada REFERENCIA. La entrada REFERENCIA se refiere al valor en centímetros en el cual deseamos se encuentre el nivel del tanque. Adicionalmente este valor se convierte a su correspondiente en voltios. La entrada Variable de Proceso va conectada a la señal proveniente de la lectura del transmisor de presión y que es proporcional al nivel del tanque. La entrada Parámetros PID son los valores de los parámetros del controlador [17]. La salida de este VI es el valor que aplica a la planta para realizar la acción de control, en este caso estará dentro de un rango de -100% hasta 100%. Esta salida la conectamos por ahora a un indicador denominado Salida del Controlador.

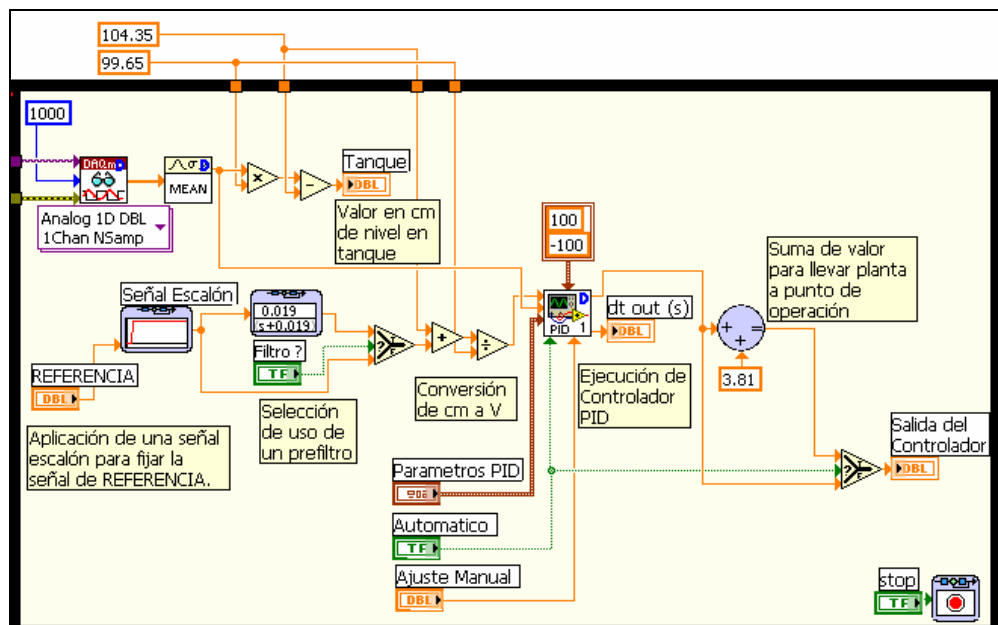


FIGURA 4.35 CONFIGURACIÓN DE CONTROLADOR PID.

En la figura 4.35 se muestra el diagrama de bloques comentado de las funciones agregadas para llevar a cabo este procedimiento. Por motivo de espacio solo se muestran las funciones que se agregaron al lazo de simulación en continuación del diagrama de bloques de la figura 4.31.

Ya configuradas las entradas de la función PID, resta enviar la señal de control producida por esta hacia la planta de control de nivel. Esto lo logramos mediante la escritura o generación de una señal hacia la planta. Debemos al igual que configuramos el canal de entrada analógico configurar un canal de salida analógico. El canal analógico que utilizaremos es el ao0 cuyos terminales en el bloque conector CB68LP son DAC0OUT y AOGND, figura 4.36.

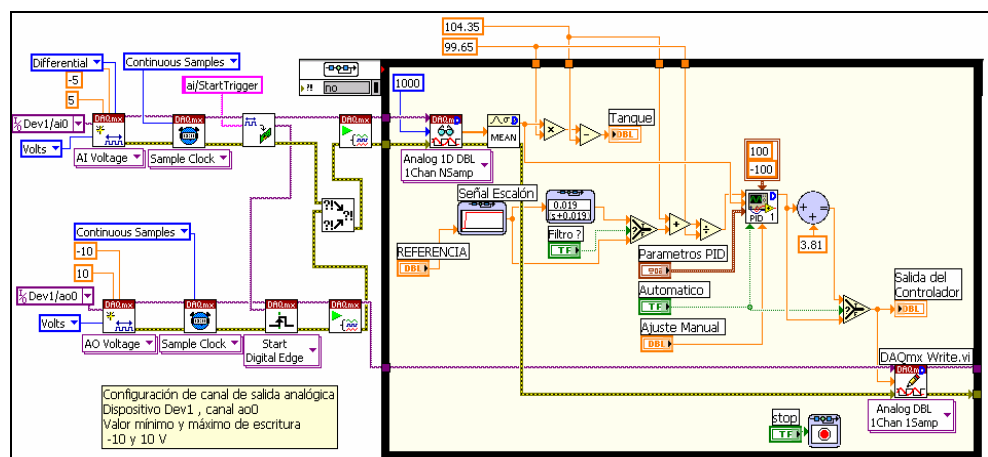


FIGURA 4.36 ESCRITURA O GENERACIÓN DE SEÑAL DE CONTROL.

Adicionalmente además de la entrada de control del variador de velocidad, este requiere de una entrada digital la cual al ser activada indica al variador de velocidad la señal de Encendido y al ser desactivada le indica la señal de Apagado. Desde el programa se enviara una salida de salida digital que como se explico en el capitulo 2 controlará el encendido y apagado del variador en el momento que se ejecute y se pare el programa, figura 4.37.

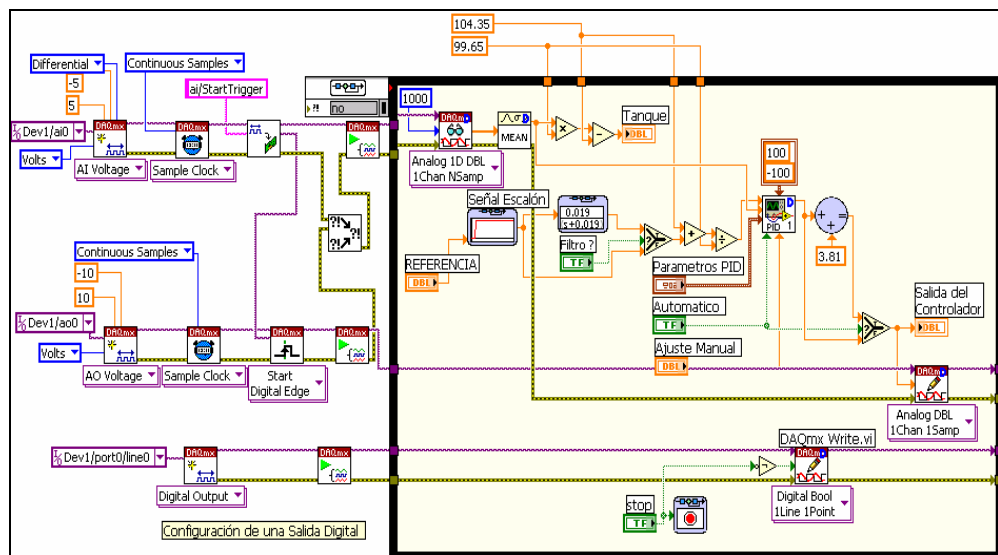


FIGURA 4.37 SEÑAL DIGITAL DE ENCENDIDO Y APAGADO DE VARIADOR DE VELOCIDAD.

Ahora luego de haber realizado la programación en el diagrama de bloques, tenemos que visualizar la entradas y salidas del sistema en el diagrama frontal del programa, para esto usamos indicadores gráficos para el monitoreo de la planta. Las señales en las que

tenemos interés son: la señal de nivel en el tanque versus la señal de Referencia, la señal de control aplicada a la planta. Las entradas que fija el usuario del programa son: los parámetros del controlador PID, el valor de la señal de Referencia.

Adicionalmente se agregan otras entradas al diagrama frontal de tal forma que el usuario tenga la opción de seleccionar si desea que la planta opere en un modo automático, es decir que sea el controlador quien calcule la acción de control pertinente; o que trabaje en modo manual, es decir que sea el usuario quien fije un valor de ajuste manual a la salida del controlador.

Aplicando el controlador ejecutado en LabVIEW, fijando una entrada de Referencia de 32cm tenemos los resultados mostrados en la figura 4.38. Para una señal de Referencia de 32cm el controlador tarda aproximadamente 180 s en alcanzar un estado estable. Adicionalmente se muestra el resultado de variar la señal de referencia desde 32cm hasta 26cm, y nuevamente desde 26cm hasta 32 cm.

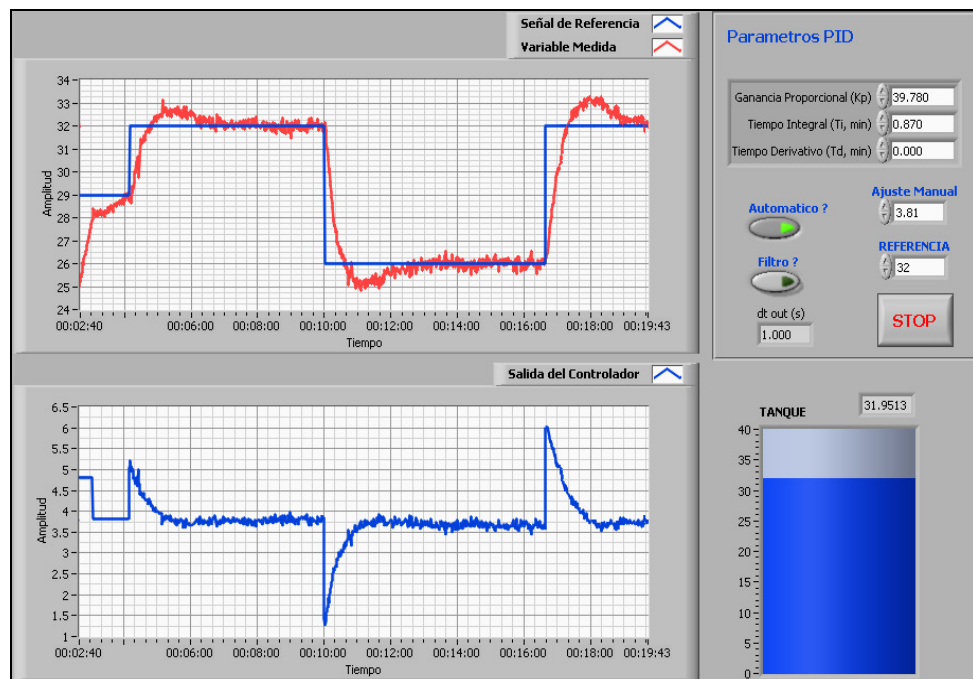


FIGURA 4.38 RESPUESTA DE LA PLANTA DE CONTROL DE NIVEL IMPLEMENTADA CON LABVIEW.

Si comparamos los resultados obtenidos para la simulación en las figuras 4.27 y 4.28 con los de la figura 4.38 de la implementación real tenemos que para la simulación tenemos un valor máximo de salida de 32.6cm mientras que en el resultado de la implementación tenemos un valor máximo aproximado de 32.75 cm. El tiempo de estabilización para la simulación es de 200 s mientras que para la implementación son aproximadamente 180 s. Mientras que la señal de salida del controlador en la simulación arroja un valor de 5V en la implementación tenemos 5.25 V. Todo esto para el primer ciclo en el cual la planta va desde 29cm hasta 32cm.

En este capítulo se definió los criterios de diseño del controlador, se especificó el sobrenivel porcentual y el tiempo de estabilización como parámetros de diseño. Para el diseño del controlador partimos realizando el análisis del modelo identificado en el capítulo anterior, tratando de hacer uso del método de Ziegler y Nichols al no poder usarse, se probó primero con una estructura solo proporcional, luego una solo integral, para finalmente unir las dos y diseñar un controlador proporcional e integral, PI. Este análisis se hizo mediante el lugar o trayectoria de las raíces. Una vez realizado este análisis se realizó la simulación de la planta mediante el uso del lazo de simulación de LabVIEW. Posteriormente se explicó el procedimiento para llevar a cabo la implementación del controlador diseñado, en la planta real de control de nivel. Los resultados demuestran que se obtuvieron una buena similitud entre la simulación y la implementación real, lo que nos lleva a concluir que se realizó una buena identificación de la planta en un punto de operación. Adicionalmente si desea se podría realizar el mismo procedimiento para diseñar un controlador aplicado en otro punto de operación.

