

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

*Trabajo de titulación
previo a la obtención del
título de Ingeniero
Electrónico*

**PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:
“DESARROLLO DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS ORIENTADO AL
APRENDIZAJE DE LA IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS
DENTRO DEL LABORATORIO LACTI DE LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA”**

AUTORES:

BRUNO ELÍAS BENAVIDES ORTIZ
FÉLIX JAVIER SIGCHA TEPAN

TUTOR:

ING. JULIO ZAMBRANO ABAD

CUENCA – ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Bruno Elías Benavides Ortiz con documento de identificación N° 0105737761 y Félix Javier Sigcha Tepán con documento de identificación N° 0105400501, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS ORIENTADO AL APRENDIZAJE DE LA IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS DENTRO DEL LABORATORIO LACTI DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Electrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, septiembre del 2019



Bruno Elías Benavides Ortiz
C.I. 0105737761



Félix Javier Sigcha Tepán
C.I. 0105400501

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS ORIENTADO AL APRENDIZAJE DE LA IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS DENTRO DEL LABORATORIO LACTI DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**, realizado por Bruno Elías Benavides Ortiz y Félix Javier Sigcha Tepán, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, septiembre del 2019



Ing. Julio César Zambrano Abad

C.I. 0301489696

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Bruno Elías Benavides Ortiz con documento de identificación N° 0105737761 y Félix Javier Sigcha Tepán con documento de identificación N° 0105400501, autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS ORIENTADO AL APRENDIZAJE DE LA IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS DENTRO DEL LABORATORIO LACTI DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, septiembre del 2019



Bruno Elías Benavides Ortiz
C.I. 0105737761



Félix Javier Sigcha Tepán
C.I. 0105400501

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiar mi camino y permitirme culminar una carrera, del mismo modo a mis padres y hermanos por su apoyo y compromiso incondicional, y al Ing. Julio Zambrano por su colaboración durante el periodo de elaboración de este proyecto.

Benavides Ortiz Bruno Elías

Principalmente agradezco a Dios por la salud y sabiduría, para poder alcanzar una meta más en la vida.

A mi abuelita Rosario por el amor, cariño, consejos y apoyo.

A mi papá y a mi mamá quienes han trabajado arduamente para tener las posibilidades de estudiar y también por los consejos brindados.

A los laboratoristas de la universidad por la ayuda brindada en la elaboración de este proyecto y la facilidad de acceder a los mismos.

Al Ing. Julio Zambrano, por la ayuda y el tiempo que se ha tomado para realizar las correcciones y observaciones de este proyecto de titulación.

Sigcha Tepán Félix Javier

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Dios quien es el motor de mi existencia, a mis padres quienes me han inculcado que la educación es la mejor herencia que un hijo puede recibir y a mis hermanos por su confianza durante este camino.

Benavides Ortiz Bruno Elías

Quiero dedicar esta tesis a toda mi familia quienes me apoyaron en todo este trayecto, especialmente a mi abuelita Rosario quien me enseñó muchos valores y estuvo ahí en toda mi vida apoyándome. También a mi papá por los consejos brindados y el apoyo en todo momento. Finalmente va dedicado a mi mamá y mis hermanos por todo el apoyo incondicional que me han brindado en todo el transcurso de mi formación profesional.

Sigcha Tepán Félix Javier

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| AGRADECIMIENTOS..... | I |
| DEDICATORIAS..... | II |
| ÍNDICE GENERAL..... | III |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XI |
| RESUMEN..... | XII |
| INTRODUCCIÓN..... | XIII |
| ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO..... | XV |
| JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)..... | XVII |
| OBJETIVOS..... | XVIII |
| OBJETIVO GENERAL..... | XVIII |
| OBJETIVOS ESPECÍFICO..... | XVIII |
| CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍA DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL TOTALMENTE INTEGRADO (LACTI)..... | 1 |
| 1.1 Descripción de la planta de control de procesos “A”..... | 1 |
| 1.2 Descripción de la planta de control de procesos “B”..... | 6 |
| 1.3 Controladores programables..... | 11 |
| 1.4 Servidores OPC Disponibles..... | 15 |
| CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS. | 18 |
| 2.1 Identificación de sistemas..... | 18 |
| 2.2 Control PID..... | 19 |
| 2.3 Técnicas de Síntonia..... | 20 |
| 2.4 Control en espacio de estados en tiempo continuo..... | 24 |
| 2.4.1 Aproximación de funciones con retardo..... | 24 |
| 2.4.2 Diseño mediante la asignación de polos..... | 25 |
| 2.4.3 Representación en el espacio de estados de sistemas definidos por su función de transferencia..... | 26 |
| 2.4.4 Controlabilidad y observabilidad..... | 27 |
| 2.4.5 Diseño de un servosistema cuando la planta no contiene integrador... | 28 |

| | | |
|--|--|----|
| 2.4.6 | Metodos para determinar la matriz K | 29 |
| 2.4.7 | Observadores de estado..... | 31 |
| 2.4.8 | Métodos para determinar la matriz Ke | 32 |
| 2.5 | Control en espacio de estados en tiempo Discreto..... | 34 |
| 2.5.1 | Diseño mediante la asignación de polos en tiempo discreto..... | 34 |
| 2.5.2 | Sistema de seguimiento..... | 34 |
| 2.5.3 | Diseño de observadores..... | 36 |
| 2.5.4 | Sistema de seguimiento con realimentación de estado observado..... | 37 |
| CAPÍTULO 3: ADQUISICIÓN DE DATOS DE LOS PROCESOS. | | 39 |
| 3.1 | Conexión del sistema CompactRIO a través del panel de control de la Planta B | 39 |
| 3.2 | Configuración del sistema CompactRIO NI 9012 | 42 |
| 3.3 | Configuración del software NI OPC Servers de National Instruments..... | 45 |
| 3.3.1 | Creación de un canal en el software NI OPC Servers..... | 45 |
| 3.3.2 | Configuración de un dispositivo | 47 |
| 3.3.3 | Creación de etiquetas | 49 |
| 3.4 | Configuración en el software KEPServerEX..... | 50 |
| 3.4.1 | Creación de un canal en el software KEPServerEX | 51 |
| 3.4.2 | Configuración de un dispositivo | 52 |
| 3.4.3 | Creación de etiquetas | 55 |
| CAPÍTULO 4: IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS..... | | 57 |
| 4.1 | Identificación del proceso de flujo de la Planta B | 57 |
| 4.2 | Identificación del proceso de Nivel de la Planta B | 65 |
| 4.3 | Identificación del proceso de flujo Másico de la Planta A | 71 |
| CAPÍTULO 5: CONTROLADORES PID | | 78 |
| 5.1 | Control PID de un proceso de flujo (PLANTA B) | 78 |
| 5.2 | Control PID de un proceso de flujo mediante el PLC SCHNEIDER ELECTRIC (PLANTA B)..... | 80 |
| 5.3 | Control PID de un proceso de flujo y nivel mediante la Auto-sintonización en el PLC SIEMENS S7-1200 (PLANTA B)..... | 84 |
| 5.3.1 | Control PID de un Proceso de Flujo (Planta B)..... | 84 |
| 5.3.2 | Control PID de un Proceso de Nivel (Planta B)..... | 89 |
| 5.4 | Control PID de un proceso de flujo másico (PLANTA A)..... | 92 |
| CAPÍTULO 6: CONTROLADORES EN ESPACIO DE ESTADOS | | 94 |
| 6.1 | Control en tiempo continuo de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados (PLANTA B)..... | 94 |

| | |
|---|-----|
| 6.2 Control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados (PLANTA B)..... | 97 |
| 6.3 Control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados con el sistema CompactRIO (PLANTA B)..... | 98 |
| 6.4 Control en tiempo discreto de un proceso de flujo másico mediante la técnica de retroalimentación de estados (PLANTA A)..... | 101 |
| CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 103 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |
| APÉNDICES..... | 109 |
| APÉNDICE A: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO CONTINUO (PLANTA B)..... | 109 |
| APÉNDICE B: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO DISCRETO (PLANTA B)..... | 111 |
| APÉNDICE C: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO DISCRETO (PLANTA A) | 113 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 <i>Tuberías, sensores y contenedores de la planta de control y procesos A del laboratorio LACTI</i> | 1 |
| Figura 1.2 <i>Tablero de control de la planta de control y procesos A</i> | 2 |
| Figura 1.3 <i>Diagrama P&ID de los elementos que intervienen en el proceso</i> | 2 |
| Figura 1.4 <i>Configuración Red Profibus</i> | 3 |
| Figura 1.5 <i>Posicionador electroneumático SIPART PS2 [1]</i> | 4 |
| Figura 1.6 <i>Válvula de control Jordán 70SP [2]</i> | 4 |
| Figura 1.7 <i>Medidor Coriolis Proline Promass 83E [4]</i> | 5 |
| Figura 1.8 <i>Variadores de Frecuencia dentro de la planta de control de procesos A [5]</i> | 5 |
| Figura 1.9 <i>Planta B del laboratorio LACTI de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca</i> | 6 |
| Figura 1.10 <i>Diagrama P&ID de los elementos que intervienen en el proceso</i> | 7 |
| Figura 1.11 <i>Posicionador Electroneumático Burkert 8792 [7]</i> | 7 |
| Figura 1.12 <i>Teclas de configuración del Posicionador Electroneumático Burkert 8792 [6]</i> | 8 |
| Figura 1.13 <i>Elementos del nivel de proceso [6]</i> | 8 |
| Figura 1.14 <i>Válvula de control de asiento inclinado de 2/2 vías [8]</i> | 9 |
| Figura 1.15 <i>Caudalímetro Burkert SE35/8035 [11]</i> | 10 |
| Figura 1.16 <i>Variador de Frecuencia Danfoss VT-2800 [12]</i> | 10 |
| Figura 1.17 <i>Detección de Nivel Capacitiva [14]</i> | 11 |
| Figura 1.18 <i>NI CompactRIO 9012 [16]</i> | 12 |
| Figura 1.19 <i>Módulo NI 9219 [17]</i> | 12 |
| Figura 1.20 <i>Módulo NI 9263 [19]</i> | 13 |
| Figura 1.21 <i>PLC S7-300 de Siemens [21]</i> | 14 |
| Figura 1.22 <i>PLC S7-1200 de Siemens [22]</i> | 14 |
| Figura 1.23 <i>PLC Schneider Electric TWDLCAE40DRF</i> | 15 |
| Figura 1.24 <i>Ventana de configuración del NI OPC Servers</i> | 16 |
| Figura 1.25 <i>Ventana de configuración del KEPServerEX 6</i> | 17 |
| Figura 2.1 <i>Sistema en lazo cerrado de un controlador [29]</i> | 20 |
| Figura 2.2 <i>Objeto Tecnológico PID_Compact</i> | 21 |
| Figura 2.3 <i>Ventana de Configuración</i> | 22 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.4 <i>Ventana de Puesta en Servicio</i> | 23 |
| Figura 2.5 <i>Aplicación PID Tuner de Matlab</i> | 24 |
| Figura 2.6 <i>Curva de respuesta de un escalón unitario [30].</i> | 26 |
| Figura 2.7 <i>Servosistema tipo 1 con observador de estado [30].</i> | 29 |
| Figura 2.8 <i>Diagrama de bloques del sistema y del observador de estados de orden completo [30].</i> | 32 |
| Figura 2.9 <i>Sistema de seguimiento con realimentación del estado y control integral.</i> | 35 |
| Figura 2.10 <i>Sistema de seguimiento con realimentación del estado.</i> | 37 |
| Figura 3.1 <i>Modo de conexión de la planta B del laboratorio LACTI con el CompactRIO NI 9012.</i> | 40 |
| Figura 3.2 <i>Conexión del módulo NI 9219 del CompactRIO con el panel de control de la planta B del laboratorio LACTI para medir flujo.</i> | 41 |
| Figura 3.3 <i>Conexión del módulo NI 9219 del CompactRIO con el panel de control de la planta B del laboratorio LACTI para medir nivel.</i> | 41 |
| Figura 3.4 <i>Configuración del Panel de Control de la Planta B.</i> | 42 |
| Figura 3.5 <i>Seleccionar tipo de Entrada posicionador Burkert 8792.</i> | 42 |
| Figura 3.6 <i>Aplicación NI MAX.</i> | 43 |
| Figura 3.7 <i>Reconocimiento del CompactRIO dentro de la aplicación NI MAX.</i> | 43 |
| Figura 3.8 <i>Configuración IP estático en el CompactRIO.</i> | 44 |
| Figura 3.9 <i>Dirección asignada al CompactRIO NI 9012.</i> | 44 |
| Figura 3.10 <i>Ventana Nuevo Proyecto.</i> | 45 |
| Figura 3.11 <i>Tipo de Canal.</i> | 46 |
| Figura 3.12 <i>Adaptador de red.</i> | 46 |
| Figura 3.13 <i>Resumen de configuración.</i> | 47 |
| Figura 3.14 <i>Agregar Dispositivo.</i> | 47 |
| Figura 3.15 <i>Modelo del PLC.</i> | 48 |
| Figura 3.16 <i>Dirección IP.</i> | 48 |
| Figura 3.17 <i>Dispositivo Configurado.</i> | 49 |
| Figura 3.18 <i>Agregar Etiqueta.</i> | 49 |
| Figura 3.19 <i>Variable Energizar.</i> | 50 |
| Figura 3.20 <i>Configuración Finalizada.</i> | 50 |
| Figura 3.21 <i>Nuevo Proyecto.</i> | 51 |
| Figura 3.22 <i>Tipo de Canal.</i> | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.23 <i>Adaptador de red.</i> | 52 |
| Figura 3.24 <i>Resumen de Configuración.</i> | 52 |
| Figura 3.25 <i>Agregar un dispositivo.</i> | 53 |
| Figura 3.26 <i>Nombre del dispositivo.</i> | 53 |
| Figura 3.27 <i>Modelo del PLC.</i> | 54 |
| Figura 3.28 <i>Dirección IP.</i> | 54 |
| Figura 3.29 <i>Dispositivo Configurado.</i> | 55 |
| Figura 3.30 <i>Agregar una etiqueta.</i> | 55 |
| Figura 3.31 <i>Etiqueta sensor caudal.</i> | 56 |
| Figura 3.32 <i>Configuración Finalizada.</i> | 56 |
| Figura 4.1 <i>Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Flujo.</i> | 57 |
| Figura 4.2 <i>Explorador de proyectos de LabVIEW con los módulos que se encuentran en el CompactRIO.</i> | 58 |
| Figura 4.3 <i>Propiedades del módulo NI 9219.</i> | 58 |
| Figura 4.4 <i>Periodo de Escaneo.</i> | 59 |
| Figura 4.5 <i>Variables utilizadas para el proceso de adquisición.</i> | 59 |
| Figura 4.6 <i>Programa para la Adquisición de Datos de Caudal.</i> | 60 |
| Figura 4.7 <i>Panel Frontal del programa de adquisición de Datos de Caudal.</i> | 61 |
| Figura 4.8 <i>Datos adquiridos en Excel.</i> | 61 |
| Figura 4.9 <i>Datos generados en Excel de Caudal.</i> | 62 |
| Figura 4.10 <i>Carga e inspección de los datos.</i> | 62 |
| Figura 4.11 <i>Selección de datos para la identificación.</i> | 63 |
| Figura 4.12 <i>Quitar el offset de los datos de entrada y salida.</i> | 64 |
| Figura 4.13 <i>Análisis del tiempo muerto.</i> | 64 |
| Figura 4.14 <i>Estimaciones para encontrar el modelo de la planta de un polo, dos polos y tres polos.</i> | 65 |
| Figura 4.15 <i>Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Nivel.</i> | 65 |
| Figura 4.16 <i>Programa para la adquisición de datos de Nivel.</i> | 66 |
| Figura 4.17 <i>Controles del Panel Frontal de LabVIEW para la adquisición de datos de Nivel.</i> | 67 |
| Figura 4.18 <i>Datos adquiridos en Excel.</i> | 67 |
| Figura 4.19 <i>Datos generados en Excel de Nivel.</i> | 68 |
| Figura 4.20 <i>Datos generados en Matlab mediante el comando plot.</i> | 68 |
| Figura 4.21 <i>Identificación de una nueva planta</i> | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.22 <i>Plant Identification</i> | 69 |
| Figura 4.23 <i>Importar Datos</i> | 70 |
| Figura 4.24 <i>Identificación de la planta</i> | 70 |
| Figura 4.25 <i>Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Flujo Másico</i> | 71 |
| Figura 4.26 <i>VARIABLES creadas en el explorador de proyectos de LabVIEW</i> | 71 |
| Figura 4.27 <i>VARIABLES utilizadas para el proceso de adquisición</i> | 72 |
| Figura 4.28 <i>Elegir modo de Acceso</i> | 72 |
| Figura 4.29 <i>Programa para la Adquisición de Datos de Caudal másico</i> | 73 |
| Figura 4.30 <i>Panel Frontal del programa de adquisición de Datos de Caudal másico</i> | 73 |
| Figura 4.31 <i>Datos generados en Excel de Caudal</i> | 74 |
| Figura 4.32 <i>Datos generados en Matlab mediante el comando plot</i> | 74 |
| Figura 4.33 <i>Datos generados en Matlab mediante el comando plot del escalón</i> | 75 |
| Figura 4.34 <i>Principio de funcionamiento regulador de 5 puntos [35]</i> | 75 |
| Figura 4.35 <i>Importar Datos</i> | 76 |
| Figura 4.36 <i>Identificación de la planta</i> | 76 |
| Figura 5.1 <i>Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo</i> | 79 |
| Figura 5.2 <i>Programa en Simulink de un diagrama de bloques PID</i> | 79 |
| Figura 5.3 <i>Comportamiento del control PID del proceso de flujo</i> | 80 |
| Figura 5.4 <i>Configuración de entrada del bloque PID</i> | 81 |
| Figura 5.5 <i>Configuración de la consigna y constantes K_p, T_d, T_i del bloque PID</i> ... | 81 |
| Figura 5.6 <i>Configuración de salida del bloque PID</i> | 82 |
| Figura 5.7 <i>Programa en LabVIEW del Control de Caudal</i> | 82 |
| Figura 5.8 <i>Ventana principal en LabVIEW del Control de flujo</i> | 83 |
| Figura 5.9 <i>Comportamiento del control PID en el PLC Schneider Electric de un proceso de flujo</i> | 83 |
| Figura 5.10 <i>Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo y nivel</i> | 84 |
| Figura 5.11 <i>Ajustes básicos</i> | 85 |
| Figura 5.12 <i>Ajustes del valor Real</i> | 85 |
| Figura 5.13 <i>Parámetros PID</i> | 86 |
| Figura 5.14 <i>Sistema Optimizado</i> | 86 |
| Figura 5.15 <i>Sistema Optimizado</i> | 87 |
| Figura 5.16 <i>Parámetros PID después de la auto-sintonía</i> | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.17 Programa en LabVIEW del Control de Caudal | 88 |
| Figura 5.18 Ventana principal en LabVIEW del Control de flujo. | 88 |
| Figura 5.19 Comportamiento del control PID en el PLC Siemens de un proceso de Control de flujo. | 89 |
| Figura 5.20 Sistema Optimizado. | 90 |
| Figura 5.21 Parámetros PID después de la auto-sintonía. | 90 |
| Figura 5.22 Programa en LabVIEW del Control de Nivel..... | 91 |
| Figura 5.23 Ventana principal en LabVIEW del Control de nivel. | 91 |
| Figura 5.24 Comportamiento del control PID en el PLC Siemens de un proceso de Control de nivel..... | 92 |
| Figura 5.25 Diagrama P&ID del proceso de control de flujo másico. | 92 |
| Figura 5.26 Programa en Simulink de un diagrama de bloques PID. | 93 |
| Figura 5.27 Comportamiento del control PID del proceso de flujo másico. | 93 |
| Figura 6.1 Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo. | 95 |
| Figura 6.2 Programa en Simulink de control en tiempo continuo de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados. | 96 |
| Figura 6.3 Comportamiento del control de flujo en tiempo Continuo. | 96 |
| Figura 6.4 Programa en Simulink de control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados. | 98 |
| Figura 6.5 Comportamiento del control de flujo en tiempo discreto. | 98 |
| Figura 6.6 Programa en LabVIEW de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados con el sistema CompactRIO. | 99 |
| Figura 6.7 Programa en LabVIEW del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados..... | 100 |
| Figura 6.8 Comportamiento del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados. | 100 |
| Figura 6.9 Programa en LabVIEW de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados. | 101 |
| Figura 6.10 Programa en LabVIEW del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados..... | 102 |
| Figura 6.11 Comportamiento del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados. | 102 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Descripción del comando tfest | 19 |
| Tabla 2.2 Descripción de los parámetros del bloque PID_Compact | 21 |

RESUMEN

En el presente trabajo se ha desarrollado un manual de prácticas orientado al aprendizaje de la identificación y control de procesos. El manual se ha aplicado dentro del Laboratorio de Automatización y Control Totalmente Integrado (LACTI) que cuenta con dos plantas de procesos denominadas planta A y B, en donde cada una está equipada con diferentes tipos de elementos que intervienen en los procesos de control. Este manual contribuirá de forma académica con los estudiantes para la familiarización con el control en el medio industrial.

En el caso de la planta B se utilizó el sistema CompactRIO para la adquisición de datos y el software de Matlab para la identificación de los modelos matemáticos. Además, se realizó un control PID y un control mediante la técnica de realimentación de estados en tiempo continuo y discreto a través del software de LabVIEW y Simulink de Matlab con un enlace OPC. Los controladores PID se implementaron en el PLC Siemens S7-1200, el cual permite la auto sintonización del proceso a través del software de programación Tía Portal, también se implementó en el PLC Schneider que permite ingresar un bloque PID mediante el software de programación TwidoSuite, para obtener las constantes se utilizó la aplicación PID Tuner de Matlab. En el sistema CompactRIO mediante el software de programación de LabVIEW se implementó un controlador en espacio de estados en tiempo discreto.

En el caso de la planta A se utilizó el PLC S7-300 para la adquisición de datos y el software de Matlab para la identificación, además se realizó el control del proceso mediante la técnica de realimentación de estados en tiempo discreto a través del software de LabVIEW con un enlace OPC. También se implementó un control PID en el cual se utilizó el software de Simulink de Matlab con un enlace OPC. Para la administración de cada uno de los elementos que intervienen en el sistema se utilizó el software STEP 7.

INTRODUCCIÓN

En el laboratorio de Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, se encuentra el Laboratorio de Automatización y Control Totalmente Integrado (LACTI), que cuenta con dos plantas de control de procesos denominados A y B con características Industriales. Entre las principales practicas es posible realizar lazos de control a través del computador usando un sistema convencional de adquisición de datos, no obstante, es posible desarrollar prácticas para configurar instrumentos, configuración y puesta en marcha de redes industriales y sistemas SCADA.

En la actualidad este laboratorio no dispone de una guía que permita a los estudiantes realizar prácticas enfocadas al control e identificación de procesos, por tal motivo la intención de este proyecto es desarrollar un manual que permita el control de estas plantas mediante técnicas de control expuestas de forma teórica profundizando así los conocimientos acerca de la teoría de control aplicado a los procesos industriales.

Además, se propone la identificación de los procesos de flujo y nivel en la planta B y de flujo másico en la planta A mediante el uso de autómatas programables y un enlace OPC. Para el diseño e implementación se proponen los controladores PID, controladores en Espacio de Estados en tiempo continuo y discreto, adicionalmente se implementan controladores PID en los PLCs Siemens S7-1200, S7-300 y en PLC Schneider Electric.

Por otra parte, cada uno de los controles será implementado en el software de LabVIEW o Simulink de Matlab. Esto permitirá obtener la función de transferencia, sintonización de los controladores e implementación de los mismos para modificar y observar su comportamiento.

En el capítulo 1 se encuentra la descripción de las plantas A y B, la descripción de controladores programables como los PLCs de la marca Siemens y Schneider Electric, además se encontrará la descripción de servidores OPC. En el capítulo 2 se expone sobre los aspectos teóricos sobre la identificación de sistemas, control PID y control en espacio de estados en tiempo continuo y discreto. En el capítulo 3 se encontrará la conexión y configuración del sistema CompactRIO, así como también las configuraciones de servidores OPC. En el capítulo 4 se realiza la identificación de

procesos en donde se obtuvieron los modelos matemáticos de los procesos. En el capítulo 5 se implementan controladores PID en el computador y en los PLCs siemens S7-1200, S7-300 y el PLC Schneider. Y finalmente en el capítulo 6 se implementan los controladores en espacio de estados mediante diagrama de bloques en los PLCs y mediante ecuaciones de control en el sistema CompactRIO.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En la actualidad a los autómatas programables ya no se definen solamente como controladores de máquinas secuenciales, sino que se ha incorporado una serie de nuevas funcionalidades como regulación de procesos continuos, comunicación mediante redes industriales y sistemas de cableado distribuido mediante buses de campo [1].

Además, con el desarrollo de los buses de campo se ha simplificado el cableado donde con un simple cable puede establecer comunicación con todas las estaciones y esclavos del bus, donde los maestros pueden ser los autómatas programables o también las PCs que vienen incorporadas con tarjetas de comunicación [1].

Con la aparición de las computadoras digitales aparecen las aplicaciones en sistemas de control donde se puede manejar varios procesos y variables, recopilar una gran cantidad de datos, analizar y optimizar diversas plantas [1].

Entre las técnicas de control podemos mencionar el PID el cual se mantiene en vigencia dentro de la automatización industrial ya que podemos encontrar en sistemas hidráulicos, neumáticos y electrónicos, cabe recalcar que más de la mitad de los controladores que se utilizan actualmente son del tipo PID por ende se han desarrollado métodos automáticos de sintonía para obtener una sintonización delicada y fina de los controladores, además es útil cuando se desconoce el modelo matemático de la planta. En los sistemas de control de procesos los controladores PID han aportado un control satisfactorio, aunque en algunas situaciones no sean muy óptimos [2].

El control en espacio de estados es una técnica que se basa en el control moderno donde el sistema posee varias entradas, salidas y variables de estado que se relacionan entre sí por ecuaciones diferenciales, por lo cual se recurre a los ordenadores para que realicen una gran parte de los cálculos [2].

El control predictivo basado en modelo (MPC) es un procedimiento dentro de la ingeniería de control moderno. Esta técnica utiliza un modelo para predecir las salidas del proceso y así calcular la acción de control futuro. El MPC tiene grandes ventajas como tratar sistemas con multivariables e incorporar restricciones la desventaja surge en la complejidad del algoritmo el cual requiere de un elevado coste

computacional pero actualmente con el avance de la tecnología este problema se ha dejado de lado [3].

En el laboratorio de Automatización y Control Totalmente Integrado (LACTI) de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca se tiene a disposición la planta A y B de control de procesos que permiten realizar prácticas de lazos de control a través del computador usando un sistema convencional de adquisición de datos por parte de los estudiantes para así corroborar los conocimientos teóricos adquiridos sobre la identificación y control de procesos.

JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

En la actualidad la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca cuenta con un laboratorio de procesos denominado Laboratorio de Automatización y Control Integrado “LACTI” este laboratorio cuenta con varios manuales de prácticas para su uso entre los cuales destaca el uso de “SCADA”, el reconocimiento de los componentes que lo integran y a su vez su funcionamiento, pero no existen manuales orientados a teoría de control, por lo cual se propone un manual donde se realice el control de las plantas desde una PC donde se pueda ajustar el valor del controlador PID los cuales se ajustaran en los PLCs que están integrados en las plantas.

Con este proyecto se pretende que los estudiantes como futuros ingenieros se puedan preparar en un entorno real donde se pueda llevar a cabo la parte teórica de una forma práctica. Además, aprovechar las ventajas de contar con un laboratorio equipado con un sistema que permita realizar prácticas de control de procesos.

Con este manual de prácticas el estudiante se familiarizará con los instrumentos que intervienen en los procesos de control además desarrollará destrezas en la identificación de procesos, servidores OPC, sintonización de los controladores PID y controladores en Espacio de Estados e implementación de los mismos en las plataformas de LabVIEW y Simulink de Matlab.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un manual de prácticas orientado al aprendizaje de la identificación y control de procesos dentro del laboratorio LACTI de la Universidad Politécnica Salesiana.

OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Identificar la planta para obtener el modelo matemático.
- Realizar la configuración de un protocolo de comunicación para la interacción entre el computador y la planta.
- Diseñar e implementar el controlador en los PLC Siemens, Schneider Electric y en las computadoras para la interacción con la planta junto con la interfaz gráfica.
- Elaborar el manual de prácticas enfocado a la materia de Teoría de Control I y Teoría de Control III ofertada en la Carrera de Ingeniería Electrónica.

CAPÍTULO 1: TECNOLOGÍA DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL TOTALMENTE INTEGRADO (LACTI)

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE CONTROL DE PROCESOS “A”

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, cuenta con el Laboratorio de Automatización y Control Totalmente Integrado (LACTI), donde se dispone de la planta de control de procesos A que es un sistema industrial integrado por autómatas programables Siemens (S7-300) y Schneider Electric. Esta planta cuenta con un sistema de válvulas proporcionales, dos tanques de acero inoxidable, uno a presión atmosférica y otro a presión controlada, instrumentos de medición de caudal, presión, temperatura y de nivel. Entre los protocolos de comunicación que existen dentro de la planta tenemos comunicación Profibus DP/PA, HART, Modbus, inalámbricas industriales IWLAM y comunicación Fieldbus Foundation (véase Figura 1.1). Esta planta, como todo sistema industrial cuenta con un tablero de Control (véase Figura 1.2). Entre las principales aplicaciones prácticas es posible realizar lazos de control a través del computador usando un sistema convencional de adquisición de datos, no obstante, también es posible desarrollar prácticas para configurar instrumentos, configuración y puesta en marcha de redes industriales y sistemas SCADA.



Figura 1.1 *Tuberías, sensores y contenedores de la planta de control y procesos A del laboratorio LACTI*



Figura 1.2 Tablero de control de la planta de control y procesos A

Para el desarrollo del proceso se toma en cuenta la línea de comunicación Profibus que se encuentra en la tubería de la parte inferior de la planta donde se encuentra el Posicionador Electroneumático SIPART PS2, la válvula Jordán y el medidor de Coriolis Promass 83E.

En la figura 1.3 se observa el diagrama P&ID en donde se pueden observar los elementos actuadores y sensores que conforman el proceso. Los elementos que intervienen en el proceso son:

- E-1 (Tanque de Reserva)
- P-101 (Bomba de Agua)
- VF-101 (Variador de Frecuencia)
- FIT-101 (Transmisor e Indicador de Flujo)
- FC-101 (Válvula de control Jordán)
- FIC-101 (Posicionador electroneumático SIPART PS2)

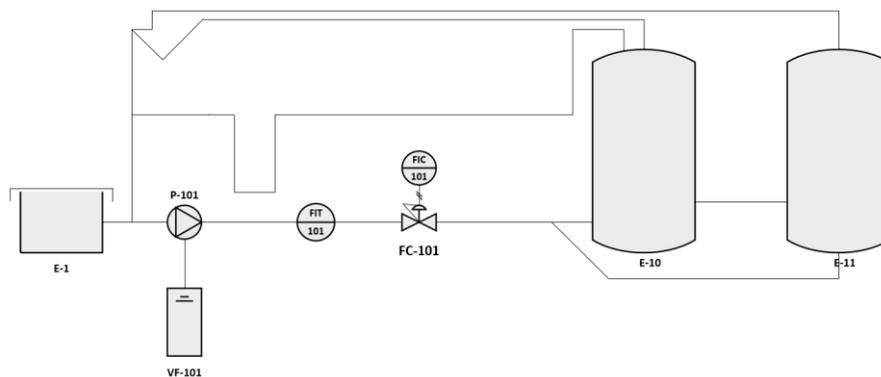


Figura 1.3 Diagrama P&ID de los elementos que intervienen en el proceso.

Al estar los elementos conectados a una red Profibus se realiza el levantamiento de la misma donde en la red Profibus DP se encuentran conectados el PLC S7-300 que actúa como maestro, los elementos Promass 83E, el variador de frecuencia y el sistema de periferia centralizada ET 200M. El posicionador SIPART PS2 tiene una interfaz Profibus PA por lo cual se añade el módulo DP/PA para el acoplamiento de bus entre Profibus DP y Profibus PA (véase Figura 1.4).

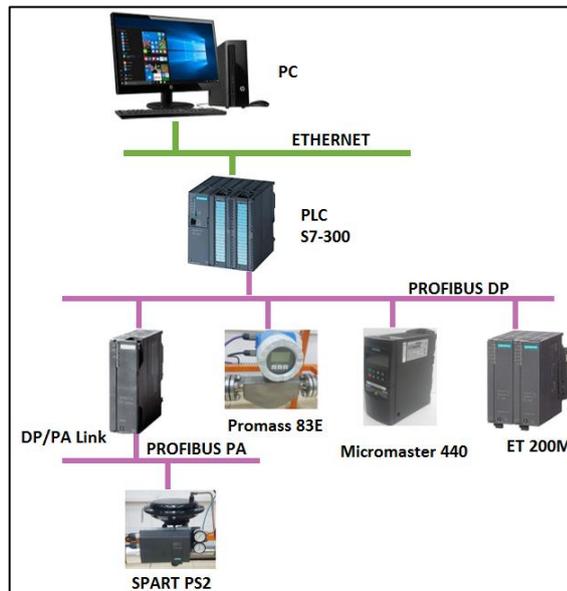


Figura 1.4 Configuración Red Profibus.

A continuación, se describen los componentes de la planta A que se utilizaron en el proceso de control:

- Posicionador Electroneumático SIPART PS2

Los posicionadores electroneumáticos SIPART PS2 (véase Figura 1.5) son utilizados para la regulación de posición de las válvulas por medio de los actuadores lineales y de giro. El posicionador SIPART PS2 de Siemens tiene la ventaja de ser versátil ya que es capaz de garantizar seguridad y ausencia de incidentes en los procesos industriales. El posicionador SIPART PS2 es de uso universal ya que puede utilizarse en todo tipo de válvulas con la máxima precisión, además cuenta con la facilidad de montaje y rápida puesta en marcha. La planta A del laboratorio LACTI cuenta con tres posicionadores SIPART PS2 para las válvulas Jordán modelo 70SP [4].



Figura 1.5 Posicionador electroneumático SIPART PS2 [4].

- **Válvula de control Jordán 70SP**

La serie de válvulas de control de diafragma de la marca 70 son accionadas neumáticamente, además combinan diversos actuadores de resorte con la precisión de la compuerta deslizante de la válvula Jordán para un control más cercano y de mayor precisión. La válvula de control Jordán 70SP (véase Figura 1.6) se combina con controladores de presión, temperatura, nivel, o flujo. El laboratorio LACTI cuenta con tres válvulas Jordán combinadas con los posicionadores SIPART PS2 [5].



Figura 1.6 Válvula de control Jordán 70SP [5].

- **Medidor Coriolis Proline Promass 83E**

El Promass 83E (véase Figura 1.7) que se encuentra en la planta A del laboratorio LACTI está conectado a una línea de Profibus. Este medidor se lo utiliza para medir el flujo másico de líquidos dentro de esta planta. El Promass 83E no se ve afectado por las propiedades físicas del fluido como su viscosidad o su densidad, permite la medición de líquidos, aceites, combustibles, lubricantes, gases licuados, disolventes. Este equipo permite realizar mediciones de distintas variables de proceso como densidad, masa y temperatura para diferentes condiciones de proceso. La medición de caudal másico se obtiene a través de la diferencia de fase entre dos sensores montados en el tubo de medición para registrar un desplazamiento de la fase de oscilación, la densidad de fluido es proporcional a la frecuencia de resonancia del tubo de medición y la temperatura del fluido con sensores de temperatura [6].



Figura 1.7 *Medidor Coriolis Proline Promass 83E [7].*

- **Variador de Frecuencia Micromaster 440**

El variador de Frecuencia Micromaster 440 controla la velocidad de operación de la bomba de agua en la planta de control de procesos A del laboratorio LACTI. La planta A cuenta con tres variadores de frecuencia Micromaster 440 con diferente tecnología de comunicación donde el primero funciona mediante HART, el segundo mediante Foundation Fieldbus y el tercero a través de Profibus (véase Figura 1.8). En las prácticas posteriores se utilizará únicamente el variador de frecuencia con tecnología de comunicación Profibus. El variador de frecuencia regula la velocidad de la bomba del tanque de reservorio que se encuentra en la planta baja del edificio del Cornelio Merchán, para que el agua circule a través de las tuberías y pueda ser controlada mediante los procesos de control [8].



