



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## **DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**TEMA: IMPLEMENTACIÓN DE UN POSICIONADOR  
ELECTRONEUMÁTICO INTELIGENTE QUE GENERE EL DIAGNÓSTICO Y  
CONTROL DE LA POSICIÓN DE UNA VÁLVULA PROPORCIONAL E  
INTEGRACIÓN A UNA RED INDUSTRIAL HART PARA EL CONTROL  
AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE NIVEL EN EL LABORATORIO DE REDES  
INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS  
FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA.**

**AUTORAS:**

**JENNY PAOLA CALVOPÍÑA OSORIO  
ESTEFANÍA MONSERRATH SERNA VILLARREAL**

**DIRECTOR: ING. EDWIN PRUNA  
CODIRECTOR: ING. WASHINGTON FREIRE**

**LATACUNGA**

**2015**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPEL**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**CERTIFICADO**

Ing. Edwin Pruna (DIRECTOR DE TESIS)

Ing. Washington Freire (CODIRECTOR DE TESIS)

**CERTIFICAN:**

Que el trabajo titulado "IMPLEMENTACIÓN DE UN POSICIONADOR ELECTRONEUMÁTICO INTELIGENTE QUE GENERE EL DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA POSICIÓN DE UNA VÁLVULA PROPORCIONAL E INTEGRACIÓN A UNA RED INDUSTRIAL HART PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE NIVEL EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA", realizado por la señorita Jenny Paola Calvopiña Osorio y la señorita Estefanía Monserrath Serna Villarreal, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas establecidas por la ESPE, en el Reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Debido a que constituyen un trabajo de alto contenido de investigación y que ayuda a la formación profesional y aplicación de conocimientos, si se recomienda su publicación. El mencionado trabajo consta de un documento empastado, un disco compacto que contienen los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a las señoritas Calvopiña Osorio Jenny Paola y Serna Villarreal Estefanía Monserrath que lo entregue al Ing. Silva Franklin, en su calidad de Director de la Carrera.

Latacunga, Agosto 2015.

---

Ing. Edwin Pruna  
DIRECTOR

---

Ing. Washington Freire  
CODIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Nosotras: Jenny Paola Calvopiña Osorio  
Estefanía Monserrath Serna Villarreal

**DECLARAMOS QUE:**

El proyecto de grado denominado "IMPLEMENTACIÓN DE UN POSICIONADOR ELECTRONEUMÁTICO INTELIGENTE QUE GENERE EL DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA POSICIÓN DE UNA VÁLVULA PROPORCIONAL E INTEGRACIÓN A UNA RED INDUSTRIAL HART PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE NIVEL EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA", ha sido desarrollada en base a una investigación, respetando derechos intelectuales de terceros, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance investigativo del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Agosto 2015.

---

Paola Calvopiña  
C.C.: 0503390239

---

Estefanía Serna  
C.C.: 1804508826

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPEL  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotras: Jenny Paola Calvopiña Osorio  
Estefanía Monserrath Serna Villarreal

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo "IMPLEMENTACIÓN DE UN POSICIONADOR ELECTRONEUMÁTICO INTELIGENTE QUE GENERE EL DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE LA POSICIÓN DE UNA VÁLVULA PROPORCIONAL E INTEGRACIÓN A UNA RED INDUSTRIAL HART PARA EL CONTROL AUTOMÁTICO DE LA VARIABLE NIVEL EN EL LABORATORIO DE REDES INDUSTRIALES Y CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Agosto 2015.

---

Paola Calvopiña  
C.C.: 0503390239

---

Estefanía Serna  
C.C.: 1804508826

## DEDICATORIA

Con mucho cariño a María Eugenia y Manuel, mis mejores amigos y guías por haberme dado la guía, su apoyo, confianza y sobre todo su amor infinito.

A José por apoyar mis sueños y dejarme ser parte de los suyos.

**PAOLA**

A mis padres, por su apoyo incondicional, amor y comprensión en todo momento.

A mi hermana Salomé, por ser mi ejemplo de trabajo y dedicación.

A Daniel por recordarme siempre que lo más importante es luchar por mis sueños.

**ESTEFANÍA**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, por su apoyo y comprensión incondicional en cada etapa de mi vida.

A Estefanía, Amparito, Fabián por su ayuda, comprensión, y todos los momentos compartidos en busca de este objetivo, recuerdos especiales que perdurarán en mi mente y corazón.

A mis familiares y amigos, por duplicar mis alegrías y mitigar mis tristezas. Gracias a todos por creer en mí.

**PAOLA**

Agradezco a mi amada familia por el inagotable amor, cariño y apoyo brindado en el transcurso de mi vida; por las constantes palabras de aliento brindadas.

A Amparito, Fabián y Paola por su apoyo, su amistad y por compartir conmigo este camino y llenar de alegría esta etapa de nuestras vidas.

**ESTEFANÍA**

Nuestra gratitud a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y a los docentes que compartieron sus conocimientos, en especial al Ing. Edwin Pruna y al Ing. Washington Freire, por su valiosa ayuda para desarrollar este proyecto. Al Ing. Franklin Silva, Director de nuestra querida carrera, por su apoyo en la realización de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>PORTADA</b> .....	<b>i</b>
<b>CERTIFICADO</b> .....	<b>ii</b>
<b>DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD</b> .....	<b>iii</b>
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xxii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xxiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Pirámide de automatización .....	2
1.2.1 Nivel de gestión .....	3
1.2.2 Nivel de célula .....	3
1.2.3 Nivel de campo .....	3
1.2.4 Nivel actuador/sensor .....	4
1.3 Redes de comunicación industriales .....	4
1.3.1 Generalidades .....	4
1.3.2 Definición de comunicaciones industriales .....	6
1.3.3 Modos de transmisión de datos .....	6
1.3.4 Codificación de señales .....	7
1.3.5 Protocolos de comunicación .....	7

1.4	Protocolo HART .....	9
1.4.1	Historia .....	9
1.4.2	Funcionamiento .....	10
1.4.3	Beneficios .....	12
1.4.4	Modem HART .....	12
1.4.5	Servidores HART .....	13
1.4.6	Bases de datos HART .....	15
1.5	Modelamiento de un sistema .....	16
1.5.1	El proceso de identificación .....	17
1.5.2	Modelo ARX.....	18
1.6	Control de la variable nivel.....	19
1.6.1	Variables físicas.....	19
1.6.2	Elemento primario de medición.....	19
1.6.3	Transmisores .....	20
1.6.4	Controladores .....	22
1.7	Criterios de estabilidad.....	28
1.7.1	Ajuste de controladores .....	28
1.8	Elementos finales de control .....	31
1.8.1	Válvulas de control.....	31
1.8.2	Actuadores neumáticos.....	32
<b>CAPÍTULO II .....</b>		<b>35</b>
<b>2.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL POSICIONADOR.....</b>	<b>35</b>
2.1	Especificación de requisitos del sistema .....	35
2.1.1	Diagrama de bloques del sistema .....	36
2.1.2	Diagrama P&ID del sistema .....	39

2.2	Montaje del posicionador en la válvula.....	42
2.2.1	Herramientas necesarias .....	43
2.2.2	Procedimiento de instalación .....	45
2.3	Configuración y calibración del Conjunto Válvula - Posicionador ...	51
2.3.1	Conexión al comunicador 475.....	51
2.3.2	Configuración y Calibración .....	53
2.3.3	Asistente de configuración (Guided setup).....	53
2.3.4	Configuración manual .....	61
2.4	Modelado de la planta.....	74
2.4.1	Simulación de un control Fuzzy .....	82
2.5	Programación del controlador .....	90
2.5.1	PLC.....	91
2.5.2	Labview .....	95
2.6	Red HART .....	109
2.6.1	Conexión punto a punto.....	110
2.6.2	Servidor HART.....	112
2.6.3	Pactware.....	117
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>126</b>
<b>3.</b>	<b>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>126</b>
3.1	Pruebas previas al control.....	127
3.1.1	Conjunto conversor de corriente a presión – válvula.....	127
3.1.2	Conjunto posicionador – válvula .....	132
3.2	Modelo matemático de la planta .....	135
3.3	Control de la variable nivel.....	136
3.3.1	Proporcional.....	137

3.3.2	Proporcional derivativo.....	154
3.3.3	Proporcional integral .....	171
3.3.4	Proporcional integral derivativo .....	187
3.3.5	Fuzzy .....	204
3.3.6	Validación del modelo matemático.....	207
3.4	Diagnóstico .....	209
3.4.1	En línea .....	209
3.4.2	Fuera de línea automático .....	212
3.4.3	Fuera de línea manual .....	216
3.4.4	Alcances .....	218
3.4.5	Limitaciones .....	218
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>220</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>220</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>223</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>226</b>
ANEXO A: GLOSARIO DE TÉRMINOS		
ANEXO B: CLAVES DE MONTAJE		
ANEXO C: MANTENIMIENTO Y SOLUCIÓN DE PROBLEMAS		

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1	CARACTERÍSTICAS DE DOS REDES DE DATOS.....	5
TABLA 1.2	VALORES INICIALES DE LAS ACCIONES DE CONTROL .....	29
TABLA 2.1	ELEMENTOS DEL KIT DE MONTAJE DEL CONTROLADOR DIGITAL DE VÁLVULA DVC 6200 .....	43
TABLA 2.2	HERRAMIENTAS ADICIONALES PARA MONTAJE DEL DVC6200 .....	44
TABLA 2.3	INFORMACIÓN GENERAL PARA LA CONFIGURACIÓN INICIAL .....	55
TABLA 2.4	PARÁMETROS DE LA VÁLVULA .....	65
TABLA 2.5	PARÁMETROS DE COMPONENTES INTERNOS .....	66
TABLA 2.6	PARÁMETROS DEL ACTUADOR.....	67
TABLA 2.7	INFORMACIÓN DEL ACTUADOR PARA AJUSTE INICIAL .....	70
TABLA 2.8	CONJUNTOS DE AJUSTE PRESELECCIONADOS .....	71
TABLA 2.9	PARÁMETROS VÁLVULA Y ACTUADOR .....	73
TABLA 2.10	BLOQUES DEL SISTEMA SIMULADO.....	89
TABLA 2.11	CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DIDÁCTICO ND-0704.....	90
TABLA 2.12	CONFIGURACIÓN DIP SWITCH PARA AJUSTAR EL MODO DE OPERACIÓN DEL POSICIONADOR .....	112
TABLA 3.1	PRUEBA: PRESIÓN Vs DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO .....	128
TABLA 3.2	PRUEBA CONVERTOR I/P VARIANDO LA CORRIENTE DE ENTRADA .....	130
TABLA 3.3	PRUEBA: CORRIENTE I/P Vs DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO.....	131
TABLA 3.4	GANANCIAS DE LOS CONJUNTOS DE CONFIGURACIÓN.....	132
TABLA 3.5	RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA ASCENDENTE 1.....	139
TABLA 3.6	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA DESCENDENTE 1 .....	142
TABLA 3.7	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA COMBINADA 1.....	145
TABLA 3.8	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA ASCENDENTE 2 .....	148
TABLA 3.9	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA DESCENDENTE 2.....	150
TABLA 3.10	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL P PRUEBA COMBINADA 2 .....	153
TABLA 3.11	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA ASCENDENTE 1.....	155
TABLA 3.12	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA DESCENDENTE 1 .....	158
TABLA 3.13	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA COMBINADA 1.....	161
TABLA 3.14	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA ASCENDENTE 2 .....	164
TABLA 3.15	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA DESCENDENTE 2 .....	167
TABLA 3.16	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PD PRUEBA COMBINADA 2.....	170
TABLA 3.17	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA ASCENDENTE 1 .....	172
TABLA 3.18	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA DESCENDENTE 1.....	175
TABLA 3.19	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA COMBINADA 1 .....	178
TABLA 3.20	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA ASCENDENTE 2 .....	181

TABLA 3.21	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA DESCENDENTE 2 .....	184
TABLA 3.22	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PI PRUEBA COMBINADA 2 .....	186
TABLA 3.23	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA ASCENDENTE 1 .....	189
TABLA 3.24	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA DESCENDENTE 1 .....	192
TABLA 3.25	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA COMBINADA 1 .....	195
TABLA 3.26	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA ASCENDENTE 2 .....	197
TABLA 3.27	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA DESCENDENTE 2 .....	200
TABLA 3.28	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL PID PRUEBA COMBINADA 2.....	203
TABLA 3.29	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL FUZZY PRUEBA COMBINADA 1 .....	205
TABLA 3.30	PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SISTEMA CON CONTROL FUZZY PRUEBA COMBINADA 2 .....	206
TABLA 3.31	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA.....	215

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1	PIRÁMIDE DE AUTOMATIZACIÓN .....	2
FIGURA 1.2	DOS CANALES DE COMUNICACIÓN .....	9
FIGURA 1.3	MODULACIÓN FSK .....	10
FIGURA 1.4	CONFIGURACIÓN DE DOS MAESTROS.....	11
FIGURA 1.5	COMUNICACIÓN HART MODO "BURST" .....	11
FIGURA 1.6	CONEXIÓN DEL MODEM HART .....	13
FIGURA 1.7	MODEM HART USB.....	13
FIGURA 1.8	SERVIDOR HART .....	14
FIGURA 1.9	PACTWARE.....	15
FIGURA 1.10	BLOQUES DE DATOS HART.....	16
FIGURA 1.11	DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO Y COMPENSACIÓN .....	21
FIGURA 1.12	TRANSMISOR DE NIVEL POR RADAR SIN CONTACTO, DE DOS HILOS .....	21
FIGURA 1.13	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROL PID.....	24
FIGURA 1.14	ETAPAS DE UN CONTROL FUZZY .....	25
FIGURA 1.15	F. DE PERTENENCIA Y VALOR DE PERTENENCIA PARA 20°C PARA BAJA.....	25
FIGURA 1.16	F. DE PERTENENCIA Y VALOR DE PERTENENCIA PARA 20°C PARA MUY BAJA .....	26
FIGURA 1.17	FUNCIÓN SINGLETON.....	28
FIGURA 1.18	VÁLVULA DE CONTROL TÍPICA. ....	31
FIGURA 1.19	POSICIONADOR DE ACCIÓN DIRECTA.....	33
FIGURA 1.20	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL POSICIONADOR DVC 6200 .....	33
FIGURA 2.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA .....	36
FIGURA 2.2	DIAGRAMA P&ID DEL SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL.....	39
FIGURA 2.3	POSICIONADOR DVC6200 MONTADO EN LA VÁLVULA BAUMANN 24000 .....	42
FIGURA 2.4	ALINEACIÓN DE LA PLATINA (PT-001) EN EL POSICIONADOR DVC6200 .....	45
FIGURA 2.5	FIJACIÓN DE LA PLATINA (PT-001) EN EL POSICIONADOR DVC6200 .....	45
FIGURA 2.6	FIJACIÓN DE LA PLATINA (PT-002) EN EL IMÁN (IM-001).....	46
FIGURA 2.7	ALINEACIÓN DEL IMÁN (IM-001) A LA CAVIDAD POSTERIOR DEL POSICIONADOR DVC 6200.....	46
FIGURA 2.8	CONJUNTO DE IMÁN COLOCADO EN EL VÁSTAGO DE LA VÁLVULA BAUMANN 2400.....	47
FIGURA 2.9	ALINEACIÓN DEL CONJUNTO DEL IMÁN .....	47
FIGURA 2.10	FIJACIÓN DEL CONJUNTO DE IMÁN AL VÁSTAGO DE LA VÁLVULA .....	48
FIGURA 2.11	DISPOSICIÓN DEL POSICIONADOR DVC6200 EN SU ACTUADOR .....	49
FIGURA 2.12	POSICIONADOR DVC6200 MONTADO EN LA VÁLVULA BAUMANN 24000. VISTA LATERAL.....	49
FIGURA 2.13	POSICIONADOR DVC6200 MONTADO EN LA VÁLVULA. VISTA LATERAL .....	50

FIGURA 2.14	MONTAJE INTEGRAL DE UN REGULADOR FISHER 67CFR EN UN CONTROLADOR DE VÁLVULA DIGITAL FIELDVUE DVC6200 .....	50
FIGURA 2.15	FISHER 67CFR MONTADO EN UN POSICIONADOR FIELDVUE DVC6200.....	51
FIGURA 2.16	CONEXIÓN DIRECTA DEL COMUNICADOR 475 AL DISPOSITIVO HART.....	51
FIGURA 2.17	TERMINALES DE COMUNICACIÓN HART Y PUERTA DE ACCESO.....	52
FIGURA 2.18	MENÚ PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN HART .....	53
FIGURA 2.19	MENÚ EN LÍNEA (ONLINE) DEL COMUNICADOR 475 .....	53
FIGURA 2.20	MENÚ CONFIGURACIÓN .....	54
FIGURA 2.21	MENÚ ASISTENTE DE CONFIGURACIÓN (GUIDED SETUP) .....	54
FIGURA 2.22	ADVERTENCIA DE MODO DEL INSTRUMENTO (INSTRUMENT MODE).....	55
FIGURA 2.23	PANTALLA ENVIAR LA CONFIGURACIÓN AL INSTRUMENTO .....	58
FIGURA 2.24	PANTALLA USAR INFORMACIÓN POR DEFECTO DE FÁBRICA .....	58
FIGURA 2.25	AVISO DE CONFIGURACIÓN TERMINADA .....	59
FIGURA 2.26	SUGERENCIA DE AUTOCALIBRACIÓN.....	59
FIGURA 2.27	CONFIRMACIÓN DE INICIO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN .....	59
FIGURA 2.28	AVISO DE AUTOCALIBRACIÓN TERMINADA.....	60
FIGURA 2.29	SUGERENCIA DE AJUSTE EXPERTO .....	60
FIGURA 2.30	ADVERTENCIA DE MODO DE INSTRUMENTO.....	61
FIGURA 2.31	MENÚ AJUSTE EXPERTO .....	61
FIGURA 2.32	SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN MANUAL .....	62
FIGURA 2.33	MENÚ CONFIGURACIÓN MANUAL.....	62
FIGURA 2.34	MENÚ MODO Y PROTECCIÓN .....	63
FIGURA 2.35	MENÚ INSTRUMENTO .....	63
FIGURA 2.36	CARRERA CALIBRADA PARA RELACIÓN DE ENTRADA ANALÓGICA .....	64
FIGURA 2.37	CONFIGURACIÓN DEL RANGO DE ENTRADA ANALÓGICO .....	64
FIGURA 2.38	MENÚ HOJA DE ESPECIFICACIONES.....	65
FIGURA 2.39	MENÚ CONTROL CARRERA/PRESIÓN .....	68
FIGURA 2.40	MENÚ SELECCIONAR CARRERA/PRESIÓN .....	68
FIGURA 2.41	MENÚ AJUSTE.....	69
FIGURA 2.42	MENÚ VÁLVULA Y ACTUADOR.....	72
FIGURA 2.43	WORKSPACE .....	74
FIGURA 2.44	VENTANA IMPORT DATA.....	75
FIGURA 2.45	VENTANA IMPORT WIZARD .....	75
FIGURA 2.46	VENTANA VARIABLE EDITOR .....	76
FIGURA 2.47	VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA CARGADAS EN EL WORKSPACE .....	76

FIGURA 2.48	VARIABLE ENTRADA (MA) .....	77
FIGURA 2.49	VARIABLE SALIDA (CM) .....	77
FIGURA 2.50	VENTANA SYSTEM IDENTIFICATION TOOL .....	78
FIGURA 2.51	CARGAR DATOS EN LA VENTANA SYSTEM IDENTIFICATION TOOL.....	78
FIGURA 2.52	VENTANA IMPORT DATA.....	79
FIGURA 2.53	GENERACIÓN DEL CUADRO MYDATA (INFORMACIÓN DE LA PLANTA) .....	79
FIGURA 2.54	OPCIÓN ESTIMATE DEL SYSTEM IDENTIFICATION TOOL .....	80
FIGURA 2.55	VENTANA NONLINEAR MODELS.....	80
FIGURA 2.56	OPCIÓN MODEL PROPERTIES .....	81
FIGURA 2.57	MODELOS GENERADOS POR LA HERRAMIENTA <i>IDENT</i> .....	81
FIGURA 2.58	VENTANA MODEL OUTPUT.....	82
FIGURA 2.59	VARIABLE DEL MODELO ARX EN EL WORKSPACE.....	82
FIGURA 2.60	VENTA PRINCIPAL DE LA HERRAMIENTA FUZZY .....	83
FIGURA 2.61	AGREGAR UNA ENTRADA AL MODELO FUZZY.....	84
FIGURA 2.62	MODELO FUZZY CON 2 ENTRADAS .....	84
FIGURA 2.63	LLAMAR A LA VENTANA DE EDICIÓN DE FUNCIONES DE PERTENENCIA.....	84
FIGURA 2.64	VENTANA FUNCIONES DE PERTENENCIA .....	85
FIGURA 2.65	LLAMAR A LA VENTANA DE EDICIÓN DE REGLAS .....	85
FIGURA 2.66	VENTANA DE EDICIÓN DE REGLAS .....	86
FIGURA 2.67	GUARDAR MODELO EN WORKSPACE .....	86
FIGURA 2.68	ASIGNACIÓN DE NOMBRE AL MODELO .....	87
FIGURA 2.69	VARIABLE DEL MODELO FUZZY EN EL WORKSPACE .....	87
FIGURA 2.70	COMO ACCEDER A LAS LIBRERÍAS DE SIMULINK .....	87
FIGURA 2.71	LIBRERÍAS DE SIMULINK .....	88
FIGURA 2.72	ESQUEMA DE UN CONTROL FUZZY DE UNA PLANTA CON MODELO ARX.....	88
FIGURA 2.73	PARÁMETROS DEL BLOQUE NONLINEAR ARX MODEL .....	89
FIGURA 2.74	PARÁMETROS DEL BLOQUE FUZZY LOGIC CONTROLLER.....	90
FIGURA 2.75	RELACIÓN BITS-CENTÍMETROS .....	91
FIGURA 2.76	CONFIGURACIÓN DE LA ENTRADA DEL PID.....	92
FIGURA 2.77	CONFIGURACIÓN DE LA SALIDA DEL PID.....	92
FIGURA 2.78	PORCENTAJE DE VARIABLE DE CONTROL .....	93
FIGURA 2.79	SALIDA PLC: ALGORITMO PID .....	94
FIGURA 2.80	SALIDA PLC: GENERAR CORRIENTE .....	94
FIGURA 2.81	MENÚ DE UN CONTROL NUMÉRICO.....	95
FIGURA 2.82	VENTANA PROPIEDADES DE UN CONTROL NUMÉRICO .....	96

FIGURA 2.83	VENTA PROPIEDADES OPCIÓN BUSCAR .....	96
FIGURA 2.84	BUSCADOR DE SERVIDORES .....	97
FIGURA 2.85	VARIABLES HART DEL POSICIONADOR DVC6200 .....	98
FIGURA 2.86	COMO ACCEDER AL FUZZY LOGIC TOOLKIT .....	99
FIGURA 2.87	VENTANA DE DISEÑO DE UN CONTROLADOR FUZZY .....	100
FIGURA 2.88	FUNCIÓN MIEMBRO DE ENTRADA “ERROR” .....	100
FIGURA 2.89	FUNCIÓN MIEMBRO DE ENTRADA “PV” .....	100
FIGURA 2.90	FUNCIÓN MIEMBRO DE SALIDA “CORRIENTE” .....	101
FIGURA 2.91	EDICIÓN DE LAS REGLAS .....	101
FIGURA 2.92	VALIDACIÓN DE LAS REGLAS .....	102
FIGURA 2.93	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA EL CONTROL CON LÓGICA DIFUSA Y MONITOREO DE LA ESTACIÓN DE NIVEL EN LABVIEW .....	103
FIGURA 2.94	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA EL AJUSTE DE LAS CONSTANTES PID Y MONITOREO DE LA ESTACIÓN DE NIVEL .....	104
FIGURA 2.95	INICIALIZACIÓN DE VECTORES Y VARIABLES .....	105
FIGURA 2.96	ADQUISICIÓN DE DATOS HART A) DATOS ASCENDENTES B) DATOS ASCENDENTES .....	106
FIGURA 2.97	GENERACIÓN DE LA GRÁFICA FIRMA DE LA VÁLVULA .....	107
FIGURA 2.98	CÁLCULO DE PARÁMETROS DE DIAGNÓSTICO A) ECUACIONES DE LAS CURVAS ASCENDENTE Y DESCENDENTE. B) PROMEDIO DE PRESIONES DE ENTRADA Y FUERZAS DE FRICCIÓN C) FRICCIÓN MÁXIMA, MÍNIMA Y PROMEDIO .....	107
FIGURA 2.99	DIAGNÓSTICO FUERA LÍNEA MANUAL .....	108
FIGURA 2.100	ALGORITMO DEL DIAGNÓSTICO EN LÍNEA .....	108
FIGURA 2.101	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA REGISTRAR DATOS EN EXCEL .....	109
FIGURA 2.102	CONEXIÓN PUNTO-PUNTO HART .....	110
FIGURA 2.103	CABLEADO DE CONEXIÓN DEL TABLERO DE CIRCUITO IMPRESO .....	111
FIGURA 2.104	CONEXIONES Y AJUSTES DEL TABLERO DE CABLEADO IMPRESO PWB .....	111
FIGURA 2.105	ÍCONO HART SERVER .....	112
FIGURA 2.106	VENTANA PRINCIPAL HART SERVER .....	112
FIGURA 2.107	CREAR UN NETWORK EN HART SERVER .....	113
FIGURA 2.108	MENÚ TIPOS DE REDES .....	113
FIGURA 2.109	VENTANA DE PROPIEDADES DE LA RED HART .....	113
FIGURA 2.110	VENTANA DE PROPIEDADES DE LA RED HART, SELECCIONAR COM .....	114
FIGURA 2.111	ADMINISTRADOR DE DISPOSITIVOS .....	114
FIGURA 2.112	RED HART DENOMINADA NIVEL .....	115
FIGURA 2.113	MENÚ NODO NIVEL .....	115

FIGURA 2.114	VENTANA INSTRUMENTO.....	115
FIGURA 2.115	VENTANA PROPIEDADES DEL INSTRUMENTO. ....	116
FIGURA 2.116	MENÚ INSTRUMENTO.....	116
FIGURA 2.117	DATOS INSTRUMENTO.....	116
FIGURA 2.118	ÍCONO PACTWARE .....	117
FIGURA 2.120	MENÚ HART COMMUNICATION .....	117
FIGURA 2.123	MODIFICACIÓN DE PARÁMETRO TAG .....	118
FIGURA 2.124	MENÚ COM.....	119
FIGURA 2.125	OPCIÓN CHANGE DTM ADDRESS .....	119
FIGURA 2.128	PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO .....	121
FIGURA 2.129	PARÁMETROS DE SEÑALES DE ENTRADA DEL DISPOSITIVO.....	121
FIGURA 2.130	PARÁMETROS HART DEL DISPOSITIVO .....	122
FIGURA 2.131	PARÁMETROS DE RANGOS DE MEDICIÓN.....	122
FIGURA 2.132	PARÁMETROS VALORES MEDIDOS DEL DISPOSITIVO .....	123
FIGURA 2.133	ARCHIVO CSV (SEPARADO POR COMAS).....	123
FIGURA 2.134	OPCIÓN ARCHIVE.....	123
FIGURA 2.135	BUSCADOR DE ARCHIVOS .....	124
FIGURA 2.136	VENTANA ARCHIVE SETTINGS.....	124
FIGURA 2.137	BOTONES RECORDING INICIAR GRABACIÓN .....	125
FIGURA 2.138	BOTONES RECORDING. DETENER GRABACIÓN .....	125
FIGURA 3.1	CALIBRADOR DE PRESIÓN FLUKE 718EX .....	127
FIGURA 3.2	DESPLAZAMIENTO DE UN 50% DEL VÁSTAGO.....	128
FIGURA 3.3	PRUEBA: PRESIÓN-%CIERRE DE LA VÁLVULA .....	129
FIGURA 3.4	CONVERSION DE CORRIENTE A PRESIÓN .....	129
FIGURA 3.5	PRUEBA CONVERSION I/P CORRIENTE VS PRESIÓN .....	131
FIGURA 3.6	CORRIENTE I/P VS DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO VÁLVULA .....	132
FIGURA 3.7	% DESPLAZAMIENTO DE VÁSTAGO PARA CONFIGURACIÓN C .....	133
FIGURA 3.8	% DESPLAZAMIENTO DE VÁSTAGO PARA CONFIGURACIÓN E .....	133
FIGURA 3.9	% DESPLAZAMIENTO DE VÁSTAGO PARA CONFIGURACIÓN H.....	134
FIGURA 3.10	% DESPLAZAMIENTO DE VÁSTAGO PARA CONFIGURACIÓN H .....	134
FIGURA 3.11	TIEMPO QUE TARDA EN ESTABILIZARSE EL CONTROL POR DESPLAZAMIENTO DE VÁSTAGO PARA LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES .....	135
FIGURA 3.12	MODELO DE LA PLANTA DE NIVEL PARA VALIDAR .....	136
FIGURA 3.13	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSION I/P .....	138
FIGURA 3.14	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSION I/P.....	138

FIGURA 3.15	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	138
FIGURA 3.16	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	139
FIGURA 3.17	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	141
FIGURA 3.18	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	141
FIGURA 3.19	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	141
FIGURA 3.20	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	142
FIGURA 3.21	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	144
FIGURA 3.22	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	144
FIGURA 3.23	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	144
FIGURA 3.24	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	145
FIGURA 3.25	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	146
FIGURA 3.26	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	147
FIGURA 3.27	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	147
FIGURA 3.28	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	147
FIGURA 3.29	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	149
FIGURA 3.30	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	149
FIGURA 3.31	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P POSICIONADOR INTELIGENTE.....	149
FIGURA 3.32	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	150
FIGURA 3.33	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	151
FIGURA 3.34	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	152
FIGURA 3.35	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	152
FIGURA 3.36	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL P UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	152
FIGURA 3.37	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	154
FIGURA 3.38	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	154
FIGURA 3.39	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	155
FIGURA 3.40	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	155
FIGURA 3.41	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	157
FIGURA 3.42	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	157
FIGURA 3.43	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	158
FIGURA 3.44	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	158
FIGURA 3.45	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	160
FIGURA 3.46	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	160
FIGURA 3.47	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	161
FIGURA 3.48	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	161
FIGURA 3.49	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P.....	163

FIGURA 3.50	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	163
FIGURA 3.51	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	164
FIGURA 3.52	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	164
FIGURA 3.53	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	166
FIGURA 3.54	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	166
FIGURA 3.55	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	166
FIGURA 3.56	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	167
FIGURA 3.57	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	168
FIGURA 3.58	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	169
FIGURA 3.59	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	169
FIGURA 3.60	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PD UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	169
FIGURA 3.61	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	171
FIGURA 3.62	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	171
FIGURA 3.63	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	172
FIGURA 3.64	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	172
FIGURA 3.65	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	174
FIGURA 3.66	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	174
FIGURA 3.67	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	175
FIGURA 3.68	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	175
FIGURA 3.69	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	177
FIGURA 3.70	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	177
FIGURA 3.71	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	178
FIGURA 3.72	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	178
FIGURA 3.73	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	180
FIGURA 3.74	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	180
FIGURA 3.75	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	180
FIGURA 3.76	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	181
FIGURA 3.77	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	182
FIGURA 3.78	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	183
FIGURA 3.79	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	183
FIGURA 3.80	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	183
FIGURA 3.81	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	185
FIGURA 3.82	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	185
FIGURA 3.83	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	185
FIGURA 3.84	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PI UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	186

FIGURA 3.85	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	187
FIGURA 3.86	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	188
FIGURA 3.87	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	188
FIGURA 3.88	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	188
FIGURA 3.89	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	190
FIGURA 3.90	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	191
FIGURA 3.91	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	191
FIGURA 3.92	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	191
FIGURA 3.93	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	193
FIGURA 3.94	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	194
FIGURA 3.95	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	194
FIGURA 3.96	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	194
FIGURA 3.97	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	196
FIGURA 3.98	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	196
FIGURA 3.99	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	197
FIGURA 3.100	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	197
FIGURA 3.101	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	199
FIGURA 3.102	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	199
FIGURA 3.103	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	199
FIGURA 3.104	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	200
FIGURA 3.105	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	201
FIGURA 3.106	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO CONVERSOR I/P .....	202
FIGURA 3.107	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	202
FIGURA 3.108	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL PID UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	202
FIGURA 3.109	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL FUZZY UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	204
FIGURA 3.110	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL FUZZY UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	205
FIGURA 3.111	VARIABLE CONTROLADA CON CONTROL FUZZY UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE .....	206
FIGURA 3.112	VARIABLE DE CONTROL CON CONTROL FUZZY UTILIZANDO POSICIONADOR INTELIGENTE.....	206
FIGURA 3.113	COMPORTAMIENTO VARIABLE NIVEL DE FORMA REAL .....	207
FIGURA 3.114	COMPORTAMIENTO VARIABLE NIVEL OBTENIDA CON SIMULINK .....	208
FIGURA 3.115	COMPORTAMIENTO VARIABLE DE CONTROL DE FORMA REAL .....	208
FIGURA 3.116	COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE DE CONTROL OBTENIDA CON SIMULINK .....	208
FIGURA 3.117	DATOS HART DE CORRIENTE Y PRESIÓN TOMADOS CON PACTWARE .....	210
FIGURA 3.118	DATOS HART DE % DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO TOMADO CON PACTWARE .....	210
FIGURA 3.119	DATOS HART DE CORRIENTE Y PRESIÓN TOMADOS CON HART SERVER.....	211

FIGURA 3.120	DATOS HART DE % DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO TOMADO CON HART SERVER.....	211
FIGURA 3.121	DATOS HART DE CORRIENTE Y PRESIÓN TOMADOS CON HART SERVER.....	212
FIGURA 3.122	DATOS HART DE % DESPLAZAMIENTO VÁSTAGO TOMADO CON HART SERVER.....	212
FIGURA 3.123	PRUEBA 1 A) FIRMA DE LA VÁLVULA OBTENIDA CON LA HERRAMIENTA IMPLEMENTADA B) FIRMA DE LA VÁLVULA OBTENIDA CON COMUNICADOR DE CAMPO 475.....	213
FIGURA 3.124	PRUEBA 1 A) PRESIÓN DEL ACTUADOR VS. TIEMPO B) % DESPLAZAMIENTO DEL VÁSTAGO VS. TIEMPO..	213
FIGURA 3.125	PRUEBA 2 A) FIRMA DE LA VÁLVULA OBTENIDA CON LA HERRAMIENTA IMPLEMENTADA B) FIRMA DE LA VÁLVULA OBTENIDA CON COMUNICADOR DE CAMPO.....	214
FIGURA 3.126	PRUEBA 2 A) PRESIÓN DEL ACTUADOR VS. TIEMPO B) % DESPLAZAMIENTO DEL VÁSTAGO VS. TIEMPO..	214
FIGURA 3.127	CORRIENTE DE LAZO Y PRESIÓN DEL ACTUADOR VS. TIEMPO .....	216
FIGURA 3.128	PORCENTAJE DE DESPLAZAMIENTO Y PUNTO DE CONSIGNA VS. TIEMPO.....	217
FIGURA 3.129	VARIABLE DE CONTROL Y PORCENTAJE DE LA VARIABLE PRIMARIA VS. TIEMPO.....	217

## RESUMEN

El presente trabajo contiene información detallada sobre la implementación de un posicionador inteligente o controlador digital en una válvula proporcional parte del módulo ND-0407 del Laboratorio de Redes Digitales y Control de Procesos Industriales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga cuyo objetivo es controlar la variable nivel al variar el flujo mediante la apertura y cierre de dicha válvula. Con el fin de comprobar el impacto que tuvo la implementación del posicionador sobre la planta se comparan las respuestas del sistema bajo los diferentes controles convencionales antes y después del montaje del nuevo elemento. Además se integró el controlador digital de la válvula a una red HART punto a punto con un ordenador por medio del modem HART (interfaz física) y se desarrolló una herramienta de diagnóstico y monitoreo de la válvula tanto en línea como fuera de línea bajo el entorno Labview asociado con el servidor HART (software de interfaz), con la opción de registrar dichos datos en Excel o en blocs de notas para contrastarlos con los obtenidos por el configurador de campo o el software Pactware que tienen prestaciones similares. También se obtuvo el modelo matemático de la planta por medio de la herramienta ident de Matlab, finalmente se provee un manual sobre el funcionamiento configuración y calibración de conjunto válvula-posicionador y uso de la herramienta que se desarrolló, mismo que servirá como guía para el desarrollo de prácticas de los estudiantes de ingeniería de la institución.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **POSICIONADOR ELECTRONEUMÁTICO**
- **VÁLVULA DE CONTROL**
- **RED HART**
- **CONTROL AUTOMÁTICO**
- **VARIABLE NIVEL**

## ABSTRACT

This paper contains detailed information on the implementation of a smart digital positioner or a digital valve controller of the module ND-0407 of the Networks and Process Control Laboratory of Armed Forces University ESPE Extension Latacunga aimed at controlling the variable level by varying the flow by opening and closing of that valve. In order to check the impact of the implementation of the positioned on the process, system responses under different conventional controls before and after assembly of the new element are compared. Besides the digital valve controller is integrated to a HART network point to point with a computer via the HART modem (physical interface) and developed a diagnostic tool and monitoring of the valve both online and offline under the environment Labview associated with the HART server (software interface), with the option of recording the data in Excel or notebooks to contrast with those obtained by the field configurator or the software PACTware which has similar benefits. The mathematical model of the plant through Matlab tool ident was also obtained finally a manual on operating configuration and calibration valve-positioning assembly and use of the tool that was developed, which will serve as a guide is provided for development of practical engineering students of the institution.

### KEYWORDS:

- **POSITIONER**
- **CONTROL VALVE**
- **RED HART**
- **AUTOMATIC CONTROL**
- **LEVEL VARIABLE**

## INTRODUCCIÓN

### **CAPÍTULO I:**

Este capítulo contiene información sobre el protocolo de comunicación industrial HART, así como los principios de funcionamiento de los elementos principales del sistema que se va a analizar como son el transmisor de nivel tipo radar, la válvula proporcional y el controlador inteligente de la válvula o posicionador. Además de las características que poseen los diferentes algoritmos de control y las características del modelo no lineal correspondiente a nuestra planta.

### **CAPÍTULO II:**

En este apartado se detallan todos los procedimientos y consideraciones que se deben tomar en cuenta para montar el posicionador en la válvula, y como se debe configurar y calibrar este nuevo conjunto. Además explica la programación desarrollada tanto en el PLC como en el software Labview para las pruebas de control del sistema y estado de la válvula.

### **CAPÍTULO III:**

Para esta sección se presentan las gráficas y valores de los parámetros obtenidos al desarrollar las pruebas para verificar el comportamiento del sistema con su respectivo análisis. Además se presentan los alcances y limitaciones del proyecto.

### **CAPÍTULO IV:**

Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó después de desarrollar el presente trabajo y recomendaciones que pueden ayudar a la continuación o evaluación de las pruebas ya realizadas.

## CAPÍTULO I

### 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1 Introducción

Para facilitar el desarrollo de actividades cotidianas como para la tecnificación y mejora de los procesos industriales, se desarrollan equipos con nuevas tecnologías cuyo objetivo es tener una producción a tiempo, optimizando recursos además de disminuir los riesgos inherentes tanto para las personas como para los elementos que conforman el sistema en sí, paralelamente minimizando el impacto que tendrá el proceso con el medio ambiente.

Por todo ello y en base a un estudio de costo beneficio en la actualidad se opta por invertir en la implementación de sistemas automáticos, los mismos que están conformados por un sin número de elementos y dispositivos con características acordes al requerimiento de cada proceso, los mismos que operan dentro una estructura descrita en la pirámide de automatización.

Esta pirámide de automatización permite entender de forma gráfica la jerarquización de los elementos acorde a su función dentro del sistema de control, así como también permite comprender que estos elementos requieren comunicarse entre sí para lograr mantener a los diferentes parámetros del proceso en las condiciones deseadas.

Aunque cada proceso es un mundo en sí por las condiciones y necesidades en las que se desarrollan de forma general se destacan cuatro partes fundamentales que son; los sensores cuyo fin es captar las señales físicas, los transmisores encargados de convertir la naturaleza de esta señal a una que pueda ser interpretada por los controladores con capacidad de procesar esta

información y en conjunto con los elementos de control final mantener dentro de ciertas condiciones a la variable de interés.

Por esta razón el capítulo 1 describe las cuatro partes fundamentales y los tipos de comunicaciones que utilizan, igualmente el nivel que ocupan dentro de la pirámide de automatización, haciendo énfasis en los dispositivos que forman parte del módulo didáctico ND-0704 existente en el laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

## 1.2 Pirámide de automatización

La pirámide de la automatización CIM (Computer Integrated Manufacturing) que traducido al español significa Fabricación Integrada por Computador, resume de forma gráfica, la estructura de los sistemas de comunicación en un entorno productivo (Figura 1.1), tomando en cuenta tanto a los procesos de producción (diseño, ingeniería y fabricación) como a los de gestión de empresa, dividiendo los varios niveles de acuerdo al tráfico y tipo de información que se intercambia.[1]

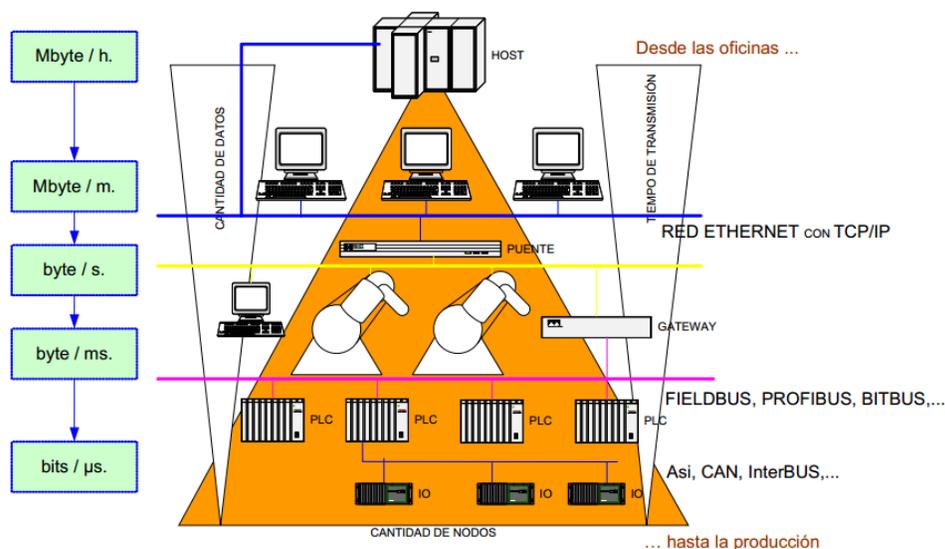


Figura 1.1 Pirámide de automatización

Fuente: [2]

En los niveles superiores de la pirámide de automatización el volumen de datos es grande y el tiempo de respuesta posee un mayor grado de tolerancia que el de los niveles inferiores, cuya respuesta debe ser inmediata (comportamiento determinista) con volúmenes de información mucho menores.

El CIM ha de planificarse “top-down” (“de arriba hacia abajo”), pero debe implantarse “bottom-up” (“de abajo hacia arriba”); las tecnologías se relacionan entre sí, tanto dentro de cada nivel como entre los distintos niveles a través de los diferentes estándares de comunicaciones industriales por lo que se describirá a continuación cada nivel. [1]

### **1.2.1 Nivel de gestión**

Procesa tareas de tipo corporativo que implican, generalmente grandes cantidades de información (administración). Se puede acceder a todos los puntos de la red para, por ejemplo, recoger datos de proceso y transmitir nuevas consignas de producción. Puede haber cientos de puestos de trabajo (estaciones).

### **1.2.2 Nivel de célula**

Procesa las tareas de automatización. Aquí aparecen los autómatas, PC's y equipos de visualización. La transferencia de información es considerable, aumentando el tamaño de los paquetes de información y el tiempo de tránsito necesario para la transmisión de estos. Ya no es tan importante la rapidez, prima más la seguridad del envío.

### **1.2.3 Nivel de campo**

Realiza la unión entre las instalaciones y los equipos que las controlan. Permite la comunicación entre los equipos de control de maquinaria y los equipos del nivel de célula. La periferia distribuida en la planta, está compuesta por módulos de Entradas/Salidas, medidores, sistemas de control de velocidad, válvulas o pantallas de operador, utiliza técnicas de transmisión muy eficientes,

capaces de trabajar en tiempo real mediante comunicaciones cíclicas o acíclicas.

#### **1.2.4 Nivel actuador/sensor**

Este nivel es el peldaño más bajo de la jerarquía de los sistemas automatizados. Trabaja con poca información, y su gestión es relativamente sencilla. Se transmiten cantidades reducidas de información (pocos bits) a gran velocidad. Las interfaces utilizan técnicas de instalación sencillas y de bajo costo, haciendo servir el mismo medio para alimentar a los elementos de campo y para transmitir la información mediante comunicaciones cíclicas.

La red a este nivel debe proporcionar una relación bits transmisión/costo lo más ajustada posible. Esto será posible gracias a:

- Un cable sencillo y económico (dos hilos, sin apantallar).
- Flexibilidad en el tendido del cableado (Cualquier topología imaginable).
- Comunicaciones robustas (inmune a interferencias).
- Protocolo de transmisión que garantice la respuesta en “tiempo real” (determinístico y rápido).
- Interfaces adaptados a cada necesidad (electrónica de bajo coste).
- Protección IP elevada (IP65 como mínimo).
- Resistencia a amplios márgenes de temperatura (-25°C a +85°C).

### **1.3 Redes de comunicación industriales**

#### **1.3.1 Generalidades**

En la industria moderna, las comunicaciones de datos entre diferentes sistemas, procesos e instalaciones suponen uno de los pilares fundamentales para que ésta se encuentre en un nivel de competitividad exigida en los procesos productivos actuales. Existen varias características pero dentro de las principales existen:

- **Volumen de datos:** Cantidad de datos que viajan por la red en cada envío.
- **Velocidad de transmisión:** Velocidad a la que viajan los datos por la red.
- **Velocidad de respuesta:** Velocidad que hay entre el momento de dar la orden y la respuesta del dispositivo.

En un sistema de comunicación de datos industriales es tanto más exigente cuanto más cerca del proceso se encuentra, para lo cual se presenta la (Tabla 1.1) que compara las principales características de dos tipos de redes.

**Tabla 1.1**  
**Características de dos redes de datos.**

	<b>Volumen de datos</b>	<b>Velocidad de transmisión</b>	<b>Velocidad de respuesta</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Red de ordenadores</b>	Elevado	Elevado	Bajo	Lectura de datos
<b>Detector de proximidad</b>	Muy bajo	Bajo	Instantánea	Sistema de seguridad

Fuente: [3]

Si se trata el ejemplo expuesto en la (Tabla 1.1) dándole una aplicación, es posible que se aclaren estas características; si se quiere comunicar un proceso industrial con la red de ordenadores, estos ordenadores podrían ser utilizados para la lectura de las bases de datos que refleja el estado actual de la producción.

En este caso la velocidad de respuesta es baja, ya que se debe tener en cuenta el tráfico de datos en la red, en este caso, los datos llegarán al sistema de destino con cierto tiempo de retardo, lo que no provocará ninguna disfunción en el sistema productivo. Mientras que cuando un sensor cambie de estado, la respuesta en el equipo de control debe ser inmediata.

### 1.3.2 Definición de comunicaciones industriales

Se pueden definir las comunicaciones industriales como el área de la tecnología que estudia la transmisión de información entre circuitos y sistemas electrónicos, que utilizados para llevar a cabo tareas de control y gestión del ciclo de vida de los productos industriales.[4].

Por lo tanto las comunicaciones industriales deben resolver la problemática de la transferencia de información entre los equipos de control del mismo nivel y entre los correspondientes a los niveles contiguos de la pirámide CIM. En la década de 1980, las Comunicaciones Industriales comenzaron a realizarse mediante conexiones punto a punto, para facilitar la utilización de los computadores.

La complejidad de las conexiones punto a punto es que despliegan múltiples canales de comunicación. Por ello para llevar a cabo dicha transferencia de información de una manera más eficaz, los equipos deben compartir canales de comunicación, dando lugar al desarrollo de redes de comunicaciones con características adecuadas.

### 1.3.3 Modos de transmisión de datos

#### a) Paralelo

Esta forma de transmisión permite el envío de información a gran velocidad. El inconveniente es la cantidad de líneas de comunicación y la distancia máxima a la cual se puede realizar ésta. Se mide en bits, o líneas de comunicación (pistas de circuito impreso). Así se tiene buses de 8, 16, 64, 128 bits. Ejemplos de este tipo de bus son:

- Sistemas domésticos: ISA, PCI, AGP.
- Sistemas industriales: Eurocard, VME, FutureBus.

#### b) Serie

Mediante un sistema clásico de transmisión de señal por niveles de tensión, por ejemplo, el sistema transmisor hace variar los niveles de señal entre dos

valores o estados. El sistema receptor debe ser capaz de identificar esos cambios de estado, e interpretarlos correctamente para poder traducirlos a bits. Este método exige que, tanto emisor como receptor estén sincronizados.

#### 1.3.4 Codificación de señales

Una vez definido el modo de transmisión de la información hay que determinar la forma de la misma, o como hacer una en que los bits que representan la información que se quiere transmitir se puedan enviar a la mayor velocidad posible sobre la línea de transmisión escogida.

Uno de los modelos más extendidos es la codificación ASCII. Es una forma de transmisión síncrona, que delimita cada carácter mediante un bit de inicio, uno de final, y uno de control de error (bit de paridad).

Una mejora sustancial en cuanto a efectividad se consigue con la codificación Manchester, que permite la sincronización ente emisor y receptor. Este código divide a cada bit en dos subintervalos, definiendo el nivel lógico de cada bit mediante el sentido del flanco entre el primer y segundo intervalo.

#### 1.3.5 Protocolos de comunicación

Una vez definido el soporte físico y las características de la señal a transmitir, hay que determinar la forma en la cual se va a realizar el intercambio de información (sincronización, entre los extremos de la línea, detección y corrección de errores, gestión de enlaces de comunicación, etc.)

El protocolo de comunicación, engloba todas las reglas y convenciones que deben seguir dos equipos para poder intercambiar información. Cualquier tipo de enlace de comunicación se puede estructurar de la siguiente manera:

D:T:E ↔D:C:E↔(CANAL)↔D:C:E↔D:T:E

Dónde:

- DTC (Data Terminal Equipment): Equipo terminal de datos

- DCE (Data Communication Equipment): Equipo de Comunicación de Datos.

El objetivo de cualquier protocolo de comunicación es poder conectar y mantener el diálogo entre dos equipos terminales de datos (DTE), permitiendo que la información pueda fluir entre ambos con seguridad (sin fallos). Es decir, todas las reglas y especificaciones del lenguaje a utilizar por los equipos.

La estandarización es un punto de conflicto entre intereses técnicos y comerciales pues cada fabricante realiza investigaciones encaminadas a que sus equipos cubran determinadas necesidades y, por supuesto, pretende después que estas soluciones se conviertan en estándar. Este tipo de soluciones tienen denominaciones tales como:

- **HART** Control de procesos
- **Profibus** Control discreto y Control de Procesos
- **AS-i** Control Discreto
- **Can** Control Discreto

Prácticamente cualquier protocolo puede integrarse, en mayor o menor medida, en cualquier nivel de la famosa pirámide de automatización, pero el objetivo es hallar un equilibrio en la relación prestaciones-precio-compatibilidad con otras tecnologías que permiten complementarse unas a otras. No hay un bus mejor que otro, sino que, su selección depende de la aplicación.

Para elegir un bus, se debe tener en cuenta las siguientes características:

- Costo por nodo de bus.
- Costo de programación (o desarrollo).
- Tiempos de respuesta.
- Fiabilidad.
- Robustez (tolerancia a fallos).
- Modos de funcionamiento (maestro, esclavo, acceso remoto).
- Medios físicos (cable, fibra óptica, radio).

- Topologías permitidas.
- Gestión.
- Interfaces de usuario.
- Futuro (o lo que es lo mismo, normalización).

## 1.4 Protocolo HART

### 1.4.1 Historia

El protocolo HART (transductor remoto direccionable en red) fue creado a mediados de 1980 por la empresa Rosemount Inc., para ser usada con instrumentos de medida inteligentes, inicialmente fue de uso exclusivo de su propietario pero pronto se hizo libre. En 1993 la marca registrada pasa a nombre de la Fundación de Comunicación HART (HCF).

HART es un protocolo que permite una comunicación (acceso de datos) bidireccionalmente entre dispositivos de campo inteligentes y la unidad central. El beneficio que representa el protocolo HART frente a las comunicaciones cableadas analógicas de 4 a 20 mA regularmente usadas, es que permite comunicar datos digitales al mismo tiempo con la señal analógica (Figura 1.2).



Figura 1.2 Dos canales de comunicación

Fuente: [5]

### 1.4.2 Funcionamiento

El protocolo HART utiliza la norma Bell 202 y sigue el modelo OSI (Open Systems Interconnections) aunque solo se implementan las capas 1,2, 3, 4 y 7 pues las demás capas no son necesarias en esta comunicación. La capa 1 (capa física) determina la comunicación digital, que se realiza modulando la frecuencia de una señal analógica (FSK), de amplitud constante 1mA (+ 0,5 mA) que se superpone a la señal analógica medida, como se muestra en la (Figura 1.3).

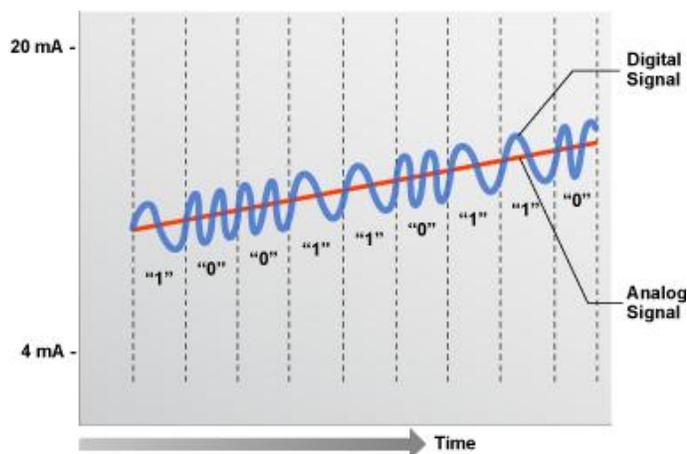


Figura 1.3 Modulación FSK

Fuente: [5]

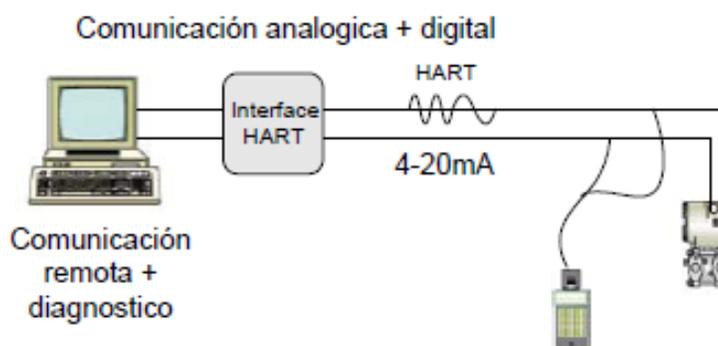
Se codifica entonces el estado lógico 1 con 1200Hz y el estado lógico 0 con 2200Hz en forma senoidal, su nivel de continua es cero por lo que no afecta a la señal de analógica de 4-20mA. Lo que permite una comunicación bidireccional, con información adicional del dispositivo.

La velocidad de transmisión es de 1200 bps, con lo cual el maestro puede tener 2 o más actualizaciones digitales por segundo del dispositivo inteligente.

En la capa 2 (capa de enlace) se forma y comprueba la trama según el protocolo HART que es: 1 bit de inicio, 8 bits de datos, 1 bit de paridad impar y 1 bit de stop, de este modo se asegura la correcta transmisión de los datos. En esta capa también se define el protocolo maestro- servidor esto quiere decir que

el dispositivo de campo (esclavo) habla solo cuando el maestro le pregunta. Pueden existir dos maestros (primario y secundario), las reglas de tiempo se definen cuando un maestro puede iniciar la comunicación con el esclavo.

Un maestro primario generalmente es un DCS (Distributed Control System), como un PLC, o un sistema de control basado en un PC, mientras que un maestro secundario puede ser un comunicador portátil (Figura 1.4)

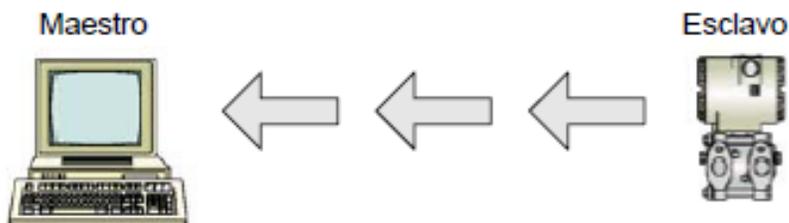


**Figura 1.4 Configuración de dos maestros**

Fuente: [5]

También existe la comunicación en modo "Burst", en la cual un único esclavo puede responder un mensaje HART de manera continua al maestro (Figura 1.5).

La capa 3 (capa de red) define el enrutamiento, seguridad punta a punta y servicios de transporte. La capa 4 (capa de transporte) se asegura de que las comunicaciones punta a punta sean correctas.



**Figura 1.5 Comunicación HART modo "Burst"**

Fuente: [5]

La capa 7 (capa de aplicación) se basa en usar una serie de comandos HART que permiten obtener datos y cambiar la configuración de parámetros del transmisor. Los comandos se dividen en 4 grupos y son:

- **Comandos universales** - suministran funciones que se pueden implementar en todos los dispositivos de campo
- **Comandos de Práctica Común** - suministran funciones comunes para muchos, pero no para todos los dispositivos de campo
- **Comandos Específicos para Dispositivo** - suministran funciones que son únicas para un dispositivo de campo en particular y son especificadas por el fabricante del dispositivo.
- **Comandos para Familia de Dispositivos** - suministran un juego de funciones estandarizadas para instrumentos con tipos particulares de medición y permiten el acceso genérico total sin usar comandos específicos para un dispositivo. [6]

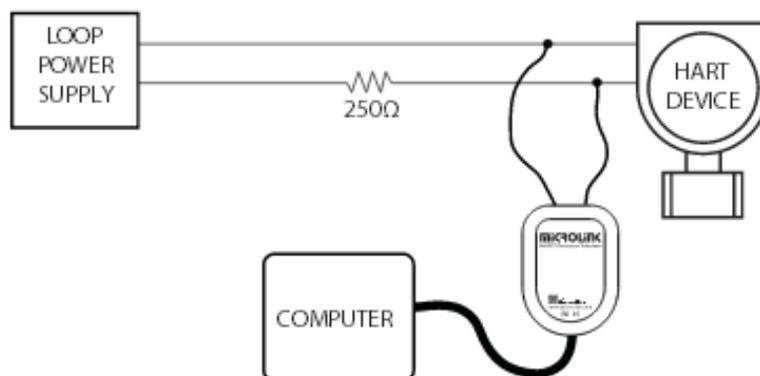
### 1.4.3 Beneficios

De esta forma el protocolo permite:

- Configuración o reconfiguración del dispositivo
- Diagnóstico del dispositivo
- Identificación y corrección de problemas del dispositivo
- Lectura de valores de medición adicionales suministrados por el dispositivo
- Estado de operación y bienestar del dispositivo, etc.,

### 1.4.4 Modem HART

El modem HART ofrece la interfaz física entre los dispositivos HART y una PC Windows con comunicación serie como muestra la (Figura 1.6), con un diseño robusto, ideal para el personal en contacto con los dispositivos HART en un entorno industrial.



**Figura 1.6 Conexión del modem HART**

Fuente:[7]

El modem HART con terminal USB (Figura 1.7) es una solución muy práctica ya que en conjunto con un servidor HART permite la configuración y monitorización de cualquier dispositivo HART gracias a sus conductores que simulan un puerto virtual RS-232 para la compatibilidad con el software existente.



**Figura 1.7 Modem HART USB**

Fuente: [8]

#### 1.4.5 Servidores HART

- **HART server**

El servidor HART (Figura 1.8) es un software de Windows que actúa como la interfaz de comunicación (OPC) entre el software del sistema y la red física subyacente, incluyendo multiplexores, paneles de conexión, canales y dispositivos. La interfaz de usuario del servidor HART se utiliza sólo para

configurar y administrar los componentes físicos que forman una jerarquía del servidor HART.[7]



**Figura 1.8 Servidor HART**

**Fuente: [7]**

El servidor OPC HART permite acceder a datos disponibles en el dispositivo, con la ventaja que se configura automáticamente.

Los instrumentos aptos para HART se pueden conectar directamente al puerto serie de la PC a través de RS-232 o RS-485. Los sistemas de dispositivos HART se pueden conectar a través de multiplexores HART y sistemas de I/O usando la biblioteca de controladores de dispositivos compatibles.

El servidor HART también hace posible el uso de información "smart" de instrumentos y datos de procesos en la sala de control para las estrategias de gestión más avanzadas. Y, por supuesto, las aplicaciones cliente OPC abren una amplia gama de oportunidades para la mejora de las operaciones.

- **PACTware**

PACTware (Process Automation Configuration Tool) es un software cuyo fin es controlar cualquier dispositivo de campo indistintamente del fabricante o bus de campo (Figura 1.9), los mismos que son elegidos de un catálogo de dispositivos con capacidad de comunicación y que satisfacen una estructura de comunicación definida en una planta de producción.

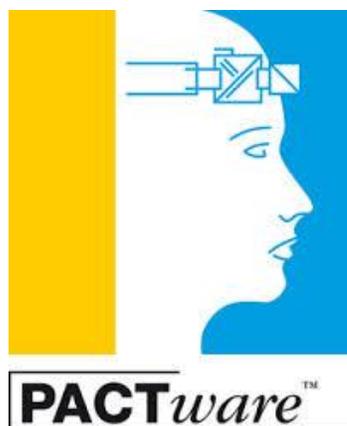


Figura 1.9 PACTware

Para ello se utiliza el estándar FDT (Field Device Tools) entre el programa marco PACTware y los diferentes módulos de software para el manejo de los dispositivos. Los módulos de software para el manejo de dispositivos son los DTM o aplicaciones para gestión de dispositivos (Device Type Manager). Es decir el estándar FDT/DTM se basa en el tradicional concepto de ventana y controlador, el FDT es la ventana o marco en el que operan los controladores o DTM. Un paralelo simple de entender es el caso de las impresoras en Windows. Cada impresora tiene su propio driver, sin este driver, Windows no sabe cómo administrar la impresora.

Los FDT son en este caso una ventana de Windows y los DTM son los controladores que informan al FDT cómo entender y mostrar la información que viene de los equipos instalados en la planta. Esta estructura hace posible la aplicación de conceptos modernos y sencillos de manejo, ya que la interfaz para el control de dispositivos está optimizada para el dispositivo.

#### **1.4.6 Bases de datos HART**

Los servidores HART proporcionan acceso a los datos universales que posee un dispositivo HART como muestra la (Figura 1.10).

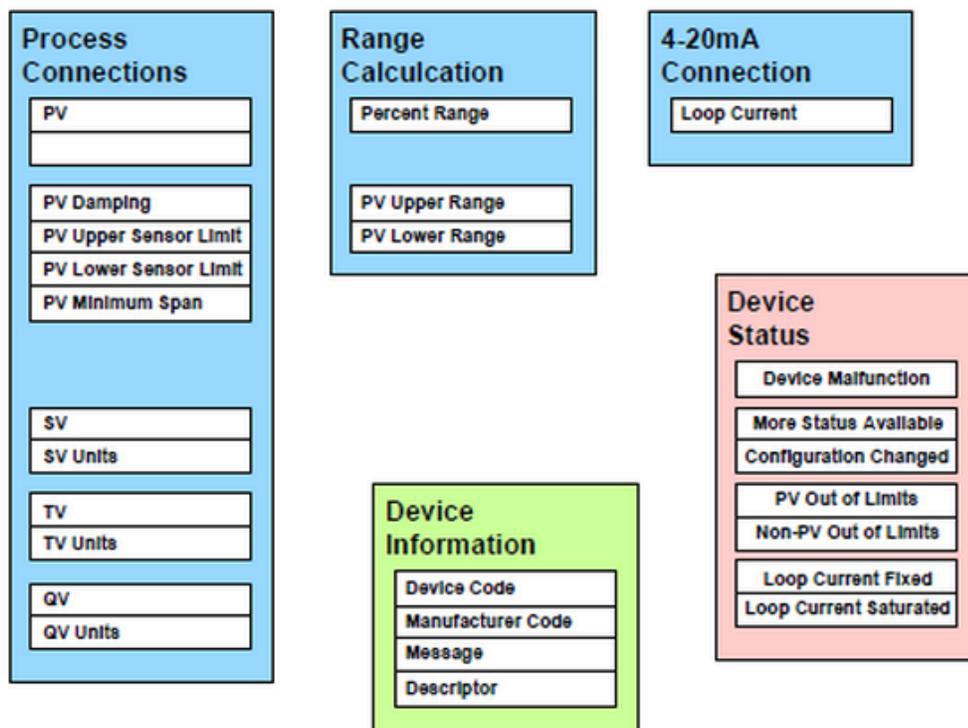


Figura 1.10 Bloques de datos HART

Fuente: [5]

- **Process Connections:** estos datos muestran directamente la caracterización del proceso. Incluye los datos de la variable primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria con sus respectivas unidades.
- **The Range Calculation and 4-20mA Connections:** son datos sobre la conexión del dispositivo de campo en el bucle de corriente de 4-20 mA, incluye el valor superior e inferior del rango.
- **Device Information:** permite acceder a la información del dispositivo y se puede leer o escribir desde un cliente OPC.
- **Device Status:** este bloque proporciona información del estado del dispositivo. Se lee en cada transacción del cliente OPC HART

## 1.5 Modelamiento de un sistema

Un modelo es una herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema ante determinadas condiciones y entradas sin necesidad de

experimentar sobre él. Existen dos métodos principales para obtener el modelo de un sistema:[9]

- **Modelado teórico:** se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso.
- **Identificación del sistema:** se trata de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la planta bajo estudio.

### 1.5.1 El proceso de identificación

En términos generales, el proceso de identificación comprende los siguientes pasos:[9]

1. **Obtención de datos de entrada-salida:** para ello se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo.
2. **Tratamiento previo de los datos registrados:** los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se trata, por tanto, de ‘preparar’ los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
3. **Elección de la estructura del modelo:** si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
4. **Obtención de los parámetros del modelo:** a continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor se ajustan a la respuesta del modelo, en función de los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. **Validación del modelo:** el último paso consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la

aplicación. Si se llega a la conclusión que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:

- El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

### 1.5.2 Modelo ARX

El modelo ARX posee la siguiente estructura: [10]

$$\begin{aligned} y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) \\ = b_1u(t-n_k) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b-n_k+1) \end{aligned} \quad \text{Ec. ( 1.1 )}$$

Donde:

$y(t)$ : Salida en tiempo  $t$

$n_a$ : Numero de polos.

$n_b$ : Número de ceros + 1

$n_k$ : Número de muestras de entrada que se producen antes de la entrada afecte a la salida, también llamado el tiempo muerto en el sistema.

$y(t-1) \dots y(t-n_k)$ : Salidas anteriores de las cuales depende la salida actual.

$u(t-n_k) \dots u(t-n_k-n_b+1)$ : Entradas anteriores y retardos de los cuales depende la salida actual.

$e(t-1) \dots e(t-n_c)$ : Valor de la perturbación de ruido blanco.

Una forma más compacta de escribir esta ecuación es Ec. ( 1.2 ):

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-n_k) + e(t) \quad \text{Ec. ( 1.2 )}$$

Dónde:

$n_a$  Es una matriz de orden  $N_y \times N_y$  y representa el orden polinomio  $A(q)$

$n_b$  Es una matriz de orden  $N_y \times N_u$  y representa el orden polinomio  $B(q)$

$n_k$  Es una matriz de orden  $N_y \times N_u$  Es el retardo de entrada-salida (Expresada como ceros del polinomio B.)

El operador de retraso, será  $q$  específicamente por lo que los polinomios son:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad \text{Ec. ( 1.3)}$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1} \quad \text{Ec. ( 1.4)}$$

## 1.6 Control de la variable nivel

### 1.6.1 Variables físicas

Una variable que se necesita medir, monitorear y controlar en la industria es el nivel, por su importancia en el óptimo funcionamiento del proceso, como en etapas de control de materia prima y el almacenamiento del producto final.

### 1.6.2 Elemento primario de medición

Para obtener medidas de nivel existen instrumentos que miden directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, miden la presión hidrostática o miden el desplazamiento producido por un flotador en el propio líquido, algunos instrumentos funcionan aprovechando las características eléctricas del líquido o utilizan otros fenómenos.

#### Medidor de nivel tipo radar:

El medidor de radar se basa en la emisión continua de una onda electromagnética generalmente en el intervalo de los rayos X, el sensor que se encuentra ubicado en la parte superior del tanque emite una onda continua modulada en alta frecuencia hacia la superficie del líquido. Una parte de la energía enviada es reflejada por el líquido y la capta el sensor. El tiempo empleado por las microondas está en función del nivel del tanque.

Las ventajas de la tecnología de radar son:

- Mediciones directas de nivel muy fiables, sin necesidad de compensación en caso de cambio en las condiciones del proceso (densidad, conductividad, viscosidad, pH, temperatura y presión).
- La instalación en la parte superior minimiza el riesgo de fugas y permite que se realice con líquido en el interior del depósito.
- Al no tener piezas móviles, no requiere recalibración, por lo que el mantenimiento es mínimo.
- La tecnología sin contacto es ideal para las aplicaciones con materiales corrosivos, sucios o adherentes.

### **1.6.3 Transmisores**

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica o digital. La señal digital actualmente es la más utilizada por las ventajas que ofrece en exactitud, facilidad de comunicaciones y grabación de la memoria técnica de las variables del proceso. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 32 bits, entonces puede enviar 32 señales binarias simultáneamente.

Que un transmisor sea “inteligente” significa que además de transmitir la señal de proceso tiene la capacidad de realizar otras funciones como:

- Generación de señales digitales.
- Uso de otros sensores tales para compensar los cambios en la variable y conseguir una mayor exactitud.
- Grabación de datos históricos.
- Mantenimiento.
- Rangeabilidad (relación “señal máxima / señal mínima”).
- Autocalibración por variaciones del proceso.
- Autodiagnóstico.
- Comunicabilidad.

## Transmisor de nivel Rosemount serie 5402

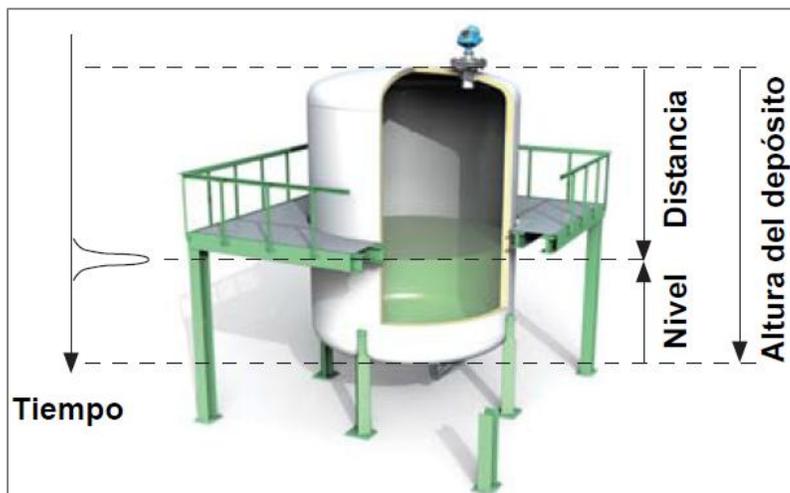


Figura 1.11 Depósitos de almacenamiento y compensación

Fuente: [11]

- **Principio de funcionamiento:**

Cuando un pulso de radar alcanza un medio con una constante dieléctrica diferente, parte de la energía se refleja de vuelta al transmisor (Figura 1.11). La diferencia de tiempo entre el pulso transmitido y el reflejado es proporcional a la distancia hasta la superficie del producto, a partir del cual se calcula el nivel, volumen y velocidad de variación del nivel.

- **Características:**



Figura 1.12 Transmisor de nivel por radar sin contacto, de dos hilos

Fuente:[11]

El transmisor de nivel radar de alta frecuencia Rosemount 5402 es un transmisor de nivel de radar de 2 hilos (Figura 1.12), diseñado para un rendimiento fiable en una amplia gama de condiciones de proceso y aplicaciones. Las características incluyen:

- Alta frecuencia (26 GHz): un haz de radar concentrado requiere menor diámetro de la antena.
- El haz estrecho lo hace adecuado para montarse en válvulas, aberturas pequeñas y cónicas altas, siendo más fácil evitar reflexiones no deseadas de obstáculos mecánicos, como agitadores y bobinas calefactoras.
- Antena cónica resistente a la acumulación de material y a la condensación.

#### **1.6.4 Controladores**

El controlador es elemento encargado de “procesar” la señal de error y “generar” una señal encargada de disminuir el valor de dicha señal de error con el objetivo de lograr la máxima precisión posible del sistema de control; el procedimiento mediante el cual el controlador genera la señal de control se denomina acción de control.

La elección del tipo de controlador debe basarse en la naturaleza de la planta, condiciones de operación e incluyendo consideraciones como seguridad, costo, disponibilidad, fiabilidad, precisión.

##### **c) Control proporcional integral derivativo (PID)**

Aunque el control proporcional integral es adecuado para la mayoría de las situaciones de control. No es adecuado para todos los casos. Algunos procesos presentan problemas de control muy complicados que no pueden ser manejados por el control proporcional integral. Existen dos casos específicos:

- Cambios rápidos en la carga

- Largas demoras entre la aplicación de la acción correctiva y la aparición de los resultados de esta acción correctiva en la medición

En estos casos la solución puede ser el control proporcional integral derivativo, la acción proporcional integral derivativa (PID) genera una señal descrita por la Ec. ( 1.5). Resultado de la acción proporcional, la acción integral y derivativa conjuntamente es decir su acción correctiva está determinada por tres cosas:

- La magnitud del error que es la parte proporcional.
- La integral de tiempo del error o la magnitud del error multiplicado por el tiempo que ha persistido que es la parte integral.
- La razón de cambio del error con el tiempo que es la parte derivativa.

$$m(t) = k \cdot e(t) + k_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + k_i \int_0^t e(t) \cdot dt$$

$$\Rightarrow k \cdot \left[ 1 + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \right]$$

**Ec. ( 1.5 )**

Y si TL/CI=0 se obtiene la Ec. ( 1.6):

$$M(s) = k \cdot \left( 1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \cdot E(s) \Rightarrow \frac{M(s)}{E(s)} = k \cdot \left( 1 + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right)$$

**Ec. ( 1.6 )**

La Figura 1.13 muestra la estructura del control PID cuyas acciones permiten eliminar el error en estado estable, logrando una buena estabilidad relativa del sistema de control, lo que implica una respuesta transitoria con tiempos de adquisición y un valor máximo de sobreimpulsos pequeños.

El diseño de un control PID se realiza diseñando primero el control proporcional derivativo para cumplir las condiciones de respuesta transitoria y posteriormente, se añade el control proporcional integral de manera que su incorporación no afecte la respuesta transitoria pero que si elimine el sistema.