CAPÍTULO 5

5. MANEJO DE LA PLANTA.

El control y regulación de nivel en un tanque es un sencillo y didáctico ejemplo del alcance que tiene la fusión de dos bastas ciencias como son Instrumentación Industrial y Control Automático, que bajo la ayuda de LabVIEW como plataforma forman una poderosa herramienta en el diseño, construcción y evaluación de sistemas de control en general.

En este capítulo estudiaremos el correcto manejo de la planta de control de nivel o modulo de prácticas de instrumentación industrial, pero para ello es necesario tener en claro conceptos básicos de Instrumentación, en especial los relacionados a las características intrínsecas que presentan los protagonistas de todo lazo de control como son el sensor o transmisor y el sistema actuador.

5.1 Características Dinámicas y Estáticas de Transmisor de Presión.

Como ya hemos estudiado a lo largo de este trabajo, un transmisor capta la variable del proceso a partir del elemento primario y la transmite a distancia. La señal transmitida puede ser neumática o eléctrica. En el caso del desarrollo de este proyecto, el transmisor que aquí utilizamos capta una señal de presión en unidades de PSI y la transforma en una señal de corriente de 4 a 20mA proporcional a las variaciones de presión ya mencionadas [10].

Todo instrumento de medición esta sujeto a características que definen su comportamiento tanto dinámico como estático, las cuales se convierten en criterios de selección a la hora de la compra o diseño de sistemas de control [1]. A continuación analizaremos algunas de estas características, centrándonos en las relacionadas al instrumento de medición aquí utilizado, el cual es el transmisor de presión WINTERS PT5.

Características Estáticas.

Son las características propias de toda medición, y por ende del instrumento destinado a realizarla. Entre ellas podemos anotar las siguientes:

- a. Campo de medida (rango).
- b. Alcance (Span).
- c. Error.
- d. Exactitud, Precisión y "Bias".
- e. Sensibilidad estática o ganancia.
- f. Repetitividad.
- g. Linealidad.
- h. Histéresis.
- i. Zona muerta.
- j. Deriva.

a. Campo de medida (rango de trabajo).

No es nada mas que el conjunto de valores de la variable medida comprendidos dentro de los limites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Viene expresada en función de los valores extremos. El transmisor de presión WINTERS posee un rango de trabajo de 0 – 5 PSI.

b. Alcance (Span).

Es la diferencia algebraica entre el valor superior y el inferior del campo de medida del instrumento. El alcance del transmisor de presión es de 5 PSI.

c. Error.

Se puede definir error como la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. A continuación definiremos algunos de los términos utilizados en el cálculo de errores:

$$E = V_M - V_R \quad (5.1)$$

Donde:

E = Error

VM = Valor Medido

VR = Valor Real

M = Media del conjunto de mediciones

Existen muchas formas de clasificar los errores ocurridos en una medición, pero hay que distinguir dos diferentes tipos de errores principales, ellos son:

Error Aleatorio.

Son aquellos que se producen en forma completamente fortuita, procedentes de fuentes en general desconocidas y por tanto no calculables directamente. Existe un error aleatorio por cada medida tomada.

$$E_A = E - M \quad (5.2)$$

Error Sistemático.

Son aquellos de los que se conoce la fuente que los producen y la forma en que se manifiestan. En general los errores sistemáticos pueden calcularse, y por ende evitarse o compensarse. Existe un error sistemático por cada conjunto de medidas en un mismo valor real, realizadas todas bajo igual condiciones.

$$E_S = M - V_{Real} \quad (5.3)$$

Valor Verdadero (PSI)	Medición (PSI)				Media
	Subida	Bajada	Subida	Bajada	
0	0,2181	0,2406	0,2444	0,2522	0,2388
1	1,2453	1,2528	1,2491	1,2584	1,2514
2	2,2372	2,2494	2,2581	2,2603	2,2513
3	3,2738	3,2819	3,2900	3,2888	3,2836
4	4,2625	4,2650	4,2675	4,2663	4,2653
5	5,2509	5,2531	5,2522	5,2566	5,2532

Tabla 5.1 DATOS DE MEDICIONES DE TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PARA SU CALIBRACIÓN.

Error Aleatorio				Error Sistemático
Subida	Bajada	Subida	Bajada	
-0,0207	0,0018	0,0055	0,0134	0,2388
-0,0061	0,0014	-0,0023	0,0070	0,2514
-0,0141	-0,0019	0,0069	0,0091	0,2513
-0,0098	-0,0017	0,0064	0,0052	0,2836
-0,0028	-0,0003	0,0022	0,0009	0,2653
-0,0023	-0,0001	-0,0010	0,0034	0,2532
Error Sistemático promedio del Transmisor de presión				0,2573

Tabla 5.2 ERROR ALEATORIO Y SISTEMÁTICO.

Como podemos apreciar en la Tabla 5.2 el transmisor posee un error sistemático de 0.2573 PSI el cual es fácil de corregir con un ajuste del tornillo de zero que posee el mismo transmisor en su interior. En los equipos en los que no se tiene la facilidad de realizar ajustes se procede a realizar un factor de corrección a cada medida tomada; en función del error sistemático previamente analizado.

d. Precisión.

Es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio. Por lo general suele expresarse en porcentaje del alcance, directamente en unidades de la variable medida, o en un porcentaje de la lectura efectuada.

El transmisor WINTERS PT5 posee una precisión especificada por el fabricante de $\pm 0.25\%$ FSO. Es decir; el máximo error encontrado en una medición será de 0.0125 PSI.

e. Repetitividad.

Es la capacidad de reproducción de las posiciones del índice o la pluma del instrumento al medir repetidamente idénticos valores de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo de medida.

Generalmente se considera su valor máximo y se expresa en tanto por ciento (%) del alcance. Un valor típico es de $\pm 0,1\%$.

La repetitividad de nuestro instrumento sensor es proporcionada por el certificado de calibración del mismo siendo este valor de 0.005 PSI; es decir el 0.1% FSO.

f. Histéresis.

Es el valor máximo de diferencia que se observa en los valores indicados por el instrumento para un mismo valor cualquiera del

campo de medida cuando la variable medida recorre toda la escala en sentido ascendente y descendente.

Valor Real en PSI	Datos de Corriente correspondientes a la escala en mA			
	Subida	Bajada	Subida	Bajada
0	4,698	4,77	4,782	4,807
1	7,985	8,009	7,997	8,027
2	11,159	11,198	11,226	11,233
3	14,476	14,502	14,528	14,524
4	17,64	17,648	17,656	17,652
5	20,803	20,81	20,807	20,821

Tabla 5.3 DATOS DE CORRIENTE A LA SALIDA DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN.

Histéresis	
Primer Ciclo	Segundo Ciclo
0,072	0,025
0,024	0,03
0,039	0,007
0,026	-0,004
0,008	-0,004
0,007	0,014
Valor Máximo	0,072

Tabla 5.4 DATOS DE HISTERESIS.

Cabe recalcar que cuando se realiza la calibración de instrumentos de presión se recomienda realizarla en dos ciclos, tanto de bajada y

subida cada uno, a fin de tener mayores valores y por ende criterios para el análisis del mismo.

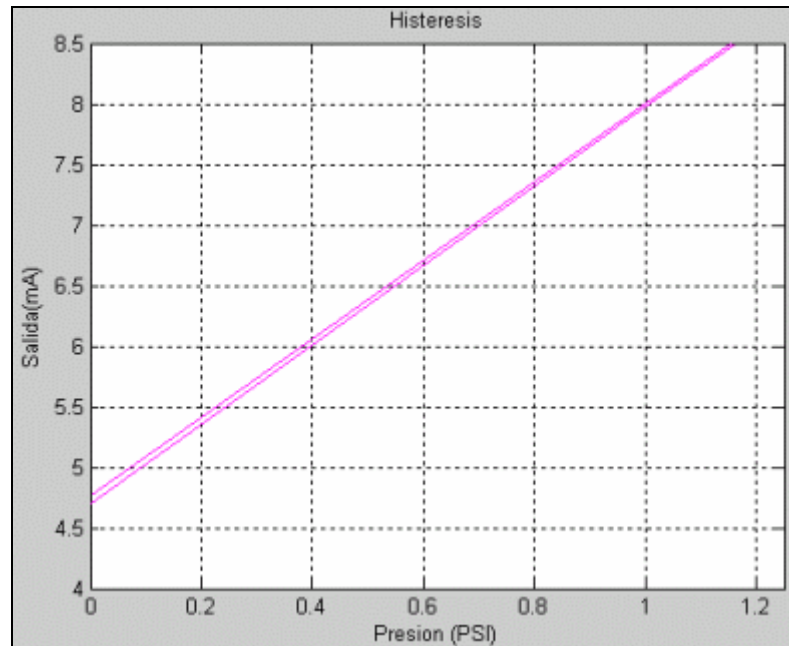


FIGURA 5.1 GRÁFICO DE HISTERESIS DE TRANSMISOR DE PRESIÓN.

En la figura 5.1 se puede observar claramente que la mayor histéresis se encuentra en las primeras mediciones realizadas, tendiendo a disminuir mientras estas avanzan en la escala.

g. Exactitud.

Esta característica nos especifica el error con el cual se mide. La exactitud se relaciona con la “ausencia de error” en las mediciones.

La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática. La exactitud puede expresarse en términos de los conceptos de precisión y "bias". El bias se refiere a la parte constante del error y se relaciona con el error sistemático.

La exactitud es el principal resultado de una calibración, ya que expresa en sí el estado del instrumento y su capacidad de trabajo dependiente de su uso o del proceso en el cual se utilice.

La exactitud del transmisor es de 0.0326 PSI, pero hay que tener en cuenta que esta exactitud se ve afectada inmensamente por el error sistemático ya analizado; es decir, esta exactitud mejorara al momento en que se realice el ajuste de cero recomendado.

Características dinámicas.

El comportamiento dinámico de un instrumento de medida puede considerarse como un ejemplo específico del comportamiento dinámico de los sistemas.

El modelo matemático general de los sistemas dinámicos más empleado es la ecuación diferencial lineal ordinaria con coeficientes constantes. Es frecuente caracterizar el comportamiento dinámico del

instrumento empleando el modelo en forma de función de transferencia.

En el caso del el transmisor de presión WINTERS es perfectamente representado por una función de transferencia de orden cero ya que la salida sigue perfectamente las variaciones de entrada, es decir, el instrumento presenta una linealidad a lo largo de toda su escala.

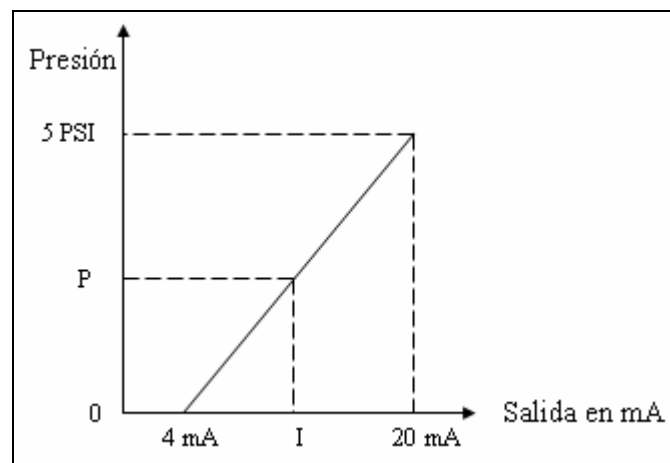


FIGURA 5.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS.

Del gráfico de la figura 5.2 tenemos que:

$$\frac{I - 4}{20 - 4} = \frac{P - 0}{5 - 0} \quad (5.4)$$

$$P = \frac{5}{16}(I - 4) \quad (5.5)$$

5.2 Identificación de sistema Variador Bomba.

El sistema actuador en nuestra planta de control de nivel esta conformado por un variador de velocidad SINAMICS G110 y una bomba centrífuga de ½ HP que al actuar dinámicamente en conjunto, se convierten en un solo elemento a identificar.