Figura 1.8 *Variadores de Frecuencia dentro de la planta de control de procesos A [8].*

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE CONTROL DE PROCESOS “B”

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, dentro del Laboratorio de Automatización y Control Totalmente Integrado (LACTI), se dispone de la planta de control de procesos B que es un sistema industrial integrado por autómatas programables Siemens (S7-1200) y Schneider Electric. Esta planta cuenta con un posicionador electroneumático, una válvula Y de 2/2 vías, un tanque de acero inoxidable a presión atmosférica, instrumentos de medición de caudal y de nivel (véase Figura 1.9). Esta planta permite realizar lazos de control utilizando ya sea un controlador lógico programable o a través de un computador usando un sistema convencional de adquisición de datos.



Figura 1.9 Planta B del laboratorio LACTI de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.

Para el desarrollo del proceso se toma en cuenta el transmisor digital de flujo Burkert SE35/8035, la válvula Y de 2/2 vías y el sensor Liquicap M.

En la figura 1.10 se observa el diagrama P&ID en donde se puede observar los elementos actuadores y sensores que conforman el proceso.

Los elementos que intervienen en el proceso son:

- E-1 (Tanque de Reserva)
- P-101 (Bomba de Agua)
- VF-101 (Variador de Frecuencia)
- FIT-101 (Transmisor e Indicador de Flujo)
- FC-201 (Válvula Y 2/2 Vías Burkert)
- FIC-201 (Posicionador electroneumático Digital Burkert 8792)
- LIT-90 (Transmisor e indicador de nivel)

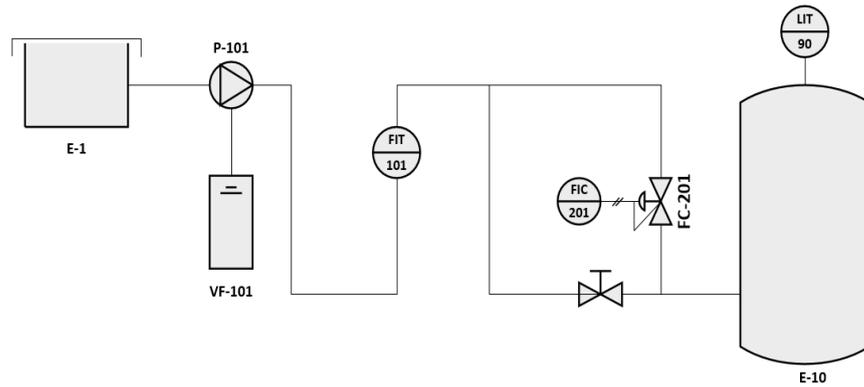


Figura 1.10 Diagrama P&ID de los elementos que intervienen en el proceso.

A continuación, se describen los componentes de la planta B que se utilizaron en el proceso de control:

- Posicionador Electroneumático Burkert 8792

El posicionador electroneumático 8792 (véase Figura 1.11) es un controlador de posición digital para válvulas continuas accionadas neumáticamente. Este dispositivo está diseñado para montaje con actuadores lineales y rotativos. La versión remota con el sensor de posición se puede combinar con las válvulas de control de proceso Burkert y puede operarse con señales habituales de corriente y voltaje. El grado de apertura o cierre de válvula se indica mediante un elemento indicador mecánico. Para su configuración, este dispositivo contiene un teclado de cuatro teclas con indicación de función controlada por software, además posee un enorme rango de capacidad de aire con suministro de presión de 7 bar [9].



Figura 1.11 Posicionador Electroneumático Burkert 8792 [10].

- **Válvula de Control de asiento inclinado 2/2 vías**

La válvula de control de asiento inclinado (véase Figura 1.14) consta de un actuador de pistón operando neumáticamente, un cono de control y un cuerpo de asiento inclinado de 2/2 vías. Utiliza gases neutros o aire como medios de control para controlar el flujo de agua, aceite, fluido hidráulico, vapor, entre otros. La entrada de flujo está siempre debajo del asiento. Para el caso del proceso en cuestión, esta válvula opera en conjunto con el posicionador electroneumático Burkert 8792 para permitir la regulación de flujo en el sistema [11].



Figura 1.14 *Válvula de control de asiento inclinado de 2/2 vías* [12].

- **Caudalímetro Burkert SE35/8035**

Este caudalímetro Burkert SE35/8035 (véase Figura 1.15) permite la medición de flujo a través de la línea del proceso. Es un dispositivo basado en paletas cuya velocidad de rotación es aprovechada para la medición de flujo. La carcasa electrónica (SE35) del 8035 constituye la placa electrónica con la pantalla, las teclas de configuración de parámetros y también un transductor (Hall). Las señales de salida se suministran a través de dos prensaestopas. Cuando el líquido fluye por el tubo, la rueda de paletas posicionada en rotación con los cuatro imanes incluidos provoca una señal en el transductor. La tensión inducida modulada en frecuencia es proporcional a la velocidad del flujo, un coeficiente de factor K específico para cada tipo de tubería permite la conversión de frecuencia a volumen por lo tanto el componente electrónico convierte la señal medida y muestra el valor real en volumen o en masa [13].



Figura 1.15 Caudalímetro Burkert SE35/8035 [14].

- Variador de Frecuencia Danfoss VT-2800

La planta B cuenta con un variador de frecuencia Danfoss VT-2800 (véase Figura 1.16) el cual varia la velocidad de la bomba del tanque de reservorio que se encuentra en la planta baja del edificio Cornelio Merchán, para que el agua circule a través de las tuberías y pueda ser controlada mediante los procesos de control. El variador de frecuencia Danfoss puede trabajar de forma manual o automática, dentro de la planta su uso común es manual ya que es aplicable cuando utilizamos el panel de control y el PLC Siemens, en el caso del PLC Schneider Electric tiene la posibilidad de actuar automáticamente [15].



Figura 1.16 Variador de Frecuencia Danfoss VT-2800 [16].

- **Detección de nivel capacitiva Liquicap**

Liquicap M (véase Figura 1.17) es una sonda de varilla para detección de nivel en aplicaciones de líquidos muy viscosos que tienden a formar adherencias. Al tener compensación activa de la acumulación de suciedad existe una máxima fiabilidad además sus materiales están hechos de materiales resistentes a la corrosión. La medición se consigue mediante una sonda dentro del tanque y las paredes del mismo formando un condensador, cuando se cubre la sonda se produce un cambio en la capacitancia y se detecta el nivel [17].



Figura 1.17 *Detección de Nivel Capacitiva [17].*

1.3 CONTROLADORES PROGRAMABLES

Para realizar cualquier tipo de proceso se requiere de controladores programables entre los cuales el laboratorio LACTI cuenta con el sistema CompactRIO, los PLCs Siemens S7-300 y S7-1200 y los PLC Schneider Electric los cuales se describen a continuación.

- **Sistema CompactRIO NI 9012**

La Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca cuenta con un Sistema CompactRIO (véase Figura 1.18), este sistema se basa en un controlador con un procesador y un chasis basado en FPGA programable, es ocupado con módulos de E/S de National Instruments, además se pueden conectar E/S adicionales a través de ethernet. Los módulos que ocupan el CompactRIO permiten conexión directa con sensores y funciones especializadas. Este sistema es ideal para mediciones distribuidas en entornos industriales o severos y útil para aplicaciones de control [18].



Figura 1.18 NI CompactRIO 9012 [19]

- **Módulo NI 9219**

Dentro del chasis del sistema CompactRIO encontramos el módulo NI 9219 (véase Figura 1.19) de National Instruments con 4 entradas analógicas que permite mediciones simultaneas a 100 Samples/s (muestras por segundo) diseñado para pruebas multipropósito en cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO. Con el NI 9219 se puede realizar mediciones de señales de sensores como medidores de tensión, RTD, termopares, celdas de carga y otros sensores con alimentación. Cada canal funciona de manera individual, por lo que permite obtener mediciones en cada uno de los 4 canales. Los rangos de medición difieren del tipo de medición, para voltaje entre los $\pm 60V$ y para corriente entre $\pm 25mA$ [20]. Este módulo tiene la capacidad de desactivar el circuito en caso de una falla de sobre corriente y sobre tensión, después de eliminar las fallas el dispositivo recupera los canales automáticamente [21].



Figura 1.19 Módulo NI 9219 [20].

- **Módulo NI 9263**

Dentro del chasis del sistema CompactRIO también encontramos el módulo NI 9263 (véase Figura 1.20) de National Instruments con 4 salidas analógicas (AO) a 10 V a 100 kS/s/ch simultáneamente. Es un módulo de salida para cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO además cuenta con protección contra sobretensiones de $\pm 30V$, protección contra cortocircuitos, baja interferencia, rápida velocidad de respuesta y alta precisión. Cada canal cuenta con un convertidor digital a analógico (DAC) que produce una señal de voltaje [22].



Figura 1.20 Módulo NI 9263 [22].

- **Controlador Lógico Programable S7-300 de Siemens**

En la planta A del laboratorio LACTI se dispone del PLC S7-300 (véase Figura 1.21) el cual nos permite controlar los elementos que componen la planta. El PLC S7-300 tiene una configuración modular donde se requiere de la fuente de alimentación que proporciona un voltaje de alimentación interno, una CPU, módulos de señales que incluyen E/S digitales para válvulas actuadores y sensores, un procesador de comunicaciones que hace posible la comunicación PROFIBUS, Ethernet, As-i y conexión punto a punto, es un PLC de gama media por lo cual puede trabajar como maestro de red ya que tiene características superiores a los PLCs de gama baja como el S7-200 [23].



Figura 1.21 PLC S7-300 de Siemens [24].

- Controlador Lógico Programable S7-1200 de Siemens

En la planta B del laboratorio LACTI encontramos el PLC S7-1200 (véase Figura 1.22), el cual nos permite controlar varios dispositivos para cumplir distintas necesidades de automatización. La CPU del PLC S7-1200 está integrado por 14 entradas y 10 salidas digitales, 2 entradas analógicas, un puerto de comunicación ethernet además proporciona conexiones HMI y permite la ampliación de módulos de señales. Dentro de este módulo también encontramos instrucciones tecnológicas donde se encuentra el objeto PID_Compact que ofrece un regulador PID con optimización integrada [25].



Figura 1.22 PLC S7-1200 de Siemens [25].

- Controlador Lógico Programable Schneider Electric

En la planta B del laboratorio LACTI se encuentra disponible el PLC Schneider Electric TWDLCAE40DRF (véase Figura 1.23) que es un modelo de tipo compacto el cual posee 40 puertos de entradas y salidas, con 2 puertos seriales RS-485, ethernet y comunicaciones Modbus, soporta un voltaje de 100/240 VAC, tiene implementado una función PID de forma embebida dentro del mismo. Además, permite expandir un total de 7 módulos I/O [26]. Adicionalmente posee 2 unidades analógicas TM2AMMH6T.

Cada módulo analógico posee 4 entradas analógicas y 2 salidas analógicas, estas permiten una corriente de 4 a 20mA y un voltaje de 0 a 10V [27].



Figura 1.23 PLC Schneider Electric TWDLCAE40DRF.

1.4 SERVIDORES OPC DISPONIBLES.

Los servidores OPC nos permiten interactuar con la planta a través del HMI que puede estar en un computador personal o en algún otro tipo de sistema de visualización. Para el laboratorio LACTI tenemos disponible NI OPC Servers de National Instruments y KEPServer. A continuación, se describe cada uno de estos componentes.

- NI OPC Servers

Los servidores NI OPC tienen incorporado controladores para la conexión con el PLC desde un único servidor OPC. OPC Servers permite la operación entre los dispositivos de control y adquisición de datos como son los controladores lógicos programables (PLC) y controladores de automatización programables (PAC) [28].

Para la interacción del OPC con la planta se requiere del módulo DSC (Datalogging and Supervisory Control) que es un complemento de LabVIEW y sirve para la operación del OPC. Este servidor es propio de National Instruments por lo cual su operación se ejecuta desde LabVIEW [28].

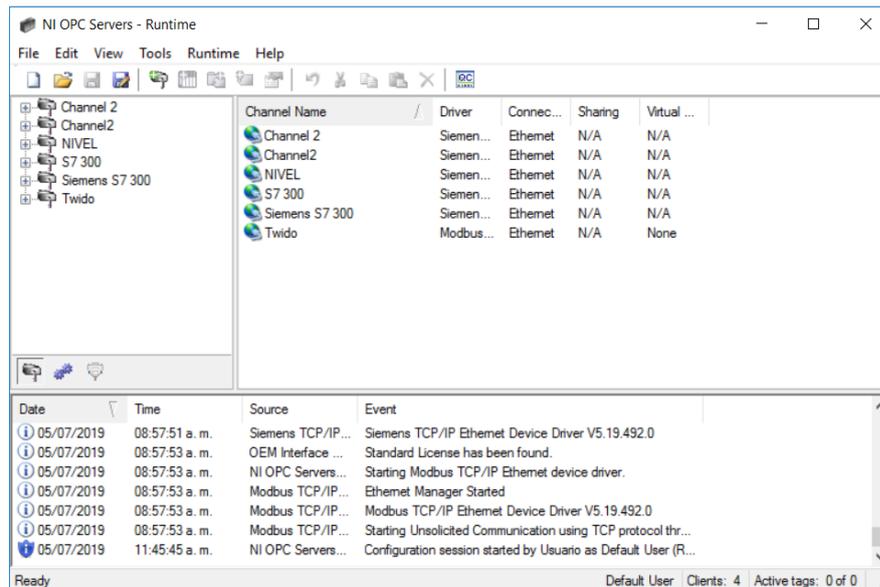


Figura 1.24 Ventana de configuración del NI OPC Servers

NI OPC Servers se puede conectar con una variedad de marcas de PLC como:

- Allan Bradley
- Mitsubishi Ethernet
- Modbus RTU serial
- Modbus TCP/IP Ethernet
- Siemens TCP/IP.
- Toshiba Ethernet.

- **KEPServerEX**

KEPServerEX es una de las plataformas de conexión líderes dentro de la industria ya que permite conectividad, administración, control y monitoreo de los dispositivos mediante un interfaz usuario máquina (véase Figura 1.25). KEPServerEX permite la interacción con el PLC de la Planta mediante el software Simulink de Matlab donde se encuentra la librería OPC Toolbox que accede a leer y escribir datos del OPC a los elementos de la Planta [29].

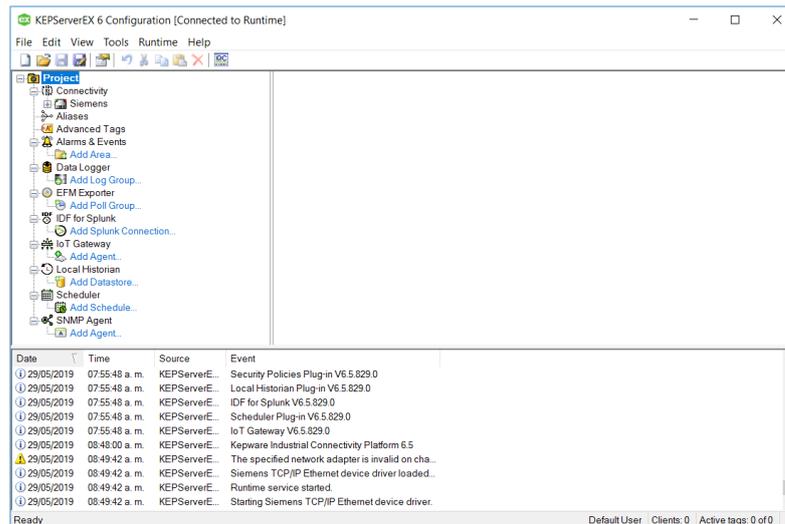


Figura 1.25 Ventana de configuración del KEPServerEX 6.

KEPServerEX se puede conectar con una variedad de marcas de PLC como:

- Allan Bradley
- Mitsubishi Ethernet
- Modbus RTU serial
- Modbus TCP/IP Ethernet
- Siemens TCP/IP.
- Toshiba Ethernet.

CAPÍTULO 2: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE IDENTIFICACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS.

2.1 IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

Para el diseño de un controlador es necesario conocer las características del modelo empleado para representar un sistema ya que no se podrían manipular las variables sin conocer su comportamiento. Por ello es necesario realizar la identificación antes del control [30].

Se puede definir como identificación de sistemas a la determinación del modelo de un proceso a partir del conocimiento previo y una serie de medidas experimentales [30].

Para obtener el modelo de un proceso se realizan experimentos que faciliten las medidas de las entradas y salidas que describen el comportamiento del sistema. Para facilitar el diseño del controlador es recomendable que exista un equilibrio entre la representación de la planta real y la simplicidad del modelo, mientras mayor sea el número de datos de entrada y de salida, mejor será la estimación del modelo, sin embargo, el tiempo de computo será mayor lo que resultan posibles cambios del comportamiento de la planta con el tiempo [30].

Es primordial elegir el periodo de muestreo ya que intervalos muy grandes o muy pequeños debido al ruido pueden cambiar el comportamiento real del proceso.

Para lograr describir el sistema se emplea la función de transferencia que proporciona una relación directa entre las señales de entrada y salida ya que lo que ocurre en el sistema no se modela explícitamente por lo que procesos diferentes pueden tener la misma representación [30].

Para tomar las medidas del proceso, se realiza durante el funcionamiento normal del sistema, para realizar la estimación, el proceso de identificación y determinar la función de transferencia [30].

El software de Matlab nos permite obtener la función de transferencia mediante el comando `tfest`, lo que resulta una herramienta útil al tener un gran número de datos de entrada y de salida.

- **tfest Matlab**

El comando tfest nos permite estimar la función de transferencia utilizando los datos del dominio de tiempo o frecuencia [31]. Para la estimación en el dominio del tiempo, los DATOS deben estar en un objeto IDDATA que contengan valores de señal de entrada y salida. Para la estimación del dominio de la frecuencia, los DATOS pueden ser un objeto FRD o IDFRD que especifique la respuesta de frecuencia registrada [31].

tfest requiere datos que contengan al menos una entrada y al menos un canal de salida. Los modelos de series de tiempo que no contienen entradas medidas no pueden estimarse [31]. Los datos se pueden obtener a partir de una señal de excitación que estimule el proceso. Para una efectiva identificación es necesario grabar los datos tanto de la señal de excitación como de la señal de respuesta con un período de muestreo adecuado.

Tabla 2.1 Descripción del comando tfest

| Descripción del comando tfest | |
|-------------------------------|---|
| Comando | Descripción |
| sys=tfest(data,np) | Estima una función de transferencia de tiempo continuo (sys) utilizando datos de dominio de tiempo o frecuencia (data) y contiene np polos. El número de ceros en el sys es max(np-1,0) [31]. |
| sys=tfest(data,np,nz) | Estima una función de transferencia que contiene nz ceros [31]. |
| sys=tfest(data,np,nz,iodelay) | Estima una función de transferencia con retardo de transporte para pares de entrada/salida iodelay [31]. |

La descripción de los parámetros que se deben ingresar para utilizar el comando tfest en Matlab se puede apreciar en la tabla 2.1.

2.2 CONTROL PID

Un controlador ampliamente utilizado en el control de procesos industriales es el controlador PID [32]. En la ecuación 1 se puede apreciar la función de transferencia de este controlador.

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

La ecuación para la salida en el dominio del tiempo continuo esta descrita por la ecuación 2. Contiene tres términos que son proporcional (P), integrador (I) y derivador (D) [32].

$$G_C(s) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

El controlador proporcional (K_P), tendrá el efecto de reducir el tiempo de respuesta, pero nunca eliminará, el error del régimen permanente. El control Integral (K_I) tendrá la función de eliminar el error del régimen permanente, pero esto podría ocasionar una peor respuesta del transitorio. El control diferencial (K_D) tendrá en efecto de incrementar la estabilidad del sistema, reduciendo el máximo sobrepaso, mejorando la respuesta del transitorio [32].

En la figura 2.1 se puede apreciar un sistema en lazo cerrado con un controlador PID en diagrama de bloques.

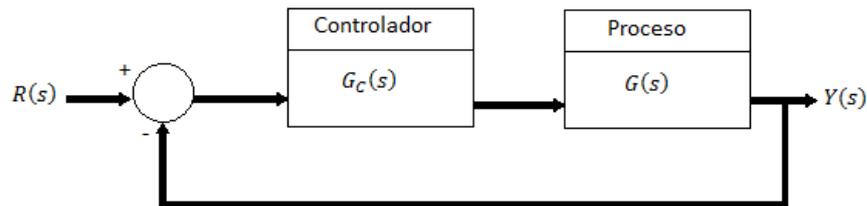


Figura 2.1 Sistema en lazo cerrado de un controlador [32].

2.3 TÉCNICAS DE SÍNTONIA

Entre las técnicas de sintonía utilizadas tenemos el objeto tecnológico PID_Compact del PLC S7-1200 y la aplicación PID Tuner de Matlab que se describen a continuación.

- **Objeto tecnológico PID_Compact.**

El PLC S7-1200 dispone de bloques para control PID en su programación. El bloque a tratar a continuación es el PID_Compact (véase Figura 2.2) que permite una programación simple además de su puesta en marcha a través del cálculo y ajuste automático durante el tiempo de ejecución. La auto-sintonización del proceso de control se realiza mediante la optimización inicial y fina además de elegir entre el modo manual y automático para registrar los valores del PID [33].

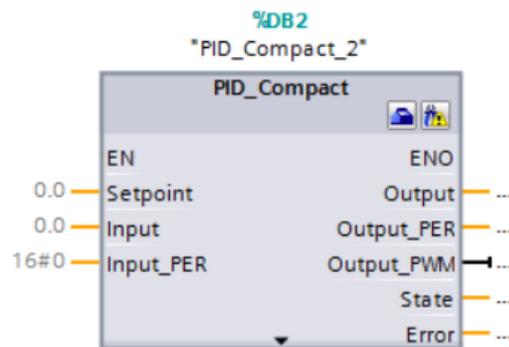


Figura 2.2 Objeto Tecnológico PID_Compact

Tabla 2.2 Descripción de los parámetros del bloque PID_Compact

| Parámetro | Tipo de Dato | Valor Predeterminado | Descripción |
|------------|--------------|----------------------|---|
| Setpoint | REAL | 0.0 | Setpoint del controlador PID. |
| Input | REAL | 0.0 | Entrada para la variable de proceso a controlar. |
| Input_PER | INT | 0 | Entrada analógica de la variable de proceso a controlar. |
| Output | REAL | 0.0 | Salida en formato REAL |
| Output_PER | INT | 0 | Salida analógica |
| Output_PWM | BOOL | FALSE | Salida de señal modulada por ancho de pulso (PWM). |
| State | INT | 0 | El parámetro State indica el modo de operación actual del controlador PID. |
| Error | BOOL | | Si el valor de error es "TRUE", al menos existe un mensaje de error en el ciclo de scan actual. |

La descripción de los parámetros que comprende el bloque PID_Compact se puede apreciar en la tabla 2.2 [34].

Para realizar la configuración del bloque, se selecciona sobre la esquina superior derecha del bloque para abrir la ventana de configuración (véase Figura 2.3). Esta ventana nos permite realizar una configuración básica donde se establece el tipo de variable a trabajar y los parámetros de entrada y salida que utilizaremos para el proceso de control [34].

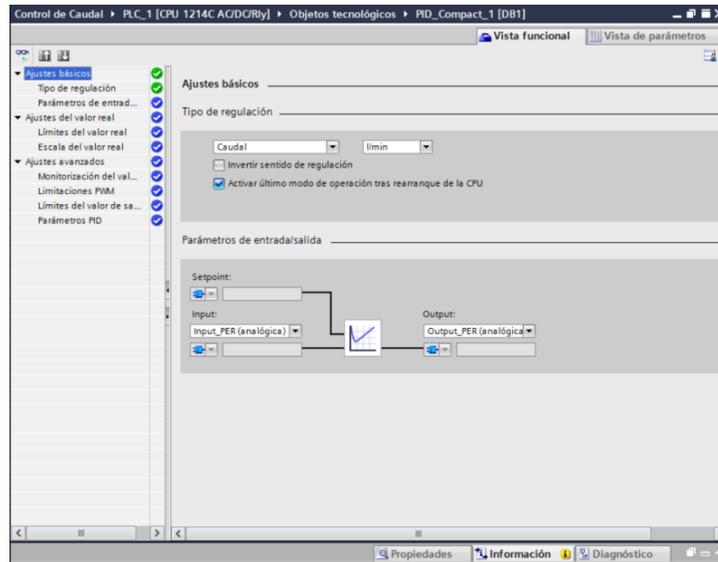


Figura 2.3 Ventana de Configuración

El bloque PID_Compact dispone del modo de optimización Inicial que realiza una sintonización mediante la respuesta del sistema ante un escalón, mientras la optimización Fina se basa en el método de oscilaciones de Ziegler-Nichols donde el sistema se comporta en estado oscilatorio y en base al estado oscilatorio y la ganancia proporcional se calculan los parámetros del controlador [34].

Para realizar la sintonización, se selecciona sobre la esquina superior derecha del bloque para abrir la ventana puesta en servicio (véase Figura 2.4). Hay que tener en cuenta que mientras el sistema sea más estable y se encuentre sin perturbaciones, más rápido se sintonizara, caso contrario se puede demorar o detener el proceso de sintonización [34].

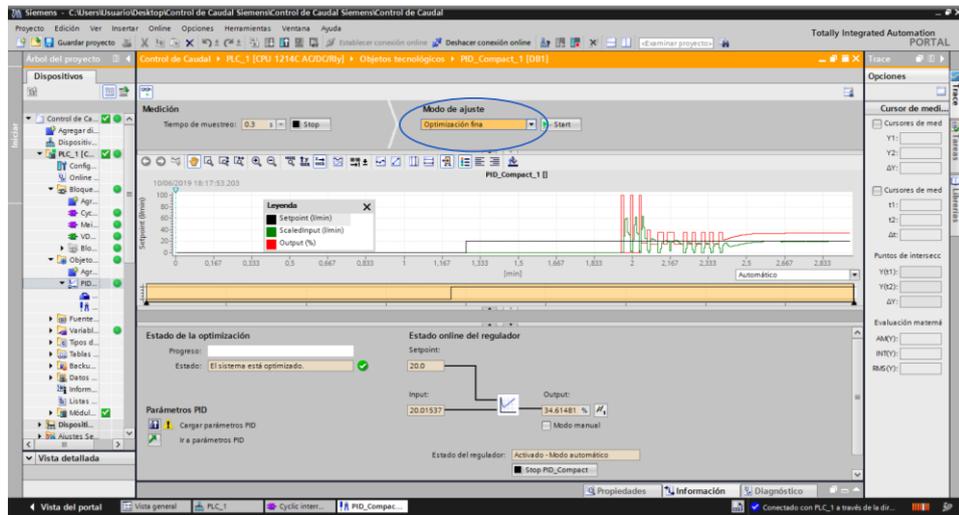


Figura 2.4 Ventana de Puesta en Servicio

- PID Tuner

La aplicación PID Tuner de Matlab (véase Figura 2.5) permite ajustar automáticamente las ganancias del controlador PID para una planta. Esta aplicación logra el equilibrio entre robustez y rendimiento además de elegir el tipo de controlador como PI, PD y PID [34]. Además permite obtener las constantes K_P , K_I y K_D del controlador PID, en donde se puede visualizar el Settling time (tiempo de asentamiento) y el overshoot (máxima sobre elongación). Además, se puede variar la velocidad del tiempo de respuesta (Response Time) y la robustez del tiempo transitorio (Transient behavior).

Para realizar la sintonización con la aplicación PID Tuner se puede utilizar función de transferencia de la planta, además se puede estimar la planta a partir de datos medidos y poder diseñar el controlador [34].

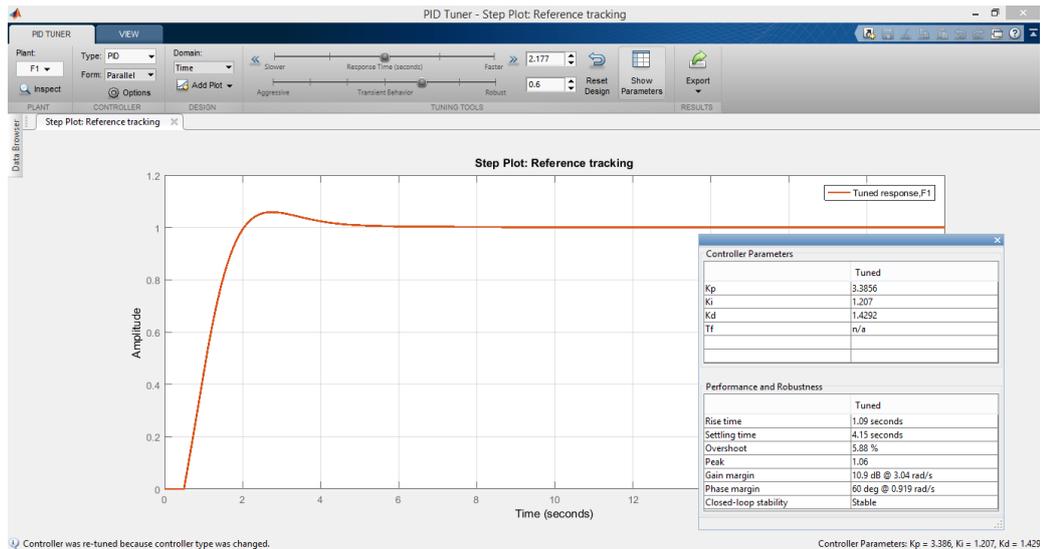


Figura 2.5 Aplicación PID Tuner de Matlab

2.4 CONTROL EN ESPACIO DE ESTADOS EN TIEMPO CONTINUO

El control en espacio de estados puede reducir la complejidad de las expresiones matemáticas y además se puede recurrir a las computadoras para que realicen gran parte de los cálculos. Además, en ocasiones hay que utilizar métodos de aproximación cuando la función de transferencia contiene un retardo. El diseño de asignación de polos es necesario para que el sistema responda según las condiciones requeridas. Representamos las matrices en la forma canónica observable. Diseñamos un servosistema de estado tipo 1 con observador de estado.

2.4.1 APROXIMACIÓN DE FUNCIONES CON RETARDO

Un método de aproximación es la de padé, en Matlab permite aproximar funciones mediante el comando *padé*, se puede aproximar a un orden 1, orden 2, o más. A continuación se presenta la ecuación 3 de aproximación de padé de orden 1, en donde T_d es el tiempo de retardo que tiene la función [2].

$$e^{-T_d s} = \frac{1 - T_d \left(\frac{s}{2}\right)}{1 + T_d \left(\frac{s}{2}\right)} \quad (3)$$

2.4.2 DISEÑO MEDIANTE LA ASIGNACIÓN DE POLOS

La técnica de diseño empieza con la determinación de polos en lazo cerrado en donde interviene la sobreelongación máxima, el factor de amortiguamiento, el tiempo de asentamiento, tiempo de retardo, tiempo de subida y el tiempo pico (véase Figura 2.6). Además, el sistema debe ser completamente controlable. Mediante la ecuación 4 de la forma estándar de un sistema de segundo orden se puede determinar la respuesta del sistema [2].

$$y(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

Donde:

ζ = factor de amortiguamiento relativo del sistema

ω_n = frecuencia natural no amortiguada

Si $0 < \zeta < 1$, el sistema se denomina sub amortiguado y la respuesta transitoria es oscilatoria. Si $\zeta = 0$, la respuesta transitoria no se amortigua. Si $\zeta = 1$, el sistema es críticamente amortiguado y si $\zeta > 1$, el sistema es sobre amortiguado [32].

- **Sobreelongación máxima (M_p)** : La sobreelongación es el máximo valor pico de la curva de respuesta (Véase figura 2.6). Mediante la ecuación 5 podemos obtener la máxima sobreelongación, en donde se requiere el factor de amortiguamiento(ζ) para el cálculo [2].

$$M_p = e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\pi} \quad (5)$$

- **Tiempo de asentamiento (t_s)** : Es el tiempo que requiere para que alcance un rango del valor final según el criterio del 2% o del 5% (véase Figura 2.6). Con la ecuación 6 podemos obtener el tiempo de asentamiento según el criterio del 2% [32].

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (6)$$

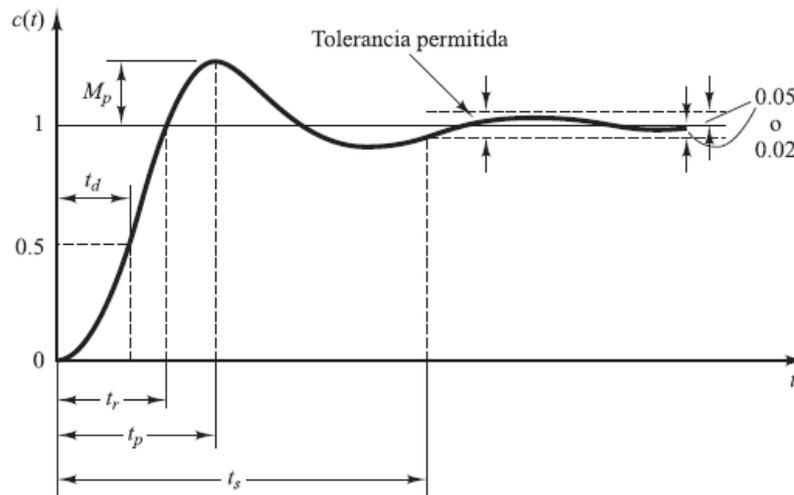


Figura 2.6 Curva de respuesta de un escalón unitario [2].

2.4.3 REPRESENTACIÓN EN EL ESPACIO DE ESTADOS DE SISTEMAS DEFINIDOS POR SU FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Existen diversas técnicas para obtener representaciones en espacio de estados de sistemas definidos por su función de transferencia. A continuación, se representa en la forma canónica observable. Para representar la función de transferencia en espacio de estados debe escribirse como la ecuación 7, donde “Y(s)” es la salida y “U(s)” es la entrada [2].

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_n s + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + a_{n-1}s + a_n} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \beta_0 &= b_0 \\ \beta_1 &= b_1 - a_1\beta_0 \\ \beta_2 &= b_2 - a_1\beta_1 - a_2\beta_0 \\ \beta_3 &= b_3 - a_1\beta_2 - a_2\beta_1 - a_3\beta_0 \\ \beta_{n-1} &= b_{n-1} - a_1\beta_{n-2} - \dots - a_{n-2}\beta_1 - a_{n-1}\beta_0 \end{aligned}$$

Las ecuaciones de estado se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \beta_1 u \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \beta_2 u \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n + \beta_{n-1} u \\ \dot{x}_n &= -a_n x_1 - a_{n-1} x_2 - \dots - a_1 x_n + \beta_n u \end{aligned}$$

En términos de ecuaciones matriciales la ecuación 8 y 9 representa la ecuación de estado y ecuación de salida respectivamente.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{bmatrix} u$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (9)$$

$$y = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \beta_0 u$$

A continuación, se puede observar las matrices A, B, C y D en espacio de estados.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{n-1} \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad C = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad D = \beta_0$$

2.4.4 CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD

Para realizar un esquema de control con observador en espacio de estados es necesario que la planta sea controlable y observable.

- Controlabilidad

Para realizar el control en espacio de estados es necesario que el sistema sea controlable. La matriz de controlabilidad nos permite verificar si el sistema es totalmente controlable. A continuación, tenemos la ecuación 10 de controlabilidad [32].

$$[B \mid AB \mid \dots \mid A^{n-1}B] \quad (10)$$

También se puede calcular si el sistema es controlable mediante el comando *ctrb* de Matlab como se muestra en la ecuación 11, donde se requieren de los parámetros de la Matriz A y B.

$$ctrb(A,B) \quad (11)$$

- Observabilidad

La matriz de observabilidad nos ayuda a verificar que la planta sea totalmente observable. A continuación, tenemos la ecuación 12 de observabilidad [32].

$$[C' \mid A'C' \mid \dots \mid (A')^{n-1}C'] \quad (12)$$

También se puede calcular si el sistema es observable mediante el comando *obsv* de Matlab como se muestra en la ecuación 13, donde se requieren de los parámetros de la Matriz A y C.

$$obsv(A,C) \quad (13)$$

2.4.5 DISEÑO DE UN SERVOSISTEMA CUANDO LA PLANTA NO CONTIENE INTEGRADOR

El principio básico para diseñar un servosistema de tipo 1 es insertar un integrador en el camino directo entre el comparador de error y la planta. Además, cuando no se pueden medir directamente todas las variables de estado se necesita usar un observador de estados. A continuación, en la figura 2.7 se muestra un diagrama de bloques de un servosistema tipo 1 con observador de estados. La ecuación 14 y 15 son las matrices del sistema, la ecuación 16 es la de control y la ecuación 17 es la del integrador [2].