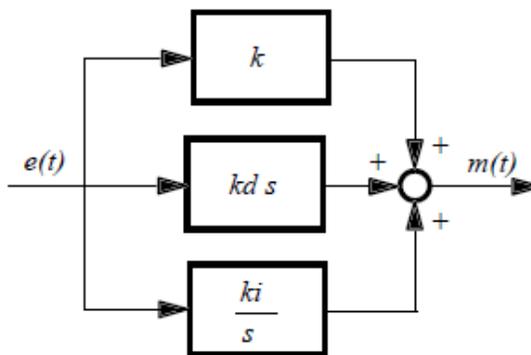


Figura 1.13 Diagrama de bloques de un control PID

Fuente: [12]

#### d) Control con lógica difusa

En la teoría de lógica difusa, aparecen nuevas alternativas respecto de la lógica tradicional, puesto que, al evaluar una proposición, ya no es verdadera o falsa sino que la misma tiene un cierto grado de veracidad, y que a su vez depende del grado de veracidad de sus premisas.

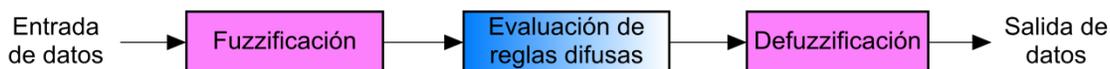
En un control difuso se utilizan sistemas basados en reglas, que emplean lógica difusa, como elemento central. Dado su estado, y los valores de las variables de entrada, estos sistemas evalúan la veracidad de cada regla, y así, toman decisión sobre los cambios a realizar en las variables de salida. Una vez actualizadas las mismas, estas producirán un cambio sobre la planta, luego se vuelven a obtener los valores de las variables de entrada, comenzando un nuevo ciclo. [13]

Las reglas se deben establecer en base a la vasta experiencia del operador quien ha desarrollado la habilidad de controlar un proceso complejo utilizando únicamente una descripción cualitativa de su dinámica. Es por ello que lo que ahora se está procesando ya no son ecuaciones, números o tablas crudas sino, reglas, es decir se procesan cosas tales como:

*“Si la temperatura es baja ENTONCES aumente el ciclo de actividad del calefactor”*

*“Si la temperatura es casi alta ENTONCES disminuya un poco el ciclo de actividad del calefactor”*

Este proceso cíclico puede ser dividido en tres grandes partes (Figura 1.14), fuzzificación, evaluación de reglas y defuzzificación.



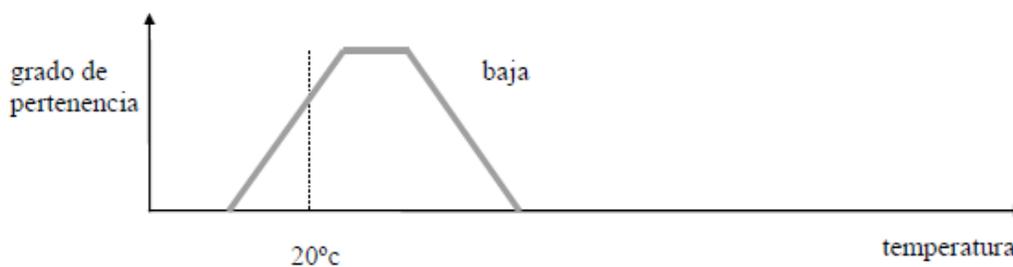
**Figura 1.14 Etapas de un control fuzzy**

Fuente:[13]

- **Fuzzificación**

Esta es la primera parte del proceso, luego del procedimiento convencional de adquirir los valores de las variables del sistema y calcular otras, se procede a calcular el grado de pertenencia de tales variables a todos los posibles conjuntos fuzzy (entradas fuzzy) que se le han asignado.

Tomando como ejemplo otra vez la variable temperatura, con un valor de 20°C, se cuantifica su grado de pertenencia a los conjuntos representados con las siguientes etiquetas lingüísticas; muy baja, baja, templada, alta y muy alta. Para ello se debe haber definido, para cada una de las etiquetas, una función de pertenencia, define qué valores de la variable temperatura les pertenecen y con qué grado.



**Figura 1.15 F. de pertenencia y valor de pertenencia para 20°C para baja**

Fuente:[13]

Son las funciones de pertenencia las que permiten cuantificar los conceptos que representan las etiquetas. En la (Figura 1.15) se puede observar la función de pertenencia para la entrada fuzzy baja, y el valor de pertenencia para 20°C.

Si ahora se realiza el mismo procedimiento para muy baja (Figura 1.16), se verá que también, para 20°C, es parcialmente muy baja.

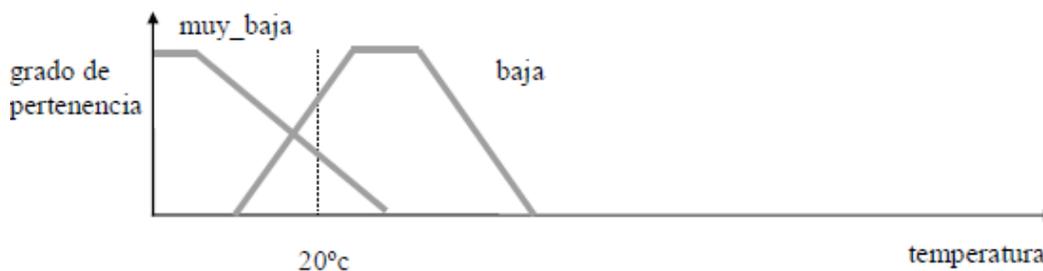


Figura 1.16 F. de pertenencia y valor de pertenencia para 20°C para muy baja

Fuente:[13]

Al finalizar este proceso, queda asignado para cada entrada fuzzy, el grado de pertenencia del valor actual de la variable que le corresponde.

- **Evaluación de reglas.**

Una vez realizada la fuzzificación, está en condiciones de evaluar los antecedentes de las reglas, obteniendo el grado de verdad o “peso”, para cada una de ellas. Si se tiene una regla como la siguiente:

“Si la temperatura es baja ENTONCES aumente el ciclo de actividad del calefactor”.

El peso de la regla estará dado por la veracidad de sus antecedentes, y se asigna directamente como peso, el grado de pertenencia del valor leído de temperatura a la etiqueta lingüística baja. En el caso de antecedentes de reglas con conectivos lógicos Y, como por ejemplo:

“Si la temperatura es baja Y el cambio de temperatura es ligeramente creciente ENTONCES aumente el ciclo de actividad del calefactor”.

La regla será tan verdadera como lo sea el menos verdadero de sus antecedentes. Es decir, se le asigna a la regla como peso, el menor de los grados de pertenencia de las variables de los antecedentes a las respectivas etiquetas lingüísticas.

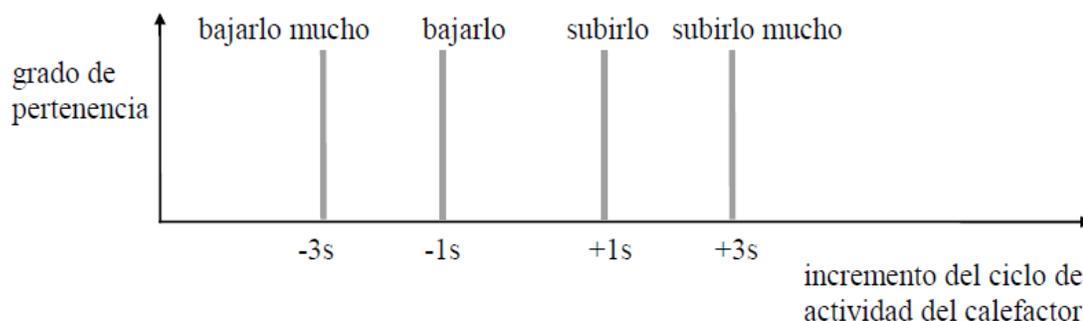
Este proceso se realiza para cada una de las reglas del sistema, quedando luego de este ciclo cada regla con su peso correspondiente. Ahora se trabaja con los consecuentes de las mismas; así como para las variables de entrada, a cada variable de salida le corresponde un grupo de funciones de membresía, representadas con etiquetas lingüísticas. Cada una de ellas es una salida fuzzy. (Subirlo mucho, subirlo, bajarlo, bajarlo mucho).

A cada una de las salidas fuzzy se le asigna como valor, o grado de aplicabilidad, el máximo valor entre todas las reglas que la mencionan, de manera que al finalizar toda la evaluación, queda cada salida fuzzy con su valor.

- **Defuzzificación.**

Para el ejemplo se tomará la forma más simple de funciones de membresía, esta es la que considera a un solo elemento del universo de discurso perteneciente totalmente al conjunto. Este tipo de funciones (Figura 1.17) se denominan singleton.

A cada salida fuzzy, se le asignó el máximo valor de verdad o peso de las reglas que la mencionan como consecuente. Ahora quedan varias salidas fuzzy para cada variable de salida, cada una con su valor de verdad, o grado de aplicabilidad, pero ¿cuál es el nuevo valor de la variable de salida?, una forma simple y efectiva de determinarlo es realizando un promedio ponderado entre todas las salidas fuzzy que le corresponden a una variable de salida.



**Figura 1.17 Función singleton**

**Fuente: [13]**

Para el caso en que las funciones de membresía no sean singletons, se procede en forma similar, pero considerando las superficies de las salidas fuzzy, afectadas por su valor de aplicabilidad, y tomando el centro de gravedad de las mismas como el nuevo valor de la variable de salida en consideración. Una vez actualizada la variable de salida, se está en condiciones de comenzar un nuevo ciclo.

## 1.7 Criterios de estabilidad

La estabilidad es la característica del lazo de control, que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación. Existen varios criterios de estabilidad pero el más utilizado para ajustar acciones de control al proceso es de razón de amortiguamiento de  $\frac{1}{4}$ , en el que después de una perturbación la variable se estabiliza cuando la relación entre las amplitudes de las crestas de recuperación sucesivas son de 4 a 1. Este criterio permite un equilibrio entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez de retorno de la variable al estado estable.

### 1.7.1 Ajuste de controladores

Al poner en marcha una planta tiene lugar por lo general el primer ajuste de los controladores, debido a que el tiempo de puesta en marcha es limitado, se

prefijan los valores de las acciones PID para luego ajustarlos definitivamente. Como guía de aplicación de valores iniciales consta la (Tabla 1.2):

**Tabla 1.2**  
**Valores iniciales de las acciones de control**

Lazo de control	Ganancia	Banda proporcional (%)	Integral $\left(\frac{\text{minutos}}{\text{repetición}}\right)$	Integral $\left(\frac{\text{repeticiones}}{\text{minuto}}\right)$	Derivada (minuto)	Tipo de válvula de control
Presión (líquidos)	0,2 - 2	500 - 50	0,005 - 0,05	20 - 200	-	Lineal o isoporcentual
Presión (gases)	2 - 100	50 - 1	0,1 - 50	0,02 - 10	0,02 - 0,1	Lineal
Caudal	2 - 0,2	50 - 500	0,005 - 0,05	20 - 200	-	Lineal o isoporcentual
Nivel	2 - 100	50 - 1	1 - 100	0,001 - 1	0,01 - 1	Lineal o isoporcentual
Temperatura	50 - 1	2 - 100	0,2 - 50	0,02 - 5	0,02 - 5	Isoporcentual

Fuente: [14]

Existen varias maneras de ajustar las acciones PID, es decir, la ganancia (banda proporcional), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (tiempo de anticipo) del controlador, de manera que se acoplen adecuadamente con el resto de elementos del lazo de control, cumpliendo con algún criterio de estabilidad, los métodos fundamentales de ajuste de controladores son: el método analítico y el método práctico.

El método analítico se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es, generalmente, difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

El método práctico se aplica obteniendo la respuesta real del proceso, puede efectuarse de las siguientes maneras:

- Método de tanteo (lazo cerrado).

- Método de ganancia límite (lazo cerrado).
- Método de curva de reacción (Lazo abierto)
- Método de Chindambara y el de Kraus y Myron.

**a) Método de tanteo (lazo cerrado)**

El método de tanteo requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones y estrecharlas, poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

**b) Ajuste de los controladores PID:**

Con la banda derivada en 0 y la integral en  $\infty$  minutos/repetición, se aumenta la ganancia proporcional (se estrecha la banda proporcional) hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25. Se aumenta, lentamente, la banda integral creando al mismo tiempo perturbaciones desplazando el punto de consigna, hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, se crea desplazamientos en el punto de consigna, hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes, puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional con mejores resultados en el control.

## 1.8 Elementos finales de control

Es un medio físico que se encuentra en contacto directo con la variable manipulada y tiene la capacidad de modificar la variable controlada, por ejemplo una válvula puede modificar el flujo con el fin de modificar el nivel del fluido en un depósito. Este elemento es vital para el óptimo control de la variable de interés.

### 1.8.1 Válvulas de control

Es una válvula accionada capaz de estrangular o modular el flujo, que se usa como elemento de regulación final en el lazo de control (Figura 1.18). Al permitir variar el caudal del fluido de control, se modifica la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable.

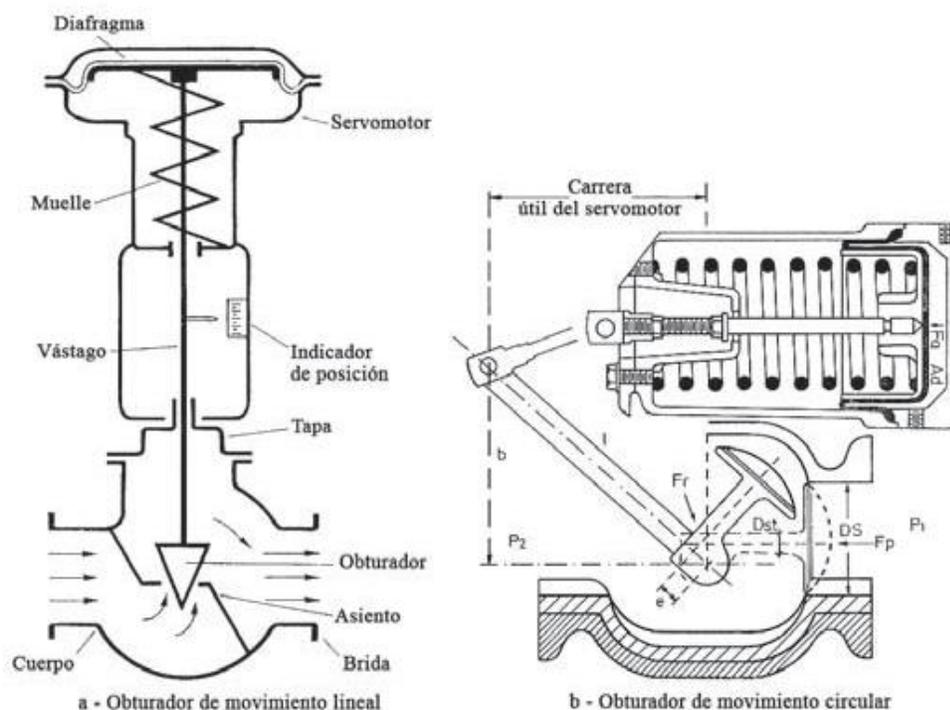


Figura 1.18 Válvula de control típica.

Fuente: [14]

Las válvulas de control operan automáticamente recibiendo señales de un controlador exterior. Las válvulas rotativas y de globo son las que se usan para

este tipo de aplicación. Las válvulas de control constan generalmente de dos partes:

- **Actuador:** Es un dispositivo que proporciona fuerza y movimiento al elemento de cierre (esfera, disco, obturador, etc.) de una válvula.
- **Cuerpo (Body)** La estructura que sostiene conjuntamente las partes de una válvula. El cuerpo resiste cargas procedentes de la presión del fluido y de la tubería conectada, y también sostiene al actuador. Otras consideraciones en el diseño del cuerpo de la válvula incluyen el montaje y desmontaje.

### 1.8.2 Actuadores neumáticos

La válvula de control neumática consiste en un actuador accionado por la señal neumática de 3-15 psi (0,2 – 1Kg/cm<sup>2</sup>). El actuador está directamente conectado al vástago que posiciona el obturador con respecto al asiento. La posición relativa entre el obturador y el asiento permite pasar el fluido desde un caudal nulo (o casi nulo) hasta el caudal máximo, y con una relación entre caudal y la carrera que viene dada por las características de la válvula.

El cuerpo de la válvula de control contiene en su interior un obturador y los asientos, y está provista de roscas o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo que es accionado por el actuador.

### Posicionador o Controlador Digital de la Válvula

La señal de entrada se dirige a la caja de terminales a través de un único par trenzado de cables y luego al submódulo denominado *tablero de cableado impreso PWB* (clave50) para ser leído por el microprocesador, para ser procesada por un algoritmo digital, y convertida en una señal analógica en unidades del *convertor I/P* (clave 41).

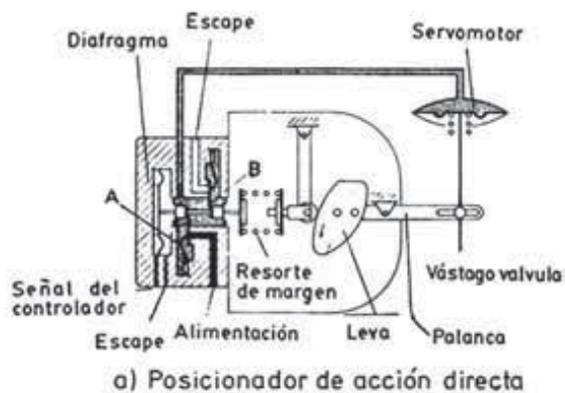


Figura 1.19 Posicionador de acción directa

Fuente: [14]

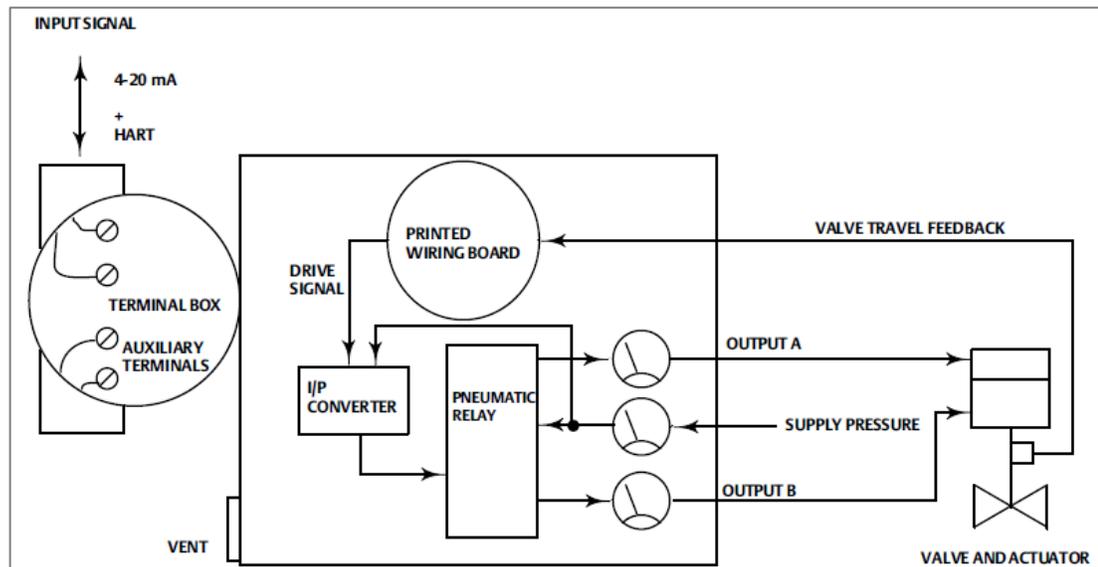


Figura 1.20 Diagrama de bloques del posicionador DVC 6200

Fuente: [15]

Si la señal de entrada incrementa, la señal de accionamiento del *convertor I/P* también, irá incrementando la presión de salida del I/P. Esta presión de salida del I/P es enviada al submódulo de *relé neumático* (clave 24). El relé también está conectado a la fuente de presión y amplifica la pequeña señal neumática proveniente del *convertor de I/P*.

El relé acepta la señal neumática amplificada y proporciona una presión de salida. Con el incremento de la señal entrada (4 a 20mA), la presión de *salida A* incrementa proporcionalmente. Como se muestra en (Figura 1.20) el aumento de la presión de *salida A* hace que el vástago del actuador se desplace hacia abajo.

La posición del vástago es detectada por el sensor de realimentación de carrera sin contacto. El vástago continúa desplazándose hacia abajo hasta que alcanza la posición establecida. En este punto el *tablero de cableado impreso PWB* fija la señal de desplazamiento del *conversor I/P*. Esto posiciona a la tobera para evitar que la presión en la boquilla se incremente.

Si la señal de entrada disminuye, la señal de activación del submódulo del conversor I/P disminuye, disminuyendo la salida de presión del I/P. El *relé neumático* disminuye la presión de la *salida A*. El vástago se mueve hacia arriba hasta que se alcanza la posición correcta. En este punto el *tablero de cableado impreso PWB* fija la señal de desplazamiento del *conversor I/P*. Esto posiciona a la tobera para evitar que la presión en la boquilla se reduzca.

#### **NOTAS:**

- La presión de salida A se utiliza directamente para aplicaciones de actuadores de simple y doble efecto.
- La presión de salida B se utiliza inversamente para aplicaciones de actuadores de simple y doble efecto.
- Para el control de un actuador de doble efecto tenga en cuenta que cuando la presión de salida A incrementa la presión de salida B disminuye y viceversa, manteniéndose el principio de funcionamiento descrito anteriormente.

## CAPÍTULO II

### 2. IMPLEMENTACIÓN DEL POSICIONADOR

#### 2.1 Especificación de requisitos del sistema

El sistema tiene como objetivo controlar el nivel de agua en un depósito, que será sensado por un transmisor de nivel de tipo radar que genera una señal de corriente estándar, que será leída por un controlador lógico programable, mediante un módulo de entradas analógicas.

Esta información será interpretada y procesada por un algoritmo incluido en el PLC que posteriormente proporcionará una señal estándar de corriente que será escrita mediante un módulo de salidas analógicas en un posicionador electroneumático inteligente; calibrado y configurado previamente acorde a las características de una válvula neumática proporcional mediante un configurador de campo.

El posicionador en su interior posee un conversor de corriente a presión, a medida que la señal de presión incrementa el vástago de la válvula se desplaza para cerrarla proporcionalmente, obstruyendo el flujo del líquido de modo que el nivel agua disminuye. En caso de disminuir la señal de presión la válvula se va abriendo proporcionalmente, dando paso al flujo del líquido permitiendo que el depósito se llene. Gracias a estas acciones que serán controladas por el algoritmo lógico del PLC se puede mantener el agua en un nivel deseado.

El posicionador tendrá la capacidad de comunicarse vía HART con la PC utilizando un modem HART como interfaz. De esta manera se establece una comunicación digital sobre la señal de control del proceso, sin interrumpirla por lo que se puede realizar un diagnóstico digital, mantenimiento y procesamiento adicional de datos como por ejemplo la posición de la válvula.

El sistema también cuenta con un HMI, en un computador personal que permite fijar el valor de nivel de agua deseado por teclado, seleccionar el tipo de control que se ejecutará, igualmente sintonizar el algoritmo de control que se esté ejecutando, mientras registra los valores de diferentes variables del proceso.

### 2.1.1 Diagrama de bloques del sistema

El diagrama de bloques (Figura 2.1) representa de forma gráfica el funcionamiento general del sistema de control de nivel de agua.

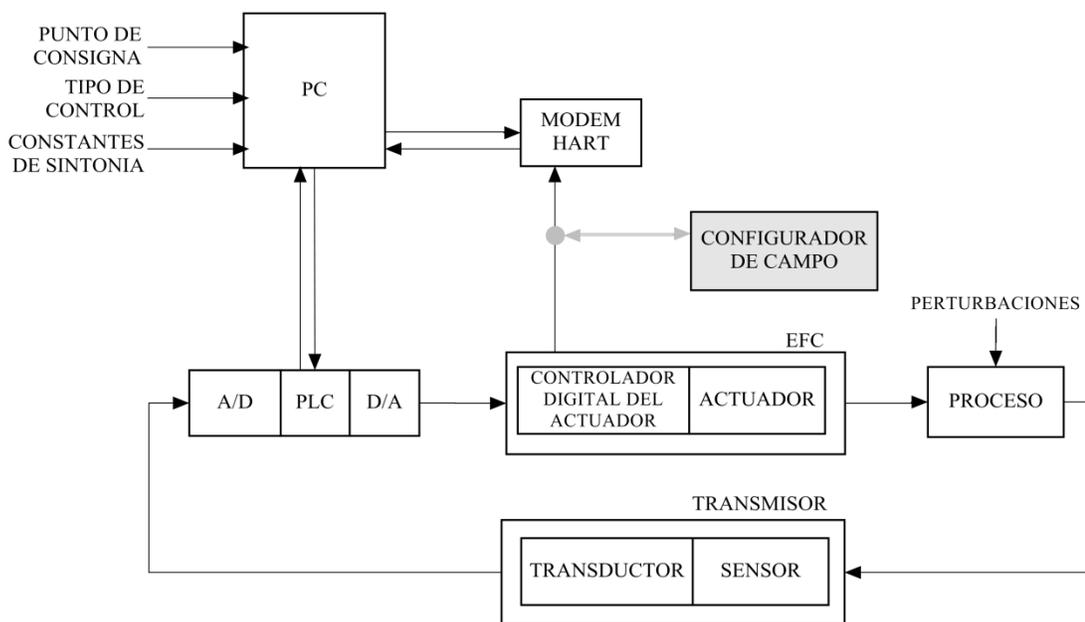


Figura 2.1 Diagrama de bloques del sistema

- **PROCESO:** Es el equipo físico que se desea controlar gracias a la serie de operaciones entre el sensor, el controlador y el actuador. En este caso se desea controlar el nivel de líquido de una columna de agua.
- **PERTURBACIÓN:** Es una señal no previsible externa al proceso y que afecta a la salida del mismo. En este sistema puede ser la apertura o cierre de una válvula manual, cambio de punto de consigna, etc.

- **SENSOR:** Es el elemento primario de medición de la variable del proceso (nivel de agua en centímetros) y la transforma en una variable medible (señal eléctrica).
- **TRANSDUCTOR:** Capta la salida del sensor y la convierte en una señal adecuada para transmitir al controlador (4-20mA).
- **TRANSMISOR:** Está formado por el sensor y el transductor, su función es captar el valor de la variable física del proceso por medio del sensor y convertirla en una señal eléctrica estándar (4-20 mA) por medio de un transductor de modo que acarree información al controlador sobre el estado actual del proceso.
- **PLC:** Es un controlador lógico programable que obtiene el valor actual del proceso a través del módulo A/D y lo compara con el valor de consigna seleccionado por el operador. En base a esta diferencia el algoritmo de control genera un valor de señal que será enviado al EFC hasta que el error ya mencionado sea aceptable (idealmente cero) mediante el módulo D/A.
- **A/D:** Es un módulo que convierte la señal analógica de los dispositivos de campo en una digital que pueda ser interpretada por el PLC. En este caso lee la señal analógica del transmisor y la convierte en una digital que pueda comprender el PLC.
- **D/A:** Es un módulo que convierte la señal digital proporcionada por el PLC en una analógica compatible con los dispositivos de campo. En este proceso convierte en una señal de corriente compatible con el controlador digital de válvula.
- **CONTROLADOR DIGITAL DEL ACTUADOR:** Tiene el fin de corregir o limitar las acciones físicas del actuador, en este caso es un controlador digital de válvula en cuyo interior posee un conversor de corriente a presión. Este suministro de presión es proporcional al porcentaje de cierre de la válvula.
- **ACTUADOR:** Este elemento tienen como función, alterar el valor de la variable del proceso por medio de una acción física. En este caso es la

válvula proporcional que mediante su apertura o cierre consigue un mayor o menor flujo de agua en el sistema; para llenar o vaciar respectivamente la columna de agua.

- **ELEMENTO FINAL DE CONTROL (EFC):** Está formado por el actuador y el controlador digital del actuador, los cuales trabajan en conjunto para ejecutar las acciones correspondientes al resultado del algoritmo de control, es decir el controlador digital de la válvula recibe una señal eléctrica estándar acorde a la cual suministra una cantidad de presión haciendo que el vástago de la válvula (actuador) se desplace, con el fin de incrementar o disminuir la sección de la válvula consecuencia de ello se tiene una variación de caudal que es proporcional a dicha sección.
- **PC:** Es un computador personal que permite la interacción entre el operador y el proceso, y permite cargar por teclado ciertos parámetros así como visualizar variables del proceso en su pantalla.
- **PUNTO DE CONSIGNA:** Es un valor en centímetros, su rango es de 20 a 60 (por las características del depósito de agua). Este parámetro permite fijar un valor deseado del nivel de líquido.
- **TIPO DE CONTROL:** Es un método constituido por algoritmo lógico que se ejecuta en el interior del PLC.
- **CONSTANTES DE SINTONÍA:** Son valores que permiten ajustar el tipo de control que se esté ejecutando, de modo que ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación acorde a las características del proceso y mantenga el error en estado estable en un valor aceptable.
- **CONFIGURADOR DE CAMPO:** Es una herramienta portátil con capacidad de realizar la configuración, calibración y diagnóstico de dispositivos HART, Wireless HART y Foundation Fieldbus. La importancia de este equipo en este sistema es configurar y calibrar el EFC para que las acciones físicas que ejecuta el actuador sean lo más precisas. Además se puede utilizar en paralelo cuando el proceso se encuentra funcionando para monitorear ciertos parámetros del EFC sin necesidad de interrumpir el funcionamiento del sistema.

- **MODEM HART:** Es un elemento que sirve de interfaz física entre dispositivos de campo con tecnología HART y un computador personal por medio de un puerto USB, con el fin de acceder a la información digital que proporciona dicho instrumento de campo.

### 2.1.2 Diagrama P&ID del sistema

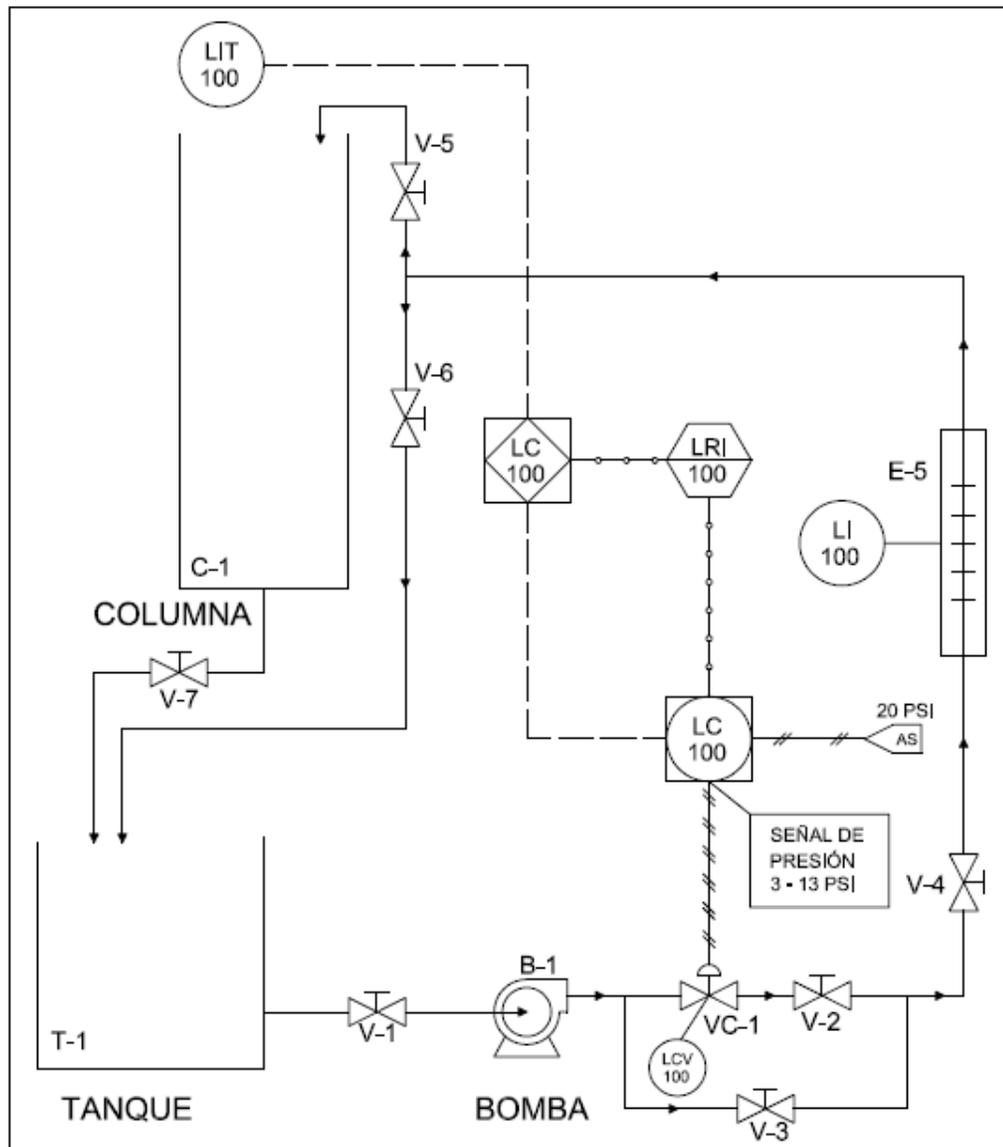


Figura 2.2 Diagrama P&ID del sistema de control de nivel

El diagrama P&ID de la Figura 2.2 registra toda la instrumentación del sistema, asociando cada elemento de medición, control y acción con un código. A continuación se enlista cada componente con una explicación sobre el rol que cumplen dentro del lazo de control para mantener las condiciones requeridas para el óptimo funcionamiento del mismo.

- **T-1:** Tanque reservorio de agua con capacidad de 45 litros. Es el punto de partida y llegada del sistema.
- **C-1:** Columna de agua, es un depósito de 100 centímetros de altura donde se controlará el nivel de agua que será visible gracias a su estructura transparente y ubicación estratégica en el sistema.
- **B-1:** Bomba centrífuga, aporta energía al líquido bombeado, esta energía se convierte en caudal, con el que el agua circulará por el sistema.
- **VC-1:** Es una válvula electroneumática proporcional responsable de generar una variación de caudal que es proporcional al nivel del agua en la columna. Por lo que se puede decir que es el elemento más importante dentro del control del proceso.
- **V-1:** Válvula de bola manual que restringe el paso de agua entre el tanque T-1 y la bomba centrífuga B-1. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente abierta.
- **V-2:** Válvula de bola manual en serie con la válvula de control VC-1 se usa para poner en servicio o dar mantenimiento a la VC-1. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente abierta.
- **V-3:** Válvula de bola manual, paralela a la válvula de control, su función es permitir el paso de agua por el sistema en caso que la VC-1 se encuentre fuera de servicio. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente cerrada.
- **V-4:** Válvula de compuerta multivuelta manual se encuentra después de la VC-1 y V-2 junto a un indicador de flujo, con el fin de modificar el mismo, generando perturbaciones en el sistema. En condiciones

normales de funcionamiento esta debe estar parcial o totalmente abierta, nunca cerrada completamente.

- **V-5:** Válvula de bola manual, permite el flujo directo del líquido a la columna de agua. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente abierta.
- **V-6:** Válvula de bola manual, permite el flujo directo del líquido al tanque reservorio, su apertura a más de generar una perturbación el sistema, evita que la columna de agua se desborde o sobrepase cierto nivel. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente cerrada.
- **V-7:** Válvula de bola manual, permite el retorno del líquido de la columna de agua al tanque reservorio. En condiciones normales de funcionamiento esta debe estar totalmente cerrada.
- **LIT/100:** Transmisor de nivel tipo radar; mide el nivel de agua en la columna C-1. Su principio de medición se basa en el tiempo que tarda en retornar una señal de microondas emitida por el mismo. Un parámetro muy importante que se debe configurar en este sensor es el dieléctrico del líquido.
- **LC/100:** Es un controlador lógico programable cuyo fin es controlar el nivel de agua, para lo cual ejecuta un algoritmo lógico que en función al error entre el valor preseleccionado y el valor actual de nivel de agua que es captado por el sensor del LIT/100; entrega un porcentaje de cierre de la válvula VC-1.
- **LI/100:** Es un rotámetro que nos permite visualizar el flujo de agua gracias a su estructura transparente en cuyo interior posee un flotador, que ante el aumento del flujo, la altura del flotador se incrementa, es decir se mueve de forma vertical en proporción, al flujo del fluido.
- **LRI/100** Es un computador personal que permite monitorear y registrar el estado de varias variables del sistema. Además mediante un programa permite parametrizar ciertos parámetros del controlador de presión LC/100 que opera en conjunto con la válvula VC-1.

- **LC/100:** Es dispositivo que controla a la válvula VC-1, que ante el incremento de una señal eléctrica (4-20 mA) incrementa la presión (3-13 PSI) que es suministrada a la válvula VC-1. Además posee comunicación digital con LRI/100, para llevar un registro de las condiciones de funcionamiento de la válvula.
- **AS:** Es un suministro de presión constante (20 PSI) que ingresa al controlador de presión PC-100 controlando el desplazamiento del vástago de la válvula LCV-100 con el fin de modificar el porcentaje de cierre de la misma.

## 2.2 Montaje del posicionador en la válvula

El controlador digital es compatible con varias series de válvulas, consecuentemente los procedimientos de instalación de forma general son muy similares.



(a) Vista frontal

(b) Vista posterior

**Figura 2.3 Posicionador DVC6200 montado en la válvula Baumann 24000**

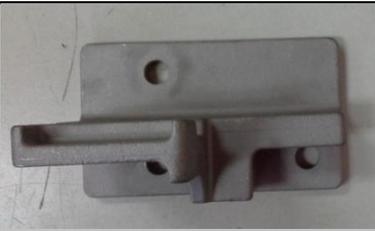
Las instrucciones que se detallan a continuación son para la válvula de control Baumann 24000 Little Scotty Bronze (Figura 2.3), componente del módulo didáctico ND-0407 del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

### 2.2.1 Herramientas necesarias

Si se solicita incluido en un conjunto con la válvula de control, la fábrica montará el controlador de válvula digital en el actuador y calibrará el instrumento. Si se adquiere el controlador de válvula digital por separado, necesitará un kit de montaje (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1**

**Elementos del kit de montaje del controlador digital de válvula DVC 6200**

Componente	Clave	Imagen
Platina	Pt-001	
Tornillo de cabeza hexagonal	T3-001	
Platina	Pt-002	
Imán	Im-001	
Tornillo de cabeza hexagonal	T2-001	

CONTINÚA →

<b>Plantilla de alineación</b>	<b>PI-001</b>	
<b>Regulador de presión Fisher 67CFR</b>	<b>RF-67CFR</b>	
<b>Junta tórica</b>	<b>Jt-001</b>	
<b>Tornillo de cabeza hexagonal</b>	<b>T2-002</b>	

Además del kit de montaje (Tabla 2.1), se requerirán las siguientes herramientas (Tabla 2.2):

**Tabla 2.2**

**Herramientas adicionales para Montaje del DVC6200**

<b>HERRAMIENTA</b>	<b>TAMAÑO</b>	<b>COMPONENTE</b>
Llave hexagonal	7/32"	Tornillos de platina grande
Llave hexagonal	1/16"	Tornillos de la platina imán
Llave hexagonal	5/32"	Roscas vástago.
Desarmador estrella		Tornillos del convertor I/P
Lubricante		Junta tórica

## 2.2.2 Procedimiento de instalación

### Paso 1:

- Aislar la válvula de control con respecto a la línea de proceso y liberar la presión de ambos lados del cuerpo de la válvula.
- Cerrar todas las líneas de presión hacia el actuador y descargar totalmente la presión del actuador.

### Paso 2:

- Colocar la platina (Pt-001) que sujetará el posicionador a la válvula de modo que los orificios de la platina coincidan con los sockets de la parte posterior del posicionador (Figura 2.4).



Figura 2.4 Alineación de la platina (Pt-001) en el Posicionador DVC6200

- Para fijar la platina al posicionador (Figura 2.5) se debe hacer uso de 3 pernos (T3-001) incluidos en el kit de montaje, ajustándolos con una llave hexagonal de 7/32 pulgadas.



Figura 2.5 Fijación de la platina (Pt-001) en el Posicionador DVC6200

**Paso 3:**

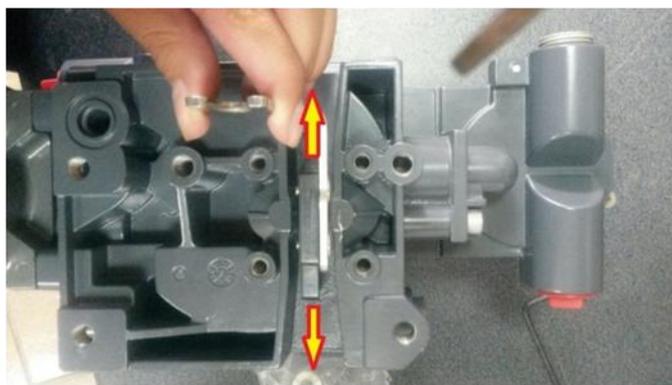
- Acoplar la platina (Pt-002) al imán (Im-001), haciendo uso de los dos pernos (T2-001), ajustándolos con una llave hexagonal de 1/16 pulgadas (Figura 2.6).



**Figura 2.6 Fijación de la platina (Pt-002) en el imán (Im-001)**

**Paso 4:**

- Alinear el imán (Im-001) con la ranura de la parte posterior del posicionador, de modo que pueda moverse fácilmente en los sentidos indicados en la (Figura 2.7).



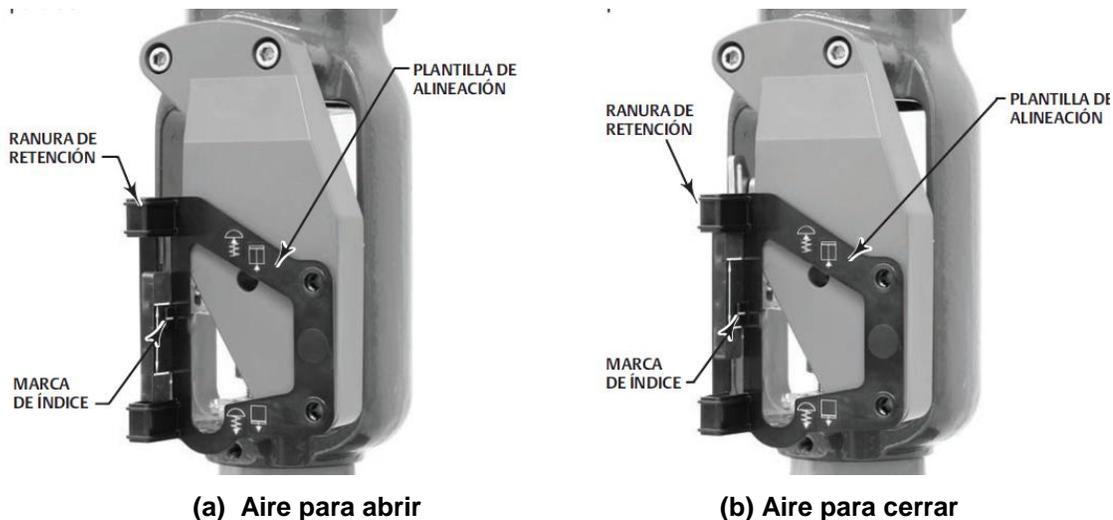
**Figura 2.7 Alineación del imán (Im-001) a la cavidad posterior del posicionador DVC 6200**

- Colocar el otro extremo de la platina (Pt-002) de modo que pueda sujetarse al vástago del posicionador sin ajustarlo ya que necesita ser alineado previamente.



**Figura 2.8** Conjunto de imán colocado en el vástago de la válvula Baumann 2400

- Mediante la plantilla de alineación (suministrada con el juego de montaje), colocar el conjunto del imán dentro de la ranura de sujeción. Para los actuadores de aire para cerrar como es este caso, alinear verticalmente el conjunto del imán de manera que la línea central de la plantilla esté alineada lo más cerca posible con el extremo inferior del intervalo de carrera válido en el conjunto del imán.



**Figura 2.9** Alineación del conjunto del imán

Fuente: [15]

- El conjunto del imán se debe colocar de forma que la marca de índice de la ranura de realimentación de la carcasa del DVC6200 se encuentre dentro del intervalo válido en el conjunto del imán, a lo largo de todo el intervalo de carrera. Ver Figura 2.9 imagen (b).

**NOTA:** Para los actuadores de apertura por aire (p. ej. Fisher 667), alinear verticalmente el conjunto del imán de manera que la línea central de la plantilla esté alineada lo más cerca posible con el extremo superior del intervalo de carrera válido en el conjunto del imán. El conjunto del imán se debe colocar de forma que la marca de índice de la ranura de realimentación de la carcasa del DVC6200 se encuentre dentro del intervalo válido en el conjunto del imán, a lo largo de todo el intervalo de la carrera. Ver Figura 2.9 imagen (a).

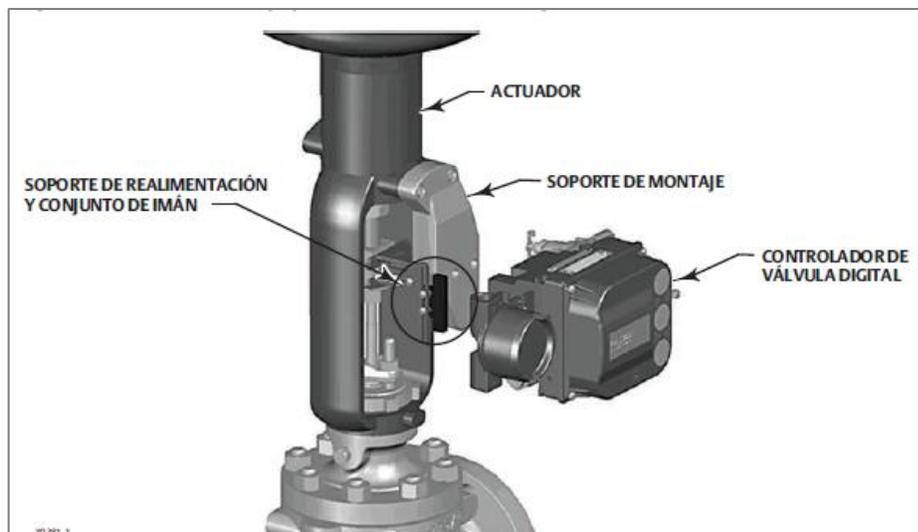
- Una vez alineado el conjunto del imán en la ranura, fijar utilizando una llave hexagonal de 5/32 pulgadas evitando desalinearlo.



**Figura 2.10 Fijación del conjunto de imán al vástago de la válvula**

#### **Paso 5:**

- Orientar la platina (Pt-001) ya colocada en el Paso 1 con los orificios de la válvula Baumann 24000, de modo que pueda sujetar con los pernos (T3-001). Ver Figura 2.11.



**Figura 2.11 Disposición del posicionador DVC6200 en su actuador**

**Fuente:[15]**

- Ajustar los pernos con una llave hexagonal de 7/32 pulgadas. De modo que el posicionador quede fijo al actuador (Figura 2.3) y (Figura 2.12).



**Figura 2.12 Posicionador DVC6200 montado en la válvula Baumann 24000. Vista lateral**

### **Paso 6:**

Si la presión de suministro es inferior a la presión nominal máxima del actuador, el instrumento no requiere un regulador. Sin embargo, siempre se requiere un filtro. A continuación se describe como colocar un filtro regulador 67CFR de montaje integral (Rf-67CFR)

- Retirar el tapón plástico de la cavidad ubicada alrededor de la conexión de SUPPLY (suministro) del controlador digital de válvula (Figura 2.13).

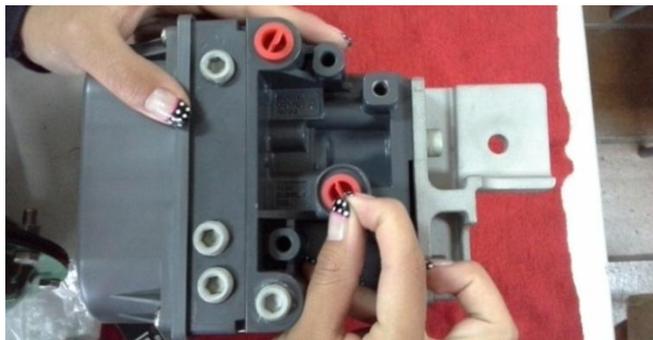


Figura 2.13 Posicionador DVC6200 montado en la válvula. Vista lateral

- Lubricar la junta tórica (Jt-001) antes de insertarla en la cavidad de suministro del posicionador.
- Roscar un tapón de tubo de cabeza hueca de 1/4 pulgadas en la salida que no se usa en el regulador de filtro, No se requiere junta tórica.
- Alinear el orificio del posicionador DVC6200 con el regulador Fisher 67CFR y la junta tórica previamente lubricada de modo que los tornillos puedan calzar correctamente en la parte lateral del controlador de válvula digital.

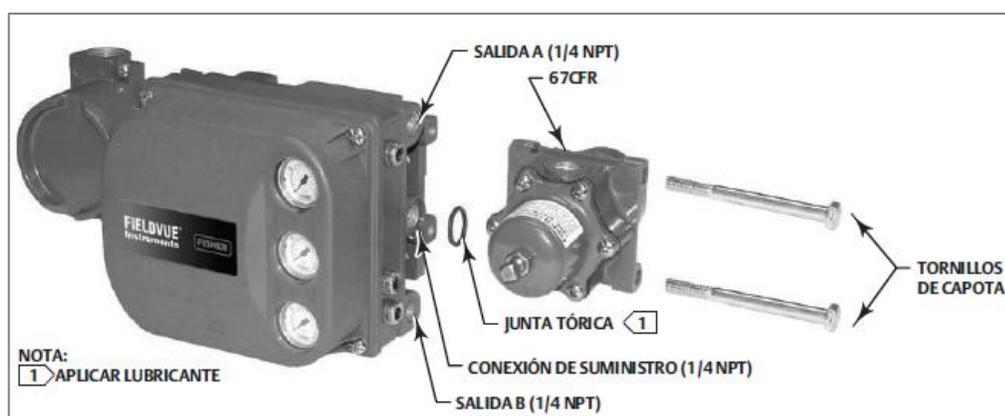


Figura 2.14 Montaje integral de un regulador Fisher 67CFR en un controlador de válvula digital FIELDVUE DVC6200

Fuente: [15]

- Ajustar los tornillos (T2-002) utilizando una llave hexagonal, de modo que el filtro regulador Fisher 67CFR quede fijo al posicionador DVC6200 como se muestra en la Figura 2.15.

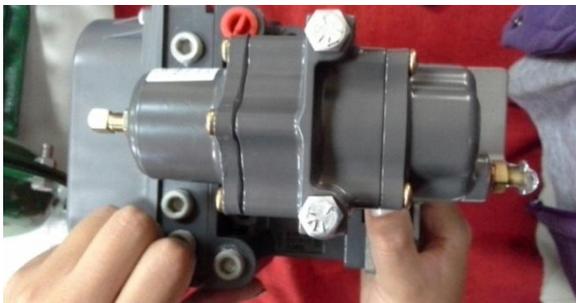


Figura 2.15 Fisher 67CFR montado en un posicionador FIELDVUE DVC6200

## 2.3 Configuración y calibración del Conjunto Válvula - Posicionador

Los procesos de configuración, calibración y diagnóstico del controlador digital de la válvula que se detallan a continuación son realizados con el Comunicador de Campo 475.

### 2.3.1 Conexión al comunicador 475

Se puede conectar el Comunicador 475 en paralelo al controlador digital de la válvula o a la resistencia de carga, la Figura 2.16 muestra la conexión realizada durante la configuración, calibración y diagnóstico del controlador digital de la válvula.

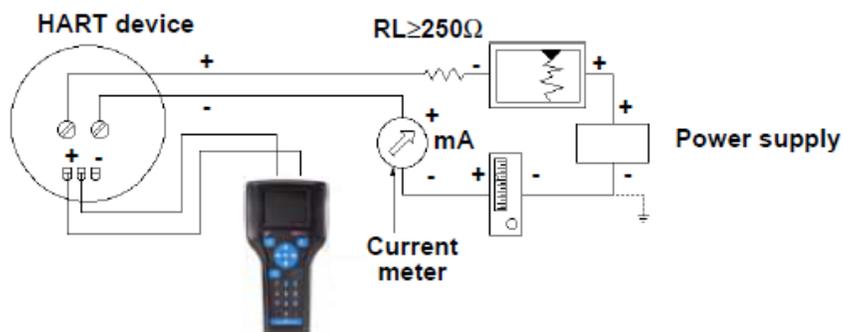
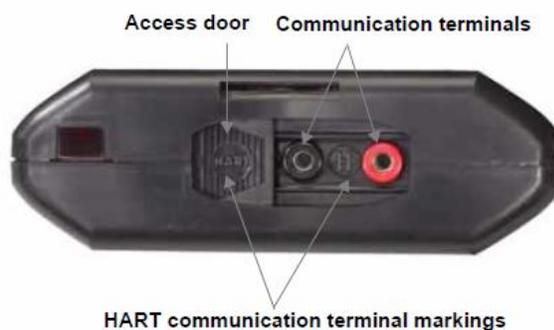


Figura 2.16 Conexión directa del Comunicador 475 al dispositivo HART

El comunicador posee tres terminales en la parte superior: el terminal negro es un terminal común compartido por ambos protocolos mientras que cada terminal rojo es una conexión específica (HART O FIELDBUS) una puerta de acceso asegura que sólo un par de terminales este expuesto en cualquier momento; ver Figura 2.17. Para HART los conectores no son sensibles a la polaridad pero es necesario que exista un mínimo de 250 ohmios de resistencia en el bucle para que la conexión con el comunicador sea exitosa.



**Figura 2.17** Terminales de comunicación HART y puerta de acceso

La aplicación HART en el Comunicador 475 permite la configuración, calibración y diagnóstico de dispositivos HART. Para iniciar la aplicación se deben seguir los siguientes pasos:

1. Mantener pulsado el botón de encendido hasta que la luz verde parpadee para encender el comunicador 475.



2. Presionar  en el menú principal del comunicador. Si un dispositivo HART está activo y conectado al comunicador, el menú En línea (Online) de la Aplicación HART (HART Application) aparece automáticamente. Si ningún dispositivo está conectado, aparece después de unos segundos nuevamente el menú principal de la Aplicación HART (Figura 2.18).

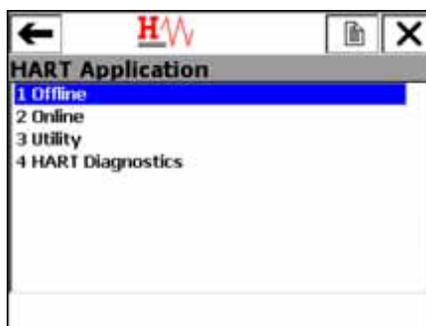


Figura 2.18 Menú Principal de la Aplicación HART

### 2.3.2 Configuración y Calibración

Para la configuración inicial del conjunto válvula posicionador, seleccionar la opción Configuración (Configure) en el menú principal de la aplicación HART (Figura 2.19).

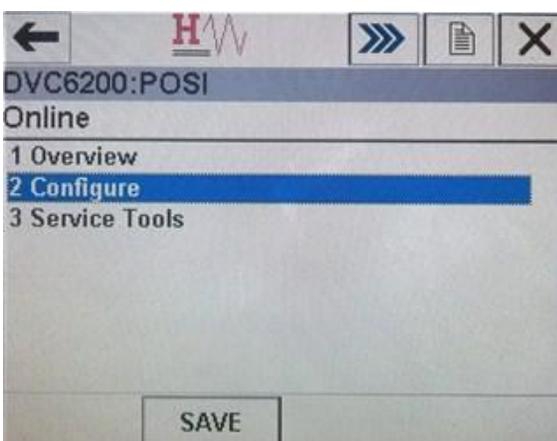


Figura 2.19 Menú En línea (Online) del Comunicador 475

En el menú Configuración (Figura 2.20) se puede optar por usar el asistente de configuración o bien realizar la configuración manual, en este trabajo se utiliza el asistente de configuración para la configuración y calibración inicial.

### 2.3.3 Asistente de configuración (Guided setup)

El Asistente de Configuración (Guided Setup) guía al usuario a través del proceso de configuración. Este menú muestra las opciones de la Figura 2.20

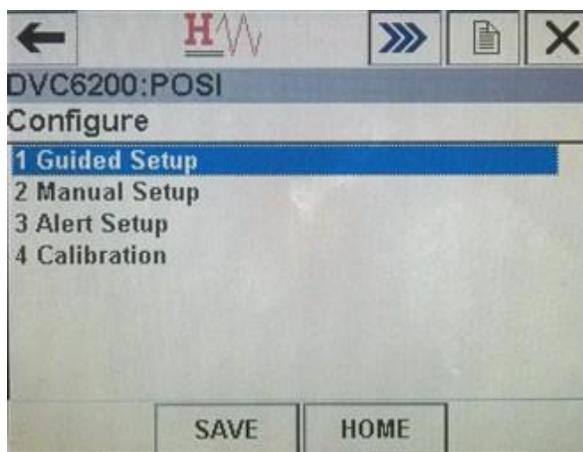


Figura 2.20 Menú Configuración

**Configuración del Dispositivo** (Device Setup): Este procedimiento (Figura 2.21) es usado para configurar la información de la válvula y el posicionador, realizar una calibración inicial y asignar el conjunto de valores para el ajuste de las ganancias del control interno del posicionador.

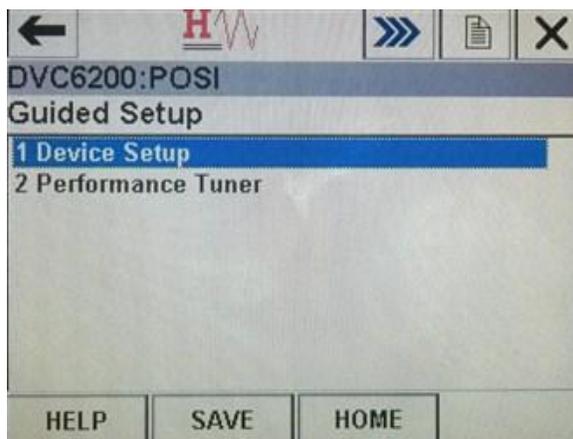
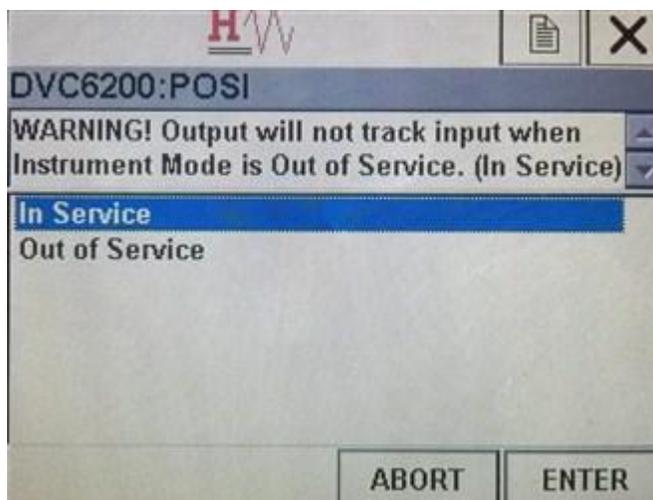


Figura 2.21 Menú Asistente de Configuración (Guided Setup)

Para que se ejecute este procedimiento es necesario que el posicionador se encuentre en modo Fuera de servicio (Out of service), por lo que el comunicador muestra la siguiente pantalla de advertencia (Figura 2.22) que permite seleccionar el Modo del Instrumento (Instrument Mode).



**Figura 2.22 Advertencia de Modo del Instrumento (Instrument Mode)**

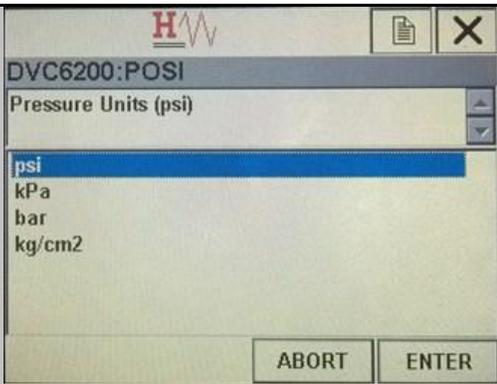
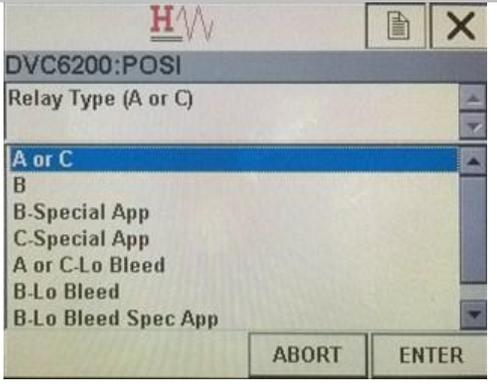
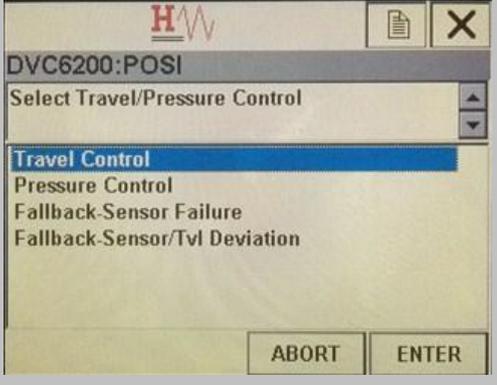
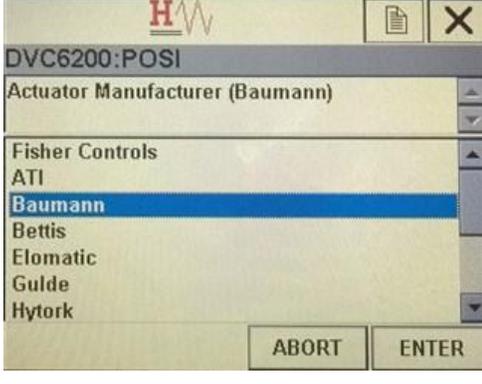
A continuación el asistente solicitará información general acerca de la válvula y su posicionador, la Tabla 2.3 contiene los parámetros y las opciones para cada caso, con las respectivas pantallas del configurador con la opción seleccionada para este trabajo.

**Tabla 2.3**

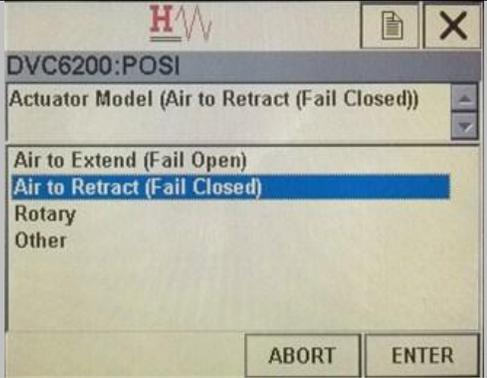
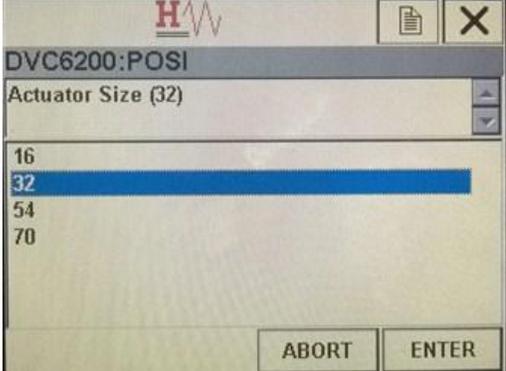
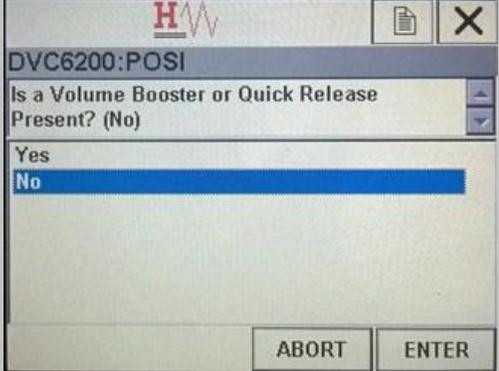
**Información General Para la Configuración Inicial**

Parámetros	Opciones	
Unidades de presión <b>(Pressure Units)</b>	Psi kPa bar kg/cm2	

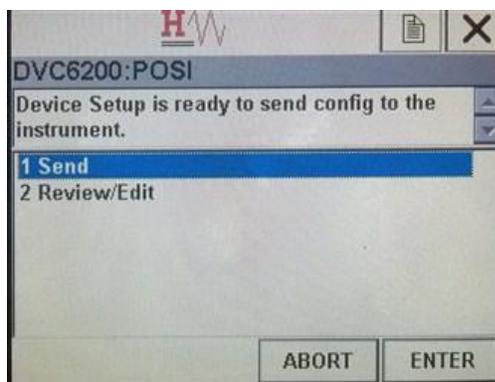
**CONTINÚA →**

Parámetros	Opciones	
Unidades de presión <b>(Pressure Units)</b>	Psi kPa bar kg/cm2	
Tipo de Relé <b>(Relay Type)</b>	A o C B B-Special App C-Special App A o C-Lo Bleed B-Lo Bleed B-Lo Bleed Special App	
Modo de Control <b>(Control Mode)</b>	Travel Control Pressure Control Fallback - Sensor Failure Fallback Sensor/Tvl Desviations	
Manufactura del Actuador <b>(Actuator Manufacturer)</b>	Fisher Controls ATI Baumann Bettis Elomatic Gude Hyrok	

CONTINÚA →

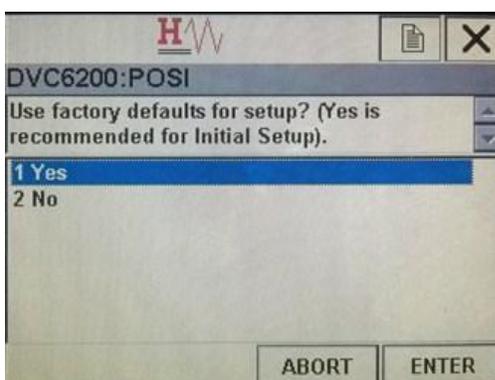
Parámetros	Opciones	
Modelo del actuador <b>(Actuator Model)</b>	Air to extended(Fail Open) Air to retract(Fail Closed) Rotary Other	
Tamaño del Actuador <b>(Actuator Size)</b>	16 32 54 70	
¿Tiene presente un Amplificador de la señal de control neumática (Volume Boster ) o un Escape rápido de aire (Quick Release)?	Yes No	

Una vez recopilada la información necesaria, el comunicador solicita una confirmación para enviar la configuración al posicionador (Figura 2.23). Seleccionar Enviar (Send) para enviar la configuración al dispositivo o Revisar/Editar (Review/Edit) para verificar o editar la información.



**Figura 2.23 Pantalla Enviar la configuración al instrumento**

A continuación el comunicador consulta al usuario si desea asignar al posicionador la información que posee por defecto en su memoria, para los parámetros de configuración más detallados, ver Figura 2.24. Durante una configuración inicial se recomienda usar estos parámetros.



**Figura 2.24 Pantalla Usar información por defecto de fábrica**

Una vez asignados los parámetros, termina la configuración y el asistente muestra el mensaje: La configuración del dispositivo ha completado (The Device Setup has Completed) ver Figura 2.25. Presionar OK para continuar.



Figura 2.25 Aviso de configuración terminada

Para terminar con la configuración el comunicador realizará una *Autocalibración de la carrera* (Auto Tvl Calib) de la válvula. Presione OK para continuar.

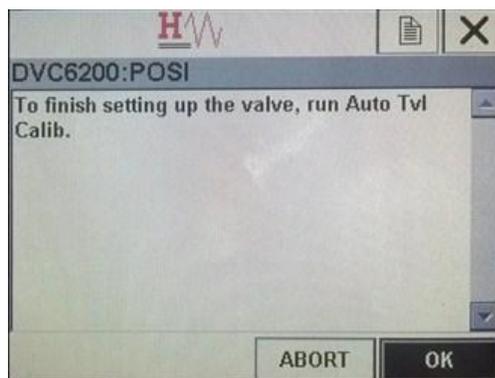


Figura 2.26 Sugerencia de Autocalibración

El calibrador solicita una confirmación para iniciar inmediatamente la autocalibración como muestra la Figura 2.26.

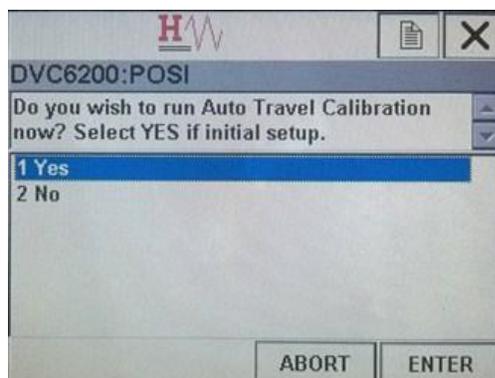
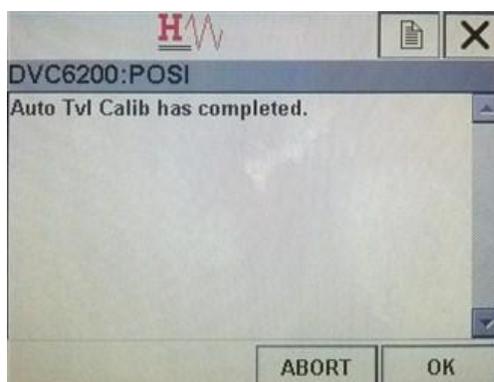


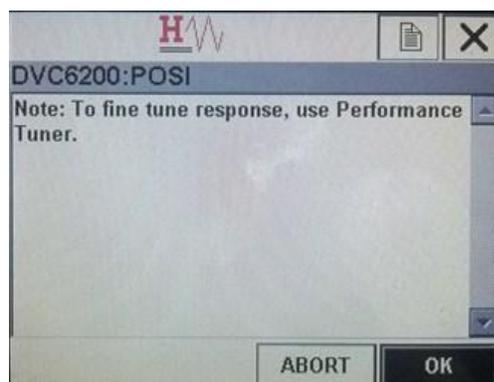
Figura 2.27 Confirmación de Inicio del Proceso de Calibración

Durante el proceso de autocalibración, el instrumento busca los puntos extremos altos y bajos, el lazo menor de retroalimentación (MLFB) y salida bias. Mediante la búsqueda de los puntos extremos, el instrumento establece los límites de desplazamiento físico, es decir, los desplazamientos reales 0% y 100% de las posiciones. El usuario no debe realizar ninguna acción durante la autocalibración. Una vez que ésta haya concluido en la pantalla se visualiza el mensaje: Autocalibración de Carrera completada (Auto TvL Calib has completed) como muestra la (Figura 2.28).



**Figura 2.28 Aviso de Autocalibración terminada**

Para un ajuste de respuesta fino seleccionar *Ajuste Experto* (Performance Tuning), Figura 2.29. Presionar OK para continuar.



**Figura 2.29 Sugerencia de Ajuste Experto**

Finalmente el comunicador permite al usuario regresar al modo servicio (In service) para poner en operación a la válvula como muestra la Figura 2.30.

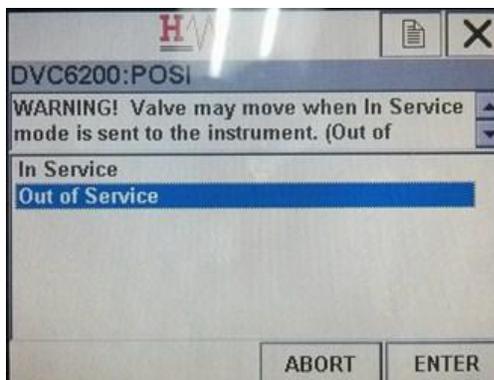


Figura 2.30 Advertencia de modo de instrumento

**Ajuste Experto** (Performance Tuning): Este proceso permite ejecutar una prueba de respuesta escalón y calcular el conjunto de valores para el ajuste de cada ganancia del controlador digital de la válvula.

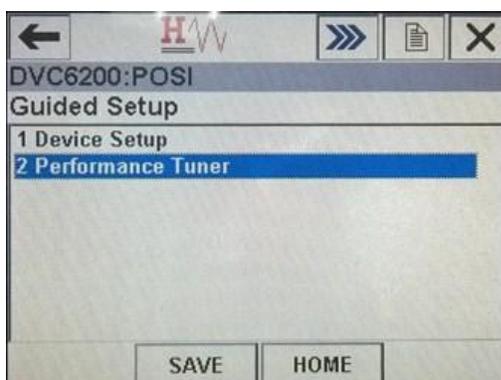


Figura 2.31 Menú Ajuste Experto

Con este proceso termina la configuración y calibración inicial del conjunto válvula posicionador, adicionalmente en este trabajo se opta por la configuración manual para asignar parámetros específicos de la válvula que serán necesarios para la calibración y diagnóstico que no fueron modificados en el procedimiento anterior.

### 2.3.4 Configuración manual

Permite configurar el controlador digital de la válvula según la aplicación dentro de esta configuración. Para acceder a esta aplicación, en el menú Configuración se selecciona la opción Configuración Manual (Manual Setup),

refiérase a la Figura 2.32, se despliega el menú que se observa en la Figura 2.33, para este trabajo la configuración se limita a las opciones Modo y Protección (Mode and Protection), Instrumento (Instrument), Sintonía (Tuning) y Válvula y Actuador (Valve and Actuator), en esta configuración algunos parámetros se mantienen por defecto, los que no, se detallan a continuación.

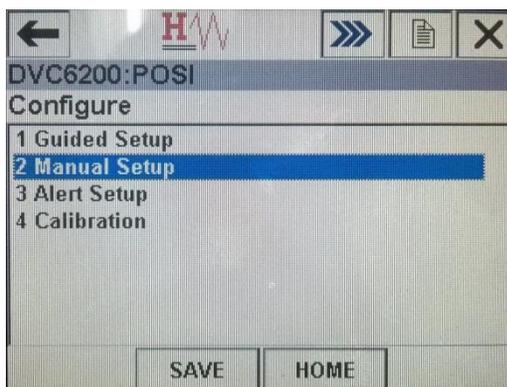


Figura 2.32 Selección de Configuración Manual

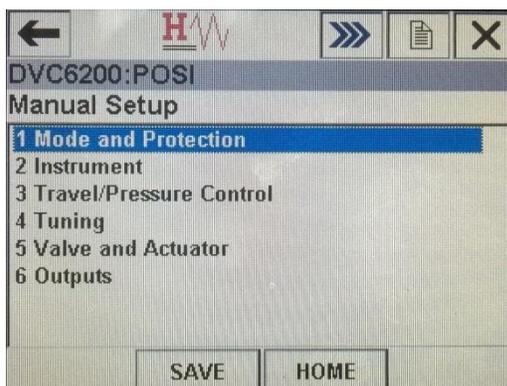


Figura 2.33 Menú Configuración Manual

**Modo y Protección** (Mode and Protection):

**Modo de Instrumento** (Instrument mode): En la Figura 2.34 se observan los dos modos que tiene el instrumento; En servicio (In Service) y Fuera de servicio (Out of Service), el primero es el modo normal en el que el instrumento sigue la señal de control de 4 a 20 mA, mientras que el segundo se requiere para la modificación de algunos parámetros o para ejecutar el diagnóstico, para este caso se selecciona el modo fuera de servicio.