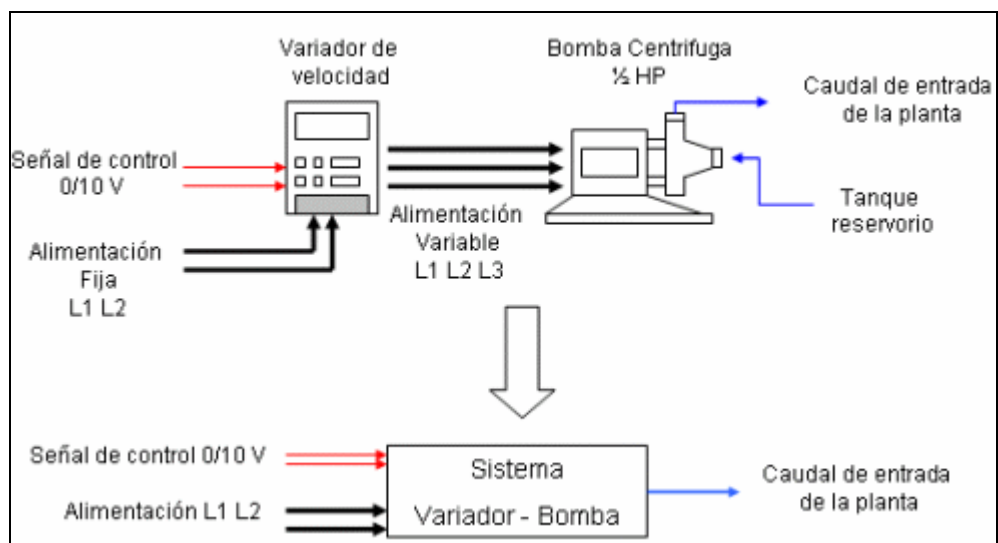


FIGURA 5.3 ESQUEMA EN BLOQUES DE SISTEMA VARIADOR DE VELOCIDAD BOMBA.

Sabemos la funcionalidad del variador de velocidad como objeto independiente, sabemos que responde bajando o subiendo la frecuencia y al mismo tiempo el voltaje AC en su salida en

proporción a cualquier cambio recibido en su señal de control, siendo los límites 0V igual 0Hz y 10V proporcional a 60Hz.

También conocemos la relación directamente proporcional entre la frecuencia de la señal de alimentación de un motor AC y su velocidad desarrollada, lo cual se ve traducido en cambios de igual proporción en el caudal desarrollado por la bomba. Pero en que proporción cada mínimo cambio de la señal de control del variador, afecta el caudal desarrollado por la bomba?

Para satisfacer esta pregunta es necesario realizar el estudio de este sistema como un solo objeto, analizando su trabajo en conjunto en forma completamente dinámica.

La identificación de este sistema consiste en la aplicación de cambios de voltaje en la señal de control del variador; y observar la reacción de cada uno de estos cambios en el caudal ejercido por la bomba, para esto es necesario el registrar tanto los cambios de la señal de control; como los cambios de caudal de la bomba. La señal que representara los cambios de voltaje en el variador debe de ser

tal que cubra todo el rango de operación del variador; es decir de 0 a 10V.

Una vez tomados los datos tanto de entrada (señal de control) y de salida del sistema (caudal de la bomba) se puede hacer uso de la herramienta de Identificación de Sistemas de LabVIEW para encontrar un modelo que represente de la manera mas real y confiable la funcionalidad del sistema variador de velocidad – bomba.

5.3 Sintonización de Parámetros del Controlador.

El diseño de un controlador y la sintonización de sus respectivos parámetros es uno de los puntos importantes en el manejo de la planta; ya que este controlador es el que gobernará por completo la funcionalidad de la planta; dependiendo los requerimientos y especificaciones de funcionamiento.

Para poder lograr un buen diseño es necesario conocer primero las características de la planta de control de nivel como un sistema total, para ello es conveniente la identificación de este sistema.

La identificación del modelo de la planta consiste en el diseño de un experimento sobre la planta, de modo tal que se aplique una señal estímulo a dicha planta y se observe la respuesta de la planta ante dicho estímulo, señal denominada de respuesta. El tipo y duración de la señal aplicada a la planta debe escogerse de acuerdo a la planta con la que se trabaje y a sus características. Adicionalmente se debe escoger cual es la variable que vamos a medir como señal de respuesta, aquella en la cual se tiene interés. Tanto la señal de estímulo como la señal de respuesta deben ser registradas o almacenadas en un conjunto de datos con los cuales posteriormente se trabajará en la identificación. Vale recalcar que la identificación de sistemas lleva de trasfondo una teoría extensa la cual debe ser estudiada para tener bien claros los conceptos involucrados en la identificación.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó una señal de onda cuadrada aplicada sobre un punto de operación en la planta, los valores de respuesta de la planta también fueron registrados.

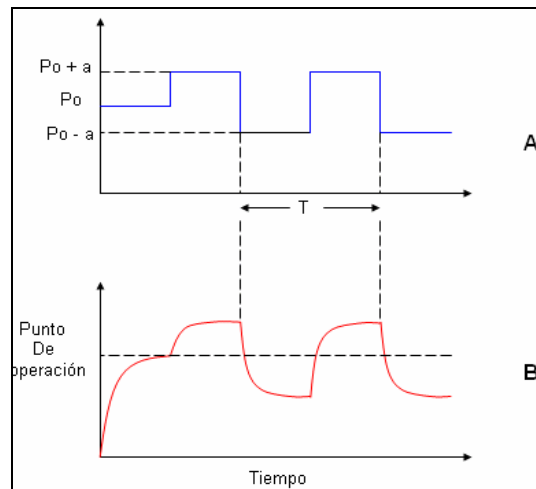


FIGURA 5.4 SEÑAL ESTÍMULO Y RESPUESTA DE UN SISTEMA.

Una vez almacenados los datos de estímulo y respuesta se hace uso de las herramientas de identificación de sistemas de LabVIEW las cuales a través de un conjunto de funciones hace posible la selección de un modelo óptimo que represente o describa el comportamiento de la planta en un rango específico de trabajo. Una vez elegida la estructura o modelo debe comprobarse que esta es la mejor selección, este procedimiento se conoce como validación del modelo.

Una vez obtenido un modelo que describa el comportamiento de la planta, se puede hacer uso de este para análisis y diseño de un controlador para la misma que cumpla con los requerimientos que el usuario demande.

El diseño del controlador y la respectiva sintonización de parámetros se pueden realizar por medio de varios métodos, siendo los dos principales el método de Ziegler Nichols y el método del Lugar Geométrico de las Raíces (L.G.R.). El primer método es muy utilizado en plantas cuya función de transferencia es de orden mayor a tres, pero para este proyecto no fue posible su uso ya que la planta aquí estudiada es apenas de orden uno, por ende el método seleccionado para el diseño y sintonización del controlador fue el L.G.R.

El L.G.R. no es nada más que un método gráfico que representa todas las posiciones posibles de los polos de lazo cerrado con ganancia proporcional K y retroalimentación unitaria.

Este método tiene la ventaja de que forma parte de la mayoría de los software utilizados para simulación de sistemas de control entre ellos LabVIEW, programa utilizado a lo largo del desarrollo de nuestro trabajo de tesis. El uso de programas como estos simplifica la labor del estudiante y además sirve de apoyo didáctico ya que con simples comandos obtenemos la gráfica correspondiente a la posición tanto de polos y ceros del sistema en lazo cerrado.

Como el lugar de raíces son realmente los lugares de todos los polos posibles a lazo cerrado, del lugar de raíces se puede elegir una ganancia tal que el sistema o planta analizada a lazo cerrado haga lo que el usuario desee. Si cualquiera de los polos elegidos está en el semiplano derecho, el sistema a lazo cerrado será inestable. Los polos más cercanos al eje imaginario son los que mayor influencia tienen en la respuesta a lazo cerrado, de modo que a pesar que el sistema tenga tres o cuatro polos, el mismo puede actuar como un sistema de segundo o aún de primer orden, dependiendo de la ubicación de los polos dominantes. He aquí que la correcta elección de un controlador se hace fundamental.

Con respecto al tipo de controlador usado para la planta de control de nivel en el desarrollo de este proyecto se seleccionó uno de los pertenecientes a la familia de controladores PID. Los controladores PID se muestran robustos en muchas aplicaciones y son los que más se utilizan en la industria. La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden estabilizadas con ningún miembro de la familia PID). A continuación mostramos

una tabla guía del resumen de los efectos de cada controlador por separado, tabla 5.5.

	Tiempo de subida (Tr)	Sobreelongación (Sp)	Tiempo de Establecimiento (Ts)	ERROR (E)
K_p	Baja	Sube	Poco Cambio	Baja
K_i	Baja	Sube	Sube	Elimina
K_d	Poco Cambio	Baja	Baja	Poco Cambio

Tabla 5.5 RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CONTROLADOR.

Nótese que estas correlaciones podrían no ser exactamente seguras, porque K_p, K_i, y K_d son dependientes entre sí. De hecho, cambiando una de estas variables se puede variar el efecto de las otras dos. Por esta razón, la tabla deberá usarse únicamente como referencia cuando se determina los valores de K_i, K_p y K_d.

5.4 Sintonización de parámetros con un controlador externo.

El controlador ASCON de la serie XS es un controlador de procesos, muy poderoso, y a la vez de uso sencillo. La característica principal de este controlador es que posee una múltiple selección de entradas, es decir este controlador nos proporciona la capacidad de trabajar con todas los diferentes tipos de variables que se pueden dar en una industria y su respectiva transmisión. Al mismo tiempo el controlador

cuenta con una selección de señales de salidas en mA y en Voltios, dependiendo del modo de configuración y operación acorde a la aplicación requerida.



FIGURA 5.6 CONTROLADOR ASCON XS.

Antes de poner en operación el controlador es necesario realizar una configuración de parámetros de acuerdo a los requerimientos del sistema o planta a controlar. Estos parámetros son:

Señal de entrada de 4 – 20mA de dos cables de transmisión.

Señal de salida continua de 0 – 10V galvánicamente aislada.

Numero de decimales requeridos (mínimo 3).

Valor inicial del rango del transmisor (0 PSI para el transmisor).

Valor final del rango del transmisor (5 PSI para el transmisor).

Máximo porcentaje de la señal de salida (80% para la aplicación).

Mínimo porcentaje de la señal de salida (20% para la aplicación).

Protección de parámetros (visibles y posibles modificación).

La conexión de las señales de entrada y salida son sencillas y se pueden apreciar mejor en la figura 5.7.

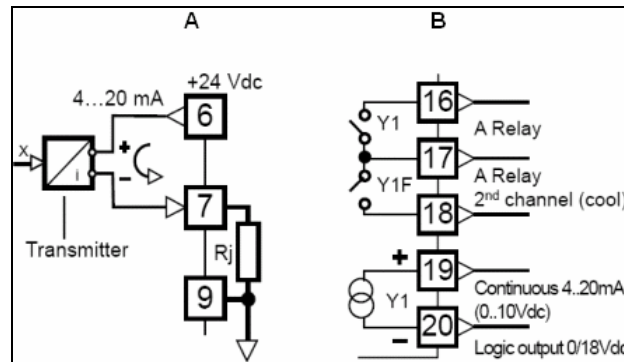


FIGURA 5.7 A) CONEXIÓN DE SEÑAL DE ENTRADA EN mA B) CONEXIÓN DE SEÑAL DE SALIDA 0/10V CONTINUOS.

La configuración del controlador se la realiza a través de la digitación de dos bloques de códigos, de 4 números cada uno, siendo el primer código E F G H el encargado de configurar tanto las señales de entrada como las de salida del controlador, mientras que el segundo bloque de códigos I L M N es necesario para la retransmisión de datos del controlador y el uso de sus salida como control remoto o a distancia.

Una vez configurado el controlador, y sus parámetros PID en función de los resultados obtenidos previamente durante el estudio de la planta, estamos listos para poner a trabajar a este valioso

mecanismo de control. Vale recalcar que este controlador posee en su menú una opción de auto ajuste; es decir, realiza un análisis por si mismo del sistema en el cual actuará, y entrega un diagnóstico del mismo en función de los parámetros PID convenientes para el eficaz trabajo del sistema y de el como parte integral del mismo. Pero hay que tener en cuenta que este auto ajuste no realiza un análisis completo de las fuentes de alimentación de nuestro sistema, por ende puede diagnosticar parámetros que fueren la alimentación del sistema al cual esta integrado, representados en cambios bruscos de las diferentes señales a medirse.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron mediciones de nivel con un error sistemático de + 8.8mm, debido a que el equipo con que se realizó la medición, un transmisor de presión posee una exactitud de 0.25% del fondo de su escala.
2. La identificación del modelo de la planta de control de nivel alrededor de un punto de operación ubicado en 29cm, arrojó como resultado un modelo identificado de primer orden.
3. Después de realizar mediciones en la planta de control de nivel se comprobó que un controlador del tipo PI se ajusta perfectamente a los requerimientos de funcionamiento de la planta en el punto de operación para el cual fue diseñado. Obteniendo para una referencia de 32cm resultados de tiempo de estabilización $T_S = 180$ seg. Y un valor pico $M_{pt} = 32.7$ cm.
4. De igual manera se comprobó la coherencia entre los resultados obtenidos en la simulación de la planta con el modelo identificado, y los resultados obtenidos en la implementación de la planta real.