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14)$$

$$y = Cx \quad (15)$$

$$u = -Kx + k_I \xi \quad (16)$$

$$\dot{\xi} = r - y \quad (17)$$

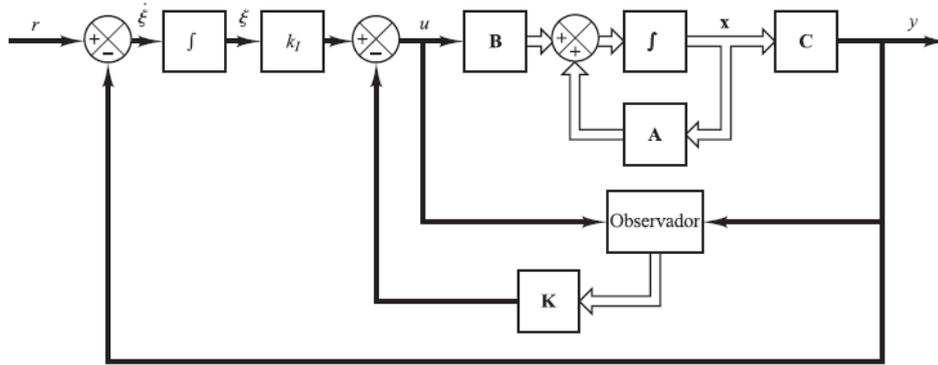


Figura 2.7 Servosistema tipo 1 con observador de estado [2].

Donde:

x = vector de estado de la planta

u = señal de control

$\dot{\xi}$ = salida del integrador

y = señal de salida

r = señal de entrada de referencia

u = señal de control

A = matriz de coeficientes constantes de $n \times n$

B = matriz de coeficientes constantes de $n \times 1$

C = matriz de coeficientes constantes de $1 \times n$

A continuación analizaremos el procedimiento para calcular la ganancia de realimentación K y la ganancia del integrador k_I . En donde para calcular \hat{K} utilizamos la matriz \hat{A} y la matriz \hat{B} mediante los métodos de sustitución directa, mediante la matriz de transformación, fórmula de Ackerman o directamente utilizando el comando *acker* de Matlab [2].

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{K} = [K \quad : \quad -k_I]$$

2.4.6 METODOS PARA DETERMINAR LA MATRIZ K

A continuación, se presentan varios métodos para determinar la matriz K de un servosistema tipo 1. En donde podemos escoger uno de los métodos para realizar los cálculos o utilizar directamente el comando *acker* de Matlab.

- **Determinación de la matriz K utilizando la formula de ackerman**

Para determinar la matriz K se utiliza la ecuación 18, en donde se utiliza la inversa de la matriz de controlabilidad y la ecuación característica que contiene los polos.

$$K = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] [B \ | \ AB \ | \ \dots \ | \ A^{n-1}B]^{-1} \phi(A) \quad (18)$$

Para determinar la ecuación característica se multiplica los polos impuestos para el diseño que es la ecuación 19 y luego se puede determinar la ecuación 20 con los parámetros de la matriz A y la matriz identidad (I).

$$(s - u_1)(s - u_2) \dots (s - u_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \quad (19)$$

$$\phi(A) = [A^n + \alpha_1 A^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} A + \alpha_n I] \quad (20)$$

- **Determinación de la matriz K utilizando la matriz de transformación T.**

Para determinar la matriz K en este método se utiliza la ecuación 21 en donde interviene la inversa de la matriz T que es la matriz de transformación [2].

$$K = [\alpha_1 - a_n \ : \ \alpha_{n-1} - a_{n-1} \ : \ \dots \ : \ \alpha_2 - a_2 \ : \ \alpha_1 - a_1] T^{-1} \quad (21)$$

Para determinar los valores de a_1, a_2, \dots, a_n se calcula con la ecuación 22 que es el polinomio característico de la matriz A (10).

$$|sI - A| = s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n \quad (22)$$

Mediante la ecuación 23 se puede determinar la matriz de transformación.

$$T = MW \quad (23)$$

Para determinar la matriz de transformación se utilizan la matriz M y la matriz W que se encuentran a continuación.

$$M = [B \ | \ AB \ | \ \dots \ | \ A^{n-1}B]$$

y

$$W = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- **Determinacion de la matriz K utilizando el método de sustitución directa**

Para obtener el resultado la matriz K se iguala la ecuación del polinomio característico con la ecuación característica. Este método se utiliza cuando el sistema es de orden inferior a 3 porque si el orden es mayor los cálculos se vuelven complejos. A continuación, se tiene la ecuación de la matriz K [2].

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$$

La ecuación Polinomio característico se muestra a continuación en donde es la matriz identidad menos la matriz A y más la matriz B multiplicado por la K que es el valor a encontrar.

$$|sI - A + BK|$$

Para obtener la matriz K utilice la ecuación 24, el polinomio característico deseado iguale con la ecuación característica de la siguiente manera:

$$|sI - A + B| = (s - u_1)(s - u_2)(s - u_3) \quad (24)$$

2.4.7 OBSERVADORES DE ESTADO

La estimación de variables de estado no medibles se denomina “observación”, estima las variables de estado basándose en las mediciones de variables de salida y de control. Puede diseñarse si y solo si satisface la condición de observabilidad. También existen algunos métodos para calcular el valor de matriz K_e , los cuales detallamos posteriormente.

Las entradas del observador son la entrada de control u y la salida y , la figura 2.8 muestra el diagrama de bloques del observador de estados de orden completo del sistema [2].

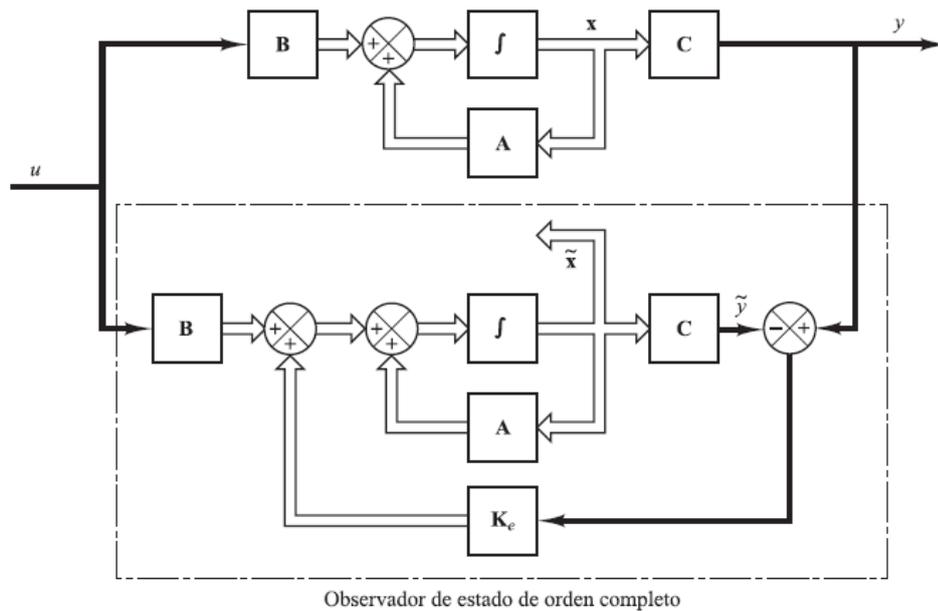


Figura 2.8 Diagrama de bloques del sistema y del observador de estados de orden completo [2].

En la ecuación 25 se presenta la ecuación del observador de estados [2].

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K_e(y - C\tilde{x}) \quad (25)$$

Donde,

\tilde{x} = Estado estimado

$C\tilde{x}$ = Salida estimada

K_e = Matriz de ganancia del observador

2.4.8 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA MATRIZ K_e

A continuación se presenta algunos de los métodos para calcular el valor de la matriz K_e , en donde se puede escoger uno de los métodos o utilizar directamente el comando *acker* de Matlab.

- **Método de transformación para obtener la matriz de ganancia del observador de estado**

El cálculo para obtener el valor de la matriz K_e es similar a los métodos para obtener la matriz K expuestos anteriormente. A continuación se presenta la ecuación 26, donde N' es la transpuesta de la matriz N [2].

$$K_e = (WN')^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_n - a_n \\ \alpha_{n-1} - a_{n-1} \\ \vdots \\ \alpha_1 - a_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Donde K_e es una matriz de dimensión $n \times 1$

$$N = [C' \mid A'C' \mid \dots \mid (A')^{n-1}C']$$

- **Formula de Ackerman para obtener la matriz de ganancias del observador de estado**

De la misma manera a continuación se presenta la ecuación 27 que es la fórmula de Ackerman para determinar la matriz K_e [32].

$$K_e = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-2} \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

- **Método de sustitución directa para obtener la matriz de ganancias del observador de estado**

Este método se lo utiliza cuando el sistema es de orden inferior a 3, en donde se utiliza el polinomio característico con la ecuación característica [2].

$$K_e = \begin{bmatrix} k_{e1} \\ k_{e2} \\ k_{e3} \end{bmatrix}$$

La ecuación 28 es el polinomio característico de la matriz A, en donde interviene la matriz identidad (I).

$$|sI - (A - K_e)| \quad (28)$$

Para obtener la matriz K_e , el polinomio característico deseado se iguala con la ecuación característica como se puede apreciar en la ecuación 29.

$$|sI - (A - K_e)| = (s - u_1)(s - u_2)(s - u_3) \quad (29)$$

2.5 CONTROL EN ESPACIO DE ESTADOS EN TIEMPO DISCRETO

Son conocidos como controladores digitales y en sistemas de control se lo utilizan por el costo reducido, la utilización de la mínima cantidad de energía y los cálculos se pueden realizar en el computador. En el controlador discreto utilizamos el diseño mediante la asignación de polos en tiempo discreto, también un sistema de seguimiento con realimentación de estado y control integral, además se le agrego un observador de estados [35].

2.5.1 DISEÑO MEDIANTE LA ASIGNACIÓN DE POLOS EN TIEMPO DISCRETO

Es necesario que para la asignación de polos los mismos también se encuentren en tiempo discreto y para convertir los polos en tiempo discreto se utilizan la ecuación 30 y 31, en donde ω_d es frecuencia natural amortiguada, T es el periodo de muestreo de los polos en tiempo discreto [2].

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (30)$$

$$z = e^{(-\zeta\omega_n T + j\omega_d T)} \quad (31)$$

2.5.2 SISTEMA DE SEGUIMIENTO

Un sistema de seguimiento contiene uno o más integradores a menos que la planta tenga una propiedad integradora. En la figura 2.9 se puede apreciar el diagrama de bloques de un sistema de seguimiento con realimentación integral. Para aplicar este controlador se supone que la planta es completamente controlable y completamente observable [35].

A continuación, tenemos la ecuación 32 que es el estado de la planta y la ecuación 33 es la de salida.

$$x(k + 1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (32)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (33)$$

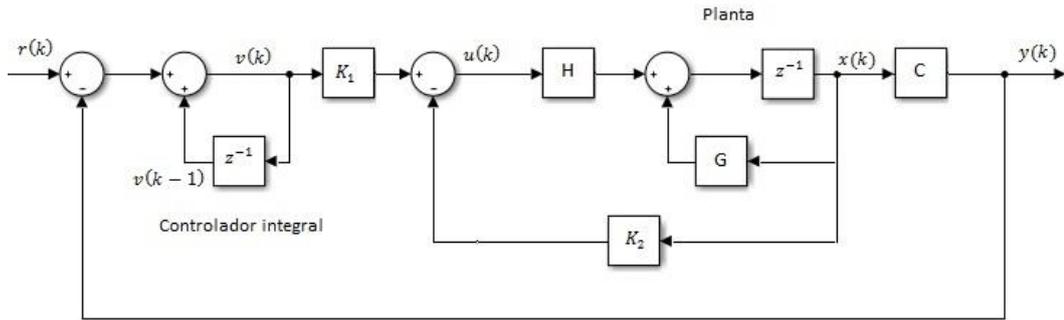


Figura 2.9 Sistema de seguimiento con realimentación del estado y control integral.

Donde,

$x(k)$ = vector de estado de la planta (de dimension n)

$u(k)$ = vector de control (de dimension r)

$y(k)$ = vector de salida (de dimension m)

G = matriz de $n \times n$

H = matriz de $n \times m$

C = matriz de $m \times n$

La ecuación de estado del integrador del sistema de seguimiento está dada por la ecuación 34.

$$v(k) = v(k - 1) + r(k) - y(k) \quad (34)$$

Donde,

$v(k)$ = vector de error de actuación (vector de dimension m)

$r(k)$ = vector de entrada de comando (vector de dimension m)

La ecuación del vector de control está dada por la ecuación 35, en la cual intervienen las matrices K_1 y K_2 .

$$u(k) = -K_2 x(k) + K_1 v(k) \quad (35)$$

A continuación analizaremos el procedimiento para determinar las matrices K_1 y K_2 , para determinar el valor de la matriz \hat{K} utilizamos la matriz \hat{G} que se encuentra en la ecuación 36 y la matriz \hat{H} que se presenta en la ecuación 37 y lo calculamos mediante el método de sustitución directa, la fórmula de Ackerman o directamente utilizar el comando *acker* de Matlab [35].

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} G & H \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \text{dimension } (n + m) * (n + m) \quad (36)$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \text{dimension } (n + m) * m \quad (37)$$

La constante de ganancia integral deseada K_1 y la matriz de ganancia de realimentación del estado K_2 se obtienen mediante la ecuación 38.

$$[K_2 \quad K_1] = [\hat{K} + [0 \quad I_m]] \begin{bmatrix} G - I_m & H \\ CG & CH \end{bmatrix}^{-1} \quad (38)$$

2.5.3 DISEÑO DE OBSERVADORES

Un observador de estados se utiliza porque en muchos casos no todas las variables están disponibles para la medición directa y mediante el observador podemos estimar aquellas variables de estado que no pueden medirse directamente. En este caso se trata de observadores de predicción porque el estado $\tilde{x}(k + 1)$ está en un periodo de muestreo delante de la predicción $y(k)$. En la ecuación 39 y 40 apreciamos la ecuación de estado y de salida [35].

$$x(k + 1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (39)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (40)$$

Donde,

$x(k)$ = vector de estado (de dimension n)

$u(k)$ = vector de control (de dimension r)

$y(k)$ = señal de salida (escalar)

G = matriz no singular $n \times n$

H = matriz de $n \times r$

C = matriz de $1 \times n$

Para aplicar un observador de estados se supone que el sistema es completamente controlable y completamente observable. En la ecuación 41 podemos apreciar la ley de control [35].

$$u(k) = -K\tilde{x}(k) \quad (41)$$

Donde,

$\tilde{x}(k) = \text{estado observado}$

$K = \text{dimension de la matriz } (n * r)$

A continuación, en la ecuación 42 presentamos la ecuación de un observador de estados de predicción.

$$\tilde{x}(k + 1) = G\tilde{x}(k) + Hu(k) + K_e(y(k) - Cx(k)) \quad (42)$$

Para determinar la matriz K_e de un observador de estados, puede calcularse mediante el método de sustitución directa, formula de Ackerman o directamente utilizar el comando *acker* de Matlab.

2.5.4 SISTEMA DE SEGUIMIENTO CON REALIMENTACIÓN DE ESTADO OBSERVADO

Este sistema de seguimiento en lugar de utilizar la realimentación de estado real utiliza una realimentación de estado observado. En la figura 2.10 podemos apreciar un diagrama de bloques del sistema de seguimiento con realimentación de estado [35].

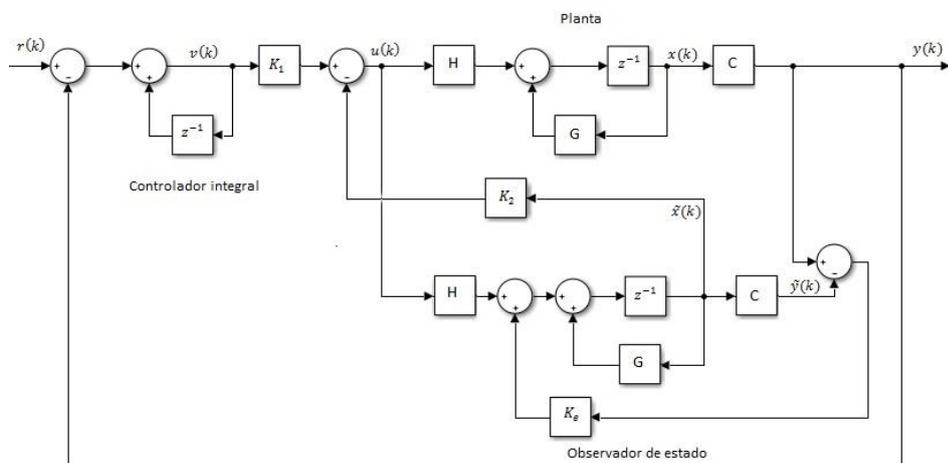


Figura 2.10 Sistema de seguimiento con realimentación del estado.

A continuación, presentamos las ecuaciones de un sistema de seguimiento con realimentación de estado. Las ecuaciones 43, 44 y 45 representa la ecuación de estado del integrador, la ecuación de control y la ecuación de observador de estados respectivamente.

$$v(k) = v(k - 1) + r(k) - y(k) \quad (43)$$

$$u(k) = -K_2x(k) + K_1v(k) \quad (44)$$

$$\tilde{x}(k + 1) = G\tilde{x}(k) + Hu(k) + K_e(y(k) - Cx(k)) \quad (45)$$

CAPÍTULO 3: ADQUISICIÓN DE DATOS DE LOS PROCESOS.

Dentro de laboratorio LACTI tenemos la Planta B que dispone de los autómatas programables de Siemens S7-1200 y Schneider Electric además del sistema CompactRIO. Para la planta A tenemos a disposición el autómata programable de Siemens S7-300, los cuales nos permitirán operar cada uno de los procesos de control. Para interactuar con la planta de Procesos tenemos el NI OPC Servers de National Instruments y el KEPServerEX además se requieren de algunas configuraciones y conocer la manera en que se encuentran conectados los dispositivos dentro del laboratorio LACTI. El software KEPServerEX permite interactuar con Simulink(Matlab) y los PLCs Siemens y Schneider. El software NI OPC Servers permite interactuar con LabVIEW y los PLCs Siemens y Schneider. A continuación, se describen las conexiones y configuraciones necesarias para el uso de estas herramientas. Para pasos más detallados revisar la guía de practica 1 y 8.

3.1 CONEXIÓN DEL SISTEMA COMPACTRIO A TRAVÉS DEL PANEL DE CONTROL DE LA PLANTA B

Para la conexión del CompactRIO el laboratorio cuenta con una fuente de alimentación DC (NI PS-15) de National Instruments, luego procedemos a conectar el Puerto RJ-45 del CompactRIO con la PC mediante cable ethernet. Dentro del CompactRIO encontramos el módulo NI 9219 y el módulo NI 9263 los cuales se conectan al Panel de Control (véase Figura 3.1).

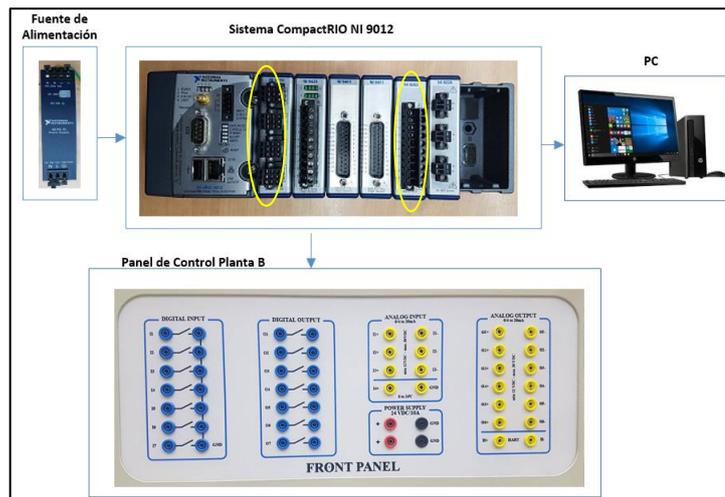


Figura 3.1 *Modo de conexión de la planta B del laboratorio LACTI con el CompactRIO NI 9012.*

Para realizar la conexión con el panel de control es necesario conocer los pines de conexión de los sensores y actuadores de la Planta. Para este proceso se eligen los pines correspondientes a los sensores de caudal y nivel además del pin de encendido de la válvula. La manera de conectar se muestra a continuación.

- **Conexión del módulo NI 9219 y el módulo NI 9263 con el Panel de Control de la Planta B para la medición de Caudal y Nivel.**

La conexión del Panel de Control se realiza mediante bananas que podemos encontrar dentro del laboratorio. Para encender el variador de Frecuencia se energiza la entrada digital I2 mediante la fuente de 24V. El módulo NI 9219 se encargará de medir los valores de caudal para esto se conecta el pin 3 del módulo al pin O6+ del panel de control que corresponde al caudalímetro de la Planta, el pin 5 del módulo NI 9219 y el pin O6- se conectan a GND. El módulo NI 9263 permite obtener valores de voltaje que serán enviados a la válvula electroneumática, esta se conectará desde AO0+ del módulo NI 9263 a la entrada analógica I1+ y finalmente se realiza una conexión entre todas las tierras (GND) del módulo NI 9263 y el Panel de control (véase Figura 3.2).

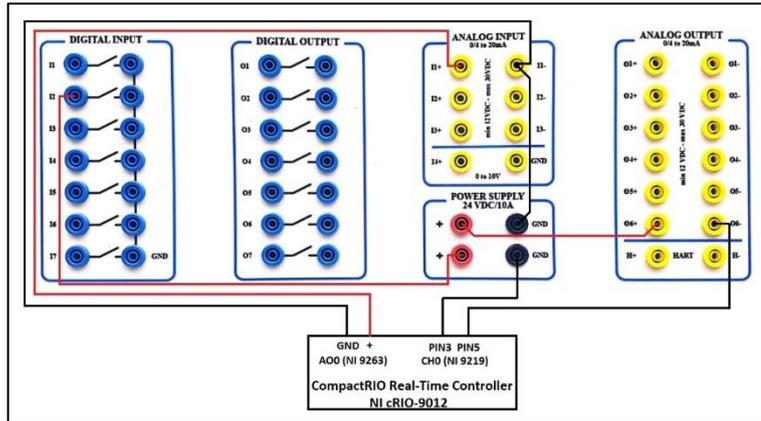


Figura 3.2 Conexión del módulo NI 9219 del CompactRIO con el panel de control de la planta B del laboratorio LACTI para medir flujo.

Para medir los valores de nivel se utiliza el sensor Liquicap M este corresponde al pin O3 del panel de control, por lo cual se procede a conectar el módulo NI 9219 a los pines correspondiente al sensor de nivel en el panel de control (véase Figura 3.3).

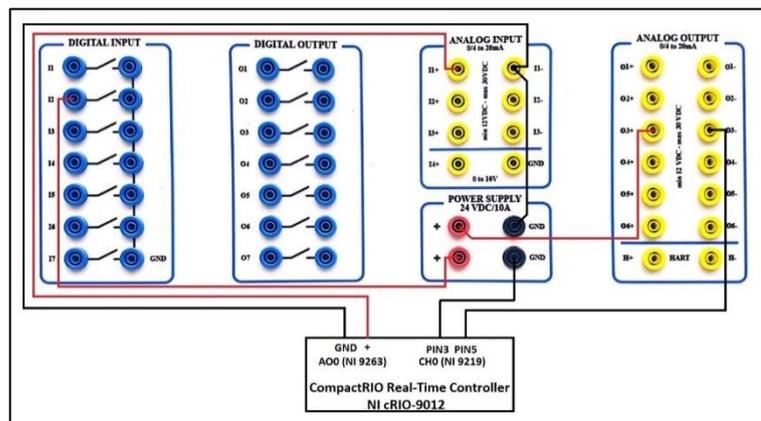


Figura 3.3 Conexión del módulo NI 9219 del CompactRIO con el panel de control de la planta B del laboratorio LACTI para medir nivel.

Para encender el panel de control, la frecuencia debe colocarse de forma manual a 60 Hz, mover la perilla de la opción “CONTROL 1” hacia la derecha (Control 2), mover la perilla de la opción “CONTROL 2” hacia la derecha (FRONT PANEL) y la última perilla colocar en “4-20mA” (véase Figura 3.4).



Figura 3.4 Configuración del Panel de Control de la Planta B.

También se debe configurar el tipo de entrada en el posicionador Burkert 8792. Se debe seleccionar la opción de 0-10V ya que el módulo NI 9263 nos proporciona un voltaje de 0-10V (véase Figura 3.5).



Figura 3.5 Seleccionar tipo de Entrada posicionador Burkert 8792.

3.2 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA COMPACTRIO NI 9012

Para la configuración del CompactRIO con la PC se requiere instalar algunos paquetes de software como la plataforma de LabVIEW, los módulos Real-Time, DSC (Control Design and Simulation) y el driver NI-RIO perteneciente al CompactRIO NI 9012. Con el software instalado en nuestra PC procedemos a abrir la aplicación NI MAX que nos permitirá realizar los cambios necesarios para comunicarnos con el CompactRIO (véase Figura 3.6).

Para la conexión del CompactRIO el laboratorio cuenta con una fuente de alimentación DC (NI PS-15) de National Instruments, luego procedemos a conectar el Puerto RJ-45 del CompactRIO con la PC mediante el cable ethernet.

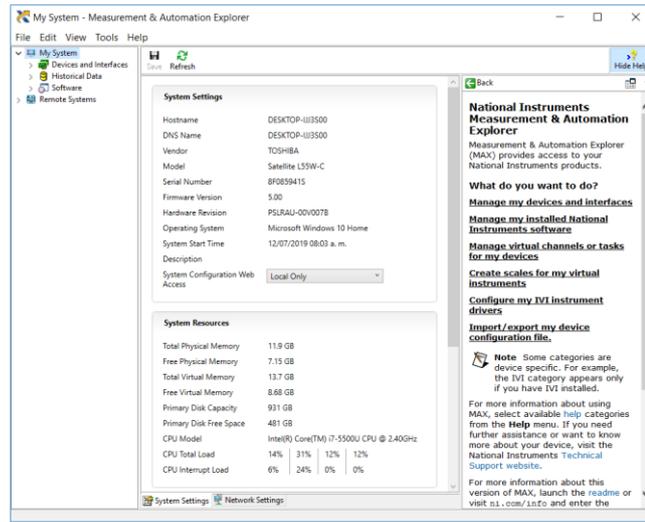


Figura 3.6 Aplicación NI MAX.

Al conectar el CompactRIO con la PC a través del cable ethernet verificar en el NI MAX que reconozca al dispositivo como se muestra en la figura 3.7.

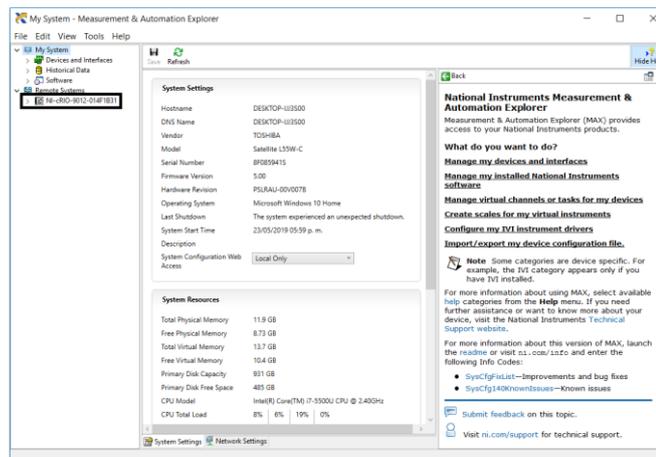


Figura 3.7 Reconocimiento del CompactRIO dentro de la aplicación NI MAX.

Para poder trabajar con el CompactRIO se debe configurar la dirección IP del mismo desde la pestaña Network Settings (véase Figura 3.8) y asegurarse que se encuentre en la misma subred con la PC.

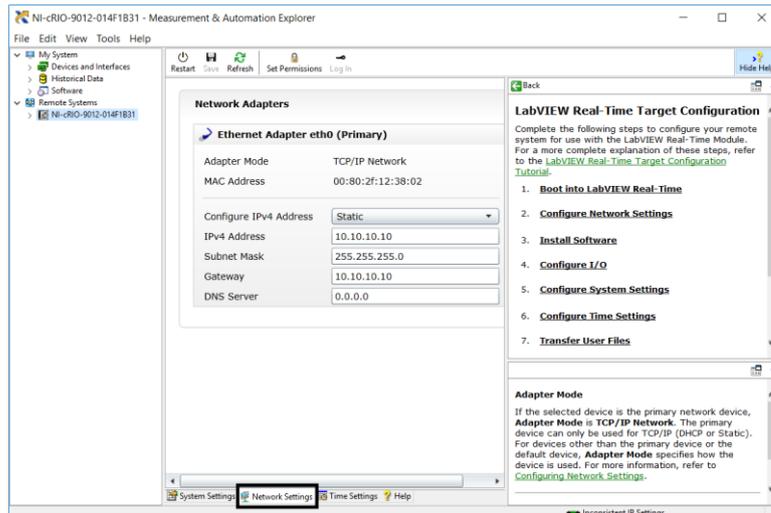


Figura 3.8 Configuración IP estático en el CompactRIO.

Adicionalmente se guardan los cambios y se observara dentro del NI MAX la dirección asignada al CompactRIO (véase Figura 3.9)

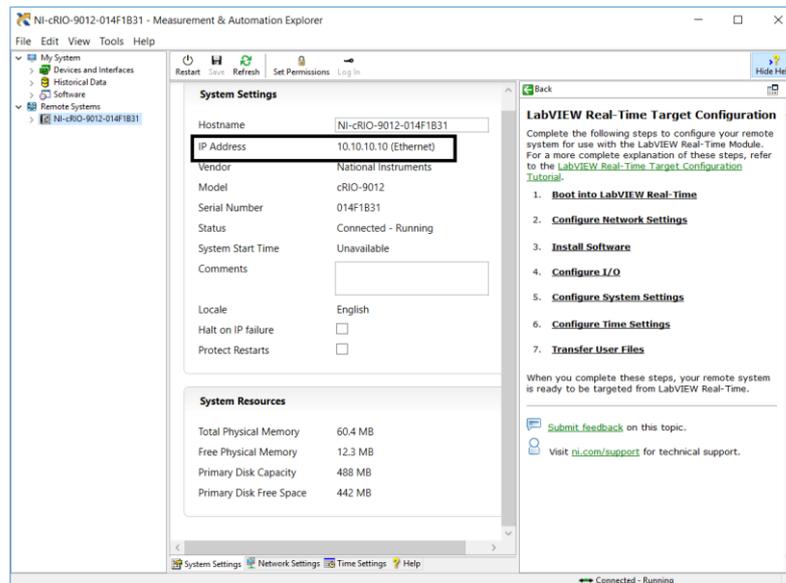


Figura 3.9 Dirección asignada al CompactRIO NI 9012.

Para realizar la conexión con el panel de control es necesario tener los paquetes de software instalados en la PC y que la dirección IP del CompactRIO como de la PC se encuentren en la misma subred.

3.3 CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE NI OPC SERVERS DE NATIONAL INSTRUMENTS

La configuración del software NI OPC SERVERS se realizará para la conexión OPC entre LabVIEW y el PLC Schneider Electric, en donde se explicará la creación de un canal, la configuración de un dispositivo y la creación de etiquetas. Para pasos más detallados revisar las guías de práctica 2, 3 y 10. También se puede seguir el mismo procedimiento para interactuar con el PLC Siemens S7-1200 y S7-300.

3.3.1 CREACIÓN DE UN CANAL EN EL SOFTWARE NI OPC SERVERS

Para la creación de un canal se debe configurar el modo de comunicación de la marca del PLC, también se agregará el adaptador de red de su computador por lo cual se procede a dar clic en añadir canal (Click to add a channel) dentro de la ventana de la aplicación del NI OPC Servers (véase en la Figura 3.10).

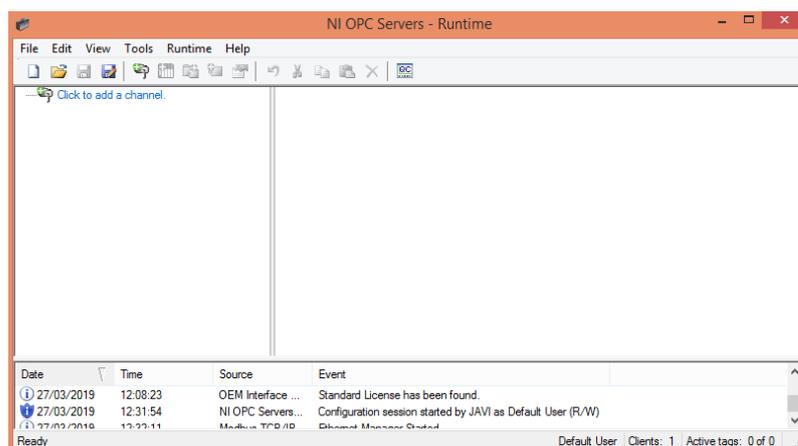


Figura 3.10 Ventana Nuevo Proyecto.

En la siguiente ventana agregamos el controlador del dispositivo. Desplegamos la pestaña “Device driver” y escogemos **Modbus TCP/IP Ethernet** (véase figura 3.11).



Figura 3.11 *Tipo de Canal.*

En esta ventana se escoge el adaptador de red del computador o lo dejamos en default como se muestra en la figura 3.12 y dar clic en siguiente.

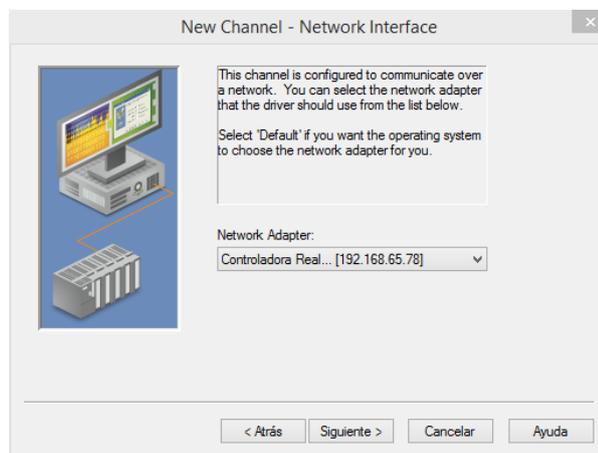


Figura 3.12 *Adaptador de red.*

Finalizado la configuración del canal podemos apreciar un resumen en donde aparecen todos los parámetros configurados (véase figura 3.13).

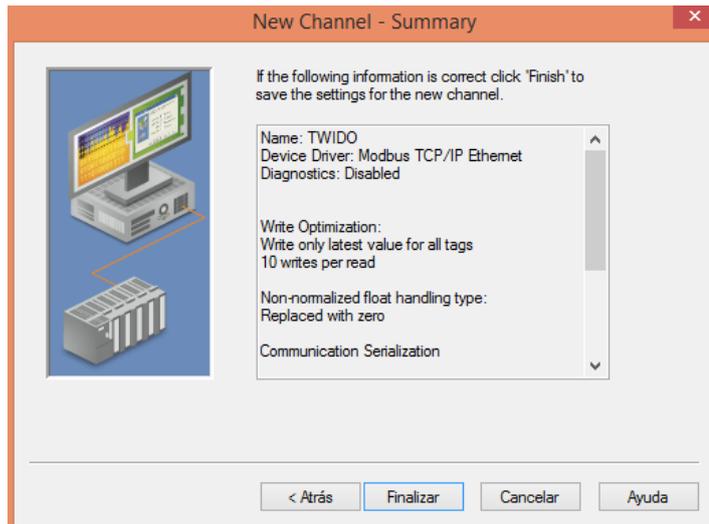


Figura 3.13 Resumen de configuración

3.3.2 CONFIGURACIÓN DE UN DISPOSITIVO

Para agregar un dispositivo se ingresa un nombre y se especifica el modelo del PLC, se agrega la dirección IP con la que se encuentra el PLC. Para agregar un nuevo dispositivo dar clic en añadir dispositivo (**Click to add a device**) (véase Figura 3.14).