Figura 2.34 Menú Modo y Protección

### **Instrumento** (Instrument)

Para este trabajo en el menú Instrumento, ver Figura 2.35, se configura la información de los parámetros Rango de entrada analógica (Analog Input Range) y Hoja de especificaciones (Spec Sheet).

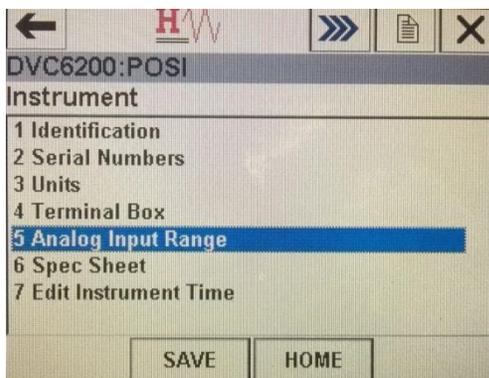


Figura 2.35 Menú Instrumento

### ***Rango de entrada analógica*** (Analog Input Range)

**Entrada superior del rango:** Permite ajustar valor superior del rango de entrada, refiérase a la Figura 2.37. El valor superior de entrada debe corresponder al valor superior del rango de carrera, si la condición *Cero Energía* (Zero Power) se configura como cerrado. Si la condición *Cero Energía* (Zero Power) se configura como abierta, el valor superior del rango de entrada corresponde al valor inferior del rango de carrera. Ver Figura 2.36.

**Entrada inferior del rango:** Permite ajustar valor inferior del rango de entrada, Figura 2.37. El valor inferior de entrada debe corresponder al valor

inferior del rango de carrera, si la condición Cero Energía (Zero Power) se configura como cerrado. Si la condición Cero Energía (Zero Power) se configura como abierta, el valor inferior del rango de entrada corresponde al valor superior del rango de carrera

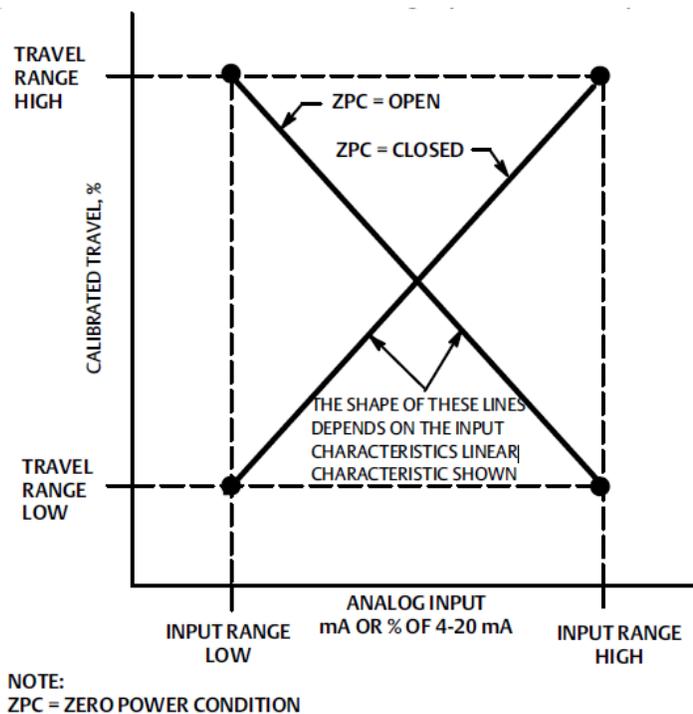


Figura 2.36 Carrera calibrada para relación de entrada analógica

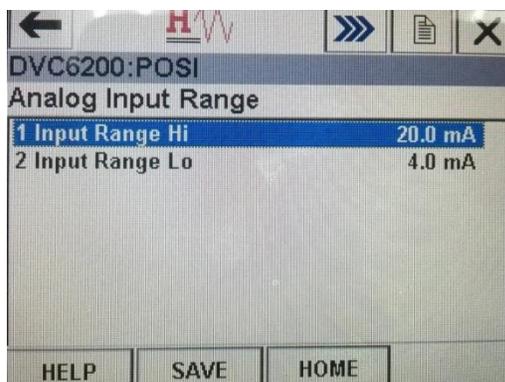


Figura 2.37 Configuración del Rango de entrada analógico

### **Hoja de Especificaciones (Spec Sheet)**

El menú Hoja de Especificaciones, ver Figura 2.38, proporciona un medio para almacenar la totalidad de las especificaciones de la válvula de control a

bordo del DVC6200. Para este trabajo se configuran los submenús: Válvula (Valve), Componentes Internos (Trim) y Actuador (Actuator), los parámetros configurados se muestra en la Tabla 2.4, Tabla 2.5 y Tabla 2.6 respectivamente, hay algunos parámetros que no se encuentran en esta tabla ya que se mantiene su configuración por defecto.

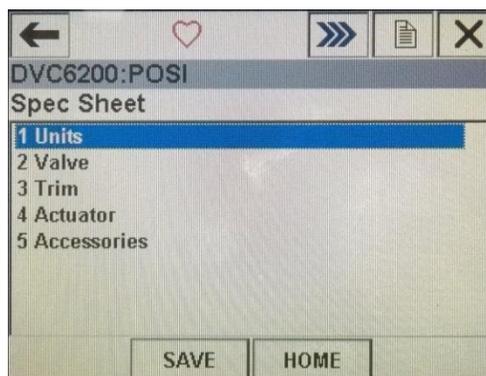


Figura 2.38 Menú Hoja de Especificaciones

Tabla 2.4

Parámetros de la Válvula

MENÚ VÁLVULA	
Parámetros	Selección
Fabricante de la válvula <b>(Valve Manufacturer)</b>	Baumann
Modelo de la Válvula <b>(Valve Model)</b>	24000
Tamaño de la Válvula <b>(Valve Size)</b>	0,75 in
Diámetro del vástago <b>(Steam Diameter)</b>	0,313 in
Tipo de empaquetamiento <b>(Packing Type)</b>	PTFE Single

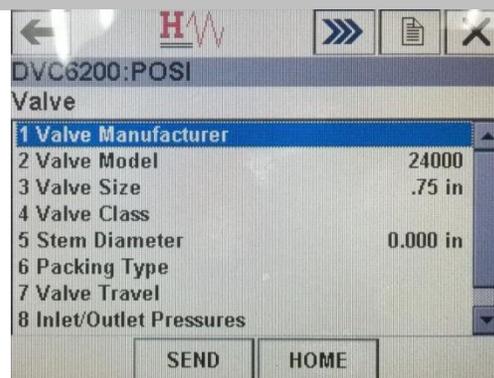


Tabla 2.5

## Parámetros de componentes internos

MENÚ COMPONENTES INTERNOS	
Parámetros	Selección
Tipo de Asiento <b>(Seat Type)</b>	Metal
Clase de fuga <b>(Leak Class)</b>	IV
Diámetro del Puerto <b>(Port Diameter)</b>	0,813in
Tipo de Puerto <b>(Port Type)</b>	Desequilibrado
Dirección del Flujo <b>(Flow Direction)</b>	Abajo
Empuje hacia abajo para <b>(Push Down To)</b>	Cerrar
Flujo tiende hacia <b>(Flow Tends To)</b>	Abajo
Área desequilibrada <b>(Unbalanced Area)</b>	0,518 in

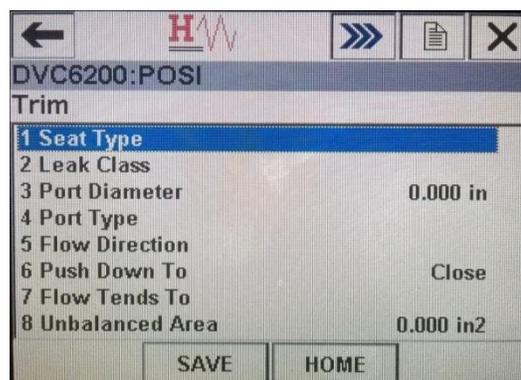
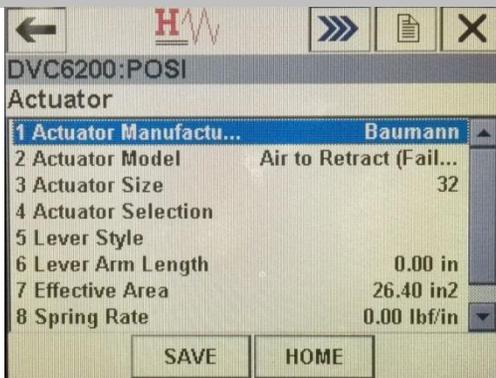


Tabla 2.6

## Parámetros del Actuador

MENÚ ACTUADOR	
Parámetros	Selección
Fabricante del Actuador <b>(Actuator Manufacturer)</b>	Baumann 
Modelo del Actuador <b>(Actuator Model)</b>	Aire para cerrar (Air to retract)
Tamaño del Actuador <b>(Actuator size)</b>	32
Área Efectiva <b>(Effective Area)</b>	32 in
Coefficiente de Resorte <b>(Spring Rate)</b>	lbf/in

**Control de Carrera/ Presión**

Dentro de todas las opciones de este menú, refiérase a la Figura 2.39, se configura únicamente la opción Seleccionar Carrera/Presión (Travel/Pressure Select).

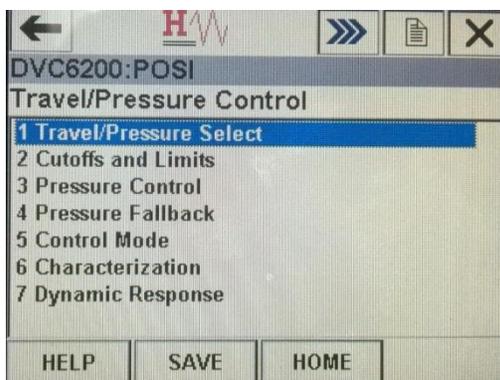


Figura 2.39 Menú Control Carrera/Presión

### **Seleccionar Carrera / Presión** (Travel /Pressure Select)

Esta opción define el modo de funcionamiento del instrumento, así como el comportamiento del instrumento ante una falla del sensor de carrera. Hay cuatro opciones, ver Figura 2.40.

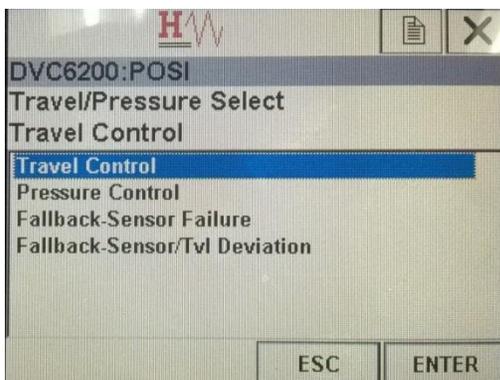


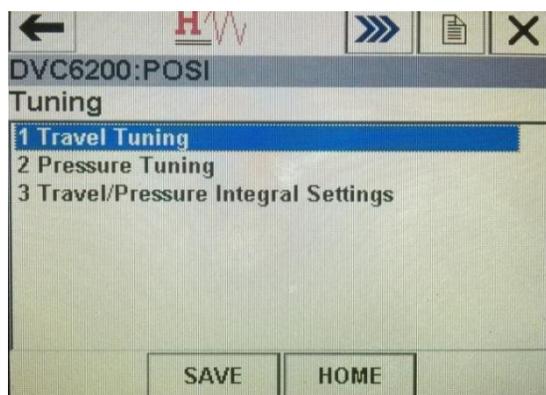
Figura 2.40 Menú Seleccionar Carrera/Presión

1. **Control de Carrera (Travel Control):** El instrumento está controlando un valor establecido de carrera. La sustitución del sensor utilizado (Fallback) no está habilitado.
2. **Control de presión (Pressure Control):** El instrumento está controlando un valor establecido de presión. La Sustitución del sensor utilizado (Fallback) no está habilitado.
3. **Retorno del sensor por falla (Fallback Sensor Failure):** El instrumento volverá al control de presión si se detecta un fallo en el sensor de carrera.

**4. Retorno-Sensor / Carrera-Desviación (Fallback Sensor / Tvl Deviation):** El instrumento volverá al control de presión si se detecta un fallo en el sensor de carrera, o si la diferencia entre el punto de consigna de la carrera y la carrera actual es mayor al valor establecido en el parámetro Tvl Dev Press Fallback durante un tiempo mayor al establecido en el parámetro Tvl Dev Press Fallback Time. La opción seleccionada para este trabajo es el Control de Carrera.

### **Ajuste** (Tuning)

Al ser escogida la opción de Control de Carrera en el parámetro anterior, en el menú Ajuste (Tuning) se realiza únicamente el Ajuste de Carrera, refiérase a la Figura 2.41.



**Figura 2.41 Menú Ajuste**

### ***Ajuste de Carrera***

Se puede escoger entre once conjuntos de valores predeterminados para el ajuste de cada ganancia del controlador digital de la válvula. La Tabla 2.7 presenta una guía para seleccionar el conjunto de valores de ajuste más adecuado tomando en cuenta el tipo de actuador. Estos valores son recomendados como puntos de partida para luego realizar un ajuste fino hasta obtener la respuesta deseada.

**Tabla 2.7**  
**Información del Actuador para Ajuste Inicial**

Actuator Manufacturer	Actuator Model	Actuator Size	Actuator Style	Starting Tuning Set	Travel Sensor Motion(2) Relay A or C(3)				
Fisher	585C & 585CR	25	Piston Dbl w/ or w/o	E	User Specified				
		50	Spring. See	I					
		60	actuator	J					
		68, 80 100, 130	instruction manual and nameplate.	L M					
	657	30 34, 40 45, 50 46, 60, 70, 76, & 80-100	Spring & Diaphragm	H K L M	Away from the top of the instrument				
		667	30 34, 40 45, 50 46, 60, 70, 76, & 80-100	Spring & Diaphragm		H K L M	Towards the top of the instrument		
			1051 & 1052	20, 30 33 40 60, 70		Spring & Diaphragm (Window-mount)		H I K M	Away from the top of the instrument
	1061			30 40 60 68, 80, 100, 130	Piston Dbl w/o Spring	J K L M		Depends upon pneumatic connections. See description for Travel Sensor Motion	
				1066SR	20 27, 75	Piston Sgl w/Spring			
		A	Away from the top of the instrument						
B		Towards the top of the instrument							
C	Towards the top of the instrument								
	D	Away from the top of the instrument							

**CONTINÚA →**

	2052	1 2 3	Spring & Diaphragm (Window-mount)	H J M	Away from the top of the instrument	
3024C	30, 30E 34, 34E, 40, 40E 45, 45E		Spring & Diaphragm	E H K	For Po operating mode (air opens): Towards the top of the instrument For Ps operating mode (air closes): Away from the top of the instrument	
GX	225 750 1200		Spring & Diaphragm	X(1) K M	Air to Open Towards the top of the instrument	Air to Close Away from the top of the instrument
Air to Extend	16			C	Towards the top of the instrument	
Air to Retract	32 54			E H	Away from the top of the instrument	
Rotary	10 25 54		Spring & Diaphragm	E H J	Specify	

NOTE: Refer to figure table 3-6 for feedback connection (magnet assembly) information.  
1. X = Expert Tuning. Proportional Gain = 4.2; Velocity Gain = 3.0; Minor Loop Feedback Gain = 18.0  
2. Travel Sensor Motion in this instance refers to the motion of the magnet assembly.  
3. Values shown are for Relay A and C. Reverse for Relay B.

Fuente: [16]

En la Tabla 2.8 se muestra una lista con los valores de la ganancia proporcional, ganancia de velocidad y ganancia de lazo menor de realimentación.

Tabla 2.8

## Conjuntos de ajuste preseleccionados

Tuning Set	Proportional Gain	Velocity Gain	Minor Loop Feedback Gain
<b>C</b>	4.4	3.0	35
<b>D</b>	4.8	3.0	35
<b>E</b>	5.5	3.0	35
<b>F</b>	6.2	3.1	35
<b>G</b>	7.2	3.6	35
<b>H</b>	8.4	4.2	31
<b>I</b>	9.7	4.85	27
<b>J</b>	11.3	5.65	23

CONTINÚA →

Tuning Set	Proportional Gain	Velocity Gain	Minor Loop Feedback Gain
K	13.1	6.0	18
L	15.5	6.0	12
M	18.0	6.0	12
X (Expert)	User Adjusted	User Adjusted	User Adjusted

Fuente: [16]

También se puede seleccionar Ajuste Experto (Expert Tuning) para fijar manualmente los valores de cada ganancia, la opción Autosintonía (Performanze Tuning) permite ejecutar el proceso de sintonía automática mientras que la opción Estabilización y Optimización (Stabilize – Optimize) para un ajuste fino de las ganancias ya seleccionadas.

En este trabajo se usa la válvula de control 24000 Little Scotty con actuador Baumann 32 de aire para abrir, según la Tabla 2.7 el conjunto de valores de ajuste a usar pueden ser el C, E o H de la Tabla 2.8.

### Válvula y Actuador (Valve and Actuator)

Existen seis parámetros a configurar dentro del menú Válvula y Actuador (ver la Figura 2.42) la Tabla 2.9 muestra estos parámetros, las opciones entre las que se puede escoger y la opción seleccionada para este trabajo.

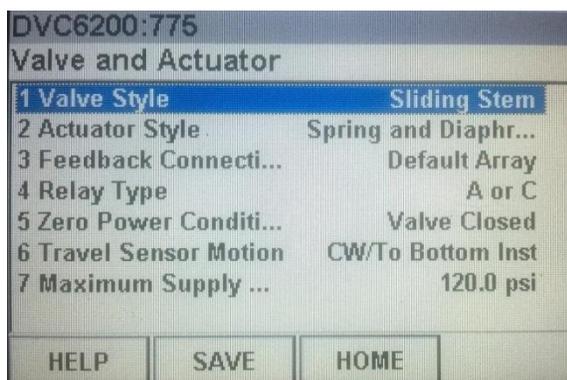


Figura 2.42 Menú Válvula y Actuador

Con estos parámetros termina la configuración manual realizada para este trabajo, finalmente se vuelve a seleccionar la opción de calibración automática,

de esta manera la válvula de control y el posicionador están funcionando adecuadamente para realizar las pruebas de control.

**Tabla 2.9**

**Parámetros Válvula y Actuador**

MENÚ VÁLVULA Y ACTUADOR		
Parámetro	Opciones	Selección
Estilo de válvula <b>(Valve Style)</b>	-Rotativa -Vástago deslizante	Vástago deslizante
Estilo de Actuador <b>(Actuator Style)</b>	-Resorte y diafragma -Pistón de doble acción sin resorte -Pistón de acción simple con resorte -Pistón de acción doble con resorte	Resorte y diafragma
Tipo de relé <b>(Relay Type)</b>	-Relé A -Relé B -Relé A o C	Relé A o C
Condición de cero energía <b>(Zero Power Condition)</b>	-Válvula Abierta -Válvula Cerrada	Cerrada
Movimiento del sensor <b>(Travel sensor motion)</b>	-Sentido de las manecillas del reloj/ hacia abajo (CW/To Bottom Inst) -Contrario las manecillas del reloj/hacia arriba (CCW/To top Inst)	CW/To Bototm Inst
Máxima presión de alimentación <b>(Maximum Supply Pressure)</b>	Ingresar la máxima presión de alimentación del instrumento	120.0 psi

## 2.4 Modelado de la planta

Una forma de hallar el modelo de una planta es realizar una identificación experimental basada en el registro de datos de entrada-salida que contienen información significativa de la planta. La herramienta “*ident*” de Matlab permite aplicar diferentes técnicas de identificación, para lo cual se deben seguir los siguientes pasos:

### Paso 1: Generar Datos

- Previo al uso de la herramienta se debe recolectar datos de entrada-salida; para lo cual se selecciona la opción generar corriente en el HMI descrito en la siguiente sección, que además permite registrar en un archivo de Excel las entradas de diferente duración y amplitud que fueron aplicadas con su respectivas salidas, a más de otros datos que serán analizados en el apartado diagnóstico.

### Paso 2: Cargar Datos de Excel al Workspace de Matlab

- En el *workspace* (Figura 2.43) Dar clic en el icono *Import data*

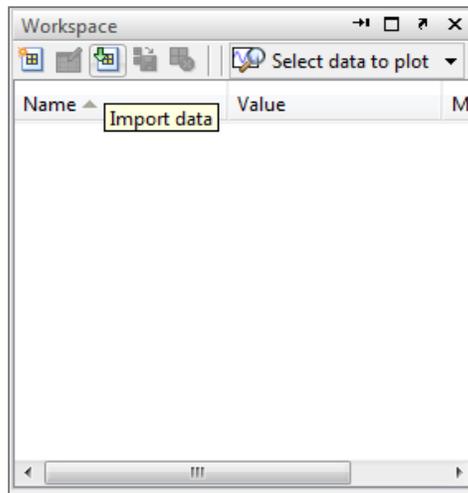


Figura 2.43 Workspace

- En la ventana *Import Data* (Figura 2.44), seleccionar el archivo de Excel que se generó en el paso 1.

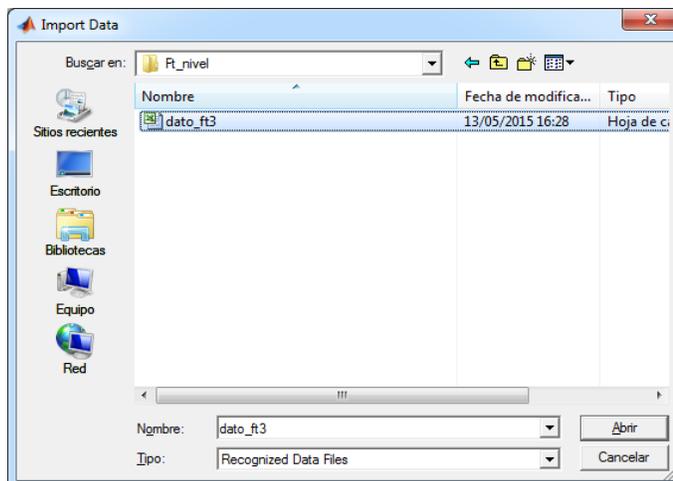


Figura 2.44 Ventana Import Data

- Se abre la ventana *Import Wizard* (Figura 2.45), donde se selecciona la hoja de cálculo del archivo de Excel sobre la cual se guardaron los datos de entrada-salida.

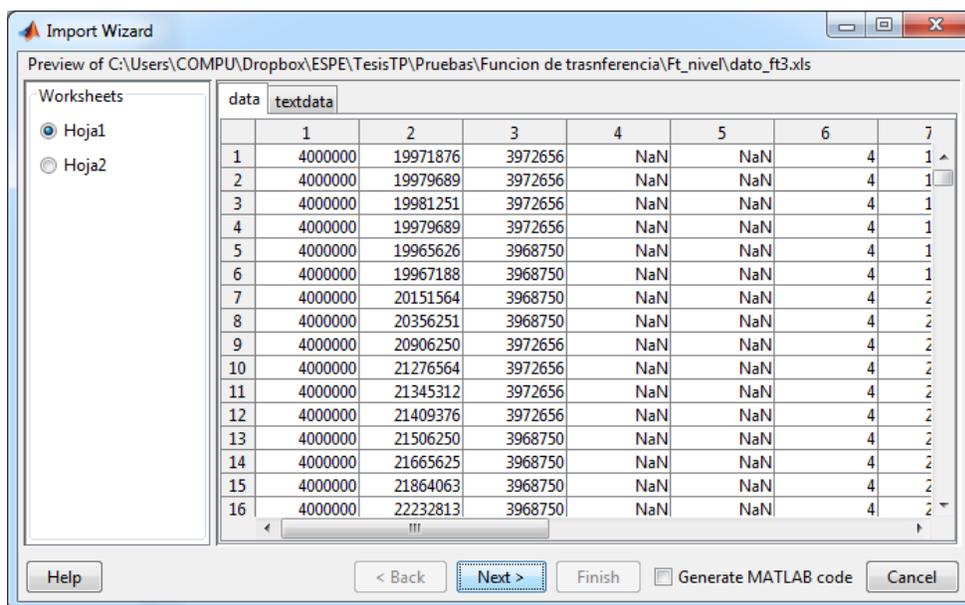


Figura 2.45 Ventana Import Wizard

- Al seleccionar la variable generada en el paso anterior se abre la ventana *Variable Editor* (Figura 2.46), en la cual se seleccionan las celdas correspondientes a la entrada y se da clic izquierdo para crear una nueva variable con los datos seccionados.

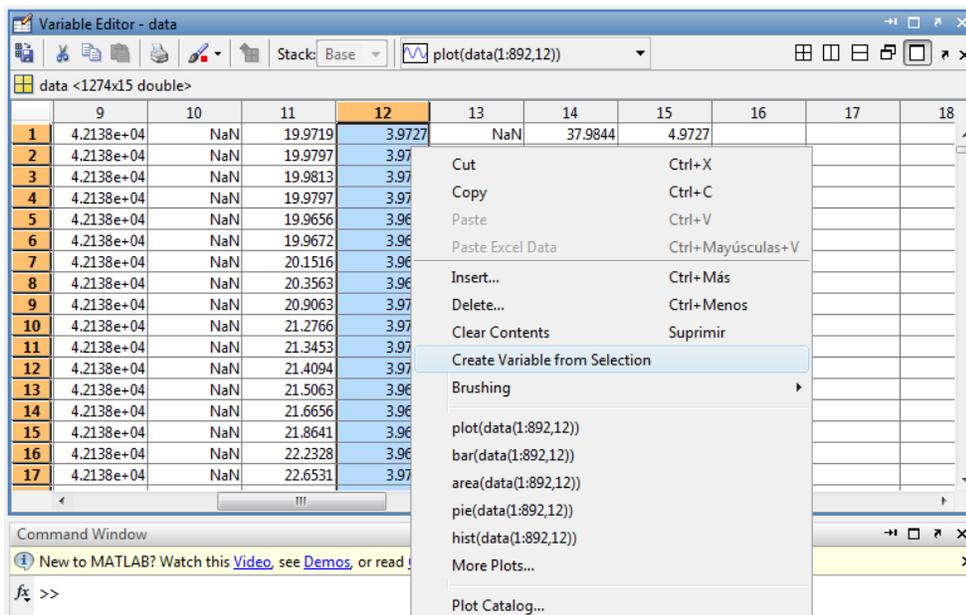


Figura 2.46 Ventana Variable Editor

- En el *Workspace* se crean las variables entrada (mA) y salida (cm) como muestra la (Figura 2.47).

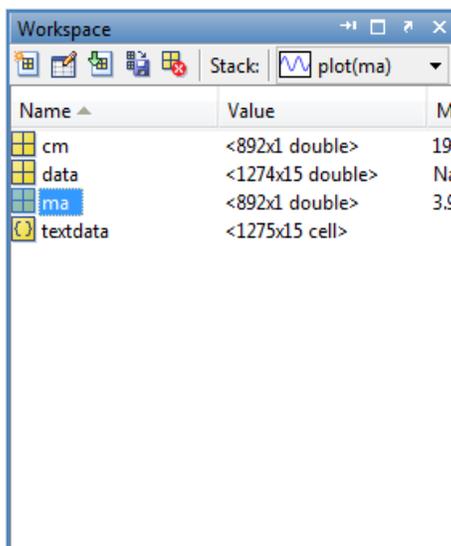


Figura 2.47 Variables de entrada y salida cargadas en el Workspace

- Para verificar que la variable entrada (Figura 2.48) y la variable salida (Figura 2.49) se cargan correctamente, se deben graficar mediante el comando *plot*.

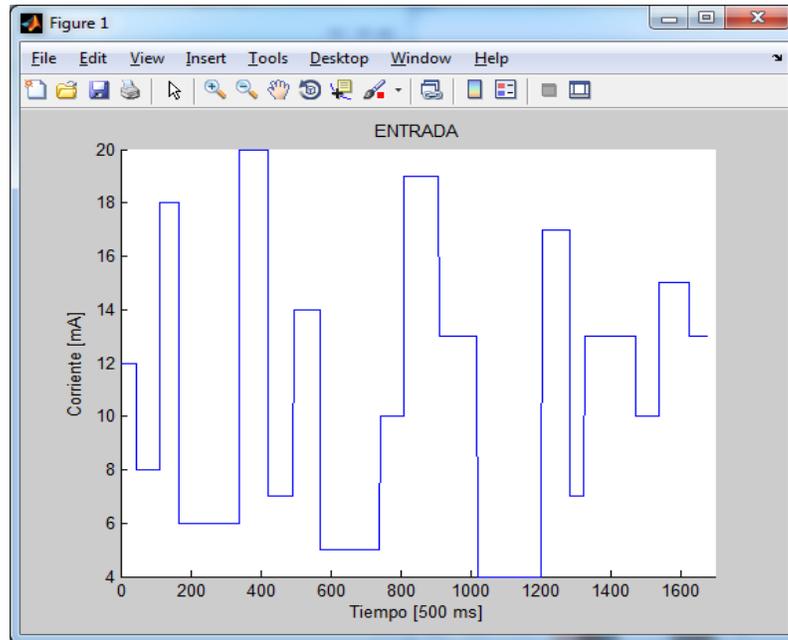


Figura 2.48 Variable entrada (mA)

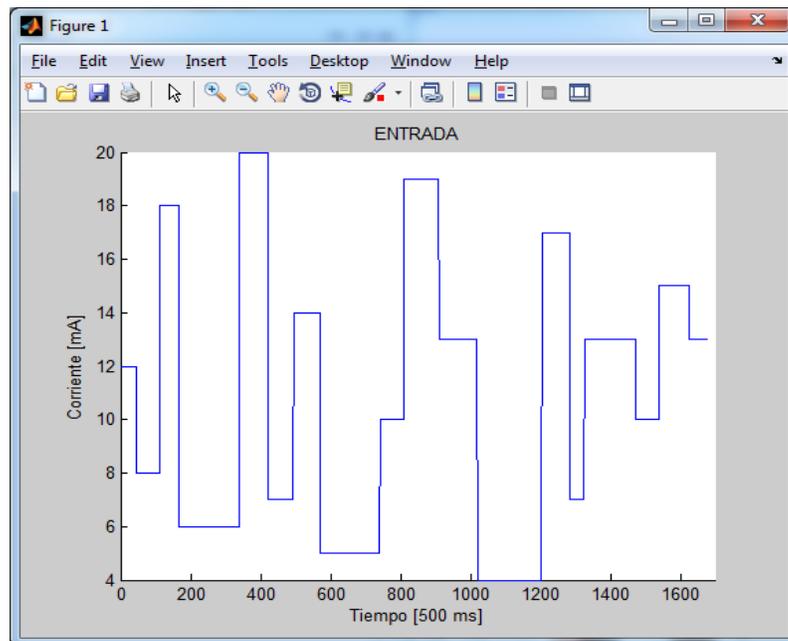


Figura 2.49 Variable salida (cm)

### Paso 3: Identificación paramétrica con la herramienta ident

- Llamar a la herramienta de identificación escribiendo en el *Comand Window* la palabra *ident*, aparecerá la ventana System Identification Tool (Figura 2.50).

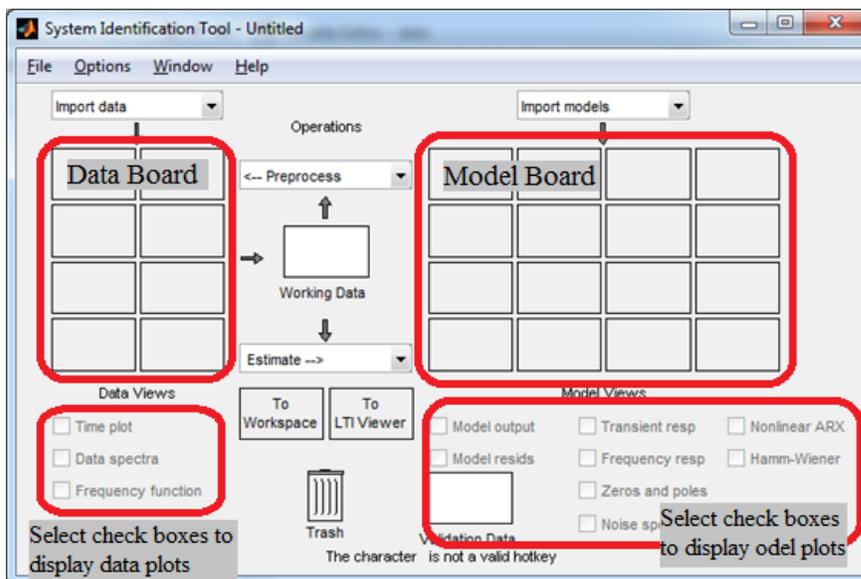


Figura 2.50 Ventana System Identification Tool

- Es necesario cargar las variables generadas en el *Wokspace* (Figura 2.47). dando clic en *Import Data* y seleccionando *Time domain data* como muestra la Figura 2.51.

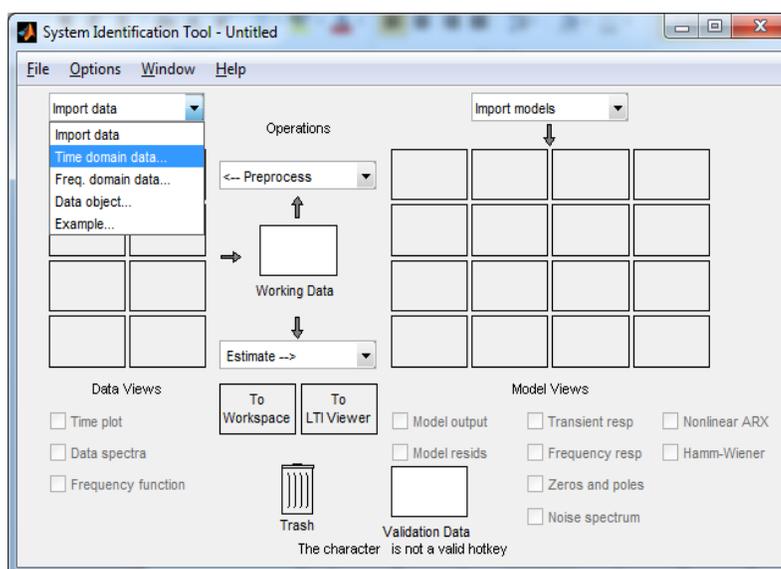


Figura 2.51 Cargar datos en la ventana System Identification Tool

- Se abrirá la ventana *Import Data* (Figura 2.52), en *input* digitar “ma” (variable de entrada) y en *output* digitar “cm” (variable de salida)

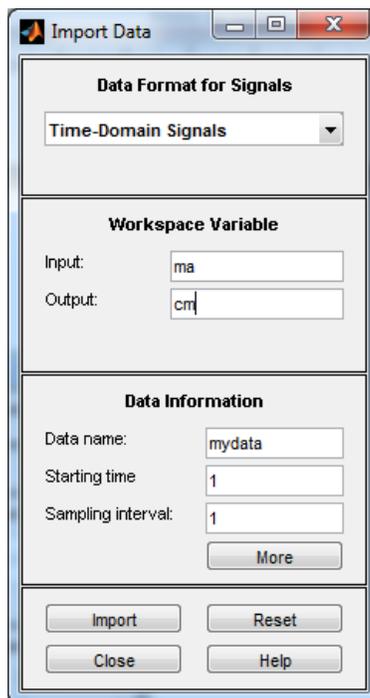


Figura 2.52 Ventana Import Data.

- Observar que se generó un cuadro que contiene la información de entrada salida en el área Data Board en la ventana System Identification Tool como muestra la Figura 2.53.

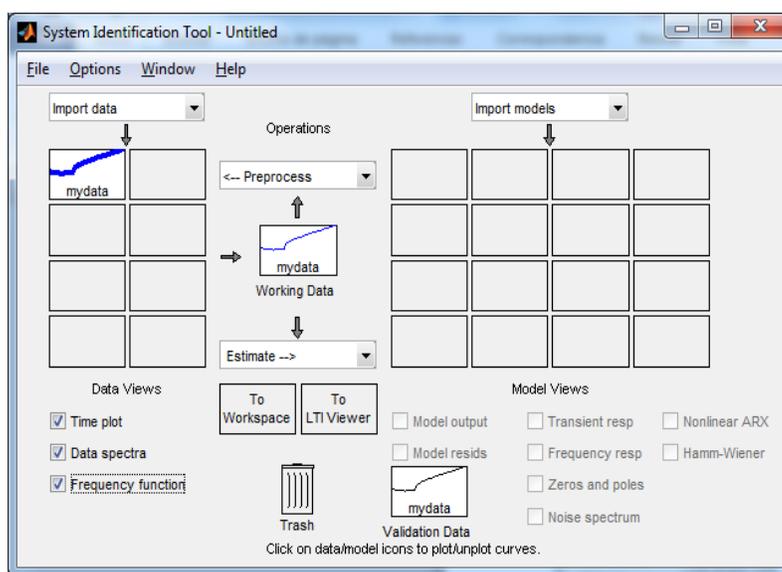


Figura 2.53 Generación del cuadro mydata (información de la planta)

- Dar clic en la pestaña *Estimate* (Figura 2.54), y seleccionar *Nonlinear Models*.

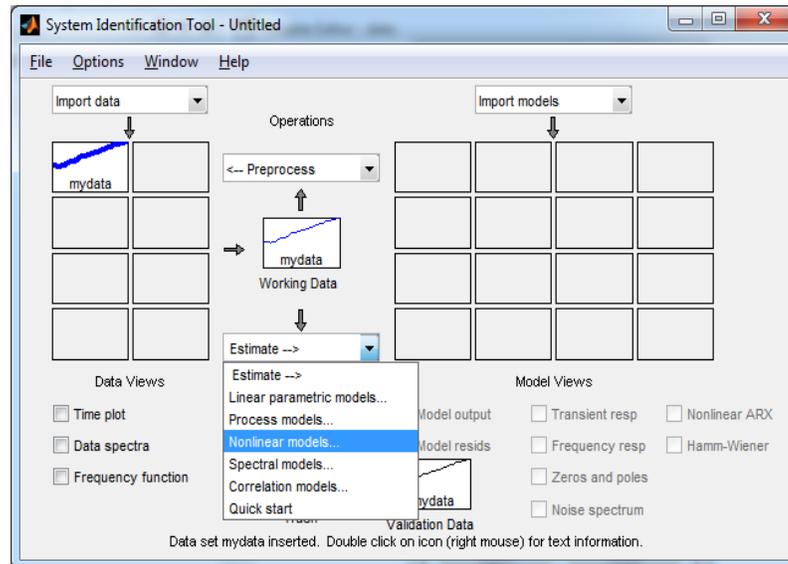


Figura 2.54 Opción estimate del System Identification Tool

- Aparecerá la ventana *Nonlinear Models*, que contiene los diferentes modelos para identificación no lineal.

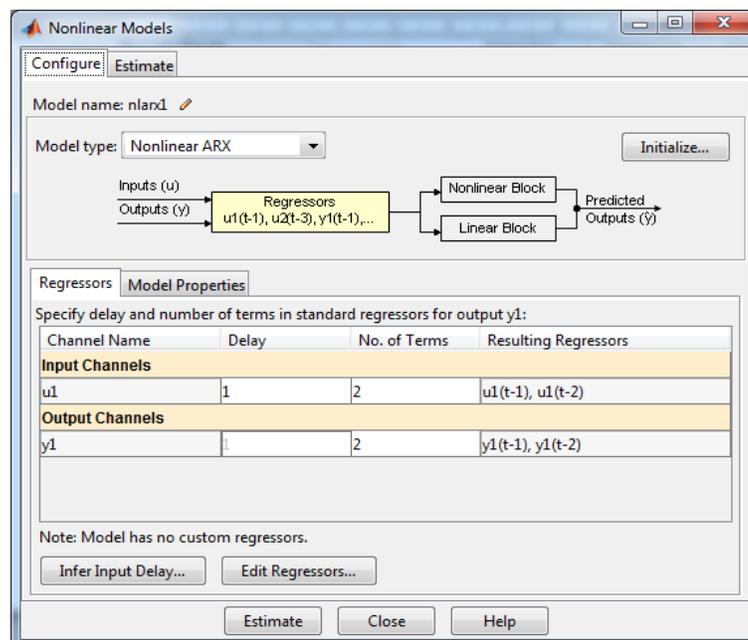


Figura 2.55 Ventana Nonlinear Models

- Dentro de la nueva ventana se muestran las diferentes propiedades de estos modelos (Figura 2.56), se modifican estas propiedades y se genera modelos dando clic en *Estimate* las veces que sean necesarias hasta obtener el modelo que más se ajuste a la planta.

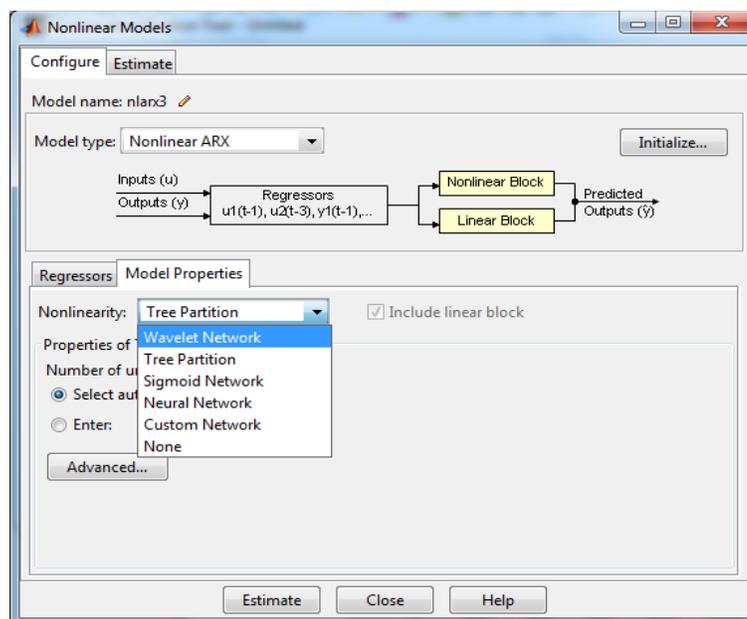


Figura 2.56 Opción Model Properties

- Los modelos generados en el paso anterior irán ocupando un espacio en la parte de model board de la ventana *System Identification Tool* como muestra la Figura 2.57.



Figura 2.57 Modelos generados por la herramienta *ident*

- Si se selecciona la opción *Model output* de los displays model plots de la ventana *System Identification Tool* (Figura 2.50) aparecerá la ventana (Figura 2.58) que contiene las gráficas de los modelos seleccionados de

todos los generados en el paso anterior con su porcentaje de aproximación.

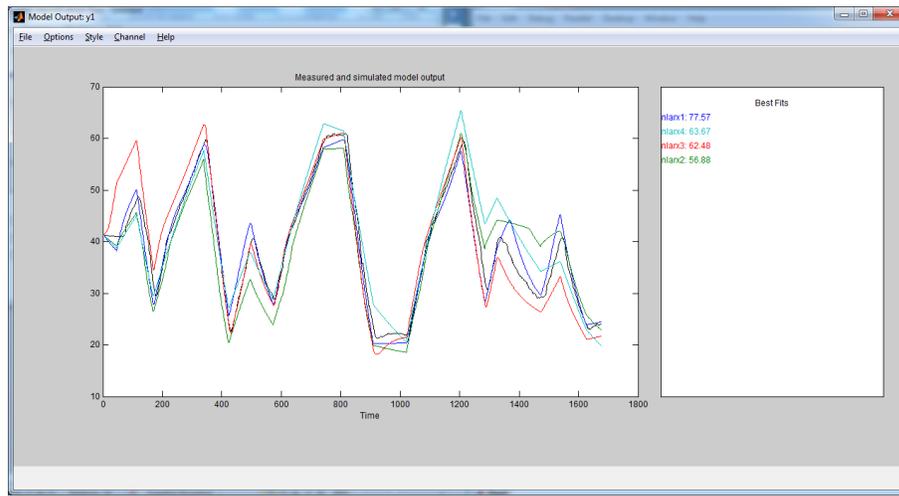


Figura 2.58 Ventana Model Output

- Si se desea utilizar el modelo para simular un proceso en Simulink, se debe cargar como una variable al *Workspace* como muestra la Figura 2.59, arrastrando el cuadro del modelo a la opción *To Workspace* (Figura 2.57).

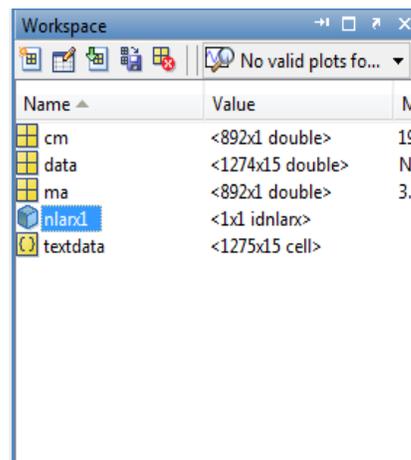


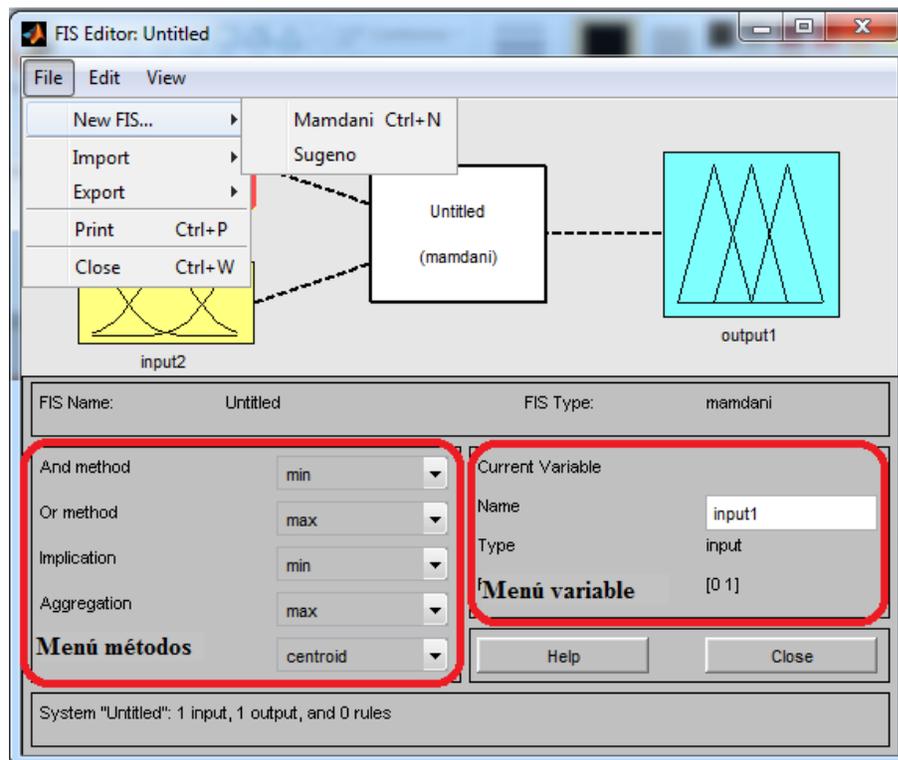
Figura 2.59 Variable del modelo ARX en el Workspace

### 2.4.1 Simulación de un control Fuzzy

El control que se desea simular se basa en lógica difusa, por lo que antes de generar el diagrama de bloques de la planta en Simulink, se deben establecer

las funciones miembro de entrada y salida con las reglas que las relacionen de la siguiente manera:

- En la ventana principal de Matlab digitar la palabra *fuzzy*, se desplegará la ventana de la (Figura 2.60), que cuenta con el menú métodos con los que se procesara a las variables de entrada; además hay un menú para asignar un nombre a la variable de entrada. Para elegir el modelo a usar dar clic en el menú *File*, seguido de *New FIS* y elegir entre las *opciones Mamdani* o *Sugeno*.



**Figura 2.60** Venta principal de la herramienta fuzzy

- Si se desea adicionar una variable de entrada, dar clic en el menú *Edit* seguido de *Input* como muestra la (Figura 2.61), se generará una nueva entrada como muestra la (Figura 2.62).

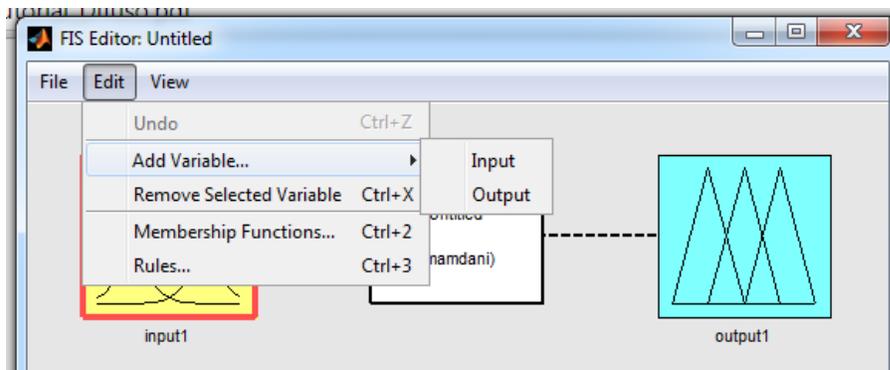


Figura 2.61 Agregar una entrada al modelo fuzzy

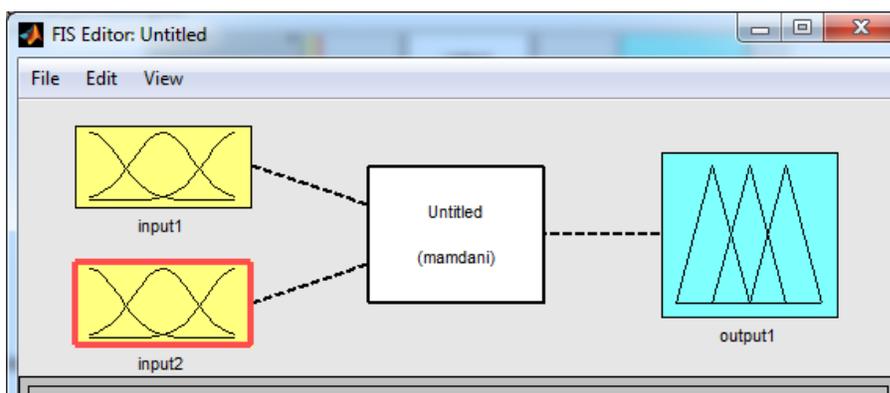


Figura 2.62 Modelo fuzzy con 2 entradas

- Para generar las funciones miembro de las variables de entrada y salida dar clic sobre el menú *Edit* seguido de *Membership Functions* como muestra la Figura 2.63.

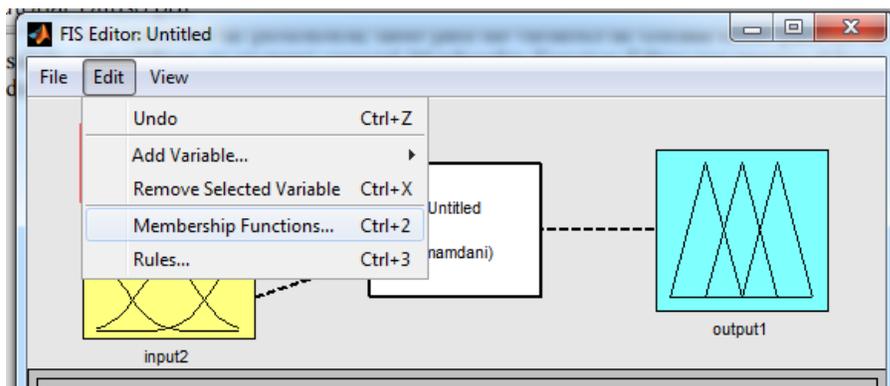


Figura 2.63 Llamar a la ventana de edición de funciones de pertenencia

- En el editor de funciones miembro (Figura 2.64) escoger el rango de pertenencia así como la forma y asignar un nombre a esta función.

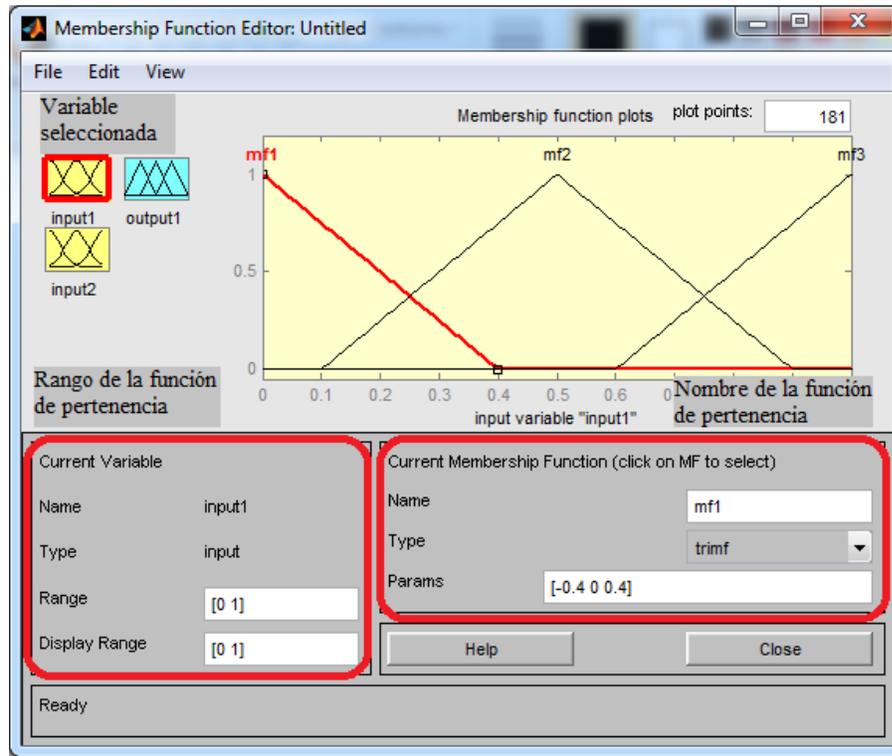


Figura 2.64 Ventana funciones de pertenencia

- Para administrar las reglas dar clic sobre el menú *Edit* seguido de *rules* como muestra la Figura 2.65.

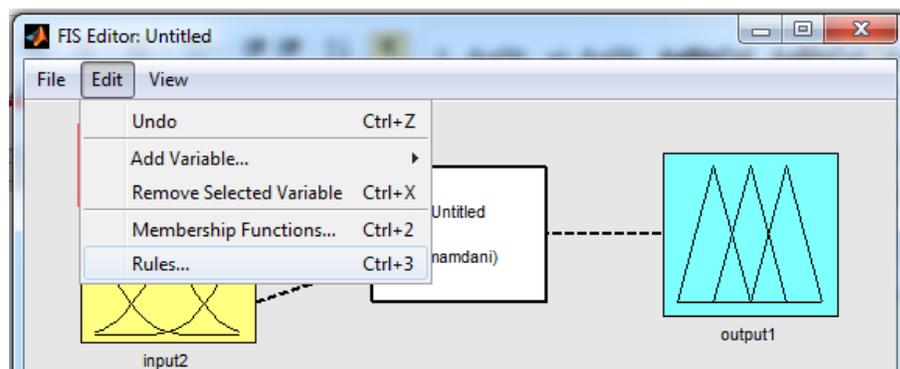


Figura 2.65 Llamar a la ventana de edición de reglas

- La ventana de edición de reglas (Figura 2.66) permite seleccionar las funciones miembro de entrada con su respectivo conector lógico, y asignar

una función miembro de salida para generar las reglas visualizadas en la parte superior en la ventana.

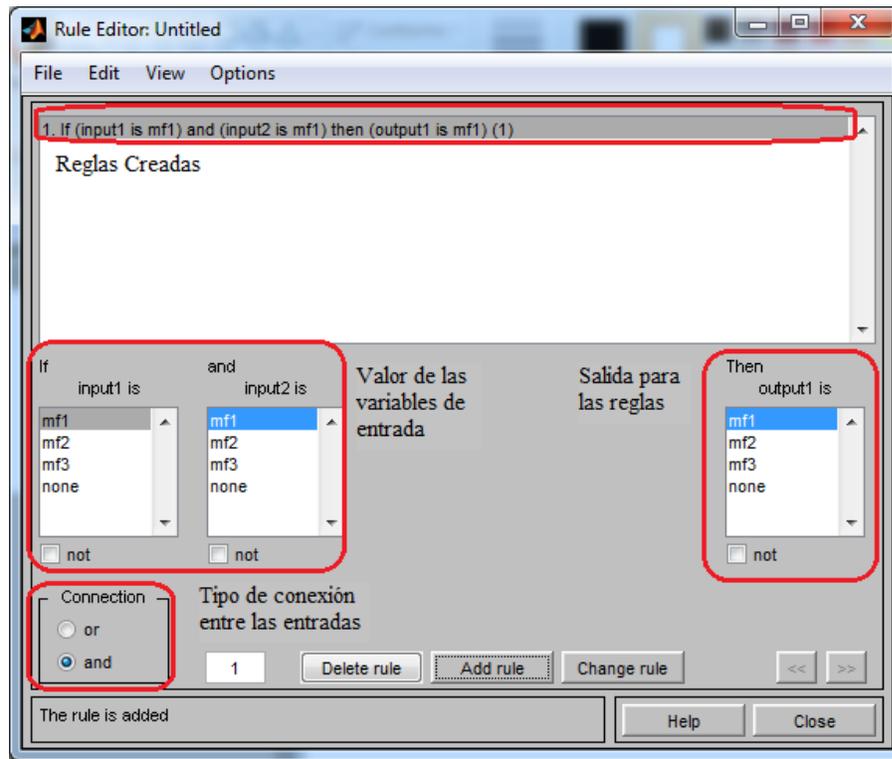


Figura 2.66 Ventana de edición de reglas

- Una vez que ha terminado de editar el modelo se puede exportar al *Workspace* dando clic sobre el menú *File* seguido de *Export* seguido de *To Workspace* como muestra la Figura 2.67, aparece un cuadro (Figura 2.68) para asignar un nombre al modelo.

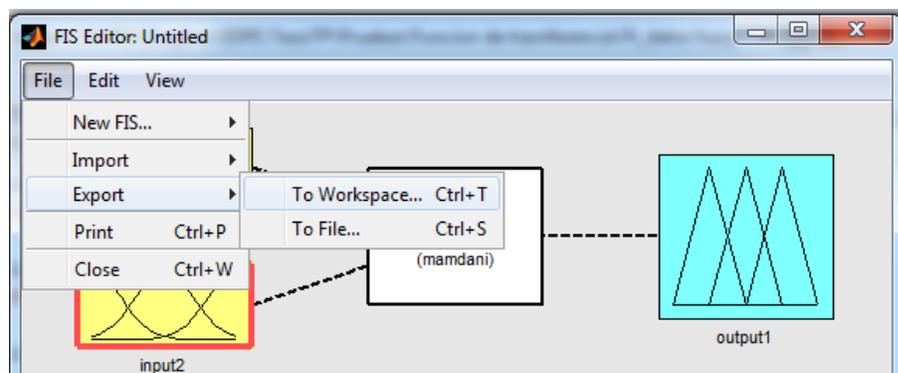


Figura 2.67 Guardar modelo en Workspace

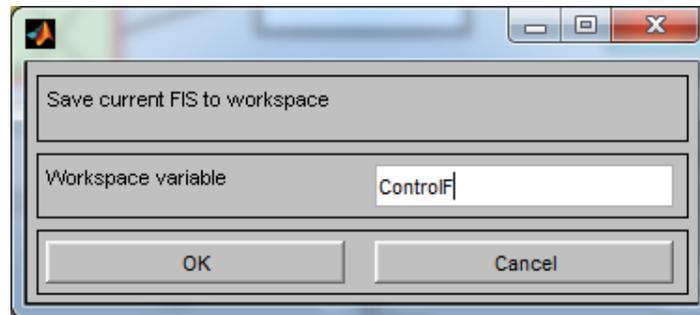


Figura 2.68 Asignación de nombre al modelo

- Verificar que se ha creado la variable en el *Workspace* como muestra la Figura 2.69.

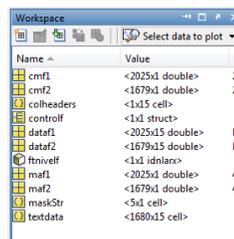


Figura 2.69 Variable del modelo fuzzy en el Workspace

En Simulink se deben seguir los siguientes pasos:

- Para acceder a los bloques de las diferentes librerías de Simulink dar clic en *View* y seleccionar la opción *Library Browser* como muestra la (Figura 2.70).

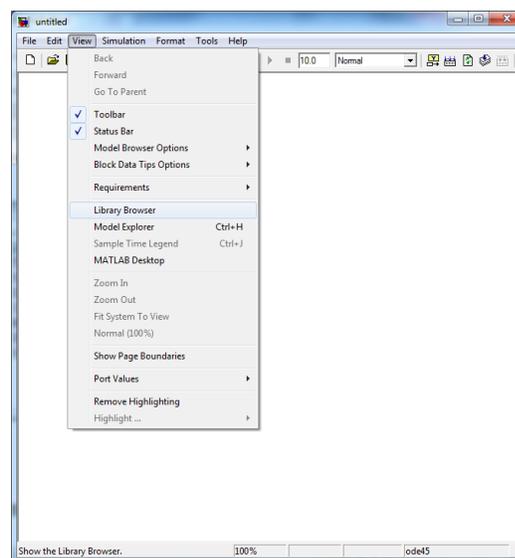


Figura 2.70 Como acceder a las librerías de Simulink

- La Figura 2.71 muestra las librerías que posee Simulink para simular un sistema.

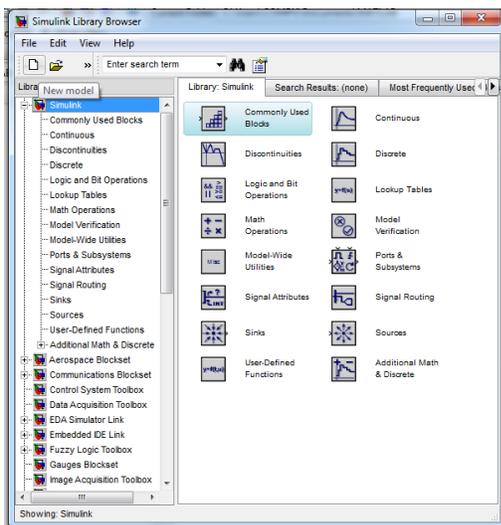


Figura 2.71 Librerías de Simulink

- Escoger los bloques de las diferentes librerías y crear el esquema a simular (Figura 2.72); en este caso un control Fuzzy de una planta de nivel modelada con la herramienta *ident*, estos bloques son descritos en la Tabla 2.10.

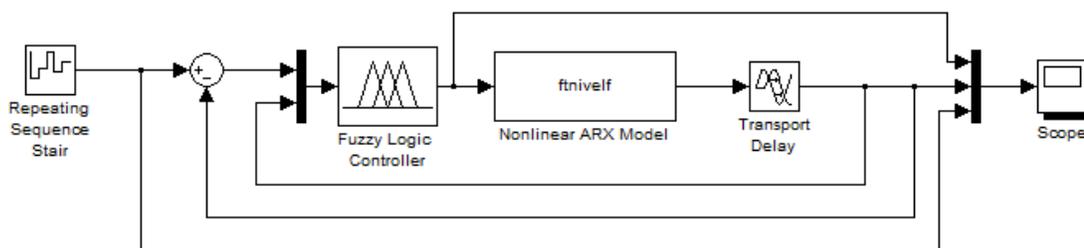


Figura 2.72 Esquema de un control Fuzzy de una planta con modelo ARX

Tabla 2.10

## Bloques del sistema simulado

Bloque	Función
Repeating Sequence Stair	Genera escalones que representan cambios en el punto de consigna
Fuzzy Logic Controller	Contiene el algoritmo de lógica difusa que se ejecuta
Nonlinear ARX Model	Contiene el modelo matemático ARX de la planta
Transport Delay	Retorna el valor discreto en el tiempo requerido
Scope	Osciloscopio

- Para acceder a los parámetros de cada bloque se debe hacer doble clic sobre los mismos, en este caso en el bloque *Nonlinear ARX Model* se cargará el modelo ARX denominado ftnivel (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Además se escriben las condiciones iniciales para dicho modelo como muestra la Figura 2.73.

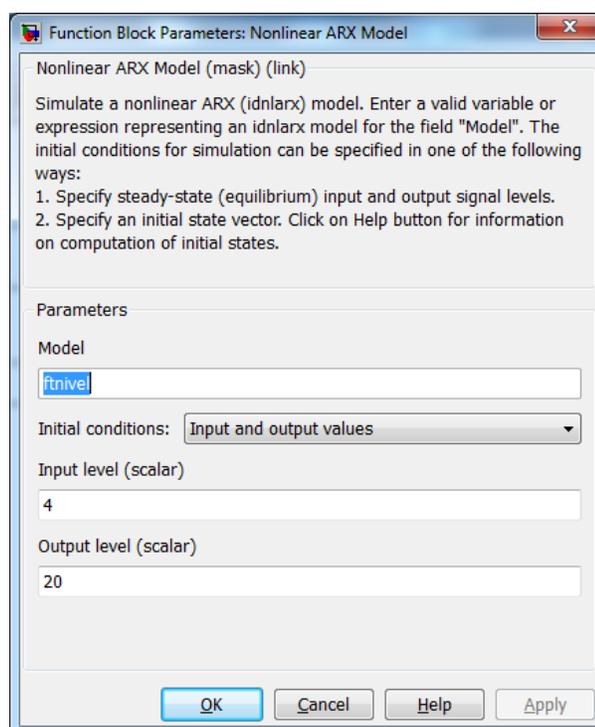


Figura 2.73 Parámetros del bloque Nonlinear ARX Model

- Además dar doble clic sobre el bloque del controlador fuzzy para escribir como parámetro del bloque la variable generada en la Figura 2.68 como muestra la Figura 2.74.

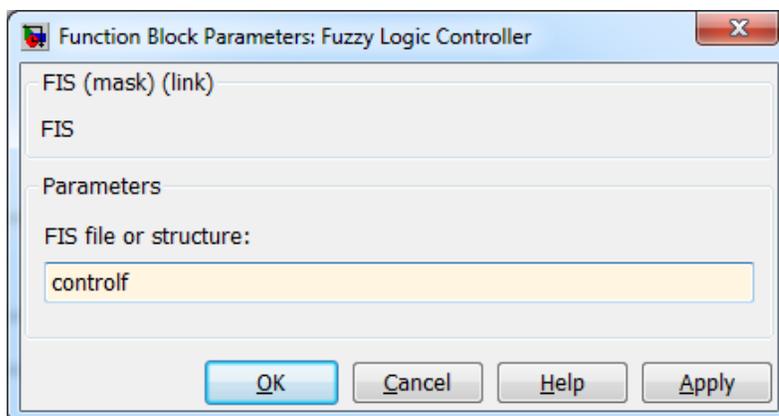


Figura 2.74 Parámetros del bloque Fuzzy Logic Controller

## 2.5 Programación del controlador

Todo algoritmo de programación, independientemente de la tecnología, lenguaje de programación y dispositivos que intervienen, debe partir de las condiciones y requerimientos del sistema. En este caso la (Tabla 2.11) resume de forma general como se relacionan ciertos parámetros de funcionamiento de la estación de nivel ND0704 del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Tabla 2.11

Condiciones de funcionamiento del módulo didáctico ND-0704

PARÁMETRO	MIN	MAX
Corriente [mA]	4	20
Presión [PSI]	3	13
Estado de la válvula	0 % cerrada Totalmente abierta	100 % cerrada Totalmente cerrada
Capacidad del tanque PV	Tiende al 100%	Tiende al 0%
Estado de la columna	Llenándose	Vaciándose

Es decir un suministro de 3 PSI ya sea por medio del convertor I/P o por medio del posicionador a la válvula no son suficientes para vencer la rigidez del resorte, por lo cual el desplazamiento del vástago es nulo obteniendo así un 0% de cierre de la válvula, consecuentemente el flujo volumétrico o caudal de agua que puede ingresar al depósito será máximo por lo que el mismo se encontrará llenándose.

A medida que esta presión vaya incrementando la válvula se irá cerrando hasta llegar a un 100% de cierre, por lo que el flujo volumétrico disminuirá, reduciéndose el nivel de agua en el depósito hasta llegar al punto de vaciarse.

### 2.5.1 PLC

El controlador deberá tener la capacidad de realizar las siguientes acciones:

#### 1. Leer la señal transmisor:

El transmisor genera una señal de 4-20 mA, el PLC por medio del módulo A/D recibe una entrada entre 6400 a 32000 bits Ec. ( 2.1 ); pero esta señal debe ser equivalente a un rango de nivel en este caso 20-60 cm (Figura 2.75), por lo que realiza el escalamiento de la Ec. ( 2.2 ):

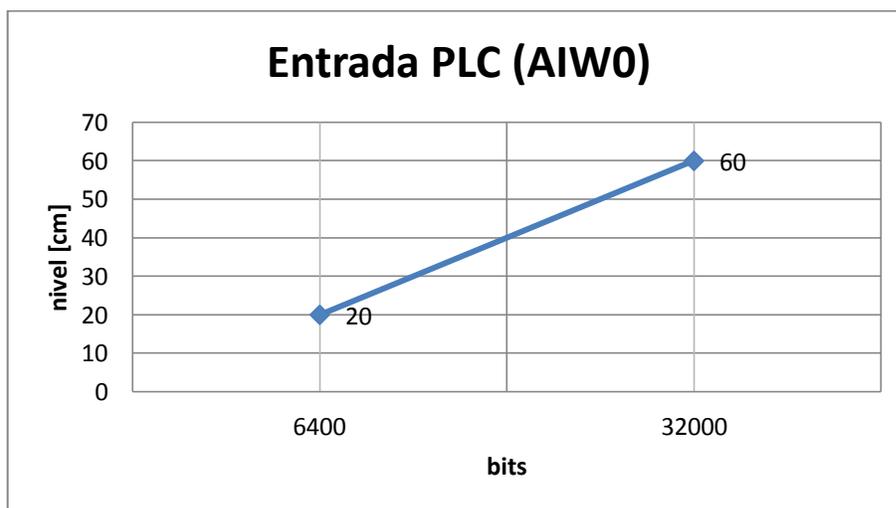


Figura 2.75 Relación bits-centímetros

$$bits = AIW0$$

$$\text{Ec. ( 2.1 )}$$

$$cm = \frac{bits}{640} + 10 \quad \text{Ec. ( 2.2 )}$$

## 2. Ejecutar un algoritmo de control:

El PLC posee un bloque que realiza los cálculos de un control PID, para lo cual se debe configurar el rango del lazo de consigna (Figura 2.76); en este caso será entre 20-60 cm. Además se debe configurar el rango que entregará el algoritmo en bits (Figura 2.77), en este caso de 6400 a 32000 bits.

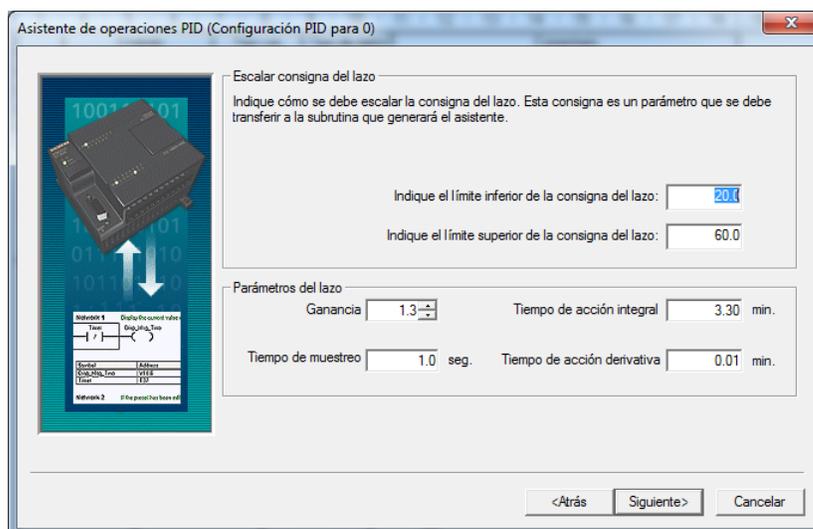


Figura 2.76 Configuración de la entrada del PID

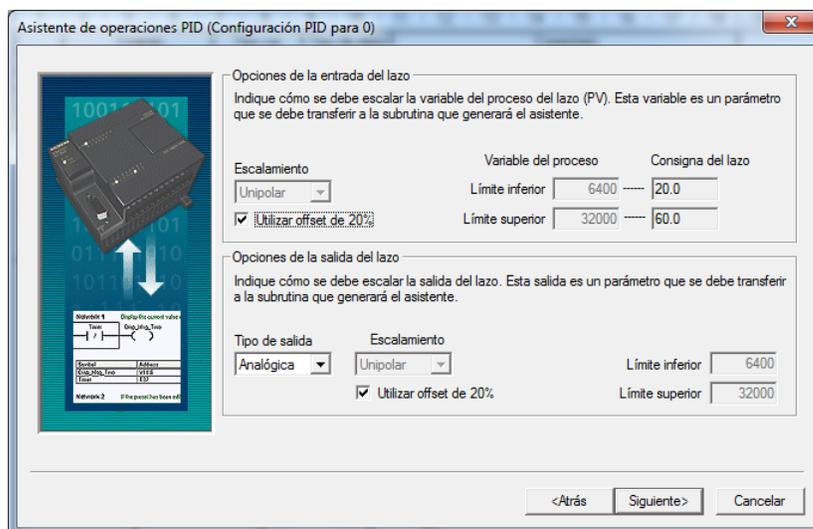


Figura 2.77 Configuración de la salida del PID

### 3. Escribir en el posicionador:

Al ejecutar el algoritmo de control, el PLC entrega una señal de control de 6400 a 32000 bits, pero como el actuador posee una lógica inversa como explica la Tabla 2.11, el algoritmo PID no toma en cuenta ese detalle, y cuando la variable de control debe estar en un 100% en realidad se encuentra en un 0%.

