

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y
Mecatrónica**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
PRESIÓN NEUMÁTICA BASADO EN ALGORITMO DE COLONIA DE
HORMIGAS (ACO)**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Espejo Gutiérrez, René Sergio

Villena Soto, Greymer Javier

Para optar el Título Profesional de

Ingeniero Mecatrónico

Asesor:

Dr. Quispe Ccachuco, Marcelo Jaime

Arequipa – Perú

2019



Universidad Católica
de Santa María

AREQUIPA-PERÚ

(51 54) 382038 <http://www.ucsm.edu.pe> [facebook.com/ucsm.edu.pe/](https://www.facebook.com/ucsm.edu.pe/)

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

INFORME DICTAMINATORIO

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO

**“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE
CONTROL DE PRESION NEUMATICA BASADO EN
ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)”**

Presentado por el Bachiller:

**ESEJO GUTIERREZ RENE SERGIO
VILLENA SOTO GREYMER JAVIER**

Nuestro DICTAMEN es:

Asesorable

OBSERVACIONES:

Ninguna

Arequipa, *05 Diciembre* 201 *9*

ING. MARCELO QUISPE CCACHUCO

ING. SERGIO MESTAS RAMOS

DEDICATORIA

A Dios, que día a día me brinda todo lo necesario para crecer como ser humano y profesional, a mis bisabuelos, abuelos, tíos, a mis padres René y María Elena, y a mi hermana Valeria, por su constante amor y apoyo, que me permitió alcanzar este logro.

René Sergio Espejo Gutiérrez

A Jesús Nazareno, a mis padres Robert y Flor Ángel, a mi hermano Giovanni, a Clara y a toda mi familia que siempre me brindó su apoyo incondicional para poder cumplir ésta meta.

Greymer Javier Villena Soto

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María, por su apoyo constante, la buena implementación de sus laboratorios y la calidad profesional de sus docentes.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, que nos brindó las herramientas y conocimientos necesarios.

Al Doctor Marcelo Quispe Ccachuco, que nos brindó una guía y apoyo constante como persona y profesional en su asesoría en éste trabajo.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	1
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.3. ANTECEDENTES	2
1.3.1. Antecedentes Nacionales	2
1.3.2. Antecedentes Sudamericanos.....	3
1.3.3. Antecedentes Internacionales.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4.1. Justificación técnica	4
1.4.2. Justificación social	4
1.5. OBJETIVOS	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.7. HIPÓTESIS.....	7

CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DE PLANTA.....	8
2.1.1. Neumática	8
2.1.1.1. Aire comprimido.....	9
2.1.1.2. Estructura de un sistema neumático.....	10
2.1.2. Control de la planta.....	14
2.1.2.1. Válvulas de control	14
2.1.2.2. Elementos de medición y sensado de la presión neumática.....	24
2.1.2.3. Tarjeta de valor de punto de consigna.....	28
2.1.2.4. Controlador Lógico Programable (PLC).....	29
2.2. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL	36
2.2.1. Introducción	36
2.2.2. Sistema de control.....	36
2.2.2.1. Sistemas de control de lazo abierto.....	37
2.2.2.2. Sistemas de control de lazo cerrado.....	38
2.2.2.3. Sistemas de control de lazo abierto vs lazo cerrado.....	39
2.2.3. Elementos de un sistema de control.....	40
2.2.3.1. Controlador	40
2.2.3.2. Actuador.....	40
2.2.3.3. Planta.....	40
2.2.3.4. Comparador.....	41
2.2.3.5. Sensor.....	41
2.2.4. Modelado matemático de sistemas de control	41
2.2.4.1. Modelamiento del sistema neumático.....	42
2.2.4.2. Modelamiento de la válvula proporcional de vías y flujos de masa	42
2.2.5. Función de transferencia	48