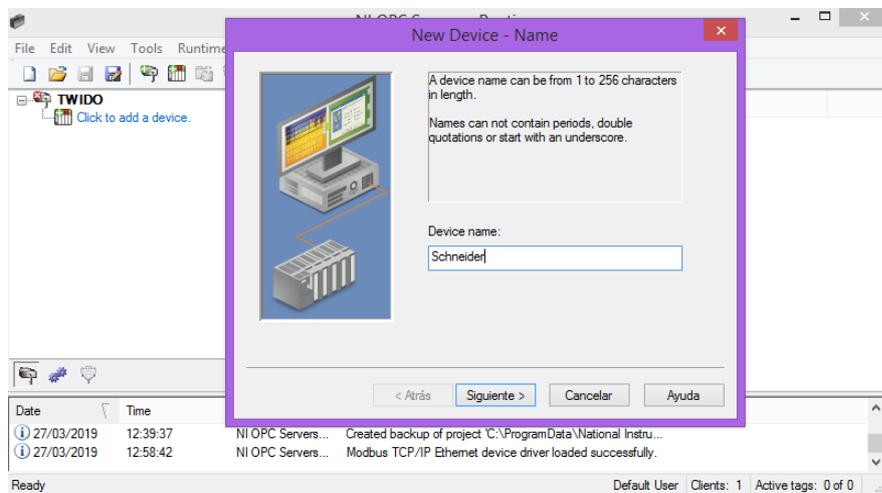


Figura 3.14 Agregar Dispositivo.

En el siguiente cuadro de diálogo especificamos el modelo del dispositivo asociado, escogemos el modelo Modbus que corresponde a la marca del PLC Schneider Electric (Véase la Figura 3.15).

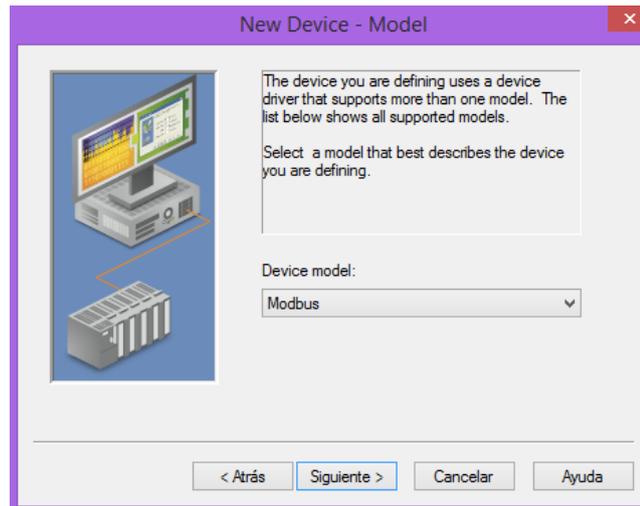


Figura 3.15 *Modelo del PLC.*

En la siguiente ventana agregamos la dirección IP de nuestro PLC, en este caso se agrega la dirección **192.168.65.75**. (véase Figura 3.16).

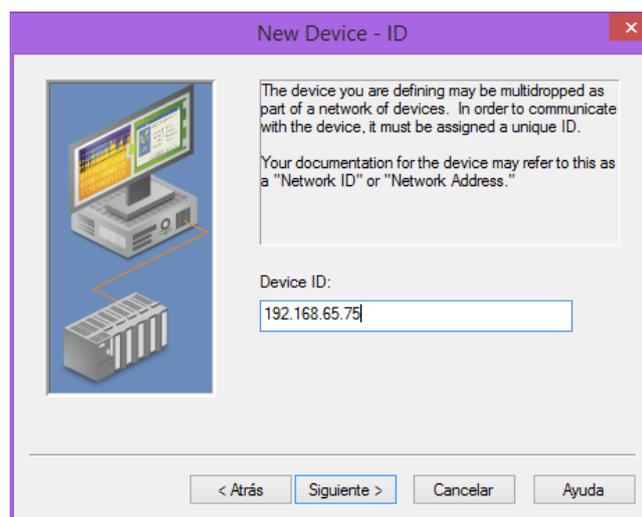


Figura 3.16 *Dirección IP.*

Finalizado la configuración del dispositivo nos muestra una tabla en donde se encuentran todos los parámetros configurados (véase figura 3.17).

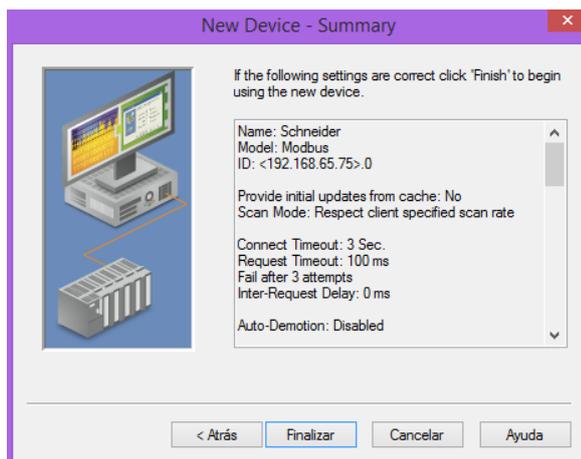


Figura 3.17 *Dispositivo Configurado.*

3.3.3 CREACIÓN DE ETIQUETAS

Las etiquetas permiten interactuar entre el computador y el PLC Schneider Electric, por lo cual pueden ser utilizadas posteriormente en el programa de LabVIEW. Estas etiquetas se deben crear con el mismo nombre que se encuentran en el PLC Schneider Electric, por lo cual nos dirigimos a la parte derecha de la ventana y damos clic sobre agregar una etiqueta (“Click to add a static tag”) (véase Figura 3.18).

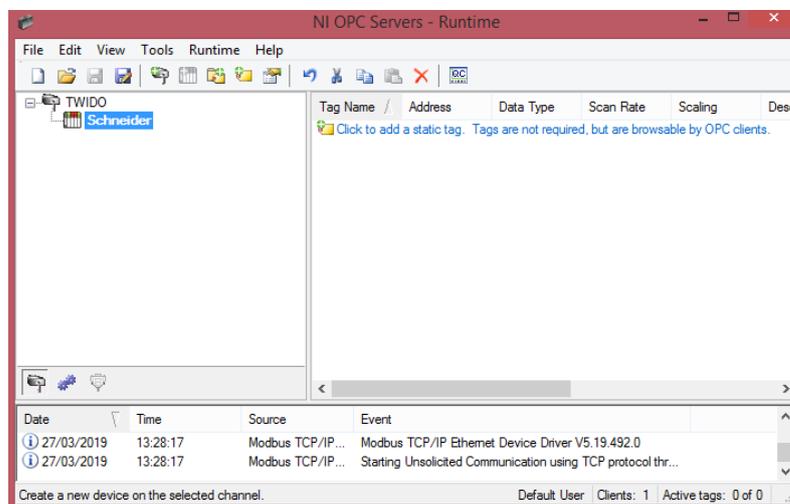


Figura 3.18 *Agregar Etiqueta.*

En la configuración de etiquetas en Name elegimos el nombre de la etiqueta. En address escribimos 000011, si la variable es analógica se asigna el número 4000 más la dirección de la marca más uno o si la variable es digital asignar el número 0000 más la dirección de la marca creada en el PLC y se suma uno. Por ejemplo, la variable es 10 y la dirección es digital por lo tanto queda 000011. Tipo de dato, se elige booleano cuando la variable nos entrega un valor de uno o cero. (Véase la figura 3.19).

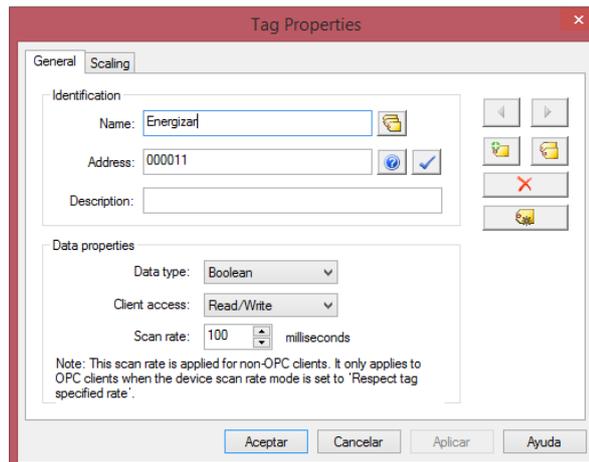


Figura 3.19 Variable Energizar.

Finalmente se apreciarán todas las etiquetas creadas. Ahora nos dirigimos a la ventana Runtime y procedemos a dar clic en conectar, como se observa en la figura 3.20. Las etiquetas creadas pueden ser utilizadas desde el software LabVIEW.

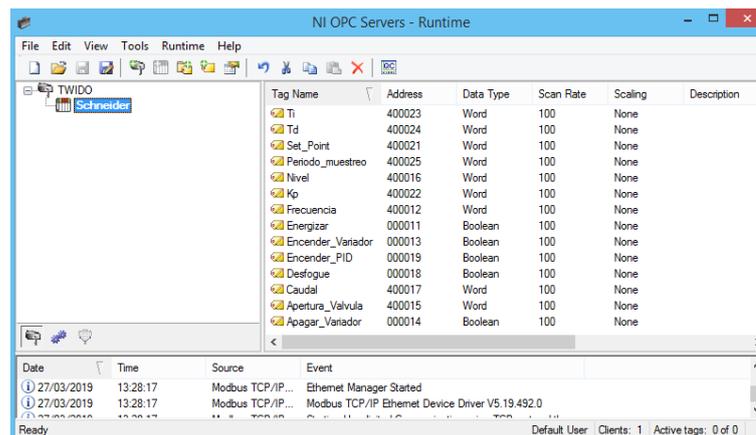


Figura 3.20 Configuración Finalizada.

3.4 CONFIGURACIÓN EN EL SOFTWARE KEPSERVEREX

La configuración del software KEPServerEX se realiza para la conexión OPC entre Simulink y el PLC S7-1200 o S7-300, en donde se explica la creación de un canal, el tipo de dispositivo a agregar y la creación de etiquetas. Para pasos más detallados revisar las guías de práctica 4, 5, 6 y 9. En el software también se puede realizar una configuración para un PLC de la marca Schneider Electric.

3.4.1 CREACIÓN DE UN CANAL EN EL SOFTWARE KEPSERVEREX

Para la creación de un canal se debe configurar el modo de comunicación de la marca del PLC, también se agregará el adaptador de red de su computador por lo cual se procede a dar clic en añadir canal (Click to add a channel) dentro de la ventana de la aplicación del KEPServerEX (véase en la Figura 3.21).

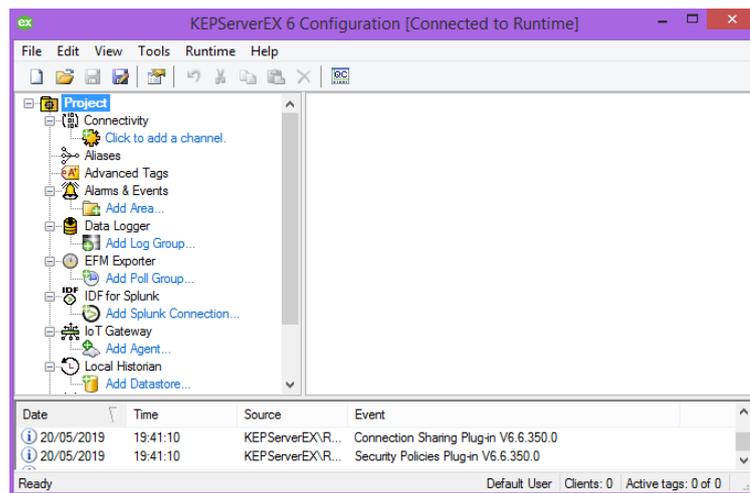


Figura 3.21 *Nuevo Proyecto.*

En la siguiente ventana nos muestra el asistente para crear canales donde se selecciona el tipo de canal a crear, escogemos el tipo de canal que en este caso es Siemens **TCP/IP Ethernet** (véase en la Figura 3.22).

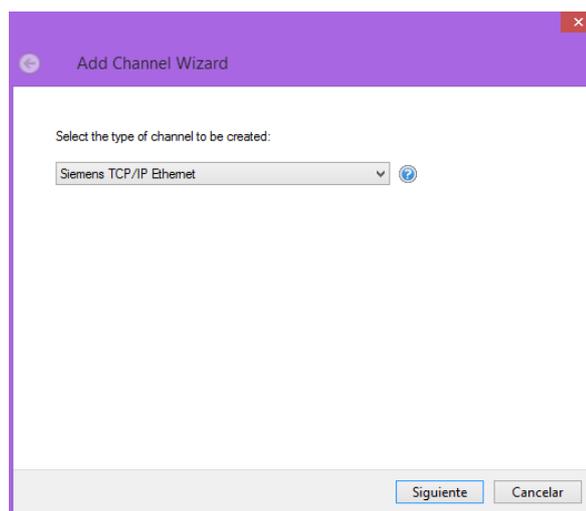


Figura 3.22 *Tipo de Canal.*

En esta la ventana se escoge el adaptador de red del computador o lo dejamos en default como se muestra en la figura 3.23 y dar clic en siguiente.

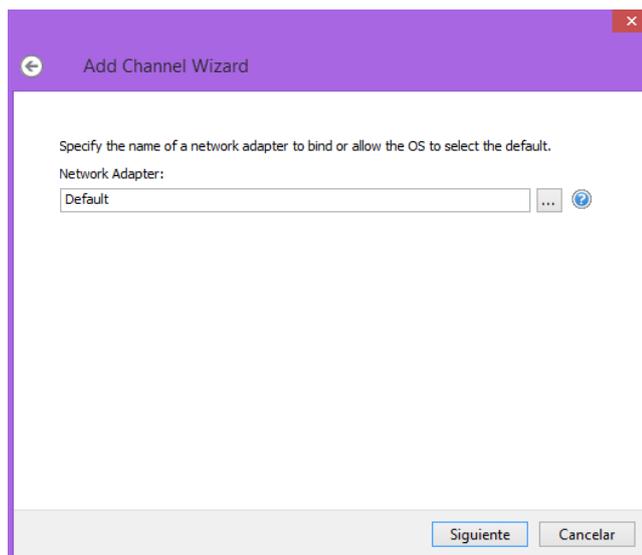


Figura 3.23 Adaptador de red.

Finalizado la configuración del canal podemos apreciar un resumen en donde aparecen todos los parámetros configurados (véase figura 3.24).

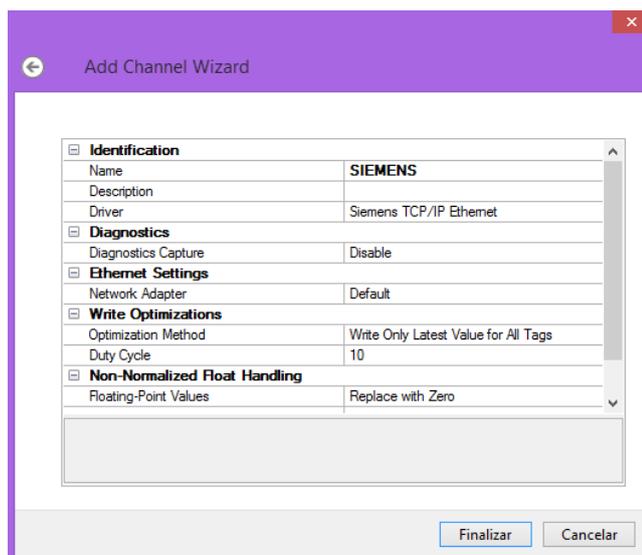


Figura 3.24 Resumen de Configuración.

3.4.2 CONFIGURACIÓN DE UN DISPOSITIVO

Para agregar un dispositivo se ingresa un nombre y se especifica el modelo del PLC, se agrega la dirección IP con la que se encuentra el PLC. Para agregar un nuevo dispositivo dar clic en añadir dispositivo (**Click to add a device**) (véase Figura 3.25).

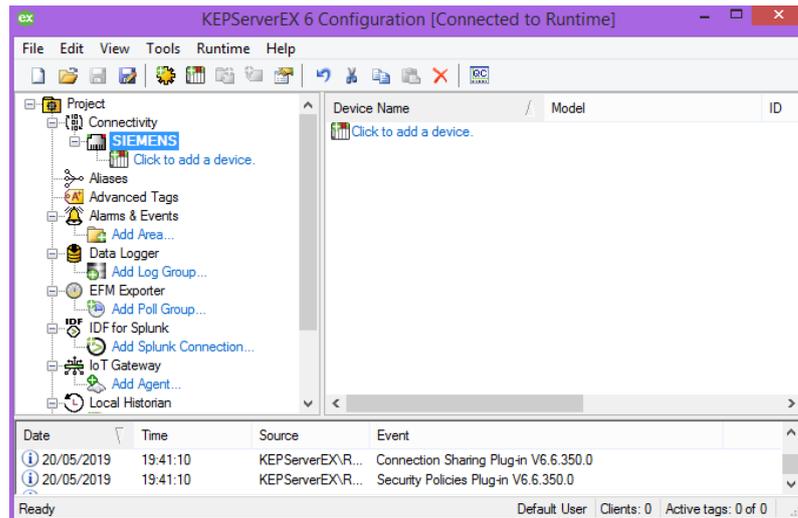


Figura 3.25 Agregar un dispositivo.

En la ventana del cuadro de diálogo agregamos un nombre a nuestro dispositivo (véase Figura 3.26).

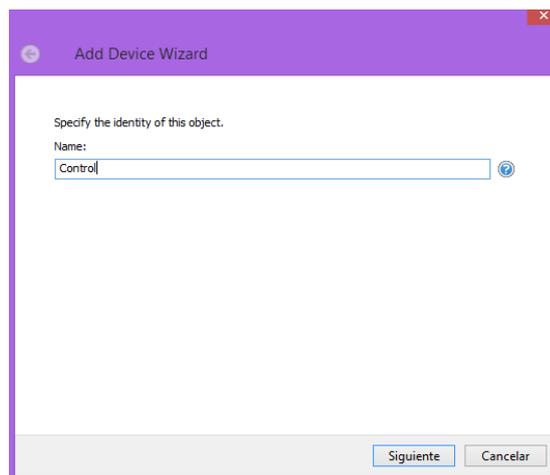


Figura 3.26 Nombre del dispositivo.

En el siguiente cuadro de diálogo especificamos el tipo de dispositivo asociado, en este caso escogemos el PLC **S7-1200** o **S7-300** como se muestra en la Figura 3.27.

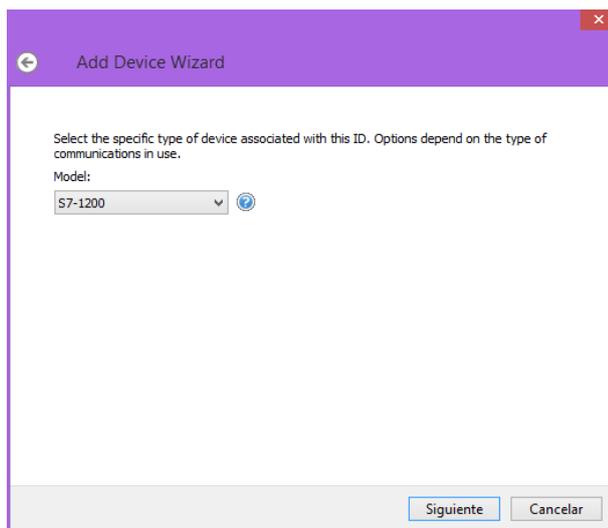


Figura 3.27 Modelo del PLC.

En la siguiente ventana agregamos la dirección IP de nuestro PLC, en este caso se agrega la dirección **192.168.65.98** con la cual está configurado el PLC S7-1200 (véase Figura 3.28).

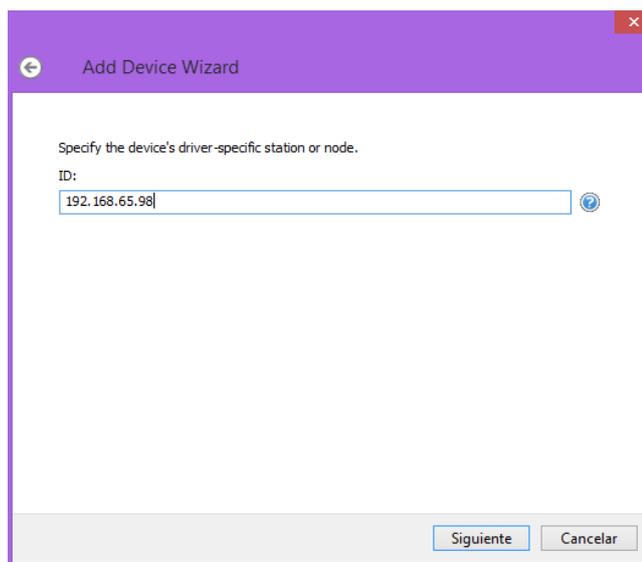


Figura 3.28 Dirección IP.

Finalizado la configuración del dispositivo nos muestra una tabla en donde se encuentran todos los parámetros configurados (véase figura 3.29).

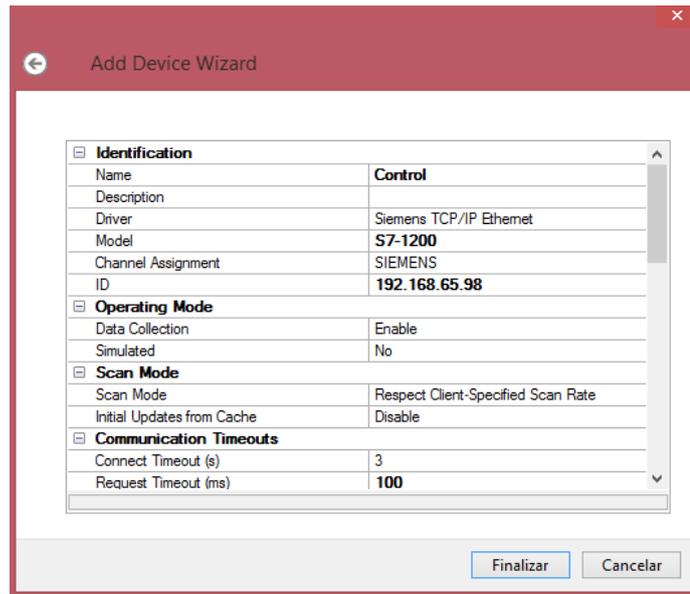


Figura 3.29 *Dispositivo Configurado.*

3.4.3 CREACIÓN DE ETIQUETAS

Las etiquetas permiten interactuar entre el computador y el PLC, por lo cual pueden ser utilizadas posteriormente en el programa de Simulink (MATLAB). Estas etiquetas se deben crear con el mismo nombre que se encuentran en el PLC Siemens S7-1200 o S7-300, por lo cual nos dirigimos a la parte derecha de la ventana y damos clic sobre agregar una etiqueta (“Click to add a static tag”) (véase Figura 3.30).

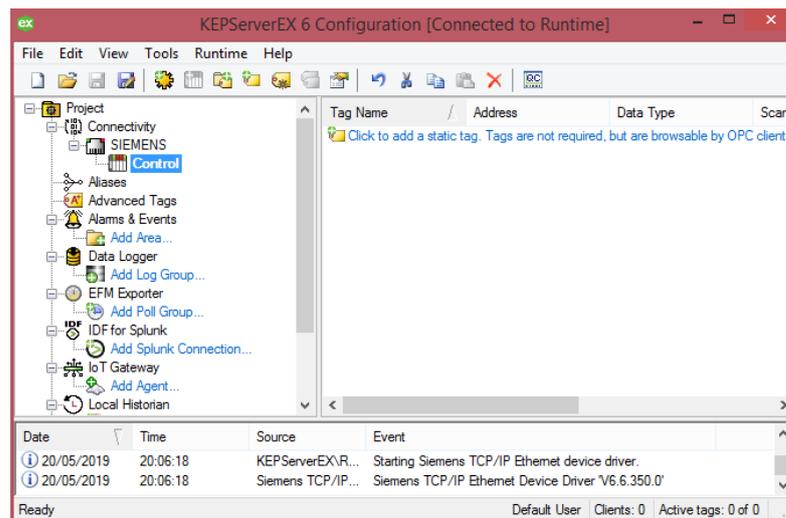


Figura 3.30 *Agregar una etiqueta.*

En la opción Name elegimos el nombre de la etiqueta. En Address escribimos IW100, que es la misma dirección con la que se encuentra en el PLC. Elegimos el tipo de dato como word y en Client Access escogemos Read/Write que elige automáticamente si la variable es de lectura o de escritura. (Véase la figura 3.31).

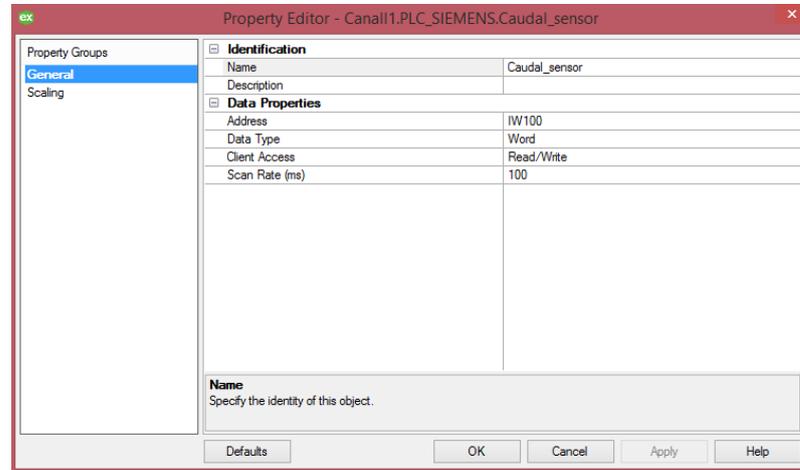


Figura 3.31 Etiqueta sensor caudal.

Finalmente se apreciarán todas las etiquetas creadas. Ahora nos dirigimos a la ventana Runtime y procedemos a dar clic en conectar, como se observa en la figura 3.32. Ahora las etiquetas creadas pueden ser utilizadas desde el software Simulink (Matlab).

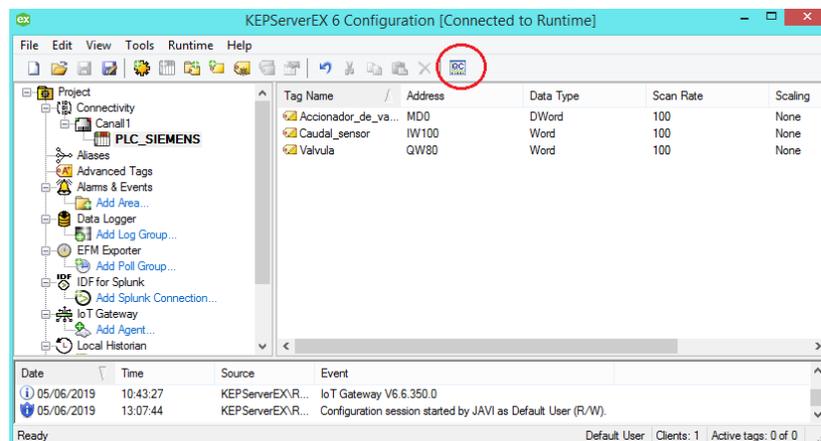


Figura 3.32 Configuración Finalizada.

CAPÍTULO 4: IDENTIFICACIÓN DE LOS PROCESOS

Para comprender el comportamiento de los procesos de control en las plantas del laboratorio LACTI es necesario realizar la identificación de los mismos para obtener un modelo mediante una serie de medidas experimentales.

Para obtener los datos de entrada y salida de un proceso se realiza un programa en el software de LabVIEW que nos permite guardar los datos en tiempo real. Para la planta B se obtienen los datos de un proceso de flujo y nivel mediante el sistema CompactRIO mientras en la planta A de un proceso de flujo másico a través del PLC S7-300 de Siemens.

Para obtener el modelo de las plantas se utilizan las herramientas de identificación de Matlab como el comando `tftest` y la aplicación PID Tuner, obteniendo así la función de transferencia de los procesos de control. Para pasos más detallados revisar las guías de práctica 1 y 8.

4.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO DE FLUJO DE LA PLANTA B

Para el proceso de flujo se mantiene constante el variador de Frecuencia VF-101 de la bomba P-101 y la variable a manipular es el voltaje aplicado a la válvula FIC-201. Por otra parte, la medición de flujo se realizará a través del transmisor FIT-101 (véase la Figura 4.1).

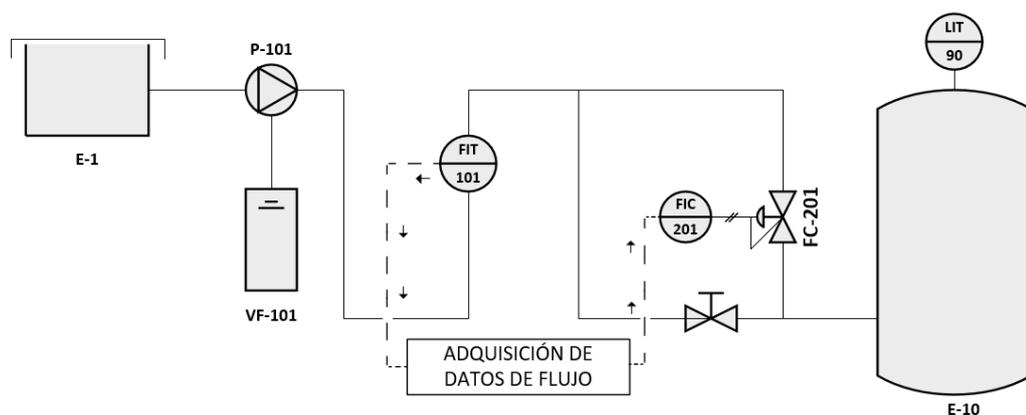


Figura 4.1 Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Flujo.

Para la identificación del proceso de flujo se realiza un programa de adquisición de datos mediante las variables del CompactRIO donde la entrada corresponde al canal AO0 del módulo NI 9263 y de salida al canal CH0 del módulo NI 9219 los cuales se añaden desde el explorador de proyectos de LabVIEW. En el capítulo 3 se encuentra la conexión y configuración del sistema CompactRIO. En la figura 4.2 se observan los módulos que se encuentran dentro del chasis del CompactRIO. Para mayor detalle véase guía 1.

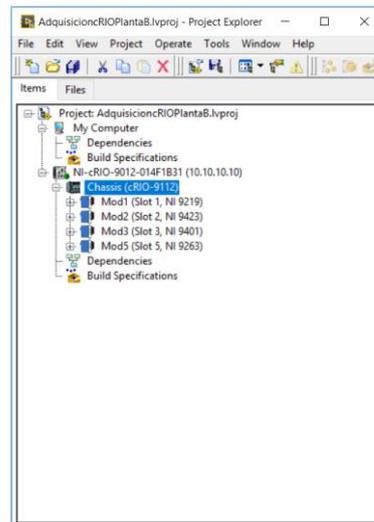


Figura 4.2 Explorador de proyectos de LabVIEW con los módulos que se encuentran en el CompactRIO.

En la ventana de propiedades del módulo NI 9219 se configura el modo de medición. Se debe seleccionar el modo “Current” porque los datos de lectura que entrega el caudalímetro varía en un rango de 4-20mA (véase Figura 4.3).

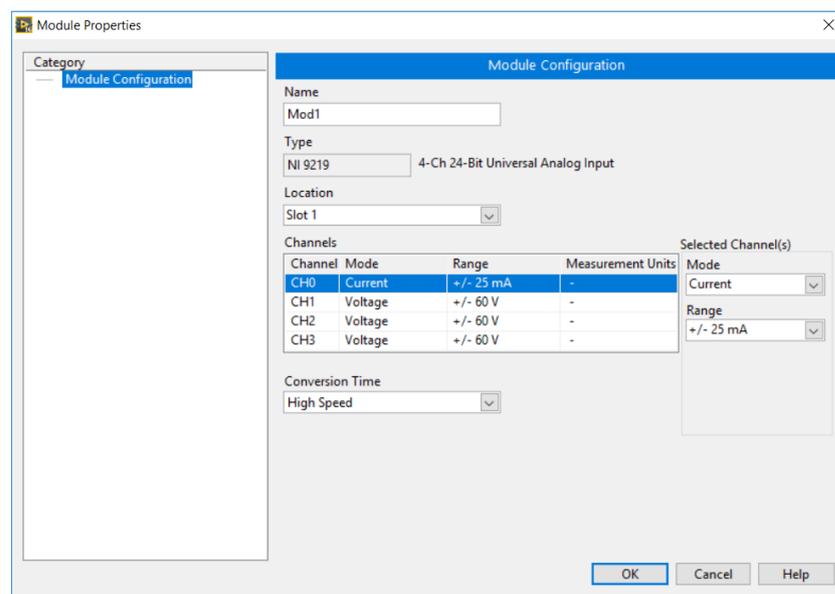


Figura 4.3 Propiedades del módulo NI 9219.

Para la adquisición de los datos de entrada y salida hay que tener en cuenta el tiempo de muestreo. Para lo cual nos dirigimos a Properties\Scan Engine y en “Scan Period” colocamos 100 ms (véase Figura 4.4).

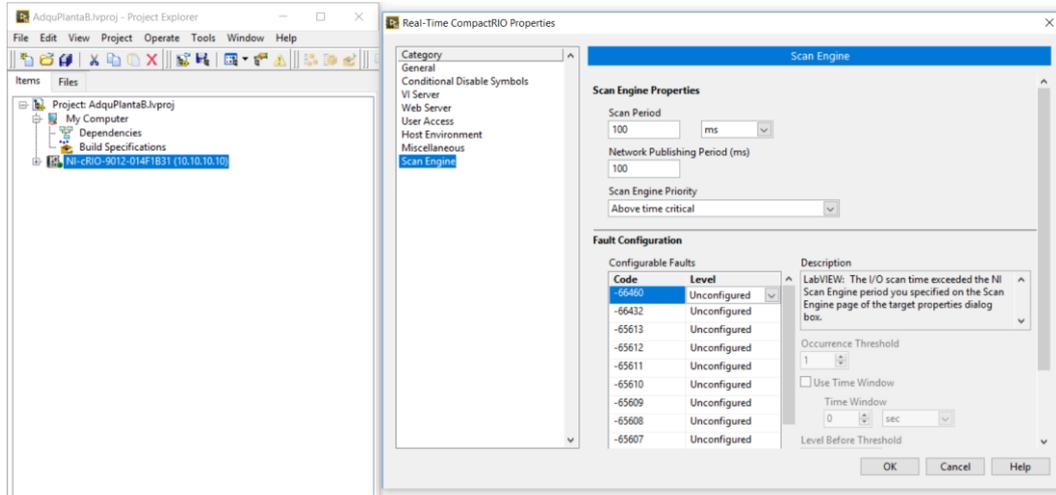


Figura 4.4 *Periodo de Escaneo.*

Con las variables configuradas se procede a arrastrarlas a la plataforma de LabVIEW desde el explorador de proyectos como se muestra en la Figura 4.5. La variable CH0 corresponde al canal 0 del módulo NI 9219 que nos permite la lectura del caudalímetro y la variable AO0 que corresponde al módulo NI 9263 que permite ingresar valores en la válvula electroneumática (véase Figura 4.5).