Es por ello que existe una relación de bits y % de variable de control mostrado en la Figura 2.78 para lo cual se debe realizar el escalamiento de la Ec. ( 2.3 ):

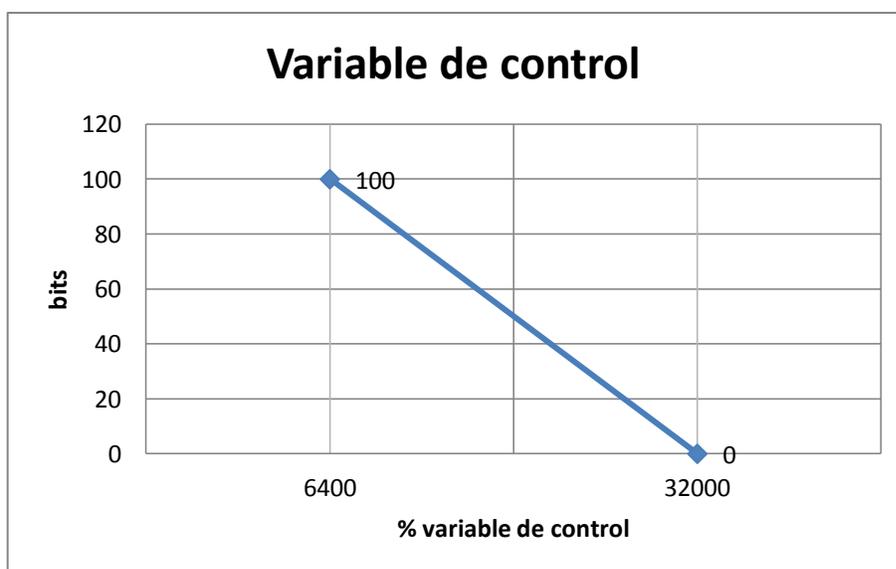


Figura 2.78 Porcentaje de variable de control

$$CV = \frac{CV_{pid}}{256} - 125 \quad \text{Ec. ( 2.3 )}$$

El anterior escalamiento permite visualizar que cuando la variable del proceso está en 100% el tanque tiende a su 100%, es decir se está llenado; pero como el convertor D/A entiende bits es necesario cambiar este porcentaje a bits como muestra la Figura 2.79 para lo cual se realiza el escalamiento de la Ec. ( 2.4 ):

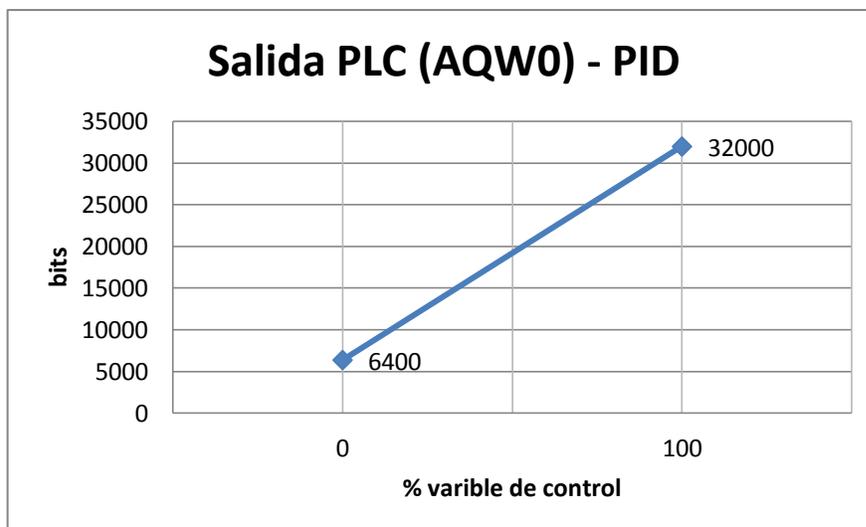


Figura 2.79 Salida PLC: algoritmo PID

$$AQW0 = (CV) * 256 + 6400 \quad \text{Ec. ( 2.4 )}$$

Además de escribir la señal generada por el algoritmo PID el PLC debe escribir un valor de corriente cuando se encuentre ejecutando esta subrutina, para lo cual se ingresa un valor desde teclado de 4-20 mA que debe ser representado en 6400-32000 bits como muestra la Figura 2.80, por lo que se realiza el escalamiento de la Ec. ( 2.5):

$$AQW0 = 1600 * corriente \quad \text{Ec. ( 2.5 )}$$

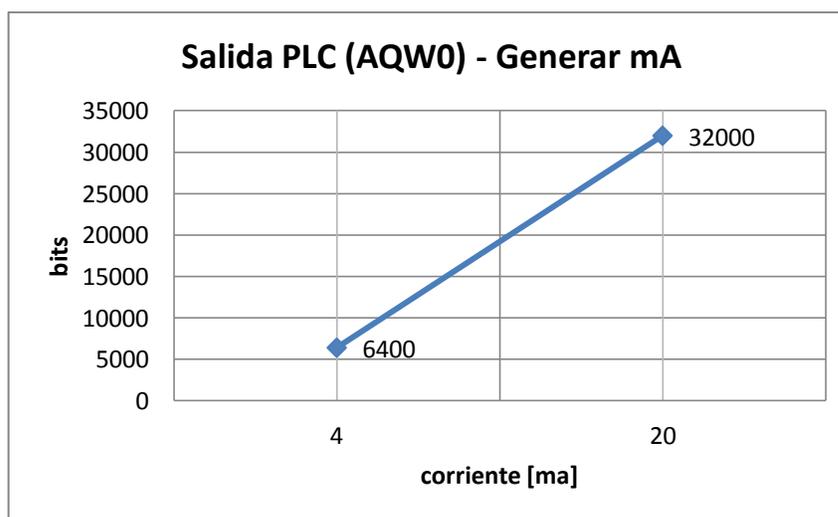


Figura 2.80 Salida PLC: generar corriente

## 2.5.2 Labview

### 1. Monitorear tags

El posicionador es un dispositivo que le da inteligencia al actuador (válvula), mediante comunicación HART y por medio de un OPC HART se puede acceder a los tags que fueron descritos en el apartado 1.4.6. Ya que el HMI trabaja bajo la plataforma Labview, a continuación se describe como acceder a dichos tags en este entorno.

- En el diagrama de bloques de Labview dar clic derecho sobre un control ya sea numérico o string según los requerimientos, al cual se asigna el tag y se desplegará un menú como muestra la Figura 2.81

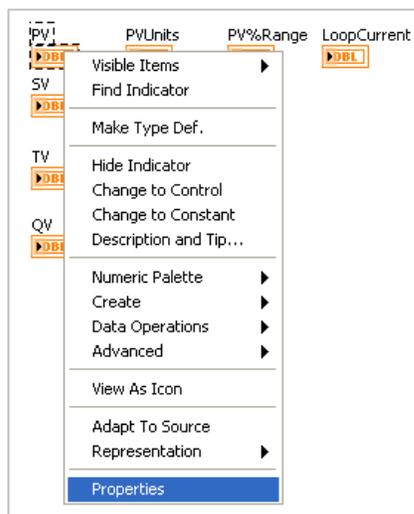


Figura 2.81 Menú de un control numérico

- En la ventana propiedades, seleccionar la pestaña *Data Binding* y escoger la opción *Data Socket* como muestra la Figura 2.82.

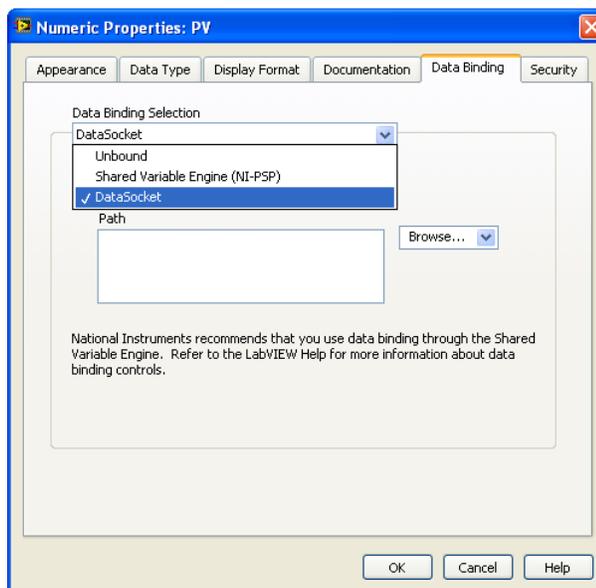


Figura 2.82 Ventana propiedades de un control numérico

- Dar clic sobre *Browse* y seleccionar la opción *DSTP Server* como muestra la Figura 2.83.

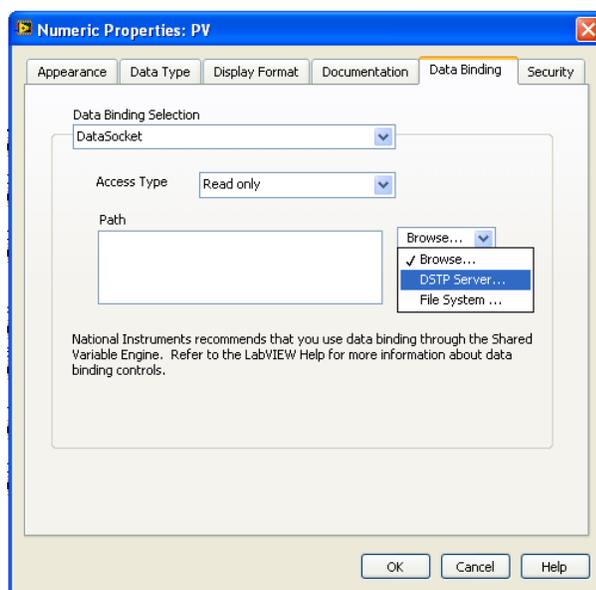
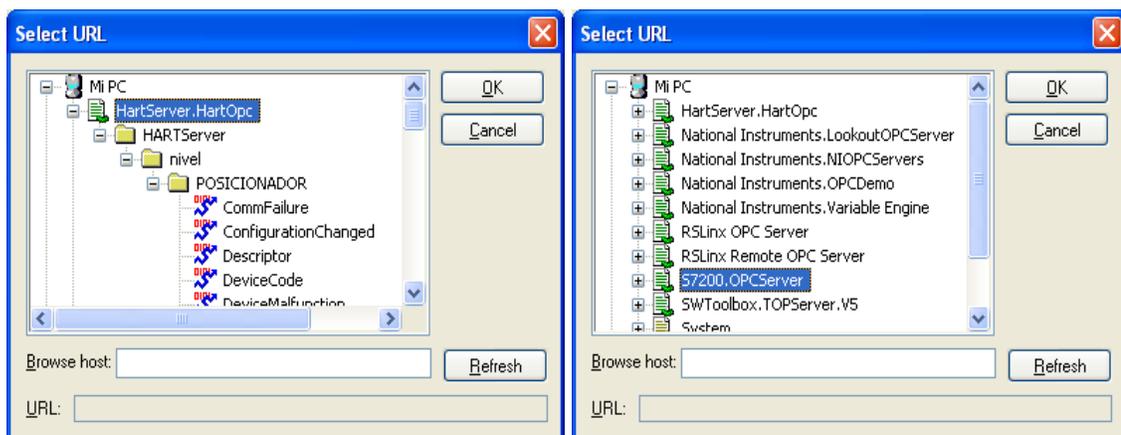


Figura 2.83 Venta propiedades opción buscar

- Se abrirá un buscador, se debe elegir *HARTServer* o *HARTOpc* como muestra la imagen (a) de la Figura 2.84; el mismo que desplegará una lista de los tags que posee el dispositivo HART en este caso los

mostrados en la Figura 2.85. Elegir el que requiera, además de seleccionar el tipo de acceso, es decir lectura o escritura.

- NOTA: La interfaz física que se utiliza es un modem HART por lo que la mayoría de tags deben ser seleccionados como lectura.



(a) OPC HART      (b) OPC controlador Siemens

Figura 2.84 Buscador de servidores

El PLC es el que posee el control de la variable nivel por lo que también es importante asignar los tags que deben ser visualizados o modificados por teclado, para ello es necesario seguir el procedimiento anterior con la diferencia que en el buscador de servidores se debe seleccionar *S7200.OPCServer* como muestra la imagen (b) de la (Figura 2.84).

- NOTA: Este OPC requiere la creación de un archivo previo en el cual se asignan los tags con sus respectivas localidades y tipo de variable en el propio entorno del OPC.

"Monitoreo tags", Default				
ConfigurationChanged ▶DBL	PVDamping abc▶	Tag abc▶	ManufacturerCode ▶DBL	PV%Range 2 ▶DBL
CommFailure ▶DBL	Message abc▶	ManufacturerName abc▶	DeviceCode ▶DBL	LoopCurrent 3 ▶DBL
MoreStatusAvailable ▶DBL	Descriptor abc▶	DeviceName abc▶	DeviceRevision ▶DBL	PVOutOfLimits ▶DBL
NonPVOutOfLimits ▶DBL		DeviceMalfunction abc▶		PVLowRange ▶DBL
PVLowerSensorLimit ▶DBL		MoreStatusString abc▶		PVHighRange ▶DBL
PVAnalogOutFixed ▶DBL		PVUnitString abc▶		PVUpperSensorLimit ▶DBL
PVAnalogOutSaturated ▶DBL		PVUnitString 2 abc▶	PV 2 ▶DBL	PVMinimumSpan ▶DBL
		SVUnitString abc▶	SV 3 ▶DBL	PVUnits ▶DBL
		TVUnitString abc▶	TV 2 ▶DBL	SVUnits ▶DBL
		QVUnitString abc▶	QV 3 ▶DBL	TVUnits ▶DBL
				QVUnits ▶DBL

Figura 2.85 Variables HART del posicionador DVC6200

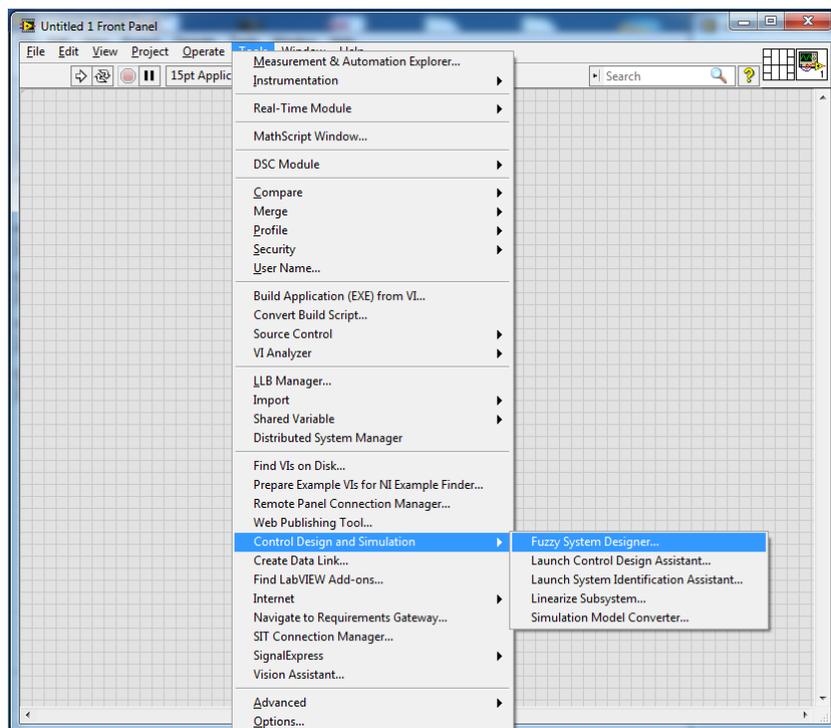
## 2. Ejecutar el algoritmo de control difuso

El PLC con el cual se han desarrollado las pruebas no posee el bloque de control con lógica difusa, es por ello que el algoritmo de control basado en esta lógica se debe implantar bajo la plataforma de Labview gracias al *Fuzzy Logic Toolkit*, con el PLC únicamente para adquirir datos del transmisor y escribir datos en el posicionador.

Aunque aparentemente no se están optimizando recursos el fin de realizar esta prueba es comparar el comportamiento entre los controles convencionales y uno de lógica difusa en la estación de nivel; cuyos resultados serán analizados en el capítulo 3.

Para diseñar el control en Labview se deben seguir los siguientes pasos:

- Dar clic en el menú *Tools* seguido de *Control Desing and Simulation* seguido de la opción *Fuzzy System Designer* como muestra la Figura 2.86.



**Figura 2.86 Como acceder al Fuzzy Logic Toolkit**

- Se despliega la ventana diseño de un modelo fuzzy (Figura 2.87) en el cual se puede crear las funciones miembro de entrada y salida así como generar las reglas.
- Para este caso en específico las acciones del controlador deben estar enfocadas en el error entre el *punto de consigna (SP)* y la *variable del proceso (PV)* por lo que se crea la función miembro para esta entrada (Figura 2.88) así como el valor atual de la *variable del proceso* cuyas funciones miembro se observan en la Figura 2.89.

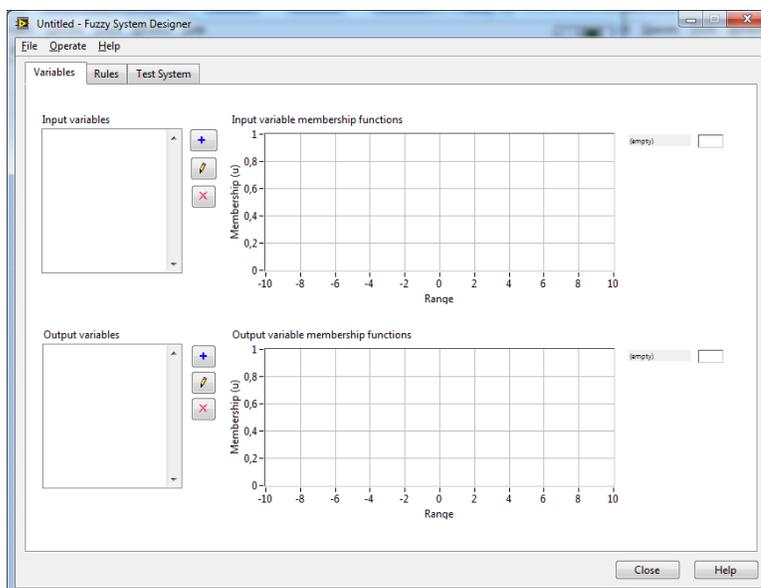


Figura 2.87 Ventana de Diseño de un controlador fuzzy

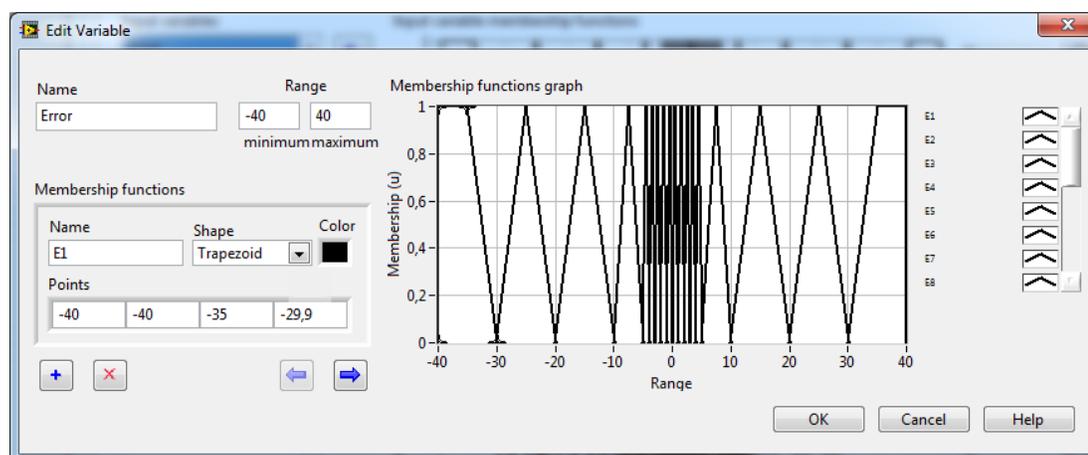


Figura 2.88 Función miembro de entrada "error"

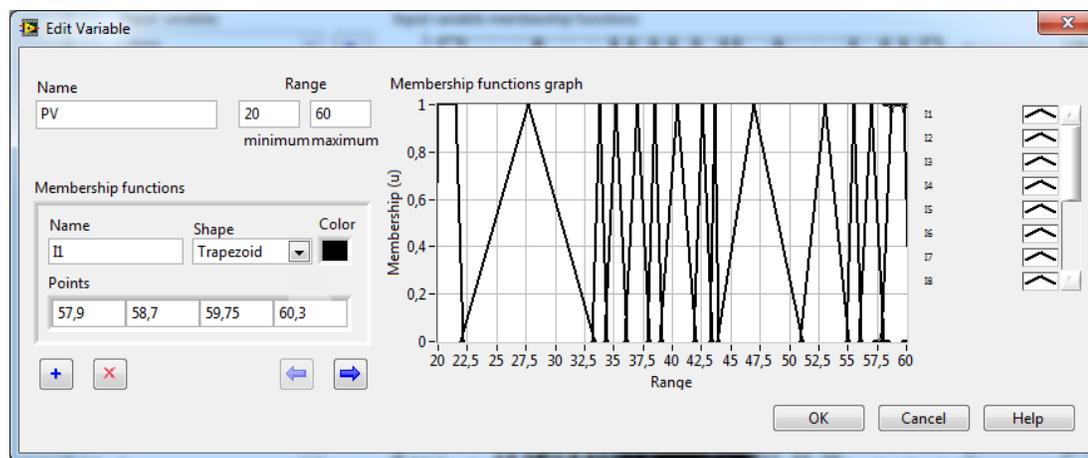


Figura 2.89 Función miembro de entrada "PV"

- Como salida se requiere generar un valor de corriente que debe ser escrito en el posicionador, por ello que se generan las funciones miembro denominadas corriente (Figura 2.90).

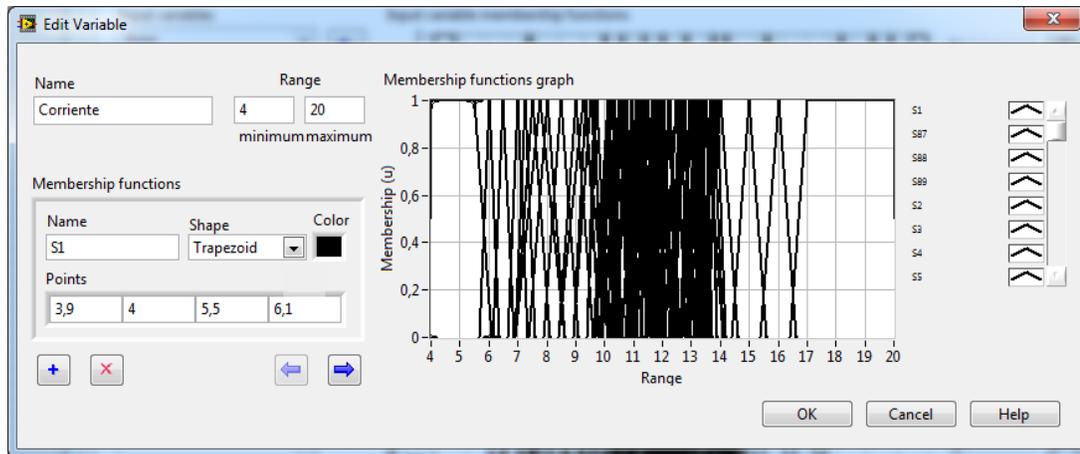


Figura 2.90 Función miembro de salida “corriente”

- Una vez creadas las funciones miembro se establecen las reglas entre las entradas con su respectivo conector lógico y se les asigna una salida como muestra la Figura 2.91.

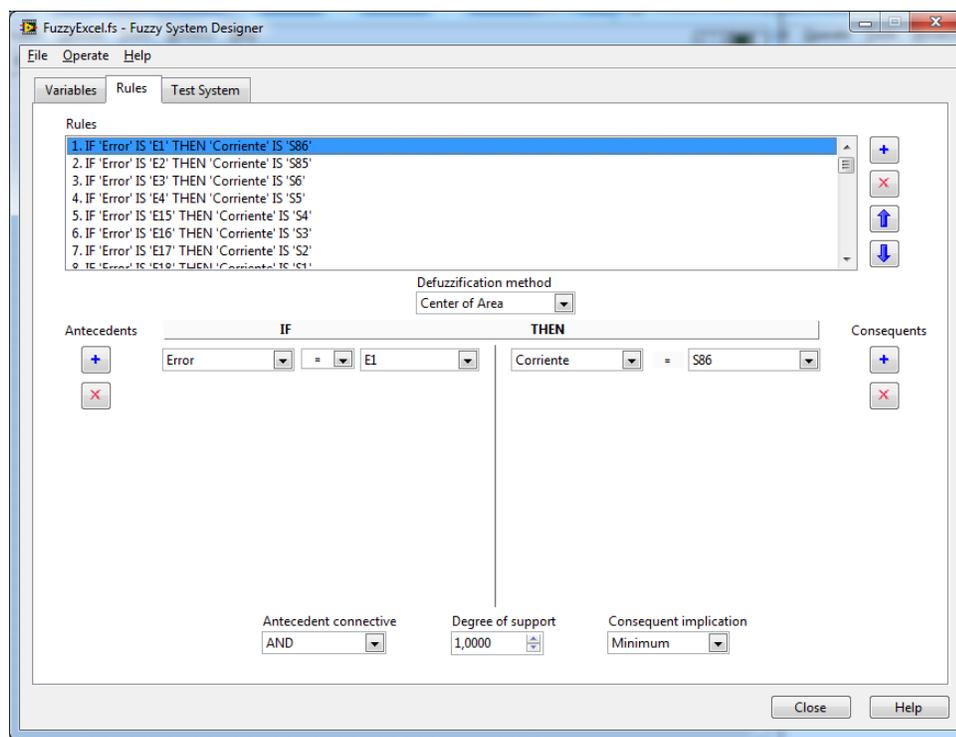
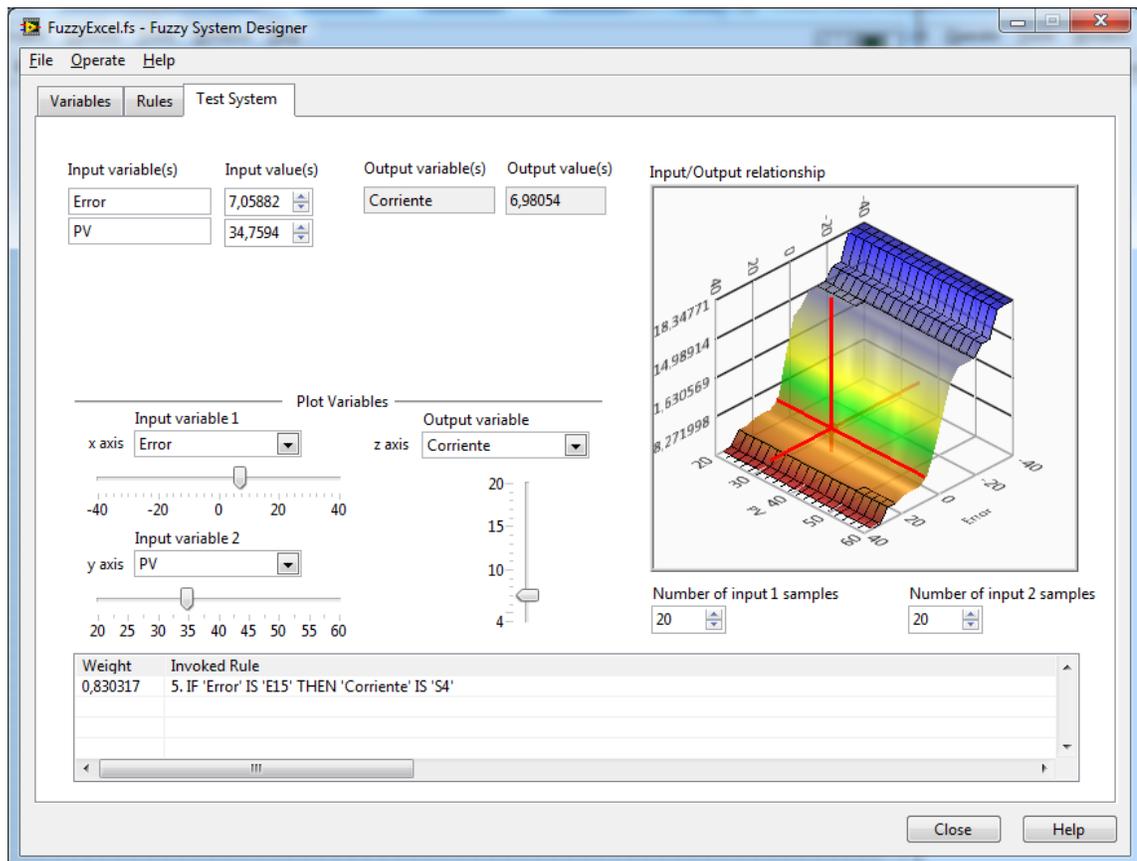


Figura 2.91 Edición de las reglas

- Antes de probar el control fuzzy en la planta se puede hacer uso del simulador (Figura 2.92) para validar que las acciones generadas por las reglas arrojen valores que pueden controlar correctamente la planta a partir del conocimiento empírico del funcionamiento del sistema.



**Figura 2.92 Validación de las reglas**

- Una vez validadas las reglas se procede a cargar el bloque difuso como muestra la Figura 2.93 en la ventana diagrama de bloques de Labview, además se asignan los tags de las variables HART a sus respectivos controles numéricos para generar un vector que contenga la información del comportamiento de dichos parámetros de la válvula.

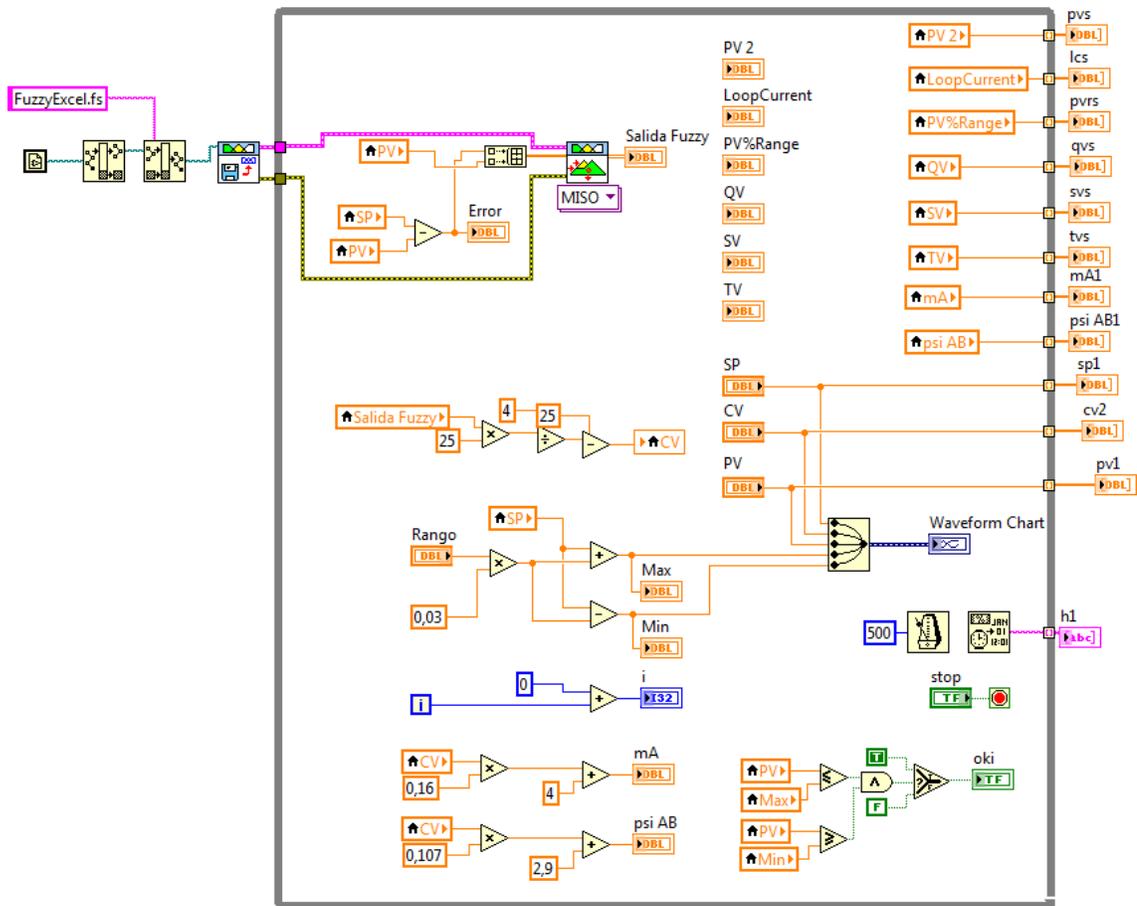


Figura 2.93 Diagrama esquemático para el Control con lógica difusa y monitoreo de la estación de nivel

- También se grafican las variables punto de consigna, variable de control, variable del proceso para monitorear el comportamiento de la estación.

### 3. Ajustar las constantes de sintonía del control PID

- Se crean controles numéricos a los cuales se asigna los tags  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  del algoritmo PID ejecutado por el PLC, además se asignan los tags de las variables HART a sus respectivos controles numéricos para generar un vector que contenga la información del comportamiento de dichos parámetros de la válvula.

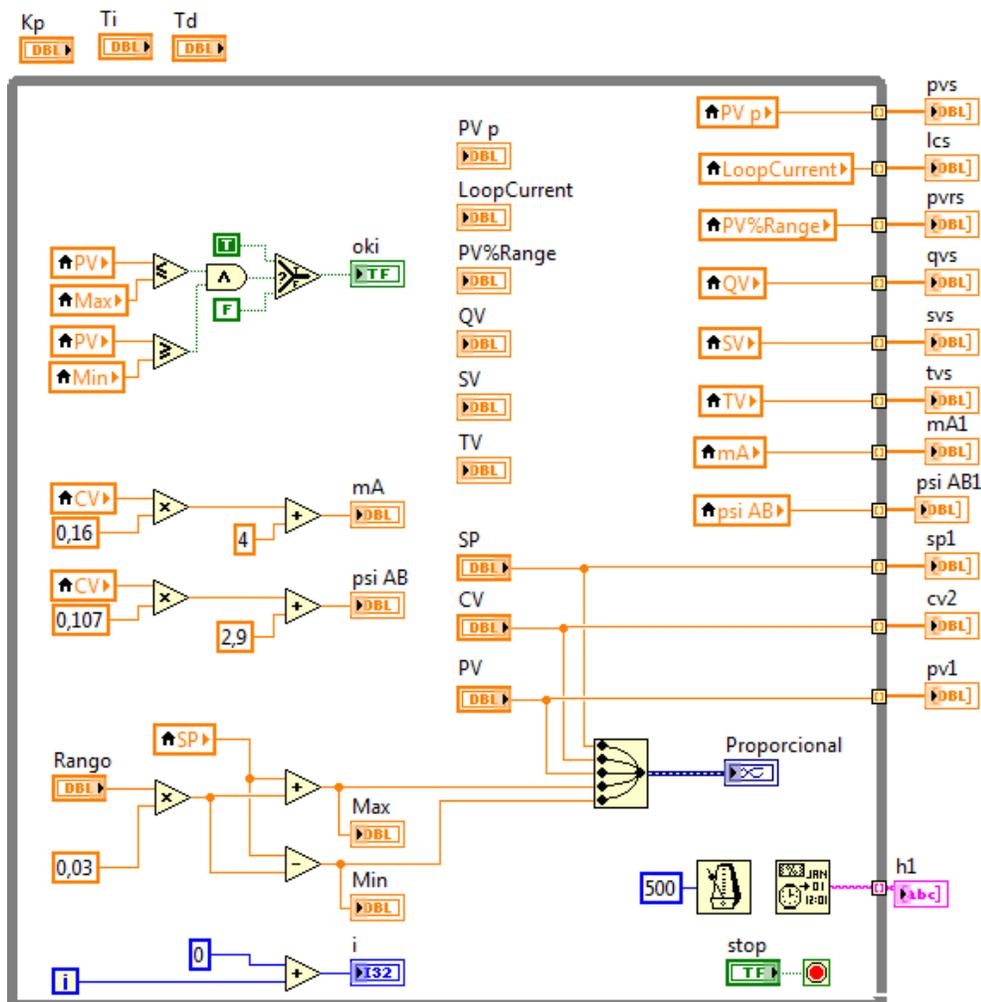


Figura 2.94 Diagrama esquemático para el ajuste de las constantes PID y monitoreo de la estación de nivel

- También se grafican las variables punto de consigna, variable de control, y variable del proceso para monitorear el comportamiento de la estación, y se realizan los cálculos para obtener un aproximado de la corriente y la presión a partir del valor de control value para comparar con los tags HART del dispositivo.

#### 4. Ejecutar algoritmos de Diagnóstico

##### a) Diagnóstico en línea automático

La firma de la válvula es un método de diagnóstico muy utilizado que se basa en el registro gráfico del estado del conjunto válvula-posicionador,

representa la relación de la presión del actuador y el desplazamiento del vástago, para su obtención se requiere que la válvula esté in-situ pero fuera de servicio. Otros registros importantes para el diagnóstico tanto en servicio como fuera de servicio son: las gráficas Presión vs. Tiempo y Desplazamiento vs. Tiempo, en base a estas gráficas se puede analizar el comportamiento de la válvula y detectar fallos en tiempo real incluso cuando se encuentra activa en el lazo de control. Dichos métodos de diagnóstico son efectivos cuando es posible comparar gráficas tomadas en diferentes períodos, de modo que permita tener una idea clara de cómo ha ido evolucionando su comportamiento desde su instalación hasta la actualidad.

El algoritmo de diagnóstico fuera de línea automático está implementado para entregar valores de corriente al posicionador que varían de manera ascendente y luego descendente entre el -5% y el 105% de la señal de control (4 – 20 mA) por medio de vectores cuyos valores fueron previamente asignados como se muestra en la Figura 2.95; de esta manera se asignan puntos de consigna al lazo de control interno del posicionador, el mismo que modifica la presión del actuador de la válvula para desplazar el vástago en relación a la corriente recibida. En la Figura 2.95 también se observa algunas variables y vectores inicializados que serán usadas en el algoritmo más adelante.

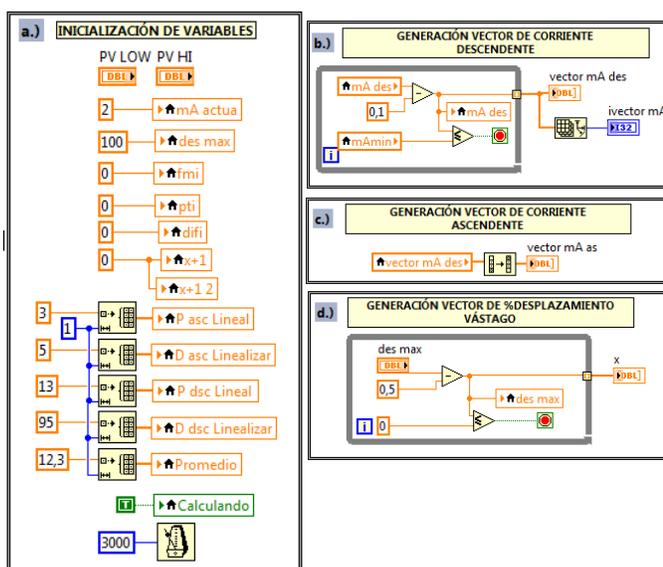
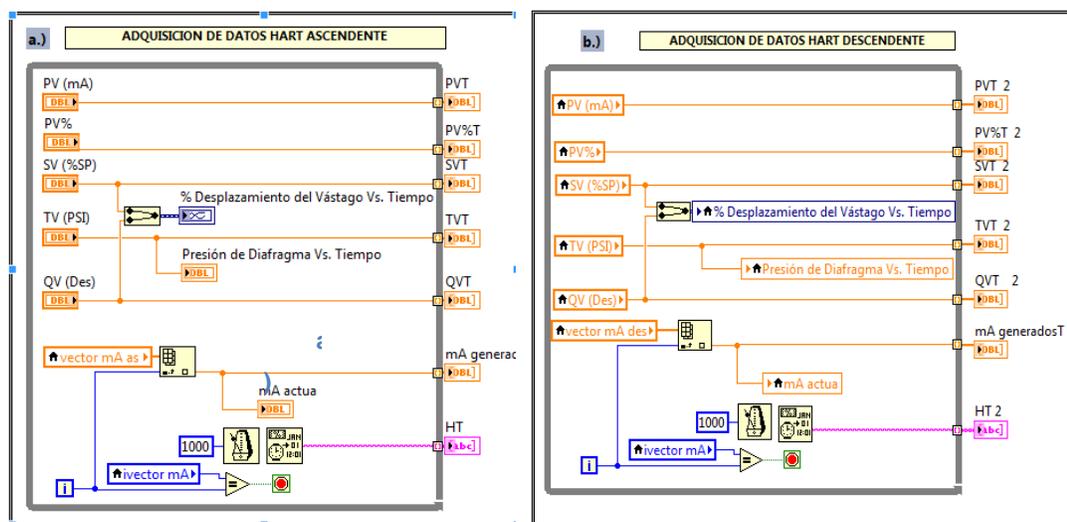


Figura 2.95 Inicialización de vectores y variables

Los valores del desplazamiento del vástago, presión del actuador, punto de consigna y corriente de lazo son adquiridos mediante protocolo HART (Variables HART) como respuesta a los valores de corriente establecidos en el posicionador, y se asignaron a vectores dentro del programa como se observa en la Figura 2.96. Además se crean gráficas de todas las variables HART en tiempo real y diagramas de barras para una mejor visualización de la información.



**Figura 2.96 Adquisición de datos HART a) Datos Ascendentes b) Datos Ascendentes**

Los vectores de desplazamiento del vástago y presión del actuador se usan para la gráfica firma de la válvula, en el eje “y” se representa la presión, mientras que el desplazamiento se representa a lo largo del eje “x”, por lo que cualquier aumento o disminución en la fuerza se muestran como un cambio vertical en el gráfico.

El cálculo de los parámetros de fricción y presión de transición se obtienen a partir de la Firma de la Válvula, se hallan las ecuaciones de las curvas ascendente, descendente y promedio, que son graficadas como se indica en la Figura 2.97.

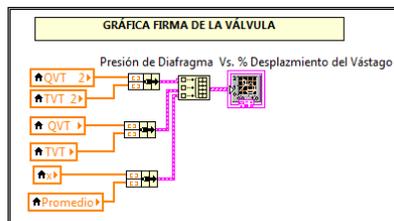


Figura 2.97 Generación de la Gráfica Firma de la válvula

Este vector de valores promedio permite establecer una recta que representa el comportamiento ideal de la válvula, el valor de la fricción se obtiene de la diferencia de presión en la carrera ascendente y la descendente multiplicada por el área efectiva del diafragma y dividida para dos [17] como se muestra en la Ec. ( 2.6).

$$F = \frac{\Delta P \times A}{2} \quad \text{Ec. ( 2.7)}$$

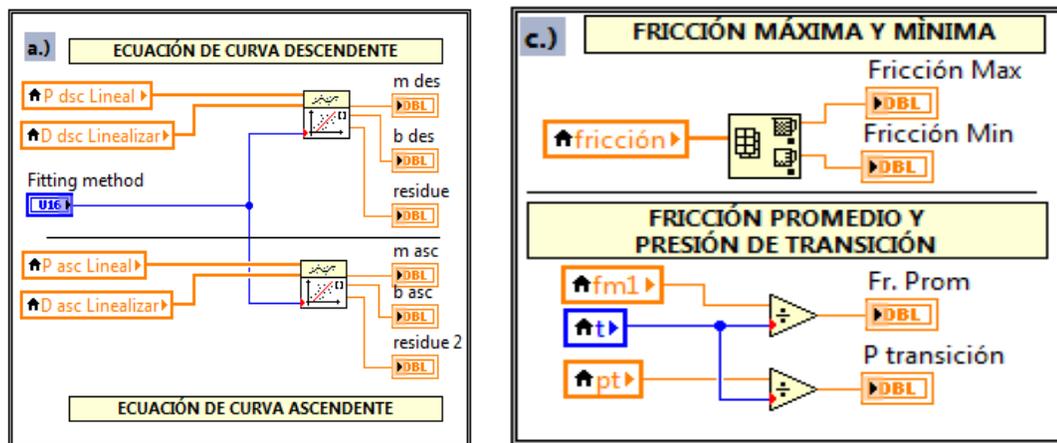


Figura 2.98 Cálculo de parámetros de diagnóstico a) Ecuaciones de las curvas ascendente y descendente. b) Promedio de presiones de entrada y fuerzas de fricción c) Fricción máxima, mínima y promedio.

### b) Diagnóstico fuera de línea manual

El algoritmo de diagnóstico fuera de línea manual consiste en dar al usuario la opción de generar escalones de porcentaje de desplazamiento del vástago de la válvula, que puedan ser de diferente duración y amplitud; para lo cual se escala un valor ingresado en el rango de 0-100 a un valor equivalente de corriente, y se grafican las variables HART respectivamente como muestra la Figura 2.99.

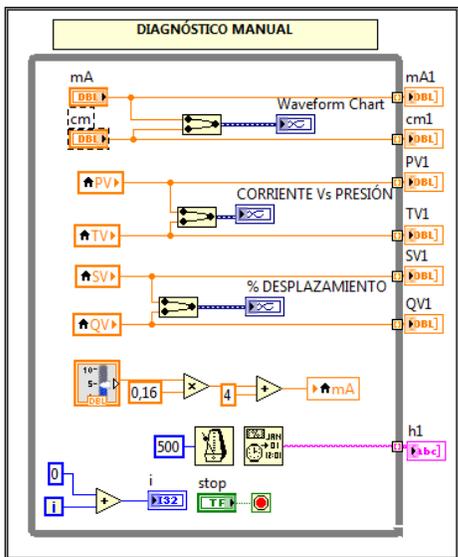


Figura 2.99 Diagnóstico Fuera Línea Manual

**c) Diagnóstico en línea**

Para el diagnóstico en línea, el algoritmo permite al usuario obtener las gráficas en tiempo real de la variable desplazamiento del vástago, presión del actuador, punto de consigna del desplazamiento del vástago y corriente del lazo, contrastándolas con la señal de control del proceso que se envía al posicionador, para esto se grafican las variables HART y la variable de control como se muestra la Figura 2.100

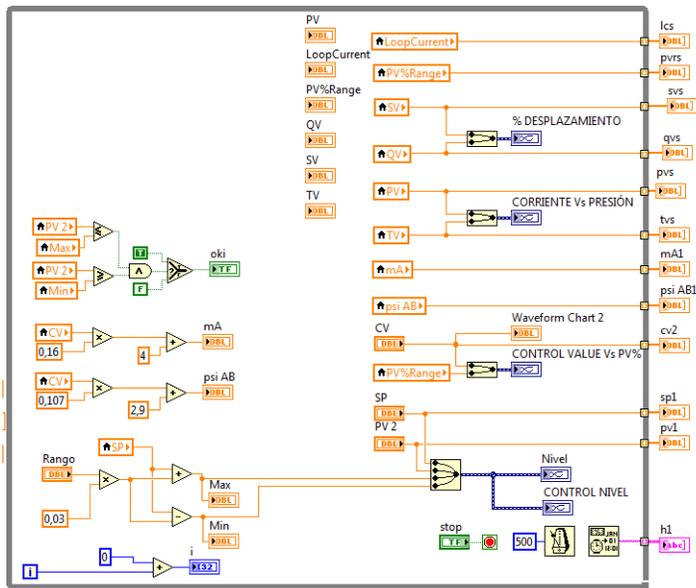


Figura 2.100 Algoritmo del Diagnóstico en Línea

## 5. Registrar datos

En los apartados anteriores se manejan grandes cantidades de datos guardados en vectores, los mismos que son cargados a una hoja de Excel utilizando los SubVI propios de Labview como muestra la Figura 2.101 para su posterior análisis en el capítulo 3.

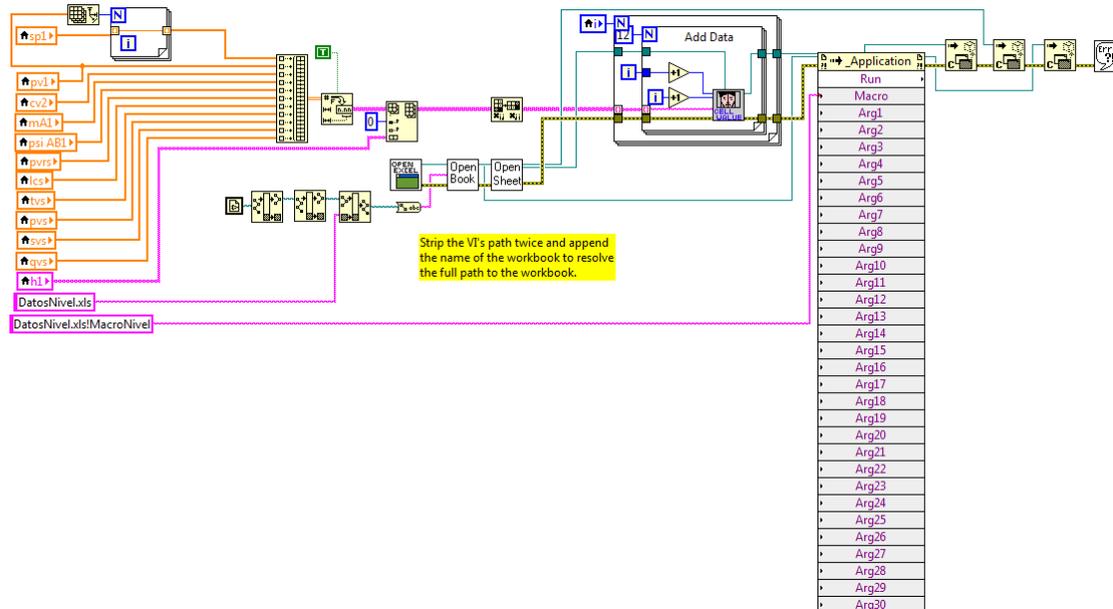


Figura 2.101 diagrama esquemático para registrar datos en Excel

## 2.6 Red HART

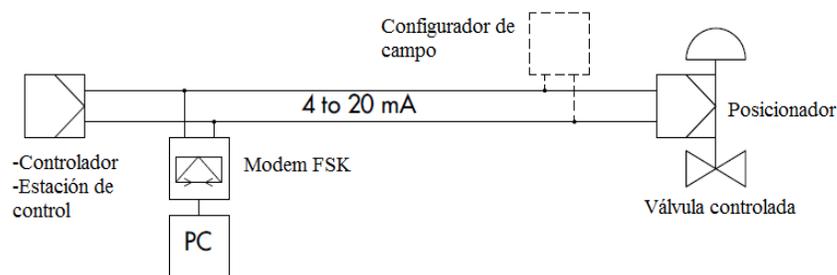
El controlador digital de válvula DVC6200, es un instrumento inteligente de campo con capacidad de comunicarse mediante protocolos tales como Fieldbus y HART, de nuestro interés es aprovechar el protocolo HART. El capítulo 1 indica que este protocolo permite establecer una comunicación digital sobre el mismo bucle de dos hilos que proporciona la señal de control del proceso de (4-20 mA), sin interrumpir la señal de proceso. De esta manera, se puede utilizar para el control y al mismo tiempo, para diagnóstico digital, mantenimiento, y de proceso adicional de datos como por ejemplo la posición de la válvula.

En esta sección se describe como establecer una red punto-punto entre el posicionar y la PC utilizando un modem HART como interfaz, en base a lo descrito en el capítulo I (Figura 1.4); el computador permitirá monitorear y registrar los valores de las variables del posicionar a lo largo de su funcionamiento para su posterior análisis en el capítulo 3. Mientras que el configurador de campo permitirá configurar y calibrar el instrumento de campo sin necesidad de retirarlo de su lugar de funcionamiento.

### 2.6.1 Conexión punto a punto

La Figura 2.102 muestra la conexión para una comunicación HART entre un dispositivo de campo HART (posicionador) y un maestro primario HART (PC) además indica los terminales donde se debe conectar un maestro secundario HART (comunicador de campo).

Para que esta comunicación sea exitosa se requiere que la dirección del dispositivo de campo sea cero ya que el programa operativo utiliza esta dirección para establecer la comunicación sobre el lazo 4-20 mA, por ello debe verificar la posición del DIP switch del posicionar (Tabla 2.12) con el siguiente procedimiento:



**Figura 2.102 Conexión punto-punto HART**

**Fuente: [18]**

1. Desatornillar los cuatro tornillos la *tapa* (clave 43) y removerla.
2. Con una llave hexagonal de 6 mm, aflojar los tres tornillos de cabeza hueca (clave 38) de los sockets. Estos tornillos se encuentran alojados en el módulo base (clave2) por anillos de retención.

3. Halar suavemente del módulo base hacia fuera de la carcasa (clave 1), teniendo cuidado de no dañar los dos conjuntos de cables (Figura 2.103) que conectan el módulo base (clave 2), a través del conjunto del tablero de circuito impreso (clave 50), sensor de carrera y el terminal de la base.

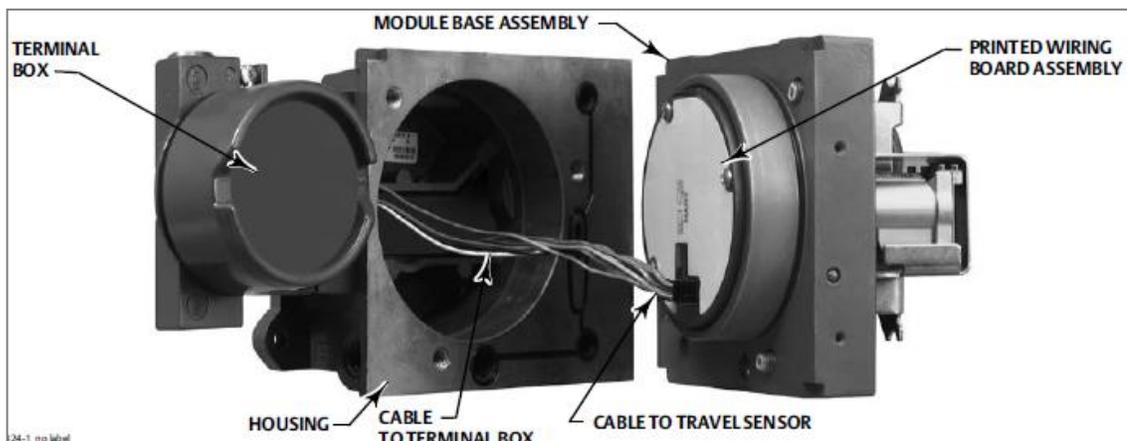


Figura 2.103 Cableado de conexión del tablero de circuito impreso

Fuente: [15]

4. El paso 3, le permitirá tener acceso al tablero de cableado impreso PWB (clave 50) (Figura 2.104), se pueden ver los sockets donde se conectan los conjuntos de cables ya mencionados y un DIP switch.

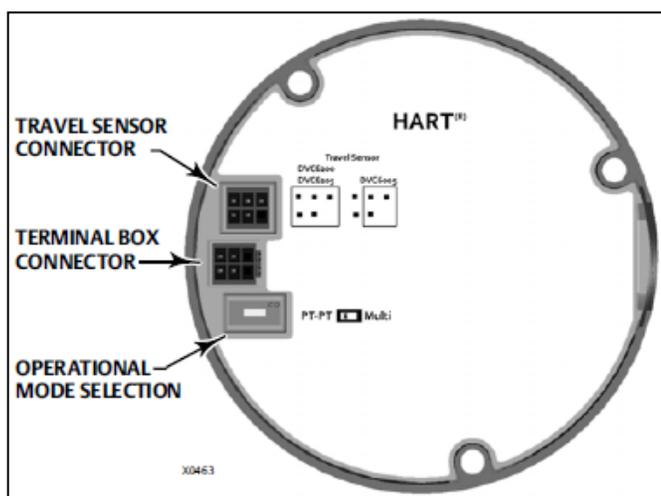


Figura 2.104 Conexiones y ajustes del tablero de cableado impreso PWB

Fuente:[15]

5. Fije al DIP switch en modo punto-punto, ver (Tabla 2.12)

Tabla 2.12

Configuración DIP switch para ajustar el modo de operación del posicionador

Etiqueta del Switch	Modo de operación	Posición del DIP switch
PT-PT	Lazo punto a punto 20 mA	Izquierda
Multi	Lazo multipunto 24Vcd	Derecha

Fuente:[16]

## 2.6.2 Servidor HART

Para configurar el HART Server deben seguirse los siguientes pasos:

1. Dar clic en el ícono HART Server (Figura 2.105) para abrir el programa.



Figura 2.105 Ícono HART Server

En la ventana principal (Figura 2.106) seleccionar la raíz del nodo HART server.

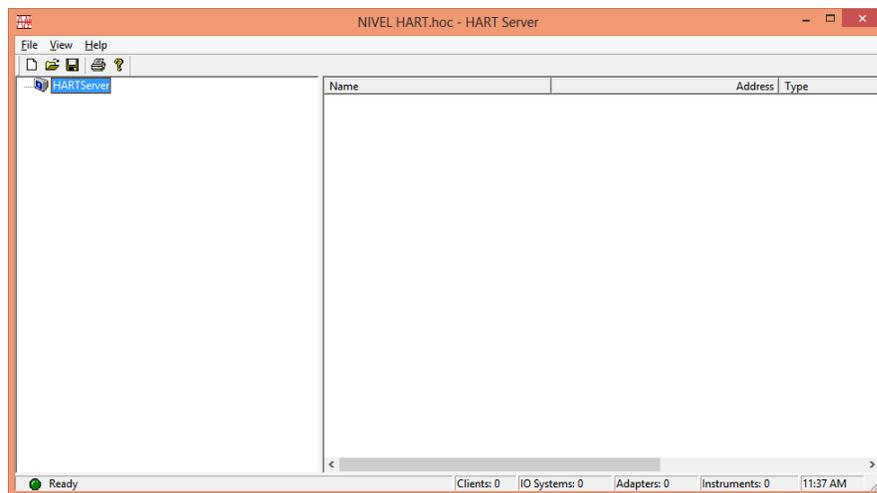
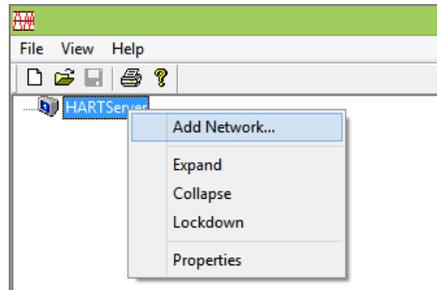


Figura 2.106 Ventana principal HART Server

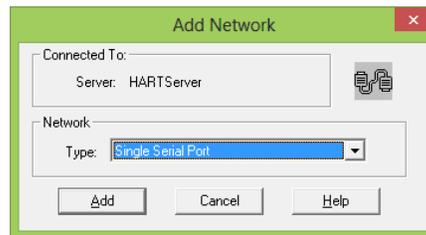
Dar derecho y escoger *Add Network* como muestra la Figura 2.107.



**Figura 2.107 Crear un Network en HART Server**

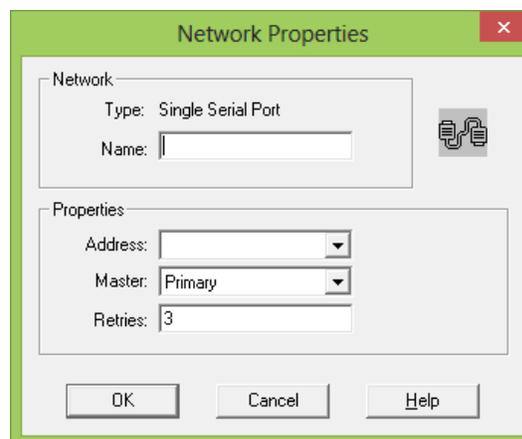
Escoger uno de los tipos de redes del menú (Figura 2.108) identificado como Type

- Serial Port RS-485
- Soporta comunicación RS-485 con multiplexores HART
- Single Serial Port
- Conexión simple RS-232 a un modem HART que soporta operación multipunto



**Figura 2.108 Menú tipos de redes**

Dar clic en *Add* para agregar la red e ir a las propiedades de la misma (Figura 2.109).



**Figura 2.109 Ventana de propiedades de la red HART**

Ingresar el nombre de la red y seleccionar el puerto COM (Figura 2.110) en el cual el administrador de dispositivos haya reconocido al modem una vez que lo conecto al puerto USB del computador.

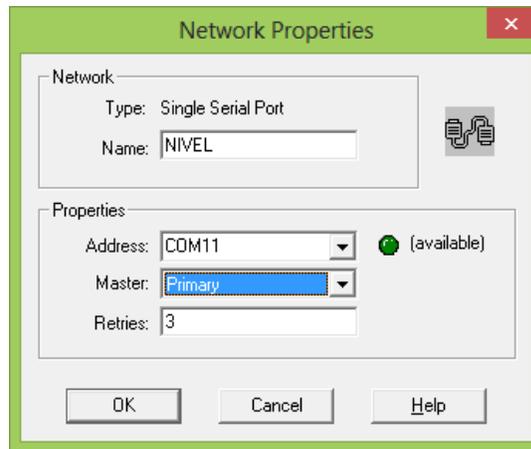


Figura 2.110 Ventana de propiedades de la red HART, seleccionar COM

**Nota:** En caso que la conexión no sea válida verifique en el administrador de dispositivos (Figura 2.111) que el driver del modem esté actualizado, de ser necesario actuarlo.

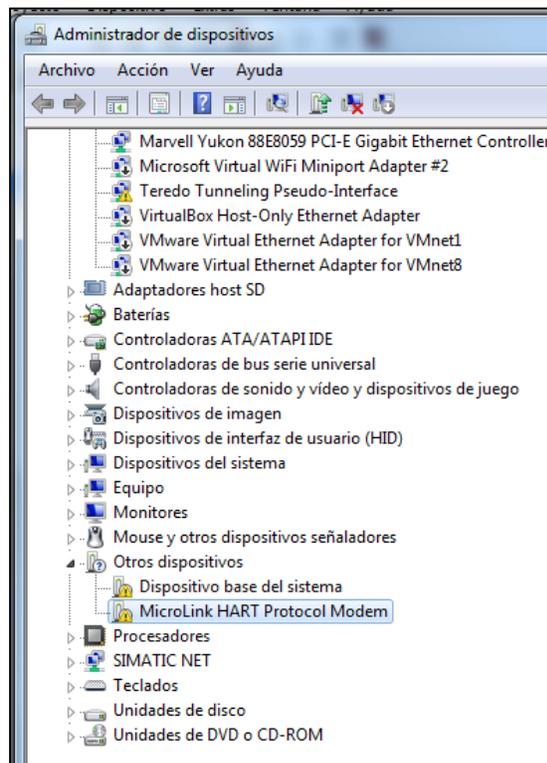
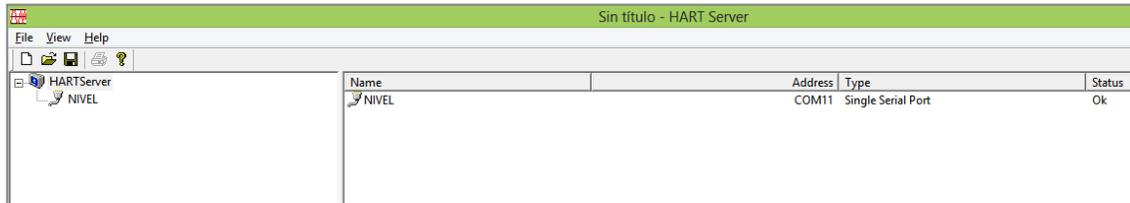


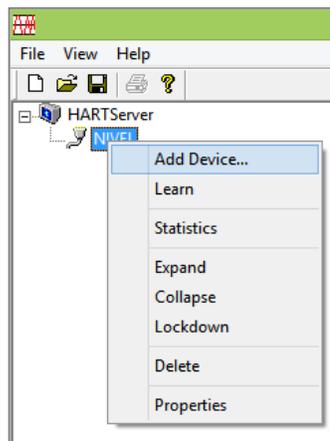
Figura 2.111 Administrador de dispositivos

Presionar *OK*, la red creada se agregará al HART server como muestra la Figura 2.112.



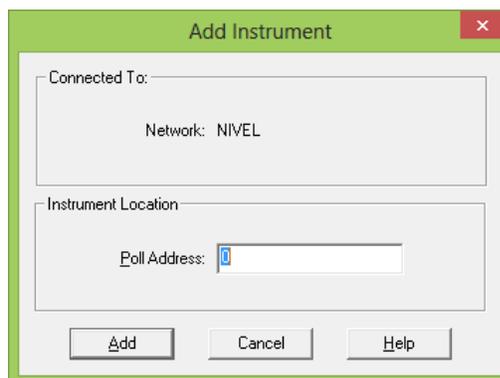
**Figura 2.112 Red HART denominada Nivel**

Agregar un nuevo dispositivo, dando clic derecho en el nuevo nodo denominado nivel y seleccionado la opción *Add Device* del cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 2.113.



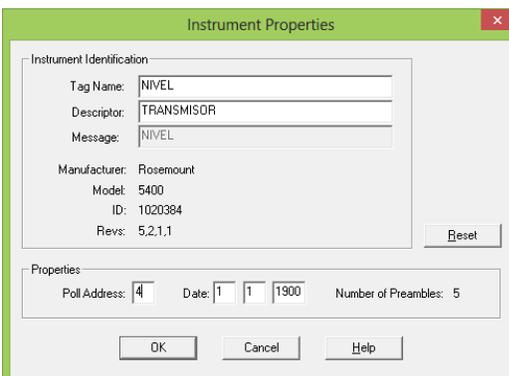
**Figura 2.113 Menú nodo nivel**

Ingresar la dirección *Poll* del instrumento HART (0 por ser una red punto-punto) en la ventana de instrumento (Figura 2.114).



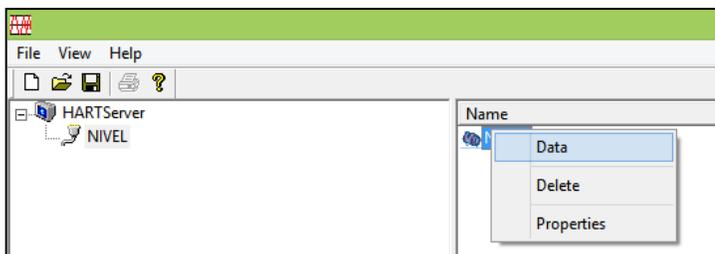
**Figura 2.114 Ventana instrumento**

Se mostrará un cuadro de diálogo (Figura 2.115) con las propiedades del instrumento agregado



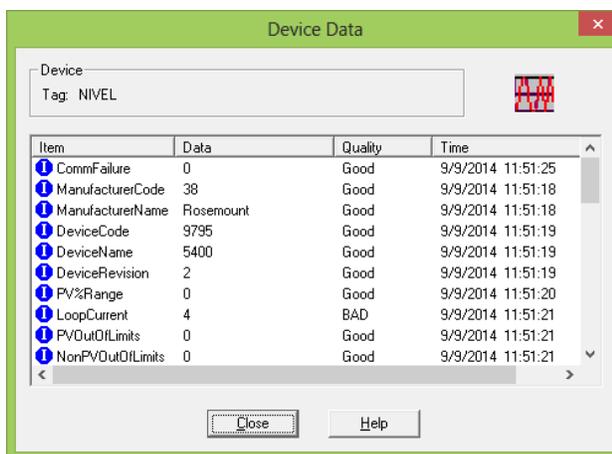
**Figura 2.115 Ventana propiedades del instrumento.**

Para observar los datos del instrumento agregado dar clic derecho en el instrumento y escoger *Data* del menú de la Figura 2.116.



**Figura 2.116 Menú instrumento**

Se mostrarán los datos del dispositivo agregado en la ventana de la Figura 2.117.



**Figura 2.117 Datos instrumento**

### 2.6.3 Pactware

1. Dar clic en el ícono que se muestra en Figura 2.118 para abrir el software PACTWARE 4.0.

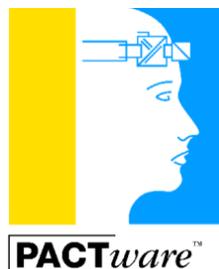


Figura 2.118 Ícono Pactware

Desplegar el catálogo de dispositivos (Figura 2.119) pulsando la tecla F3.

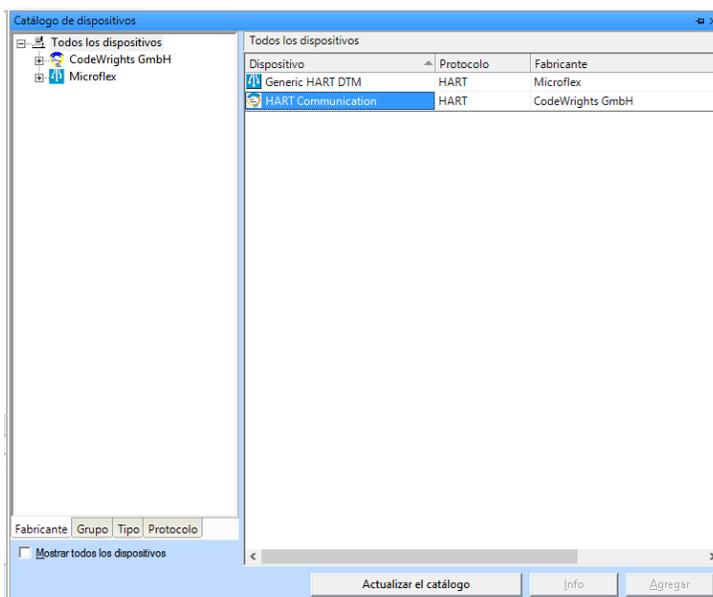


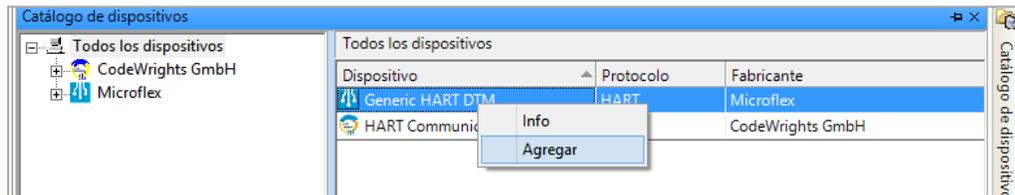
Figura 2.119 Catálogo de dispositivos

Dar clic derecho en *HART Communication* (Figura 2.120) para agregar un canal.



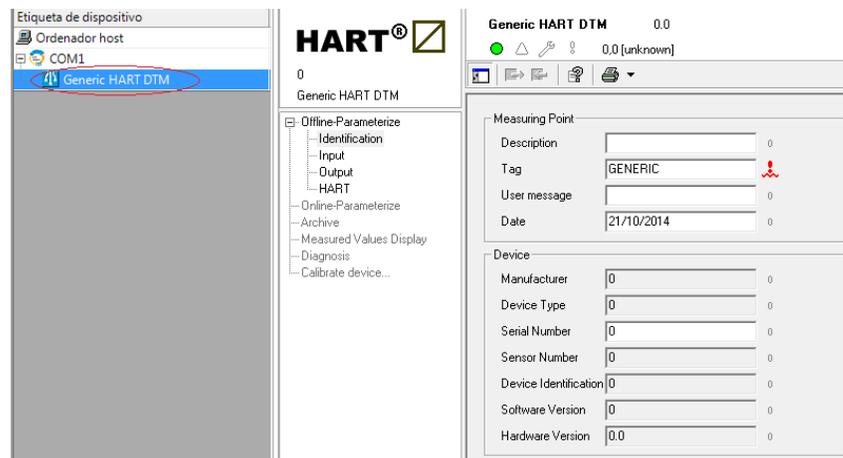
Figura 2.120 Menú HART Communication

De la misma forma, dar clic derecho en Generic HART DTM (Figura 2.121) para agregar un dispositivo.

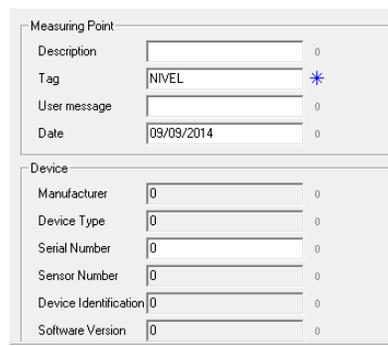


**Figura 2.121 Menú Generic HART DTM**

En el costado izquierdo dar clic en *Generic HART DTM* (Figura 2.122) para modificar el nombre del tag (Figura 2.123) entre otros parámetros.



**Figura 2.122 Ventana Generic HART DTM**



**Figura 2.123 Modificación de parámetro TAG**

En el costado izquierdo dar clic en *COM* (Figura 2.124) para desplegar un menú.

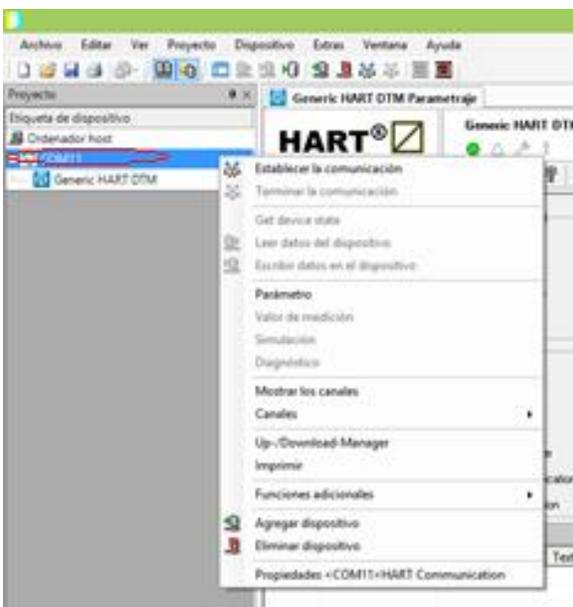


Figura 2.124 Menú COM

Seleccionar la opción *Funciones adicionales/Change ATM Address* (Figura 2.125).

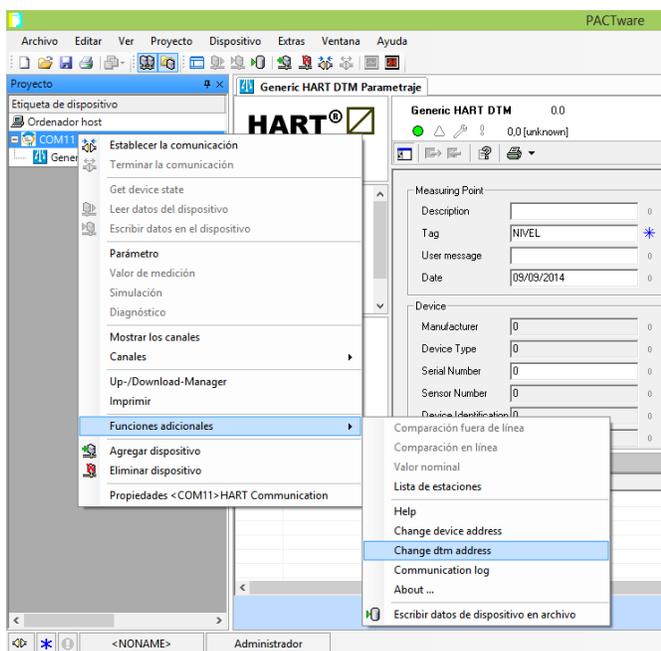
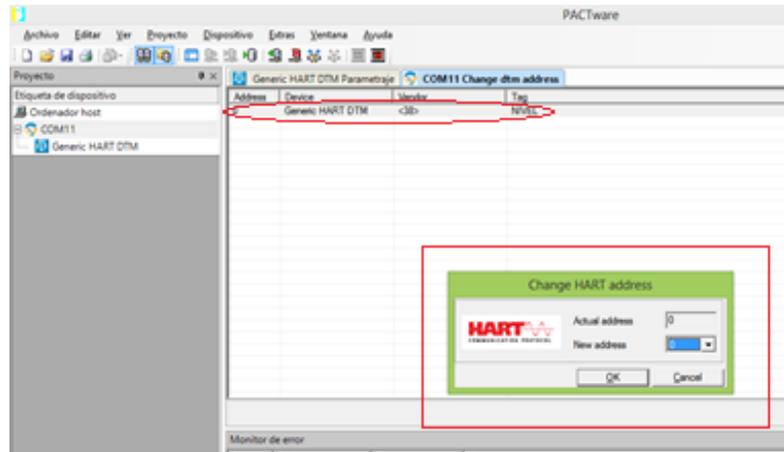


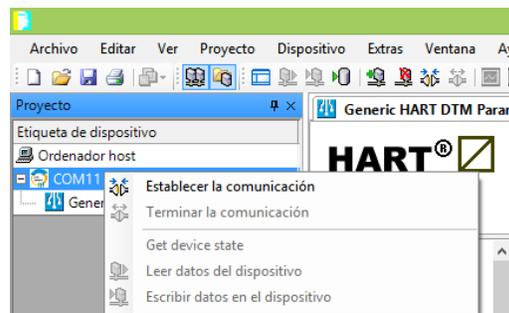
Figura 2.125 Opción Change DTM address

Dar clic derecho en el dispositivo para poder cambiar la dirección del mismo por medio de la ventana Change HART Address (Figura 2.126).