Punto Referencia (cm)		Ts (seg)	Tp (seg)	Mpt (cm)	SP (%)
30	Real	240	90	30,30	30,00%
	Simulación	210	85	30,16	16,00%
31	Real	180	72	31,40	20,00%
	Simulación	220	85	31,35	17,50%
32	Real	180	80	32,70	23,33%
	Simulación	210	85	32,50	16,67%

Tabla de Resultados.

5. Con respecto al software utilizado para el desarrollo del proyecto concluimos que la flexibilidad y ventajas proporcionadas por el software LabVIEW versión 8.2 al momento de hacer uso de sus herramientas de identificación, análisis y diseño son perfectamente comparables con las proporcionadas por otros programas de análisis y diseño tales como Matlab y Simulink.

6. Además fueron de gran utilidad las herramientas para adquisición y generación de datos, produciendo buenos tiempos de respuesta del controlador implementado en LabVIEW.

RECOMENDACIONES

1. Ya que el modulo diseñado tiene fines didácticos se recomienda añadir equipos de medición de otras variables, como por ejemplo de caudal, para así implementar las aplicaciones de control de dichas variables.
2. Se recomienda el uso de otros equipos para medición de nivel de modo tal que se puedan establecer diferencias entre ellos, y analizar las ventajas y desventajas de los mismos.
3. Adicionalmente se recomienda que en el futuro la planta se utilice como base para el estudio, investigación e implementación de estructuras de control más avanzadas y modernas.

ANEXOS

ANEXO A

EQUIPOS Y CONEXIONES.

A.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PCI 6024E.

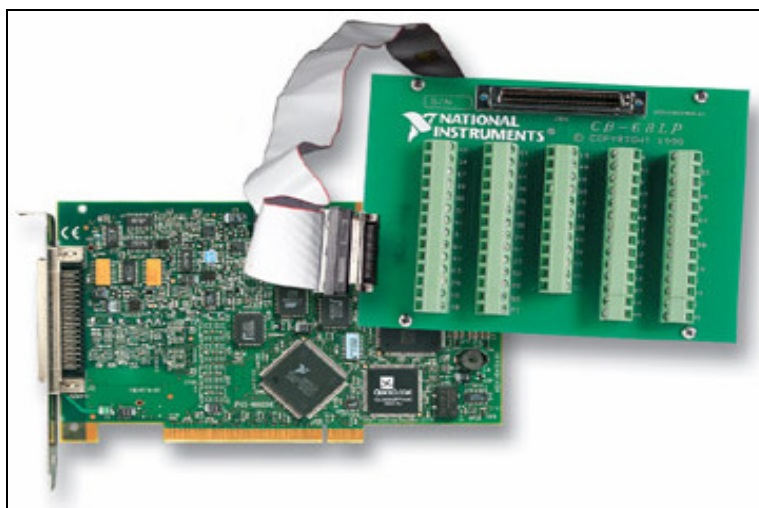


FIGURA A.1. ACCESORIOS PCI6024E, R6868, CB-68LP.

La tarjeta PCI 6024E de National Instruments, es una tarjeta de adquisición de datos que alcanza velocidades de hasta 200000 muestras por segundo, posee 16 canales de entrada analógica de 12 Bits, 2

canales de salida analógica, 8 líneas Entrada / Salida digital. Para el uso de esta tarjeta se requiere de los siguientes requisitos:

- Poseer la tarjeta PCI 6024E
- El software para el manejo de la tarjeta es LabVIEW
- La librería NI-DAQ instalada en el software LabVIEW
- Un computador equipado con un puerto PCI.

El NI-DAQ que es un manejador adquirido con la compra de la tarjeta PCI 6024E es compatible con el dispositivo. Este posee una extensa librería con funciones que pueden ser llamadas desde la aplicación en la cual se esté trabajando, estas funciones además permiten usar todas las aplicaciones que se pueden realizar con la PCI 6024E.

En la figura A.2 podemos apreciar el diagrama en bloques general de la constitución de la tarjeta de adquisición de datos. Analizando este esquema observamos el conector a la izquierda de entradas y salidas.

La tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E tiene un rango de entrada bipolar que cambia de acuerdo a una ganancia programada. Cada canal puede ser programado con una ganancia única de 0.5, 1.0, 10, o 100 para maximizar la resolución del convertidor análogo-digital de 12 bits. Con la configuración de ganancia apropiada se puede hacer uso de la resolución completa del convertidor ADC para medir las señales de entrada. La tabla A.1 muestra el rango de entrada y la precisión de acuerdo a la ganancia usada.

Ganancia	Rango de Voltaje de Entrada	Precisión
0.5	-10 a 10 V	4.88 mV
1	-5 a 5 V	2.44 mV
10	-500 a 500 mV	244.14 μ V
100	-50 a 50 mV	24.41 μ V

Tabla A.1. RANGO DE VOLTAJE DE ENTRADA Y PRECISIÓN
ACORDE A LA GANANCIA SELECCIONADA.

Las tarjetas suministran 2 canales de salida de voltaje analógico en el conector de Entrada / Salida. El rango bipolar es de -10V hasta +10V. Los datos escritos al DAC, convertidor digital-analógico son interpretados en formato de complemento de dos.

Adicionalmente las tarjetas contienen 8 líneas de Entrada / Salida digital (DIO<0...7>) de propósito general. Individualmente se puede configurar cada línea ya sea como entrada o salida digital. En la tabla A.2 se muestran los niveles lógicos de las entradas / salidas digitales de la PCI 6024E.

Nivel	Mínimo	Máximo
Entrada nivel bajo	0 V	0.8 V
Entrada nivel alto	2 V	5 V
Entrada baja corriente ($V_{in} = 0V$)		-320 μA
Entrada alta corriente ($V_{in} = 5V$)		10 μA
Salida nivel bajo ($I_{oL} = 24 \text{ mA}$)		0.4 V
Salida nivel alto ($I_{oH} = 13 \text{ mA}$)	4.35 V	

TABLA A.2. NIVELES LÓGICOS DIGITALES.

La figura A.3 muestra la asignación de los pines de entrada y salida a la tarjeta PCI 6024E en el conector CB 68LP. Adicionalmente en la tabla A.4 se muestra un resumen de la descripción de las señales de entrada, salida y sus respectivas referencias.

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT1	22	56	AIGND
DAC1OUT1	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PF10/TRIG1	11	45	EXTSTROBE*
PF11/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PF12/CONVERT*
+5 V	8	42	PF13/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PF14/GPCTR1_GATE
PF15/UPDATE*	6	40	GPCTR1_OUT
PF16/WFTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PF17/STARTSCAN
PF19/GPCTR0_GATE	3	37	PF18/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

FIGURA A.3. ASIGNACIÓN DE PINES EN CONECTOR DE ENTRADA
SALIDA PARA PCI6024E.

Señal	Punto de Referencia	Dirección	Descripción
AIGND			Señal de tierra para entradas analógicas
ACH<0..15>	AIGND	Entrada	Canales de entrada analógica desde 0 a 15. Se puede configurar un par de canales
DAC0OUT	AOGND	Salida	Este pin provee el voltaje de salida de la salida analógica del canal 0.
DAC1OUT	AOGND	Salida	Este pin provee el voltaje de salida de la salida analógica del canal 1.
AOGND			Señal de tierra para salidas analógicas. Las salidas analógicas están referenciadas a este punto. El pin AIGND, AOGND y DGND están conectados entre ellas dentro del dispositivo.
DGND			Tierra digital, este pin provee un punto de referencia para todas las entradas o salidas digitales, así como a la fuente de +5V que posee el dispositivo.
DIO<0..7>	DGND	Entrada o Salida	
+5V	DGND	Salida	Fuente de 5 Vdc , este pin esta provisto de un fusible que soporta hasta 1A

Tabla A.3. RESUMEN DE DESCRIPCIÓN DE ENTRADAS Y SALIDAS.

A.2 TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PT5.



FIGURA A.4. TRANSMISOR DE PRESIÓN WINTERS PT5.

Cableado y Conexión.

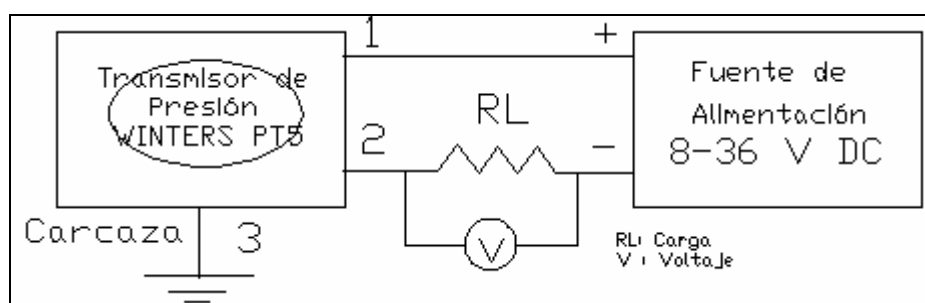


FIGURA A.5. CABLEADO Y CONEXIÓN.

Rango de Medición 0 - 5PSI

Salida 4 – 20mA

Máxima carga RL 800 ohmios

Cableado/ Colores

Café	+Us (1)
Azul	- Us (2)
Amarillo/Café	\perp ≡

Tabla A.4. COLORES DE CABLES CON RESPECTIVO TERMINAL.

Especificaciones Técnicas.

Salida	4-20mA
Excitación	8-36V
Exactitud	<0.25% FS
Rango de compensación de Temperatura	0° a 85°C
Temperatura error zero	< -0.02% FS/K
Temperatura error span	< -0.01% FS/K (0-70°C)
Protección	IP65
Presión estallido	2.5*FS (excepto donde se indique)
Partes húmedas/conexión	316 Acero inoxidable, cerámico.

Tabla A.5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS WINTERS PT5.

Conversión de la señal de salida de transmisor en miliamperios a escala de centímetros.

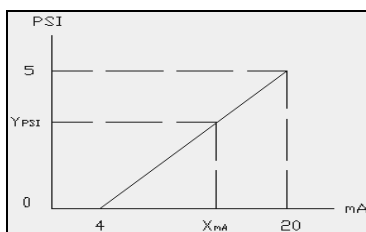


FIGURA A.6. RANGO DE OPERACIÓN TRANSMISOR DE PRESIÓN.

$$\frac{Y_{PSI} - 0}{X_{mA} - 4} = \frac{5 - 0}{20 - 4} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

Y_{PSI} es el valor de presión en PSI medido por el transmisor, y X_{mA} es el valor de corriente en mA transmitido por el dispositivo. Partiendo de la ecuación A.1 tenemos que:

$$Y_{PSI} = \frac{5 * (X_{mA} - 4)}{16} [\text{PSI}] \quad (\text{A.2})$$

Llevando la ecuación A.2 desde escala de PSI hasta escala de Pascal, N/m^2 , tenemos:

$$Y_{Pa} = \frac{5 * (X_{mA} - 4)}{(16)} \times \frac{10000}{1.45} [\text{N/m}^2] \quad (\text{A.3})$$

Donde:

Y_{Pa} es el valor de presión medido en escala de Pascal.

Conociendo que la presión producida por una columna de un líquido de altura h , es igual al la densidad del líquido por la gravedad, por la altura de la columna del líquido tenemos que:

$$Y_{pa} = \rho \times g \times h \quad (\text{A.4})$$

Donde:

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, densidad del agua.

$g = 9.8 \text{ m/s}^2$, gravedad.

$h =$ altura de columna de líquido en metros

Reemplazando estos valores dentro de la ecuación A.4 obtenemos:

$$Y_{Pa} = 1000 \times 9.8 \times h \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2] \quad (\text{A.5})$$

Igualando la ecuación 2.3 con la ecuación 2.5 tenemos que:

$$1000 \times 9.8 \times h \text{ [kg/m}^3 \cdot \text{m/s}^2] = \frac{5 * (X_{mA} - 4)}{16} \times \frac{10000}{1.45} \text{ [N/m}^2]$$

Resolviendo:

$$h = \frac{(X_{mA} - 4)}{16} \times 3.5186 \text{ [m]} \quad (\text{A.6})$$

Resolviendo la ecuación 2.6 para llevarla a escala de centímetros tenemos:

$$h_{cm} = \frac{(X_{mA} - 4)}{16} \times 351.86 \text{ [cm]} \quad (\text{A.7})$$

Se debe tener en cuenta que los valores aquí usados consideran que a 0PSI se tiene una salida de 4mA y a 5PSI, 20mA , lo cual puede no ser

totalmente real a la hora de la medición, en todo caso es recomendable ajustar el equipo y verificar estos valores. Ahora si se coloca una resistencia R_L a la salida del transmisor, se produce una caída de voltaje V_{TRANS} , de modo tal que A.7 se convierte en:

$$h_{cm} = \left[\frac{V_{TRANS}}{R_L} - 4 \right] \times \frac{351,86}{16} [\text{cm}] \quad (\text{A.8})$$

Valores de salida del transmisor de presión.