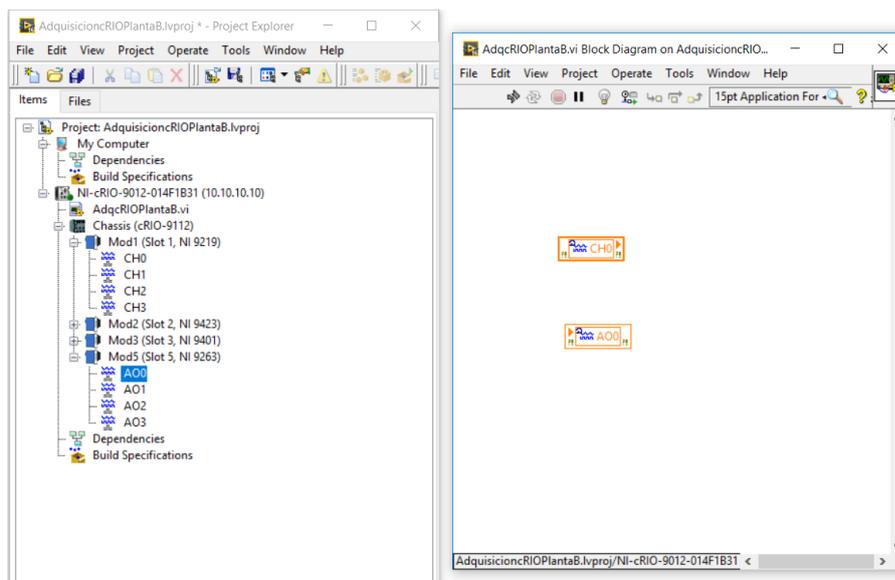


Figura 4.5 *Variables utilizadas para el proceso de adquisición.*

Para realizar el programa de adquisición en la plataforma de LabVIEW hay que tener en cuenta que para el sensor de Caudal utilizamos el canal 0 (CH0) del módulo NI 9219, para esto se requiere realizar una conversión ya que trabaja en un rango de medición de **4 – 20 mA**, y el caudal máximo que entrega el sensor es de **80 l/min**, los datos se obtienen en valores negativos por ende se multiplica por -1000. Al trabajar en un rango entre 4-20 mA se resta -4 para obtener valores entre 0-16mA. Como conocemos que el caudal máximo es de 80 l/min y el valor máximo que entrega el módulo es de 16mA, estos valores adquiridos lo multiplicamos por 5, para obtener los valores correctos de caudal en l/min. En el caso de la válvula utilizaremos el pin **AO0** del módulo NI 9263 que tiene un rango de medición de **0 - 10V** lo cual es necesario dividir para 10. En el bloque Tsamp se realiza operaciones para ingresar un valor de tiempo de muestreo en segundos (véase Figura 4.6).

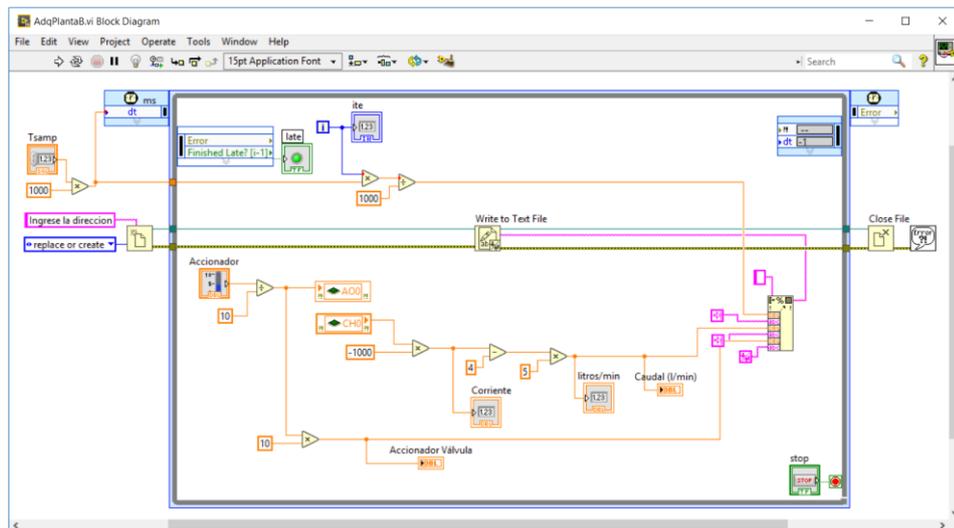


Figura 4.6 Programa para la Adquisición de Datos de Caudal.

En el VI principal del programa de LabVIEW nos permite ingresar el tiempo de muestreo en segundos en Tsamp, mediante la consigna o set point se puede ir variando el valor de caudal. Además, en las graficadoras del Set Point y Caudal se puede observar el comportamiento de los datos de caudal en tiempo real (véase Figura 4.7).

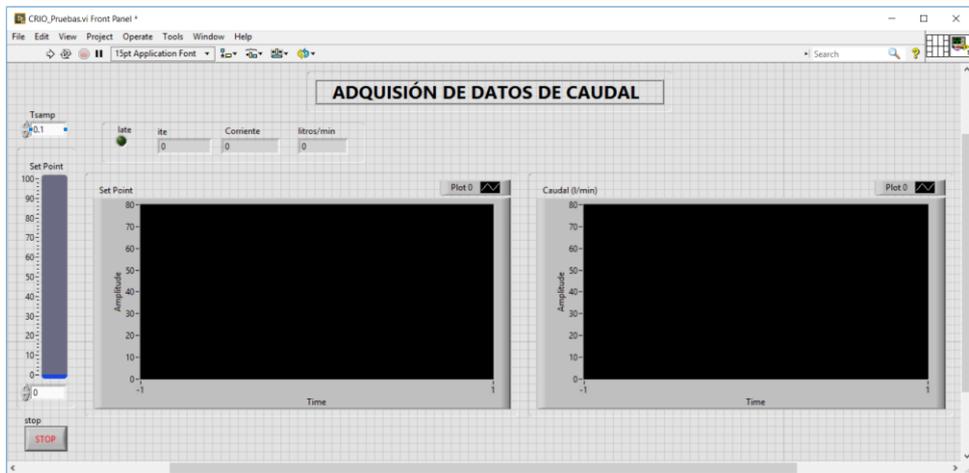


Figura 4.7 Panel Frontal del programa de adquisición de Datos de Caudal.

Este programa nos permite guardar los datos en Excel, al momento de ejecutar el programa se deberá seleccionar el archivo donde se guardarán los datos del proceso (véase Figura 4.8).

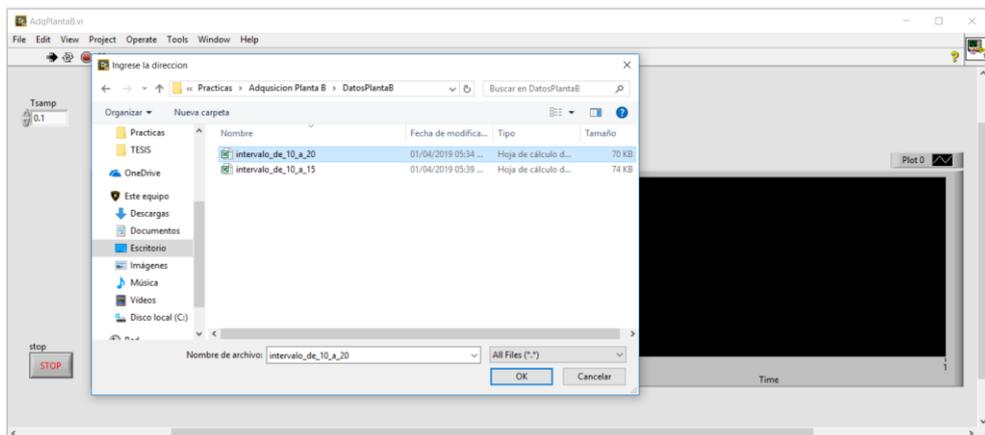


Figura 4.8 Datos adquiridos en Excel.

En la siguiente gráfica, los datos obtenidos se pueden abrir y visualizar en el software de Excel (véase Figura 4.9).

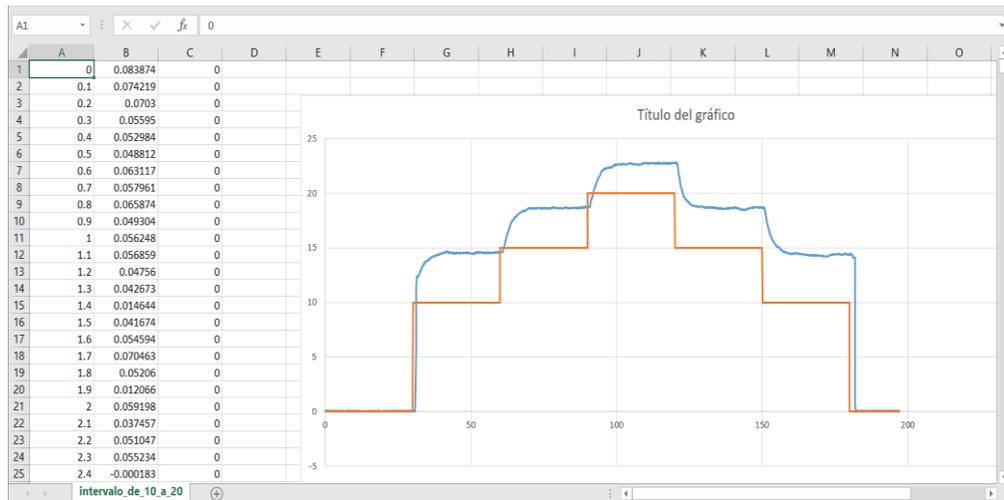


Figura 4.9 Datos generados en Excel de Caudal.

- Obtención de la Función de Transferencia de Caudal de la Planta B

Para obtener la función de transferencia es necesario transferir los datos al software de Matlab en donde se elige un escalón de los datos adquiridos. A continuación, se muestra el código en Matlab que permite cargar los datos y observar el comportamiento del sistema (Véase figura 4.10).

```
%LOAD AND PLOT DATA
load Data1_10_15.mat
subplot(211);plot(tC,inC,'b','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');ylabel('Amplitude')
subplot(212);plot(tC,outC,'r','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');ylabel('Amplitude')
```

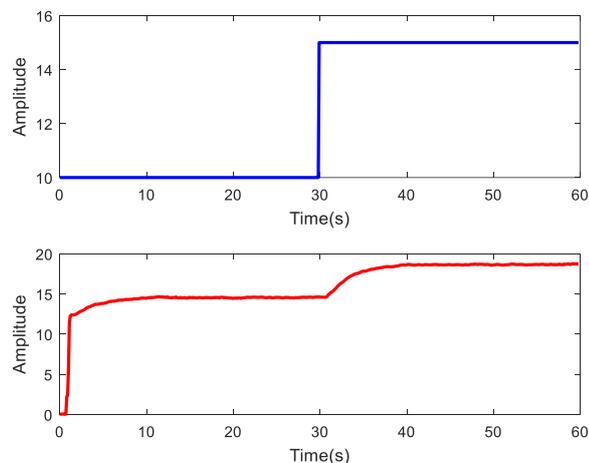


Figura 4.10 Carga e inspección de los datos.

Ahora se seleccionan los datos que se requieren para la identificación.

```
%GET DATA FOR IDENTIFICATION
figure
Ts=0.1;
u_ide=inC(200:end);
y_ide=outC(200:end);
t_ide=0:Ts:40-Ts;
subplot(211);plot(t_ide,u_ide,'b','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');y
label('Amplitude')
subplot(212);plot(t_ide,y_ide,'r','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');y
label('Amplitude')
```

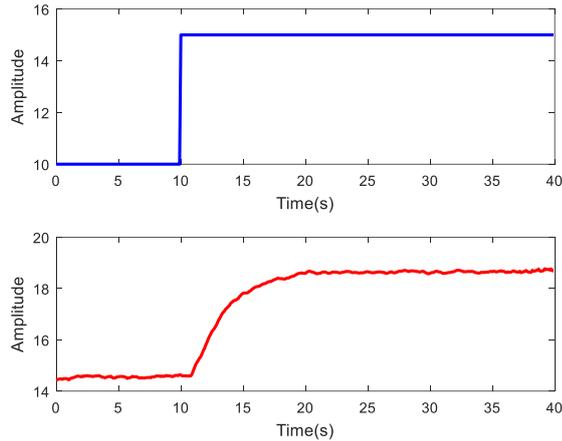


Figura 4.11 Selección de datos para la identificación.

Con los datos seleccionados se procede a quitar el offset de los datos de entrada y salida (véase figura 4.12). Para quitar el offset de la señal de entrada se resta directamente el valor de la primera muestra, mientras que para la salida por el ruido que puede estar presente se puede tomar la media de un conjunto de muestras.

```
%REMOVE OFFSET OF INPUT AND OUTPUT DATA
u_ide=u_ide-u_ide(1);
y_ide=y_ide-mean(y_ide(1:50));
figure
subplot(211);plot(t_ide,u_ide,'b','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');y
label('Amplitude')
subplot(212);plot(t_ide,y_ide,'r','LineWidth',2);xlabel('Time(s)');y
label('Amplitude')
```

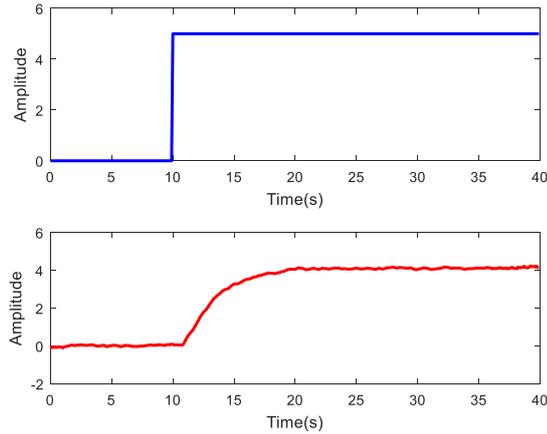


Figura 4.12 *Quitar el offset de los datos de entrada y salida.*

Ahora se procede a analizar el tiempo de demora como se observa en la figura 4.13.

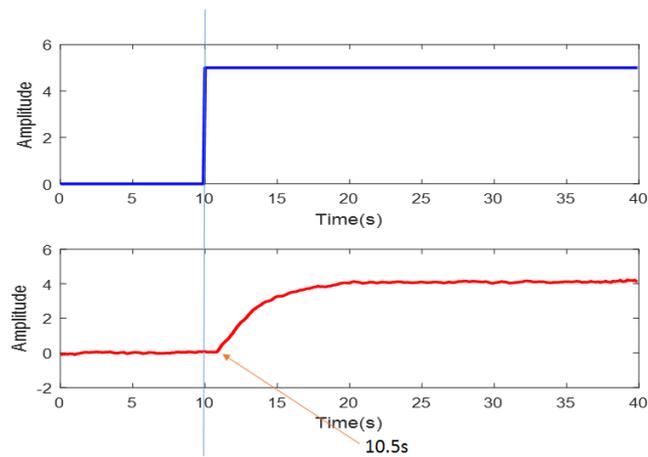


Figura 4.13 *Análisis del tiempo muerto.*

Luego con el comando `tfest` se procede a realizar las estimaciones necesarias para encontrar el modelo más adecuado de la planta (véase figura 4.14).

```
% MODEL ESTIMATION
data=iddata(y_ide,u_ide,Ts);
sys1=tfest(data,1,0,0.5)
figure
compare(data,sys1);title('Un polo')

sys2=tfest(data,2,0,0.5)
figure
compare(data,sys2);title('Dos polos')

sys3=tfest(data,3,1,0.5)
figure
compare(data,sys3);title('Tres polos')
```

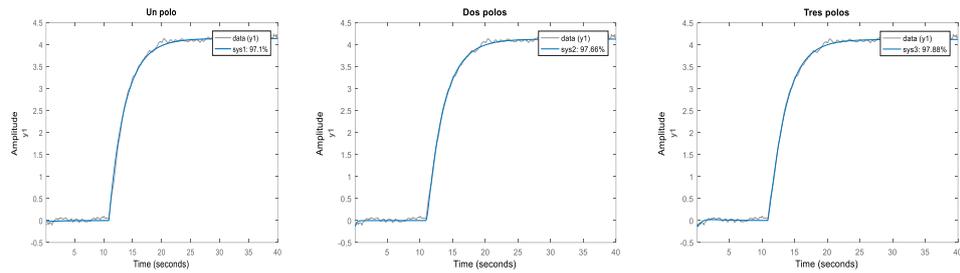


Figura 4.14 Estimaciones para encontrar el modelo de la planta de un polo, dos polos y tres polos.

Finalmente se escogió la función de transferencia con 2 polos, la cual utilizaremos en las prácticas.

$$F(s) = e^{-0.5s} * \frac{0.5907}{s^2 + 2.172s + 0.7162}$$

4.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO DE NIVEL DE LA PLANTA B

Para el proceso de nivel se mantiene constante el variador de Frecuencia VF-101 de la bomba P-101 y la variable a manipular es el voltaje aplicado a la válvula FIC-201. Por otra parte, la medición de nivel se realizará a través del transmisor LIT-90 (véase la Figura 4.15).

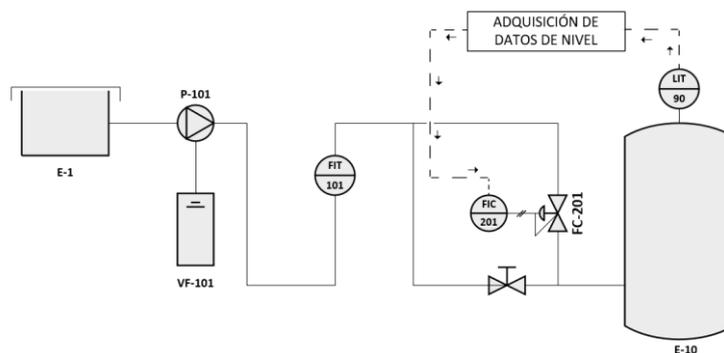


Figura 4.15 Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Nivel.

Para la identificación del proceso de nivel se realiza la misma configuración del sistema CompactRIO donde la entrada corresponde al canal A00 del módulo NI 9263 y de salida al canal CH0 del módulo NI 9219 los cuales se añaden desde el explorador de proyectos de LabVIEW.

Para obtener los datos de Nivel se utilizó el canal 0 (CH0) del módulo NI 9219 que se encuentra dentro del chasis del CompactRIO. El sensor de Nivel trabaja en un rango de medición de 4-20 mA, y el nivel máximo es del 100% por lo cual se requiere realizar una conversión para obtener los datos del nivel del tanque en porcentaje (%). Los datos se obtienen en valores negativos por ende se multiplica por -1000. Al trabajar en un rango entre 4-20 mA se resta -4 para obtener valores entre 0-16mA. Como conocemos que el nivel máximo comprende el 100 % y el valor máximo que entrega el módulo es de 16 mA, estos valores adquiridos lo multiplicamos por 6.25, para obtener los valores correctos de nivel. En el caso de la válvula utilizaremos el pin A00 del módulo NI 9263 que tiene un rango de medición de 0 - 10V lo cual es necesario dividir para 10. En el bloque Tsamp se realiza operaciones para ingresar un valor de tiempo de muestreo en segundos (véase Figura 4.16).

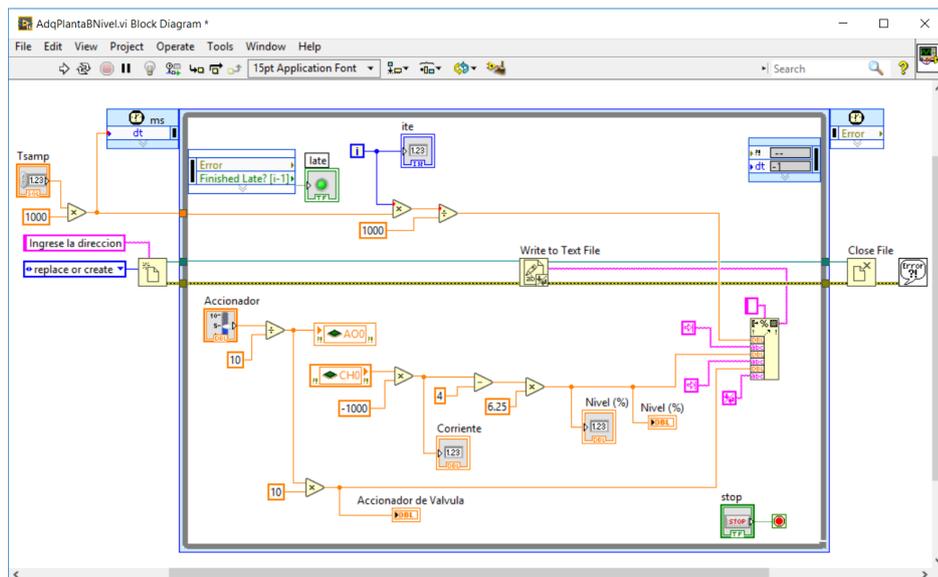


Figura 4.16 Programa para la adquisición de datos de Nivel.

En el VI principal del programa de LabVIEW nos permite ingresar el tiempo de muestreo en segundos en Tsamp, mediante la consigna o set point se puede ir variando el valor del nivel del tanque. Además, en las graficadoras del Set Point y Nivel se puede observar el comportamiento de los datos de nivel en tiempo real (véase Figura 4.17).

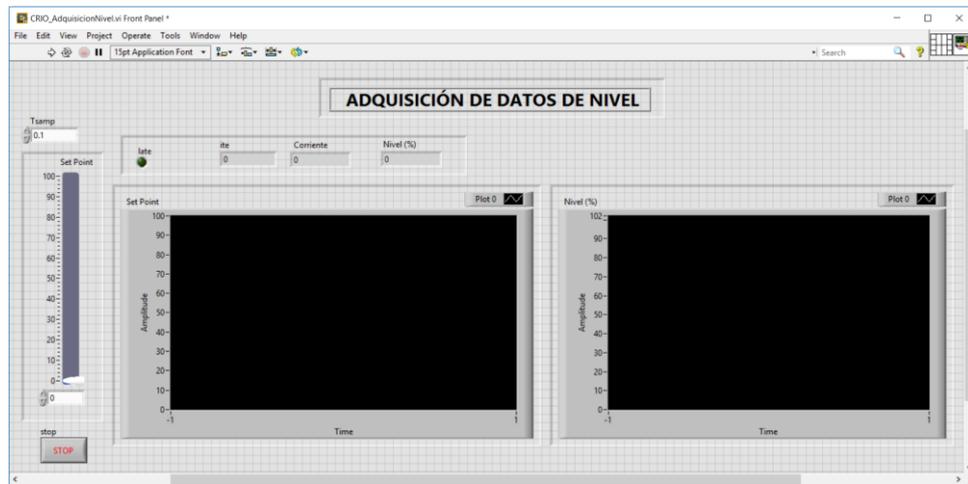


Figura 4.17 Controles del Panel Frontal de LabVIEW para la adquisición de datos de Nivel.

Este programa nos permite guardar los datos en Excel, al momento de ejecutar el programa se deberá seleccionar el archivo donde se guardarán los datos del proceso (véase Figura 4.18).

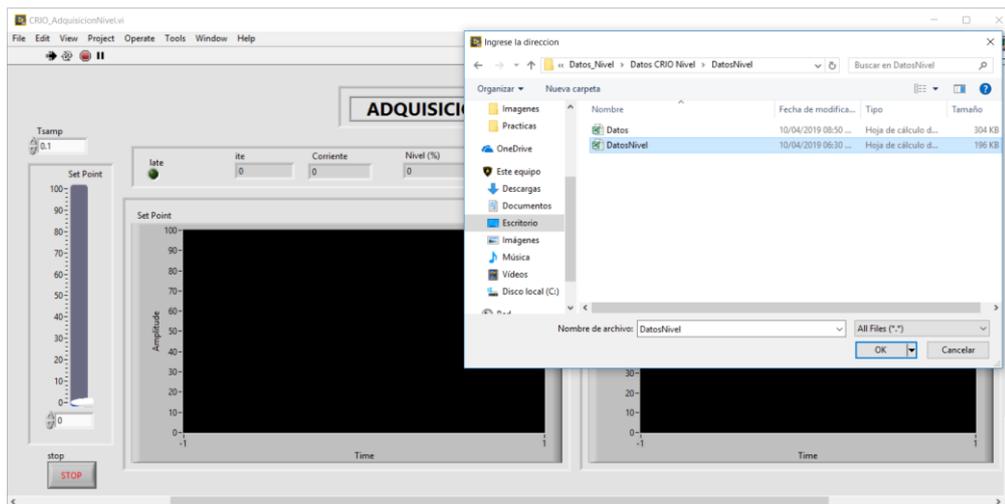


Figura 4.18 Datos adquiridos en Excel.

Aplicando un escalón y con la válvula de desfogue medio abierta se obtuvo la siguiente gráfica, los datos obtenidos se pueden abrir y visualizar en el software de Excel (véase Figura 4.19).

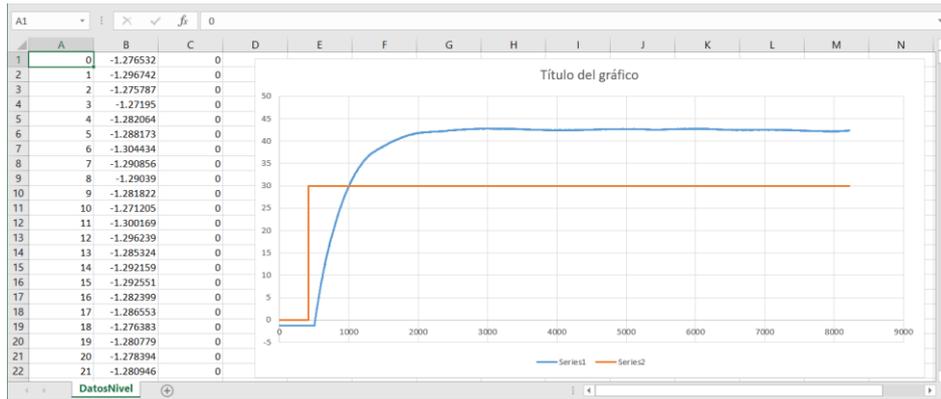


Figura 4.19 Datos generados en Excel de Nivel.

- **Obtención de la función de Transferencia de Nivel de la Planta B.**

Para obtener la función de transferencia es necesario transferir los datos al software de Matlab. Los mismos son graficados mediante el comando plot, en donde la línea de color tomate es el valor del escalón y la línea de color azul son los valores de nivel, en el eje “x” los valores están en segundos y en el eje “y” el nivel en porcentaje (%) (Véase figura 4.20).

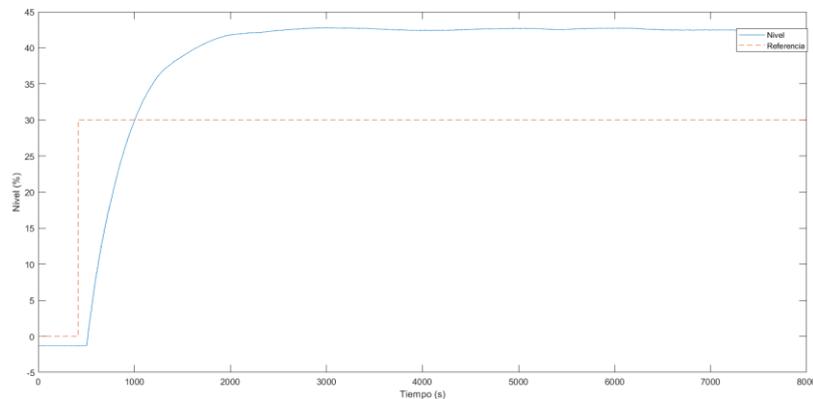


Figura 4.20 Datos generados en Matlab mediante el comando plot.

Para obtener la función de transferencia se utiliza la aplicación PID Tuner de Matlab donde se importan los datos y se ajusta la gráfica para encontrar la función de transferencia de la planta además esta aplicación permite eliminar el offset de los datos experimentales, dentro de esta aplicación es necesario seleccionar la opción “Identify New Plant” (véase Figura 4.21).

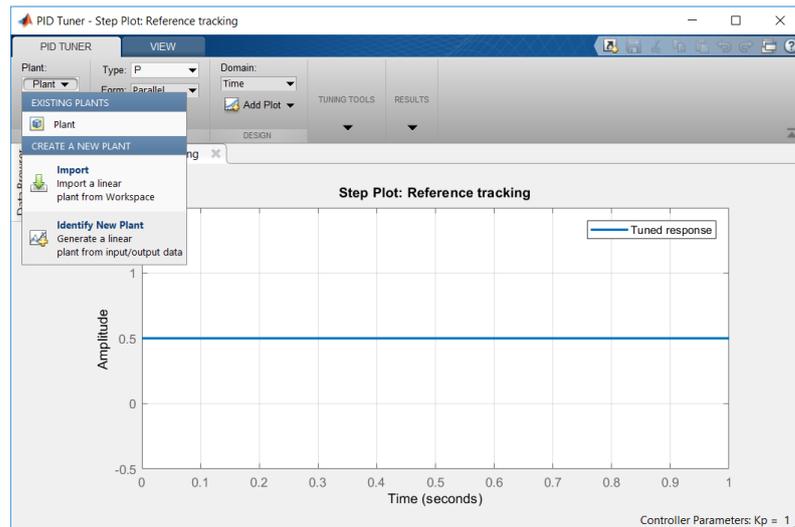


Figura 4.21 Identificación de una nueva planta

Dentro de la pestaña “PLANT IDENTIFICATION” accedemos a los datos experimentales desde la opción “Get I/O Data” y elegimos la opción “Step Response” (véase Figura 4.22).

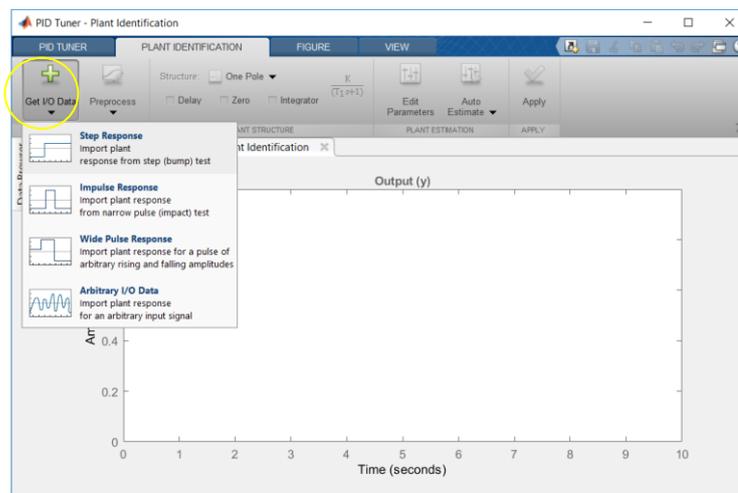


Figura 4.22 Plant Identification.

Para importar los datos a la aplicación PID Tuner se requiere de un escalón donde los datos de salida se encuentran en un archivo MAT (outN) y en la entrada se ingresa un escalón, en la opción Input Signal se ingresan los valores de Amplitud, offset y el tiempo de retraso, en la opción Time Vector se ingresa el tiempo de muestreo (véase Figura 4.23).

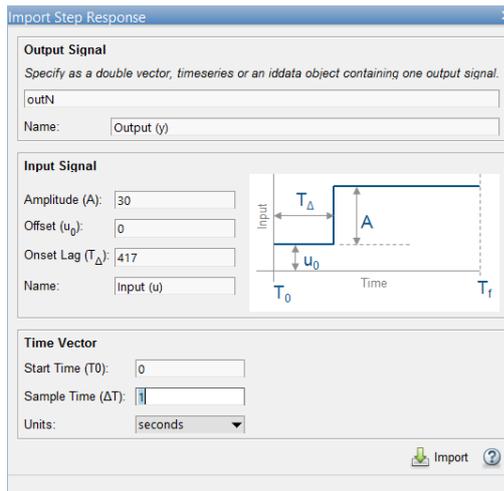


Figura 4.23 Importar Datos

Una vez importado los datos se procede a eliminar el offset desde la opción Preprocess y se habilita la opción Delay ya que la planta contiene un retraso y finalmente mediante el cursor arrastramos hasta que nuestra planta identificada coincida con los datos experimentales (véase Figura 4.24).

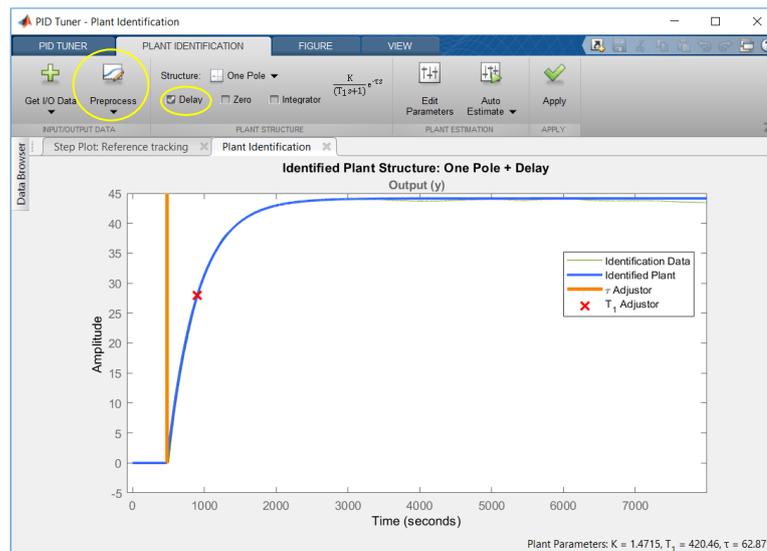


Figura 4.24 Identificación de la planta.

Con la planta identificada se exportan los datos al Workspace de Matlab donde se observa la función de transferencia. A continuación, se muestra la función de transferencia identificada mediante la aplicación PID Tuner:

$$F(s) = e^{-88.424s} * \frac{1.4621}{397.61 \cdot s + 1}$$

4.3 IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO DE FLUJO MÁSCICO DE LA PLANTA A

La adquisición de datos del proceso de Flujo Másico se realiza dentro de la Planta A. Para el proceso de flujo másico se mantiene constante el variador de Frecuencia VF-101 de la bomba P-101 y la variable a manipular es el voltaje aplicado a la válvula FIC-101. Por otra parte, la medición de flujo se realizará a través del transmisor FIT-101 (véase la Figura 4.25).

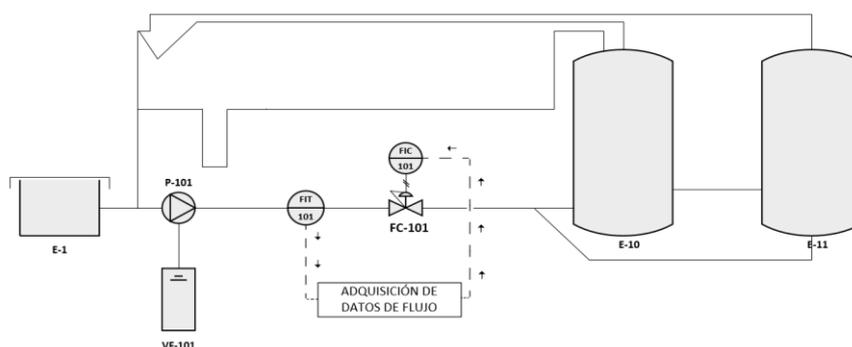


Figura 4.25 Diagrama P&ID del proceso de Adquisición de Datos de Flujo Másico.

Para la identificación del proceso de flujo se realiza un programa en el PLC Siemens S7-300 con el software STEP 7 mediante las variables que intervienen en el proceso. También se crea un proyecto en LabVIEW con las variables creadas en servidor NI OPC Servers. Para mayor detalle véase guía 8. En el explorador de proyectos de LabVIEW se observan las variables que intervienen en el proceso (véase figura 4.26).

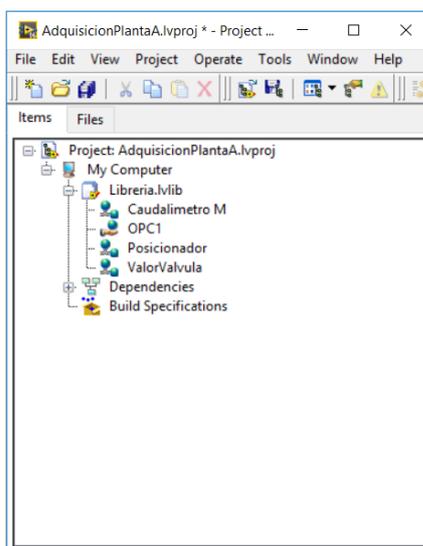


Figura 4.26 Variables creadas en el explorador de proyectos de LabVIEW.

Con las variables configuradas se procede a arrastrarlas a la plataforma de LabVIEW desde el explorador de proyectos como se muestra en la Figura 4.27.