**Figura 2.126 Ventana Change HART address**

Una vez cambiada la dirección se establece la comunicación de la computadora con el dispositivo HART, dar clic derecho en COM (Figura 2.127) y seleccionar Establecer comunicación



**Figura 2.127 Establecer comunicación con el canal**

Una vez establecida exitosamente la comunicación el software permite visualizar el estado de los diferentes parámetros cuando el dispositivo se encuentra fuera de línea:

- La Figura 2.128 muestra la ventana donde se pueden editar los parámetros de identificación del dispositivo HART como son la descripción, el Tag, y otros que no se pueden editar como el Manufacturer, la versión de software, etc.

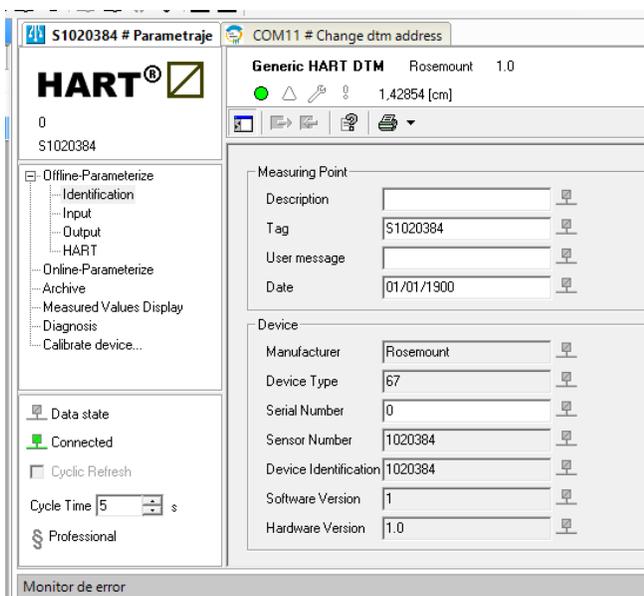


Figura 2.128 Parámetros de identificación del dispositivo

- También se pueden modificar los límites y rangos de la señal de entrada del sensor con el dispositivo HART está asociado como muestra la Figura 2.129.

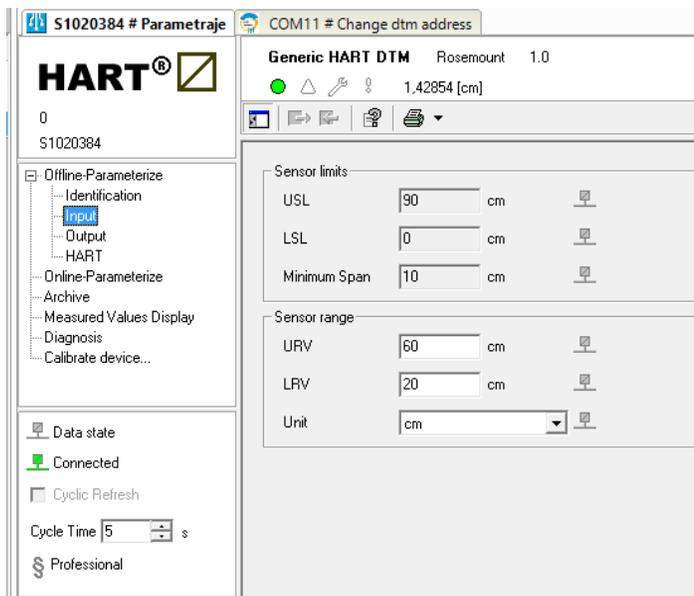
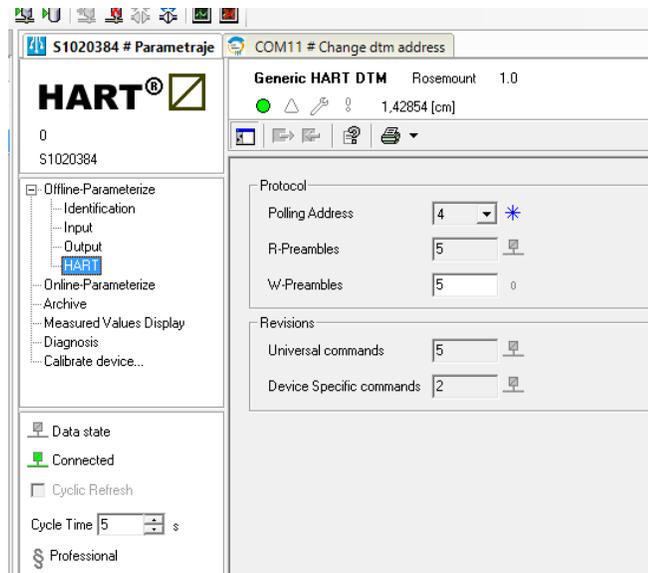


Figura 2.129 Parámetros de señales de entrada del dispositivo

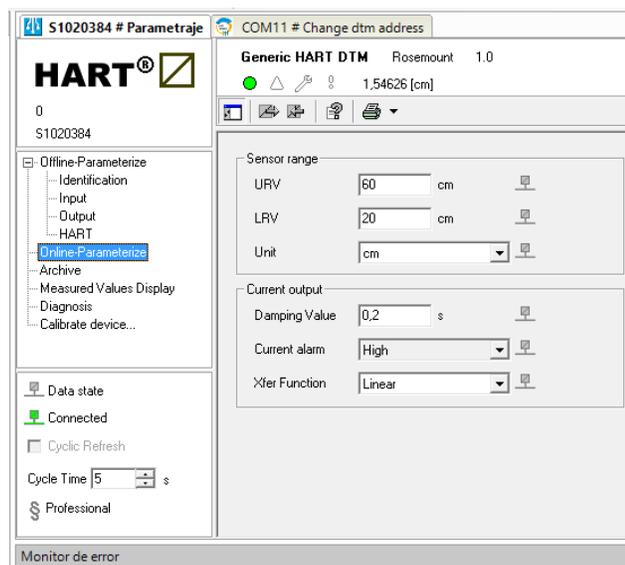
- Los parámetros HART del dispositivo se pueden cambiar en la ventana mostrada en la Figura 2.130, por ejemplo la dirección.



**Figura 2.130 Parámetros HART del dispositivo**

Dentro de los parámetros en línea es posible acceder a las siguientes opciones:

- Cambiar el rango de medición con las unidades de ingeniería que se usan en el proceso como muestra la Figura 2.131, en este caso los límites del sensor de nivel se establecen entre 20 cm a 60cm.



**Figura 2.131 Parámetros de rangos de medición**

Se puede observar la dinámica de las variables HART del dispositivo en la opción Measured Values Display (Figura 2.132).

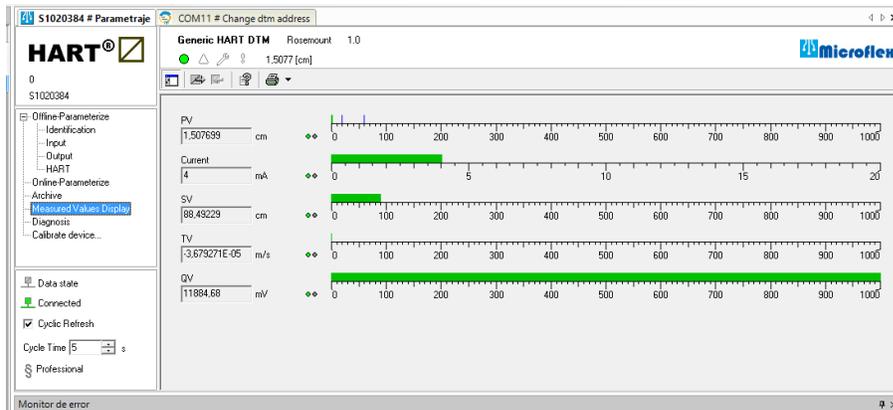


Figura 2.132 Parámetros valores medidos del dispositivo

Además se puede generar un registro de las variables HART respecto al tiempo con los siguientes pasos:

- Generar un archivo CSV (separado por comas) en Excel , como muestra la (Figura 2.133)

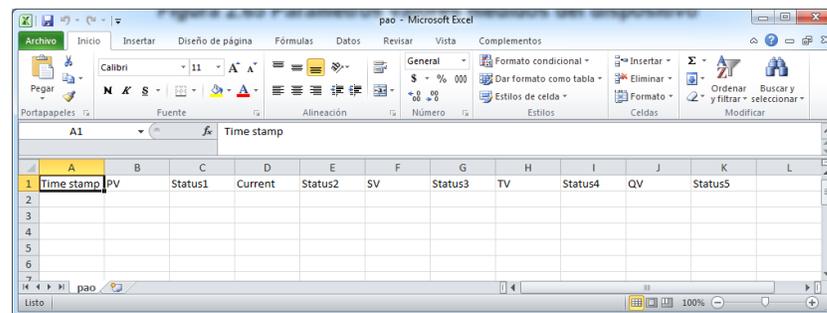


Figura 2.133 Archivo CSV (separado por comas)

- Seleccionar la opción Archive como muestra la Figura 2.134

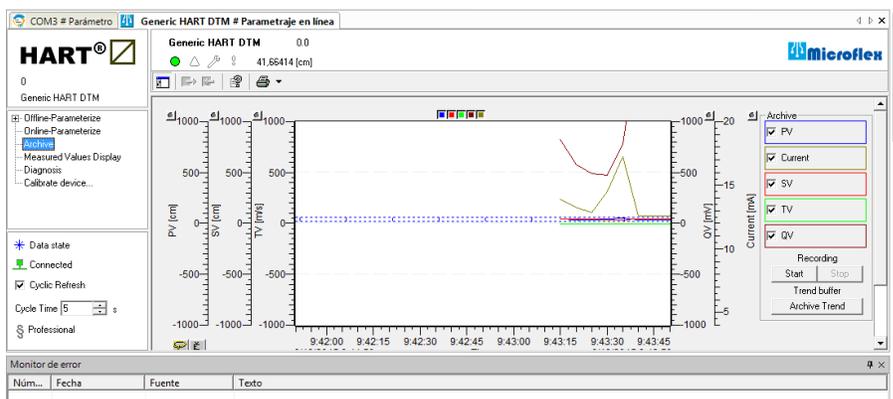
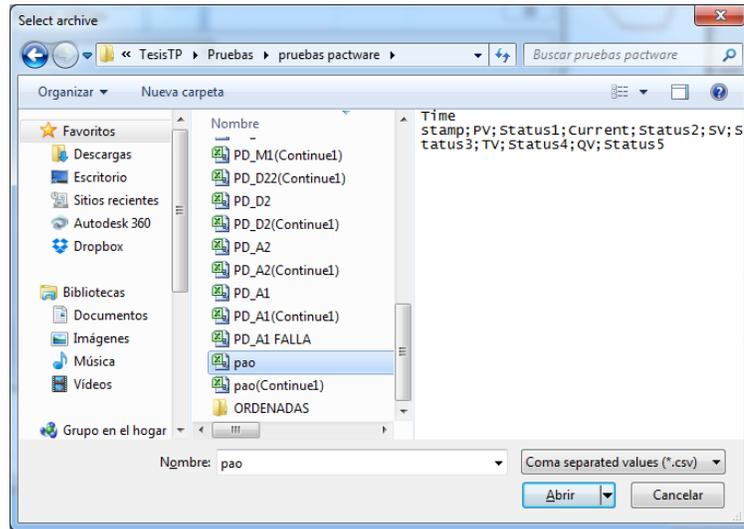


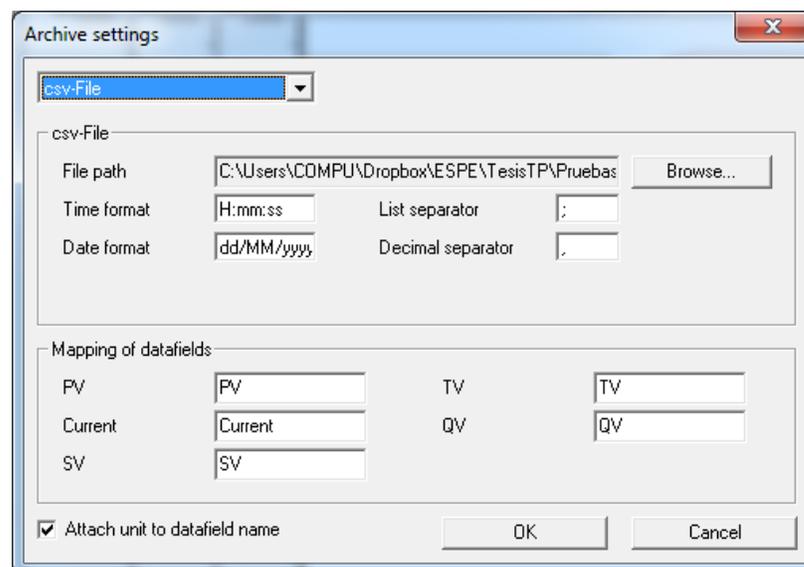
Figura 2.134 Opción Archive

- Dar clic en el botón *Archive Trend* de la esquina inferior derecha de la (Figura 2.134).
- Aparecerá la ventana *Archive Settings* (Figura 2.136), direccionar el archivo CSV creado anteriormente dando clic en el botón *Browse* y seleccionando el archivo en el buscador como muestra la Figura 2.135.



**Figura 2.135 Buscador de archivos**

- En la ventana *Archive Settings* (Figura 2.136), una vez que haya direccionado el archivo CSV, elegir como List separator un punto y coma, mientras que en Decimal separator una coma



**Figura 2.136 Ventana Archive settings**

- Dar clic sobre el botón Start para iniciar la grabación.



**Figura 2.137 Botones Recording Iniciar grabación**

- Para detener la grabación dar clic sobre el botón Stop.



**Figura 2.138 Botones Recording. Detener grabación**

## CAPÍTULO III

### 3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Este capítulo contiene las pruebas realizadas en el módulo didáctico ND-0407 del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, cuyo fin es controlar el nivel de agua en una columna, mismo que varía acorde a la variación de flujo producida por la válvula de control Baumann 24000 Little Scotty de Bronze.

En una primera etapa se evaluaron los controles convencionales P, PD, PI y PID de la viable nivel, resultados que son un referente del funcionamiento previo a la implementación del posicionador electroneumático inteligente, para lo que fue necesario retirar la válvula del sistema, circunstancia que fue propicia para verificar visualmente el desplazamiento del vástago de la válvula respecto a la presión suministrada por el calibrador Fluke 718 en contraste con la suministrada por el conversor de corriente a presión, elemento propio del sistema en estudio.

Una vez montado el posicionador, se configuró y calibró el conjunto válvula posicionador con el configurador de campo 475, a continuación se evaluaron nuevamente los controles convencionales P, PD, PI y PID, además se tomaron datos en lazo abierto de la planta para determinar la función de transferencia de la misma, mediante la herramienta Ident de Matlab.

También se integró el dispositivo de campo a una red HART para el diagnóstico tanto en línea como fuera de línea; cuya interpretación e importancia se describen a continuación así como el análisis de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas ya mencionadas.

### 3.1 Pruebas previas al control

Antes de evaluar el control de la variable nivel, con convertor de corriente a presión o con posicionador como parte del actuador se realizaron pruebas de la respuesta de la válvula con los elementos mencionados para hallar las óptimas condiciones para cada caso.

#### 3.1.1 Conjunto convertor de corriente a presión – válvula

##### 1. Desplazamiento del vástago respecto a la presión del actuador

El objetivo de esta prueba es aplicar una señal de presión, de forma ascendente y descendente, y ver como incide en el desplazamiento del vástago. Para lo cual se utilizó el Calibrador de presión Fluke 718Ex (Figura 3.1), que tiene la capacidad de generar un suministro de presión gracias a su bomba interna.



Figura 3.1 Calibrador de presión Fluke 718Ex

Fuente:[19]}

Con el calibrador se suministró a la válvula una señal de presión entre 2 y 13 PSI primero de forma ascendente y luego de forma descendente con incrementos de 1 PSI, obteniendo los porcentajes de desplazamiento descritos en la (Tabla 3.1) respectivamente.

Tabla 3.1

Prueba: presión Vs desplazamiento vástago

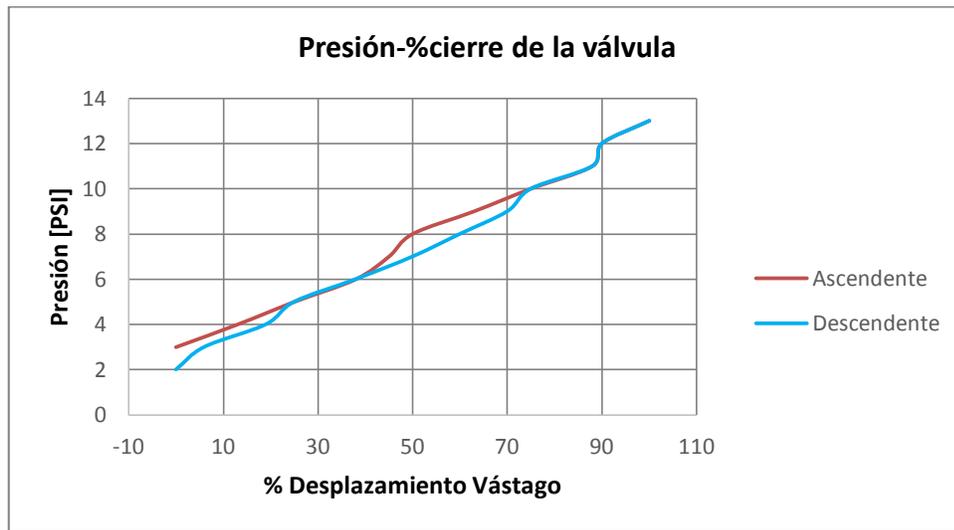
Ascendente		Descendente	
PSI	% Cierre	PSI	% Cierre
2	0,00	2	0,00
3	0,00	3	6,00
4	13,00	4	19,00
5	25,00	5	25,00
6	38,00	6	38,00
7	45,00	7	50,00
8	50,00	8	60,00
9	63,00	9	70,00
10	75,00	10	75,00
11	88,00	11	88,00
12	90,00	12	90,00
13	100,00	13	100,00

Idealmente la válvula con 3 PSI debe estar completamente abierta y con 13 PSI totalmente cerrada, además el valor de porcentaje de cierre de la válvula ante cierto valor de presión debe ser independiente del estado anterior, es decir que en 8 PSI se debe registrar un valor de 50% de desplazamiento (Figura 3.2) ya sea que este valor se tome en una medición ascendente o descendente. Pero de forma real estos valores difieren, por diversos factores que se explicaran en el apartado 3.4 denominado Diagnóstico.



Figura 3.2 Desplazamiento de un 50% del vástago

La Figura 3.3 permite entender de forma gráfica los resultados de la prueba descrita anteriormente.



**Figura 3.3 Prueba: Presión-%cierre de la válvula**

## 2. Corriente Vs Desplazamiento del vástago

En la prueba anterior se comprobó que el desplazamiento del vástago de la válvula es proporcional a la presión, para poder integrar las acciones de la válvula con el controlador previo a la implementación del posicionador se utilizaba un convertor de corriente a presión como muestra la Figura 3.4.



**Figura 3.4 Convertor de corriente a presión**

El convertor de corriente a presión fue ajustado de forma que al recibir una señal de 4-20 mA la convierte en una de 3-13 PSI (por características de funcionamiento de la válvula). Por ello se midió la presión de salida al variar la corriente de forma ascendente y luego de forma descendente con incrementos

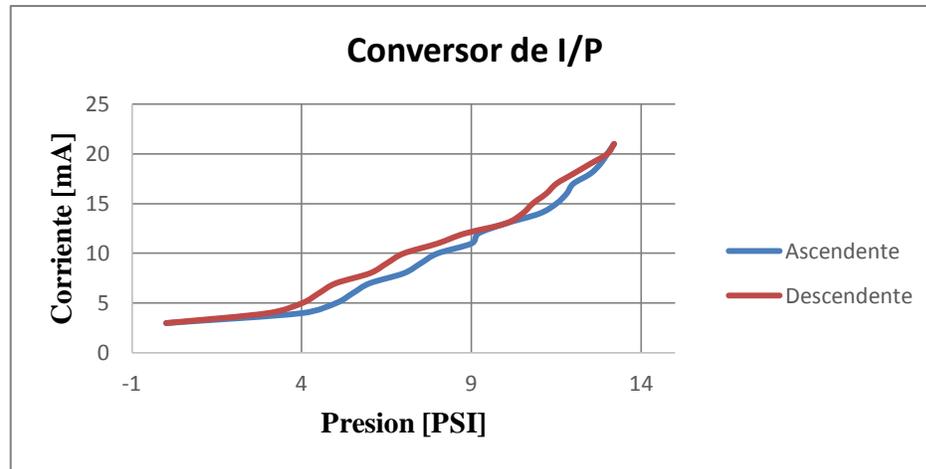
de 1mA en un rango de 4-20mA, obteniendo los valores de presión de la Tabla 3.2 respectivamente.

**Tabla 3.2**

**Prueba conversor I/P variando la corriente de entrada**

	<b>Ascendente</b>	<b>Descendente</b>
<b>mA</b>	<b>PSI</b>	<b>PSI</b>
3	0	0
4	4	3
5	5	4
6	5,5	4,5
7	6	5
8	7	6
9	7,5	6,5
10	8	7
11	9	8
12	9,2	8,8
13	10	10
14	11	10,5
15	11,5	10,8
16	11,8	11,2
17	12	11,5
18	12,5	12
19	12,8	12,5
20	13	13
21	13,2	13,2

El conversor I/P con 4 mA debe proporcionar una presión de 3 PSI, mientras que con 20 mA una presión de 13 PSI y con 12 mA una presión de 8 PSI independiente del estado anterior; ya sea que este valor se tomó en una medición ascendente o descendente. Pero de forma real estos valores difieren, la Figura 3.5 permite el comportamiento del transductor al realizar mediciones ascendentes en contraste con descendentes.



**Figura 3.5 Prueba convertor I/P corriente vs presión**

A continuación se describe el comportamiento de la válvula en conjunto con el convertor I/P. La Tabla 3.3 muestra el desplazamiento del vástago de la válvula en relación a la corriente que se aplica al I/P de forma ascendente y descendente en un rango de 4-20 mA en pasos de 1mA.

**Tabla 3.3**

**Prueba: corriente I/P Vs desplazamiento vástago**

Ascendente			Descendente		
% de cierre	(mA)	PSI	% de cierre	(mA)	PSI
0	4	3	0	3,8	3
0,25	7,5	5	0,19	7	4
0,5	11,8	8	0,25	8,5	7
0,626	13,2	8,8	0,5	12,1	8
0,75	15,5	10	0,75	16	9,5
1	20	13	1	20	13
1	21	13	1	21	13

La Tabla 3.3 permite contrastar las mediciones ascendentes con las descendentes del desplazamiento del vástago de la válvula respecto a la corriente del I/P que se obtuvieron al desarrollar la prueba descrita anteriormente.

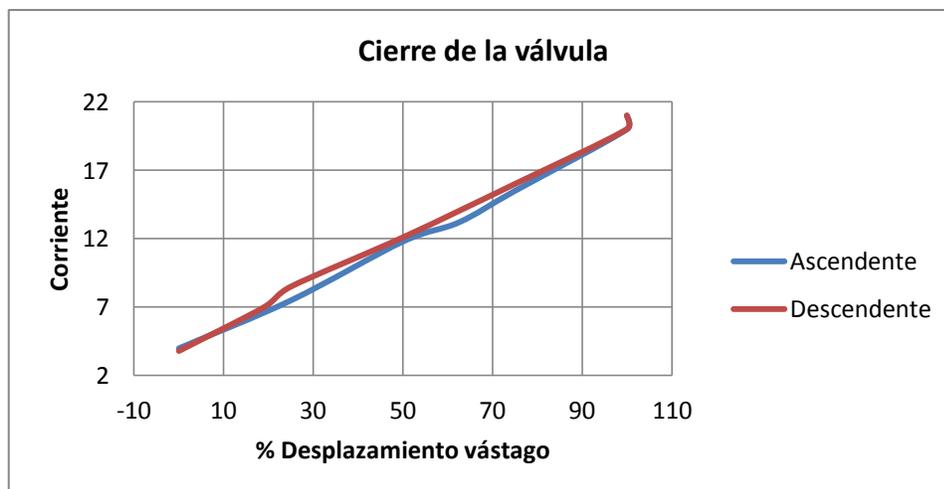


Figura 3.6 Corriente I/P vs desplazamiento vástago válvula

### 3.1.2 Conjunto posicionador – válvula

#### 1. Corriente Vs Desplazamiento del vástago

En el capítulo anterior se explicó que el posicionador posee un lazo de control interno de desplazamiento del vástago de la válvula, con un valor de consigna descrito por variable secundaria (SV) mientras que el valor de variable controlada se registra en la variable cuaternaria (QV). El algoritmo de control posee constantes que deben ser ajustadas, la Tabla 3.4 muestra los valores de constantes de las configuraciones C, E, H y autosintonía con las cuales se realizaron pruebas, para lo cual se aplicaron escalones de corriente y se registró el tiempo que tarda en estabilizarse.

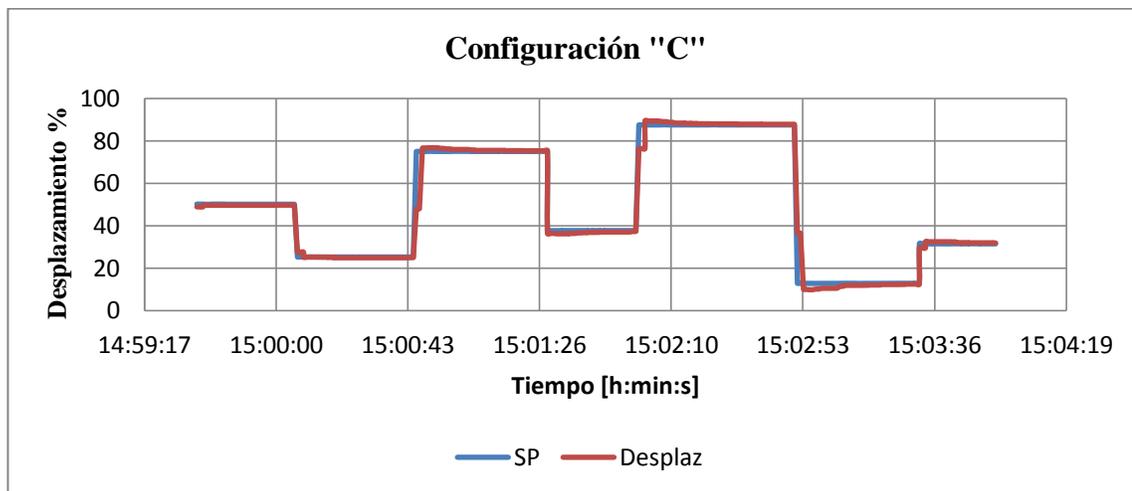
Tabla 3.4

Ganancias de los conjuntos de configuración

Tipo de configuración	Ganancia proporcional	Ganancia de velocidad	Ganancia MLFB
C	4.4	3.0	35
E	5.5	3.0	35
H	8.4	4.2	31
X	8.6	3.3	30

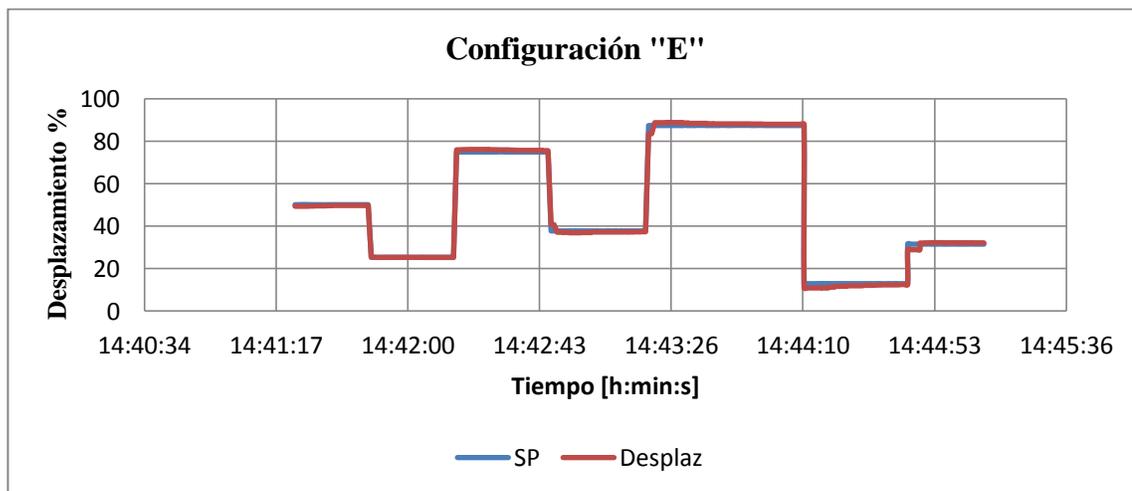
Se aplicaron escalones de corriente ascendentes como descendentes, equivalentes a cambios de porcentaje de desplazamiento de 50% a 25%, de

25% a 75%, de 75% a 38%, de 38% a 88%, de 88% a 13% y de 13% a 32%. La Figura 3.7 permite visualizar el porcentaje de desplazamiento del vástago de la válvula (QV) respecto al porcentaje deseado (SV), con una configuración tipo C.



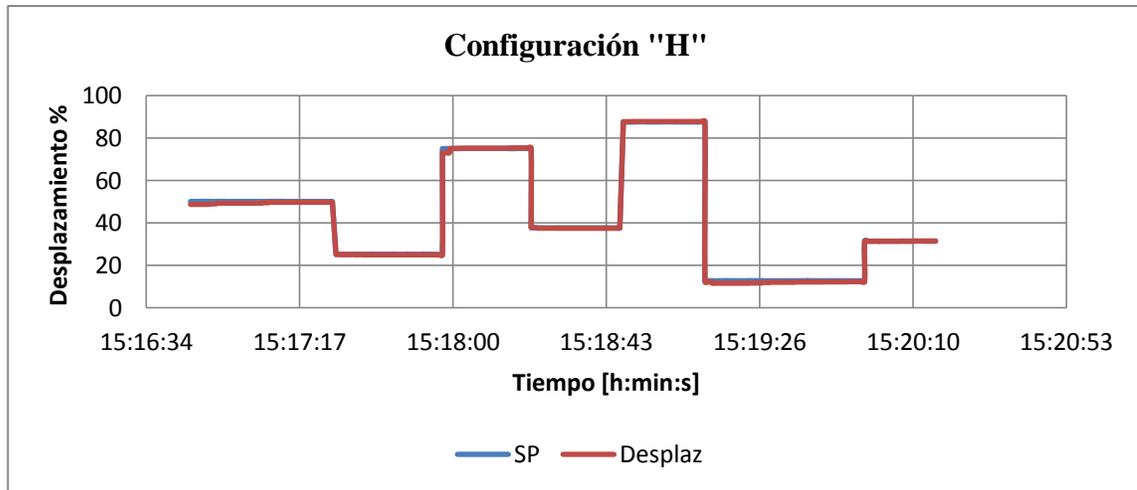
**Figura 3.7 % Desplazamiento de vástago para configuración C**

La Figura 3.8 muestra como el porcentaje de desplazamiento del vástago del actuador (QV) varía de acuerdo al porcentaje de consigna (SV), con una configuración tipo E.



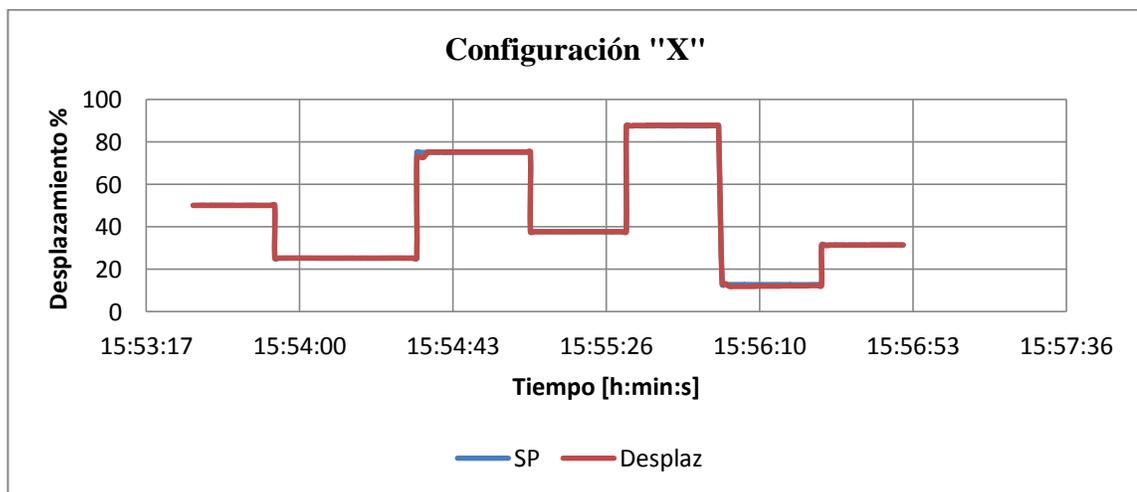
**Figura 3.8 % Desplazamiento de vástago para configuración E**

La Figura 3.9 permite visualizar la variación de porcentaje de desplazamiento del vástago del actuador (QV) de acuerdo porcentaje de consigna (SV), con una configuración tipo H.



**Figura 3.9 % Desplazamiento de vástago para configuración H**

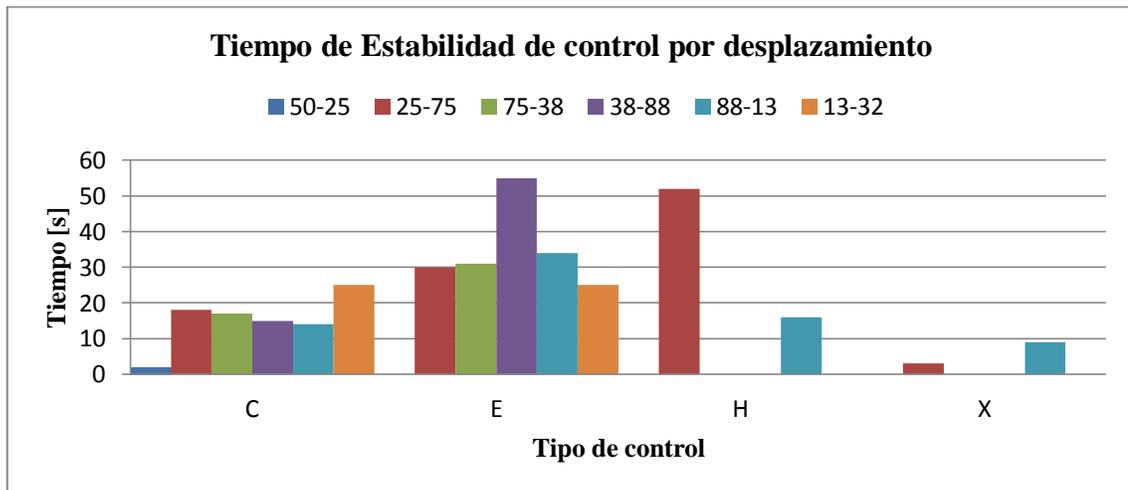
La Figura 3.10 permite visualizar la variación de porcentaje de desplazamiento del vástago del actuador (QV) de acuerdo porcentaje de consigna (SV), con una configuración tipo experta (X) cuyas constantes de ganancias se muestran en la Tabla 3.4.



**Figura 3.10 % Desplazamiento de vástago para configuración H**

Las configuraciones evaluadas poseen tiempos de levantamiento mínimos, en la mayoría de casos toma menos de un segundo en pasar de un 10% a un 90% de valor deseado. En cuanto al tiempo que tarda en estabilizarse la acción del actuador varía significativamente entre las diferentes configuraciones. La

Figura 3.11 muestra dicho tiempo para las ciertas configuraciones al aplicar distintos escalones.

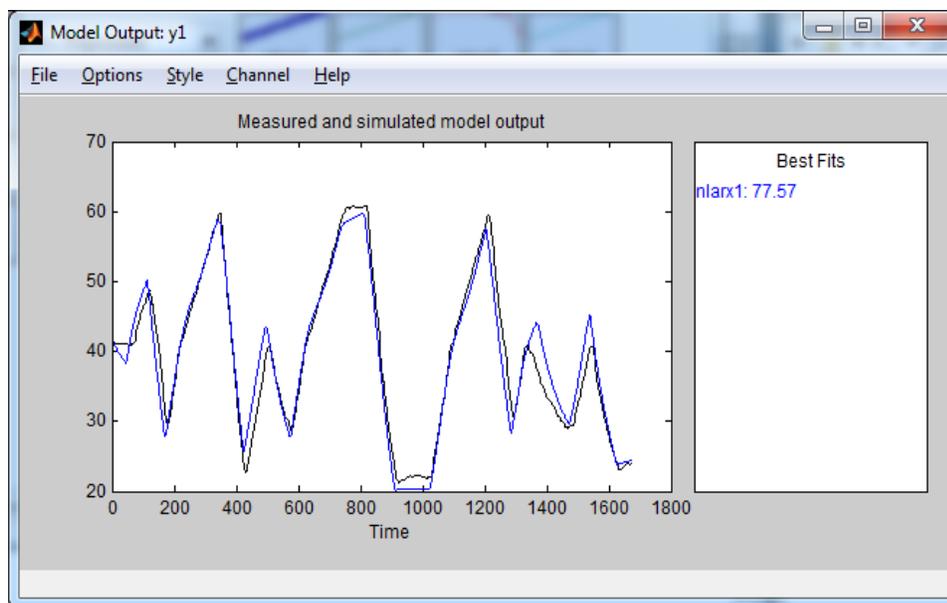


**Figura 3.11** Tiempo que tarda en estabilizarse el control por desplazamiento de vástago para las distintas configuraciones

La configuración que mejor responde es la obtenida a través del modo experto ya que presentó el menor tiempo en pasar de un estado a otro y estabilizarse. El mejor tiempo registrado fue menor a un segundo mientras que el tiempo más magno se presenta en un cambio de consigna de 88 a 13 % de desplazamiento ya que es un cambio significativo en el cual influye la inercia existente en los elementos el actuador. Cabe recalcar que respecto a la respuesta de las demás configuraciones en las diferentes pruebas es mucho menor.

### 3.2 Modelo matemático de la planta

El modelo obtenido por la herramienta *ident* de Matlab se muestra la Figura 3.12, tiene un 78% de aproximación y corresponde a un modelo no lineal ARX con una única entrada  $u_1$  y una única salida  $y_1$  con un regresor no lineal  $y_1(t-1)$ . Los parámetros estándar poseen los siguientes órdenes:  $n_a = 2$ ,  $n_b = 2$ ,  $n_k = 1$ .



**Figura 3.12 Modelo de la planta de nivel para validar**

### 3.3 Control de la variable nivel

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de control de la variable nivel realizadas en la estación de trabajo ND-0704 del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Para poder identificar a cada prueba se le asignó un código haciendo referencia al tipo de conjunto que se utilizó: convertor de corriente a presión (CIP) o posicionador electroneumático inteligente (PSC). Para hacer referencia a los controles convencionales: Proporcional (P), Proporcional Derivativo (PD), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID). En cuanto a perturbaciones se varió el punto de consigna (en centímetros) en escalones de forma ascendente, descendente y de forma combinada de la siguiente manera:

- A1: Prueba ascendente con cambios de punto de consigna de 5cm desde 20cm hasta 50cm.
- D1: Prueba descendente con cambios de punto de consigna de 5cm desde 50cm hasta 20cm.

- C1: Prueba combinada con cambios de punto de consigna de 30-40-20-50-35 cm
- A2: Prueba ascendente con cambios de punto de consigna de 10cm desde 23cm hasta 53cm.
- D2: Prueba descendente con cambios de punto de consigna de 10cm desde 53cm hasta 23cm.
- C2: Prueba combinada con cambios de punto de consigna de 23-31-46-28-37 cm.

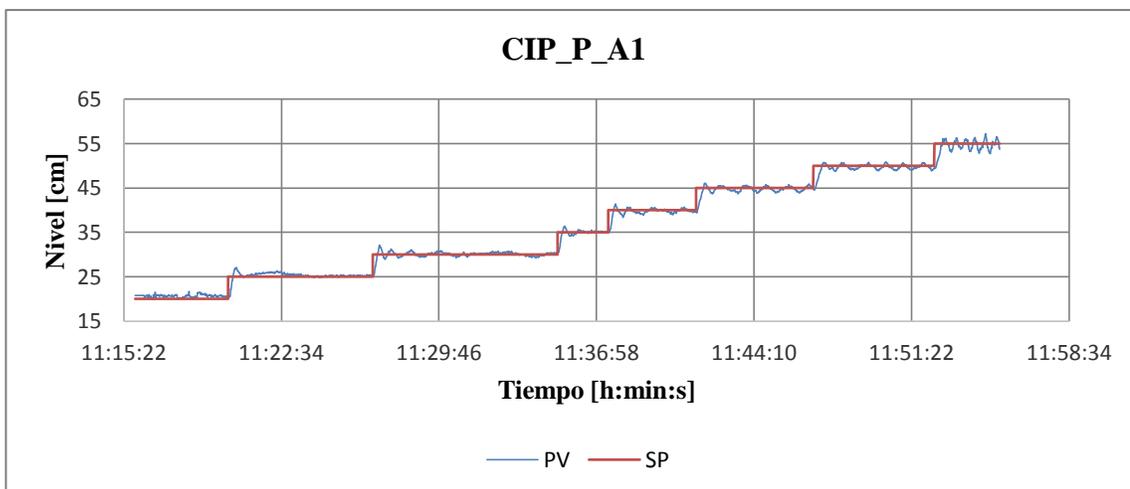
Es por ello al referirse a la prueba **CIP\_P\_A1** se habla de que fue desarrollada utilizando como conjunto al convertor de corriente a presión - válvula, bajo un algoritmo de control Proporcional y se realizaron cambios de consigna ascendente de 5cm desde 20cm hasta 50cm.

Se generaron dos tipos de gráficas para cada prueba, la primera muestra el comportamiento de la variable controlada es decir el nivel de agua respecto al valor deseado, mientras en la segunda se muestra el desplazamiento del vástago (apertura y cierre de la válvula).

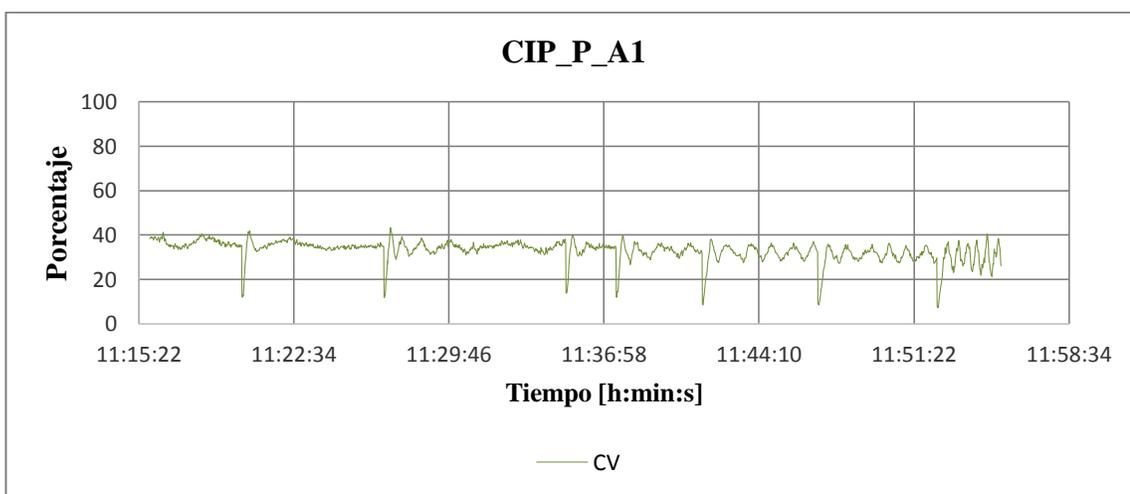
Primero se presentan las gráficas obtenidas con el convertor de corriente a presión seguida por las obtenidas por el posicionador además de una tabla con los siguientes parámetros: tiempo de levantamiento ( $T_r$ ), tiempo de estabilidad ( $T_s$ ), tiempo pico ( $T_p$ ) y porcentaje de sobreimpulso (%OS); además del error (E) en estado estable en caso de no estabilizarse el sistema con el fin de comparar los resultado obtenidos para la misma prueba.

### **3.3.1 Proporcional**

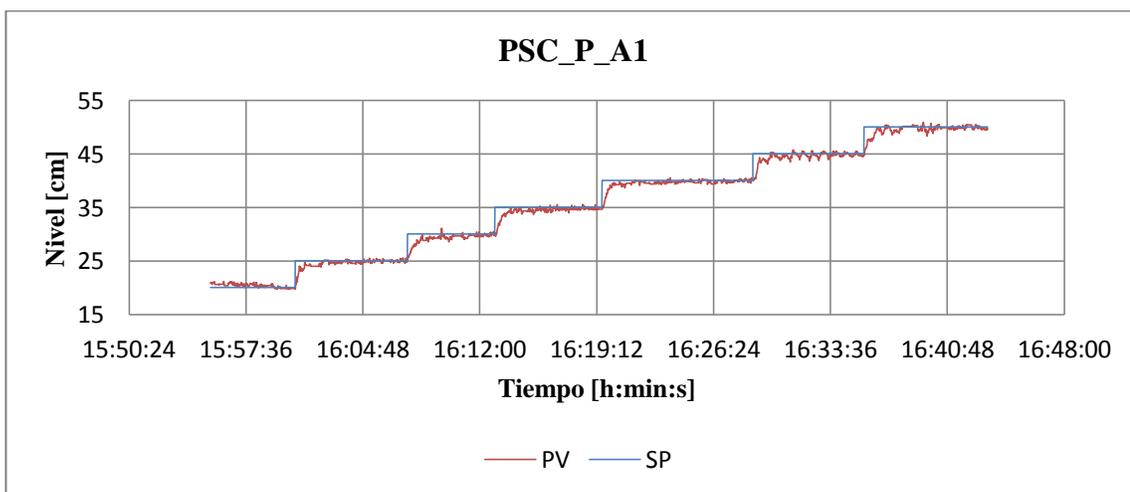
A continuación se muestran las pruebas desarrolladas bajo un algoritmo de control proporcional.



**Figura 3.13 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P**



**Figura 3.14 Variable de control con control P utilizando conversor I/P**



**Figura 3.15 Variable controlada con control P utilizando posicionador inteligente**

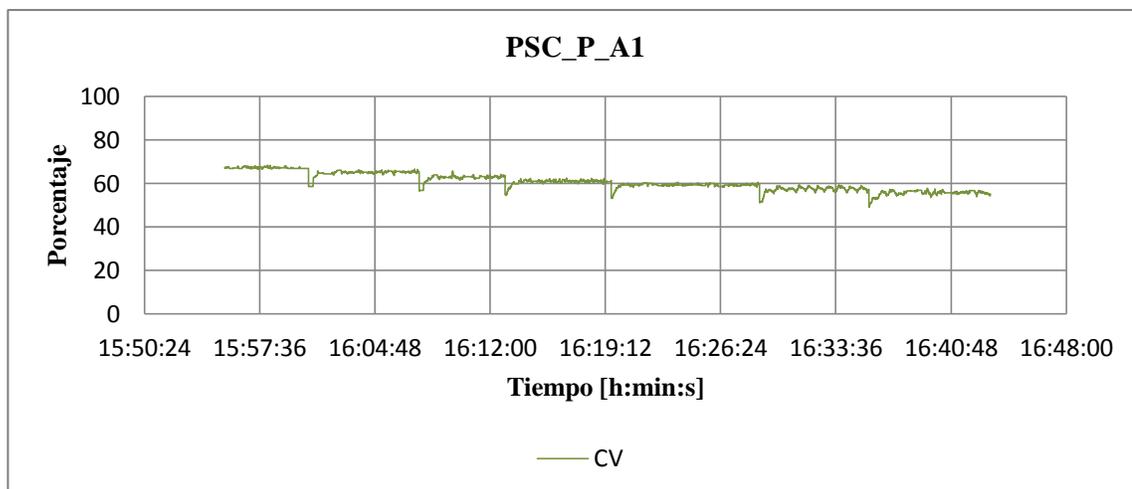


Figura 3.16 Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.5

Respuesta del sistema con control P prueba ascendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>20-25</b>		
Tr	13	33
Ts	201	248
Tp	23	–
%OS	42,4	–
Error	–	–
<b>25-30</b>		
Tr	8	49
Ts	456	126
Tp	19	127
%OS	43,8	–
Error	–	–
<b>30-35</b>		
Tr	12	50
Ts	93	273
Tp	20	–
%OS	28,6	–
Error	–	–
<b>35-40</b>		
Tr	10	32
Ts	210	416
Tp	20	–

CONITNÚA→

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
%OS	29,4	–
Error	0	0
<b>40-45</b>		
Tr	15	31
Ts	315	285
Tp	24	–
%OS	23	–
Error	0	0
<b>45-50</b>		
Tr	16	43
Ts	–	267
Tp	87	–
%OS	16	–
Error	1	0

De la Tabla 3.5 se puede rescatar que el menor tiempo de levantamiento es de 8 segundos, registrado en la prueba CIP\_P\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 25 a 30 cm mientras que el mayor tiempo registrado corresponde la prueba de PSC\_P\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 35. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 456 segundos en la prueba CIP\_P\_A1 en el cambio de punto de consigna de 25 a 30 cm en contraste con el menor tiempo que es de 126 en el mismo cambio de consigna pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 43.8% registrado en la prueba CIP\_P\_A1 en el cambio de punto de consigna de 25 a 30 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Es importante resaltar que en el único caso que no se llegó a la estabilidad del sistema al utilizar el convertor I/P en el escalón de 45 a 50 cm, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar que en la variable de control las variaciones al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

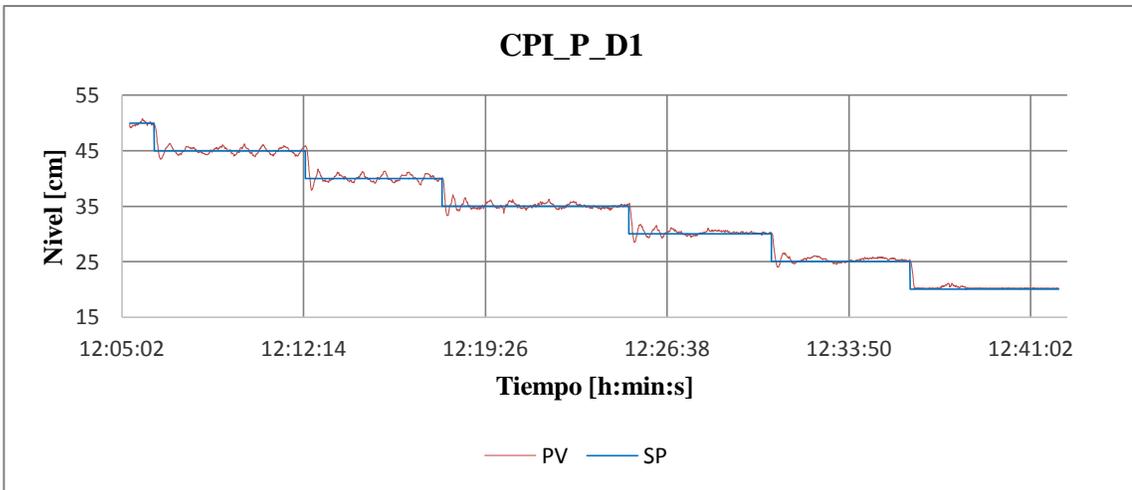


Figura 3.17 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P

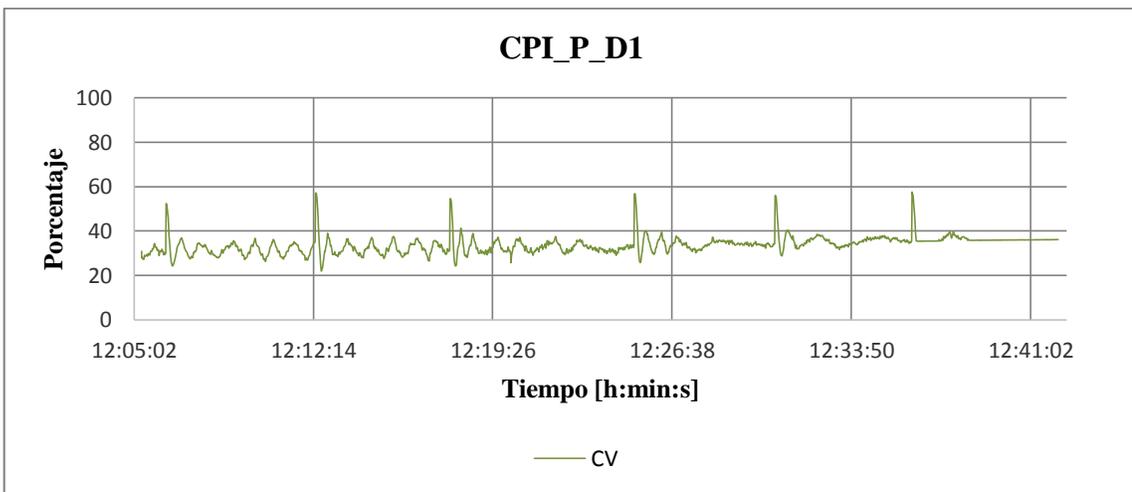


Figura 3.18 Variable de control con control P utilizando conversor I/P

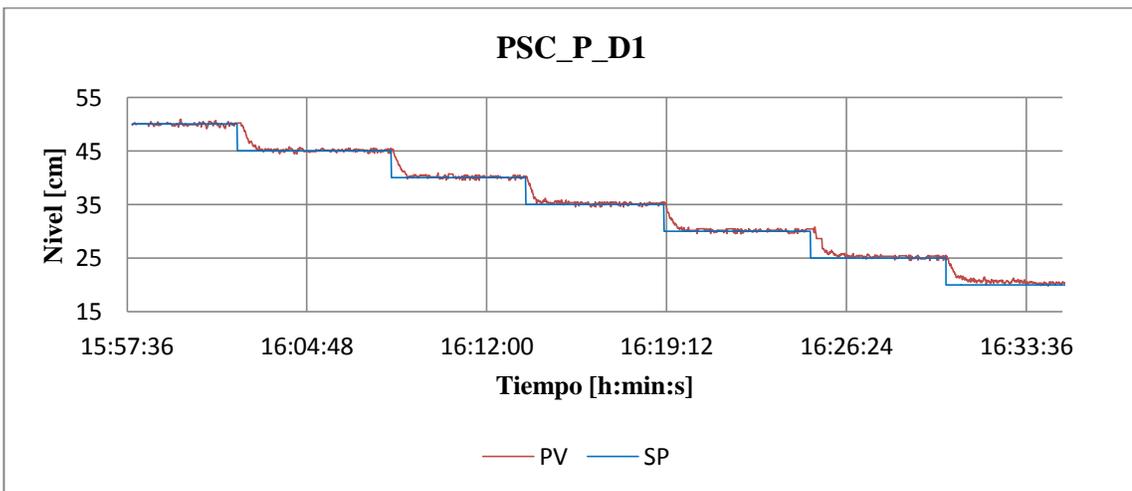


Figura 3.19 Variable controlada con control P utilizando posicionador inteligente

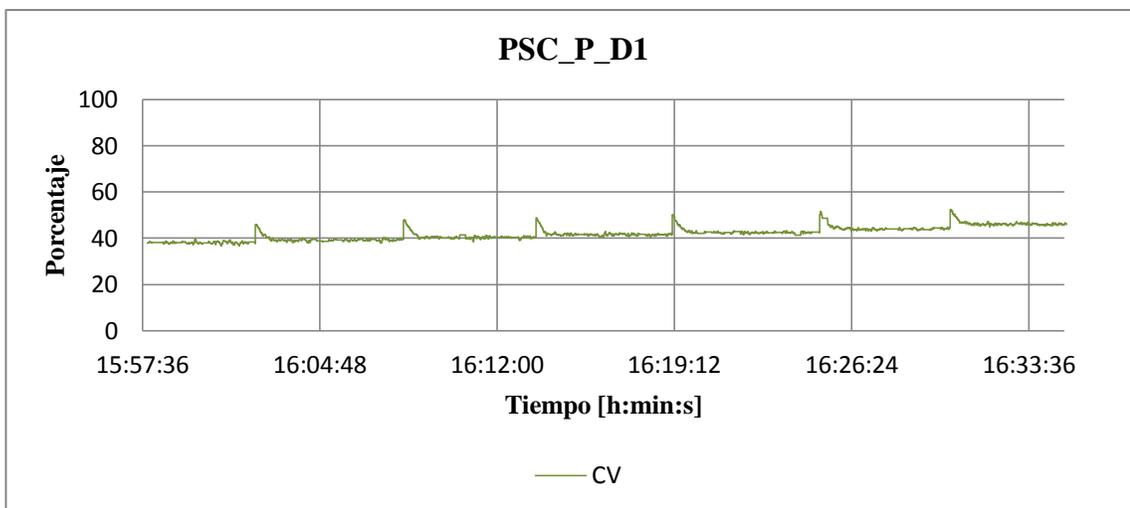


Figura 3.20 Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.6

Parámetros de respuesta del sistema con control P prueba descendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>50-45</b>		
Tr	10	32
Ts	–	186
Tp	15	–
%OS	30	–
Error	1	0
<b>45-40</b>		
Tr	7	30
Ts	–	149
Tp	16	–
%OS	42	–
Error	1	0
<b>40-35</b>		
Tr	6	20
Ts	–	103
Tp	14	–
%OS	33,8	–
Error	0,685	0
<b>35-30</b>		
Tr	8	27
Ts	236	54

CONITNÚA→

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b> Tp </b>	15	–
<b> %OS </b>	110,4	–
<b> Error </b>	0	0
<b> 30-25 </b>		
<b> Tr </b>	6	51
<b> Ts </b>	295	169
<b> Tp </b>	16	–
<b> %OS </b>	20,4	–
<b> Error </b>	0	0
<b> 25-20 </b>		
<b> Tr </b>	8	62
<b> Ts </b>	127	190
<b> Tp </b>	–	–
<b> %OS </b>	–	–
<b> Error </b>	0	0

La Tabla 3.6 resume el comportamiento del sistema bajo un control proporcional al utilizar el convertor de corriente a presión en relación a los resultados obtenidos al emplear el posicionador. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_P\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 25 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 62 segundos en la prueba PSC\_P\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 25 a 20. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 295 segundos en la prueba CIP\_P\_D1 en el cambio de punto de consigna de 30 a 25 cm en contraste con el menor tiempo que es de 54 en el cambio de consigna de 35 a 30 pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobre impulso el mayor porcentaje es de 110% registrado en la prueba CIP\_P\_D1 en el cambio de punto de consigna de 35 a 30 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el convertor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm y  $\pm 0.68$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

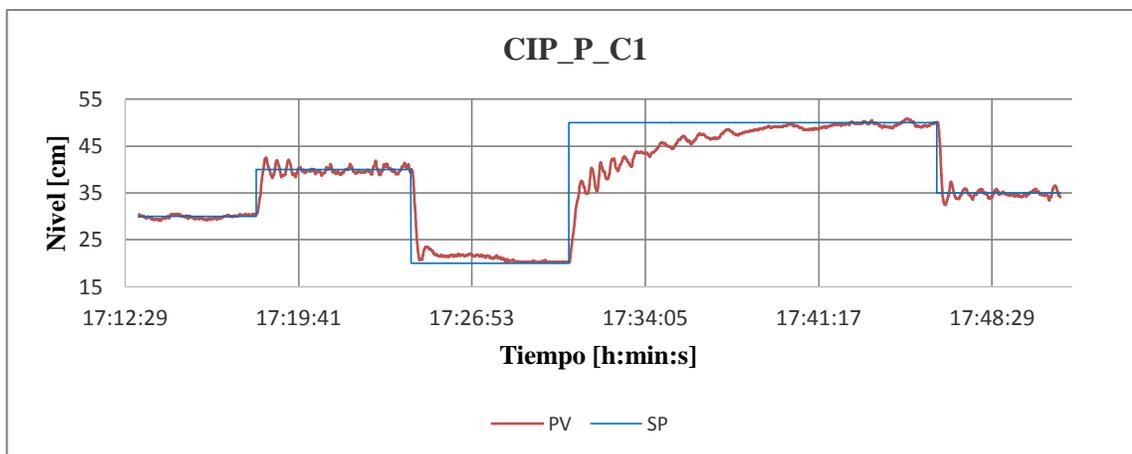


Figura 3.21 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P

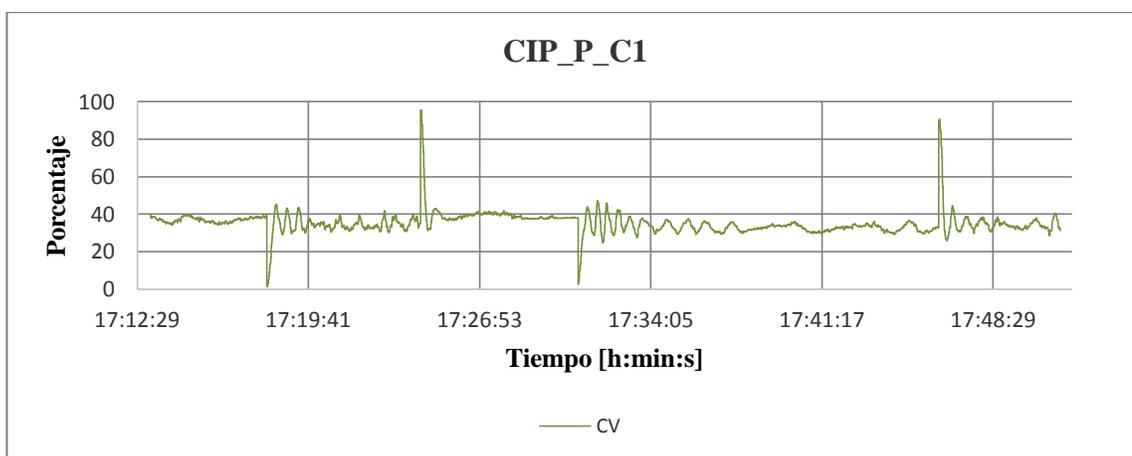


Figura 3.22 Variable de control con control P utilizando conversor I/P

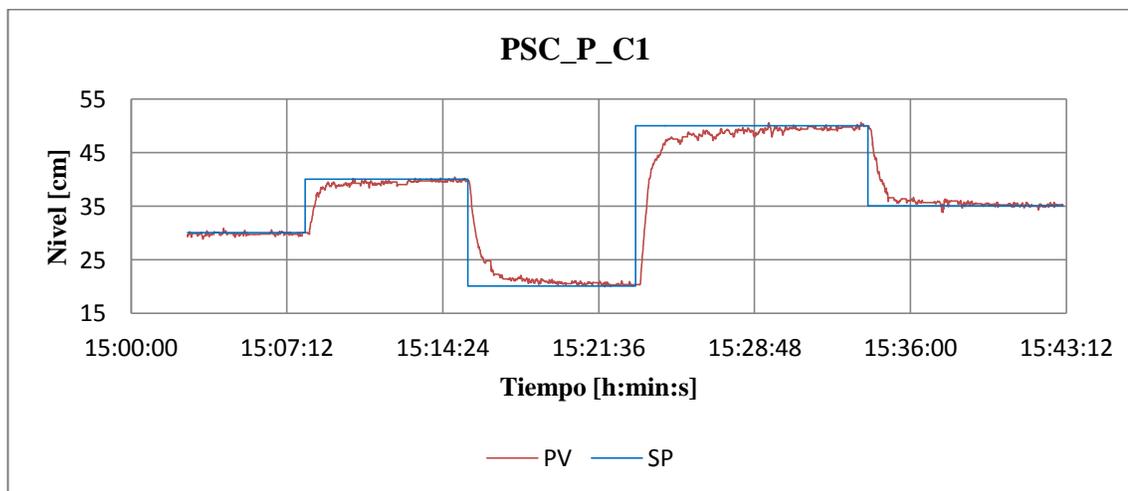


Figura 3.23 Variable controlada con control P utilizando posicionador inteligente

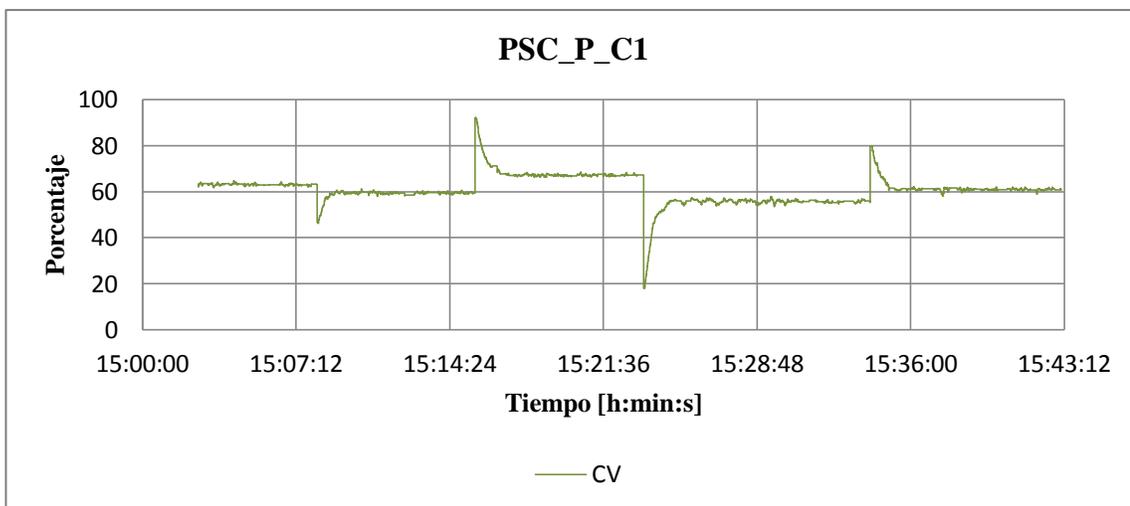


Figura 3.24 Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.7

Parámetros de respuesta del sistema con control P prueba combinada 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>30-40</b>		
Tr	12	46
Ts	–	283
Tp	25	–
%OS	25,7	–
Error	1,065	0
<b>40 - 20</b>		
Tr	13	64
Tp	–	–
%OS	100	–
Error	0	0
<b>20-50</b>		
Tr	279	67
Ts	602	408
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	0	0
<b>50-35</b>		
Tr	6	39
Ts	–	288
Tp	21	–
%OS	17,13333333	–
Error	1,85	0

La Tabla 3.7 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un conversor I/P y un posicionador bajo un control proporcional. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_P\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 50 a 35 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 67 segundos en la prueba PSC\_P\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 602 segundos en la prueba CIP\_P\_C1 en el cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm en contraste con el menor tiempo que es de 288 en el cambio de consigna de 50 a 65 cm pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 100% registrado en la prueba CIP\_P\_D1 en el cambio de punto de consigna de 40 a 20 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el conversor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1.065$  cm y  $\pm 1.85$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

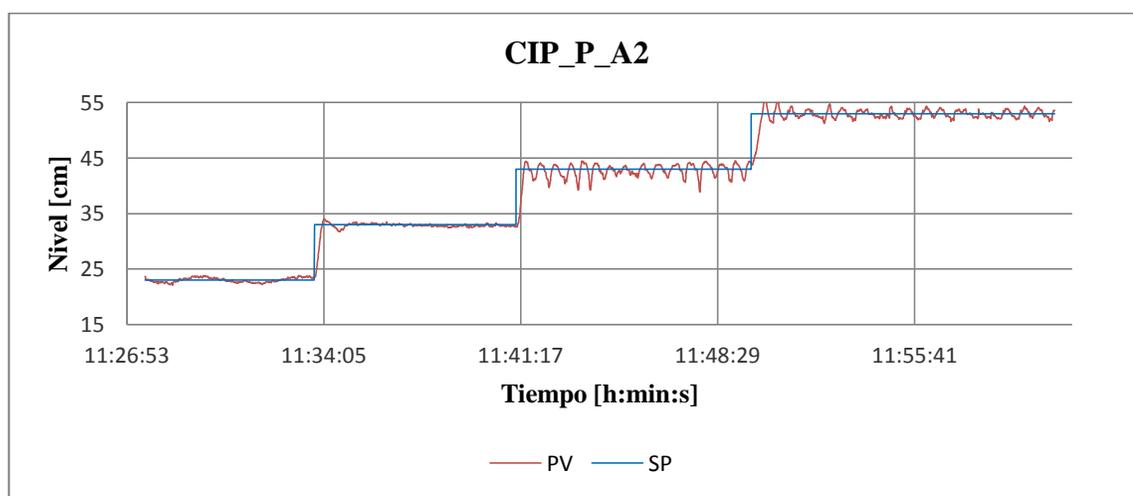
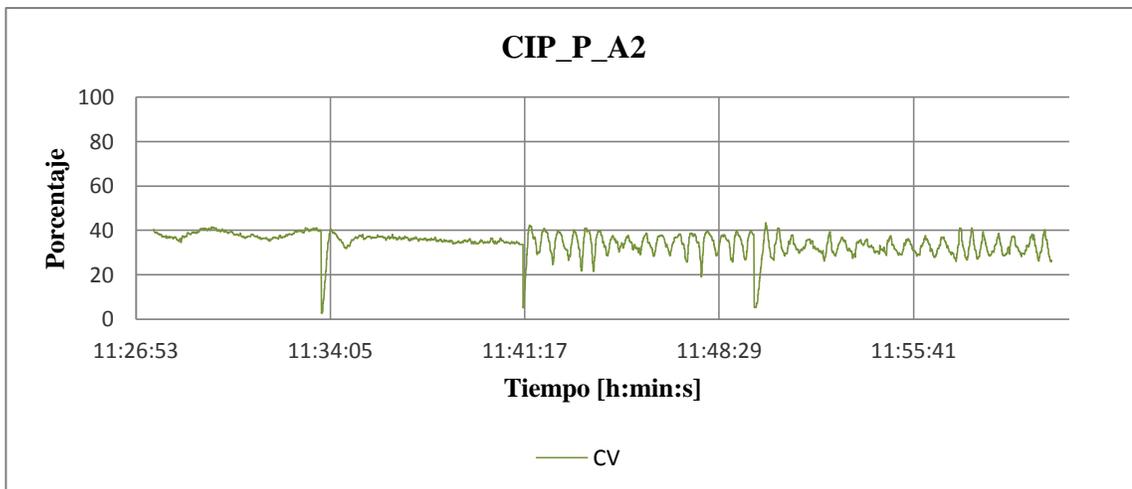
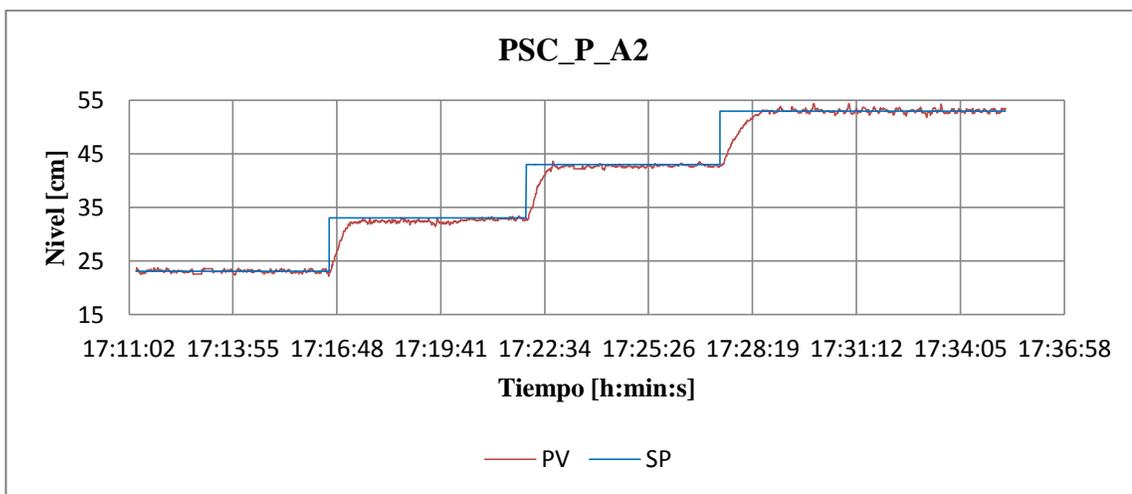


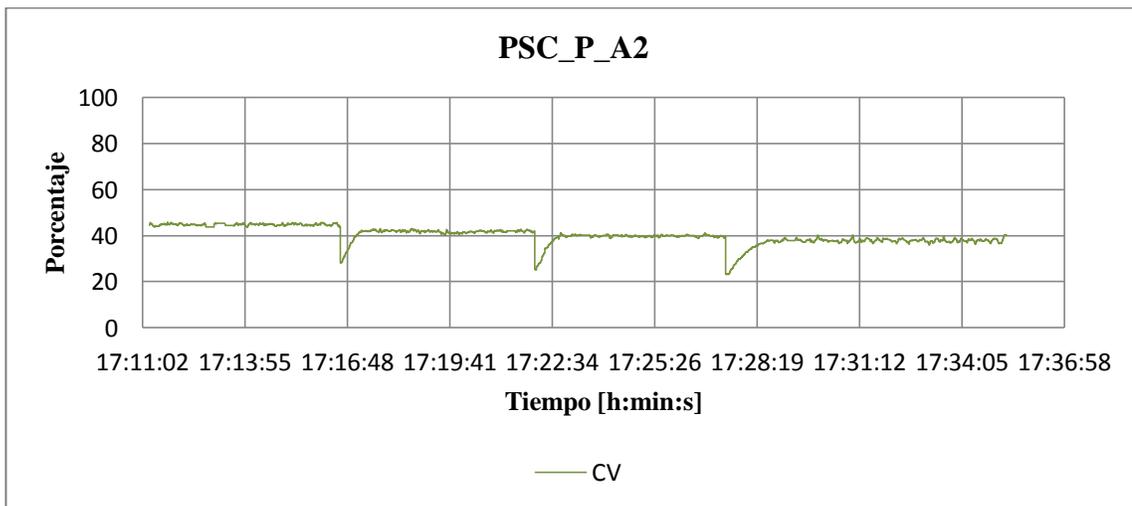
Figura 3.25 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P



**Figura 3.26** Variable de control con control P utilizando convertor I/P



**Figura 3.27** Variable controlada con control P utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.28** Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.8

## Parámetros de respuesta del sistema con control P prueba ascendente 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-33</b>		
Tr	13	30
Ts	346	219
Tp	21	–
%OS	9,9	–
Error	0	0
<b>33-43</b>		
Tr	11	30
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	1	0
<b>43-53</b>		
Tr	18	49
Ts	–	370
Tp	30	–
%OS	27,8	–
Error	0,875	0