Presión PSI	mA (valor fabricante)	mA (valor medido)
0	4	4,78
1	7,2	7,98
2	10,4	11,18
3	13,6	14,38
4	16,8	17,58
5	20	20,78

Tabla A.6. CORRESPONDENCIAS DE VALORES DE ENTRADAS Y SALIDAS DE TRANSMISOR.

Haciendo uso de los valores medidos y siguiendo el procedimiento explicado desde la ecuación A.1 hasta la ecuación A.8 tenemos que:

$$h_{cm}' = 99.65V_{TRANS} - 104.35 [\text{cm}] \quad (\text{A.9})$$

Haciendo uso de la ecuación A.9 tenemos los valores que se calculan de nivel de agua en un tanque, valores que se observan en la tabla A.7. En

la tabla A.8 se muestran los valores de altura que producen una presión hidrostática determinada.

Presión (PSI)	mA (valor fabricante)	mA (valor medido)	Voltaje (V) para RL= 220 ohm	Altura (cm)
0	4	4,78	1,05	2,44
1	7,2	7,98	1,76	72,60
2	10,4	11,15	2,45	142,09
3	13,6	14,47	3,18	214,88
4	16,8	17,64	3,88	284,37
5	20	20,8	4,58	353,65

Tabla A.7 CORRESPONDENCIAS ENTRE VALORES DE CORRIENTE EN SALIDA DE TRANSMISOR Y LECTURA EN CENTÍMETROS.

Presión (PSI)	Presión (Pa)	Altura (m)	Altura (cm)
0	0,00	0,00	0,00
1	6896,55	0,70	70,37
2	13793,10	1,41	140,75
3	20689,66	2,11	211,12
4	27586,21	2,81	281,49
5	34482,76	3,52	351,86

Tabla A.8 PRESIÓN Y DISTANCIAS DE COLUMNAS DE AGUA.

A.3 VARIADOR DE VELOCIDAD SINAMICS G110.



FIGURA A.7 SINAMICS G110.

Datos de Placa.

SIEMENS	
SINAMICS G110 CPM110 AIN 6SL3211-0AB15-5UA1	
Serial No. XAU726-006228 E-Stand (Version) A04/1.10	
Input: 200-240V $\pm 10\%$ 1 \emptyset AC 7.7A 47-63Hz	
Output: 0-230V 3 \emptyset AC 3.2A 0-650Hz	
Motor: 0.55kW Duty Class II Weight: 0.83Kg/1.83lbs	
Temp. Range: -10 - +50C IND.CONT.EQ.5B33	
Protection: IP20 (see manual)	
Made in EU (UK) www.siemens.com/sinamics-g110	
N117	CE
UL	LISTED

FIGURA A.8 DATOS DE PLACA DE SINAMICS G110.

Datos Técnicos.

Rango de potencia	0,12 kW a 3,0 kW
Tensión de red	1 AC 200 V a 240 V $\pm 10\%$
Frecuencia de red	47 Hz a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
cos θ	$\geq 0,95$
Rendimiento del convertidor	en modelos < 0,75 kW: 90% a 94% en modelos $\geq 0,75$ kW: $\geq 95\%$
Corriente de Sobrecarga	Corriente de sobrecarga 1,5 x corriente asignada de salida (es decir, 150% de capacidad de sobrecarga) Capacidad de sobrecarga durante 60 s, después 0,85 x corriente asignada de salida durante 240 s, tiempo de ciclo 300 s
Corriente de precarga	no superior a la corriente asignada de entrada
Método de control	Característica U/f lineal (con elevación de tensión parametrizable); característica U/f cuadrática ; característica multipunto (característica U/f parametrizable)
Frecuencia de pulsación	8 kHz (estándar) 2 kHz a 16 kHz (en escalones de 2 kHz)
Frecuencias fijas	3, parametrizables
Banda de frecuencias inibible	1, parametrizable
Resolución de consigna	0,01 Hz digital 0,01 Hz serie 10 bits analógica (potenciómetro motorizado 0,1 Hz)
Entradas digitales	3 entradas digitales parametrizables, sin aislamiento galvánico; tipo PNP, compatibles con SIMATIC
Entrada analógica (variante analógica)	1, para consigna (0 V a 10 V, escalable o utilizable como cuarta entrada digital)
Salida digital	1 salida por optoacoplador con aislamiento galvánico (24 V DC, 50 mA, óhm., tipo NPN)

Tabla A.9. DATOS TÉCNICOS SINAMICS G110.

Puerto serie (variante USS)	RS485, para servicio con protocolo USS
Longitud del cable al motor	máx. 25 m (apantallado) máx. 50 m (no apantallado)
Frenado	por inyección de corriente continua
Grado de protección	IP20
Temperatura de servicio	-10 °C a +40 °C hasta +50 °C con derating
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +70 °C

Tabla A.10. CONTINUACIÓN DATOS TÉCNICOS SINAMICS G110.

Programación.

P0010 1 = Servicio Rápido	Inicio de la puesta en servicio rápido. La puesta en servicio rápido se inicia poniendo P0010 = 1 y se finaliza con P0039 diferente de 0. Después de finalizar la puesta en servicio rápido el parámetro P0010 se pone automáticamente en 0 (requiso indispensable para poder accionar el motor.
P0100 0 = KW/50Hz 1 = hp/60Hz 2 = KW/60Hz	Europa / Norteamérica Para los ajustes 0, o 1 use interruptor DIP 2 para el ajuste 2 use P0100
P0304	Tensión nominal del motor. Tensión nominal del motor (V) tomada de la placa de características.
P0305	Corriente nominal del motor. Corriente nominal del motor (A) tomada de la placa de características.
P0307	Potencia nominal del motor. Potencia nominal del motor (kW) tomada de la placa de características. Si P0100 = 1 los valores deberán ser en hp.
P0310	Frecuencia nominal del motor. Frecuencia nominal del motor (Hz) tomada de la placa de características.

Tabla A.11. PROGRAMACIÓN SINAMICS G110.

P0311	Velocidad nominal del motor. Velocidad nominal del motor (rpm) tomada de la placa de características.
P0700	Selección de la fuente de comandos. (on/off/reversa). 1 = BOP 2 = Bornes/terminales 5 = USS interface
P1000	Selección de la consigna de frecuencia. 1 = BOP 2 = Consigna analógica 3 = Frecuencias ajustadas 5 = USS interfase
P1080	Frecuencia mínima del motor. Ajuste mínimo de la frecuencia del motor (0-650Hz) a partir de la cual girará el motor con indiferencia de la consigna de frecuencia ajustada. El valor aquí ajustado es válido para giros horarios como anti-horarios.
P1082	Frecuencia máxima del motor. Ajuste máximo de la frecuencia del motor (0-650Hz) a partir de la cual girará el motor con indiferencia de la consigna de frecuencia ajustada. El valor aquí ajustado es válido para giros horarios como anti-horarios.
P1120	Tiempo de aceleración. Tiempo que lleva el motor acelerar de la parada a la frecuencia máxima ajustada.
P1121	Tiempo de deceleración. Tiempo que lleva el motor decelerar de la frecuencia máxima del motor a la parada.
P3900	Finalizar puesta en servicio rápido. 0 = Sin puesta en servicio rápido sin cálculo del motor ni reajuste de fábrica. 1 = Fin puesta en servicio rápido con cálculo del motor y reajuste de fábrica (recomendado). 2 = Fin puesta en servicio rápido con cálculo del motor y reajuste de E/S. 3 = Fin puesta en servicio rápido con cálculo del motor pero sin reajuste de fábrica.

Tabla A.12. CONTINUACIÓN PROGRAMACIÓN SINAMICS G110.

Conexiones.

Variante Analógica	Terminales	Parámetro por defecto	Operación
Frecuencia de Referencia	9	P1000 = 2	Entrada Analógica
Fuente de comandos	3,4 y 5	P0700 = 2	Entrada Digital
Entrada Digital 0	3	P0701 = 1	ON/OFF1
Entrada Digital 1	4	P0702 = 12	Reversa
Entrada Digital 2	5	P0703 = 9	Fault Acknowledge

Tabla A.13. TERMINALES PARA VARIANTE ANALÓGICA.

En la figura A.9 podemos observar el bloque de entradas de control del variador de velocidad.

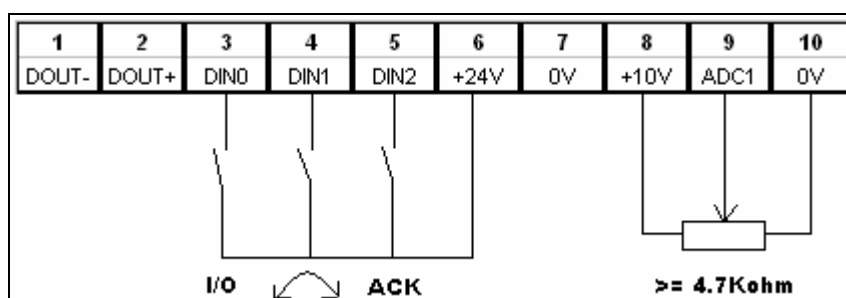


FIGURA A.9. TERMINALES DE CONTROL.

En la figura A.10 podemos observar los terminales de potencia del variador de velocidad SINAMICS G110. L1 y L2 de alimentación y U, V y W de salida para conexión con el motor.

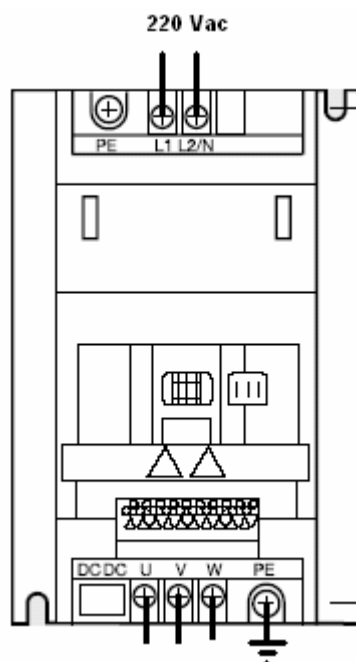


FIGURA A.10. TERMINALES DE POTENCIA.

A.4 BOMBA.



FIGURA A.11. BOMBA CENTRÍFUGA WEG-GRUNDFOS.

Datos de placa.


	3 f	W48X175J	KW(HP-CV) 0.37 (1/2)	
	RPM 3460		REG S1	
	220/380/440 V		60 Hz	FS 1.60
	1.70/0.98/0.85 A		ISOL B Δ t	AMB 40°C
	IFS 2.72/1.67/1.36 A			
	REND		Cos Φ 0.75	IP/IN 8.00

FIGURA A.12. DATOS DE PLACA DEL MOTOR.

Conexiones Eléctricas.

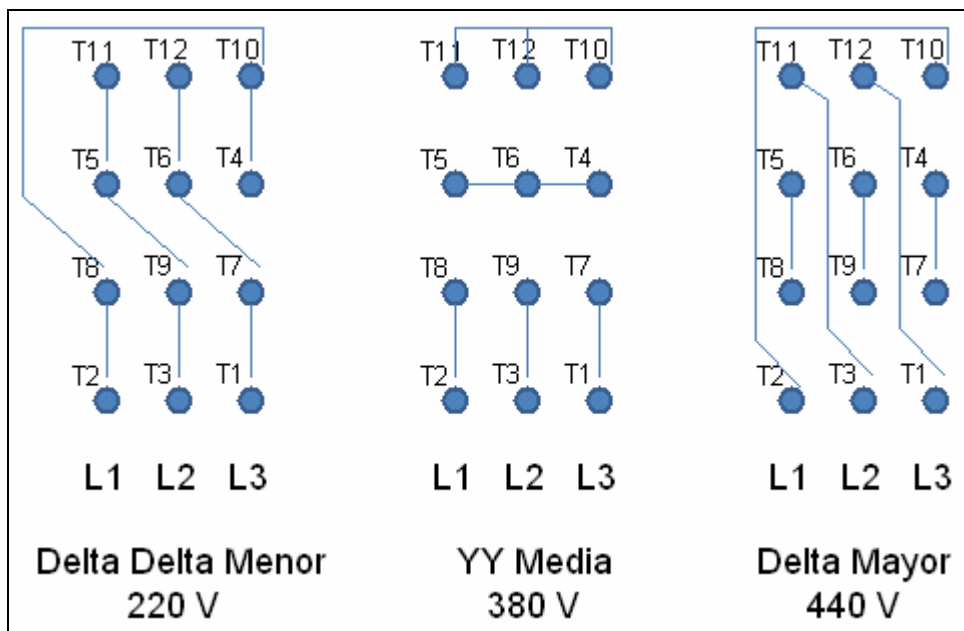


FIGURA A.13 CONEXIONES ELÉCTRICAS.