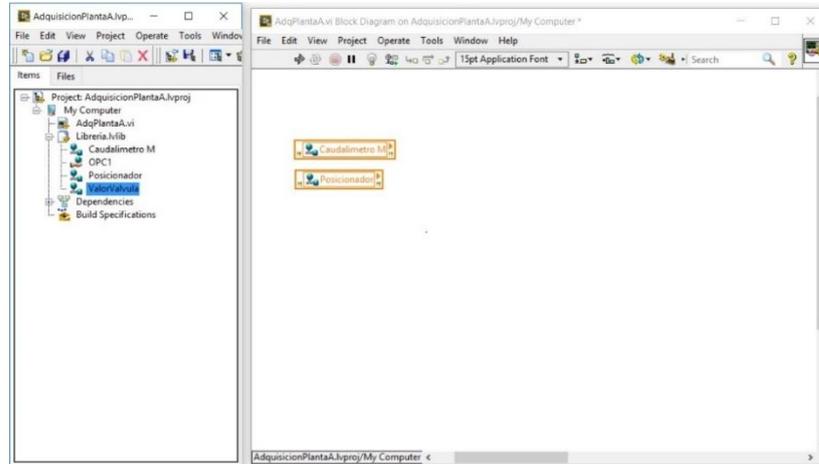


Figura 4.27 Variables utilizadas para el proceso de adquisición.

Es necesario configurar el modo de acceso de cada una de las variables creadas donde elegimos entre el modo de escritura o lectura. Para la variable Caudalímetro M se elige la opción de lectura (Read) y la variable Posicionador de escritura (Write) (véase Figura 4.28).

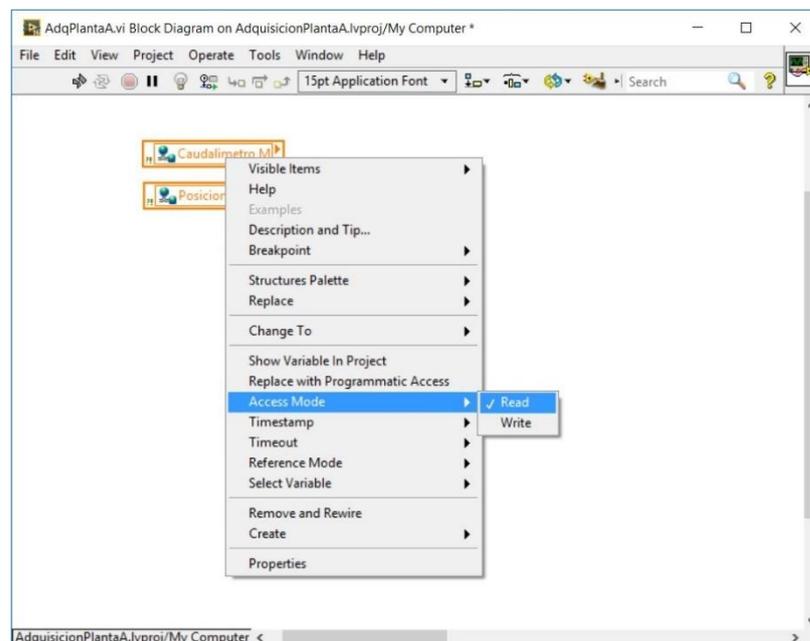


Figura 4.28 Elegir modo de Acceso.

El programa de adquisición se realizó en un VI de LabVIEW. Para mayor detalle véase guía 8. Los datos que se obtienen del PLC no requieren ningún tipo de conversión porque nos entrega datos reales de caudal. Se utiliza el bloque write to Text file para guardar los datos en Excel. El bloque Tsamp sirve para ingresar el tiempo de muestreo en segundos y los demás bloques son visualizadores que nos permiten ver los datos en tiempo real (véase Figura 4.29).

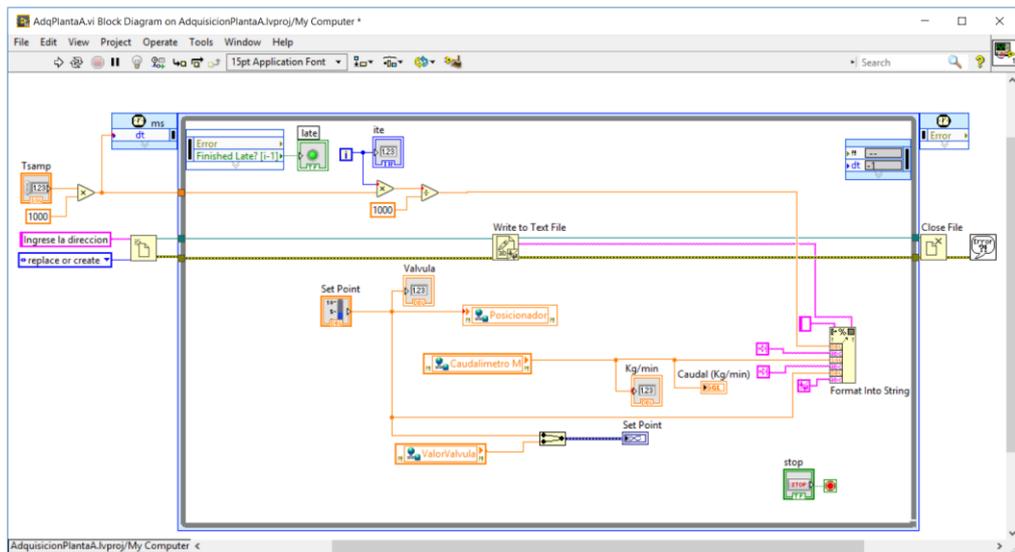


Figura 4.29 Programa para la Adquisición de Datos de Caudal másico.

En el VI principal del programa de LabVIEW nos permite ingresar el tiempo de muestreo en segundos en el bloque Tsamp, mediante la consigna o set point se puede ir variando el valor del caudal másico. Además, en las graficadoras del Set Point y Caudal se puede observar el comportamiento de los datos de caudal en tiempo real (véase Figura 4.30).

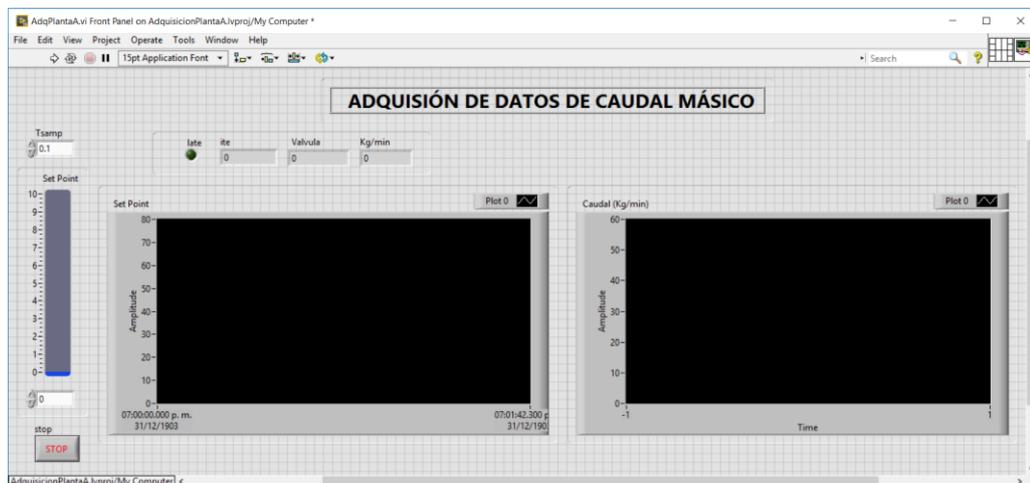


Figura 4.30 Panel Frontal del programa de adquisición de Datos de Caudal másico.

Aplicando diferentes escalones se obtuvo la siguiente gráfica, los datos obtenidos se pueden abrir y visualizar en el software de Excel (véase Figura 4.31).

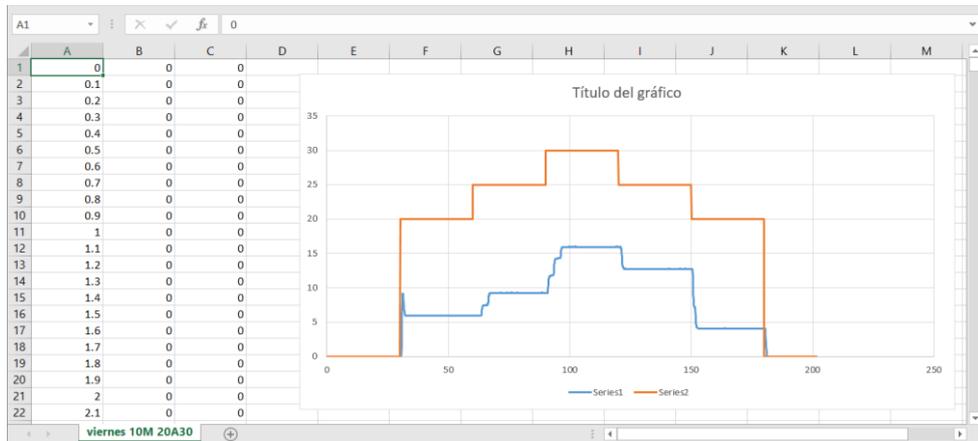


Figura 4.31 Datos generados en Excel de Caudal.

- **Obtención de la función de Transferencia de Flujo másico de la Planta A.**

Para obtener la función de transferencia es necesario transferir los datos al software de Matlab. Los mismos son graficados mediante el comando plot, en donde la línea de color tomate es el valor del escalón y la línea de color azul son los valores de nivel, en el eje “x” los valores están en segundos y en el eje “y” el caudal en Kg/min (Véase figura 4.32).

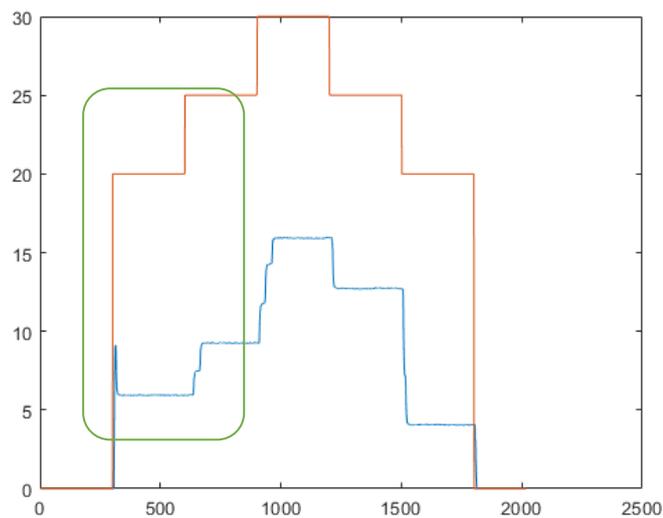


Figura 4.32 Datos generados en Matlab mediante el comando plot

Para obtener la función de transferencia, se toma en cuenta un escalón de los datos adquiridos, para esta prueba se tomó en cuenta los valores de entrada de 20 y 25, los mismos son graficados mediante el comando plot, en donde la línea de color tomate es el valor del escalón y la línea de color azul son los valores de flujo (Véase figura 4.33).

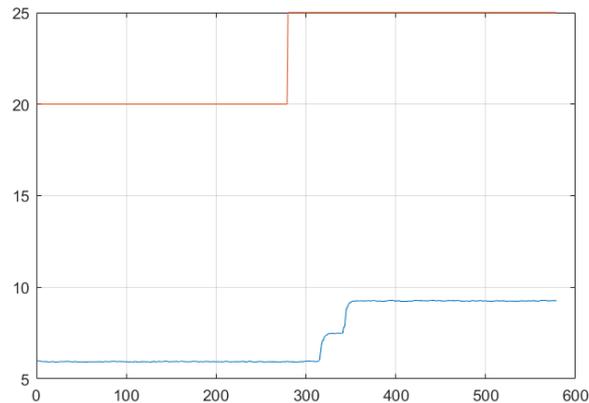


Figura 4.33 Datos generados en Matlab mediante el comando plot del escalón.

Al aplicar un escalón en la gráfica de caudal se aprecia una respuesta en la que se forma como 2 escalones y se estabiliza (véase figura 4.38). La explicación a esa respuesta del proceso es porque el posicionador SIPART PS2 contiene un microcontrolador en el cual está incluido un algoritmo de regulación. El algoritmo es un regulador de 5 puntos predictivo adaptativo. Cuando el error de regulación es grande, la válvula se controla mediante contacto permanente en la zona de marcha rápida mientras el error es intermedio se controla mediante modulación por longitud de impulsos en la zona de marcha lenta y cuando el error de regulación es pequeño no se emite impulsos de regulación, esto ocurre en la zona de muerte adaptativa (véase Figura 4.34) [36].

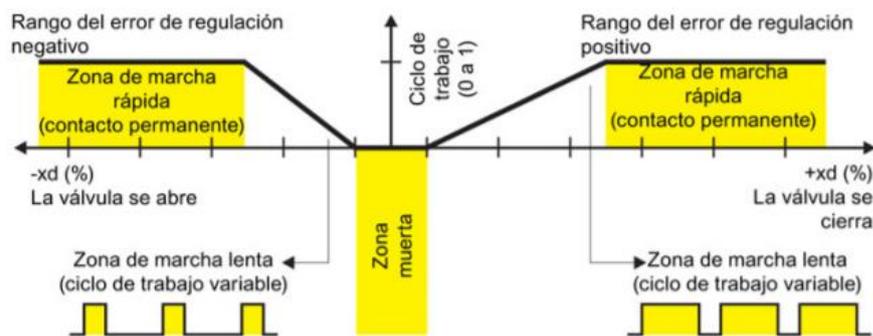


Figura 4.34 Principio de funcionamiento regulador de 5 puntos [36].

Para obtener la función de transferencia se utiliza la aplicación PID Tuner de Matlab donde se requiere de un escalón donde los datos de salida se encuentran en un archivo MAT (salida) y en la entrada se ingresa un escalón, en la opción Input Signal se ingresan los valores de Amplitud, offset y el tiempo de retraso, en la opción Time Vector se ingresa el tiempo de muestreo (véase Figura 4.35).

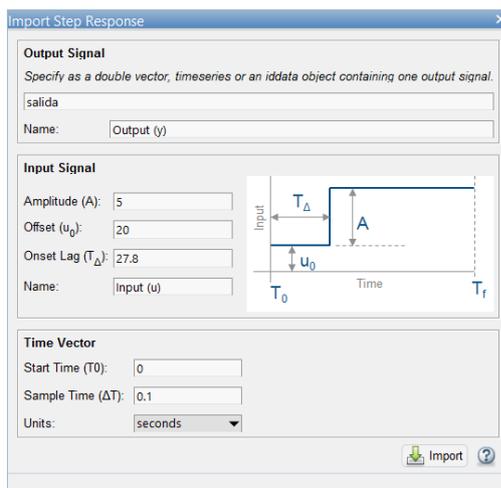


Figura 4.35 Importar Datos

Una vez importado los datos se procede a eliminar el offset desde la opción Preprocess y se habilita la opción Delay ya que la planta contiene un retraso y finalmente mediante el cursor arrastramos hasta que nuestra planta identificada coincida con los datos experimentales (véase Figura 4.36).

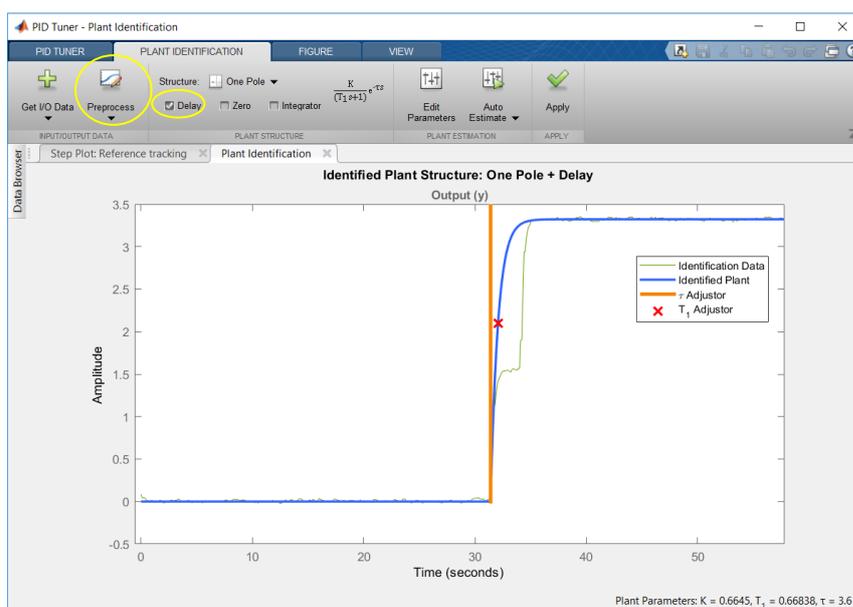


Figura 4.36 Identificación de la planta.

Con la planta identificada se exportan los datos al Workspace de Matlab donde se observa la función de transferencia. A continuación, se muestra la función de transferencia identificada mediante la aplicación PID Tuner:

$$F(s) = e^{-3.6s} * \frac{0.6645}{0.66838 \cdot s + 1}$$

CAPÍTULO 5: CONTROLADORES PID

Dentro del laboratorio LACTI tenemos a disposición los autómatas programables PLC S7-1200 y S7-300 de Siemens, el PLC Schneider Electric los cuales nos permiten realizar un control PID. Entre las herramientas para el control PID tenemos el software de Simulink de Matlab que nos permite crear programas en diagramas de bloques donde ingresamos el valor de las constantes del PID y se enlaza mediante el servidor KEPServer con el PLC S7-1200 o el PLC S7-300. El PLC Schneider Electric cuenta con un bloque PID el cual se programa mediante el software TwidoSuite y el PLC S7-1200 que permite la auto-sintonía a través del software Tía Portal mediante un bloque denominado PID_Compact. En este capítulo se implementan controladores PID en Simulink, PID Auto-sintonía en el PLC Siemens S7-1200, PID en el PLC Schneider Electric en la planta A y B. Para pasos más detallados revisar las guías de práctica 2, 3, 4 y 9.

5.1 CONTROL PID DE UN PROCESO DE FLUJO (PLANTA B)

En el software de Simulink (MATLAB) se realizó un programa mediante un diagrama de bloques, para la adquisición de datos se utilizó el PLC siemens s7-1200 que se configura en el software TIA Portal. Para mayor detalle véase guía 4. Para interactuar entre el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB) se utilizó el software KEPServer.

Para el proceso de control utilizamos el variador de frecuencia (VF-101) para encender la bomba de agua (P-101), como señal de realimentación la señal proporcionada por el transmisor e indicador de flujo (FIT-101). Por otra parte, la señal de control generada por el controlador será enviada al posicionador digital (FIC-201) como se muestra en la figura 5.1.

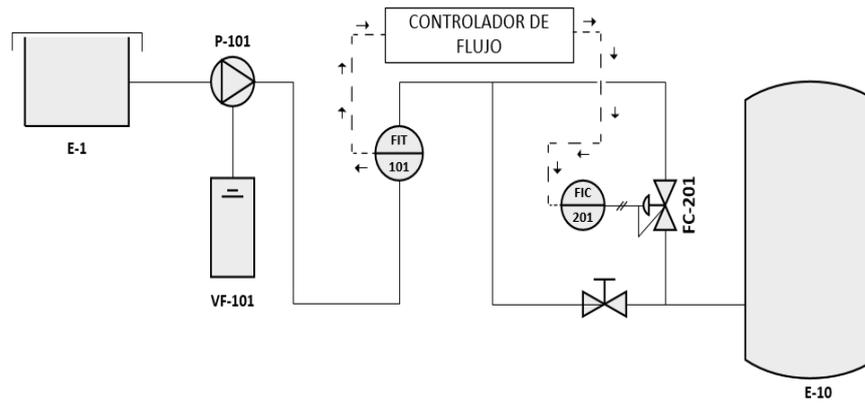


Figura 5.1 Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo.

- **Programa en Simulink (Matlab)**

En el programa se utilizó el diagrama de bloques de un sistema PID. En el bloque OPC Configuration se configura para enlazar el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB). En el bloque OPC Read se agrega la variable del transmisor de flujo que se configura en el servidor OPC (KEPServer). De la misma manera en el bloque OPC Write se agrega la variable para ingresar valores en la válvula electroneumática. Los bloques MATLAB function1, MATLAB function2 son para convertir los datos que nos entrega el PLC siemens S7-1200 a valores reales de caudal. (Véase figura 5.2)

Los valores de las constantes K_p , K_d y K_i se pueden obtener mediante la sintonización en la aplicación PID Tuner de Matlab con la función de transferencia que se obtuvo en el capítulo 4. Mayor detalle véase guía 4.

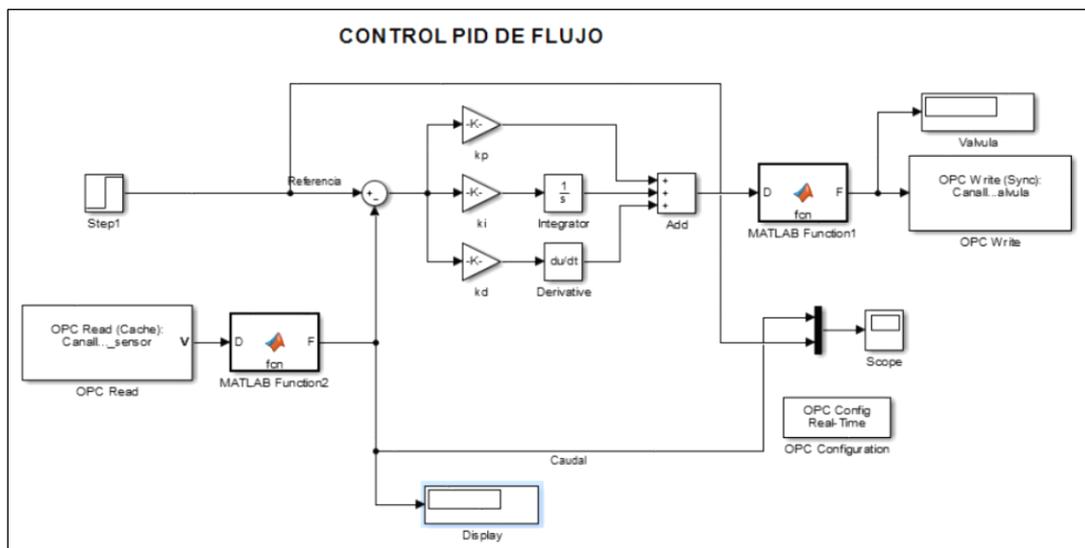


Figura 5.2 Programa en Simulink de un diagrama de bloques PID.

El resultado del control PID de un proceso de flujo se puede apreciar en la figura 5.3. La sintonización se lo realizó en la aplicación PID Tuner de Matlab. Aplicando un escalón se capturo la gráfica en donde el tiempo de asentamiento es de 11 segundos.

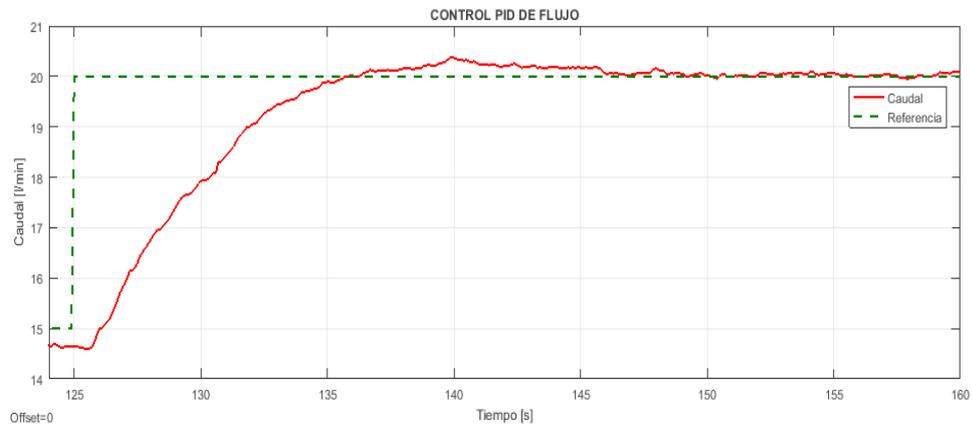


Figura 5.3 Comportamiento del control PID del proceso de flujo.

5.2 CONTROL PID DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE EL PLC SCHNEIDER ELECTRIC (PLANTA B)

En el PLC SCHNEIDER ELECTRIC se realizó un programa en el software TwidoSuite. Para más detalle véase guía 3. En el cual se agregó un bloque PID para ingresar las variables del mismo. Se utilizó el lazo de control de la figura 5.1. Para interactuar entre el PLC Schneider Electric y LabVIEW se utilizó el servidor OPC (NI OPC Servers). Además, se crea un programa para ingresar las constantes K_p , T_d y T_i desde la ventana LabVIEW. Para la sintonización del controlador se utilizó la función de transferencia que se adquirió anteriormente en el capítulo 4.

- Configuración del bloque PID en el software TwidoSuite

En el bloque PID se configura la entrada, en este caso será la variable %MW16 que corresponde al transmisor e indicador de flujo (véase Figura 5.4).

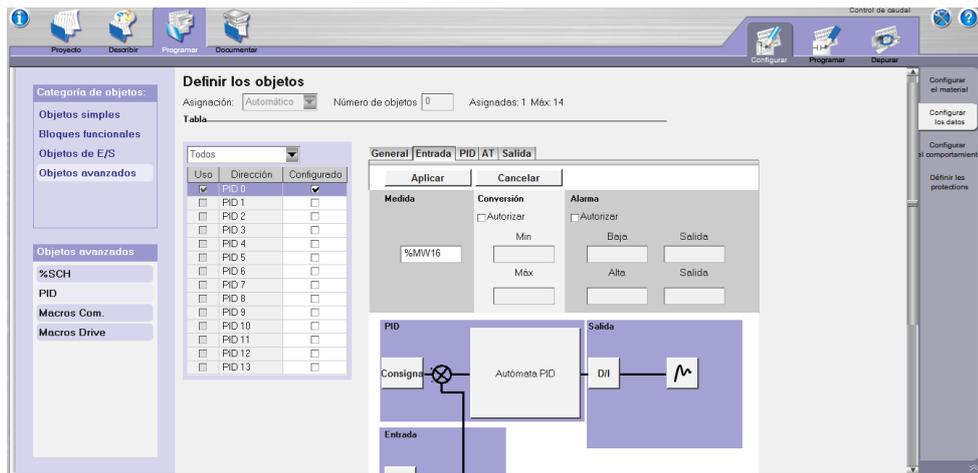


Figura 5.4 Configuración de entrada del bloque PID

A continuación, se configura la variable de consigna, las variables de las constantes K_p , T_d y T_i , también se le asigna una variable al periodo de muestreo que es el tiempo en el cual se ejecuta el proceso (véase Figura 5.5).

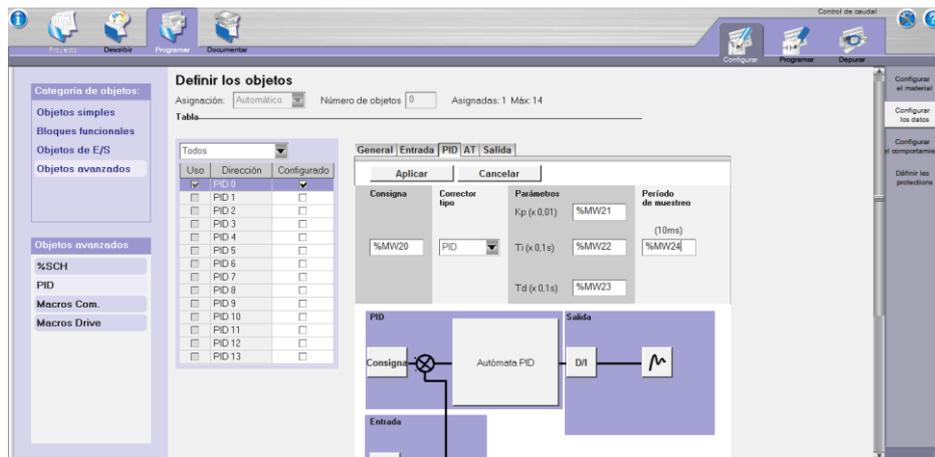


Figura 5.5 Configuración de la consigna y las constantes K_p , T_d , T_i del bloque PID

En el bloque PID también se configura la salida, el cual se le asigna la variable %MW14 que corresponde a la válvula electroneumática y los demás parámetros se mantiene por default (véase figura 5.6). Mayor detalle en la guía 3.

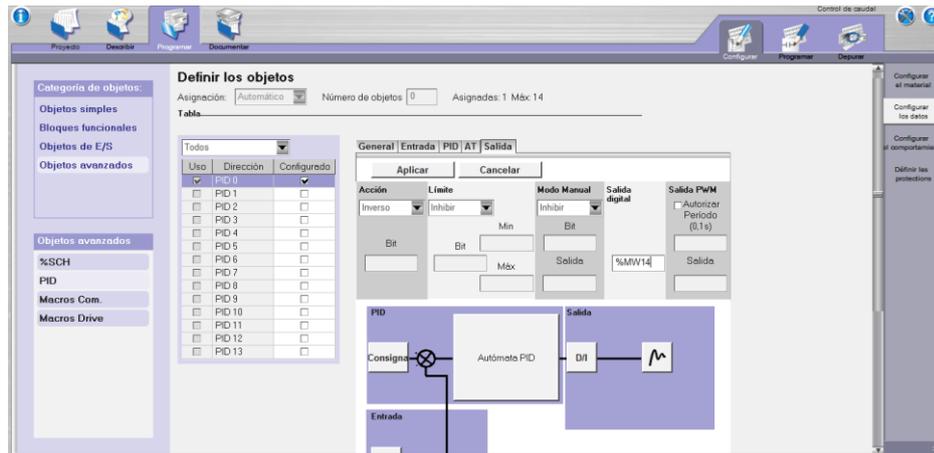


Figura 5.6 Configuración de salida del bloque PID

- Programación en LabVIEW

Las variables que se utilizan mediante el servidor OPC (NI OPC Servers) son asignadas en el software de programación TwidoSuite. Las variables Energizar, Encender_Variador y Frecuencia son para poner en marcha la bomba mediante el variador de frecuencia. La variable Set Point o también llamada consigna es un parámetro del controlador PID en donde se ingresan los valores de caudal, la conversión se realiza porque el PLC Schneider nos entrega datos de 0 a 4095 y lo convertimos a valores de caudal de 0 a 80 l/min. La variable de caudal permite obtener los datos del transmisor e indicador de flujo. En la variable de set point o consigna se realiza la misma conversión de la variable de caudal (véase figura 5.7).

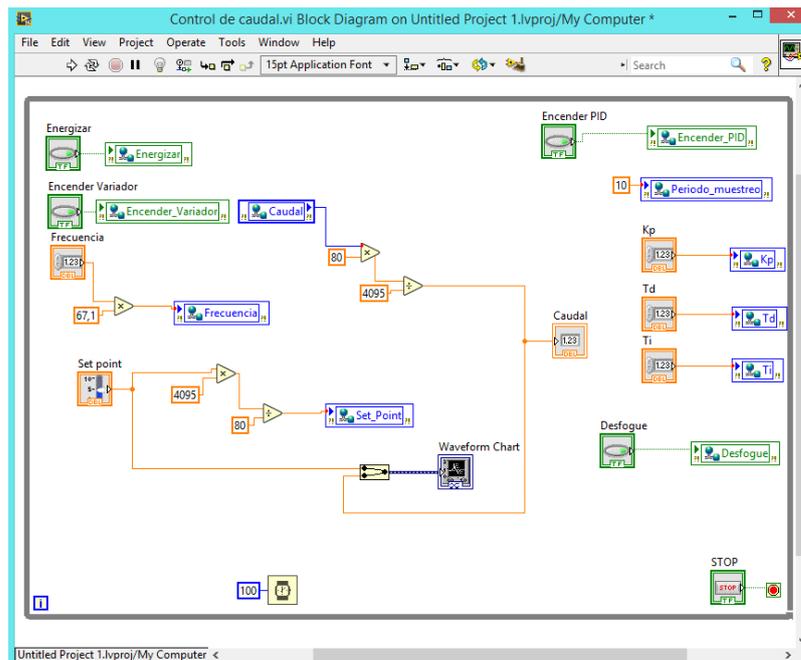


Figura 5.7 Programa en LabVIEW del Control de Caudal

En la ventana principal de LabVIEW se puede apreciar los botones Energizar y Encender que son para poner en marcha el variador de frecuencia que va a permanecer con un valor constante de 60 Hertz. La consigna o Set Point sirve para dar cambios de escalones. El botón Encender PID sirve para encender el bloque PID. En las constantes K_p , T_d y T_i se pueden ingresar valores de acuerdo a la sintonización (véase figura 5.8).

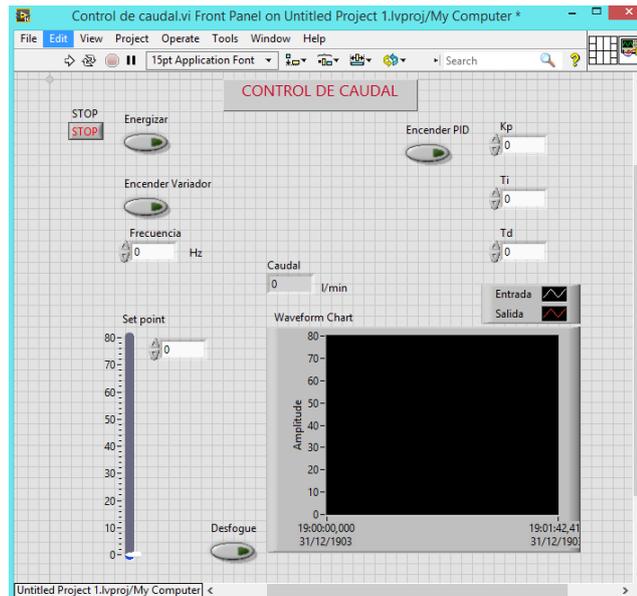


Figura 5.8 Ventana principal en LabVIEW del Control de flujo.

El resultado del control de flujo en el PLC Schneider se puede apreciar en la figura 5.9. Aplicando un escalón se capturó la gráfica en donde el tiempo de asentamiento es de 16 segundos, que es igual al tiempo que se realizó la auto-sintonía en la aplicación PID Tuner de Matlab.

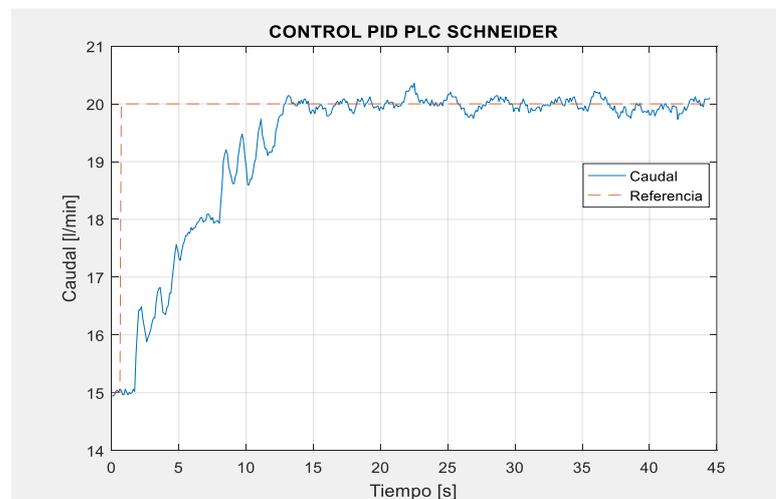


Figura 5.9 Comportamiento del control PID en el PLC Schneider Electric de un proceso de flujo.

5.3 CONTROL PID DE UN PROCESO DE FLUJO Y NIVEL MEDIANTE LA AUTO-SINTONIZACIÓN EN EL PLC SIEMENS S7-1200 (PLANTA B)

El proceso de flujo y nivel se realiza por separado. Para el control de flujo se mantiene constante el variador de frecuencia (VF-101) que comanda la bomba (P-101) y la variable a manipular es el voltaje en la válvula (FIC-201). Por otra parte, la medición de flujo se realizará a través del transmisor (FIT-101). Para el control del proceso de nivel la variable manipulada será la misma, la bomba se mantendrá fija y la medición se obtendrá a través del transmisor (LIT-90) como se muestra en la figura 5.10.