La Tabla 3.8 permite comparar el comportamiento del sistema utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional. El menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos correspondiente a la prueba CIP\_P\_A2 en un cambio de punto de consigna de 33 a 43 cm, mientras que el mayor tiempo registrado es de 49 segundos en la prueba PSC\_P\_A2, en un cambio de punto de consigna de 23 a 33 cm. El tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 370 segundos en la prueba PSC\_P\_A2 en el cambio de punto de consigna de 43 a 53 cm en contraste con el menor tiempo que es de 213 segundos en la misma prueba en el cambio de consigna de 33 a 43 cm. El mayor porcentaje de sobreimpulso es de 27.8% registrado en la prueba CIP\_P\_D1 en el cambio de punto de consigna de 40 a 20 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso. Al utilizar el convertor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm y  $\pm 0.85$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

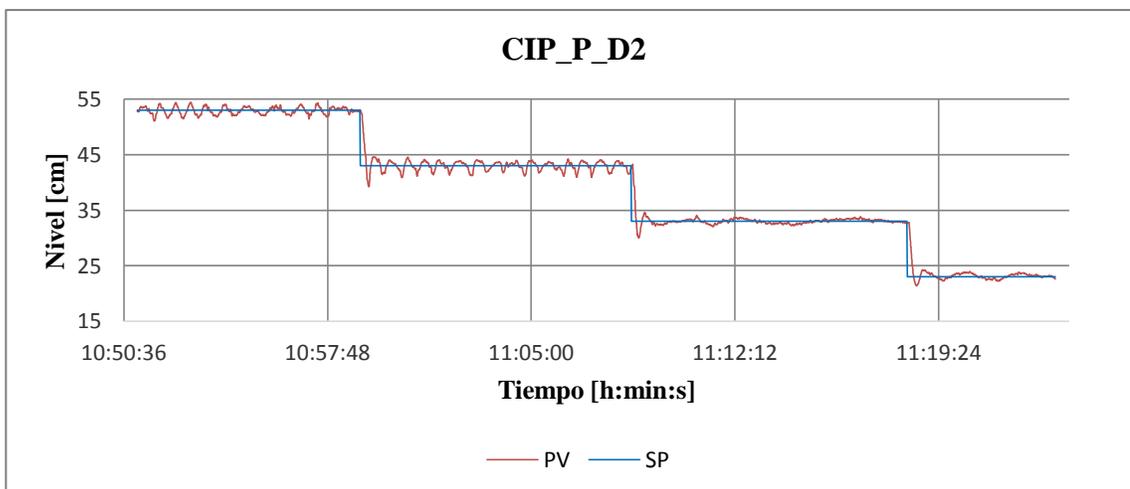


Figura 3.29 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P

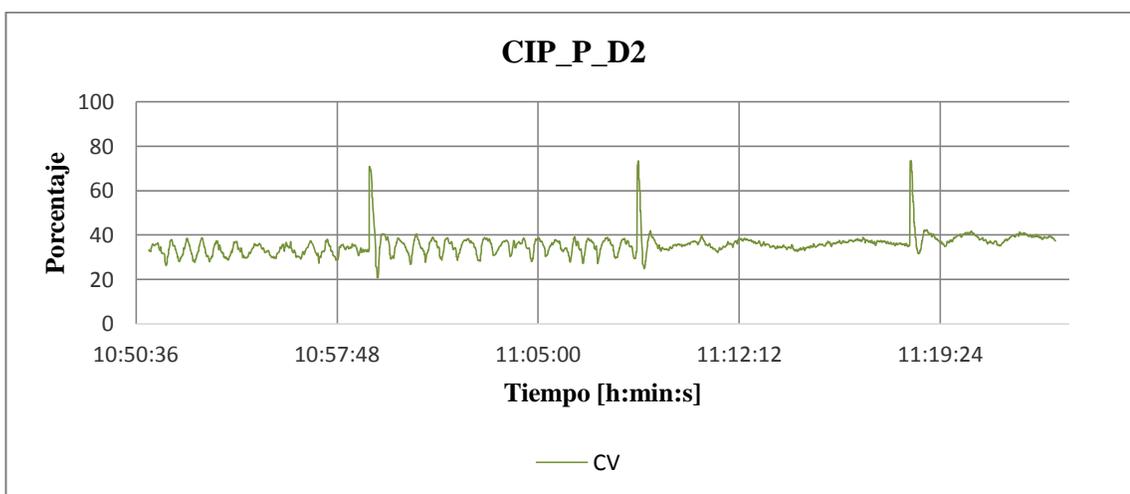


Figura 3.30 Variable de control con control P utilizando conversor I/P

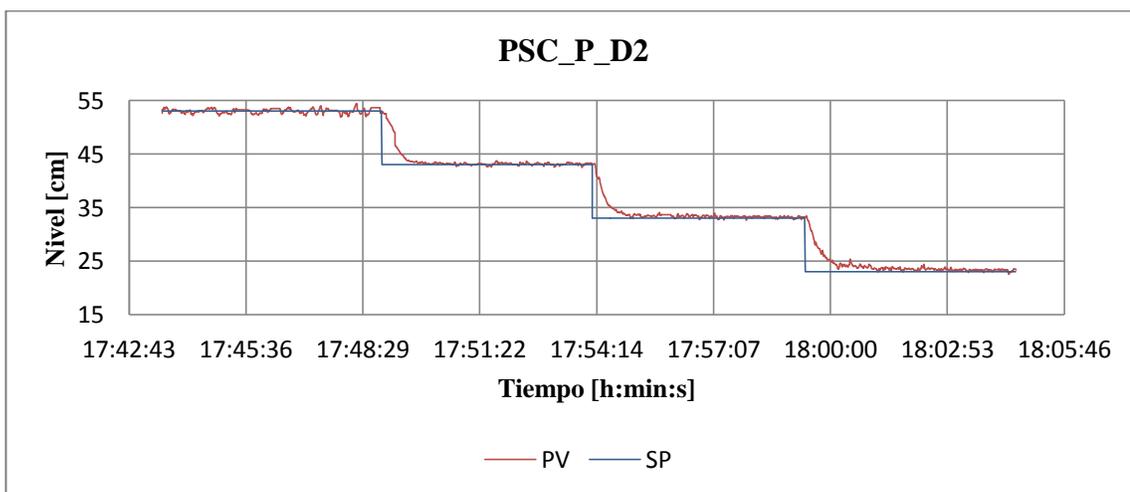


Figura 3.31 Variable controlada con control P posicionador inteligente

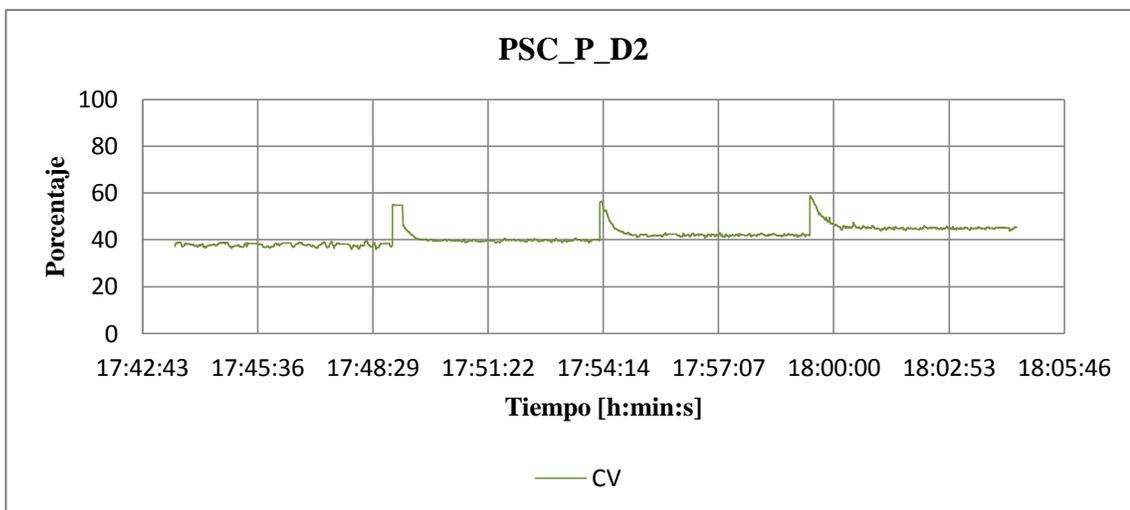


Figura 3.32 Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.9

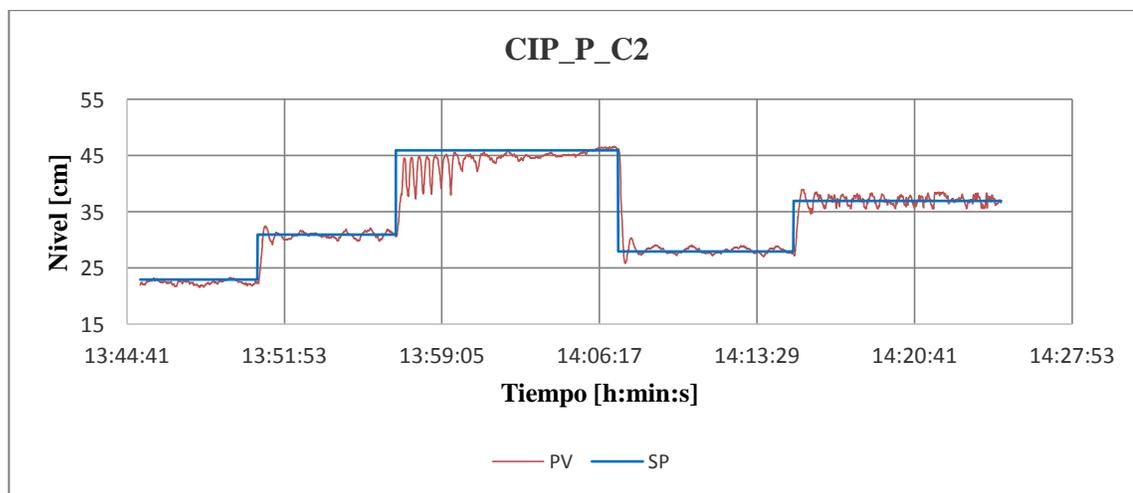
Parámetros de respuesta del sistema con control P prueba descendente 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>53-43</b>		
Tr	8	29
Ts	–	215
Tp	18	–
%OS	37,5	–
Error	1,5	0
<b>43-33</b>		
Tr	6	35
Ts	493	182
Tp	15	–
%OS	29,1	–
Error	0	0
<b>33-23</b>		
Tr	8	31
Ts	253	236
Tp	20	–
%OS	15,9	–
Error	0	0

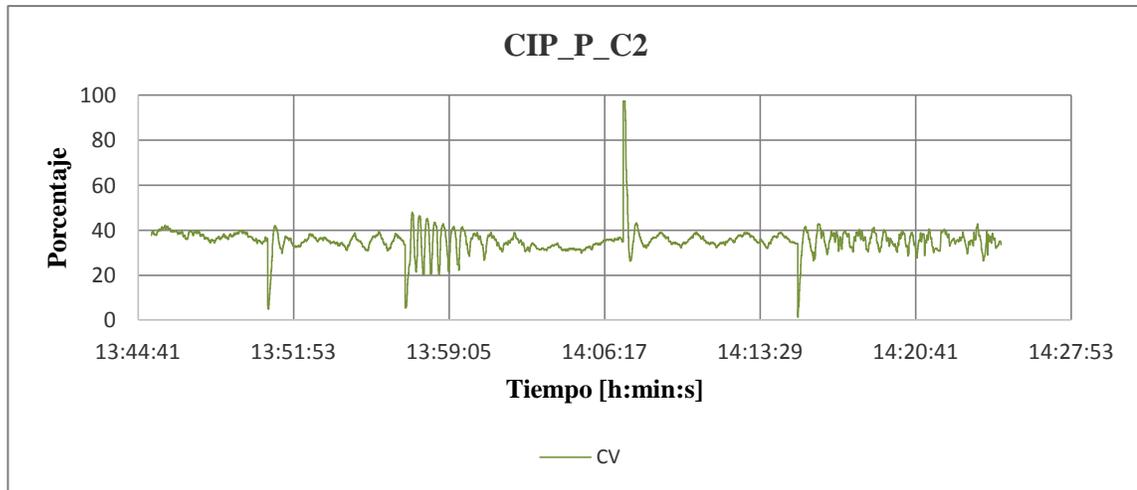
La Tabla 3.9 permite comparar el comportamiento del sistema al utilizar un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_P\_D2, al

realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 35 segundos en la prueba PSC\_P\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 493 segundos en la prueba CIP\_P\_D2 en el cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm en contraste con el menor tiempo que es de 182 en el mismo cambio de consigna al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 37.5% registrado en la prueba CIP\_P\_D2 en el cambio de punto de consigna de 53 a 43 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

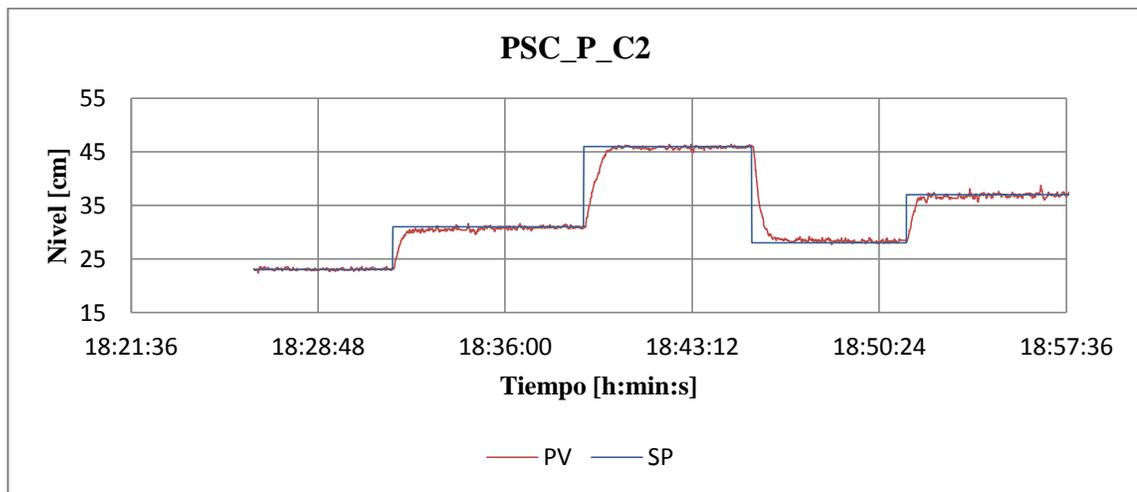
Al utilizar el conversor I/P se registró un caso en el que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1.5$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.



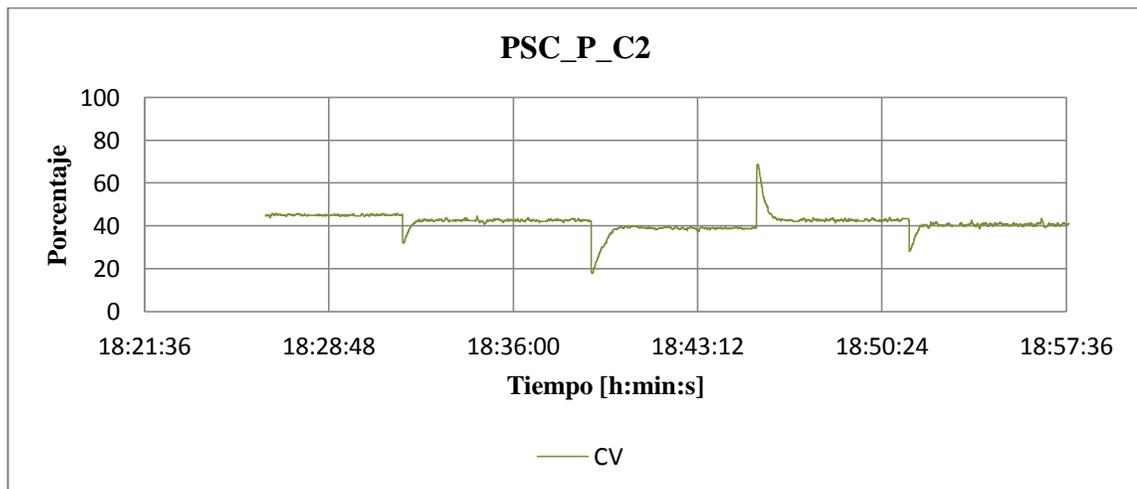
**Figura 3.33 Variable controlada con control P utilizando conversor I/P**



**Figura 3.34** Variable de control con control P utilizando convertor I/P



**Figura 3.35** Variable controlada con control P utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.36** Variable de control con control P utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.10

Parámetros de respuesta del sistema con control P prueba combinada 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-32</b>		
Tr	9	38
Ts	–	323
Tp	21	–
%OS	18,25	–
Error	1	0
<b>31-46</b>		
Tr	18	45
Ts	523	254
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	0	0
<b>46-28</b>		
Tr	8	31
Ts	441	163
Tp	19	–
%OS	12	–
Error	0	0
<b>28-37</b>		
Tr	10	21
Ts	–	324
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	1,5	0

La Tabla 3.10 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional. El menor tiempo de levantamiento es de 8 segundos, registrado en la prueba CIP\_P\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 46 a 28 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 45 segundos en la prueba PSC\_P\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 31 a 46 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 523 segundos en la prueba CIP\_P\_C2 en el cambio de punto de consigna de 31 a 46 cm en contraste con el menor tiempo que es de 163 segundos en el cambio de consigna de 46 a 28 cm pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso

se registra un 18.25% registrado en la prueba CIP\_P\_C2 en el cambio de punto de consigna de 23 a 32 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el convertor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm y  $\pm 1.5$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

### 3.3.2 Proporcional derivativo

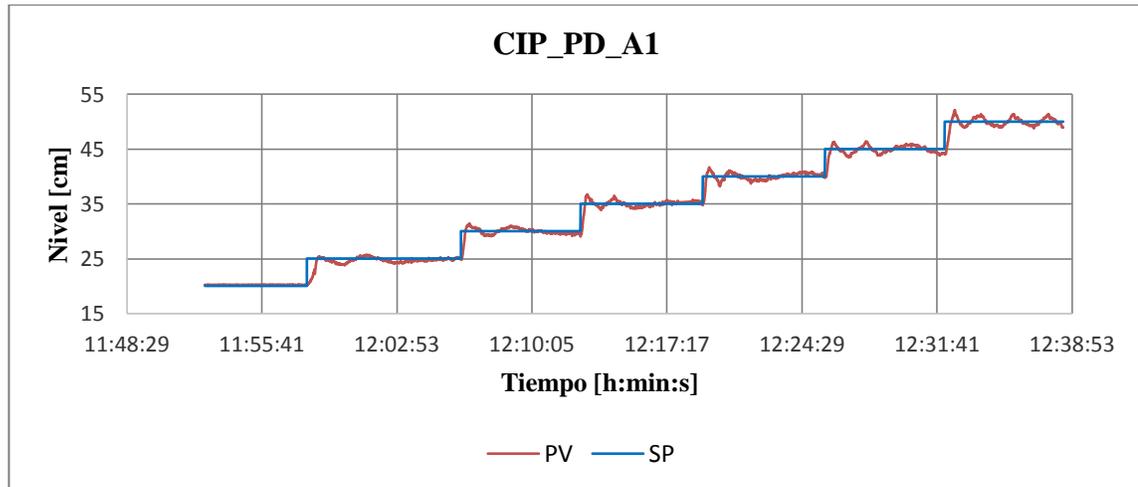


Figura 3.37 Variable controlada con control PD utilizando convertor I/P

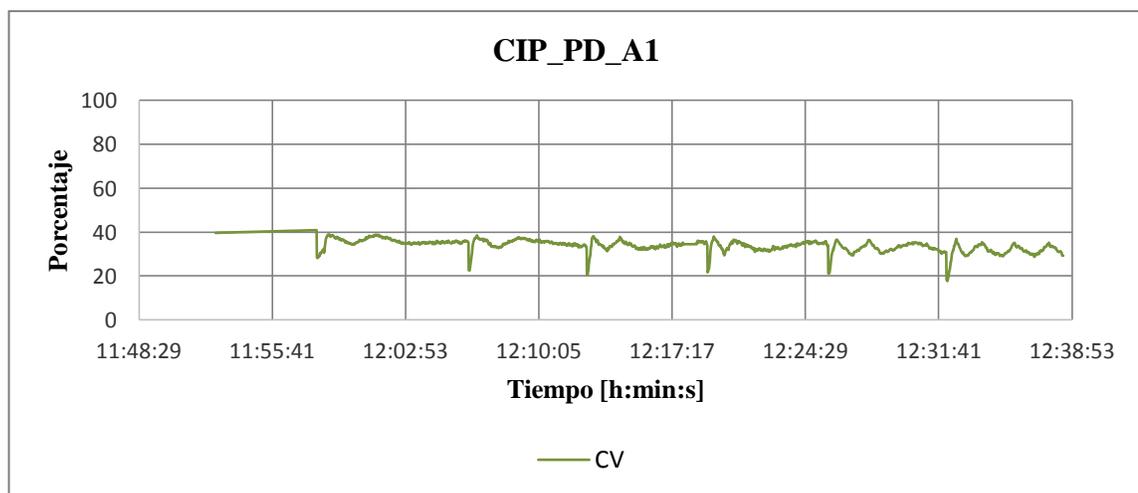


Figura 3.38 Variable de control con control PD utilizando convertor I/P

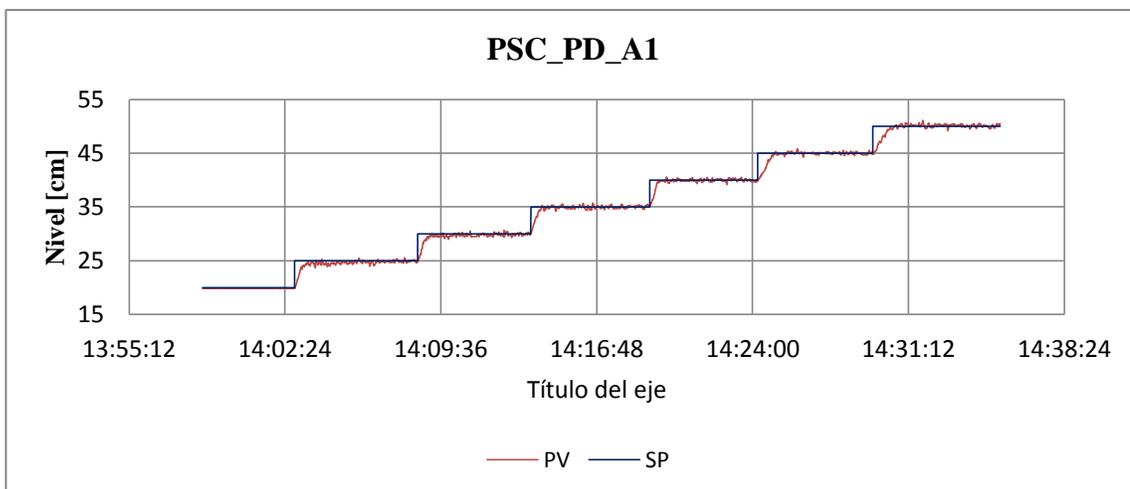


Figura 3.39 Variable controlada con control PD utilizando convertor I/P

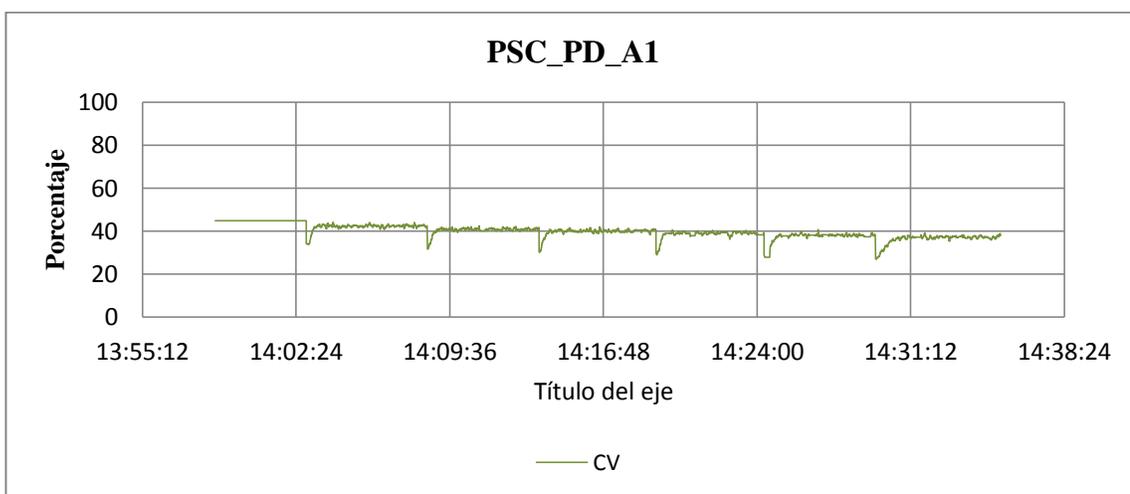


Figura 3.40 Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.11

Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba ascendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>20-25</b>	
Tr	127	29
Ts	384	224
Tp	–	–
%OS	0	–
Error	0	–
	<b>25-30</b>	
Tr	8	32

CONTINÚA →

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b> Tp </b>	27	–
<b> %OS </b>	28,4	–
<b> Error </b>	0	0
<b>30-35</b>		
<b> Tr </b>	9	25
<b> Ts </b>	279	204
<b> Tp </b>	22	–
<b> %OS </b>	33,8	–
<b> Error </b>	0	0
<b>35-40</b>		
<b> Tr </b>	7	18
<b> Ts </b>	–	215
<b> Tp </b>	20	–
<b> %OS </b>	32,8	0
<b> Error </b>	1	0
<b>40-45</b>		
<b> Tr </b>	14	32
<b> Ts </b>	–	128
<b> Tp </b>	26	–
<b> %OS </b>	25,4	0
<b> Error </b>	1	0
<b>45-50</b>		
<b> Tr </b>	11	38
<b> Ts </b>	–	210
<b> Tp </b>	23	–
<b> %OS </b>	42	0
<b> Error </b>	1	0

La Tabla 3.11 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba ascendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 7 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 35 a 40 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 38 segundos en la prueba PSC\_PD\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 45 a 40 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 384 segundos en la prueba CIP\_PD\_A1 en el cambio de punto de consigna de 20 a 25 cm en contraste con el menor tiempo que es de 128 segundos en el cambio

de consigna de 40 a 45 cm pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 33.8% registrado en la prueba CIP\_PD\_A1 en el cambio de punto de consigna de 30 a 35 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el conversor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

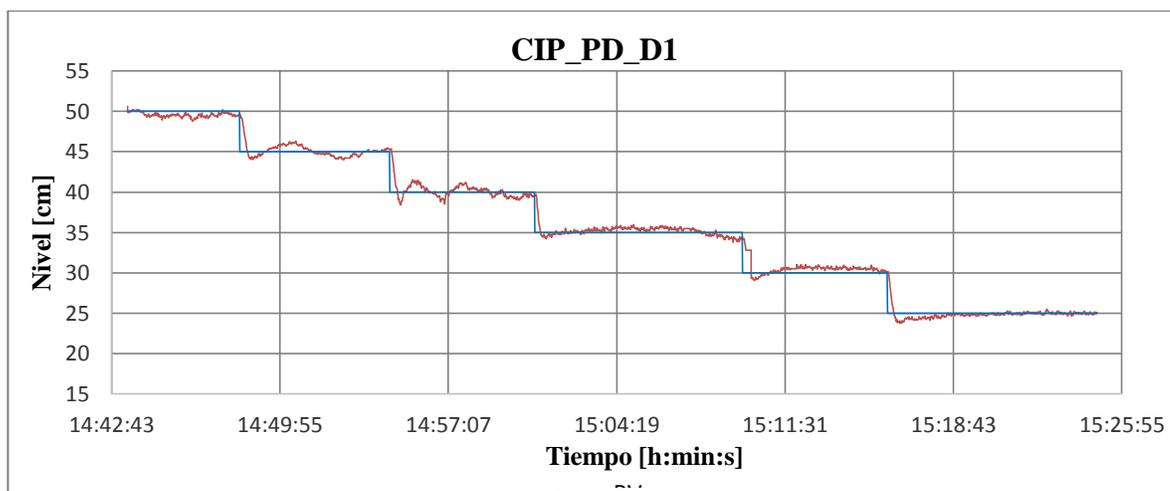


Figura 3.41 Variable controlada con control PD utilizando conversor I/P

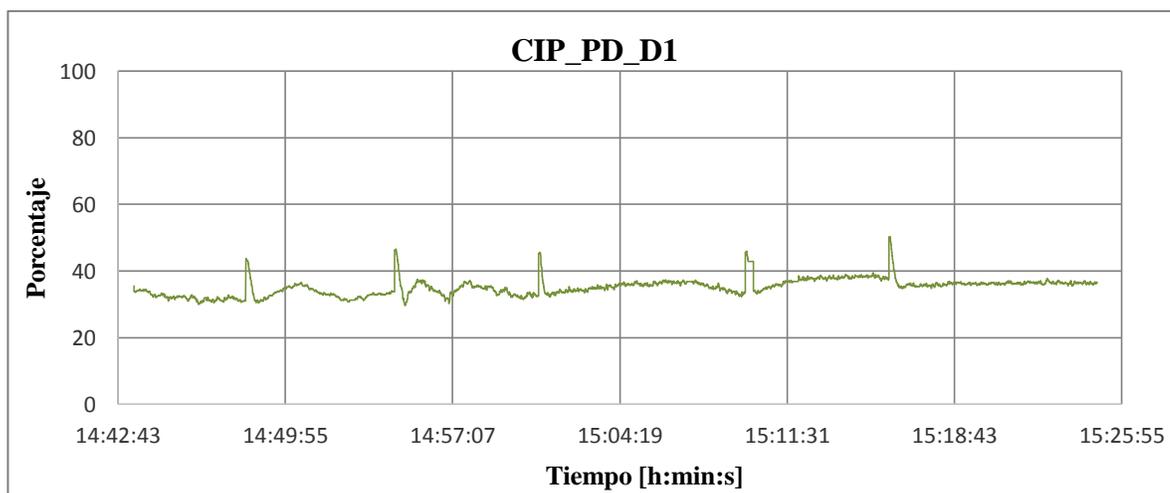


Figura 3.42 Variable de control con control PD utilizando conversor I/P

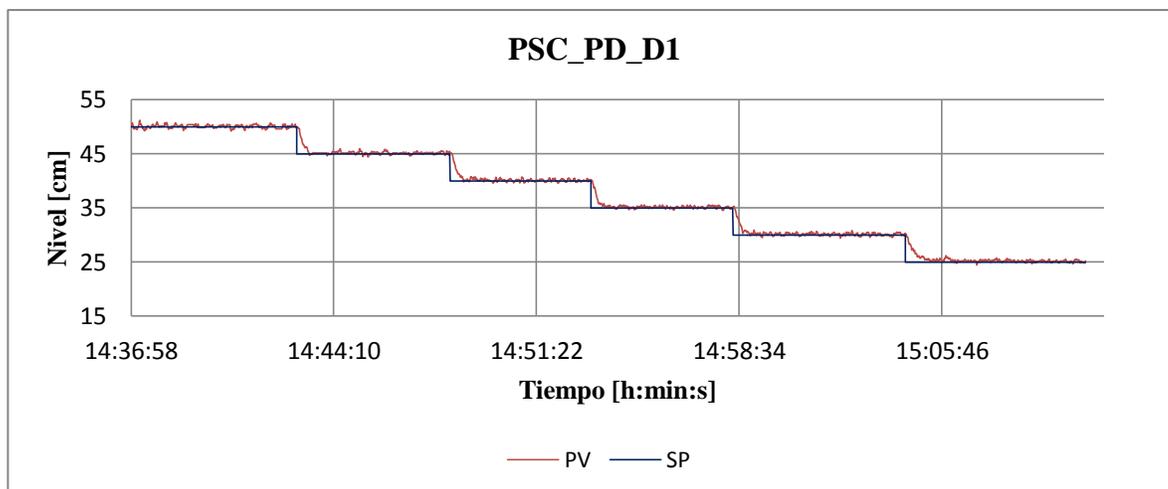


Figura 3.43 Variable controlada con control PD utilizando posicionador inteligente

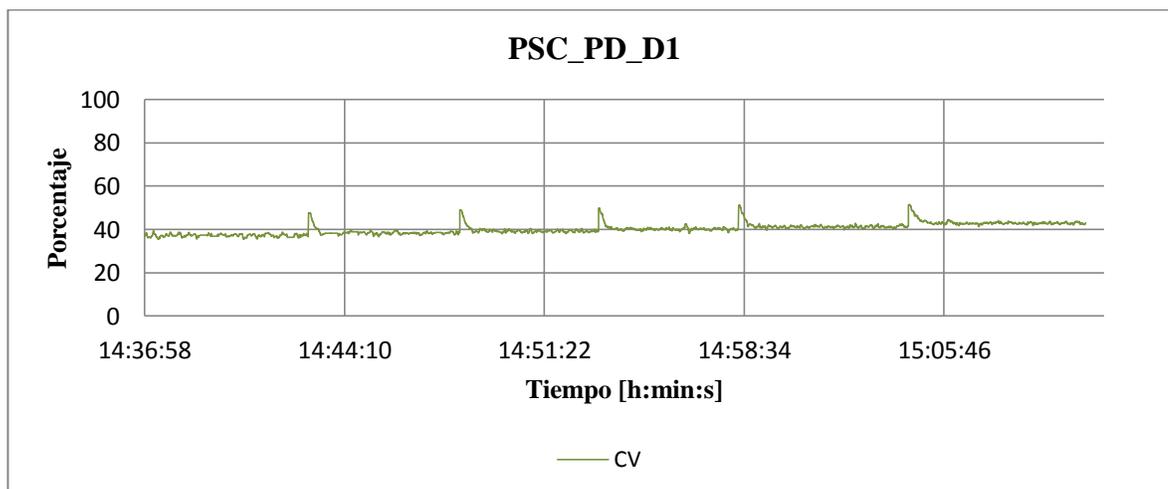


Figura 3.44 Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.12

Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba descendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>50-45</b>	
Tr	17	19
Ts	308	194
Tp	27	–
%OS	20,4	0
Error	0	0

CONTINÚA →

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>45-40</b>		
Tr	12	22
Ts	–	212
Tp	28	–
%OS	32	0
Error	1	0
<b>40-35</b>		
Tr	12	20
Ts	491	212
Tp	29	–
%OS	16	0
Error	0	0
<b>35-30</b>		
Tr	18	15
Ts	345	254
Tp	30	–
%OS	19,2	0
Error	0	0
<b>30-25</b>		
Tr	11	40
Ts	138	218
Tp	34	–
%OS	25,4	0
Error	0	0

La Tabla 3.12 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba descendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 25 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 40 segundos en características similares con la diferencia que se utilizó posicionador. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 345 segundos en la prueba CIP\_PD\_D1 en el cambio de punto de consigna de 35 a 30 cm en contraste con el menor tiempo que es de 194 en el cambio de consigna de 50 a 45 cm utilizando posicionador.

En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 32% registrado en la prueba CIP\_PD\_D1 en el cambio de punto de consigna de 45 a 40 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el conversor I/P se registró un caso en el que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

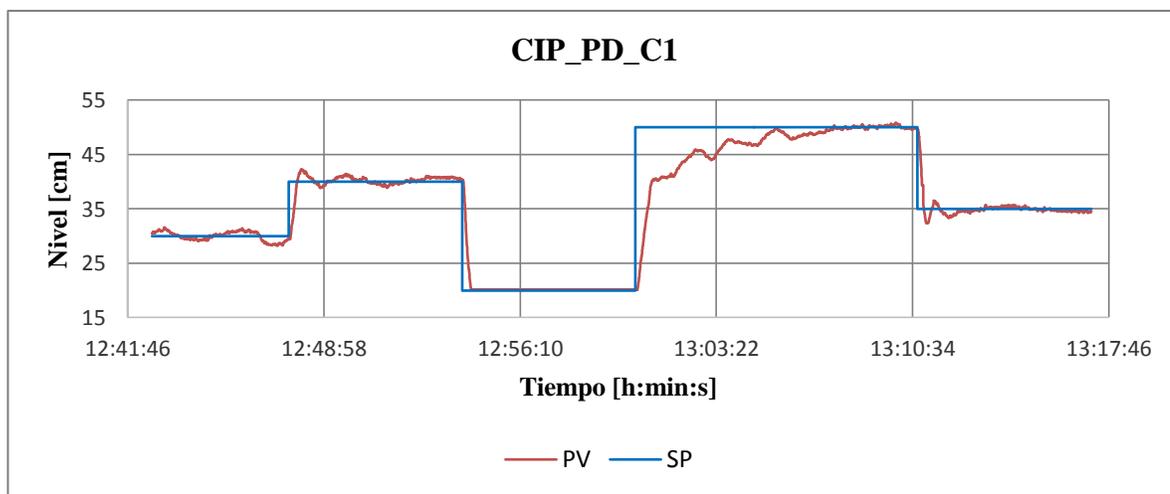


Figura 3.45 Variable controlada con control PD utilizando conversor I/P

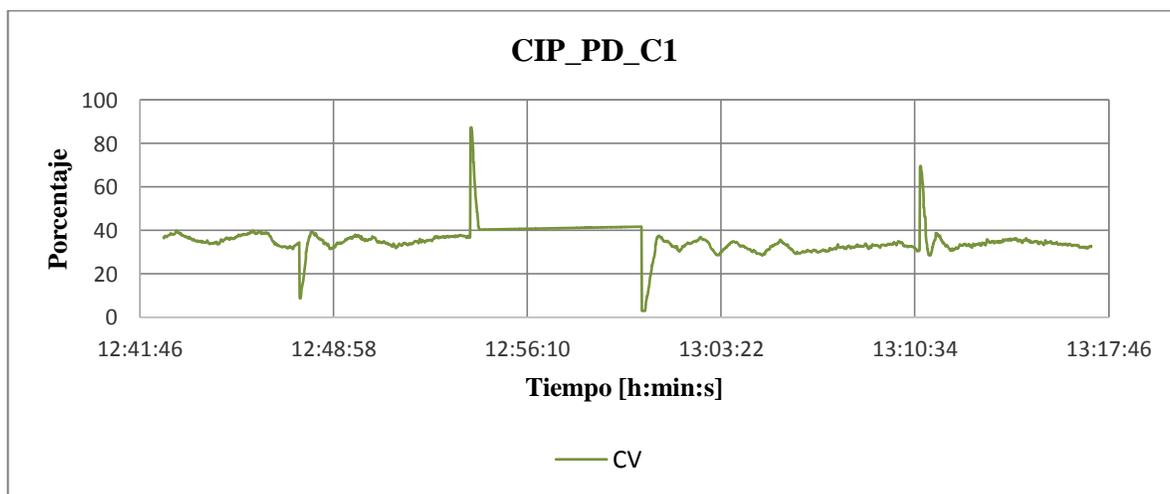


Figura 3.46 Variable de control con control PD utilizando conversor I/P

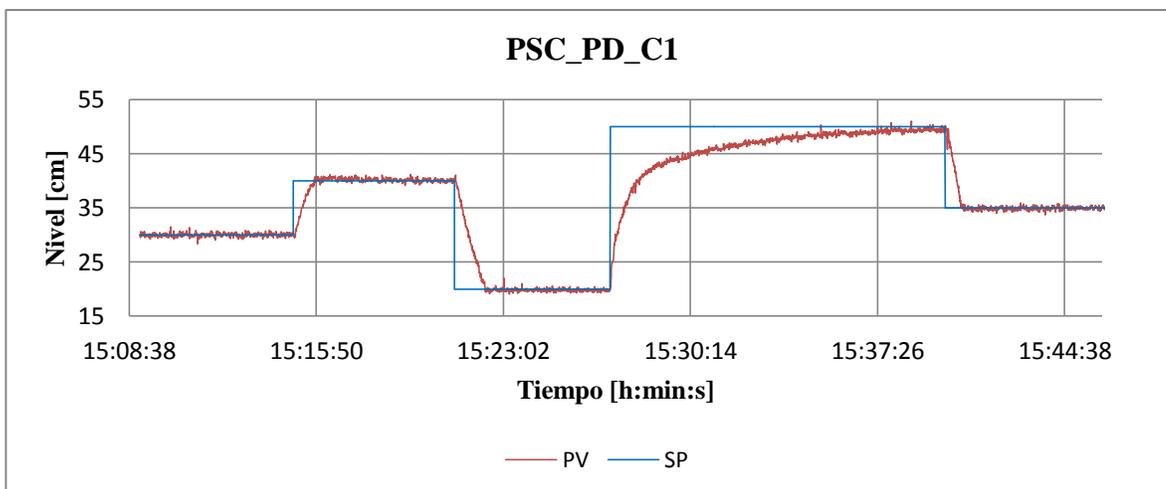


Figura 3.47 Variable controlada con control PD utilizando posicionador inteligente

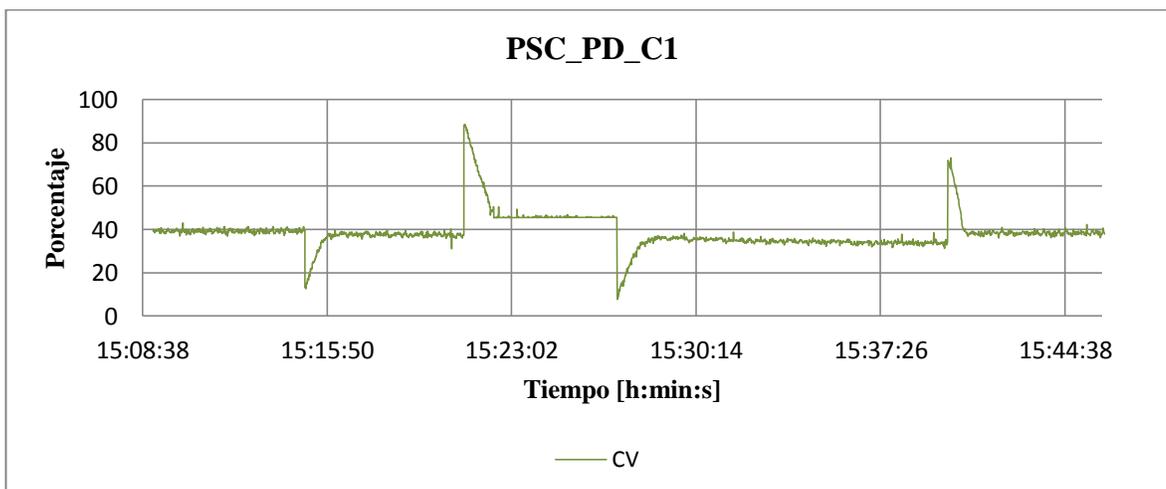


Figura 3.48 Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.13

Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba combinada 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>30-40</b>	
Tr	11	32
Ts	–	329
Tp	27	–
%OS	23	0
Error	1	0

CONTINÚA→

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>40-20</b>		
Tr	13	52
Ts	14	115
Tp	–	–
%OS	0	0
Error	0	0
<b>20-50</b>		
Tr	188	311
Ts	582	578
Tp	–	–
%OS	0	0
Error	0	0
<b>50-35</b>		
Tr	7	20
Ts	117	261
Tp	80	–
%OS	17,6	0
Error	0	0

La Tabla 3.13 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 7 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 50 a 35 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 311 segundos en la prueba PSC\_PD\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 582 segundos en la prueba CIP\_PD\_C1 en el cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm en contraste con el menor tiempo que es de 115 segundos en el cambio de consigna de 40 a 20 cm al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es 23% registrado en la prueba CIP\_PD\_C1 en el cambio de punto de consigna de 30 a 40 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el convertor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm. En

cuanto al comportamiento del actuador se puede observar que las variaciones al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

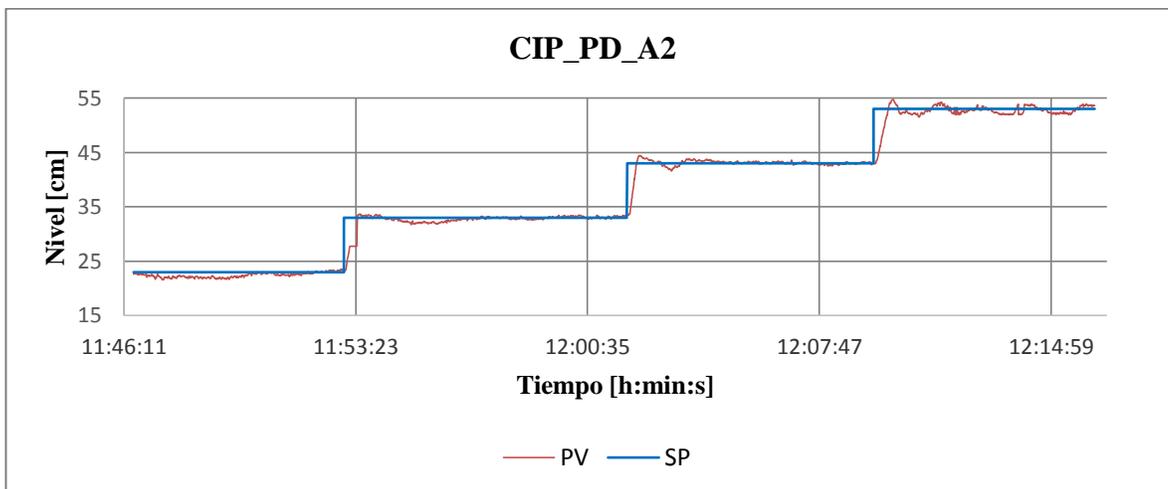


Figura 3.49 Variable controlada con control PD utilizando convertor I/P

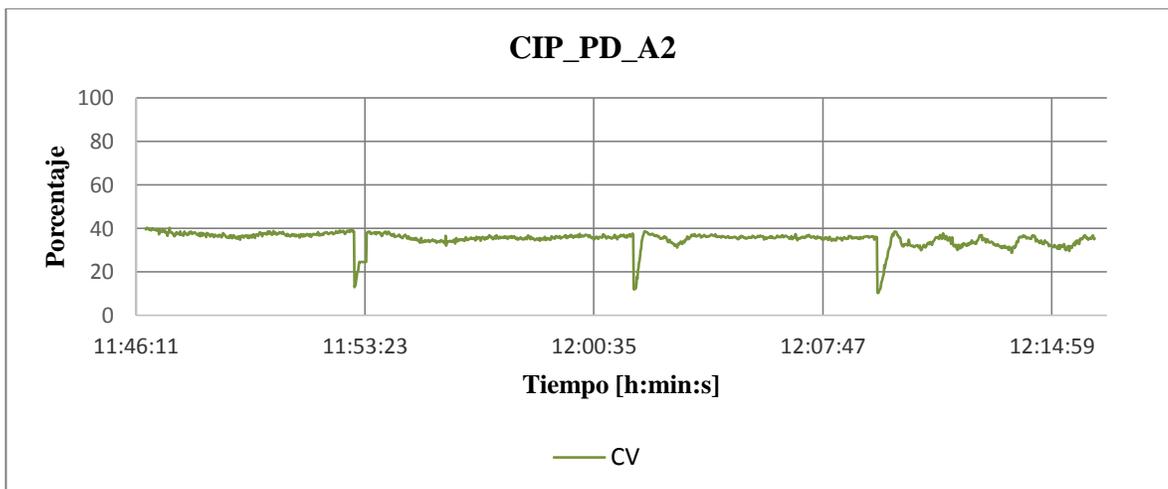


Figura 3.50 Variable de control con control PD utilizando convertor I/P

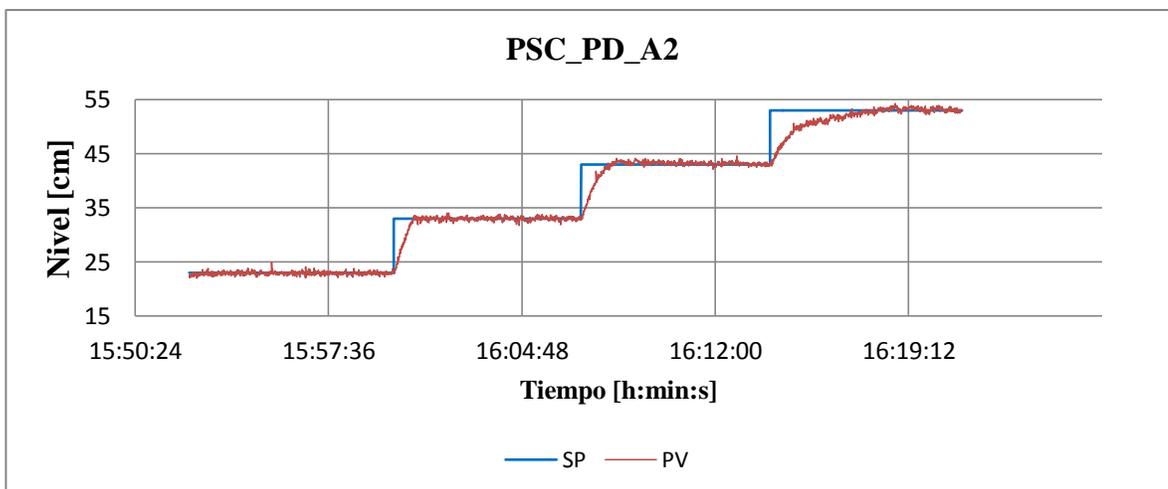


Figura 3.51 Variable controlada con control PD utilizando posicionador inteligente

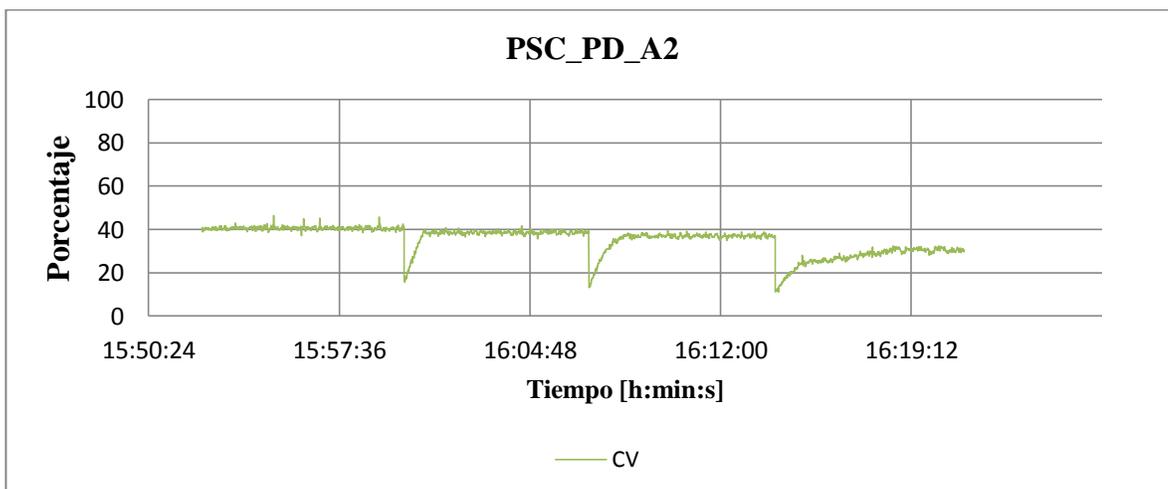


Figura 3.52 Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.14

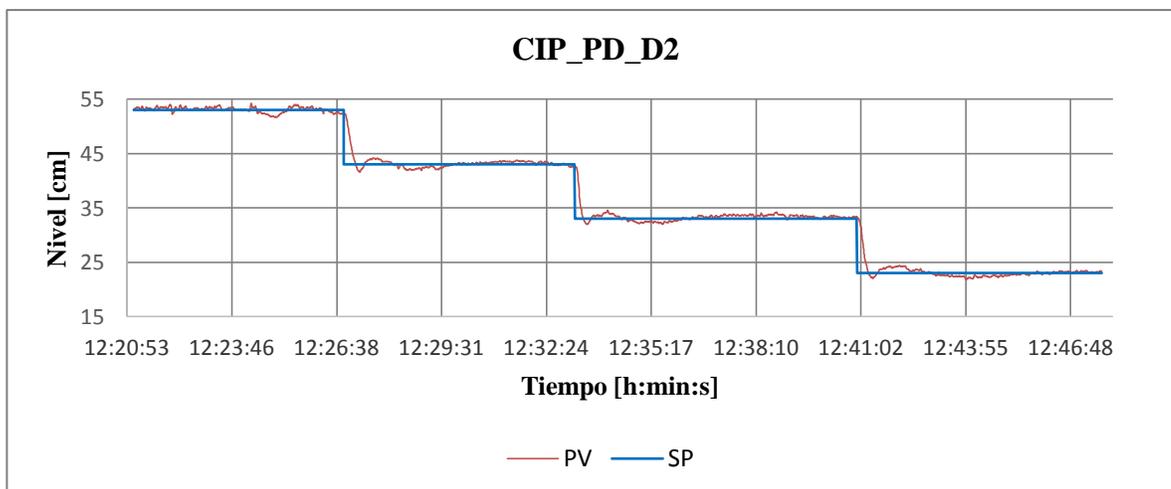
Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba ascendente 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>23-33</b>	
Tr	20	32
Ts	231	374
Tp	25	–
%OS	6,6	0
Error	0	0

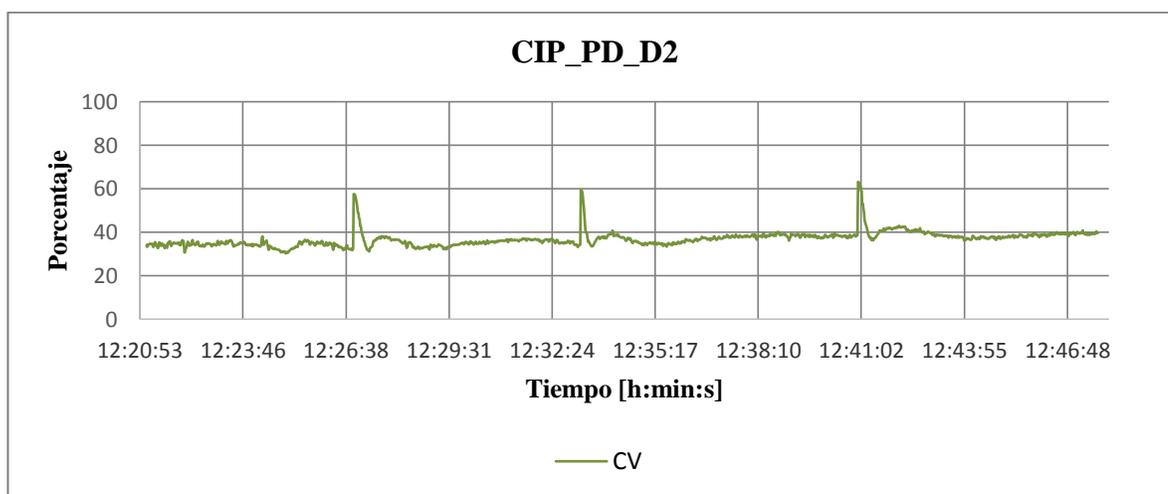
CONTINÚA →

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>33-43</b>		
Tr	10	46
Ts	307	351
Tp	22	–
%OS	14,7	0
Error	0	0
<b>43-53</b>		
Tr	18	126
Ts	–	405
Tp	36	–
%OS	58	0
Error	1	0

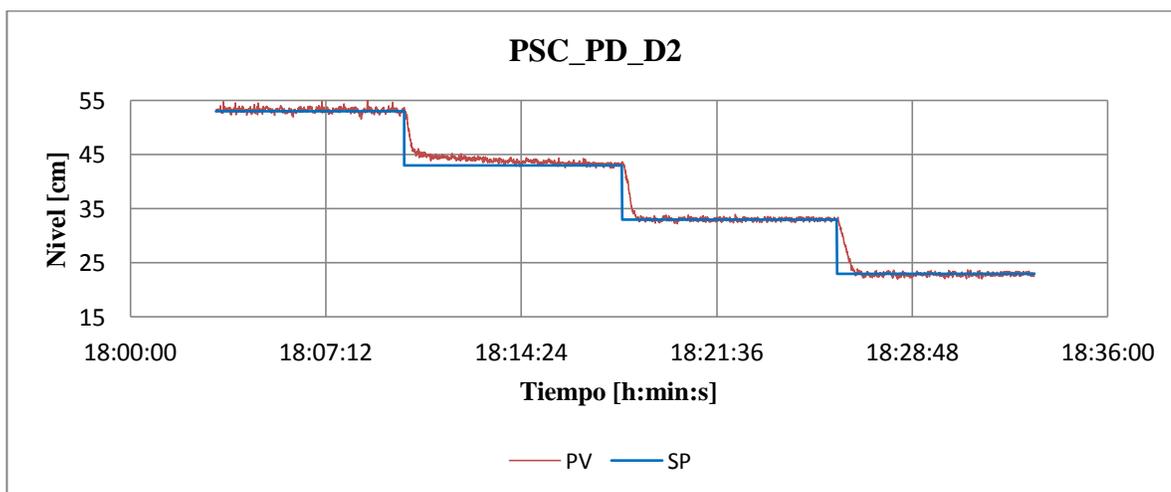
Tabla 3.14 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 10 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_A2, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 43 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 126 segundos en la prueba PSC\_PD\_A2, al realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 53 cm. Y registra un tiempo de estabilidad de 405 segundos, que es el tiempo de mayor magnitud pero en la prueba CIP\_PD\_A2 en el cambio de punto de consigna de 20 a 25 cm no se logra estabilizar el sistema, manteniendo un error en estado estable de  $\pm 1$ cm, registrando el mayor porcentaje de sobreimpulso correspondiente a 58% mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso para ningún caso. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.



**Figura 3.53 Variable controlada con control PD utilizando convertor I/P**



**Figura 3.54 Variable de control con control PD utilizando convertor I/P**



**Figura 3.55 Variable controlada con control PD utilizando posicionador inteligente**

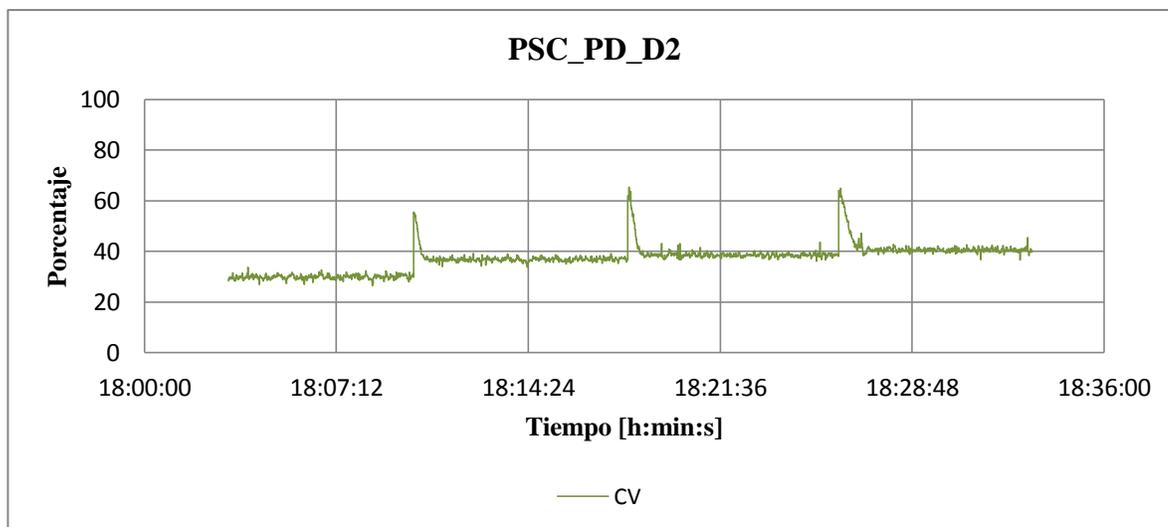


Figura 3.56 Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.15

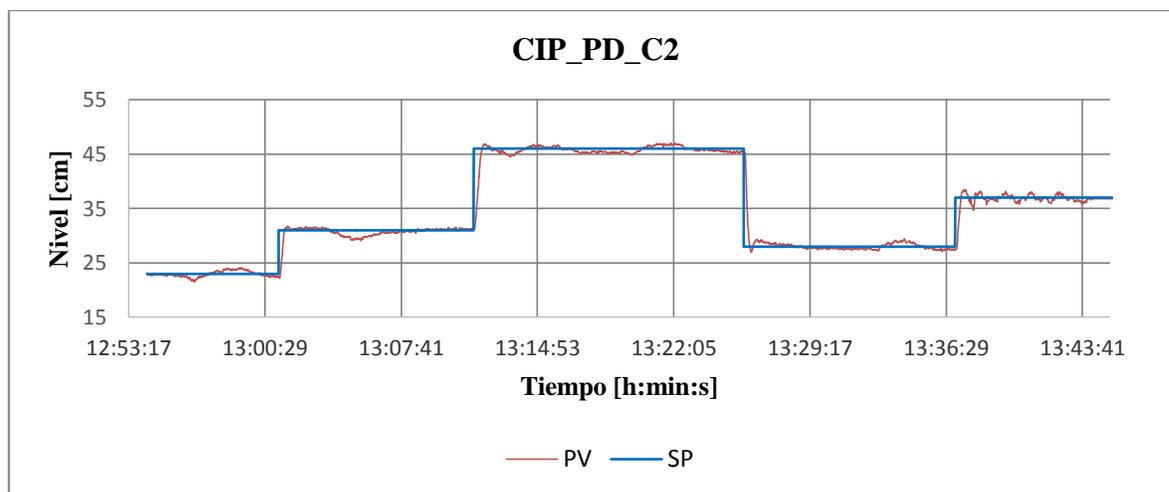
Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba descendente 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>53-43</b>		
Tr	14	22
Ts	335	423
Tp	26	–
%OS	14	0
Error	0	0
<b>43-33</b>		
Tr	8	21
Ts	428	322
Tp	–	–
%OS	0	0
Error	0	0
<b>33-23</b>		
Tr	11	30
Ts	242	322
Tp	–	–
%OS	8,6	0
Error	0	0

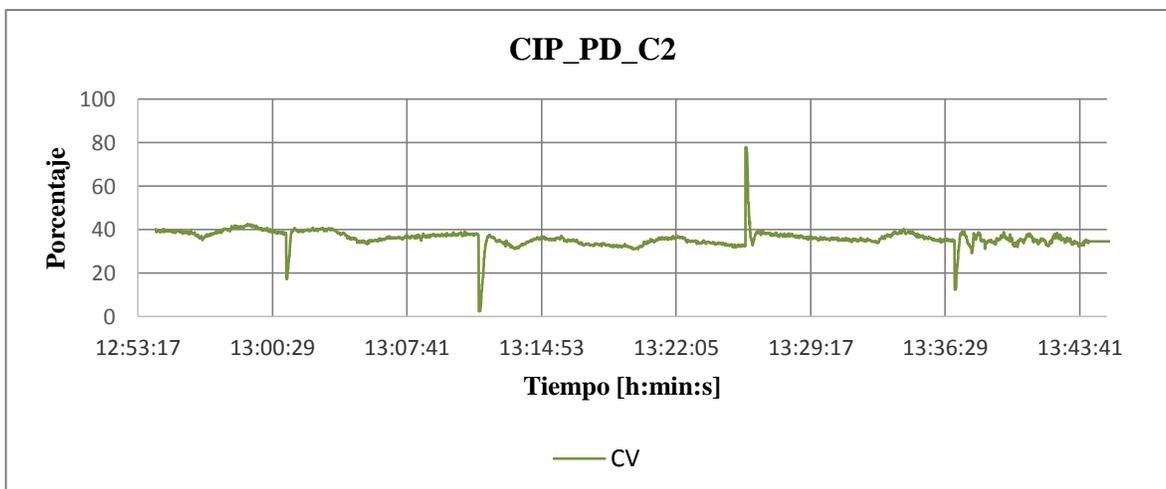
La Tabla 3.15 permite comparar el comportamiento del sistema utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo. El

menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 23 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 30 segundos en una prueba similar al utilizar posicionador. El mayor tiempo de estabilidad es de 423 segundos obtenido en la prueba PSC\_PD\_D2 en el cambio de punto de consigna de 53 a 43 cm y el menos tiempo es de 442 segundo registrados en la prueba con posicionador en un cambio de consigan de 33 a 23 cm. Las pruebas desarrolladas con conversor presentan sobreimpulso con un valor máximo de 14% mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso para ningún caso.

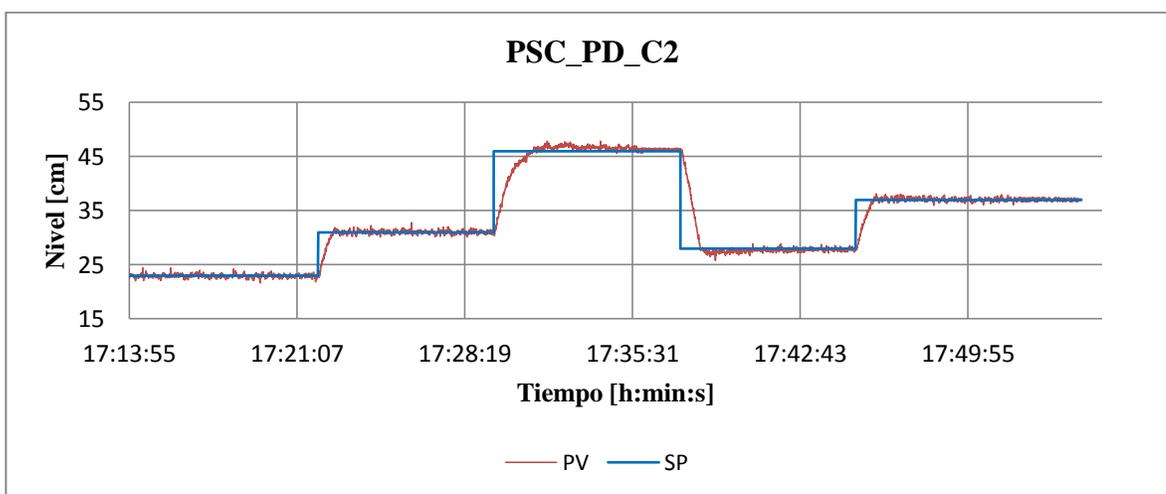
En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar que las variaciones al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.



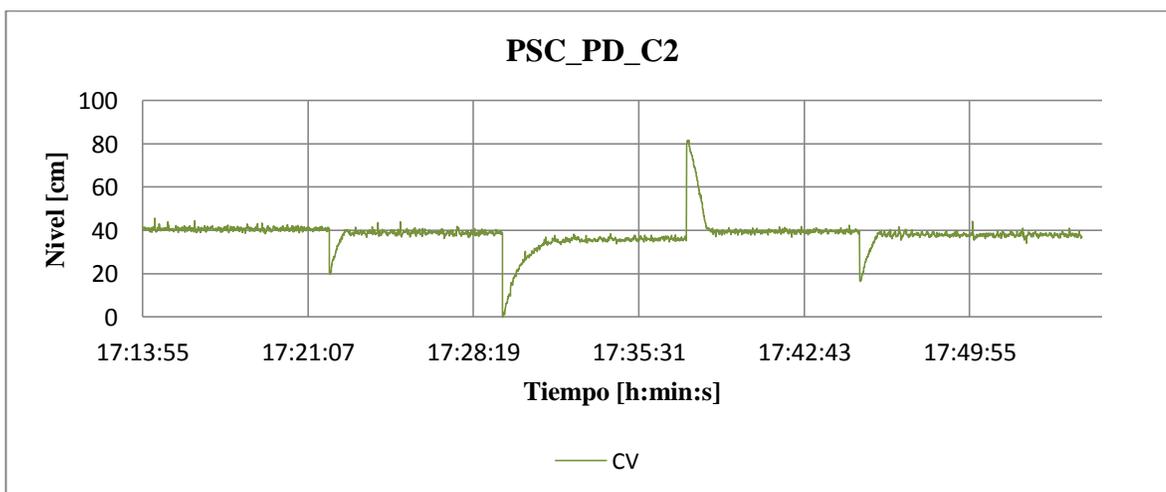
**Figura 3.57** Variable controlada con control PD utilizando conversor I/P



**Figura 3.58** Variable de control con control PD utilizando convertor I/P



**Figura 3.59** Variable controlada con control PD utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.60** Variable de control con control PD utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.16

## Parámetros de respuesta del sistema con control PD prueba combinada 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-31</b>		
Tr	9	27
Ts	563	412
Tp	28	–
%OS	9,75	0
Error	0	0
<b>31-46</b>		
Tr	17	67
Ts	821	369
Tp	25	–
%OS	5	0
Error	0	0
<b>46-28</b>		
Tr	11	38
Ts	539	179
Tp	18	–
%OS	5	0
Error	0	0
<b>28-37</b>		
Tr	12	32
Ts	381	408
Tp	24	–
%OS	14,2	0
Error	0	0

La Tabla 3.15 permite comparar el comportamiento del sistema utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional derivativo en una prueba de escalones ascendentes y descendentes. El menor tiempo de levantamiento es de 9 segundos, registrado en la prueba CIP\_PD\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 23 a 31 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 67 segundos en una prueba PSC\_PD\_C2 en un cambio de consigna de 31 a 46 cm. El menor tiempo que el sistema toma en estabilizarse es de 179 segundos obtenido en la prueba PSC\_PD\_D2 en el cambio de punto de consigna de 46 a 28 cm y el mayor tiempo es de 821 segundos registrados en la prueba con convertor I/P en un cambio de consigna

de 31 a 46 cm. Las pruebas desarrolladas con convertor presentan sobreimpulso con un valor máximo de 14.2% mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso para ningún caso.