En la figura A.13 se muestran los diferentes tipos de conexiones del motor de la bomba, para tres tipos diferentes de alimentación.

ANEXO B

CONJUNTO DE HERRAMIENTAS DE LABVIEW.

B.1 Herramientas de propósito general.








 <p>While Loop</p>	<p>Lazo Mientras. Repite un subdiagrama o función colocada dentro de el, hasta que el terminal condicional, un terminal de entrada, recibe un valor booleano particular.</p>
 <p>Case Structure</p>	<p>Estructura de Caso. Tiene uno o mas subdiagramas, o casos, de los cuales solo se ejecuta uno a la vez. El valor cableado en la terminal selectora determina que caso ejecutar.</p>
 <p>Write To Measurement File</p>	<p>Escribir a un archivo de medición. Escribe datos a un archivo basado en texto.</p>
 <p>Merge Signals</p>	<p>Combinar Señales. Combina dos o mas señales a una sola salida.</p>
 <p>Split Signals</p>	<p>Separar Señales. Separa dos o mas señales en componentes individuales.</p>
 <p>Select</p>	<p>Selector. Retorna el valor cableado en t si la entrada s es verdadera , y retorna el valor cableado en f si s es falso.</p>
 <p>Get Waveform Subset.vi</p>	<p>Obtener porción de Señal. Retorna una porción de una señal a un determinado tiempo.</p>

FIGURA B.1. CONJUNTO DE FUNCIONES DE PROPOSITO GENERAL.

B.2 Herramientas de Adquisición y Generación de Datos.

En la figura B.2 se muestra un resumen del conjunto de funciones utilizadas para la adquisición y generación de datos desde y hacia la planta de control de nivel.







	<p>DAQmx Crear Canal Virtual. Crea un canal ya sea de lectura o escritura de una señal.</p>
	<p>DAQmx Lectura. Adquiere muestras desde una tarea que contiene un canal de entrada analógico.</p>
	<p>DAQmx Escritura. Genera muestras a una tarea que contiene</p>
	<p>DAQmx Temporización. Fija la fuente del reloj de muestreo, la tasa de adquisición, y el número de muestras a adquirir o generar.</p>
	<p>DAQmx Iniciar Tarea. Conmuta una tarea a el estado de ejecución, para empezar la adquisición o generación de datos.</p>
	<p>DAQmx Limpiar Tarea. Limpia una tarea. Antes de limpiar , para la ejecución de la tarea.</p>

FIGURA B.2. FUNCIONES PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS.

B.3 Herramientas para Identificación de Sistemas.

En la figura B.3 se muestra la descripción de algunas de las funciones utilizadas para la identificación de sistemas con LabVIEW, existen muchas funciones mas las cuales pueden ser investigadas en los manuales del software.






 <p>SI Remove Trend.vi</p>	<p>SI Remover Tendencias. Remueve promedio y tendencias lineales de estado estable de las señales estímulo y respuesta.</p>
 <p>SI Estimate Transfer Function Model.vi</p>	<p>SI Estimar Modelo de Función de Transferencia. Estima los parámetros de un modelo de función de transferencia discreta o continua de un modleo desconocido.</p>
 <p>SI Model Simulation.vi</p>	<p>SI Simulación de Modelo. Simula la respuesta de un modelo ante una señal de entrada.</p>
 <p>SI Convert Discrete to Continuous Model.vi</p>	<p>SI Convertir un Modelo de Discreto a Continuo. Convierto un modelo discreto a un modelo continuo.</p>
 <p>SI Save System Model to File.vi</p>	<p>SI Guardar un Modelo a un archivo. Guarda un modelo a un archivo con extensión .sim</p>

FIGURA B.3. FUNCIONES PARA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.

B.4 Herramientas para Diseño de Control.

La figura B.4 muestra funciones representativas del conjunto de funciones de diseño de control de LabVIEW con una breve descripción.









<p>CD Construct Zero-Pole-Gain Model.vi</p> 	<p>CD Construir Modelo Zero-Polo-Ganancia. Crea una representación zero-polo-ganancia de un sistema, usando los valores especificados por el usuario.</p>
<p>CD Draw Zero-Pole-Gain Equation.vi</p> 	<p>CD Dibujar Ecuación Zero-Polo-Ganancia. Muestra en un indicador grafico una ecuación tipo zero-polo-ganancia.</p>
<p>CD Write Model to File.vi</p> 	<p>CD Guarda modelo en un archivo. Crea un archivo en donde guarda un modelo.</p>
<p>CD Series.vi</p> 	<p>CD Serie. Conecta un modelo 1 y un modelo 2 tal como un modelo serie, en el cual un modelo va conectado a continuación del otro.</p>
<p>CD Feedback.vi</p> 	<p>CD Retroalimentación. Conecta un modelo 1 y un modelo 2 tal como un modelo en retroalimentación, se debe seleccionar que modelo va en la retroalimentación.</p>
<p>CD Step Response.vi</p> 	<p>CD Respuesta Escalón. Calcula la salida de un sistema cuando una entrada tipo escalón lo excita.</p>
<p>CD Parametric Time Response.vi</p> 	<p>CD Respuesta en el Tiempo. Calcula información tal como tiempo de ascenso, tiempo pico, tiempo de estabilización, sobrenivel porcentual, valor pico.</p>
<p>CD Root Locus.vi</p> 	<p>CD trayectoria de las raíces. Grafica la trayectoria de los polos en lazo cerrado de un sistema, cuando la ganancia de retroalimentación varía desde 0 hasta el infinito.</p>

FIGURA B.4. FUNCIONES PARA DISEÑO DE CONTROL.

B.5 Herramientas para Simulación.

En la figura B.5 se muestra un conjunto de las funciones de simulación, todas ellas colocadas dentro de un lazo de simulación, con lo que queremos recalcar que estas funciones solo pueden ser cargadas y puestas a funcionar dentro de un lazo de simulación, fuera de el no tienen efecto.

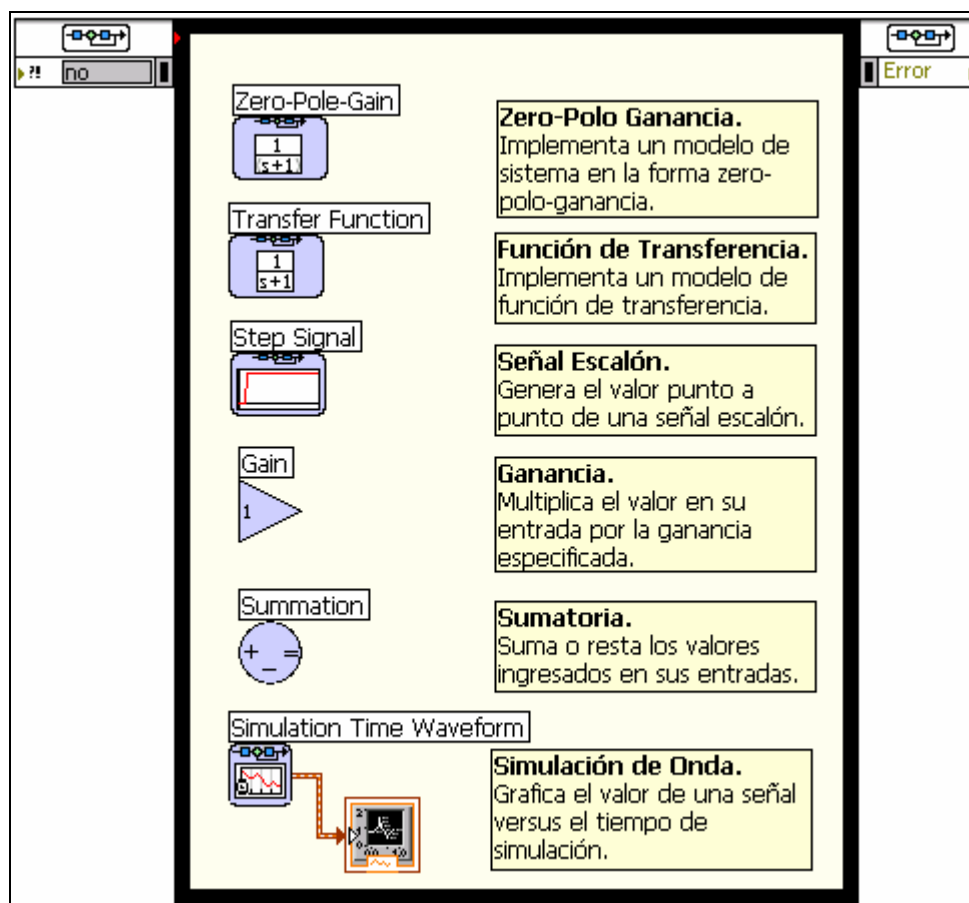


FIGURA B.5. FUNCIONES PARA SIMULACIÓN.

ANEXO C

PROGRAMAS DESARROLLADOS CON LabVIEW.

C.1 Programa para Adquisición y Generación de Datos.

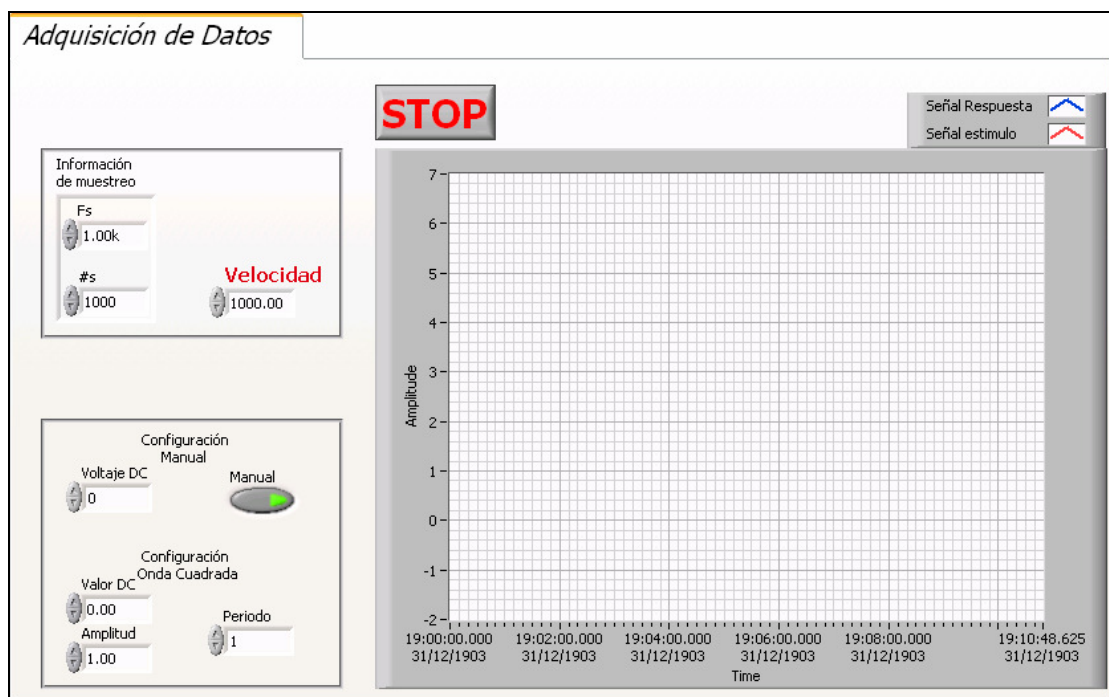


FIGURA C.1. PANEL FRONTAL DE PROGRAMA PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS.