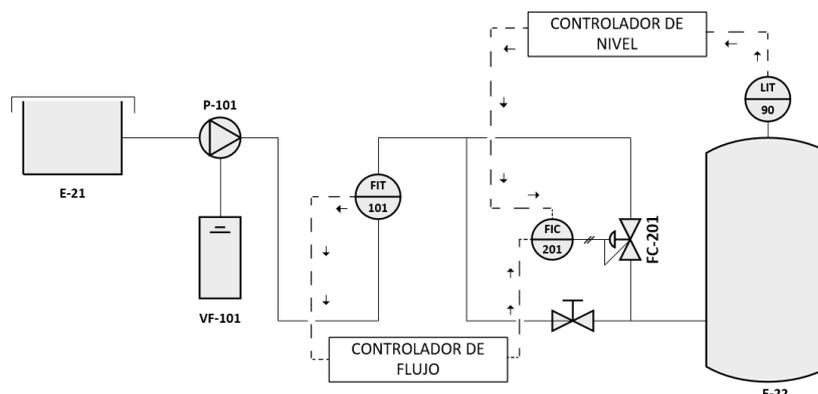


Figura 5.10 Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo y nivel.

5.3.1 CONTROL PID DE UN PROCESO DE FLUJO (PLANTA B)

En el PLC SIEMENS S7-1200 se realiza un programa en el software Tía Portal, donde se agregó el objeto tecnológico PID_Compact para la auto-sintonización del proceso de control de flujo. Para interactuar entre el PLC Siemens y LabVIEW se utilizó el servidor NI OPC Servers. Para mayor detalle véase guía 2.

- Configuración del bloque PID_Compact

El bloque PID_Compact nos permite configurar los parámetros del proceso dependiendo del control que deseamos realizar, en este caso se configura para el control de flujo. En Ajustes básicos se escoge el tipo de regulación de Caudal en l/min

y se seleccionan las variables de entrada Input_PER (analógica) y salida Output_PER (analógica) (véase Figura 5.11).

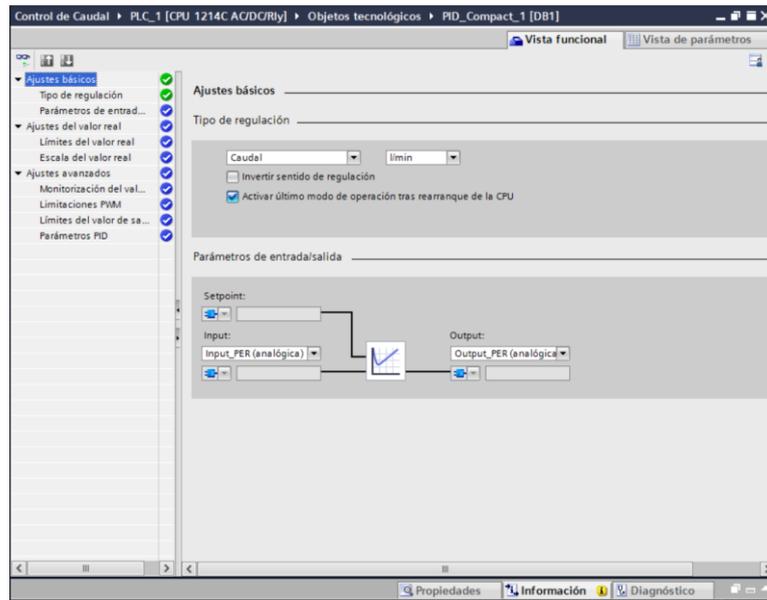


Figura 5.11 Ajustes básicos.

En la opción Límites del valor real se configura como límite inferior un valor de cero y como límite superior de 100. En la Escala del valor real se realiza una conversión en donde el valor real inferior es 0 y el valor real superior es 80 que representa el valor mínimo y máximo de caudal que lee el caudalímetro, además se configuran las opciones de Abajo y Arriba en el rango de 5529 a 27648 que son los valores mínimos y máximos que nos entrega el PLC (véase Figura 5.12).

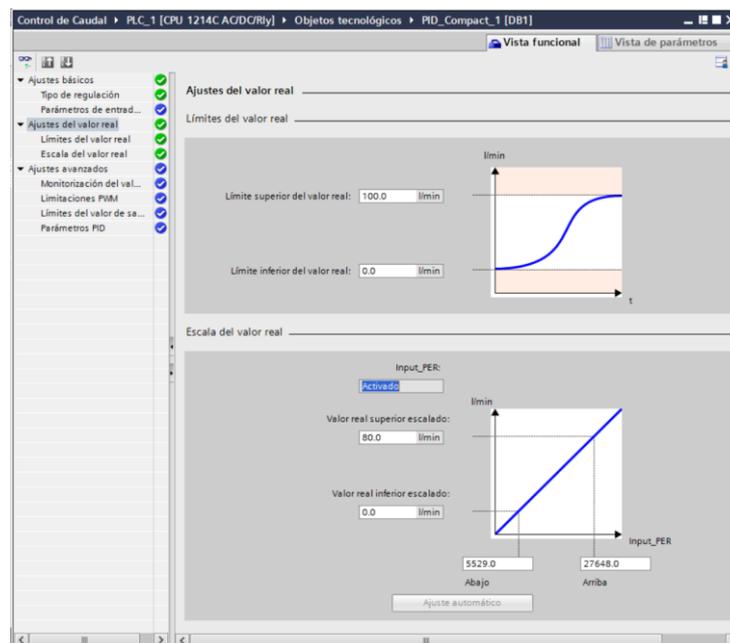


Figura 5.12 Ajustes del valor Real.

En la opción Parámetros PID, el recuadro Activar entrada manual debe estar inhabilitado y en Estructura del regulador se debe seleccionar PID (véase Figura 5.13).

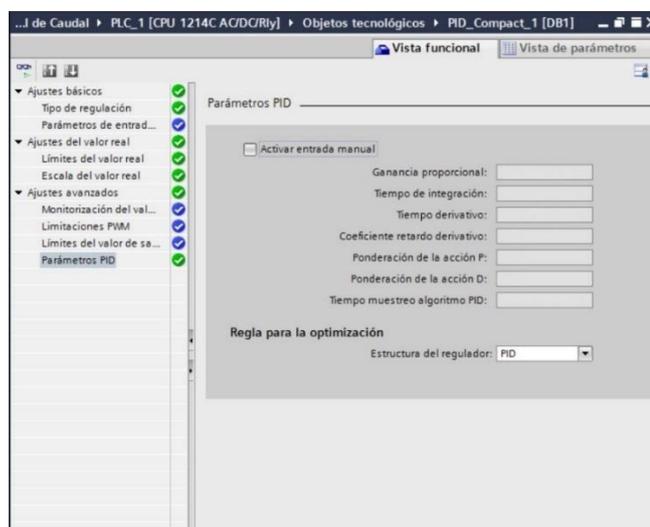


Figura 5.13 Parámetros PID.

Para realizar la auto sintonización elegimos la opción abrir la ventana para puesta en servicio, seleccionamos Start y elegimos la opción optimización fina. El proceso finaliza cuando en la barra de estado se observa “El sistema esta optimizado” (véase Figura 5.14).

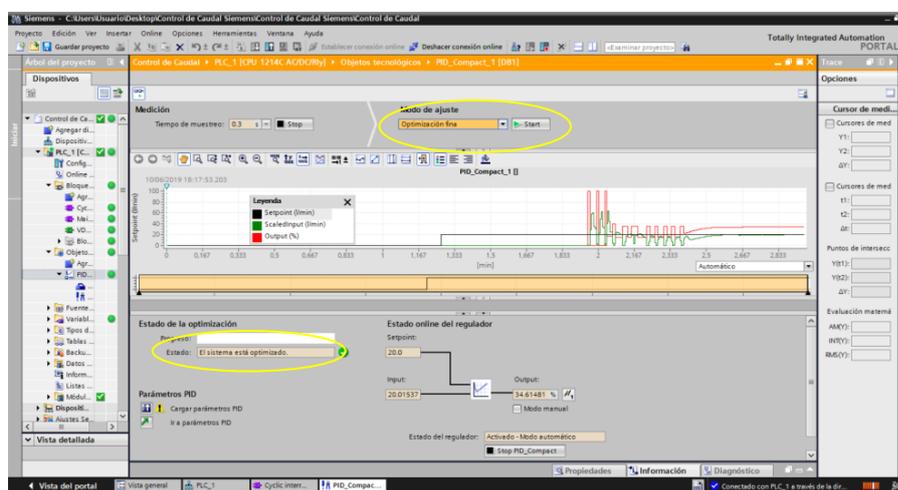


Figura 5.14 Sistema Optimizado.

Una vez culminado la sintonización se procede a cargar los valores del PID desde la opción “Cargar parámetros PID” y para observar los valores del PID elegimos la opción “Ir a parámetros PID” (véase Figura 5.15).

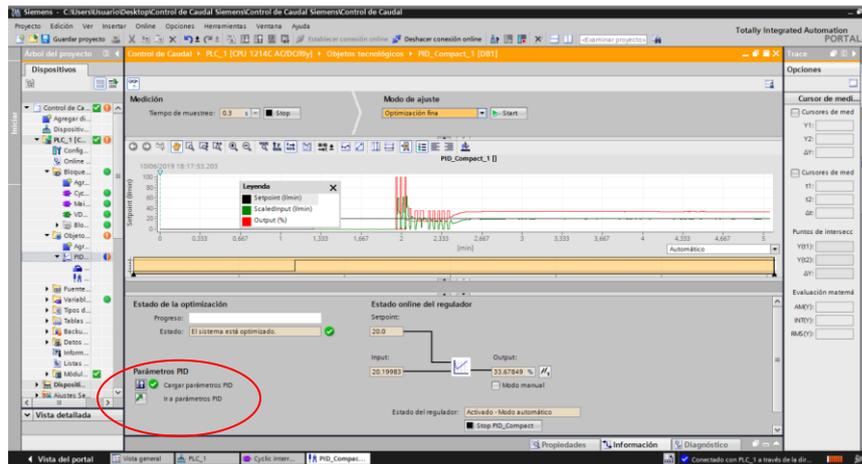


Figura 5.15 Sistema Optimizado.

Ingresando en la opción “Ir a parámetros PID” podemos apreciar los valores que se obtuvieron en la auto sintonización de la ganancia proporcional, tiempo de integración, tiempo derivativo entre otros parámetros (véase Figura 5.16).

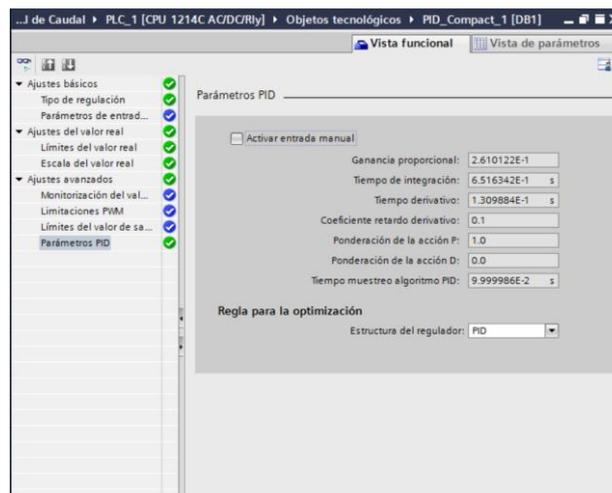


Figura 5.16 Parámetros PID después de la auto-sintonía.

- Programación en LabVIEW

Las variables que se utilizan mediante el servidor OPC (NI OPC Servers) se crean en el software Tía Portal. La variable Set Point o también llamada consigna es un parámetro del controlador PID en donde se ingresan los valores de caudal, la conversión se realiza porque el PLC Siemens nos entrega valores en un rango de 5530 a 27648 y lo convertimos a valores de caudal de 0 a 80 l/min. La variable de caudal son los datos que nos entregan el transmisor e indicador de flujo. La variable de desfogue se lo utiliza en caso de emergencia para vaciar el tanque (Véase figura 5.17).

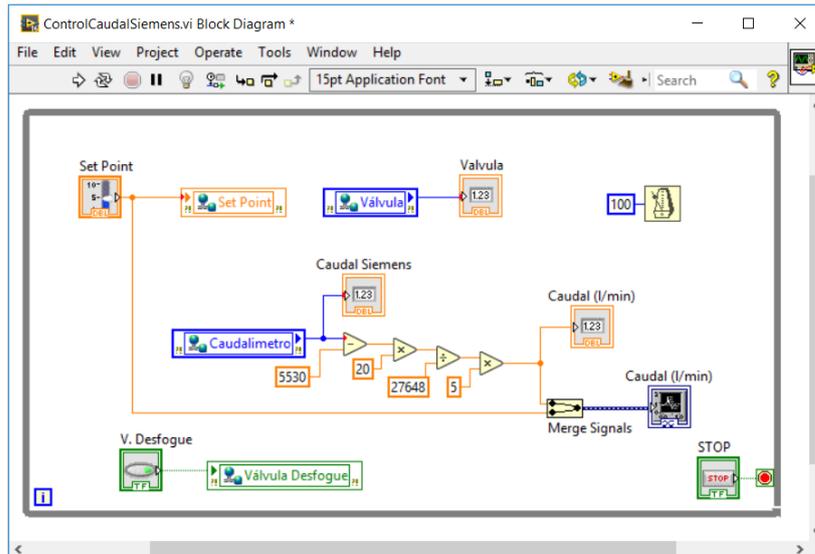


Figura 5.17 Programa en LabVIEW del Control de Caudal

En la ventana principal de LabVIEW se puede apreciar el Set Point y los indicadores de caudal en l/min. La consigna o Set Point sirve para dar cambios de escalones o variar el caudal y el botón de la válvula de desfogue para emergencias (Véase figura 5.18).

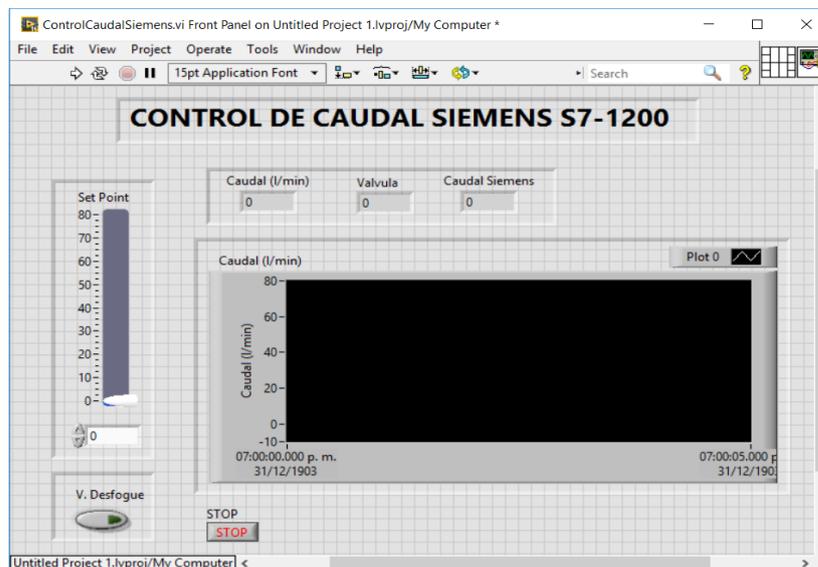


Figura 5.18 Ventana principal en LabVIEW del Control de flujo.

El resultado del control de flujo en el PLC Siemens mediante la Auto-sintonización se puede apreciar en la figura 5.19 donde se aplican varios escalones para verificar el comportamiento del controlador.

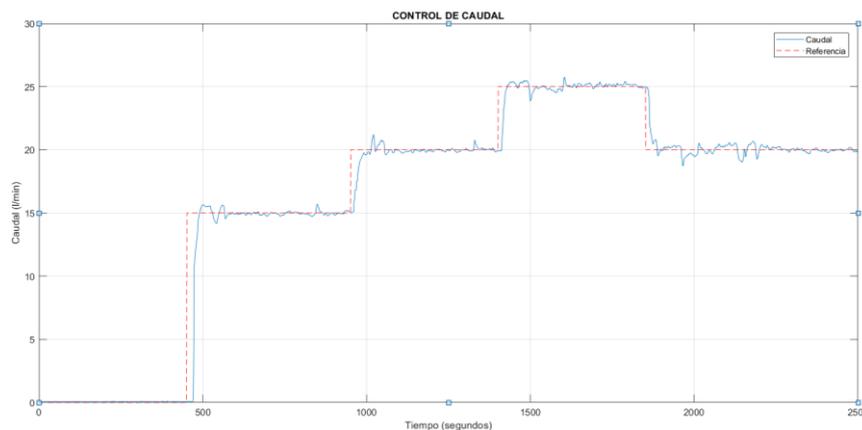


Figura 5.19 Comportamiento del control PID en el PLC Siemens de un proceso de Control de flujo.

5.3.2 CONTROL PID DE UN PROCESO DE NIVEL (PLANTA B)

Para la sintonización de un proceso de nivel se lleva a cabo el mismo procedimiento que la sintonización de flujo mediante el PLC SIEMENS S7-1200 en el software Tía Portal a través del objeto tecnológico PID_Compact. Para mayor detalle véase guía 2. A si mismo se utilizó el servidor OPC (NI OPC Servers) para interactuar entre el PLC SIEMENS y LabVIEW.

- Configuración del bloque PID_Compact

En este caso para el control de nivel se configura en Ajustes básicos el tipo de regulación general en porcentaje (%), las variables de entrada Input_PER (analógica) y salida Output_PER (analógica). En la opción Limites del valor real se configura como límite inferior un valor de cero y como límite superior de 100. Para la Escala del valor real se realiza una conversión en donde el valor real inferior es 0 y el valor real superior es 100 que representa el valor mínimo y máximo de nivel que mide el sensor, además se configuran las opciones de Abajo y Arriba en el rango de 5529 a 27648 que son los valores mínimos y máximos que nos entrega el PLC.

Para realizar la sintonización así mismo elegimos la opción abrir la ventana para puesta en servicio, seleccionamos Start y elegimos la opción optimización fina. El proceso finaliza cuando en la barra de estado se observa “El sistema esta optimizado”. Para cargar los parámetros PID dirigirse a la opción “Cargar parámetros PID” y para observar las ganancias del controlador ir a la opción “Ir a parámetros PID” (véase Figura 5.20).

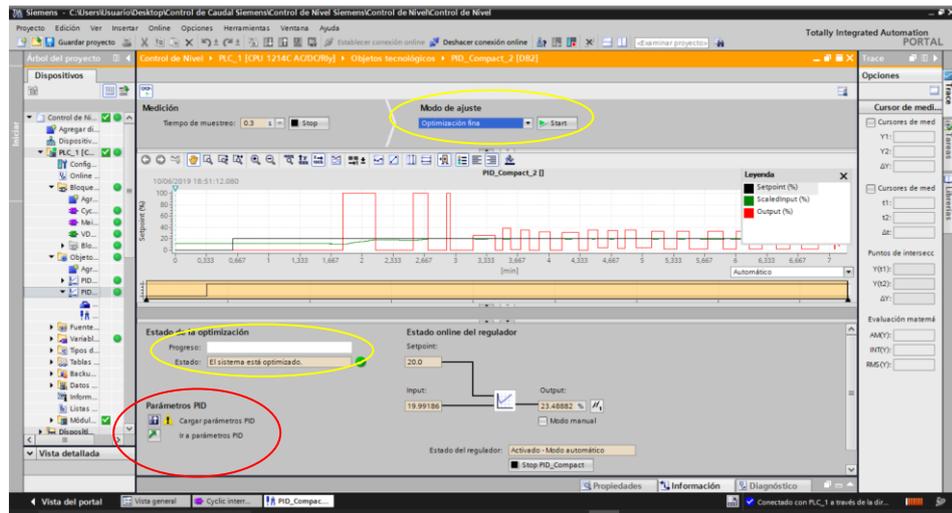


Figura 5.20 Sistema Optimizado.

La opción “Ir a parámetros PID” se observa los valores que se obtuvieron en la auto sintonización de la ganancia proporcional, tiempo de integración, tiempo derivativo entre otros parámetros para el control de nivel (véase Figura 5.21).

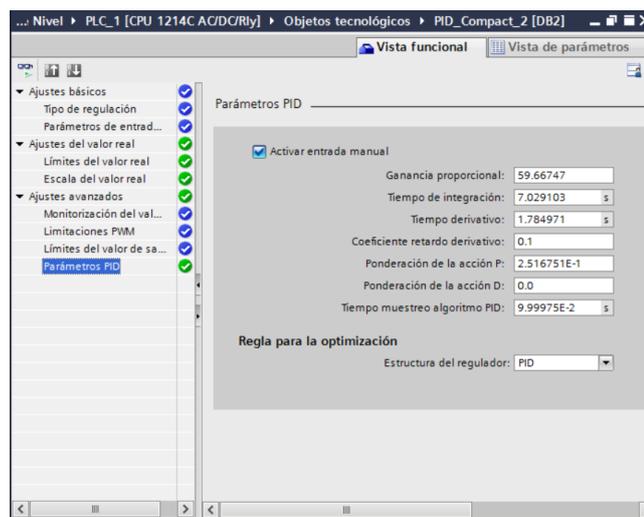


Figura 5.21 Parámetros PID después de la auto-sintonía.

- Programación en LabVIEW

Las variables que se utilizan mediante el servidor OPC (NI OPC Servers) son las que se crea en el software Tía Portal. La variable Set Point se ingresan valores de nivel. En la variable de nivel se realiza una conversión ya que el PLC Siemens nos entrega valores en un rango de 5530 a 27648 y lo convertimos a valores de nivel de 0 a 100. (Véase figura 5.22).

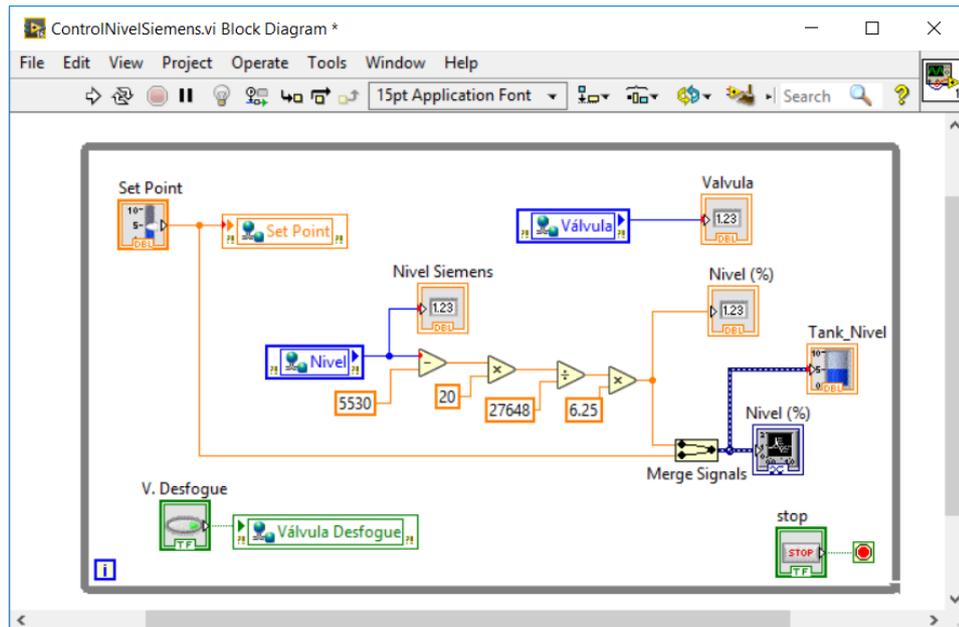


Figura 5.22 Programa en LabVIEW del Control de Nivel

En la ventana principal de LabVIEW se puede apreciar el Set Point y los indicadores de nivel. La consigna o Set Point sirve para dar cambios de escalones y el botón de la válvula de desfogue para vaciar el tanque en caso de emergencia (Véase figura 5.23).

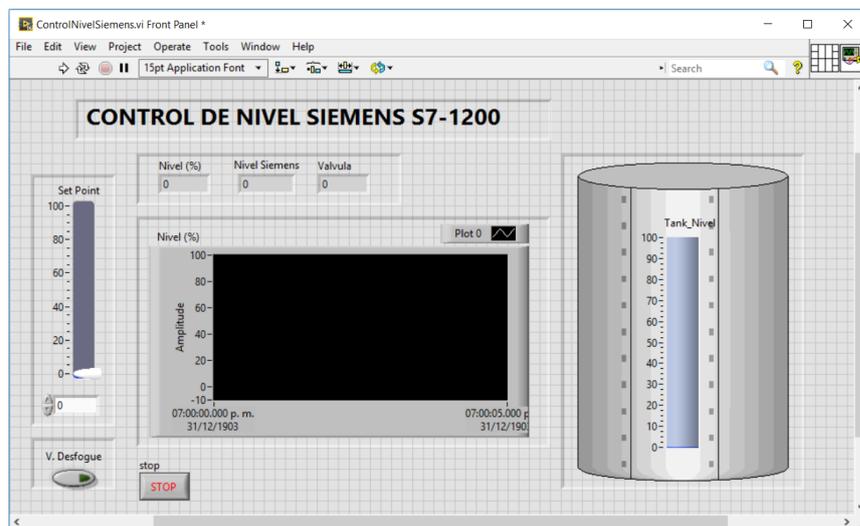


Figura 5.23 Ventana principal en LabVIEW del Control de nivel.

El resultado del control de nivel en el PLC Siemens mediante la Auto-sintonización se puede apreciar en la figura 5.24 donde se aplican varios escalones para verificar el comportamiento del controlador.

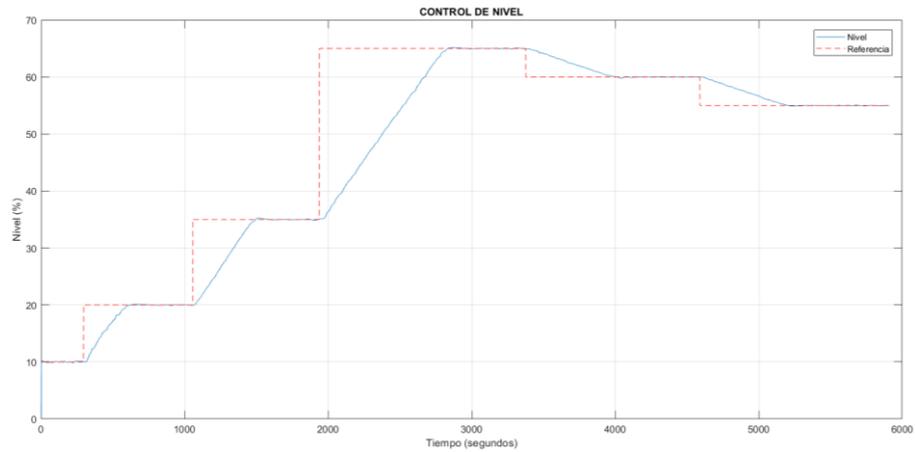


Figura 5.24 Comportamiento del control PID en el PLC Siemens de un proceso de Control de nivel.

5.4 CONTROL PID DE UN PROCESO DE FLUJO MÁSSICO (PLANTA A)

En el software de Simulink (MATLAB) se realizó un programa mediante un diagrama de bloques, para la adquisición de datos se utilizó el PLC siemens s7-300 que se configura en el software STEP7. Para mayor detalle véase guía 9. Para interactuar entre el PLC Siemens S7-300 y Simulink (MATLAB) se utilizó el software KEPServer.

Para el proceso de control utilizamos el variador de frecuencia (VF-101) para encender la bomba de agua (P-101), como señal de realimentación, la señal proporcionada por el transmisor e indicador de flujo (FIT-101). Por otra parte, la señal de control generada por el controlador será enviada al posicionador (FIC-101) como se muestra en la figura 5.25.

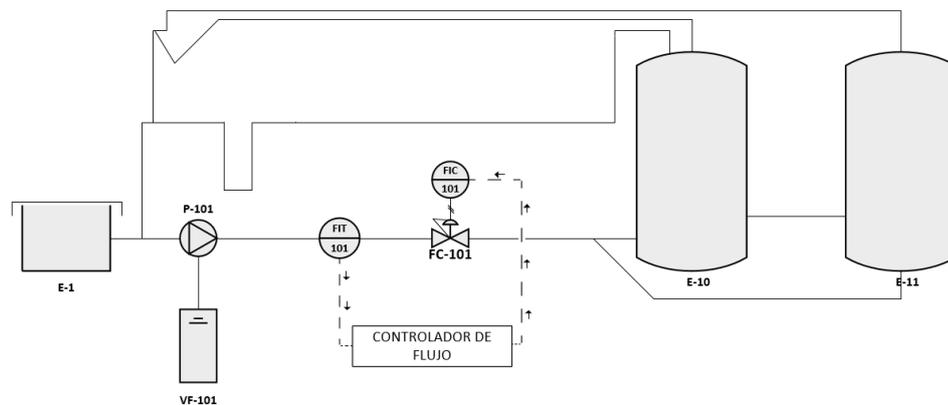


Figura 5.25 Diagrama P&ID del proceso de control de flujo másico.

- Programa en Simulink (Matlab)

En el programa se utilizó el diagrama de bloques de un sistema PID. En el bloque OPC Configuration se configura para enlazar el PLC Siemens S7-300 y Simulink (MATLAB). En el bloque OPC Read se agrega la variable del transmisor de flujo que se configura en el servidor OPC (KEPServer). De la misma manera en el bloque OPC Write se agrega la variable para ingresar valores en la válvula electroneumática. Los bloques MATLAB function1, MATLAB function2 son para limitar los datos en un rango de 0 a 100 que ingresan a la válvula (véase Figura 5.26)

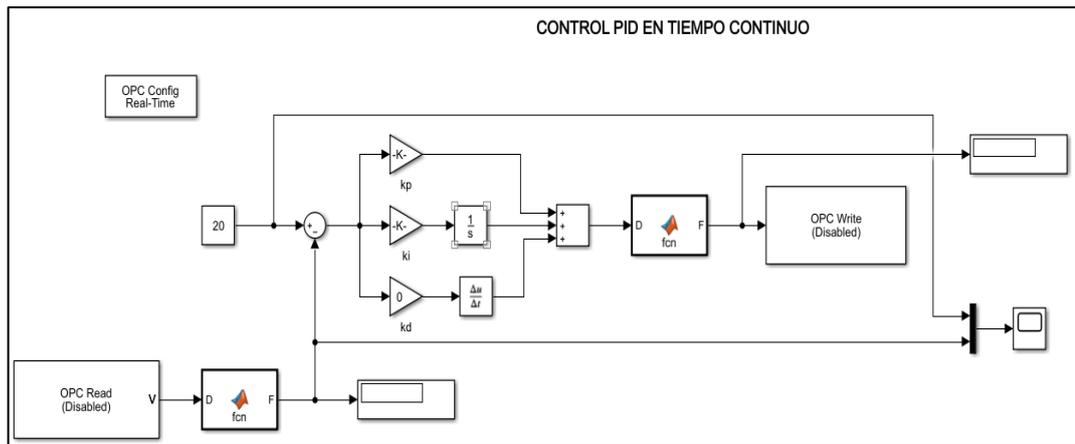


Figura 5.26 Programa en Simulink de un diagrama de bloques PID.

El resultado del control PID de un proceso de flujo se puede apreciar en la figura 5.27. La sintonización se lo realizó en la aplicación PID Tuner de Matlab. Aplicando un escalón se capturo la gráfica en donde el tiempo de asentamiento es de 17.5 segundos.

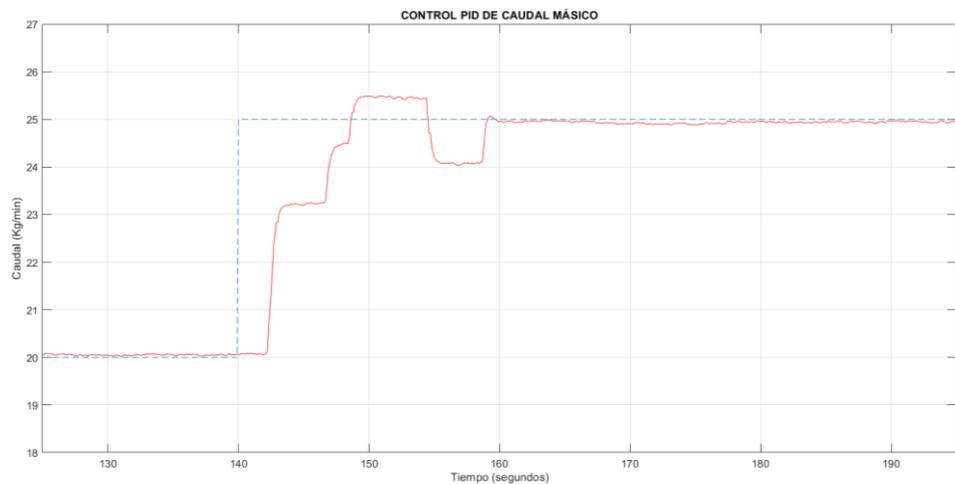


Figura 5.27 Comportamiento del control PID del proceso de flujo másico.

CAPÍTULO 6: CONTROLADORES EN ESPACIO DE ESTADOS

Para el control en Espacio de Estados utilizamos los servidores NI OPC Servers y el KEPServer para la comunicación con el PLC S7-1200 y el PLC S7-300. También se realiza un control utilizando el sistema CompactRIO. En este capítulo se implementan controladores mediante la técnica de realimentación de estados en tiempo continuo y en tiempo discreto. Para pasos más detallados revisar las guías de práctica 5, 6, 7 y 10.

6.1 CONTROL EN TIEMPO CONTINUO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS (PLANTA B)

En el software de Simulink (MATLAB) se realizó un programa mediante un diagrama de bloques. En el lazo de control se puede apreciar los equipos utilizados. Además, para la adquisición de datos se utilizó el PLC siemens s7-1200 que se configura en el software TIA Portal. Para mayor detalle véase guía 5. Para interactuar entre el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB) se utiliza el software KEPServer.

- Descripción del lazo de Control

Para el proceso de control utilizamos el variador de frecuencia (VF-101) para encender la bomba de agua (P-101), como señal de realimentación, la señal proporcionada por el transmisor e indicador de flujo (FI-101). Por otra parte, la señal de control generada por el controlador será enviada al posicionador digital (FIC-201) como se muestra en la figura 6.1.

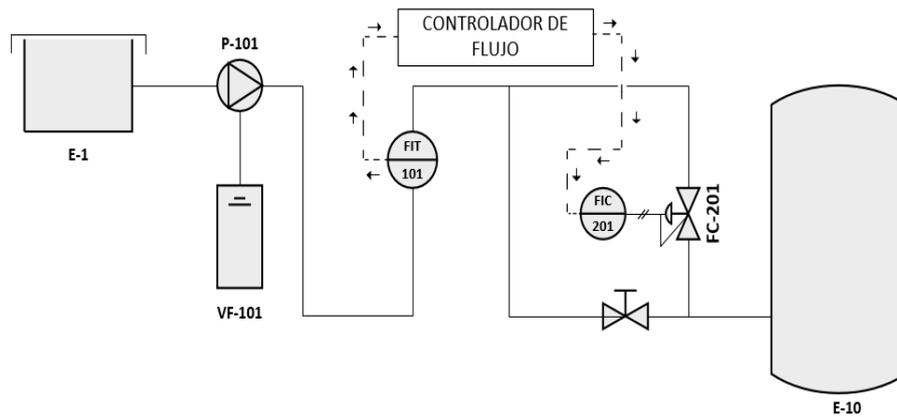


Figura 6.1 Diagrama P&ID del proceso de Control de flujo.

- Programa en Simulink (Matlab)

En el programa el control en tiempo continuo del proceso de flujo se utilizó el diagrama de bloques de un servosistema tipo 1 con observador de estados. En el bloque OPC Configuration se configura para enlazar el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB). En el bloque OPC Read se agrega una variable del transmisor de flujo que se configura en el servidor OPC (KEPServer). De la misma manera en el bloque OPC Write se agrega una variable para ingresar los valores en la válvula electroneumática. Los bloques MATLAB function1, MATLAB function2 son para convertir los datos que nos entrega el PLC siemens S7-1200 a valores reales de caudal. (Véase figura 6.2)

Mediante un programa en Matlab que se encuentra en el APÉNDICE A se obtienen los valores de las matrices A, B y C. Además, en el programa se impone el tiempo de asentamiento y el máximo sobrepaso para obtener los valores de las matrices K1, K2 y Ke.