En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

### 3.3.3 Proporcional integral

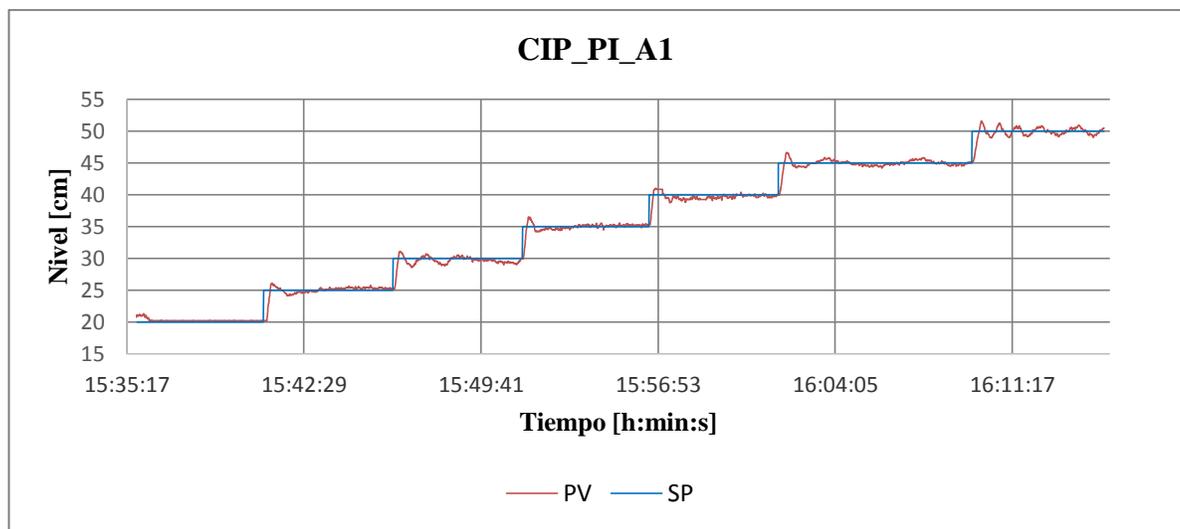


Figura 3.61 Variable controlada con control PI utilizando convertor I/P

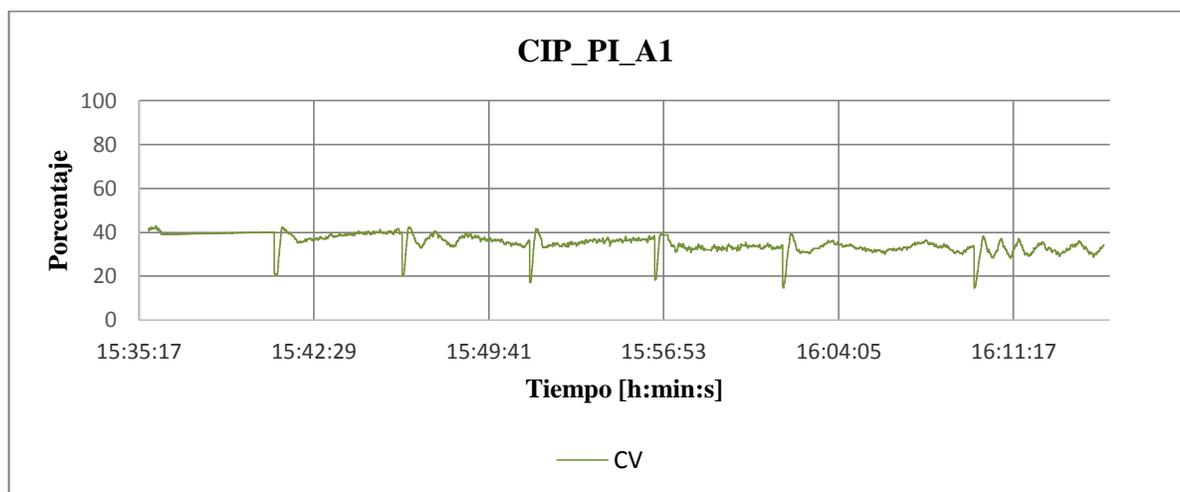
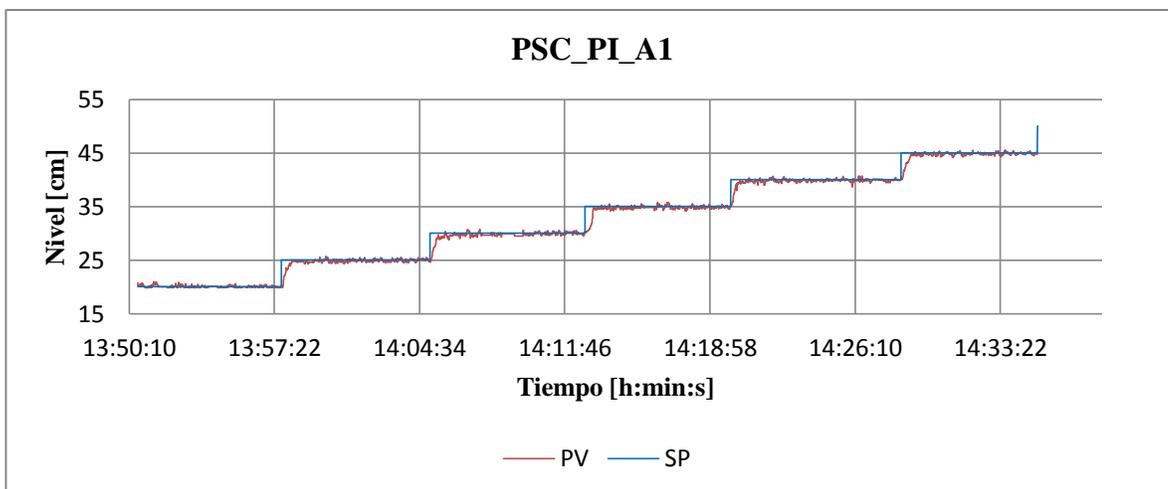
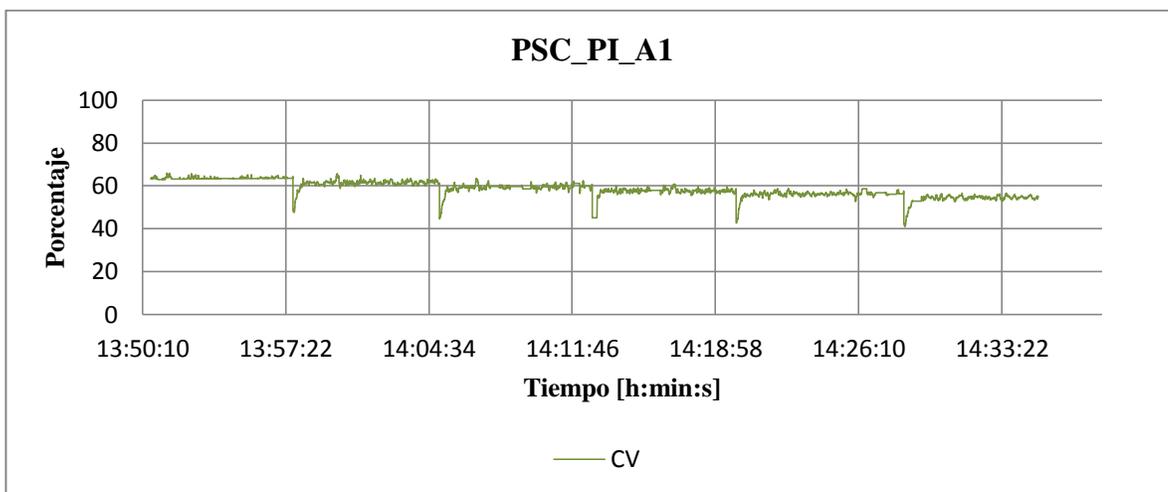


Figura 3.62 Variable de control con control PI utilizando convertor I/P



**Figura 3.63 Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente**



**Figura 3.64 Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente**

**Tabla 3.17**

**Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba ascendente 1**

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>20-25</b>	
Tr	8	24
Ts	263	198
Tp	19	—
%OS	19,4	—
Error	—	—
	<b>25-30</b>	
Tr	8	28

**CONTINÚA →**

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>Ts</b>	–	278
<b>Tp</b>	15	–
<b>%OS</b>	18,2	–
<b>Error</b>	0,75	–
<b>30-35</b>		
<b>Tr</b>	6	25
<b>Ts</b>	238	321
<b>Tp</b>	14	–
<b>%OS</b>	27,8	–
<b>Error</b>	–	–
<b>35-40</b>		
<b>Tr</b>	7	22
<b>Ts</b>	210	416
<b>Tp</b>	16	–
<b>%OS</b>	99,8	–
<b>Error</b>	–	–
<b>40-45</b>		
<b>Tr</b>	10	27
<b>Ts</b>	360	310
<b>Tp</b>	19	–
<b>%OS</b>	30,6	–
<b>Error</b>	–	–
<b>45-50</b>		
<b>Tr</b>	12	0
<b>Ts</b>	–	–
<b>Tp</b>	23	–
<b>%OS</b>	32,2	–
<b>Error</b>	1	0

La Tabla 3.17 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba ascendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 35 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 28 segundos en la prueba PSC\_PI\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 25 a 30 cm. Por lo contrario el menor tiempo de estabilidad es de 198 segundos en la prueba CIP\_PI\_A1 en el cambio de punto de consigna de 20 a 25 cm. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 32.2% registrado en la

prueba CIP\_PI\_A1 en el cambio de punto de consigna de 45 a 50 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el convertor I/P se registró un caso en el que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

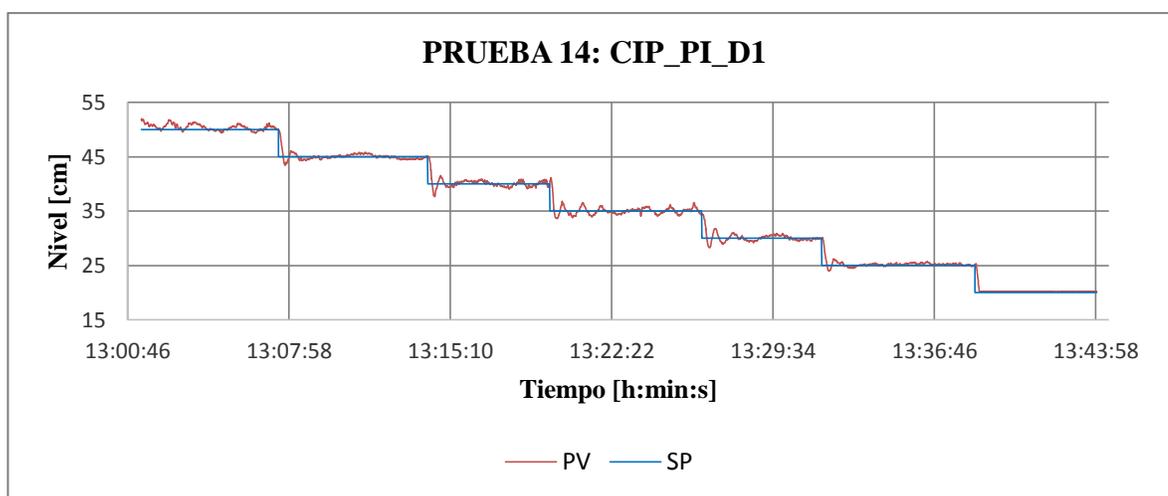


Figura 3.65 Variable controlada con control PI utilizando convertor I/P

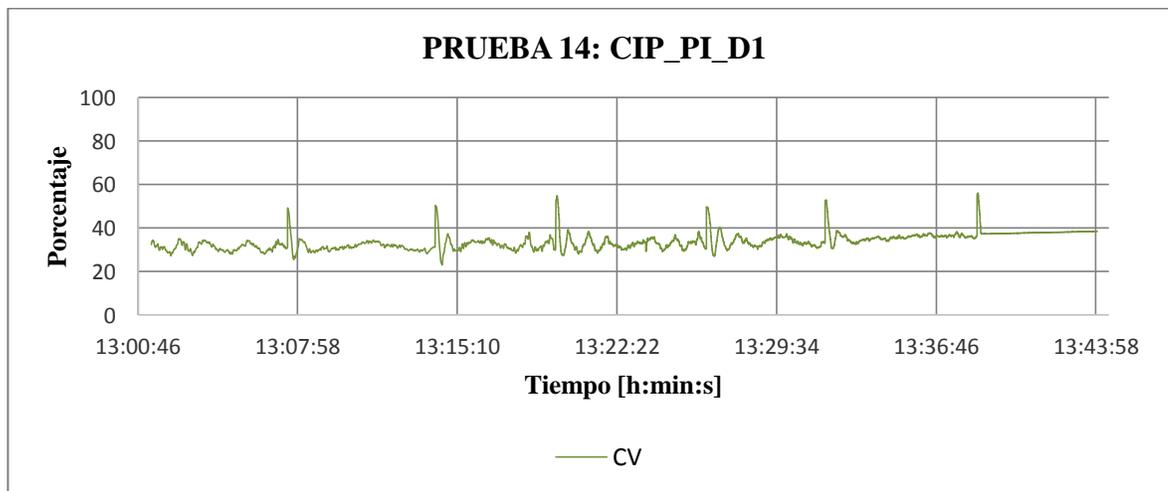


Figura 3.66 Variable de control con control PI utilizando convertor I/P

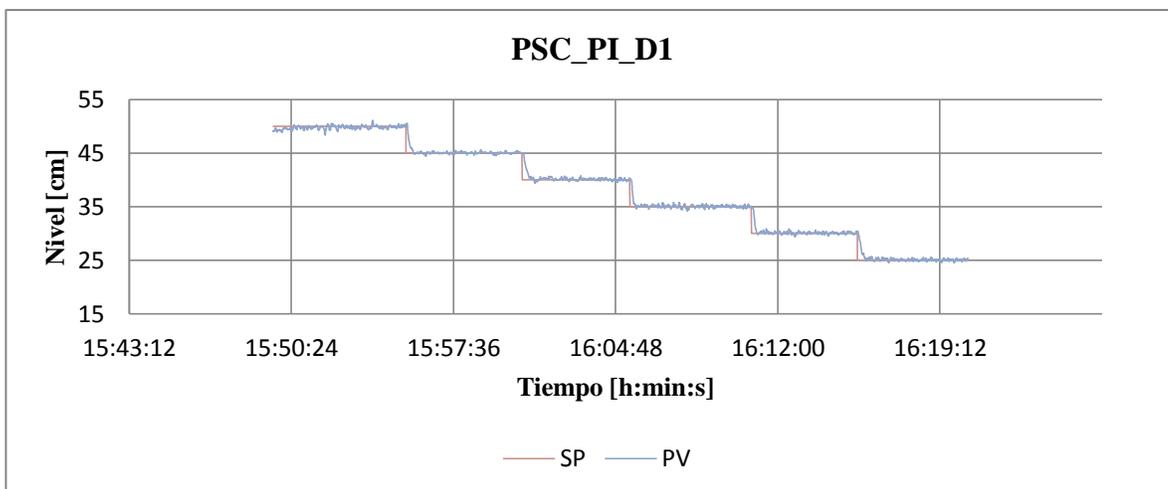


Figura 3.67 Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente

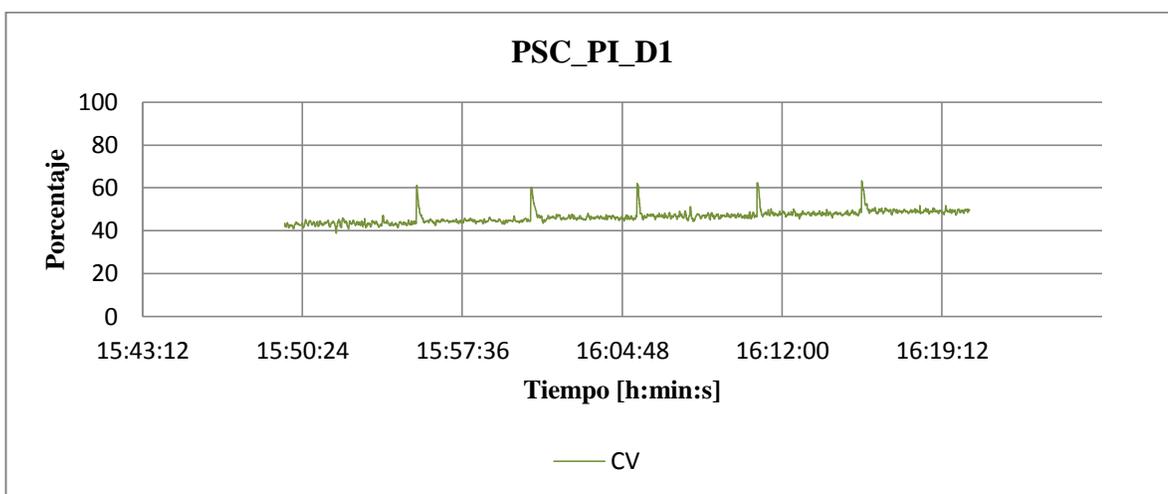


Figura 3.68 Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.18

Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba descendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>50-45</b>	
Tr	9	13
Ts	346	200
Tp	17	—
%OS	28,6	—
Error	—	—
	<b>45-40</b>	
Tr	5	14

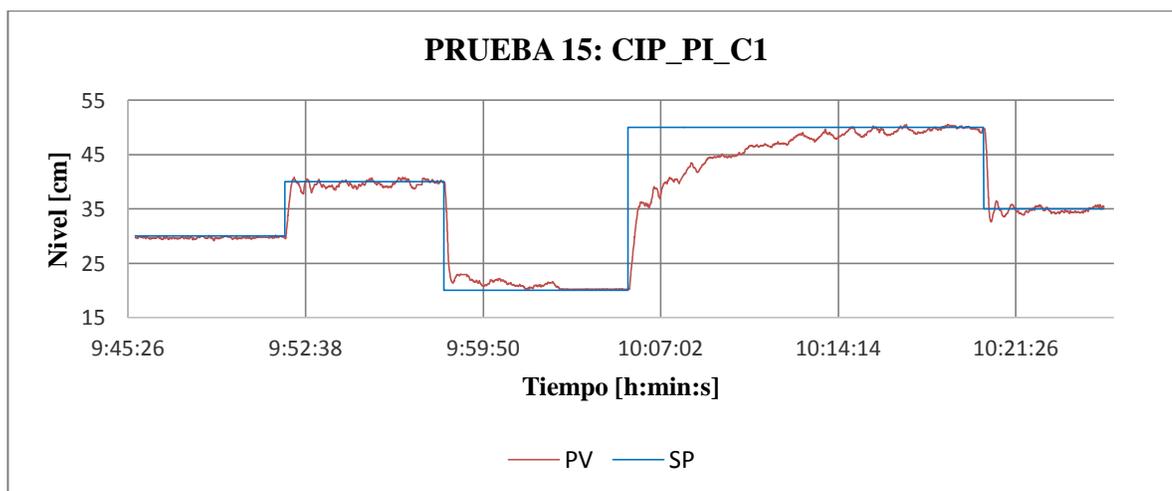
CONTINÚA →

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>Ts</b>	–	156
<b>Tp</b>	15	–
<b>%OS</b>	42	–
<b>Error</b>	1	–
<b>40-35</b>		
<b>Tr</b>	4	6
<b>Ts</b>	–	203
<b>Tp</b>	15	–
<b>%OS</b>	24,8	–
<b>Error</b>	1	–
<b>35-30</b>		
<b>Tr</b>	7	8
<b>Ts</b>	256	171
<b>Tp</b>	18	–
<b>%OS</b>	32,8	–
<b>Error</b>	–	–
<b>30-25</b>		
<b>Tr</b>	9	15
<b>Ts</b>	287	195
<b>Tp</b>	17	–
<b>%OS</b>	18	–
<b>Error</b>	–	–
<b>25-20</b>		
<b>Tr</b>	6	0
<b>Ts</b>	12	0
<b>Tp</b>	–	–
<b>%OS</b>	–	–
<b>Error</b>	–	–

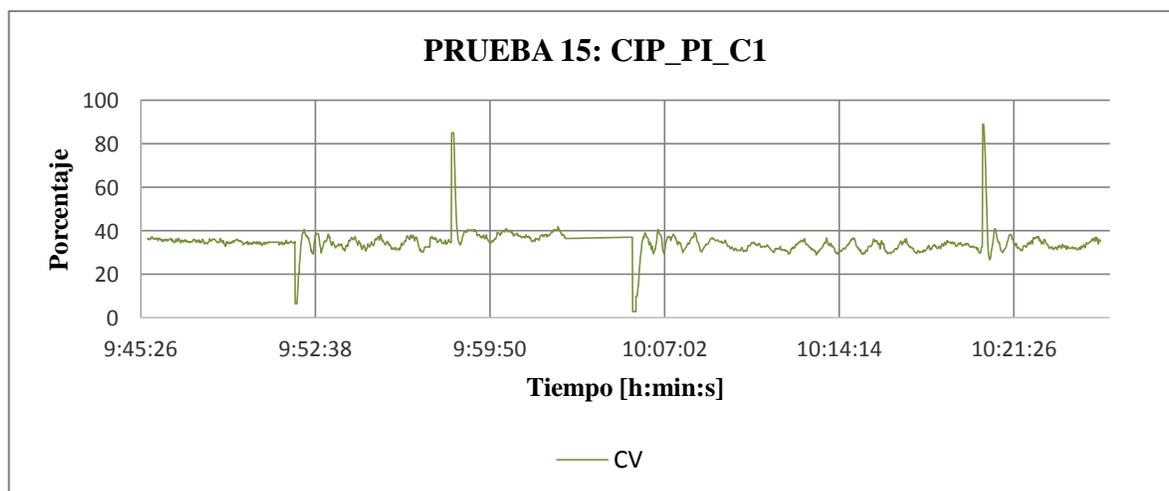
La Tabla 3.18 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba descendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 4 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 40 a 35 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 15 segundos en la prueba PSC\_PI\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 25 cm. Por el contrario el tiempo de estabilidad de mayor valor corresponde a 346 segundos en la prueba CIP\_PI\_A1 en el cambio de punto de consigna de 50 a 45 cm en contraste con el menor tiempo que es de

156 en el cambio de consigna de 45 a 40 cm pero al utilizar posicionador. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 32.8% registrado en la prueba CIP\_PD\_A1 en el cambio de punto de consigna de 35 a 30 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el conversor I/P se registraron casos en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.



**Figura 3.69 Variable controlada con control PI utilizando conversor I/P**



**Figura 3.70 Variable de control con control PI utilizando conversor I/P**

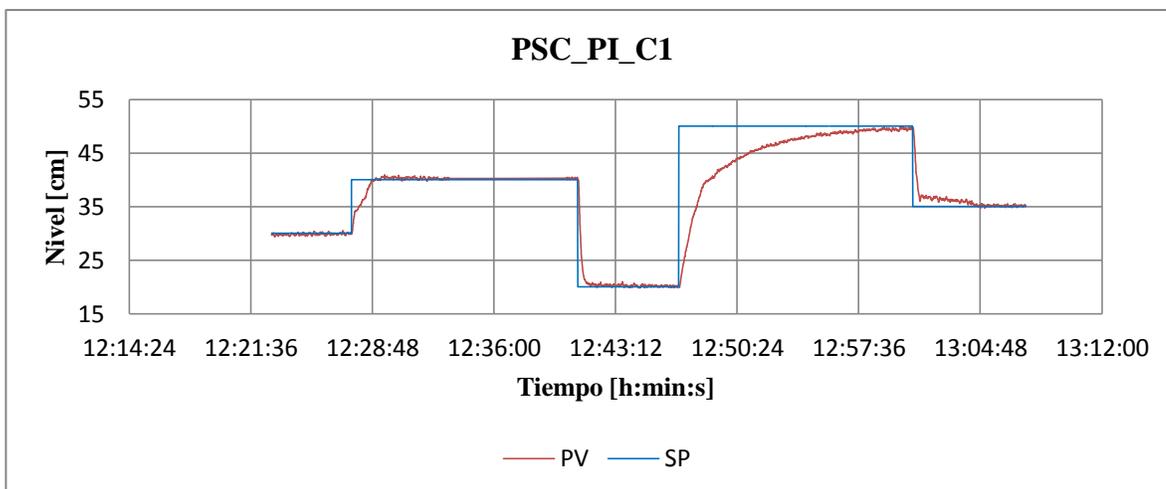


Figura 3.71 Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente

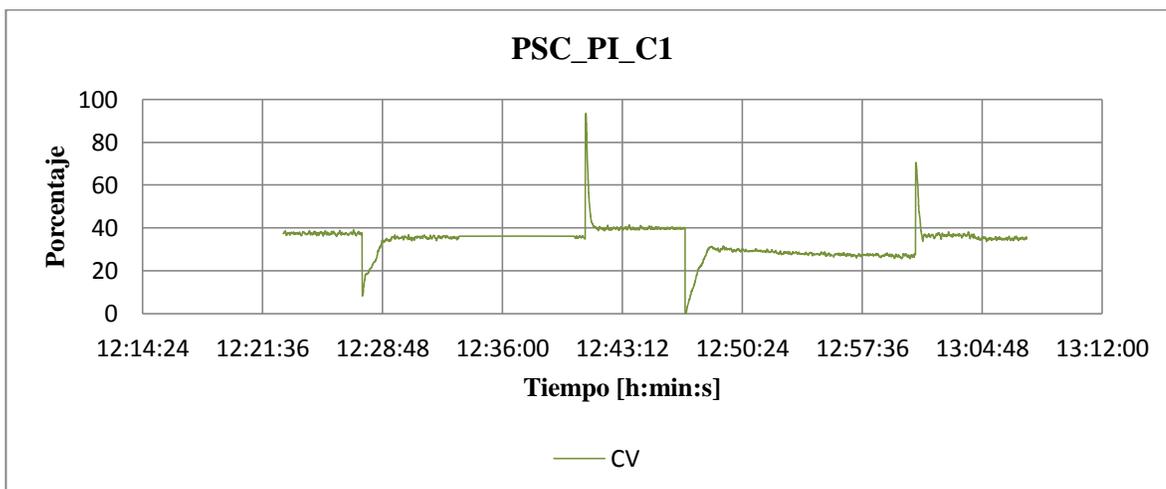


Figura 3.72 Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.19

Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba combinada 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>30-40</b>	
Tr	11	63
Ts	—	260
Tp	23	—
%OS	8,1	—
Error	0,885	—
	<b>40-20</b>	

CONTINÚA →

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
Tr	14	17
Ts	270	28
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>20-50</b>		
Tr	363	354
Ts	576	537
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>50-35</b>		
Tr	42	20
Ts	243	251
Tp	16	–
%OS	15,86666667	–
Error	–	–

Tabla 3.19 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 30 a 40 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 363 segundos en la misma prueba, al realizar un cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm con un tiempo de estabilidad de 576 segundos mientras que el menor tiempo que tarde en estabilizarse el sistema es de 28 en la prueba PSC\_PI\_D1 en el cambio de punto de consigna de 40 a 20 cm. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 15.8% registrado en la prueba CIP\_PI\_D1 en el cambio de punto de consigna de 50 a 35 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar el convertor I/P se registró un caso en los que no se llegó a la estabilidad del sistema, manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 0.88$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de

desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

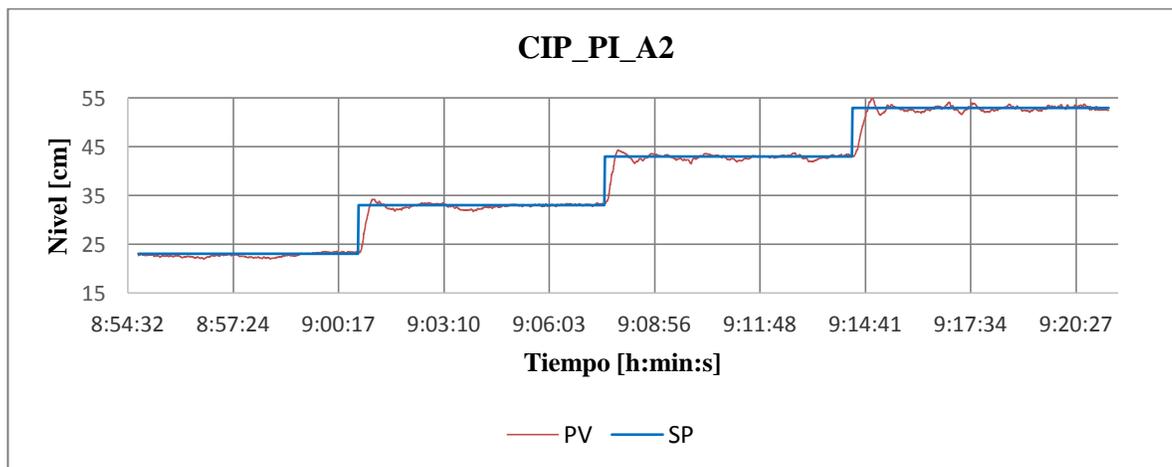


Figura 3.73 Variable controlada con control PI utilizando convertor I/P

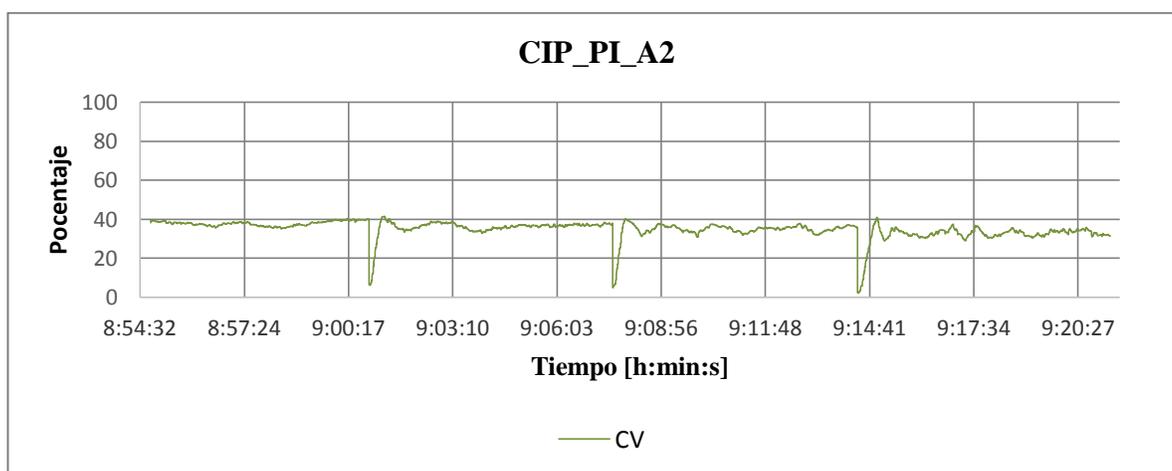


Figura 3.74 Variable de control con control PI utilizando convertor I/P

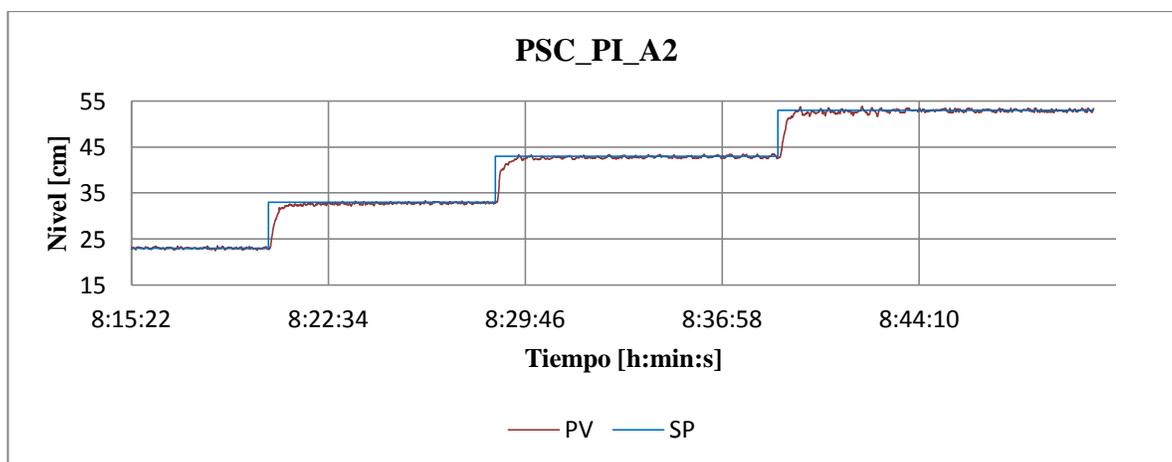
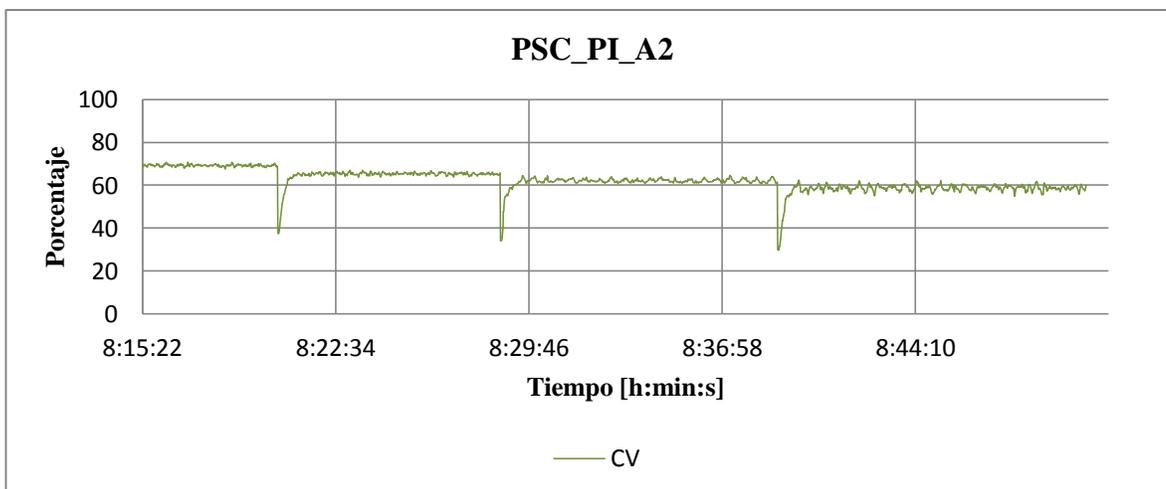


Figura 3.75 Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.76 Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente**

**Tabla 3.20**

**Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba ascendente 2**

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-33</b>		
Tr	13	31
Ts	220	254
Tp	26	—
%OS	12	—
Error	—	—
<b>33-43</b>		
Tr	12	32
Ts	350	265
Tp	21	—
%OS	13	—
Error	—	—
<b>43-53</b>		
Tr	16	27
Ts	382	246
Tp	34	—
%OS	18,8	—
Error	—	—

La Tabla 3.20 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba combinada utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 12 segundos,

registrado en la prueba CIP\_PI\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 43 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 32 segundos en la misma prueba al utilizar el posicionador. El tiempo de estabilidad de menor valor corresponde a 246 segundos en la prueba PSC\_PI\_C1 en el cambio de punto de consigna de 43 a 53 cm mientras que el mayor valor corresponde a 382 en la misma prueba realizada con convertor I/P. En cuanto al sobreimpulso el mayor porcentaje es de 18.8% registrado en la prueba CIP\_PI\_C1 en el cambio de punto de consigna de 43 a 53 cm mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

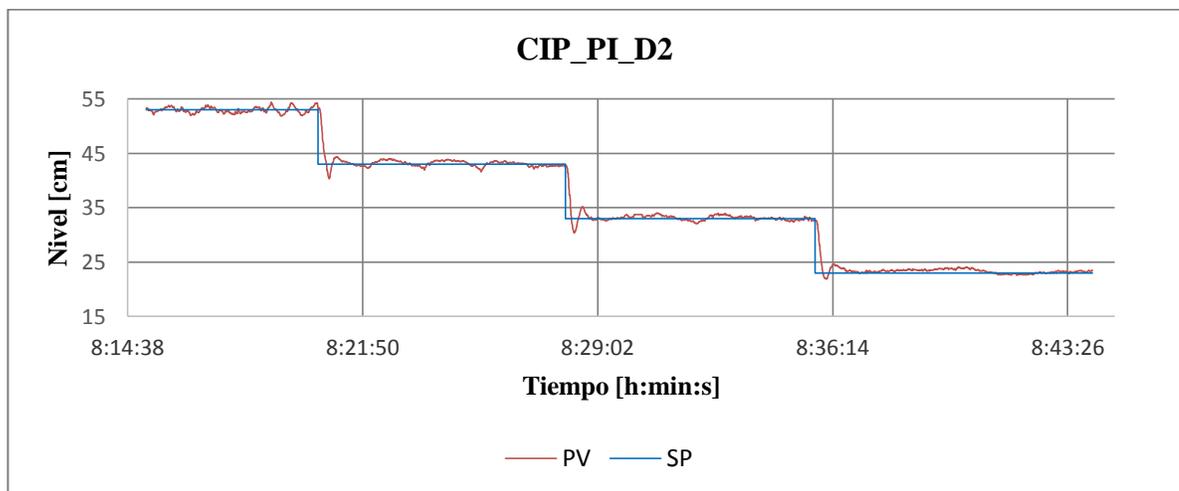
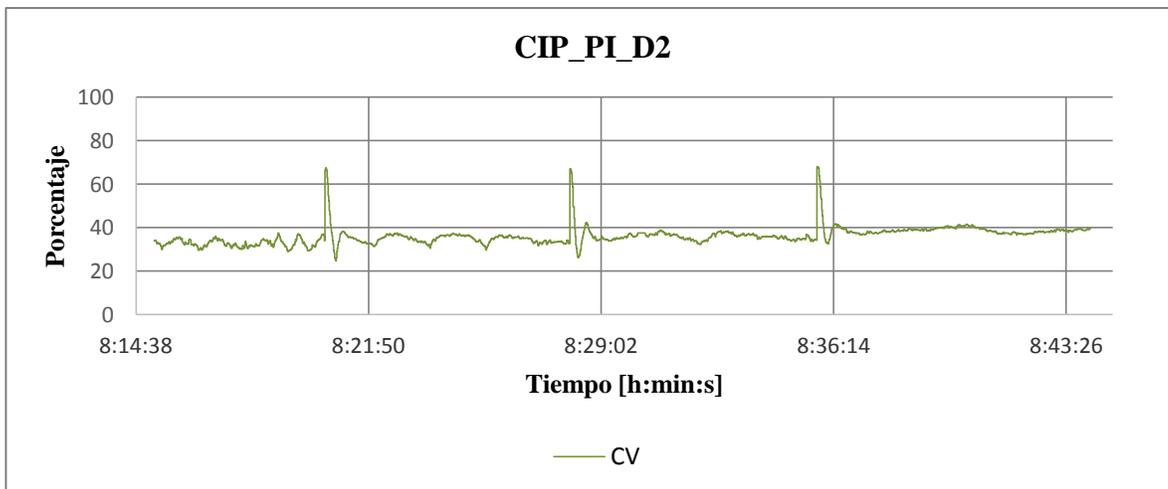
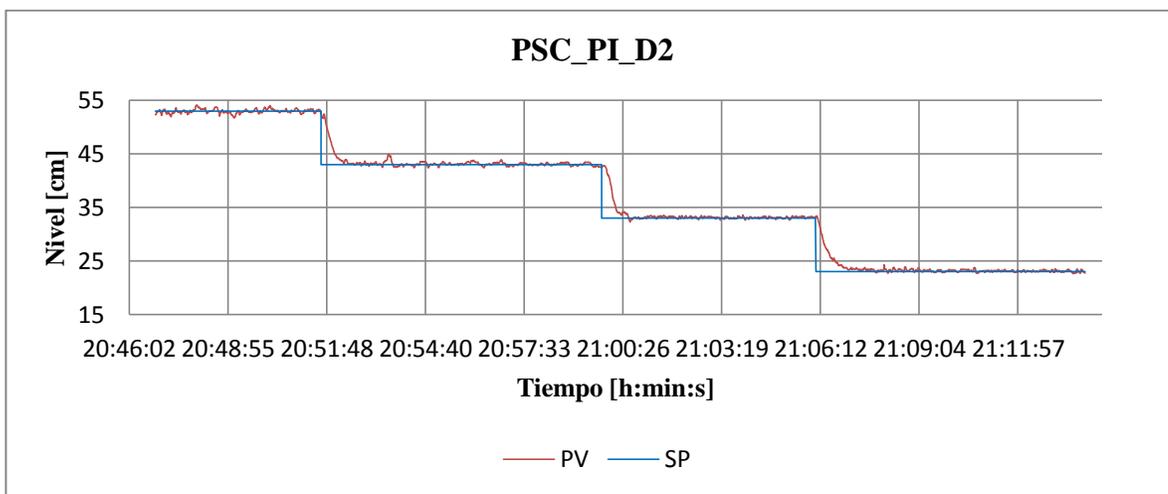


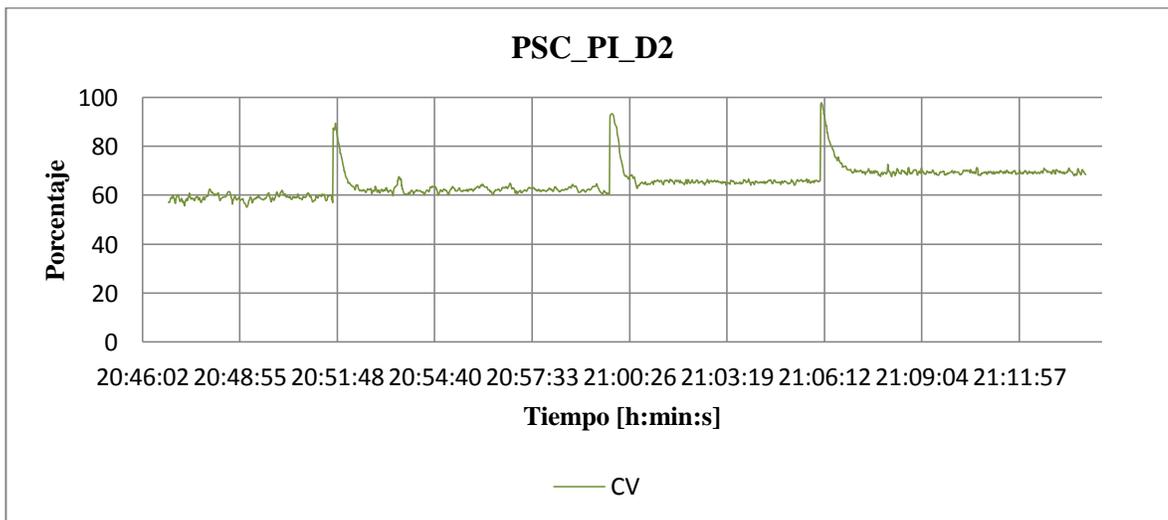
Figura 3.77 Variable controlada con control PI utilizando convertor I/P



**Figura 3.78** Variable de control con control PI utilizando convertor I/P



**Figura 3.79** Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.80** Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente

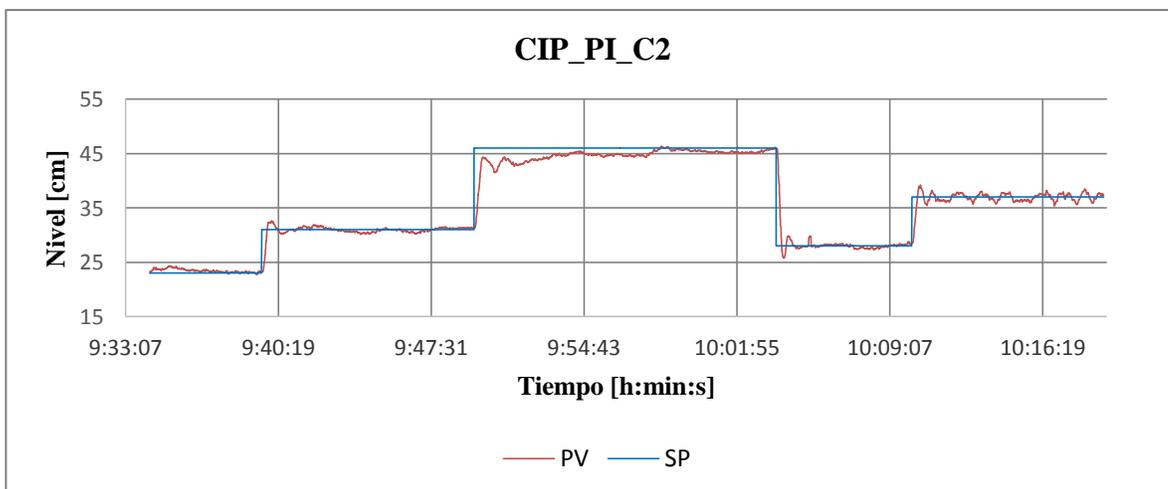
Tabla 3.21

## Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba descendente 2

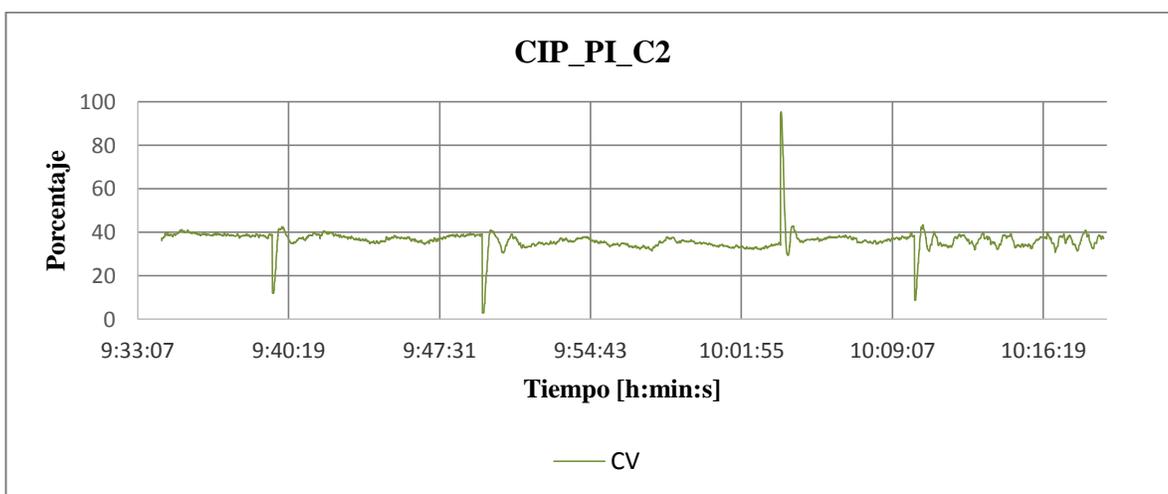
Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>53-43</b>		
Tr	8	29
Ts	405	317
Tp	20	–
%OS	25	–
Error	–	–
<b>43-33</b>		
Tr	6	19
Ts	421	248
Tp	16	–
%OS	26,7	–
Error	–	–
<b>33-23</b>		
Tr	9	34
Ts	301	279
Tp	20	–
%OS	11,4	–
Error	–	–

La Tabla 3.21 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba descendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 34 segundos en la prueba PSC\_PI\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 23 cm. El tiempo de estabilidad de 279 segundos es el menor y se registró en la prueba PSC\_PI\_D2 en un escalón de 33 a 23 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 421 en la prueba CIP\_PI\_D2 en el cambio de punto de consigna de 43 a 33 con un sobreimpulso 26.7% que es el más significativo mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

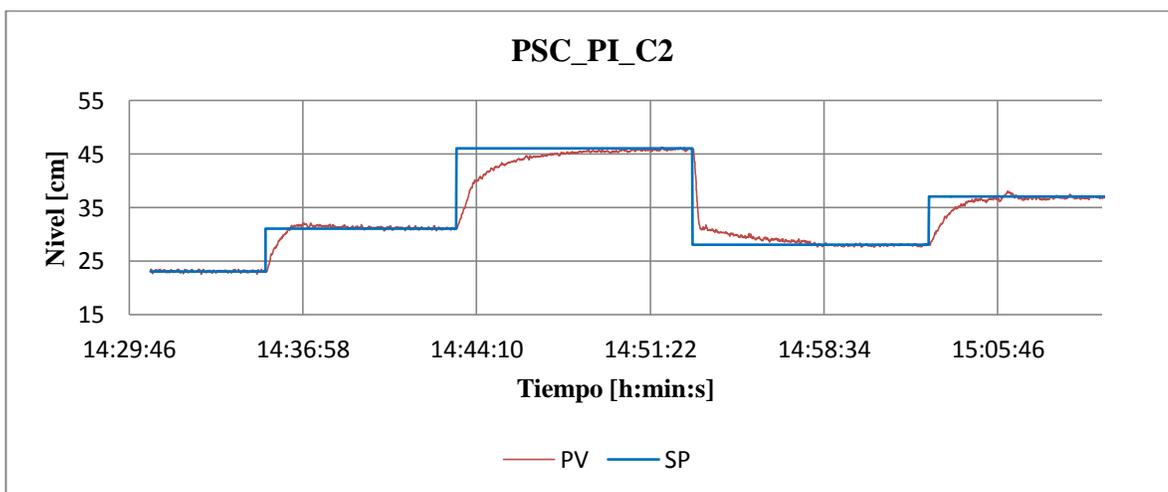
En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.



**Figura 3.81** Variable controlada con control PI utilizando convertor I/P



**Figura 3.82** Variable de control con control PI utilizando convertor I/P



**Figura 3.83** Variable controlada con control PI utilizando posicionador inteligente

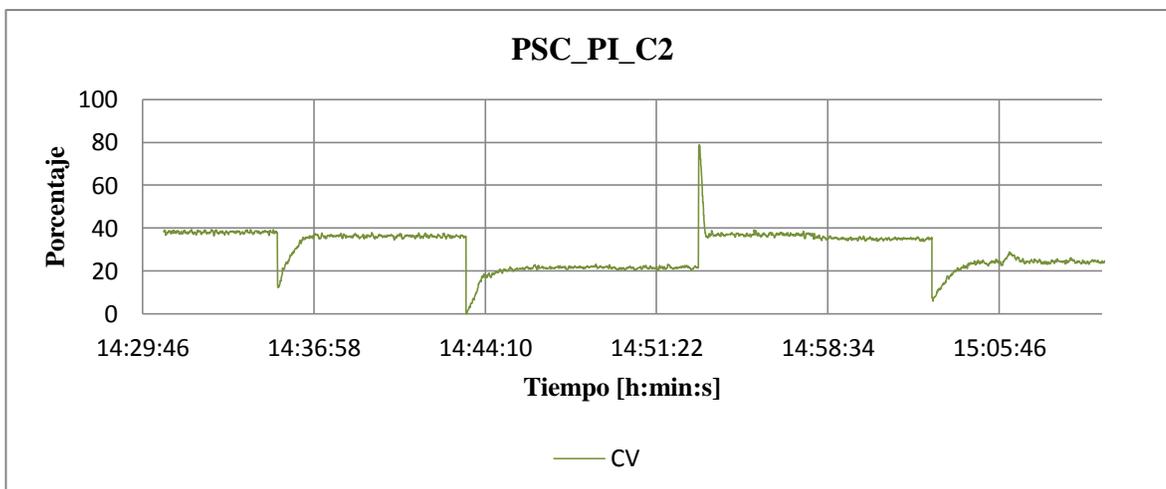


Figura 3.84 Variable de control con control PI utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.22

Parámetros de respuesta del sistema con control PI prueba combinada 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-31</b>		
Tr	9	50
Ts	522	103
Tp	27	–
%OS	18,5	–
Error	–	–
<b>34-46</b>		
Tr	190	164
Ts	800	482
Tp	–	–
Error	–	–
<b>46-28</b>		
Tr	10	97
Ts	99	293
Tp	19	–
%OS	8,3	–
Error	–	–
<b>28-37</b>		
Tr	10	88
Ts	–	299
Tp	–	–
%OS	24,4	–
Error	1,05	–

La Tabla 3.22 permite comparar el comportamiento del sistema en una utilizando un conversor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 9 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 23 a 31 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 97 segundos en la prueba PSC\_PI\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 46 a 28 cm. Por lo contrario el tiempo de estabilidad de 103 segundos es el menor y se registró en la prueba PSC\_PI\_C2 en un escalón de 23 a 31 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 522 en la prueba CIP\_PI\_D2 en el cambio de punto de consigna de 43 a 31 cm con un sobreimpulso 18.5% que es el más significativo mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

### 3.3.4 Proporcional integral derivativo

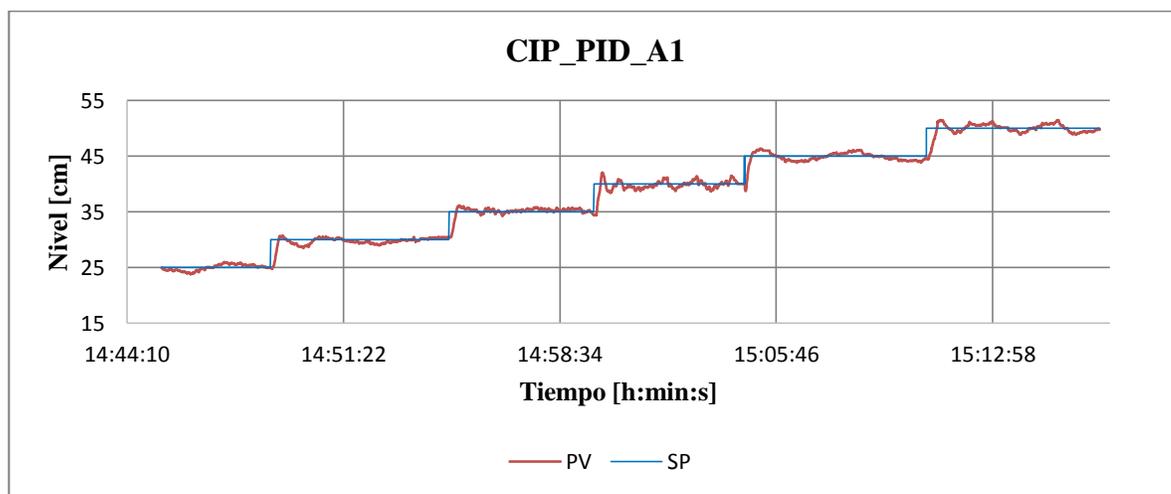
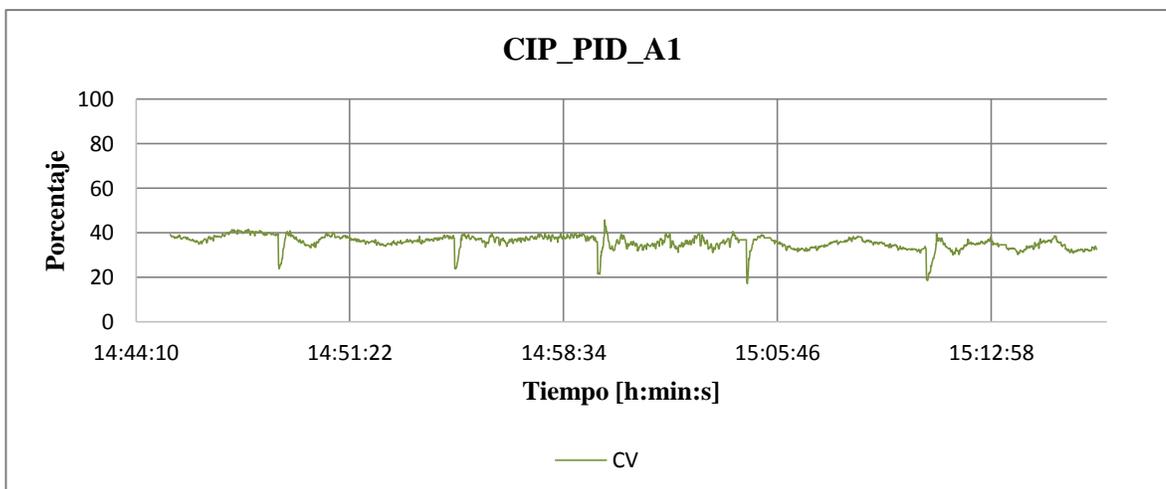
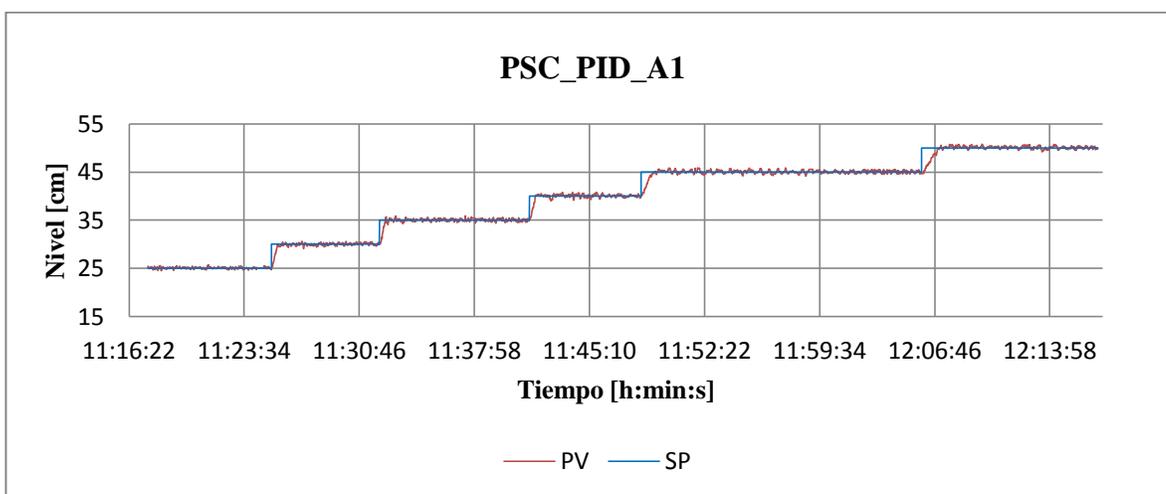


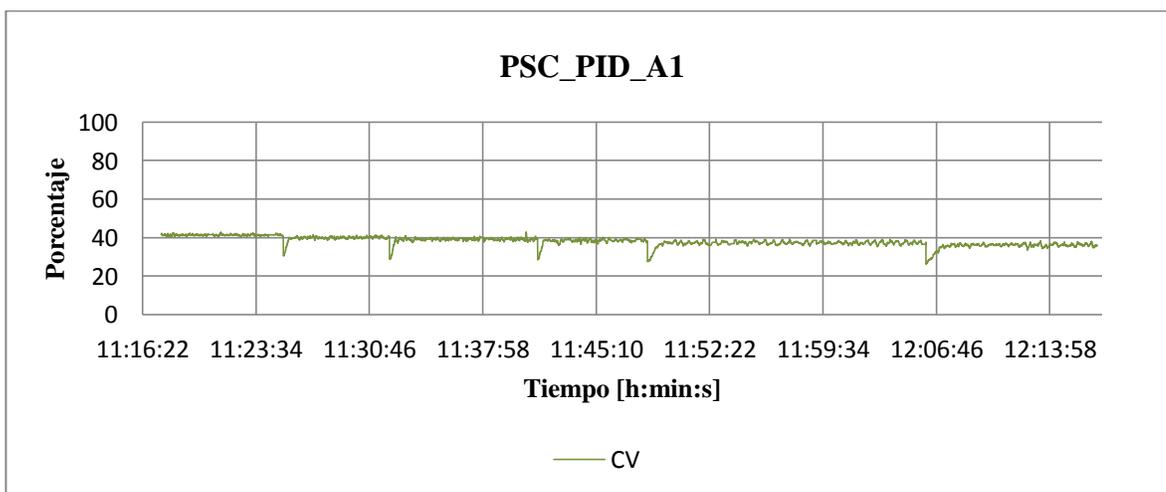
Figura 3.85 Variable controlada con control PID utilizando conversor I/P



**Figura 3.86 Variable de control con control PID utilizando convertor I/P**



**Figura 3.87 Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente**



**Figura 3.88 Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente**

Tabla 3.23

Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba ascendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>25-30</b>		
Tr	8	17
Ts	241	281
Tp	24	–
%OS	14,6	–
Error	–	–
<b>30-35</b>		
Tr	9	14
Ts	263	472
Tp	21	–
%OS	23,2	–
Error	–	–
<b>35-40</b>		
Tr	7	18
Ts	278	275
Tp	17	–
%OS	50	–
Error	–	–
<b>40-45</b>		
Tr	8	35
Ts	237	645
Tp	32	–
%OS	27,4	–
Error	–	–
<b>45-50</b>		
Tr	12	45
Ts	–	507
Tp	28	–
%OS	30,2	–
Error	1	–

Tabla 3.23 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba ascendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 7 segundos, registrado en la prueba CIP\_PID\_A1, al realizar un cambio de punto de consigna de 35 a 40 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 45 segundos en la prueba PSC\_PI\_A1, al realizar un cambio de punto de

consigna de 45 a 50 cm. El tiempo de estabilidad de 237 segundos es el menor y se registró en la prueba CIP\_PI\_D2 en un escalón de 40 a 45 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 645 en la prueba PSC\_PI\_D2 en el cambio de punto de consigna de 40 a 45 cm. El sobreimpulso de 26.7% es el más significativo registrado al utilizar convertor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

El sistema en ciertos escalones no logra estabilizarse manteniéndose un error en estado estable de  $\pm 1$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.

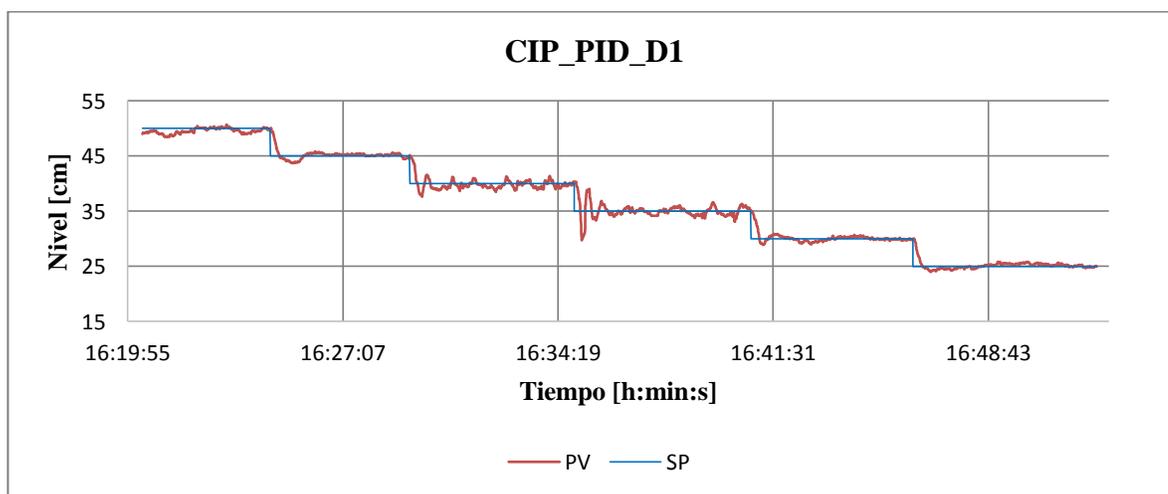


Figura 3.89 Variable controlada con control PID utilizando convertor I/P

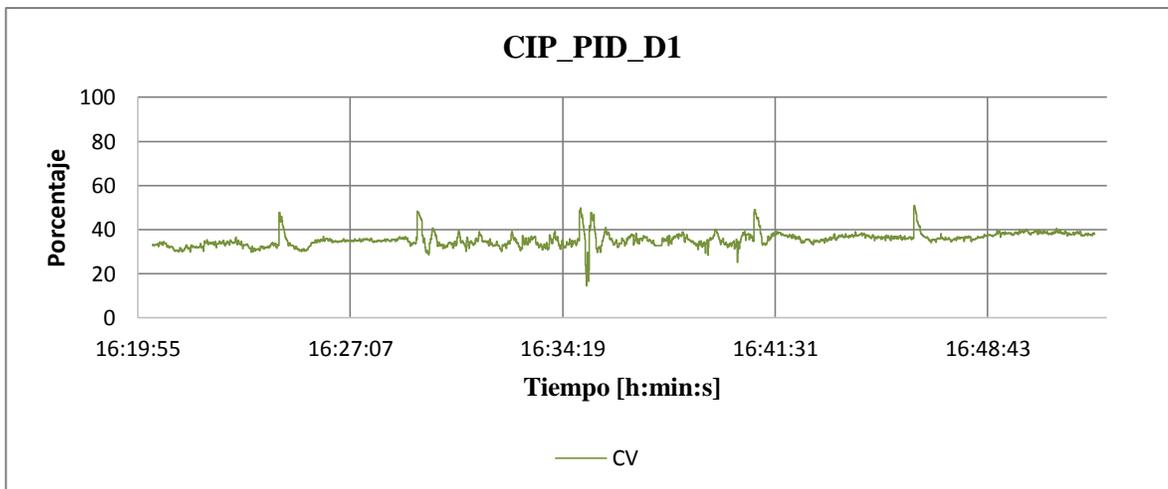


Figura 3.90 Variable de control con control PID utilizando conversor I/P

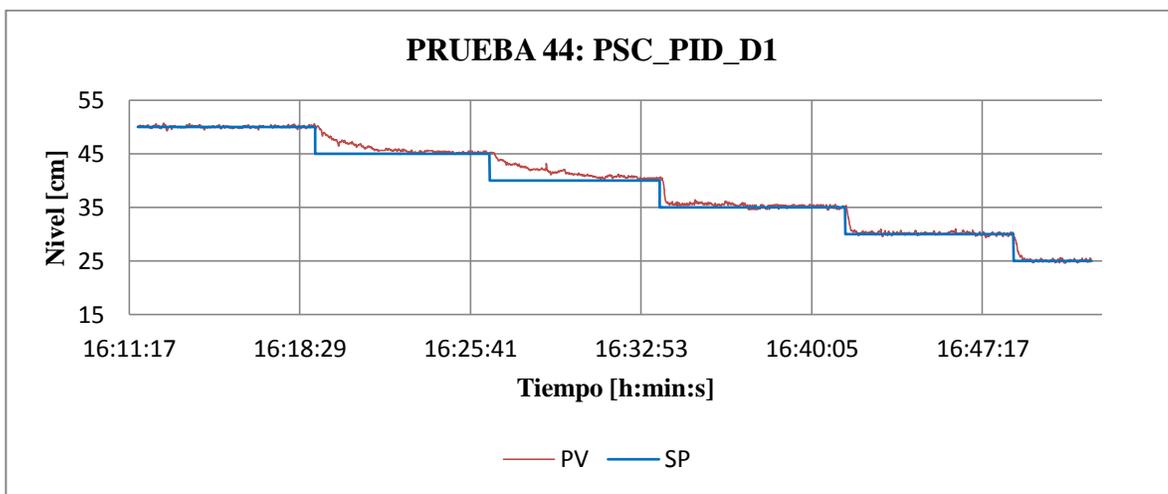


Figura 3.91 Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente

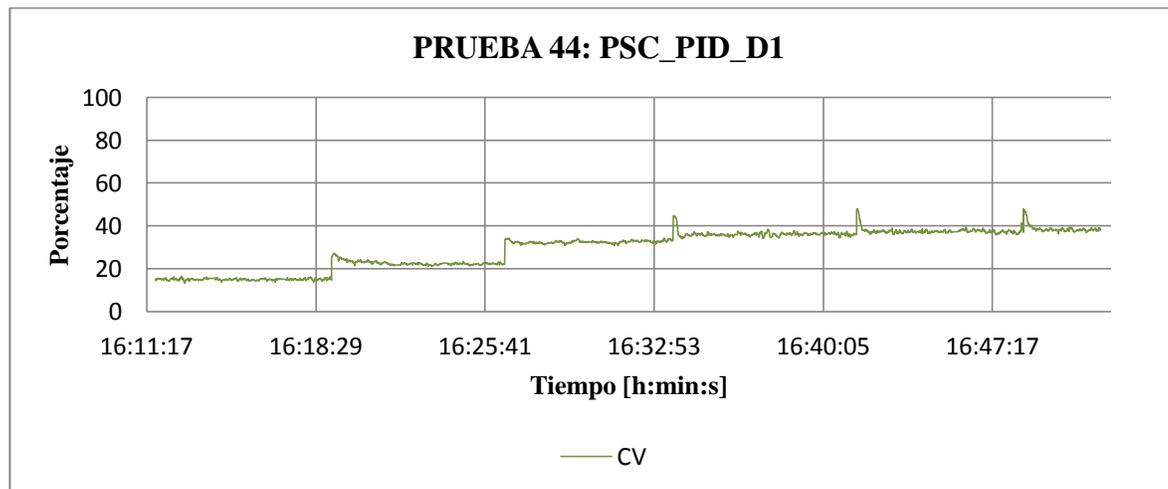


Figura 3.92 Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.24

## Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba descendente 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>50-45</b>		
Tr	13	138
Ts	259	298
Tp	45	–
%OS	25	–
Error	–	–
<b>45-40</b>		
Tr	11	254
Ts	–	374
Tp	25	–
%OS	46	–
Error	1,15	–
<b>40-35</b>		
Tr	8	16
Ts	–	217
Tp	15	–
%OS	105	–
Error	1,5	–
<b>35-30</b>		
Tr	12	14
Ts	226	363
Tp	24	–
%OS	21,6	–
Error	–	–
<b>30-25</b>		
Tr	12	21
Ts	299	120
Tp	36	–
%OS	19,75	–
Error	–	–

La Tabla 3.24 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba descendente utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral. El menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos, registrado en la prueba CIP\_PI\_D1, al realizar un cambio de punto de consigna de 45 a 40 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 138 segundos en la prueba PSC\_PI\_D1, al realizar un cambio de punto de

consigna de 50 a 45 cm. El tiempo de estabilidad de 120 segundos es el menor y se registró en la prueba PSC\_PI\_D2 en un escalón de 30 a 25 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 363 en la prueba PSC\_PI\_D2 en el cambio de punto de consigna de 35 a 30 cm. El mayor sobreimpulso registrado corresponde al 46% que es el más significativo en un cambio de 45 a 50 cm al utilizar el conversor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar conversor existen cambios en los cuales el sistema no se estabiliza presentando errores en estado estable de  $\pm 1.5$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

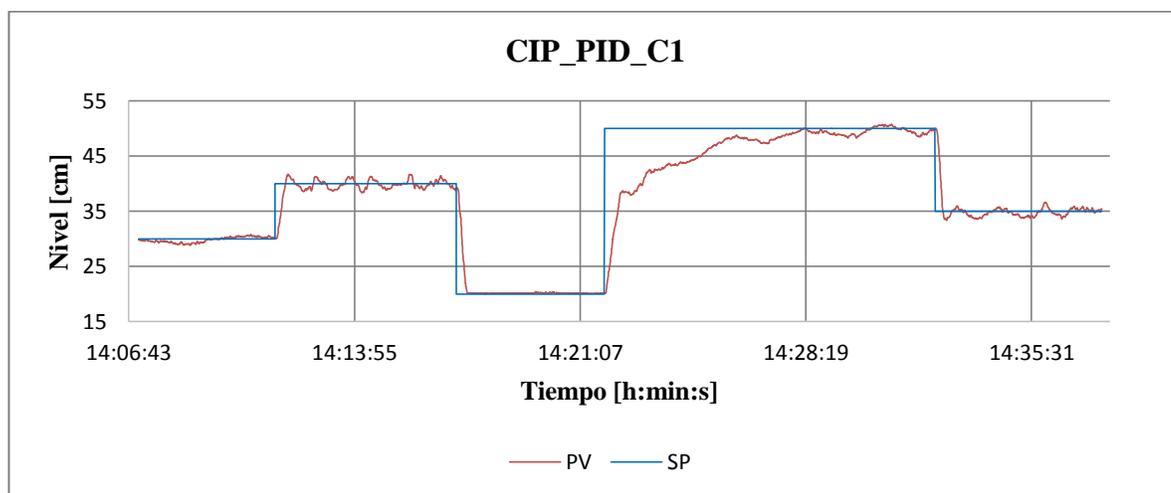


Figura 3.93 Variable controlada con control PID utilizando conversor I/P

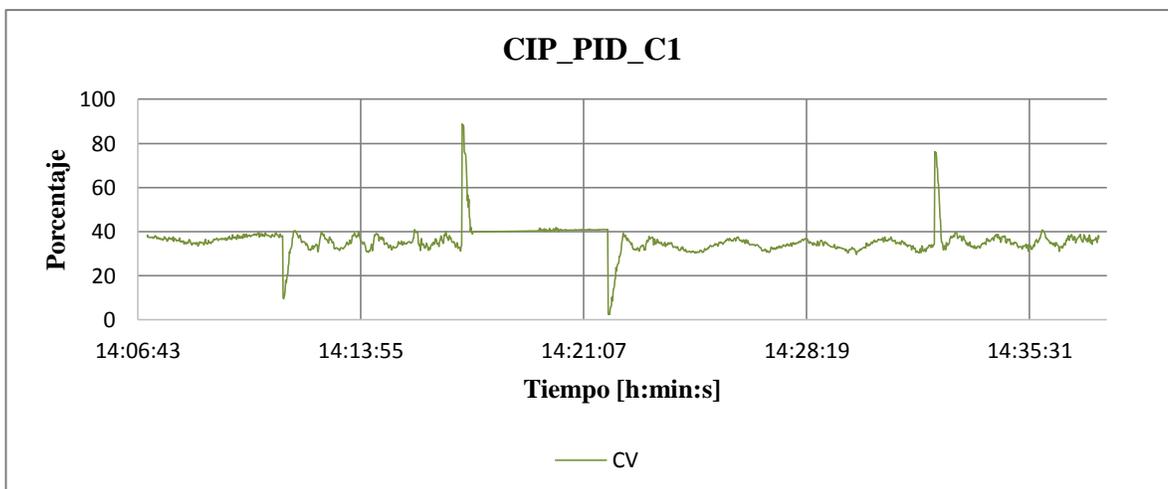


Figura 3.94 Variable de control con control PID utilizando conversor I/P

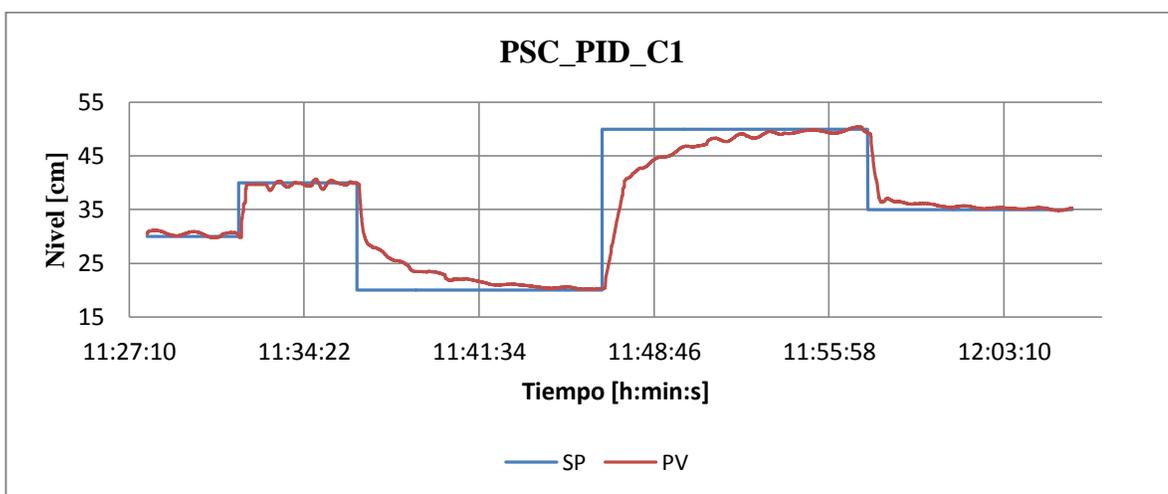


Figura 3.95 Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente

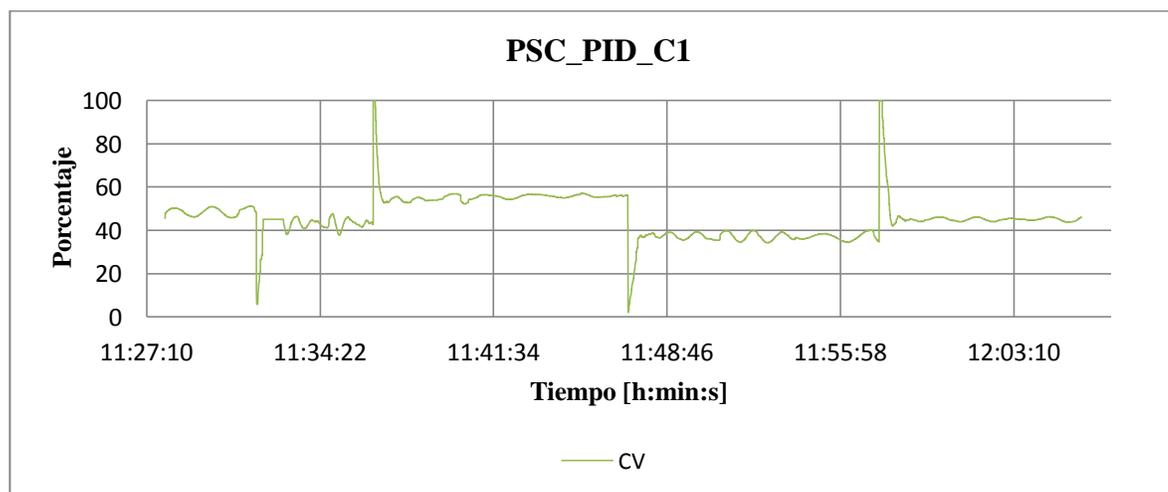


Figura 3.96 Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.25

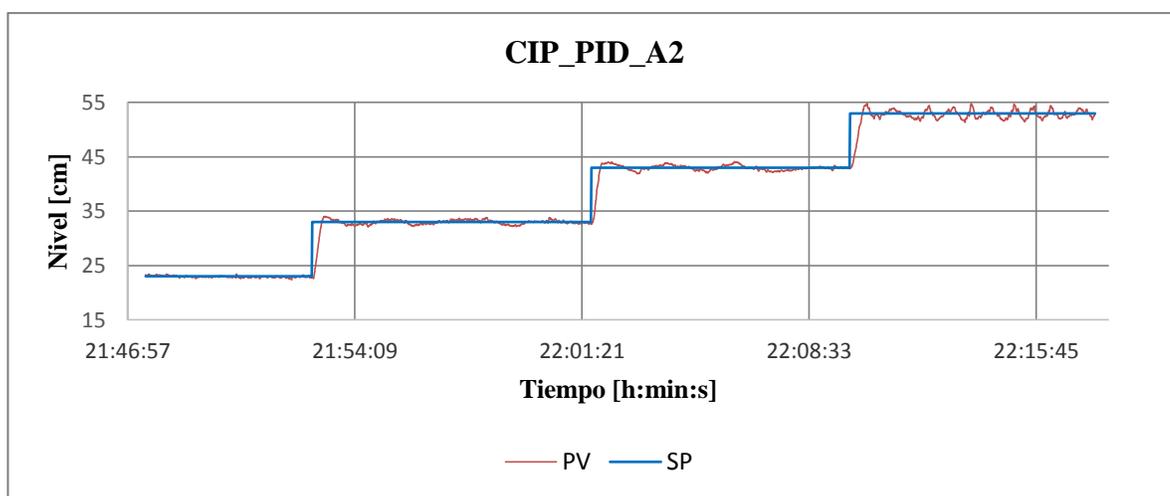
## Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba combinada 1

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>30-40</b>		
Tr	12	12
Ts	–	216
Tp	25	–
%OS	17,7	–
Error	1,2	–
<b>40-20</b>		
Tr	12	216
Ts	16	398
Tp	–	–
%OS	100	–
Error	0	–
<b>20-50</b>		
Tr	203	238
Ts	483	386
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>50-35</b>		
Tr	6	20
Ts	283	172
Tp	22	–
%OS	10,7	–
Error	–	–

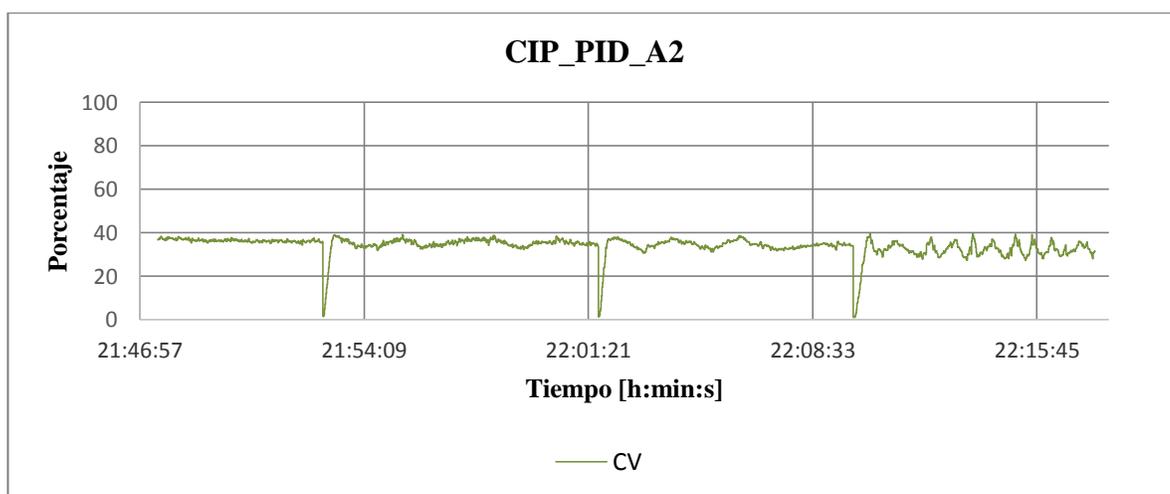
La Tabla 3.25 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba con escalones ascendentes y descendentes utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_PID\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 50 a 35 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 238 segundos en la prueba PSC\_PID\_C1, al realizar un cambio de punto de consigna de 20 a 50 cm. El tiempo de estabilidad de 16 segundos es el menor y se registró en la prueba CIP\_PI\_C1 en un escalón de 40 a 20 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 398 en la prueba PSC\_PID\_C1 en el cambio de punto de consigna de 40 a 20

cm. El sobreimpulso más significativo fue 17.7% al utilizar convertor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar convertor existen cambios en los cuales el sistema no se estabiliza presentando errores en estado estable de  $\pm 1.2$ cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.