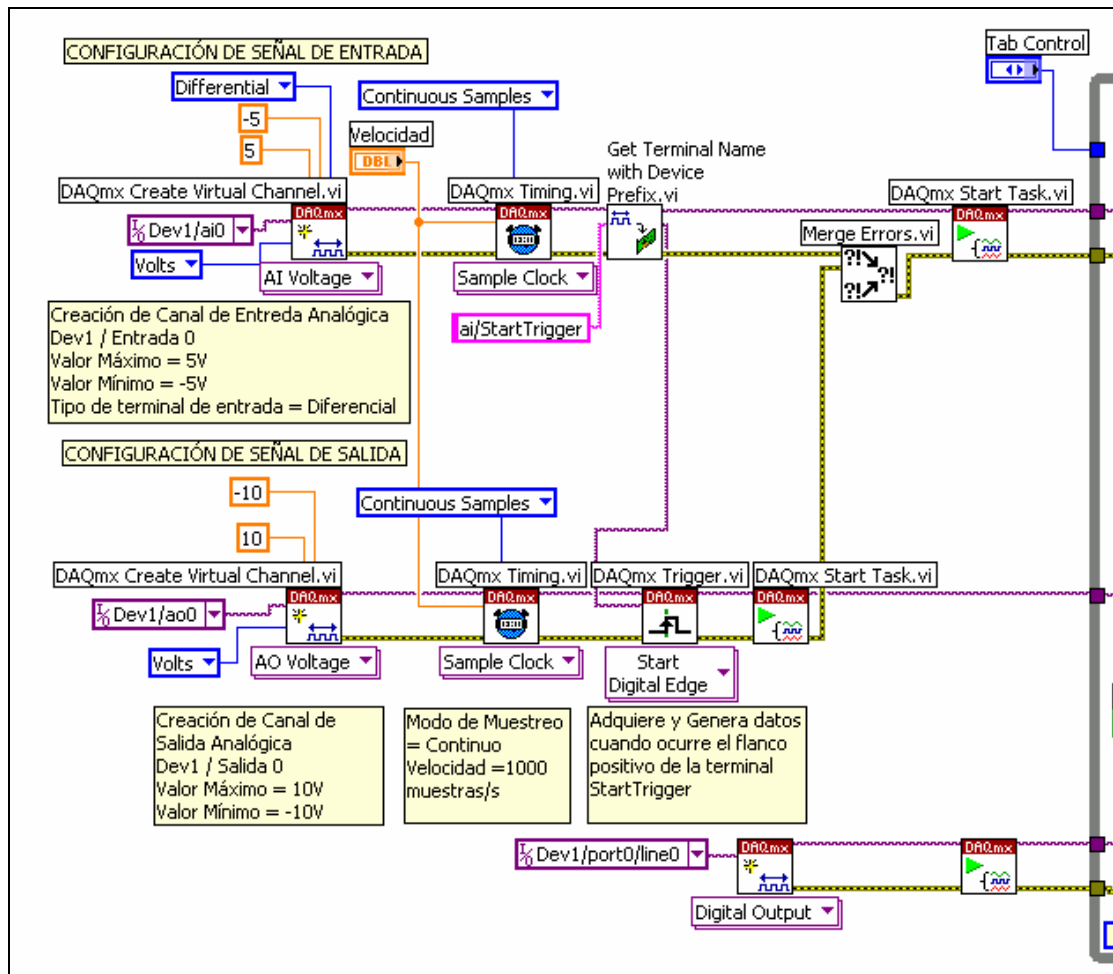


FIGURA C.2. DIAGRAMA DE BLOQUES, PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS.

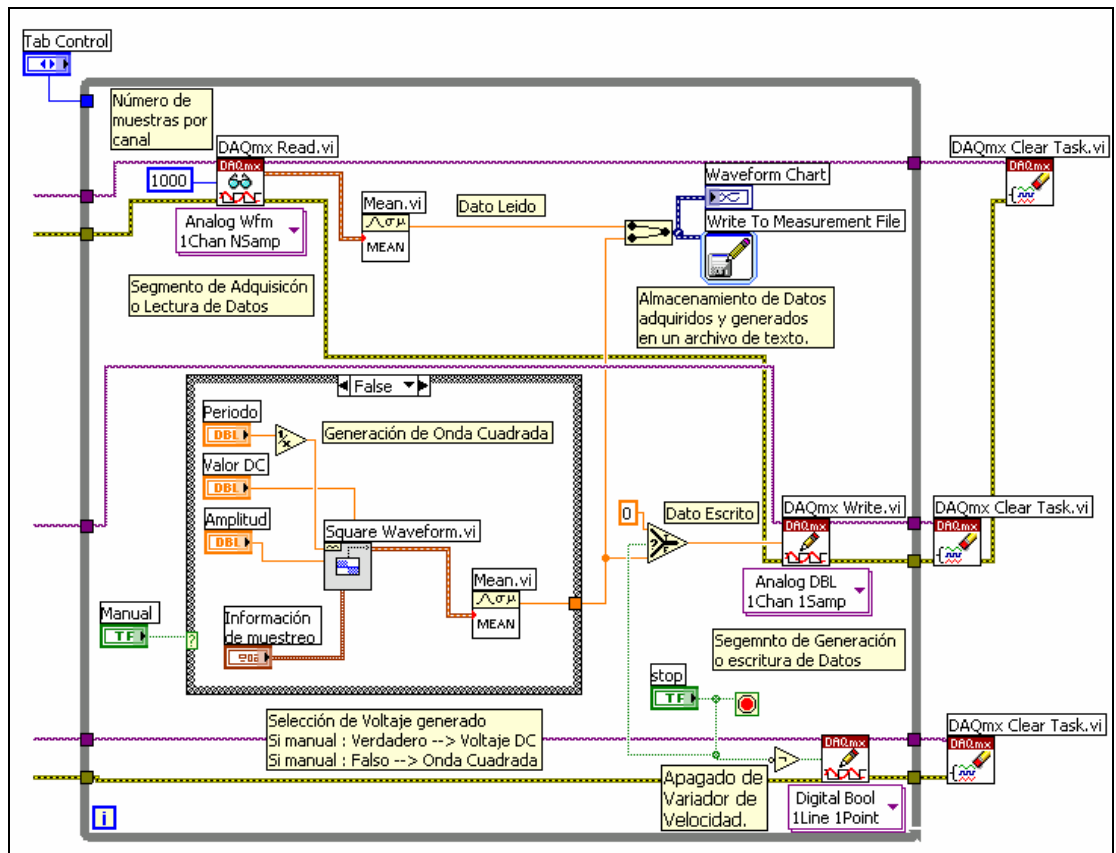


FIGURA C.3. CONTINUACIÓN DIAGRAMA DE BLOQUES, PROGRAMA DE ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS.

C.2 Programa para Identificación de Sistema.

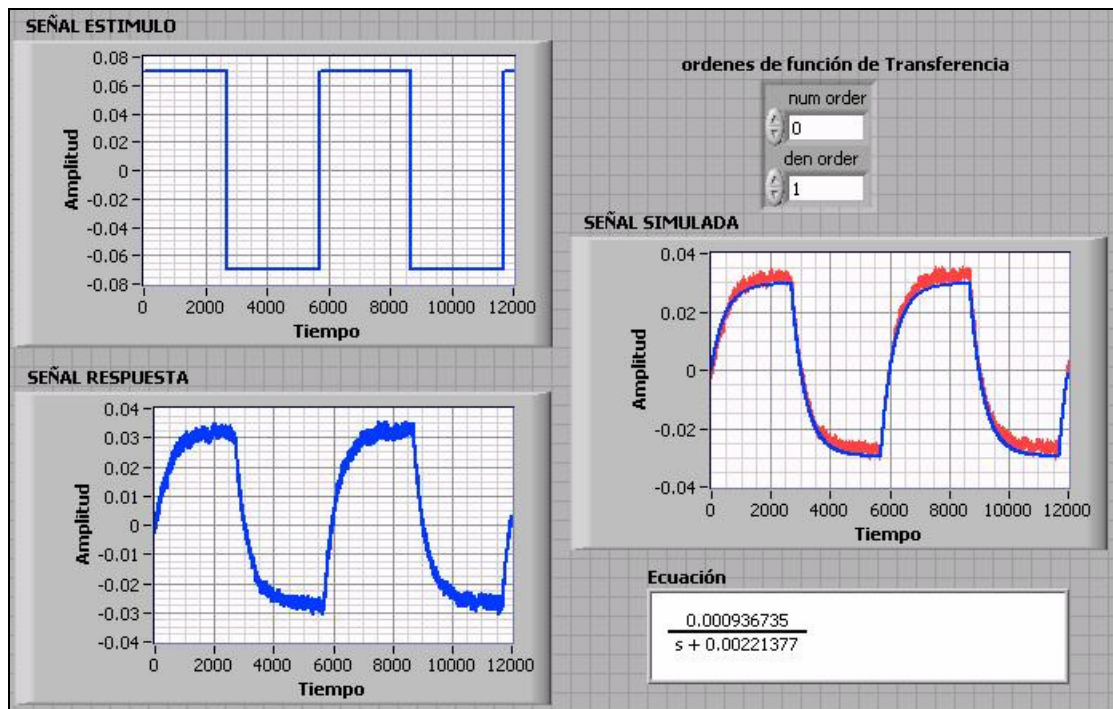


FIGURA C.4. PANEL FRONTAL PARA PROGRAMA DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA.

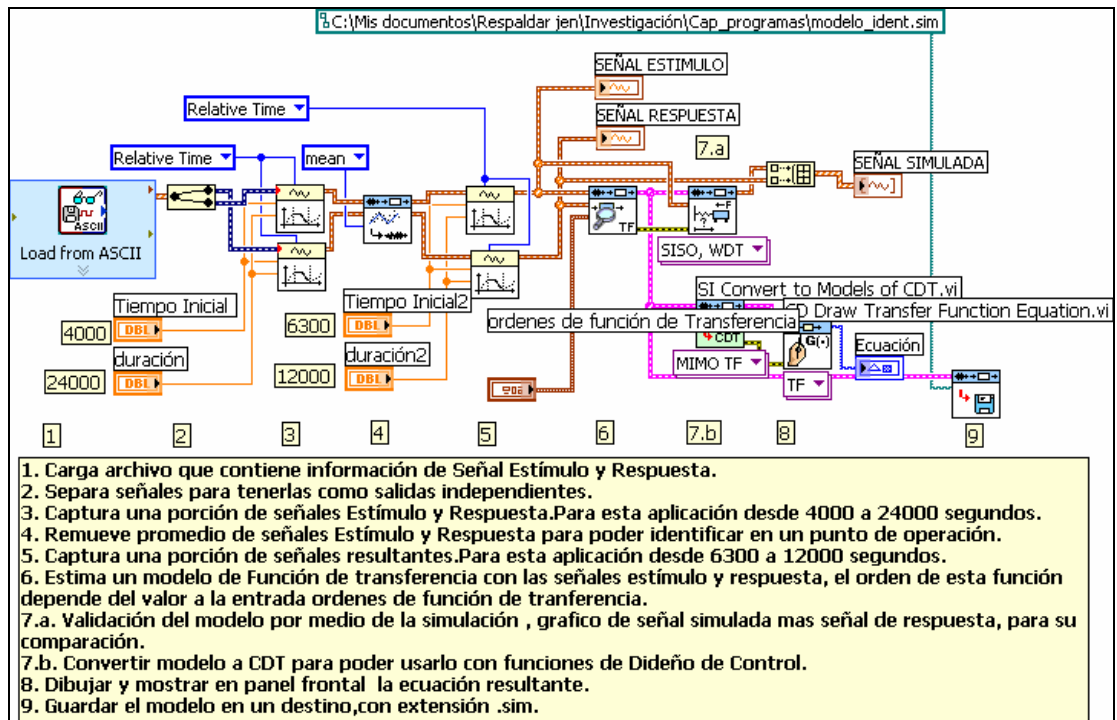


FIGURA C.5. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA PROGRAMA DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMA.

C.3 Programa para Diseño de Control.

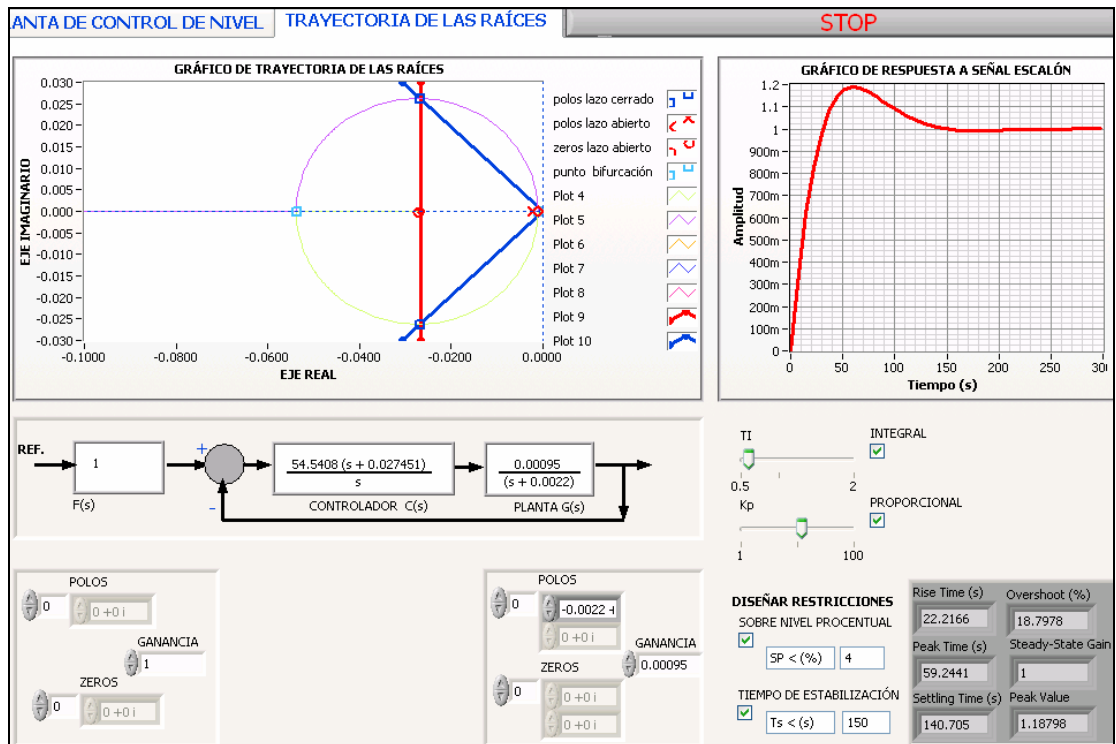


FIGURA C.6. PANEL FRONTAL PARA PROGRAMA DE DISEÑO DE CONTROL.