6.2 CONTROL EN TIEMPO DISCRETO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS (PLANTA B)

En el software de Simulink (MATLAB) se realiza un programa mediante un diagrama de bloques. Se utilizó el lazo de control de la figura 6.1 donde se puede apreciar los equipos utilizados. Además, para la adquisición de datos se utilizó el PLC siemens S7-1200 que se configura en el programa de TIA Portal. Para interactuar entre el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB) se utilizó el servidor OPC (KEPServer). Para mayor detalle véase guía 6.

- Programación en Simulink (Matlab)

En el programa se utilizó el diagrama de bloques de un sistema de seguimiento con realimentación de estado observado. En el bloque OPC Configuration se configura para enlazar el PLC Siemens S7-1200 y Simulink (MATLAB). En el bloque OPC Read se agrega la variable del transmisor de flujo que se configura en el servidor OPC (KEPServer). De la misma manera en el bloque OPC Write se agrega la variable para ingresar valores en la válvula electroneumática. Los bloques MATLAB function1, MATLAB function2 son para convertir los datos que nos entrega el PLC siemens S7-1200 a valores reales de caudal. (Véase figura 6.4).

Mediante un programa en Matlab que se encuentra en el APÉNDICE B se obtienen los valores de las matrices G, H y C. Además, en el programa se impone el tiempo de asentamiento y el sobrepaso máximo para obtener los valores de las matrices K1, K2 y Ke.

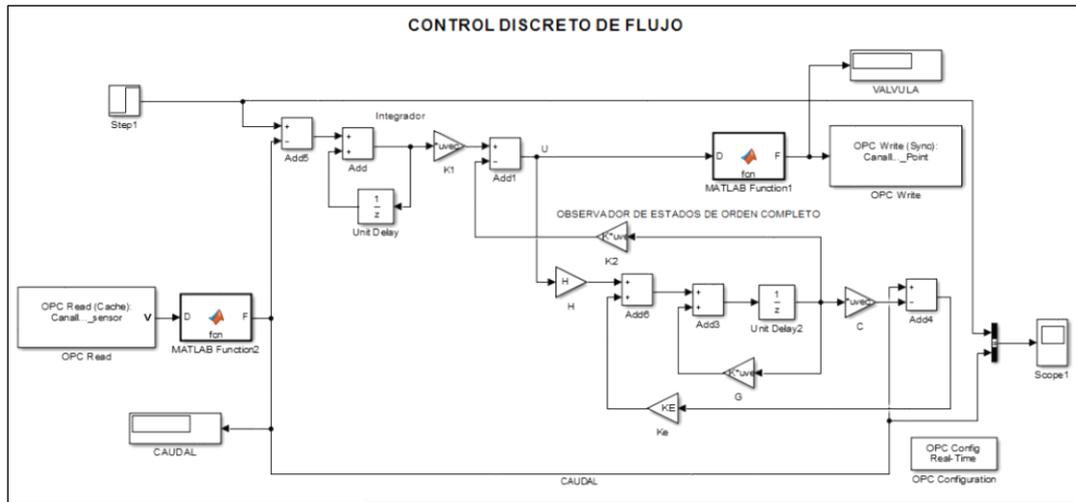


Figura 6.4 Programa en Simulink de control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

El resultado del control en tiempo discreto del proceso de flujo mediante la técnica de realimentación de estados se puede apreciar en la figura 6.5. Aplicando un escalón se capturo la gráfica en donde el tiempo de asentamiento es de 20 segundos y el máximo sobrepaso de 0,2% que se impuso en el diseño.

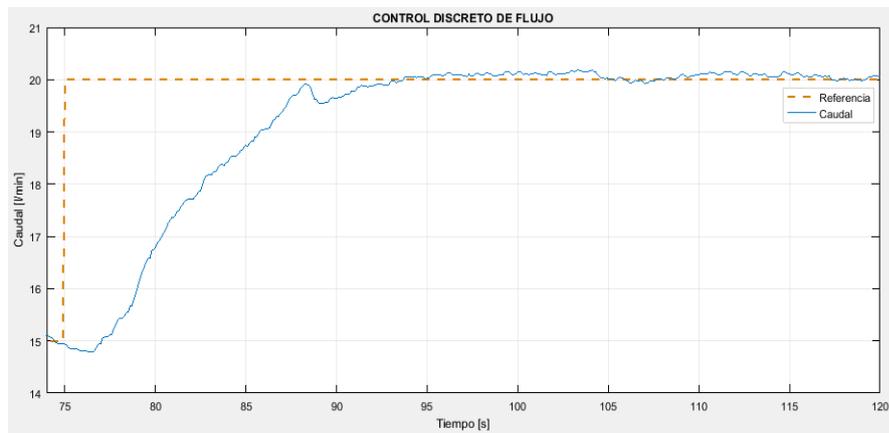


Figura 6.5 Comportamiento del control de flujo en tiempo discreto.

6.3 CONTROL EN TIEMPO DISCRETO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS CON EL SISTEMA COMPACTRIO (PLANTA B)

En el software de LabVIEW se realizó un programa mediante las ecuaciones del sistema de seguimiento con realimentación de estado observado (Véase figura 6.6). El lazo de control que utilizamos es el lazo de control expuesto anteriormente en la figura 6.1. Para la adquisición de datos se utilizó el sistema CompactRIO, las

conexiones y configuraciones se expusieron en el capítulo 3. Para mayor detalle véase guía 7.

- Programación en LabVIEW

En el VI principal de LabVIEW se puede apreciar la referencia o consigna que sirve para dar cambios de escalones o variar el caudal. El caudalímetro y el graficador waveform Chart nos permite visualizar los valores de caudal en tiempo real (véase figura 6.6).

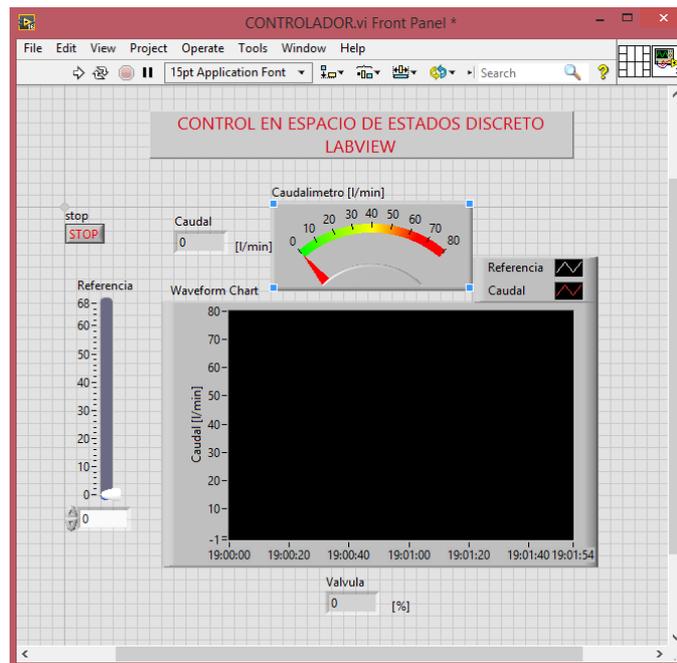


Figura 6.6 Programa en LabVIEW de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados con el sistema CompactRIO.

En el Matlab script que se encuentra en la parte izquierda (véase figura 6.7) utilizamos el programa que se encuentra en el APENDICE B. En la programación se utiliza la función de transferencia de la Planta B obtenida anteriormente en el capítulo 4 lo transformamos y obtenemos matrices G, H y C en espacio de estados en tiempo discreto. Para obtener los valores de las matrices K1, K2 y Ke se impone el tiempo de asentamiento y la máxima sobreelongación para el sistema de seguimiento con realimentación de estado observado.

En el siguiente Matlab script se introducen las ecuaciones del sistema de seguimiento con realimentación de estado observado. Se agrega la variable del transmisor e indicador de caudal en la que se encuentra conectada al sistema CompactRIO y se realiza una conversión para obtener los valores reales de caudal.

También se agrega la variable de la válvula electro neumática que se encuentra conectada al sistema CompactRIO y se realiza la conversión para ingresar valores de voltaje en la misma (véase figura 6.7).

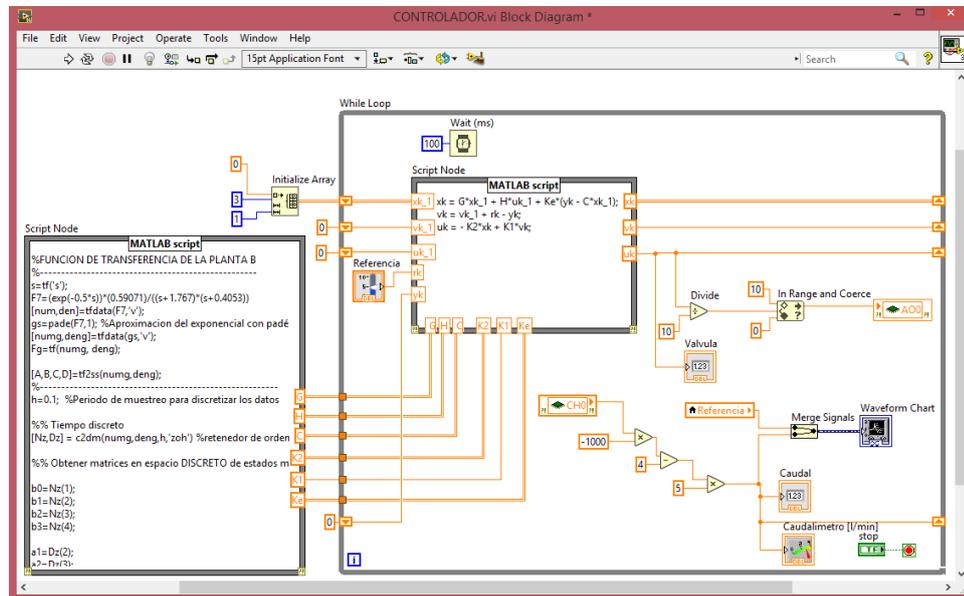


Figura 6.7 Programa en LabVIEW del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

El resultado del control de flujo mediante la técnica de realimentación de estados se puede apreciar en la figura 6.8. Aplicando un escalón se capturo la gráfica en donde el tiempo de asentamiento es de 20 segundos, que es el tiempo que nos impusimos en el diseño.

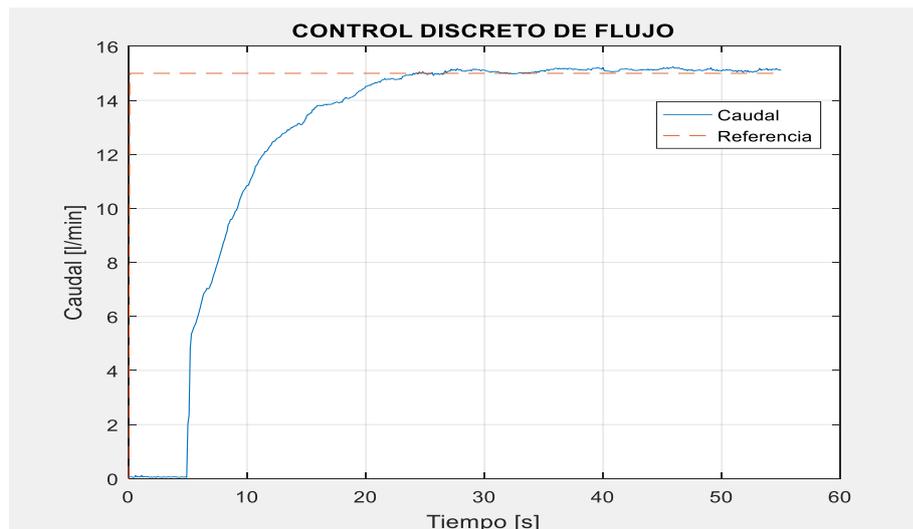


Figura 6.8 Comportamiento del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

6.4 CONTROL EN TIEMPO DISCRETO DE UN PROCESO DE FLUJO MÁSICO MEDIANTE LA TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS (PLANTA A).

En el software de LabVIEW se realizó un programa mediante las ecuaciones del sistema de seguimiento con realimentación de estado observado (Véase figura 6.9). El lazo de control que utilizamos es el lazo de control expuesto anteriormente en la figura 6.1. Para la adquisición de datos se utilizó el PLC S7-300 mediante el NI OPC Servers. Para mayor detalle véase guía 10.

- Programación en LabVIEW

En el VI principal de LabVIEW se puede apreciar la referencia o consigna que sirve para dar cambios de escalones o variar el caudal. El caudalímetro y el graficador waveform Chart nos permite visualizar los valores de caudal másico en tiempo real (véase figura 6.9).

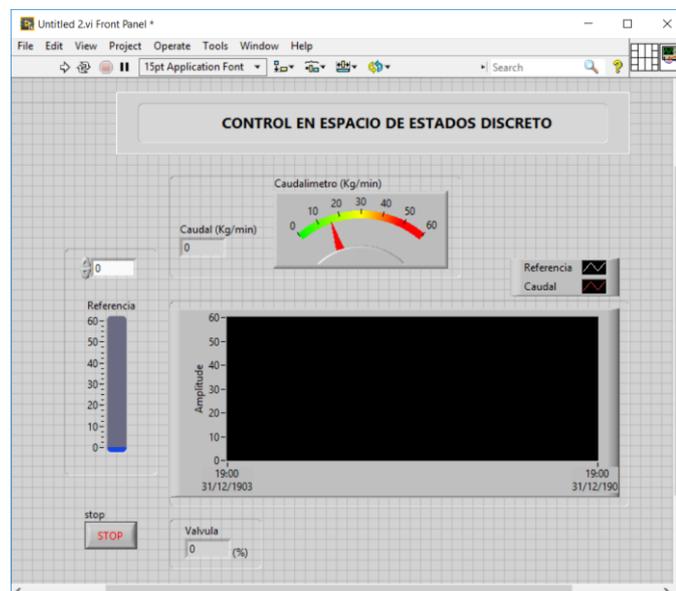


Figura 6.9 Programa en LabVIEW de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

En el Matlab script que se encuentra en la parte izquierda (véase figura 6.10) utilizamos el programa que se encuentra en el apéndice C. En la programación se utiliza la función de transferencia de la Planta A obtenida anteriormente en el capítulo 4 lo transformamos y obtenemos las matrices G, H y C en espacio de estados en tiempo discreto. Para obtener los valores de las matrices K1, K2 y Ke se impone el tiempo de

asentamiento y la máxima sobreelongación para el sistema de seguimiento con realimentación de estado observado.

En el siguiente Matlab script se introducen las ecuaciones del sistema de seguimiento con realimentación de estado observado. Se agrega la variable del transmisor e indicador de caudal en la que se encuentra conectado el PLC S7-300. También se agrega la variable de la válvula electro neumática (véase figura 6.10).

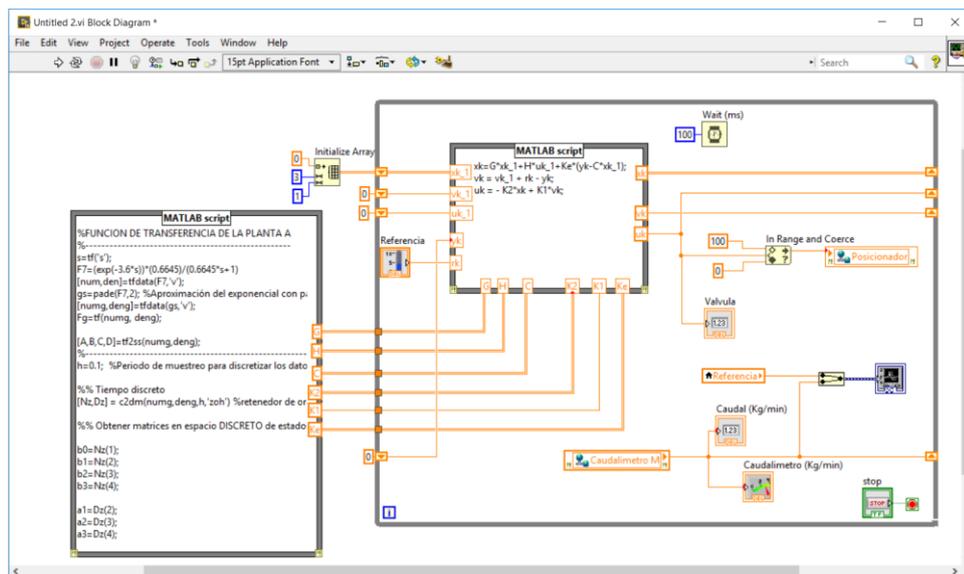


Figura 6.10 Programa en LabVIEW del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

El resultado del control de flujo mediante la técnica de realimentación de estados se puede apreciar en la figura 6.11. Aplicando un escalón se capturo la gráfica en donde el tiempo se asentamiento es de 15 segundos.

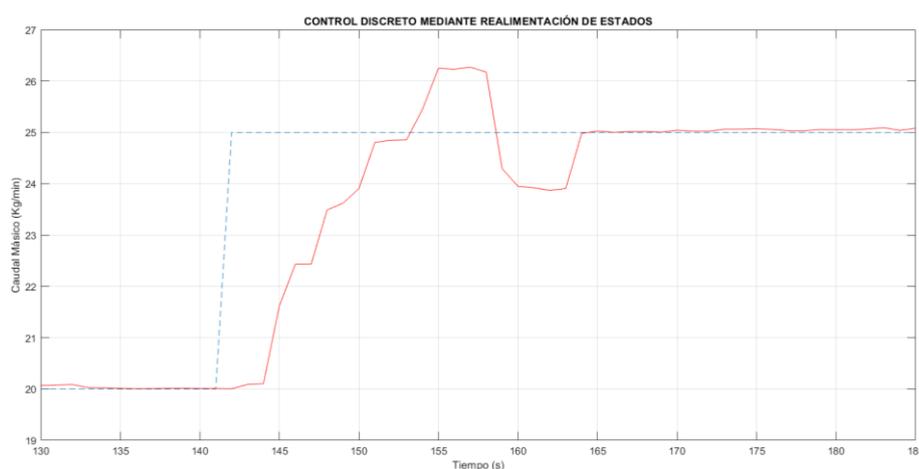


Figura 6.11 Comportamiento del control en tiempo discreto de un proceso de flujo mediante la técnica de retroalimentación de estados.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de culminar con este proyecto se pudo realizar la estimación lineal de diferentes procesos que abarcan varios dispositivos industriales. Esta estimación basada en datos estuvo soportada en la herramienta `ident` de Matlab. Posterior a la identificación se pudo realizar la sintonía de los controladores tanto PID, como por retroalimentación de estados. No obstante, se probaron otros procedimientos basados en herramientas computacionales para auto-sintonizar el PID sin la necesidad de contar con un modelo.

Todos los procedimientos que se siguieron tanto para la identificación como para la sintonización de los controladores, se pudieron ejecutar sobre dispositivos industriales reales. Esto hace que este proyecto se convierta en un aporte significativo para los lectores que requieran implementar un controlador en un ambiente industrial ya que para todas las implementaciones se brindan los lineamientos para una satisfactoria ejecución.

El material que se pudo generar, sin duda alguna brindará a los estudiantes una herramienta para el aprendizaje sobre la identificación y el control de procesos. No obstante, se debe tener en cuenta que la ejecución de un controlador puede tomar un tiempo considerable, ya que se parte desde la configuración de los instrumentos, la parametrización del software para el interfaz humano máquina, la recolección de datos, la estimación, la sintonía, la ejecución y la evaluación del controlador.

Como recomendaciones se puede exponer lo siguiente:

Para la sintonización de la planta es recomendable realizar varias estimaciones hasta encontrar el modelo más adecuado de la planta. Además, en la identificación del sistema se toma en cuenta solo un escalón por ende el controlador solo dentro de ese rango funcionará de manera óptima.

Para el control mediante la auto sintonía del PLC S7-1200 se debe tener en cuenta las conversiones propuestas para que no exista problemas en la optimización, además en el caso de la sintonización del control de nivel es necesario realizarlo con

el tanque a un nivel mayor a cero ya que el bloque PID_Compact no reconoce valores negativos que proporciona el sensor de nivel.

En el PLC Schneider Electric se puede agregar un bloque PID mediante el software de programación TwidoSuite, el cual permite ingresar los valores de las constantes K_p , T_d y T_i que se puede sintonizar en otras aplicaciones, en este caso para obtener las constantes PID se sintonizo en la aplicación PID Tuner de Matlab. La desventaja es que no permite realizar la auto sintonía.

En el caso de la planta A se utiliza el software STEP 7 por lo cual es necesario tener instalado Windows 7 o Windows 10 caso contrario se puede utilizar una máquina virtual.

Al configurar el sistema CompactRIO se debe tener en cuenta el tiempo de muestreo sea el mismo dentro del chasis mediante la aplicación NI MAX, en el enlace OPC y el programa en LabVIEW, lo mismo ocurre con los PLCs S7-1200 y S7-300.

El software KEPServerEX permite interactuar con Simulink (Matlab) por un periodo de 2 horas porque posee una licencia y se debe comprar si desea utilizar de manera ilimitada, cuando se culminan las 2 horas es necesario reiniciar el computador y puede seguir utilizando nuevamente. Por otra parte, el software NI OPC Servers permite interactuar con LabVIEW de manera ilimitada, pero no es compatible con Simulink (Matlab).

Para la implementación de los controladores en espacio de estados se debe considerar si la función de transferencia contiene retraso, si es el caso se utiliza el comando *pade* de Matlab para una aproximación del mismo. Para una respuesta deseada del sistema es necesario calcular los polos a utilizar, los polos se pueden calcular mediante sobreelongación máxima y el tiempo de asentamiento del sistema.

- [10] "206612 - Posicionador Remoto con Display / Control lateral / Posicionadores/Controladores de proceso / Válvulas de control / Válvulas de proceso y de control", *Burkert.es*, 2019. [online]. Disponible en: <https://www.burkert.es/es/products/valvulas-de-proceso-y-de-control/valvulas-de-control/posicionadores-controladores-de-proceso/control-lateral/206612>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [11] "Válvula de control de asiento inclinado de 2/2 vías Tipo 2702", *Burkert.com*, 2017. [online]. Disponible en: <https://www.burkert.com/en/Media/plm/MAN/MA/MA2702-Manual-EU-EN.pdf?id=MAN00000000000000001000311822ENA>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [12] "Tipo 2702 - Válvula reguladora de asiento inclinado de 2 vías accionada neumáticamente", *Burkert.es*, 2019. [online]. Disponible en: <https://www.burkert.es/es/type/2702>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [13] "Digital batch controller 8035", *Cms.esi.info*, 2016. [online]. Disponible en: https://cms.esi.info/Media/documents/9639_1506001563292.pdf. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [14] "Remote Sensor Type 8798", *Burkert.com*, 2017. [online]. Disponible en: <https://www.burkert.com/en/Media/plm/MAN/MA/MA8798-Standard-EU-ML.pdf?id=MAN00000000000000001000126690MLJ>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [15] "Guía rápida del VLT 2800", *Files.danfoss.com*, 2005. [online]. Disponible en: http://files.danfoss.com/download/Drives/doc_MG28M105.pdf. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [16] "Variador de frecuencia trifásico Danfoss 0.55 Kw - Zuendo", *Zuendo*. [online]. Disponible en: <https://www.zuendo.com/variadores-de-frecuencia-trifasicos-380v-usados/4401-variador-de-frecuencia-trifasico-danfoss-055-kw.html>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [17] "Detección de nivel capacitiva - Liquicap FTI51 | Endress+Hauser", *Es.endress.com*. [online]. Disponible en: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-nivel/deteccion-nivel-adherencias>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [18] "CompactRIO NI cRIO-9012/9014", *Sal.wisc.edu*, 2008. [online]. Disponible en: <http://www.sal.wisc.edu/PFIS/docs/rss->

- nir/archive/public/Product%20Manuals/ni/ni-9012-14-manual.pdf. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [19] "National Instruments NI cRIO-9012 & 9112 Compact Chassis & Real-Time Controller | eBay", *eBay*, 2019. [online]. Disponible en: <https://www.ebay.co.uk/itm/National-Instruments-NI-cRIO-9012-9112-Compact-Chassis-Real-Time-Controller-/382213468003>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [20] N. Instruments, "DATASHEET NI 9219", *Ni.com*, 2016. [online]. Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/374473a_02.pdf. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [21] N. Instruments, "GETTING STARTED GUIDE NI 9219", *Ni.com*, 2016. [online]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374473f.pdf>. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [22] N. Instruments, "DATASHEET NI 9263", *Ni.com*, 2016. [online]. Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/373781b_02.pdf. [Ultimo Acceso: Mayo 2019].
- [23] W5.siemens.com. (2008). *Sistema de automatización S7-300*. [online] Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S7300-GETTINGSTARTER.PDF> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [24] Deao-electiic.diytrade.com. (2019). *Siemens SIMATIC PLC S7-300 Function Module*. [online] Disponible en: http://deao-electiic.diytrade.com/sdp/1256626/4/pd-5590807/7925192-0/Siemens_SIMATIC_PLC_S7-300_Function_Module.html#normal_img [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [25] W5.siemens.com. (2012). *S7 Controlador programable S7-1200*. [online] Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200%20Manual%20Sistema%20Abr12.pdf> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [26] Electric, S. (2009). *TWDLCAE40DRF*. [online] Datasheet.octopart.com. Disponible en: <https://datasheet.octopart.com/TWDLCAE40DRF-Telemecanique-datasheet-9738758.pdf> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [27] Electric, S. (2019). *TM2AMM6HT*. [online] Schneider-electric.us. Disponible

- en: <https://www.schneider-electric.us/en/product/download-pdf/TM2AMM6HT> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [28] Instruments, N. (2019). *OPC - National Instruments*. [online] Sine.ni.com. Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/215328> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [29] Kepware.com. (2019). *KEPServerEX Connectivity Platform | OPC Server | Kepware*. [online] Disponible en: <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [30] Martínez Rodríguez, J. and Morales Rodríguez, J. (2010). *Control aplicado con variables de estado*. 2nd ed. Madrid: Paraninfo.
- [31] Mathworks.com. (2019). *Transfer function estimation - MATLAB tfest*. [online] Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [32] Dorf, R. and Bishop, R. (2005). *Modern control system*. 12th ed. Beijing: Science Press.
- [33] Media.distributordatasolutions.com. (2016). *SIMATIC S7-1200, S7-1500 PID control*. [online] Disponible en: <https://media.distributordatasolutions.com/seimens/2017q1/36796b64c1c05acb43a31141cc057501aad5b132.pdf> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [34] Automatización Industrial - Automatas S7-1200 y S7-1500. (2018). *Control PID - Automatización Industrial - Automatas S7-1200 y S7-1500*. [online] Disponible en: <https://auto1215.000webhostapp.com/index.php/control-pid/> [Ultimo Acceso: Julio 2019].
- [35] Ogata, K., Aranda Pérez, J. and Rodríguez Ramírez, F. (2003). *Sistemas de control en tiempo discreto*. 2nd ed. México [etc.]: Prentice Hall Hispanoamericana.
- [36] Cache.industry.siemens.com. (2006). *Posicionadores electroneumáticos SIPART PS2*. [online] Disponible en: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/366/76356366/att_21461/v1/A5E00074633-10es_PS2HART_OI_es-ES.pdf [Ultimo Acceso: Julio 2019].

APÉNDICES

APÉNDICE A: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO CONTINUO (PLANTA B)

```
%%CONTROL EN TIEMPO CONTINUO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA
TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS
%-----
clear all
close all
clc

%% Función de transferencia de la Planta B
s=tf('s');
F7=(exp(-0.5*s))*(0.59071)/((s+1.767)*(s+0.4053))
[num,den]=tfdata(F7,'v');
gs=pade(F7,2); %Aproximación del exponencial con padé orden 2
[numg,deng]=tfdata(gs,'v')
Fg=tf(numg, deng);

%-----
%% Matrices en espacio de estados
b0=numg(1);
b1=numg(2);
b2=numg(3);
b3=numg(4);
b4=numg(5);

a1=deng(2);
a2=deng(3);
a3=deng(4);
a4=deng(5);

bt0=b0;
bt1=b1-a1*bt0;
bt2=b2-a1*bt1-a2*bt0;
bt3=b3-a1*bt2-a2*bt1-a3*bt0;
bt4=b4-a1*bt3-a2*bt2-a3*bt1-a4*bt0;

%Matrices en la forma canónica observable
Ap=[0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1; -a4 -a3 -a2 -a1]
Bp=[bt1; bt2; bt3; bt4]
Cp=[1 0 0 0]
Dp=0

%-----
%% COMPROBACION DE CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD
%Para comprobar si es CONTROLABLE
MR= ctrb(Ap, Bp);
cont= rank(MR)
%Para comprobar si es OBSERVABLE
NR= obsv(Ap,Cp);
obs= rank(NR)

%-----
%% RESPUESTA DESEADA DEL SISTEMA
```

```

%Sobreelongación máxima (Mp) y Tiempo de asentamiento (ts)
%-----
ts = 20; %tiempo de asentamiento seg
Mp = 0.002; % Sobreelongación máxima
sigma = 4/ts ; %atenuación según el criterio del 2%
wd = (-pi*sigma )/( log(Mp)); %frecuencia natural amortiguada
p1 = - sigma + wd*j;
p2 = - sigma - wd*j;
po=[p1; p2]; %polos

z=sqrt(1/(1+(pi/(-log(Mp)))^2)); %factor de amortiguamiento
wn=wd/(sqrt(1-z^2)); %frecuencia natural no amortiguada

%-----
%Gráfica del sistema
s=tf('s');
PL=(wn^2)/(s^2+ 2*z*wn*s+ wn^2) %Ecuación de un sistema de 2do
orden
figure (1)
step(PL)
title('RESPUESTA DESEADA DEL SISTEMA')

POLOS=[po; -1.5; -2; -2.5]
%Ecuación característica
ec9=poly(POLOS); %multiplicación de los polos

%Gráfica de todos los polos
nump=[1];
denp=[ec9];
sysp=tf(nump,denp)
figure (2)
step(sysp) %Grafica de los polos
title('Polos en lazo abierto')
%-----
%% Cálculos para el Integrador y realimentación

Au=[Ap zeros(4,1); -Cp 0]; %Matriz aumentada Au
Bu=[Bp; 0]; %Matriz aumentada Bu

%% Calculo de ganancias K1 y K2 mediante el comando place
Kt = place(Au ,Bu ,POLOS )
K2= [Kt(1) Kt(2) Kt(3) Kt(4)]
K1= [-Kt(5)]

%-----
%% Calculo de la ganancia Ke del observador mediante el comando
%acker

POLOSO = [-10 -10 -10 -10]; %% Polos para el Observador
KE = acker(Ap', Cp', POLOSO)'

```

APÉNDICE B: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO DISCRETO (PLANTA B)

```

%%CONTROL EN TIEMPO DISCRETO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA
TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS
clear all
close all
clc

%Función de transferencia de la planta B
%-----
s=tf('s');
F7=(exp(-0.5*s))*(0.59071)/((s+1.767)*(s+0.4053))
[num,den]=tfdata(F7,'v');
gs=pade(F7,1); %Aproximación del exponencial con padé
[numg,deng]=tfdata(gs,'v');
Fg=tf(numg, deng);

[A,B,C,D]=tf2ss(numg, deng);
%-----
h=0.1; %Periodo de muestreo para discretizar los datos

%% Tiempo discreto
[Nz,Dz] = c2dm(numg, deng, h, 'zoh') %retenedor de orden cero(zoh)

%% Matrices en espacio de estados

b0=Nz(1);
b1=Nz(2);
b2=Nz(3);
b3=Nz(4);

a1=Dz(2);
a2=Dz(3);
a3=Dz(4);

bt1=b1-(a1*b0);
bt2=b2-(a2*b0);
bt3=b3-(a3*b0);

%-----
%Forma canónica observable
G=[-a1 1 0; -a2 0 1; -a3 0 0]
H=[bt1; bt2; bt3]
C=[1 0 0]
D=0

%-----
%% RESPUESTA DESEADA DEL SISTEMA
%Sobrelongación máxima (Mp) y Tiempo de asentamiento (ts)
%-----
ts = 20; %tiempo de asentamiento seg
Mp = 0.002; % Sobrelongación máxima 0.1 ---> 10% 0.002
sigma = 4/ts ; %atenuación según el criterio del 2%
wd = (-pi*sigma)/(log(Mp)); %frecuencia natural amortiguada
p1 = - sigma + wd*j;
p2 = - sigma - wd*j;
pol=[p1; p2]; %polos

```

```

po=[pol; -1.5; -2] %[po; -10; -20; -30] [po; -2; -2.2; -2.5]
ec9=poly(po); %multiplicación de los polos

%-----

% Polos en tiempo discreto
Tp=0.1 %tiempo de muestreo para polos 0.1
polosd= exp(po*Tp) %polos en tiempo discreto

%-----

%% Método para obtener K1 y K2 DEL INTEGRADOR Y REALIMENTACION
Gg=[G H; zeros(1,4)]
Hh=[zeros(3,1);1]
Kk= acker(G, H, polosd);
K=(Kk+[zeros(1,3) 1])*inv([(G-eye(3)) (H); (C*G) (C*H)]);
K2=[K(1) K(2) K(3)]
K1=[K(4)]

%OBSERVADOR DE ESTADOS
%-----
polos0=[-10 -10 -10]; %polos en tiempo continuo del observador
polosd0= exp(polos0*Tp) %polos en tiempo discreto del observador

Ke = acker(G', C', polosd0)'

```

APÉNDICE C: PROGRAMACIÓN EN MATLAB DEL CONTROL EN TIEMPO DISCRETO (PLANTA A)

```

%%CONTROL EN TIEMPO DISCRETO DE UN PROCESO DE FLUJO MEDIANTE LA
TÉCNICA DE RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS

clear all
close all
clc

%Función de transferencia de la planta A
%-----

s=tf('s');
F7=(exp(-3.6*s))*(0.6645)/(0.6645*s+1)
[num,den]=tfdata(F7,'v');
gs=pade(F7,2); %Aproximación del exponencial con padé
[numg,deng]=tfdata(gs,'v');
Fg=tf(numg, deng)

[A,B,C,D]=tf2ss(numg,deng);
%-----
h=0.1; %Periodo de muestreo para discretizar los datos

%% Tiempo discreto
[Nz,Dz] = c2dm(numg,deng,h,'zoh') %retenedor de orden cero(zoh)

%% Matrices en espacio de estados

b0=Nz(1);
b1=Nz(2);
b2=Nz(3);
b3=Nz(4);

a1=Dz(2);
a2=Dz(3);
a3=Dz(4);

bt1=b1-(a1*b0);
bt2=b2-(a2*b0);
bt3=b3-(a3*b0);

%-----
%Forma canónica observable
G=[-a1 1 0; -a2 0 1; -a3 0 0]
H=[bt1; bt2; bt3]
C=[1 0 0]
D=0

%-----
%% RESPUESTA DESEADA DEL SISTEMA
%%Sobreelongación máxima (Mp) y Tiempo de asentamiento (ts)
%-----
ts = 15; %tiempo de asentamiento seg
Mp = 0.002; % Sobreelongación maxima 0.1 ---> 10% 0.002
sigma = 4/ts ; %atenuación según el criterio del 2%
wd = (-pi*sigma)/(log(Mp)); %frecuencia natural amortiguada
p1 = - sigma + wd*j;

```

```

p2 = - sigma - wd*j;
pol=[p1; p2]; %polos

po=[pol; -1.5; -2] %[po; -10; -20; -30] [po; -2; -2.2; -2.5]
ec9=poly(po); %multiplicación de los polos

%-----

% Polos en tiempo discreto
Tp=0.1 %tiempo de muestreo para polos 0.1
polosd= exp(po*Tp) %polos en tiempo discreto

%-----

%% Método para obtener K1 y K2 DEL INTEGRADOR Y REALIMENTACION
Gg=[G H; zeros(1,4)]
Hh=[zeros(3,1);1]
Kk= acker(G, H, polosd);
K=(Kk+[zeros(1,3) 1])*inv([(G-eye(3)) (H); (C*G) (C*H)]);
K2=[K(1) K(2) K(3)]
K1=[K(4)]

% OBSERVADOR DE ESTADOS
%-----

polosO=[-10 -10 -10]; %polos en tiempo continuo del observador
polosdO= exp(polosO*Tp) %polos en tiempo DISCRETO del observador

KE = acker(G', C', polosdO)'

```