**Figura 3.97 Variable controlada con control PID utilizando convertor I/P**



**Figura 3.98 Variable de control con control PID utilizando convertor I/P**

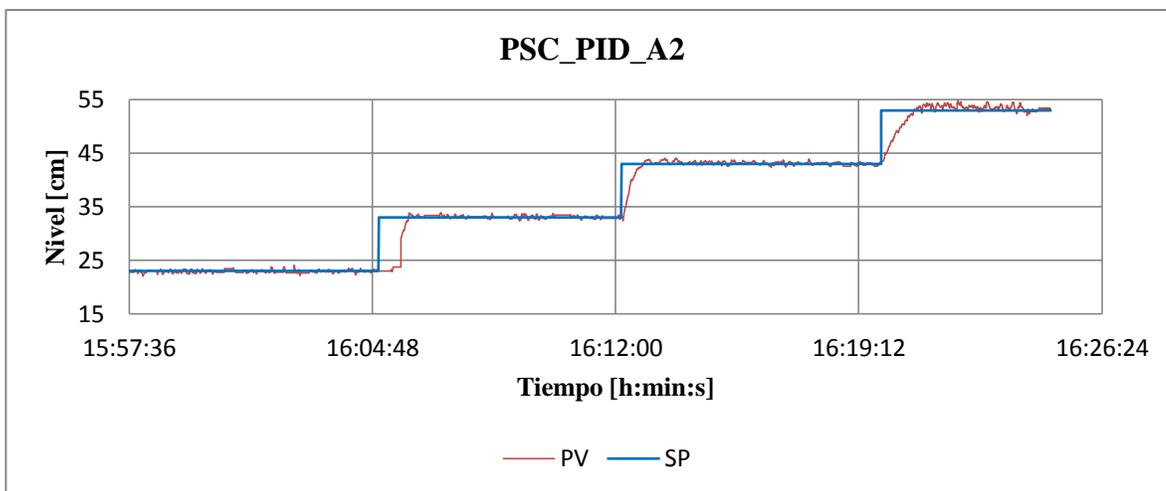


Figura 3.99 Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente

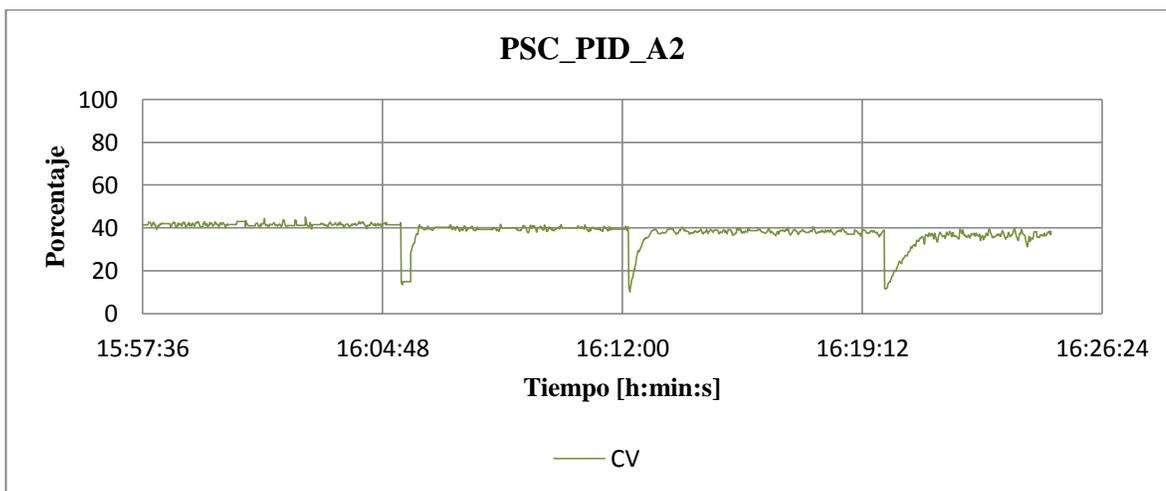


Figura 3.100 Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.26

Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba ascendente 2

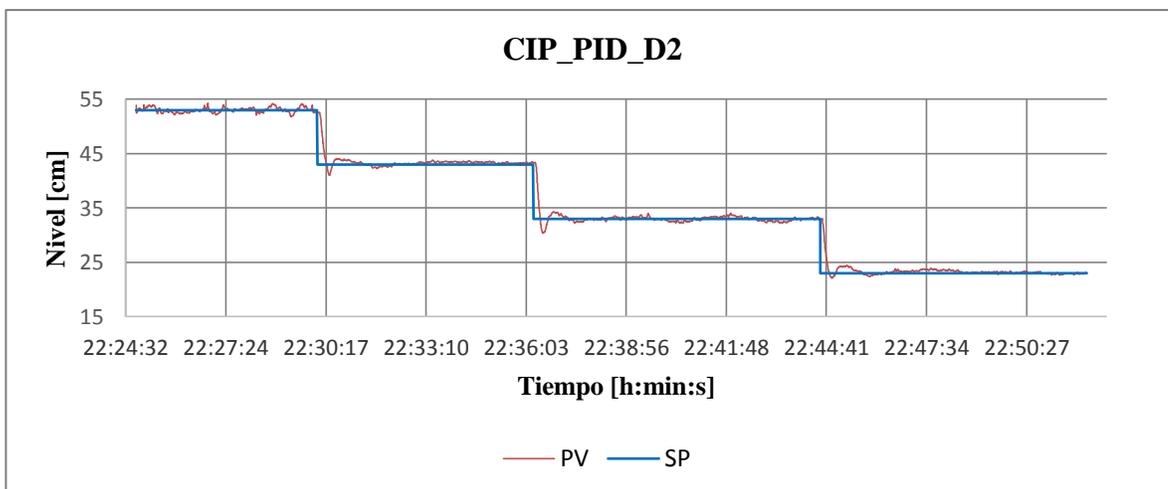
Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
	<b>23-33</b>	
Tr	11	9
Ts	464	310
Tp	24	—
%OS	14	—
Error	—	—

CONTINÚA →

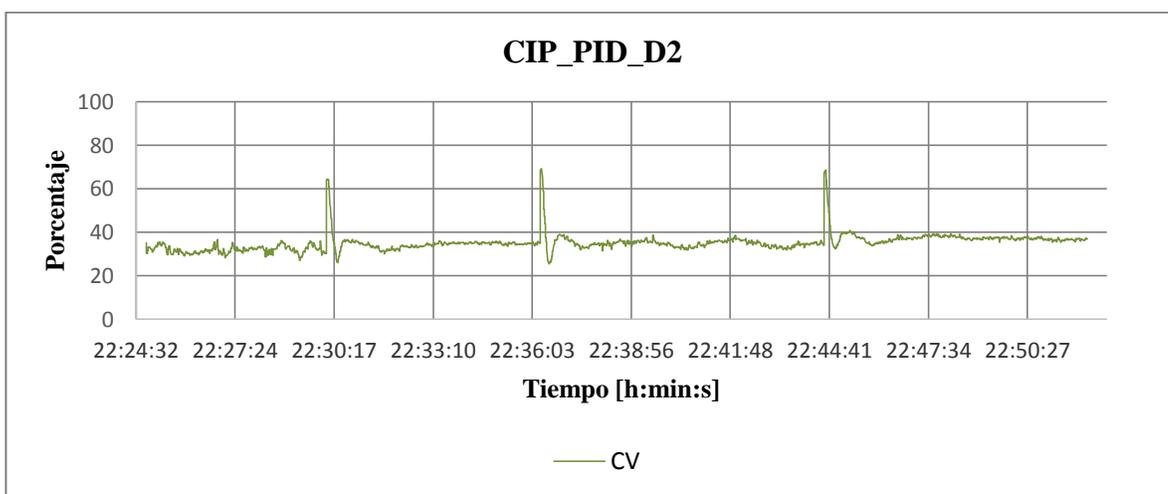
Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>33-43</b>		
Tr	9	22
Ts	398	371
Tp	362	–
%OS	9,2	–
Error	–	–
<b>43-53</b>		
Tr	16	46
Ts	–	264
Tp	31	–
%OS	17,7	–
Error	1	–

Tabla 3.26 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba con escalones ascendentes utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 9 segundos, registrado en la prueba CIP\_PID\_A2, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 43 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 46 segundos en la prueba PSC\_PID\_A2, al realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 53 cm. El tiempo de estabilidad de 264 segundos es el menor y se registró en la prueba PSC\_PI\_A2 en un escalón de 43 a 53 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 464 en la prueba CIP\_PID\_C1 en el cambio de punto de consigna de 23 a 33 cm. El sobreimpulso más significativo fue 17.7% al utilizar convertor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

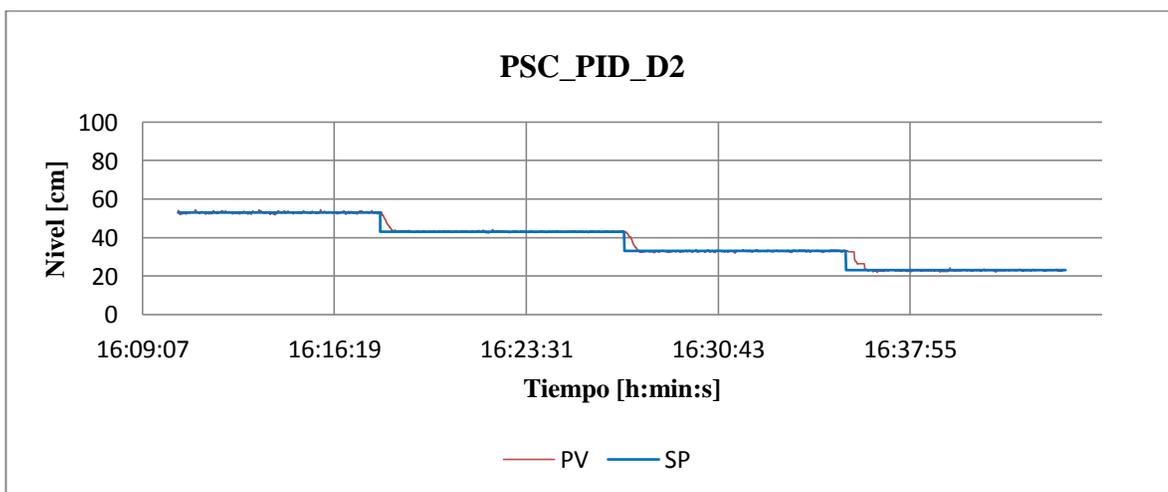
Al utilizar convertor existen cambios en los cuales el sistema no se estabiliza presentando errores en estado estable de  $\pm 1$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar convertor de corriente a presión.



**Figura 3.101 Variable controlada con control PID utilizando conversor I/P**



**Figura 3.102 Variable de control con control PID utilizando conversor I/P**



**Figura 3.103 Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente**

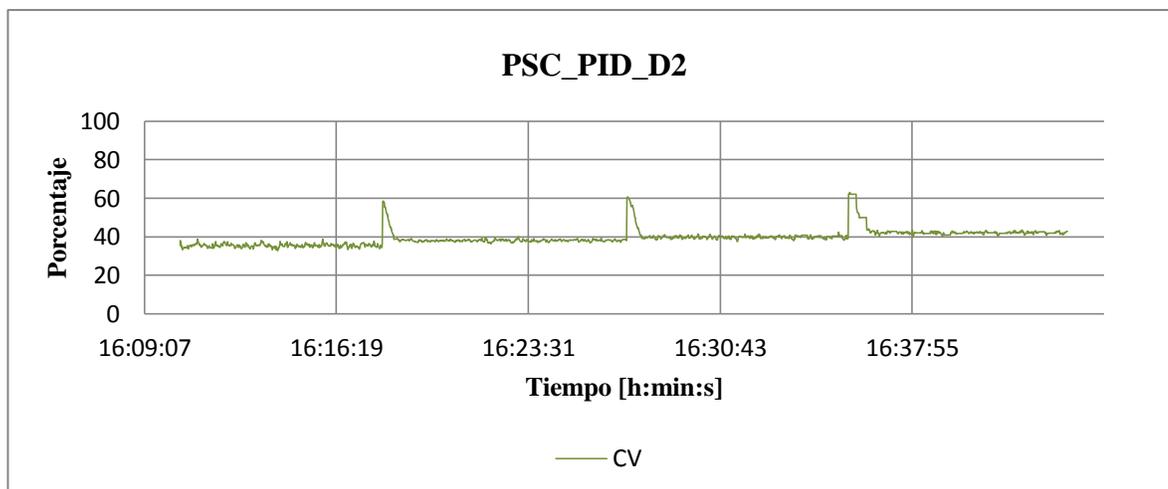


Figura 3.104 Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.27

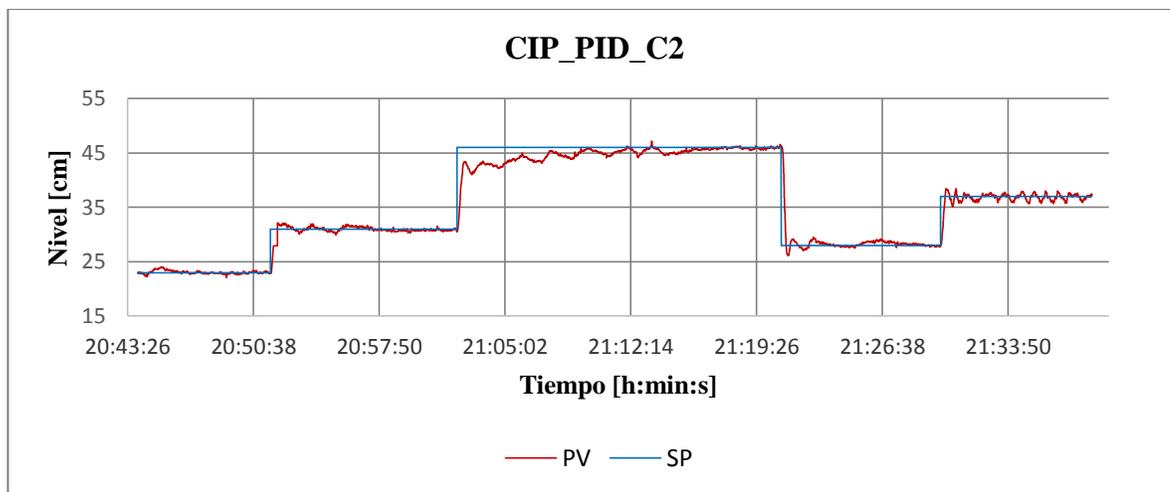
Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba descendente 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>53-43</b>		
Tr	9	21
Ts	304	255
Tp	21	–
%OS	19	–
Error	–	–
<b>43-33</b>		
Tr	6	22
Ts	439	377
Tp	16	–
%OS	26,8	–
Error	–	–
<b>33-23</b>		
Tr	8	23
Ts	238	338
Tp	20	–
%OS	9,5	–
Error	–	–

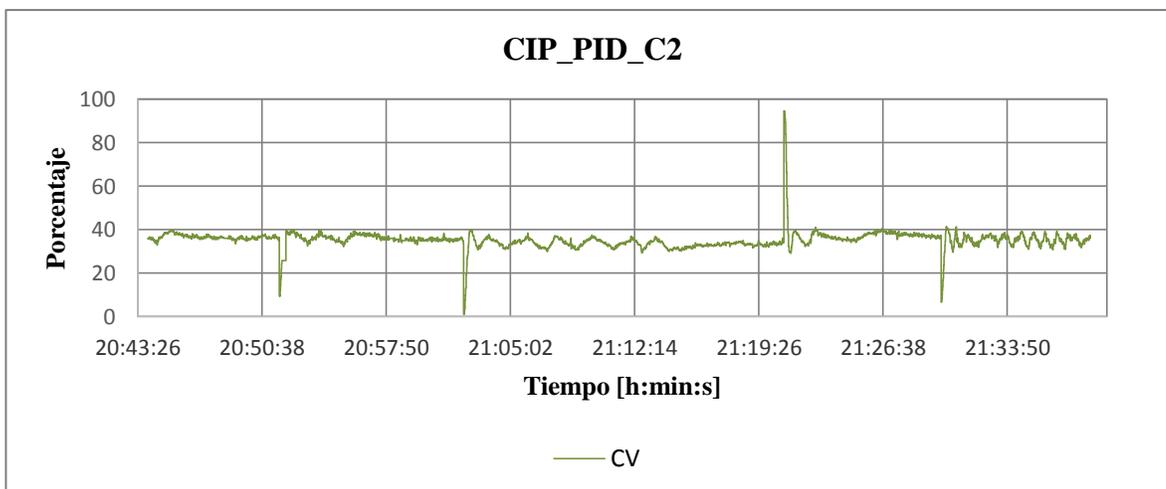
La Tabla 3.27 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba con escalones descendentes utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral derivativo. El menor tiempo de

levantamiento es de 6 segundos, registrado en la prueba CIP\_PID\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 23 segundos en la prueba PSC\_PID\_D2, al realizar un cambio de punto de consigna de 33 a 23 cm con un tiempo de estabilidad de 255 segundos es el menor, mientras que el mayor tiempo fue de 439 en la prueba CIP\_PID\_D2 en el cambio de punto de consigna de 43 a 33 cm. El único caso que presento sobreimpulso tuvo un 26.8% al utilizar conversor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

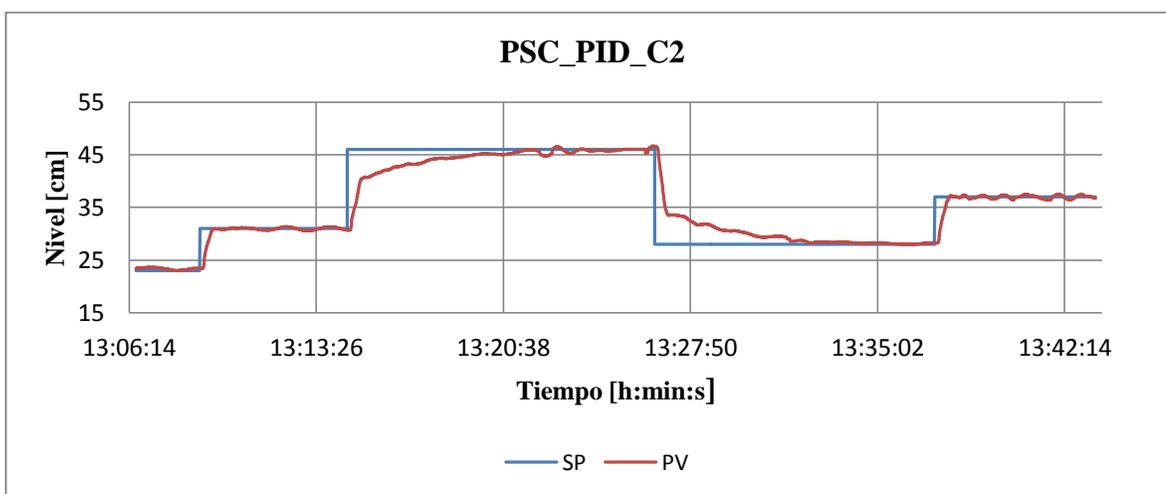
En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.



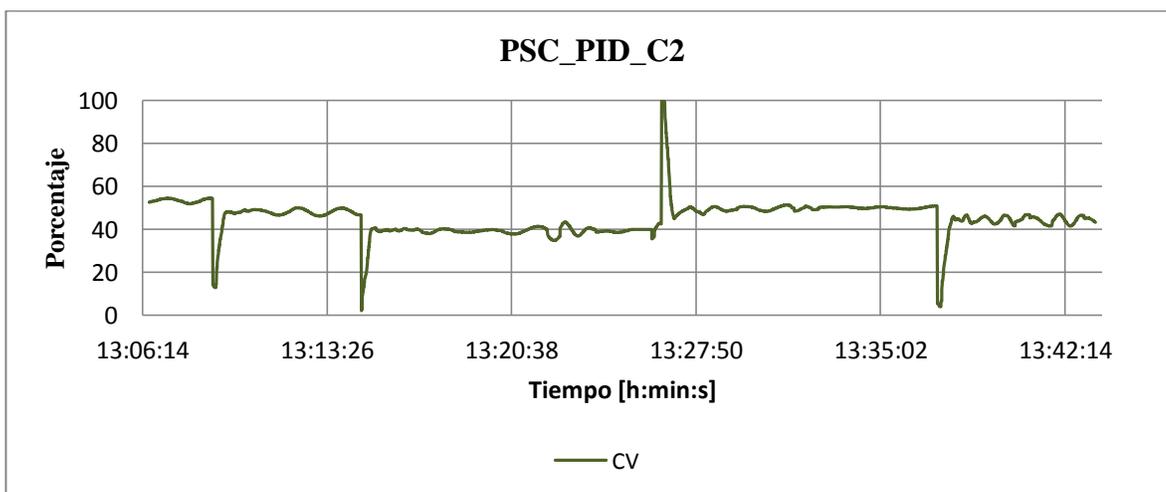
**Figura 3.105 Variable controlada con control PID utilizando conversor I/P**



**Figura 3.106** Variable de control con control PID utilizando convertor I/P



**Figura 3.107** Variable controlada con control PID utilizando posicionador inteligente



**Figura 3.108** Variable de control con control PID utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.28

## Parámetros de respuesta del sistema con control PID prueba combinada 2

Parámetro	Convertor I/P	Posicionador
<b>23-31</b>		
Tr	19	17
Ts	594	27
Tp	24	–
%OS	20	–
Error	–	–
<b>31-46</b>		
Tr	211	238
Ts	797	473
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>46-28</b>		
Tr	11	212
Ts	347	312
Tp	25	–
%OS	10,7	–
Error	–	–
<b>28-37</b>		
Tr	10	18
Ts	–	316
Tp	41	–
%OS	21,1	–
Error	1,15	–

La Tabla 3.28 permite comparar el comportamiento del sistema en una prueba con escalones ascendentes y descendentes utilizando un convertor I/P y un posicionador bajo un control proporcional integral derivativo. El menor tiempo de levantamiento es de 11 segundos, registrado en la prueba CIP\_PID\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 28 a 37 cm mientras que el mayor tiempo registrado es de 238 segundos en la prueba PSC\_PID\_C2, al realizar un cambio de punto de consigna de 31 a 46 cm. El tiempo de estabilidad de 27 segundos es el menor y se registró en la prueba PSC\_PI\_C2 en un escalón de 23 a 31 cm, mientras que el mayor tiempo fue de 594 en una prueba similar utilizando convertor. El sobreimpulso más

significativo fue 21.1% al utilizar conversor mientras que al utilizar posicionador no existe sobreimpulso.

Al utilizar conversor existen cambios en los cuales el sistema no se estabiliza presentando errores en estado estable de  $\pm 1.15$  cm. En cuanto al comportamiento del actuador se puede observar las variaciones de desplazamiento del vástago al utilizar posicionador son mucho menores que al utilizar conversor de corriente a presión.

### 3.3.5 Fuzzy

El modelo obtenido por la herramienta *ident* que más se aproxima al real es de tipo no lineal; por lo que también se desarrolló y evaluó el comportamiento de la planta bajo un control de lógica difusa con las siguientes pruebas:

- C1: Prueba combinada con cambios de punto de consigna de 30-40-20-50-35 cm
- C2: Prueba combinada con cambios de punto de consigna de 23-31-46-28-37 cm.

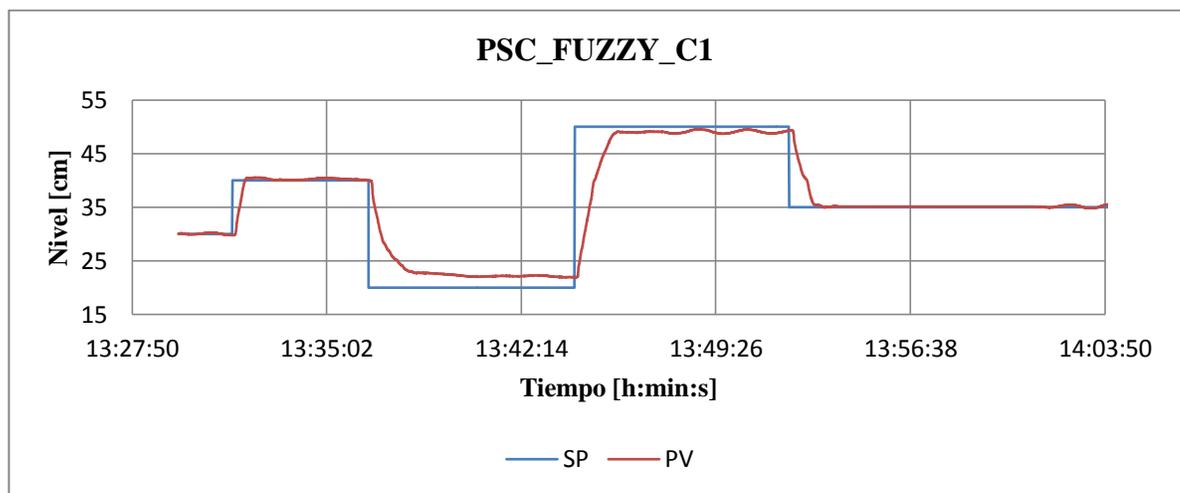


Figura 3.109 Variable controlada con control fuzzy utilizando posicionador inteligente

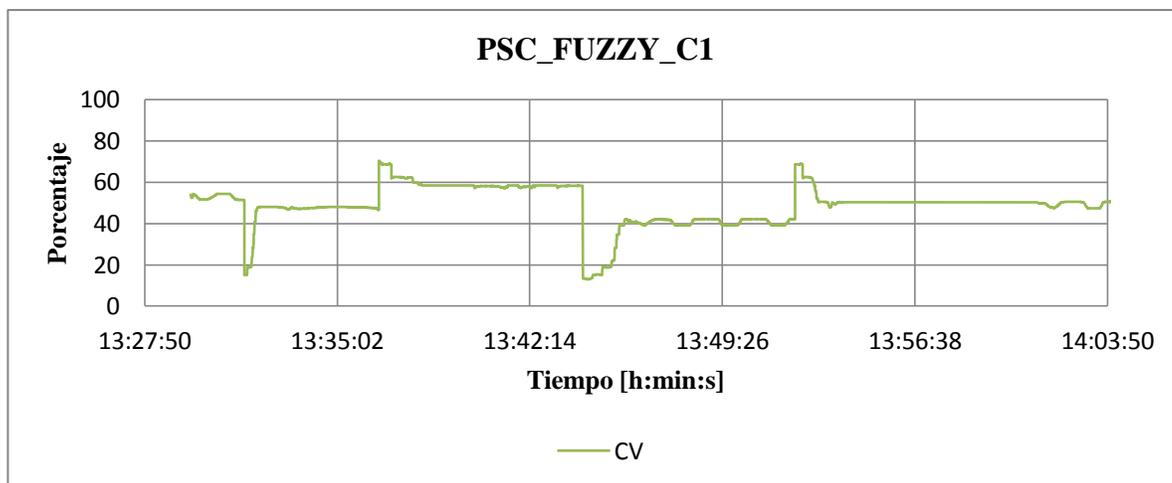


Figura 3.110 Variable de control con control fuzzy utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.29

Parámetros de respuesta del sistema con control fuzzy prueba combinada 1

Parámetro	Fuzzy	PID
<b>30-40</b>		
Tr	16	12
Ts	50	216
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>40-20</b>		
Tr	205	216
Ts	–	398
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	2	–
<b>20-50</b>		
Tr	68	238
Ts	85	386
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>50-35</b>		
Tr	34	20
Ts	53	172
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–

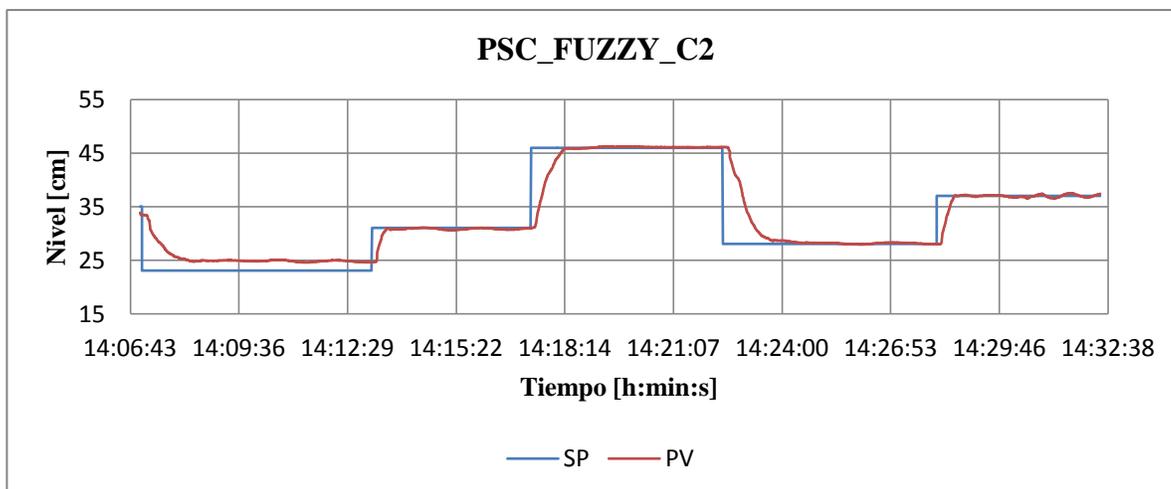


Figura 3.111 Variable controlada con control fuzzy utilizando posicionador inteligente

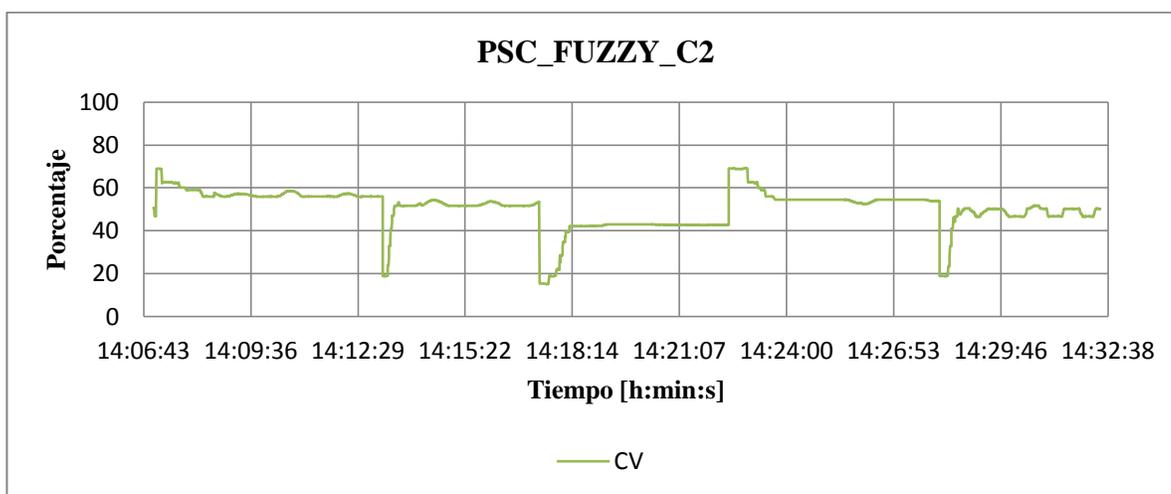


Figura 3.112 Variable de control con control fuzzy utilizando posicionador inteligente

Tabla 3.30

Parámetros de respuesta del sistema con control fuzzy prueba combinada 2

Parámetro	Fuzzy	PID
<b>23-31</b>		
Tr	20	17
Ts	22	27
Tp	—	—
%OS	—	—
Error	—	—
<b>Parámetro</b>	<b>Fuzzy</b>	<b>PID</b>
	31-46	

CONTINÚA →

Parámetro	Fuzzy	PID
Tr	36	238
Ts	49	473
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>46-28</b>		
Tr	48	212
Ts	75	312
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–
<b>28-37</b>		
Tr	16	18
Ts	217	316
Tp	–	–
%OS	–	–
Error	–	–

### 3.3.6 Validación del modelo matemático

Para validar el modelo matemático obtenido con la herramienta ident de Matlab, se comparan las mediciones tomadas en tiempo real del sistema en funcionamiento frente a la repuesta del modelo en Simulink, en ambos casos el sistema se encuentra bajo las acciones de un control de lógica difusa. La Figura 3.113 muestra el nivel deseado en centímetros de color rojo y de color azul el nivel actual del sistema de forma real, mientras que la Figura 3.114 muestra la misma información pero obtenida por simulación.

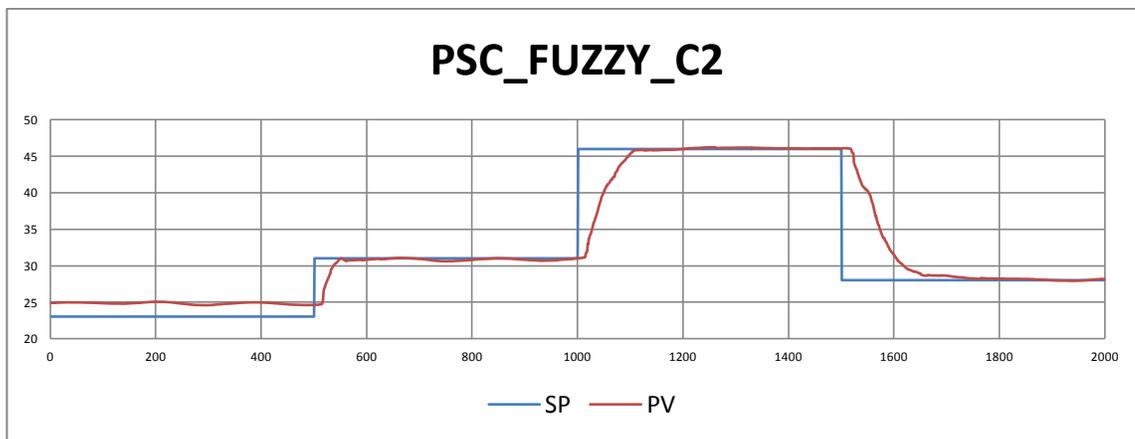
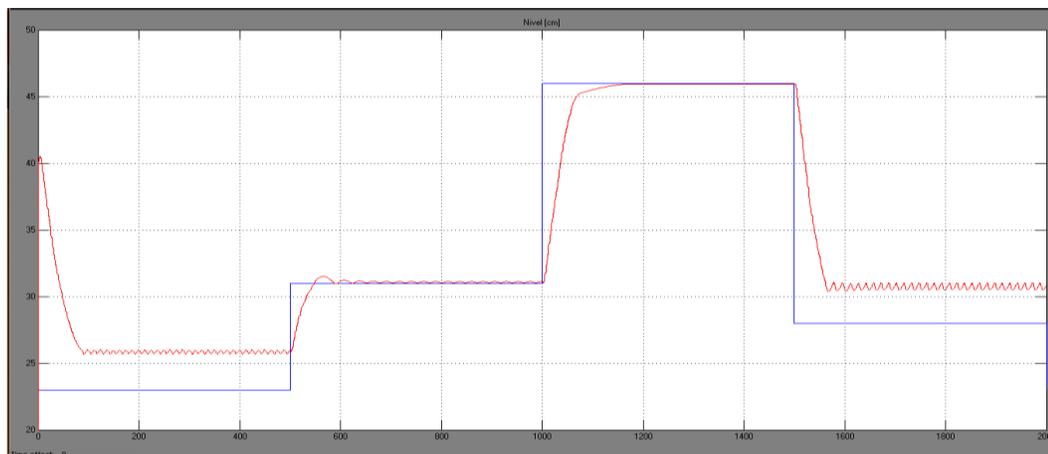
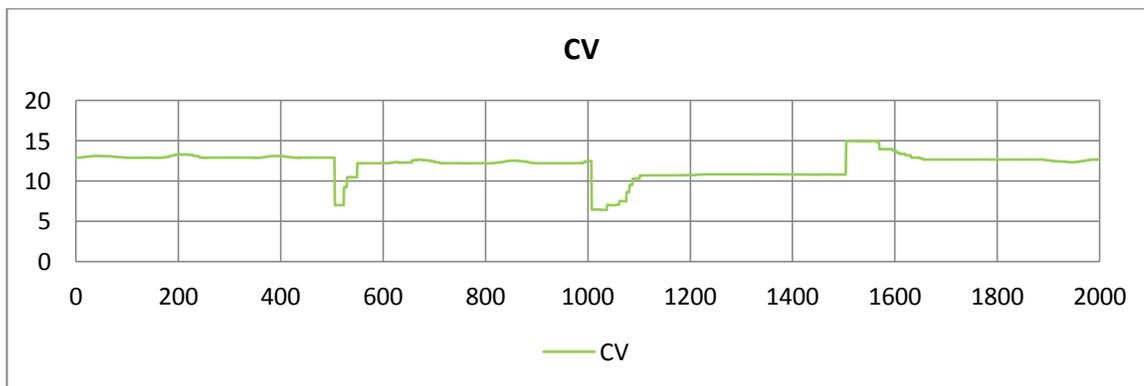


Figura 3.113 Comportamiento variable nivel de forma real

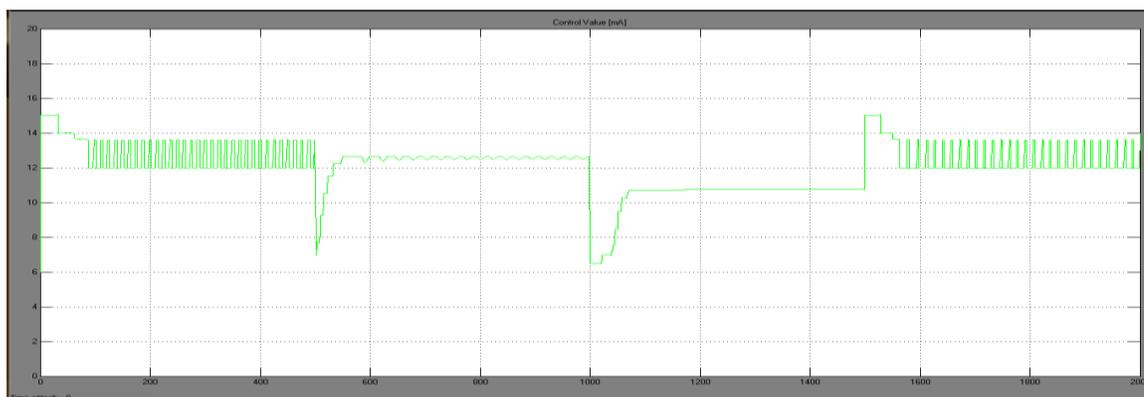


**Figura 3.114 Comportamiento variable nivel obtenida con Simulink**

También se presenta la variación de corriente, que es la señal que controla las acciones de apertura y cierre de la válvula. La Figura 3.115 muestra la evolución de la misma en tiempo real, mientras que la Figura 3.116 muestra la evolución generada por simulación.



**Figura 3.115 Comportamiento variable de control de forma real**



**Figura 3.116 Comportamiento de la variable de control obtenida con Simulink**

Al comparar los resultados obtenidos por el sistema en contraste con los obtenidos por Simulink se aprecia gran aproximación tanto en respuesta del sistema como el comportamiento de la variable de control, existen pequeñas diferencias como el sobreimpulso en el primer escalón en la simulación y el error en estado estable en el último cambio de consigna, que se atribuyen a que el porcentaje de aproximación del sistema es de un 78%.

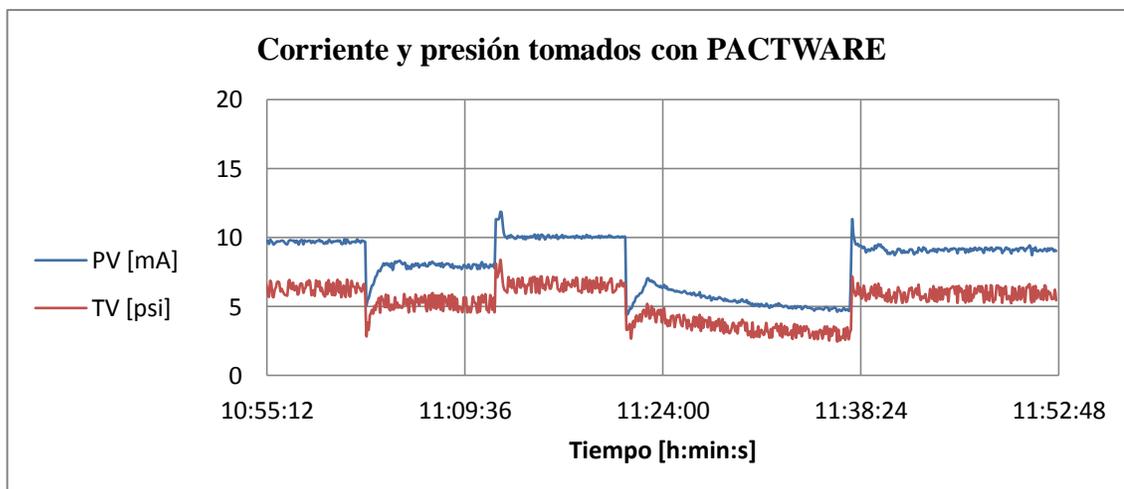
### **3.4 Diagnóstico**

#### **3.4.1 En línea**

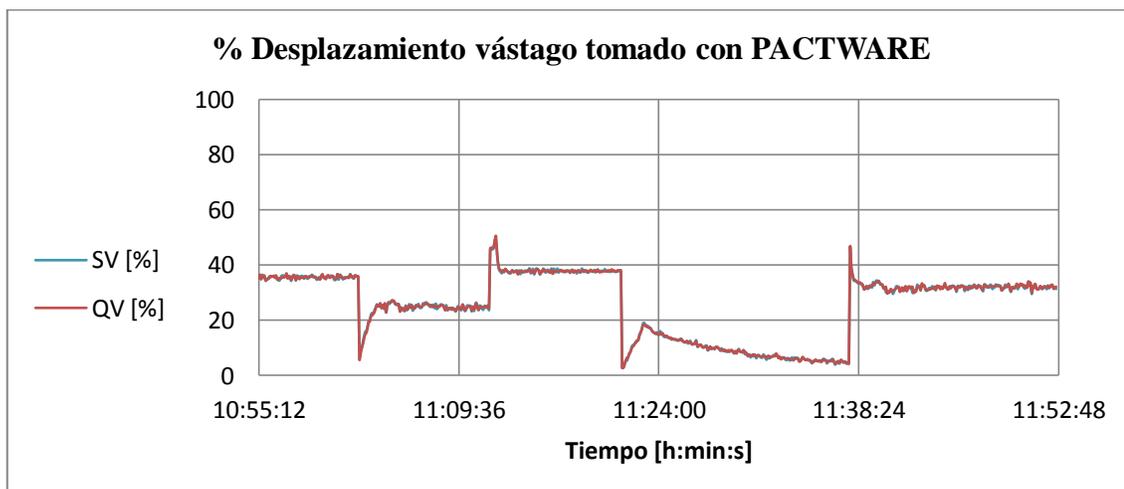
Se evaluó el comportamiento de la válvula en funcionamiento; con el fin de monitorear la evolución de la presión corriente y porcentaje de desplazamiento del vástago. Para acceder a la información digital provista por el posicionador se utilizó dos tipos de software. Pactware, que como se mencionó en el capítulo 2 permite registrar datos en un archivo CSV de Excel directamente, mientras que con HART Server se utilizó la plataforma Labview para registrar dichos datos en un archivo de Excel.

Para ambos casos el sistema se encontraba bajo las acciones de un control automático y se registraron los valores de las variables HART que fueron asignadas previamente al dispositivo: la primera permite visualizar la evolución de señal de corriente (PV) y la de presión (TV) que son directamente proporcionales. También se registró valores de consigna de porcentaje de desplazamiento del vástago (SV) y el desplazamiento del mismo (QV).

La Figura 3.117 muestra como la variación de corriente de lazo influye en la variación de la presión durante el desarrollo de la prueba PSC\_PID\_C1, mientras que la Figura 3.118 muestra como se desplazaba el vástago en relación al punto de consigna del lazo de control interno del posicionador. Para ambos casos se tomaron datos mediante el software Pactware.

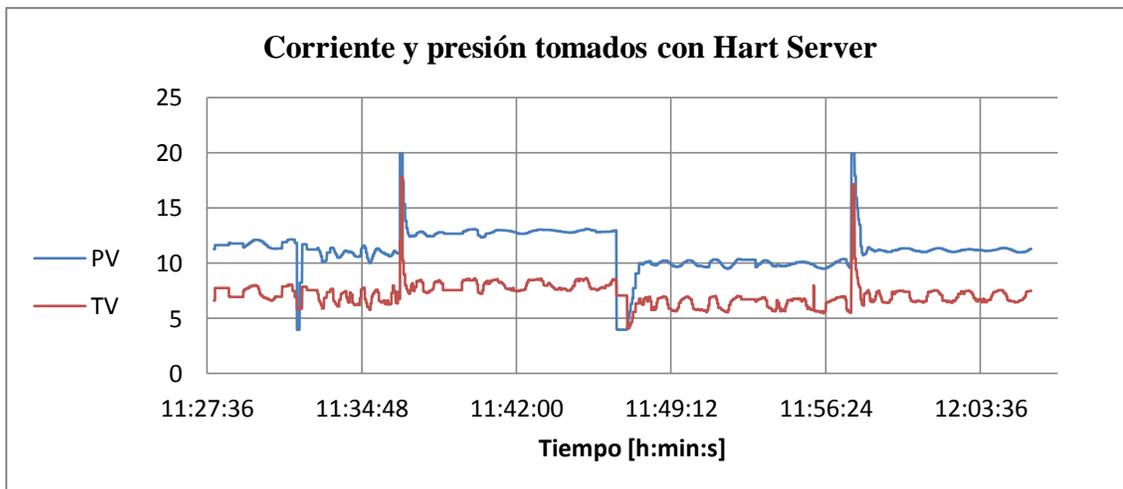


**Figura 3.117 Datos HART de corriente y presión tomados con PACTWARE**

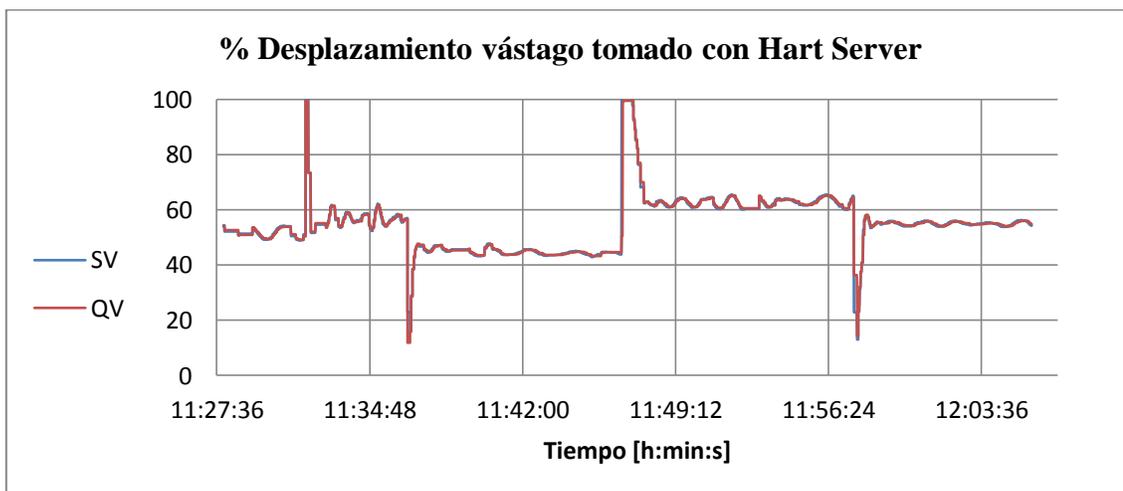


**Figura 3.118 Datos HART de % desplazamiento vástago tomado con PACTWARE**

La Figura 3.119 muestra como la variación de corriente de lazo influye en la variación de la presión durante se desarrollaba la prueba PSC\_PID\_C1, mientras que la Figura 3.120 muestra cómo se desplazaba el vástago en relación al punto de consigna del lazo de control interno del posicionador. Para ambos casos se tomaron datos mediante el software HART server en conjunto con Labview.



**Figura 3.119 Datos HART de corriente y presión tomados con HART Server**



**Figura 3.120 Datos HART de % desplazamiento vástago tomado con HART Server**

La Figura 3.121 muestra como la variación de corriente de lazo influye en la variación de la presión mientras se desarrollaba la prueba PSC\_PID\_C1, mientras que la Figura 3.122 muestra cómo se desplazaba el vástago en relación al punto de consigna del lazo de control interno del posicionador. Para ambos casos se tomaron datos mediante el software HART server en conjunto con Labview.

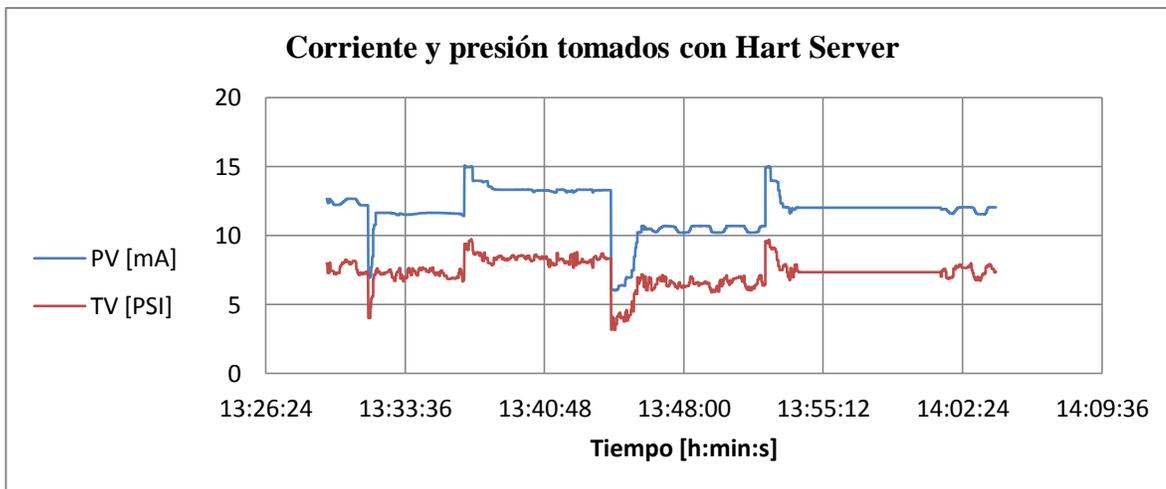


Figura 3.121 Datos HART de corriente y presión tomados con HART Server

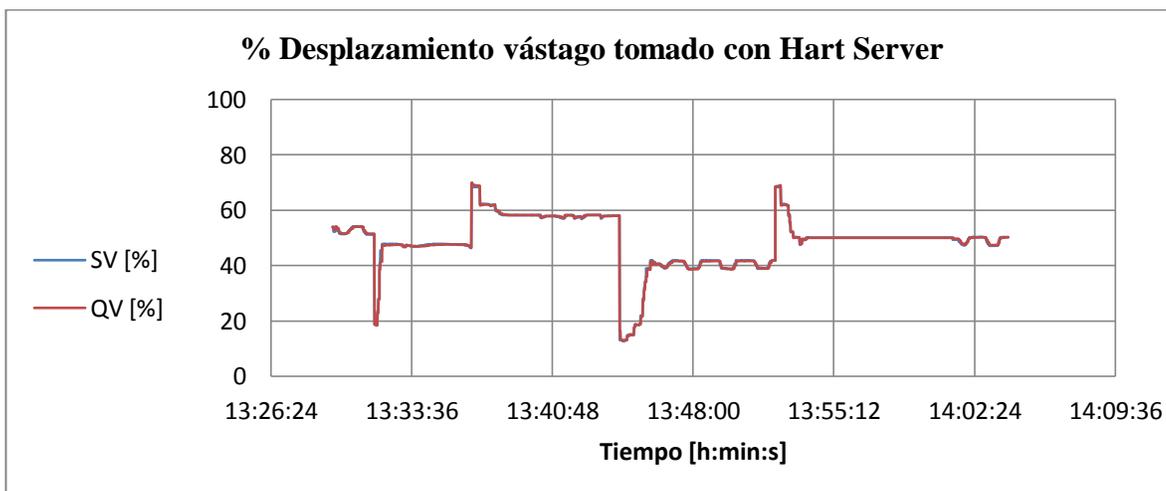
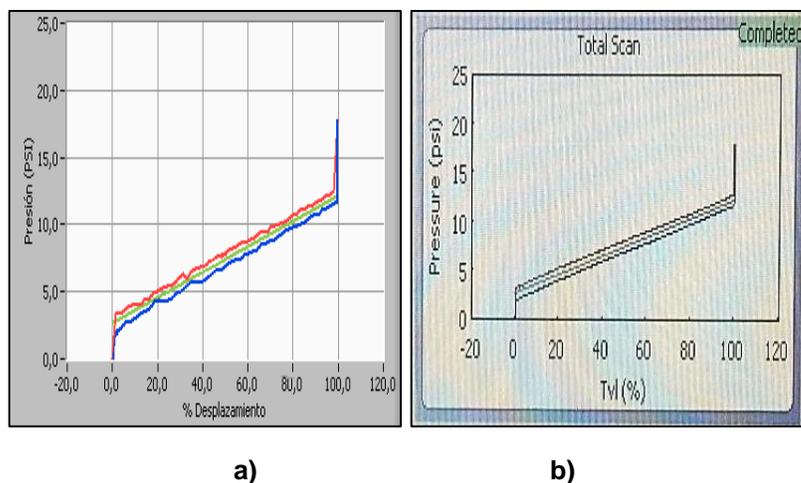


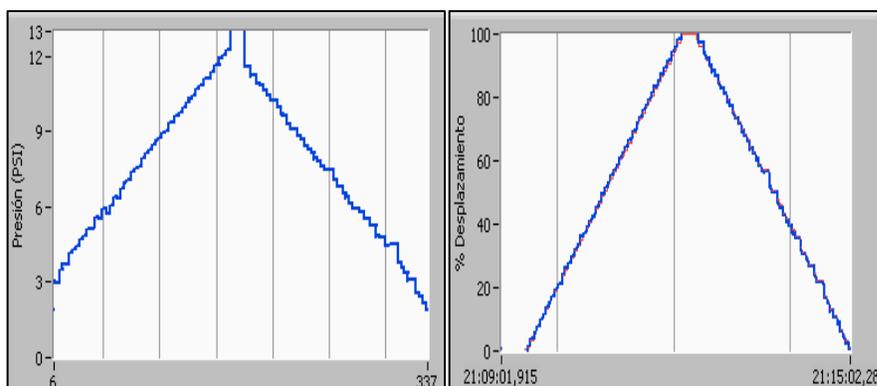
Figura 3.122 Datos HART de % desplazamiento vástago tomado con HART Server

### 3.4.2 Fuera de línea automático

Para el diagnóstico fuera de línea se realizaron dos pruebas, la prueba 1 con la válvula configurada y calibrada, y para la prueba 2 se desajustó la válvula para verificar el correcto funcionamiento del programa. En los gráficos de la firma de la válvula ( Figura 3.123 y Figura 3.125) se representa la presión del actuador en función del desplazamiento del vástago, la línea de cierre (azul) muestra a la presión cuando el vástago es ascendente y la línea de apertura (rojo) muestra la presión cuando el vástago se mueve de manera descendente.



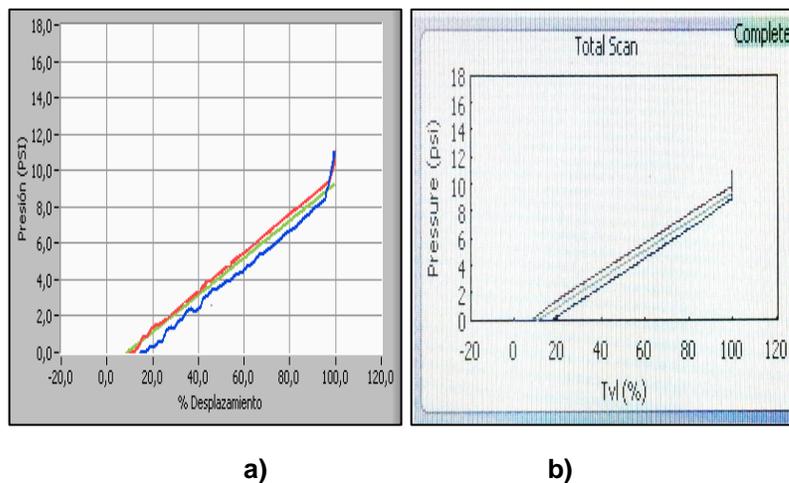
**Figura 3.123 Prueba 1 a) Firma de la válvula obtenida con la herramienta implementada b) Firma de la válvula obtenida con comunicador de campo 475.**



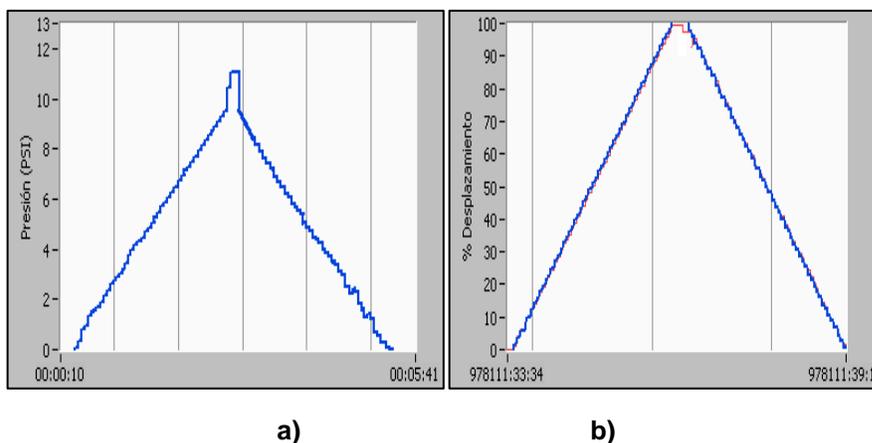
**Figura 3.124 Prueba 1 a) Presión del actuador vs. Tiempo b) % Desplazamiento del vástago vs. Tiempo**

De manera visual la Figura 3.123 a) permite conocer que la presión inicial para que la válvula empiece a cerrarse es de 2,5 PSI, mientras que se necesita que una presión de 12 PSI para que la válvula empiece a abrirse, es decir estos valores de presión son los necesarios para vencer la fricción del actuador. Se observa también que la válvula se ha desplazado del 0 al 100% de su carrera y viceversa, los picos de los extremos de las líneas de apertura y cierre o cambios de pendiente permiten verificar que la válvula alcanzó una parada sólida en ambos extremos del recorrido, he indica que completó todo su desplazamiento. En la Figura 3.125 a) se observa que una presión mayor a 0

PSI permite que la válvula empiece a cerrarse, mientras que con una presión menor a 12,5 la válvula empieza a abrirse. Es posible distinguir que la válvula se desplaza entre un 12% y un 95%, es decir no completa la totalidad de su desplazamiento.



**Figura 3.125 Prueba 2 a) Firma de la válvula obtenida con la herramienta implementada  
b) Firma de la válvula obtenida con comunicador de campo**



**Figura 3.126 Prueba 2 a) Presión del actuador vs. Tiempo b) % Desplazamiento del vástago vs. Tiempo**

En ambas gráficas (Figura 3.123 y Figura 3.125a)) se puede decir que las líneas de apertura y cierre son paralelas y lineales en toda la carrera completa, su separación obedece a la fricción opuesta a la carrera ascendente, más la fricción opuesta a la carrera descendente, mientras mayor fricción exista más

amplia será la separación o banda de fricción. Las fuerzas de fricción calculadas por el programa se muestran en la Tabla 3.31 Parámetros de funcionamiento de la válvula La fuente principal de fricción en una válvula es su material de empaque; los materiales que tienen un alto coeficiente de fricción, tales como grafito, producirá una mayor cantidad de fricción y por lo tanto un ancho de banda más amplia que los materiales de bajo coeficiente, tales como PTFE que es usado en la válvula de prueba.

**Tabla 3.31 Parámetros de funcionamiento de la válvula**

<b>Parámetros</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>
<b>Fricción Max [lbf]</b>	<b>21.85</b>	<b>21.16</b>
<b>Fricción Min [lbf]</b>	<b>16.93</b>	<b>0.008</b>
<b>Fricción Promedio [lbf]</b>	<b>19.06</b>	<b>12.58</b>
<b>Presión de Transición [PSI]</b>	<b>1.24</b>	<b>0.88</b>

En las líneas de apertura y cierre de ambas gráficas existe una pendiente en los datos que indica que el actuador contiene un resorte, de no existir este resorte las líneas de apertura y cierre serían casi planas (horizontales), el ángulo de la pendiente depende del resorte y el tamaño del actuador

La banda de presión existente entre la curva de apertura y la de cierre representan la presión necesaria para lograr la transición del movimiento de apertura al de cierre y viceversa; en el caso de la prueba 1 la instalación fue de 1,24 PSI, mientras que para la prueba 2 fue de 0,88 PSI.

Cabe recalcar que se verifica la validez de las gráficas obtenidas con la herramienta de diagnóstico implementada al compararlas con las obtenidas por un comunicador de campo Emerson, para la prueba 1 Figura 3.123 b) y para las prueba 2 Figura 3.125 b), las gráficas presentan características idénticas a las tomadas con el programa y la eficiencia de la herramienta se ve reflejada en el entorno gráfico de Labview, al ser éste más amigable permite

modificar las escalas del gráfico de manera más específica, lo que facilita al usuario el análisis de las gráficas, adicionalmente es posible llevar un registro de las variables HART en un archivo con extensión txt.

La gráfica de la Figura 3.124 a) y Figura 3.126 a) permiten conocer el rango de presión dentro del cual la válvula se encuentra funcionando, el rango de presión en el caso de la prueba realizada a la válvula luego de su instalación fue entre 3 y 12,5 PSI para la carrera ascendente mientras que en la carrera descendente el rango fue entre 2,5 y 11,5 PSI. Figura 3.124 b) y Figura 3.126 b) permite verificar que el vástago se desplaza adecuadamente (azul) respondiendo al punto de consigna asignado (roja) en ambos casos.

### 3.4.3 Fuera de línea manual

Se realizaron pruebas con el diagnóstico fuera de línea manual, aplicando al posicionador escalones de corriente de 12, 8, 16 y 11 mA como señal de control, el comportamiento de la válvula a estos escalones se observa en las gráficas de las figuras Figura 3.127, Figura 3.128 y Figura 3.129.

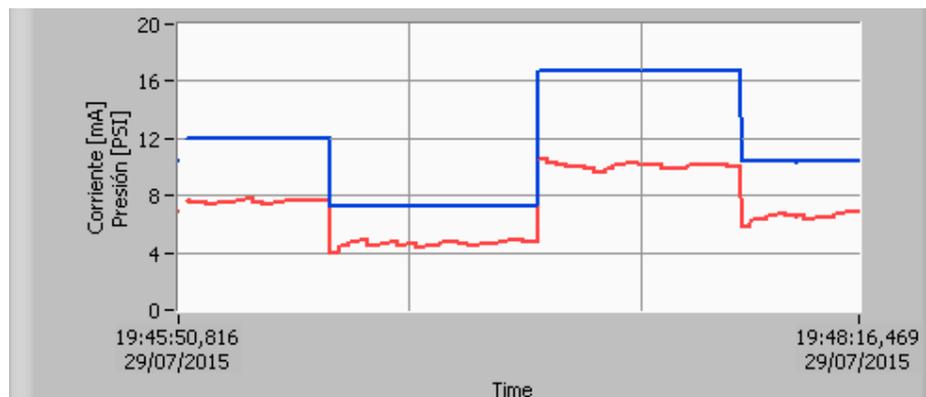
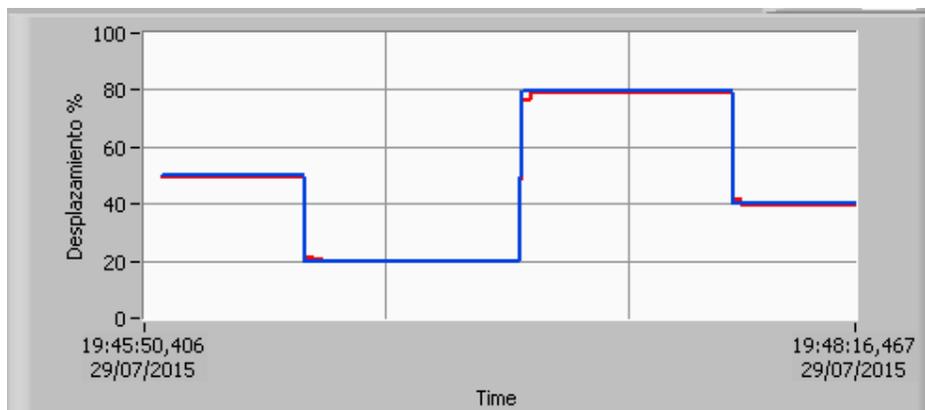


Figura 3.127 Corriente de lazo y Presión del actuador vs. Tiempo



**Figura 3.128 Porcentaje de Desplazamiento y Punto de consigna vs. Tiempo**



**Figura 3.129 Variable de control y Porcentaje de la Variable Primaria vs. Tiempo**

La Figura 3.127 permite verificar visualmente que la presión del actuador (rojo) varía según la corriente de lazo (azul) establecida. Además puede verificarse que se mantenga en el valor presión establecido mientras la corriente de lazo no cambie. En la Figura 3.128 se comprueba que el control interno del controlador de la válvula esté funcionando de manera adecuada al comparar el punto de consigna (azul) con la variable medida (rojo) del porcentaje de desplazamiento del vástago. La Figura 3.129 permite verificar que el posicionador de la válvula entrega la acción de control solicitada por el usuario, al comparar la variable primaria HART (azul) con la variable de control (rojo) de lazo de control del proceso.

### 3.4.4 Alcances

Los alcances de trabajo desarrollado son los siguientes:

- Se implementó el controlador digital a la válvula y esta se convirtió en un instrumento inteligente con capacidad de comunicarse mediante el protocolo HART.
- La implementación de una red HART entre el dispositivo de campo y un computador mediante el modem USB-HART permitió llevar un registro de los parámetros de funcionamiento de la válvula paralelamente a un registro del comportamiento del sistema en sí.
- Se desarrolló una herramienta de diagnóstico de la válvula bajo la plataforma Labview lo que permite obtener graficas como la firma de la válvula, la evolución de corriente, presión y desplazamiento del vástago con resultados muy satisfactorios respecto a los obtenidos con un configurador de campo.
- Se provee de un manual de usuario del posicionador DVC 6200 para una válvula 24588 con el fin de que el estudiante pueda cambiar los diferentes parámetros y comprender como influye en el funcionamiento del sistema.
- La herramienta ident de Matlab permitió determinar un modelo matemático aproximado del sistema a partir de datos tomados en lazo abierto.

### 3.4.5 Limitaciones

- La comunicación HART entre el dispositivo de campo y el ordenador restringe la escritura en las variables de caracterización del proceso por lo que el control se sigue desarrollando mediante la variación de corriente del lazo y los datos digitales simplemente pueden ser leídos.

- Aunque en la actualidad existen transmisores inteligentes que se comunican directamente con el posicionador, con una variación de corriente que responde a un algoritmo de control automático interno, con el fin de suprimir el controlador como elemento físico intermediario; para el control de la variable nivel no se han desarrollado puesto que la debilidad de la tecnología mencionada es que tiene cierto retardo de respuesta, no admisible para el control de una válvula.
- Si se desea aplicar la herramienta de diagnóstico a una válvula con diferentes especificaciones se deben modificar ciertos valores dentro del programa de Labview.
- Al conocer que la dinámica de la planta responde a un sistema no lineal se plantea el desarrollo de algoritmos de control avanzados con el fin de mejorar la respuesta del sistema, pero es necesario realizar pruebas minuciosas para definir los parámetros de dicho algoritmo.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- El controlador inteligente de la válvula o posicionador evita que el control sea errático y lo vuelve estable al compensar las fuerzas de desequilibrio que actúan sobre la válvula, mejorando el control de la variable nivel en este caso.
- La implementación del posicionador mejoró sustancialmente la estabilidad de la válvula y la estabilidad del sistema pero en menor grado, por lo que se concluye que se incrementa la vida útil del elemento de control final.
- El posicionador permite realizar una configuración y calibración en menor tiempo ya que no es necesario retirar la válvula del sistema al utilizar un configurador de campo que posee un asistente que guía paso a paso al personal.
- El protocolo HART integra una señal digital sobre la señal de control de 4 a 20 mA que comunica instrumentos convencionales e inteligentes sin necesidad de modificar el diseño del sistema.
- El protocolo HART define variables universales que los distintos dispositivos HART poseen, lo que hace posible acceder a información general del dispositivo así como información específica de su funcionamiento.
- El modem HART permite integrar un ordenador a una red industrial lo que facilita el almacenamiento y procesamiento de información como atributos generales de fábrica y variables HART.

- El sistema posee un modelo matemático no lineal por lo que el control de la variable nivel mejoró al utilizar un algoritmo de control automático con lógica difusa.
- Pactware y HART Server permiten monitorear el funcionamiento de la válvula en línea, además tienen la opción de llevar un registro de esta información, con la diferencia que HART Server sirve de interfaz con el entorno Labview.
- El software Labview mejora la presentación de la información del lazo control, así como datos HART en una Interfaz Humano Máquina que incluyen gráficas e indicadores que son intuitivos para el usuario.
- La firma de la válvula es un método de diagnóstico muy completo, ya que permite comprobar detalladamente el estado del conjunto válvula actuador, dando a conocer un conjunto de parámetros como: fricción, presión de transición, presión inicial para apertura y cierre, desplazamiento del vástago, rango de presión del actuador de la válvula, etc.

## 4.2 Recomendaciones

- Antes de realizar cualquier pruebas verificar el correcto accionamiento de los dispositivos dentro de su rango de trabajo.
- El suministro de presión del posicionador debe ser mayor a (5 PSIG) y no debe sobrepasar (145 PSIG) o la presión máxima del actuador o el que sea el menor.
- Verificar que la posición del dip switch del posicionador sea la correspondiente para el tipo de comunicación que se va a realizar (punto-punto o multipunto).

- Comprobar que el instrumento este en modo servicio después de realizar la configuración o calibración de un instrumento HART.
- El voltaje mínimo en los terminales del instrumento debe ser 9.5 VCD para control analógico y 10 VCD para una comunicación HART, con una corriente mínima de 4mA.
- Recuerde que el microprocesador reinicia con 3.5 mA.
- No sobrepasar el voltaje máximo 30 VCD que soporta el posicionador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Rodríguez Penin , Sistemas SCADA, Mexico D.F.: Marcombo S.A., 2007, p. 293.
- [2] E. Sánchez Uriza, «HVCOM Potencializando tus conocimientos,» HVCOM, 1 Junio 2012. [En línea].  
Available: <http://edu-hvcom.blogspot.com/p/curso-hvcom.html>.  
[Citado: 16 Enero 2015].
- [3] V. Guerrero, R. Yuste y Martínez Luis, Comunicaciones industriales, Marcombo.
- [4] E. Mandado Pérez , J. Marcos Acevedo, C. Fernández Silva y J. Armesto Quiroga, Autómatas programables y sistemas de automatización, Barcelona: Marcombo S.A, 2009.
- [5] H. c. foundation, «HART Communications Protocol,» [En línea]. Available: <http://en.hartcomm.org/>.  
[Citado 17 Enero 2015].
- [6] Fundación Comunicación HART, «Acerca de nosotros: HART COMMUNICATION FOUNDTION,» [En línea].  
Available: <http://sp.hartcomm.org>.
- [7] ABB, «HART Device Integration,» ABB Powwer and productivity for a better world, [En línea]. Available:  
<http://new.abb.com/control-systems/system-800xa/800xa-dcs/fieldbus-protocols/hart>. [Citado: 15 Enero 2015].
- [8] MicroFlex, «MicroFlex,» [En línea].  
Available: [http://microflx.com/products/usb\\_hart?variant=792035283](http://microflx.com/products/usb_hart?variant=792035283).  
[Citado 15 enero 2015].

- [9] M. E. López Guillen, *Identificación de Sistemas*, 2010.
- [10] MathWorks, «MathWorks,» 21 Enero 2015. [En línea].  
Available: <http://www.mathworks.com/help/ident/ref/arx.html>.  
[Citado: 21 Marzo 2015].
- [11] EMERSON , *Guía de instalación rápida, 00825-0109-4026, Rev FB*, 2013.
- [12] D. Biel Solé, S. Gomáriz Castro y M. Reyes Moreno, *Teoría de Control. Diseño Electrónico*, México: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 1999.
- [13] J. C. Gómez, «Edutecne,» 2008. [En línea]. Available:  
[http://www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy\\_control/UTN-FCONTR.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/fuzzy_control/UTN-FCONTR.pdf).  
[Citado: 20 Marzo 2015].
- [14] C. Solé, *Instrumentación Industrial*, Octava edición ed., Alfaomega, Ed., Barcelona: Marcombo S.A., 2010.
- [15] Fisher, *Instruction Manual*, 2015.
- [16] EMERSON, «DVC6200 Digital Valve Controller Instruction Manual,» Enero 2015. [En línea].  
  
Available:<http://www2.emersonprocess.com/en-US/brands/fisher/DigitalValveControllers/hartcommunicationprotocol/DVC6200/Pages/FIELDVUEDVC6200.aspx>.
- [17] EMERSON, «Valve diagnostic - Friction,» 2015. [En línea]. Available:  
<http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/fisher/digitalvalvecontrollers/fieldvuesolutions/valvediagnostics/pages/valvesignaturebasics.aspx>.
- [18] S. AG, «SAMSON AG,» Diciembre 1999. [En línea]. Available:  
[https://www.samson.de/pdf\\_en/l452en.pdf](https://www.samson.de/pdf_en/l452en.pdf). [Citado: 24 Febrero 2015].

- [19] Fluke Corporation, *700PEX Series Pressure Modules Hoja de Instrucciones*, 2004.
- [20] EMERSON, «DVC6200 Digital Valve Controllers Quick Start Guide,» Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www2.emersonprocess.com>. [Citado: Febrero 2015].

# ANEXOS

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente proyecto de investigación fue desarrollado por las señoritas: Jenny Paola Calvopiña Osorio y Estefanía Monserrath Serna Villarreal, bajo nuestra supervisión:

---

Ing. Edwin Pruna  
**DIRECTOR**

---

Ing. Washington Freire  
**CODIRECTOR**

**APROBADO POR:**

---

Ing. Franklin Silva  
**DIRECTOR DE LA CARRERA**

**CERTIFICADO POR:**

---

Dr. Rodrigo Vaca  
**SECRETARIO ACADÉMICO  
UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRO**