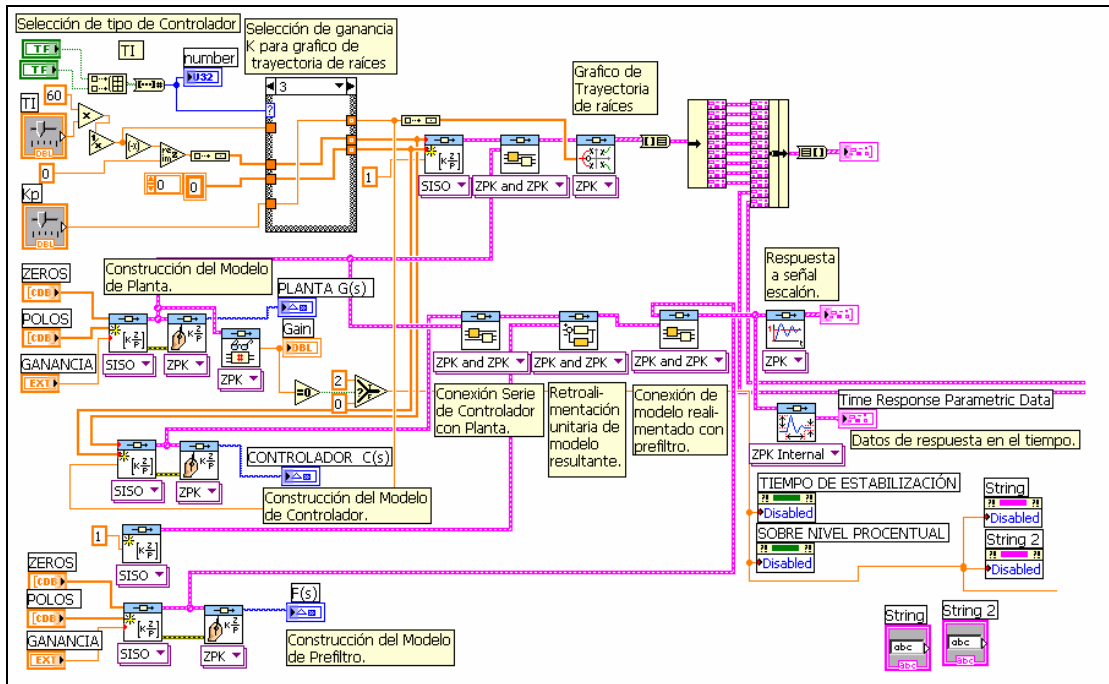


FIGURA C.7. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA PROGRAMA DE DISEÑO DE CONTROL.

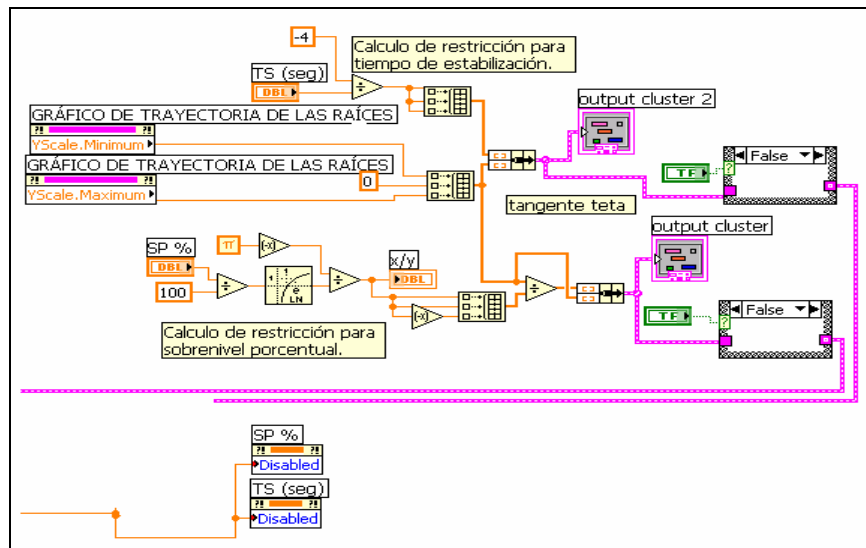


FIGURA C.8. CONTINUACIÓN DIAGRAMA DE BLOQUES PARA PROGRAMA DE DISEÑO DE CONTROL.

C.4 Listado de programas usados.

Adq_gen.vi : Programa que sirve para llevar a cabo la aplicación de una señal estímulo a la planta, y capturar la información de la respuesta de la planta a dicha señal estímulo. El programa graba en un archivo la información de la señal estímulo y la señal respuesta.

Identificación.vi : Programa para estimar modelo de la planta, en base a un archivo de datos que contiene una señal estímulo y respuesta.

Diseño_control.vi : Programa para graficar trayectoria de raíces de la planta en lazo cerrado, además permite agregar una estructura de control y verificar la respuesta de la planta ante una señal de referencia tipo escalón.

Simulación.vi : Programa para simular funcionamiento de la planta con controlador.

Implementación.vi : Programa para implementar controlador real dentro de la planta.

ANEXO D

ESTRUCTURA DE DISEÑO DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

D.1 Estructura.

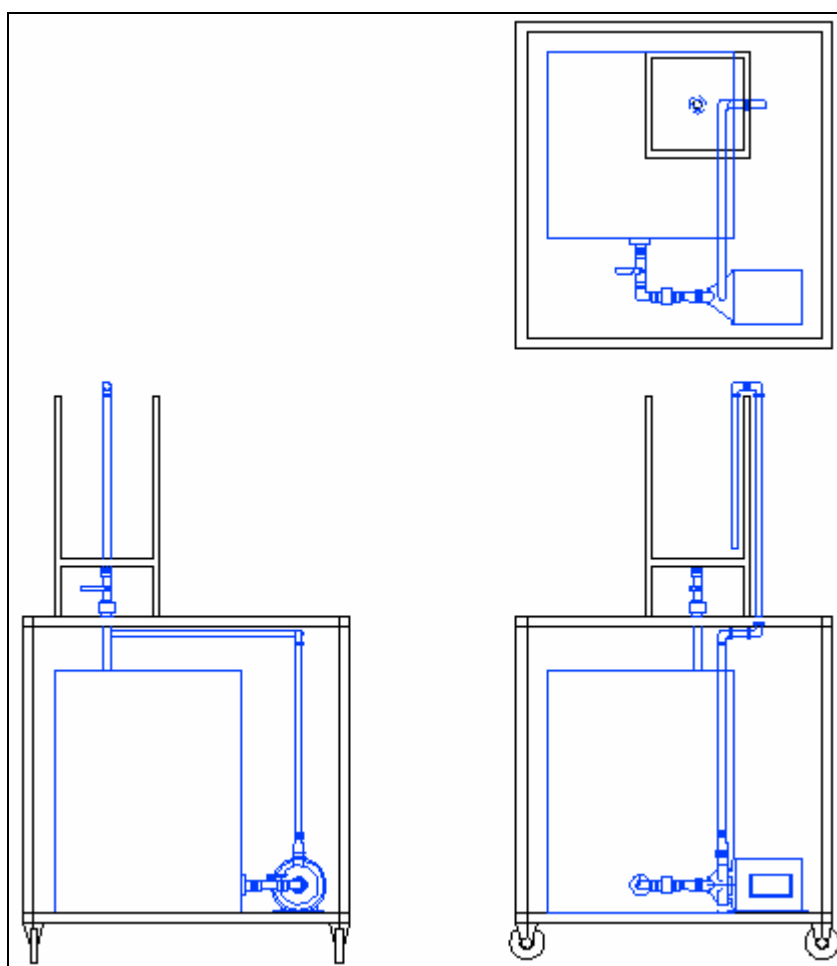


FIGURA D.1 ESTRUCTURA DE PLANTA DE CONTROL DE NIVEL.

D.2 Rangos de operación.

1. Rangos de temperatura.

Rango para transmisor de presión de 0-85 °C.

Rango para variador de velocidad de -10 °C a +50 °C .

Rango de Bomba Centrífuga de 40° C.

Se recomienda una máxima temperatura de operación de 40° C debido a la limitante de la bomba.

2. Fuentes de alimentación.

Para transmisor de presión fuente de alimentación DC que puede estar dentro de un rangote 8 a 36 V.

Variador de Velocidad de 200 a 240 V AC, dos fases.

Bomba, conexión delta-delta menor, alimentación 220 V AC.

3. Rangos de trabajo en tanque.

El tanque cuenta con una longitud de 50cm, de los cuales son aprovechables 38cm. Desde el borde inferior 7cm hacia arriba no se lo considera por ser el espacio ocupado para la conexión del transmisor de presión, y desde el tope superior hacia abajo se recomienda siempre tener 5cm libres para evitar un posible desbordamiento de agua.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] CREUSS, ALFONSO, *Instrumentación Industrial*, Séptima Edición, Editorial Marcombo, Año 2005.

- [2] MAZZONE, VIRGINIA, “Controladores PID”, Artículo Técnico, Universidad Nacional de Quilmes, Departamento de Automatización y Control Industrial, 2002.

- [3] SPORTELLI, G., NOSSA, C. y, MARTINEZ, I., “Sistemas de Control Muestreados”, Artículo Técnico, Disponible en <http://www.mstarlabs.com/docs/tn031.html>.

- [4] DORF, RICHARD, *Sistemas Modernos de Control Teoría y Práctica*, Cuarta Edición, Addison-Wesley Iberoamericana, 1989.

- [5] FERNANDEZ, PEDRO “Bombas centrífugas y volumétricas”, Artículo Técnico, Disponible en <http://www.termica.webhop.info>.

- [6] “System Identification Toolkit User Manual”, LabVIEW, National Instruments, 2006.

- [7] “Control Design Toolkit User Manual”, LabVIEW, National Instruments, 2006.
- [8] “Simulation Module User Manual”, LabVIEW, National Instruments, 2004.
- [9] “6023E/6024E/6025E User Manual”, DAQ, National Instruments, 2000.
- [10] “WINTERS PT5 datasheet”, WINTERS, Disponible en www.winters.com.
- [11] SERWAY, RAYMOND , *Física*, Tercera Edición , Tomo 1, Mc Graw Hill, 1996.
- [12] “Catálogo SINAMICS G110”, Siemens, 2003, Disponible en www.automation.siemens.com/sd/sinamicsg110/html_76/support.htm.
- [13] “DPL datasheet”, Kobold, Disponible en www.koboldmessring.com/fileadmin/koboldfiles/pdf/gb/s4gb_dpl.pdf.
- [14] LJUNG, LENNART, *System Identification Theory for the User*, Segunda Edición , Prentice Hall PTR, 1999.

- [15] REYES, ARÍSTIDES, "Identificación de Sistemas", ISPJAE, Departamento de Automática y Computación, Cuba, 2006.
- [16] GOODWIN, G.C., GRAEBE, S.F. y SALGADO, M.E. , *Control Design Systems*, Segunda Edición, Prentice Hall, 2001
- [17] "PID Control Toolkit User Manual", LabVIEW, National Instruments, 2006.
- [18] SMITH, CARLOS y CORRIPIO, ARMANDO, *Control Automático de Procesos Teoría y Práctica*, Primera Edición, Editorial Limusa, 1991.
- [19] "Artículos técnicos LabVIEW", Disponibles en www.ni.com.