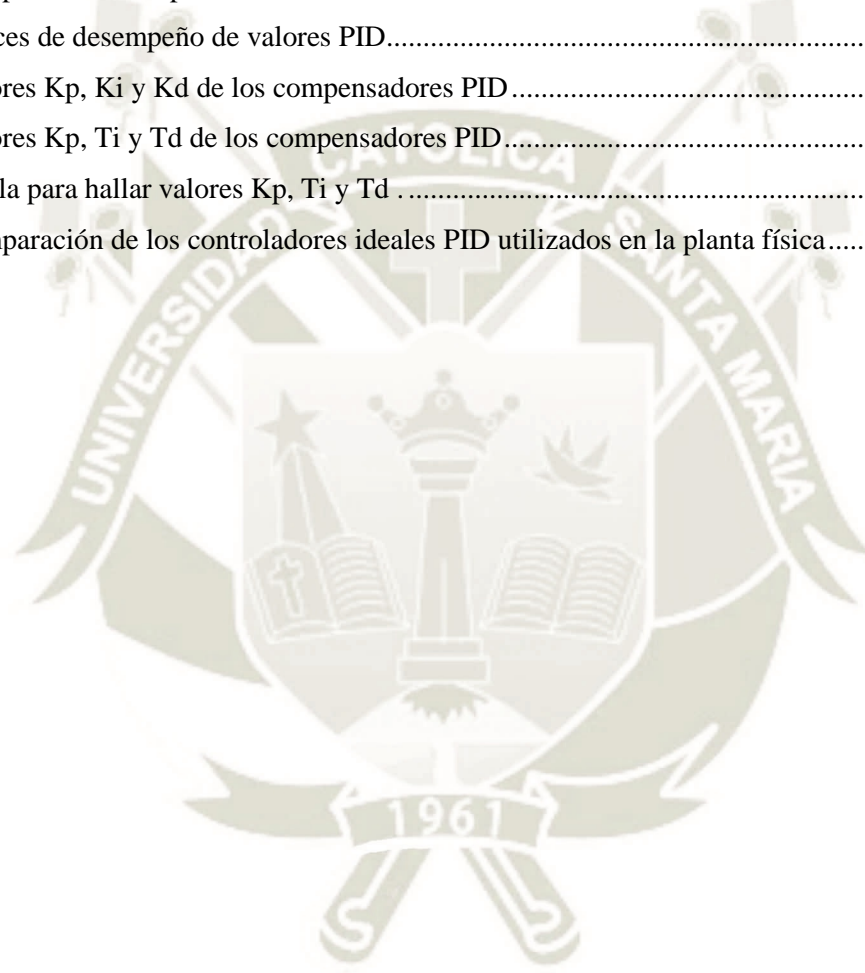
2.2.6.	Diseño de un sistema de control	49
2.2.7.	Modos de control	51
2.2.7.1.	Control proporcional (P)	51
2.2.7.2.	Control integral (I)	51
2.2.7.3.	Control proporcional – integral (PI).....	52
2.2.7.4.	Control proporcional – derivativo (PD).....	53
2.2.7.5.	Control proporcional – integral – derivativo (PID).....	54
2.2.8.	Métodos tradicionales de sintonización de controladores PID	55
2.2.8.1.	Método por herramienta PID Compact de TIA Portal	55
2.2.8.2.	Método por herramienta Sisotool de Matlab.....	58
2.3.	ALGORITMO COLONIA DE HORMIGAS (ACO).....	61
2.3.1.	Optimización combinatoria.....	61
2.3.2.	Heurística	62
2.3.3.	Metaheurística.....	63
2.3.3.1.	Métodos constructivos	64
2.3.3.2.	Métodos de búsqueda.....	65
2.3.3.3.	Métodos evolutivos	66
2.3.3.4.	Inteligencia de enjambre	66
2.3.4.	Optimización de colonia de hormigas.....	67
2.3.4.1.	Propiedades del Ant Colony Optimization	69
2.3.4.2.	Esquema de funcionamiento	70
2.3.4.3.	Procedimiento Ant Colony System.....	71
CAPÍTULO III.....		73
3.	MODELAMIENTO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA	73
3.1.	MODELAMIENTO DE LA PLANTA.....	73
3.1.1.	Adquisición de datos.....	76

3.1.1.1.	Programación del Controlador Lógico Programable (PLC)	76
3.1.1.2.	Generación de datos de planta	81
3.1.2.	Modelamiento de la planta.....	82
3.2.	OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	91
3.3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA	93
3.3.1.	Diseño neumático de la planta	93
3.3.2.	Diseño eléctrico de la planta	95
CAPÍTULO IV.....		97
4.	CÁLCULO DE PARÁMETROS PID DEL CONTROLADOR	97
4.1.	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID APLICANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SISOTOOL DE MATLAB	97
4.2.	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID APLICANDO LA HERRAMIENTA PID COMPACT DEL SOFTWARE TIA PORTAL.....	104
4.2.1.	Procedimiento de obtención de parámetros PID con PID Compact	104
4.2.1.1.	Ingreso, salida y escalamiento de variables de control	104
4.2.1.2.	Creación y configuración del objeto PID Compact	107
4.2.1.3.	Optimización y obtención de parámetros PID	109
4.3.	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID DEL CONTROLADOR POR EL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO).....	111
4.3.1.	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO	111
4.3.2.	PARÁMETROS Y CONSTRUCCIÓN DEL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO).....	116
4.3.3.	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO).....	120

CAPÍTULO V	134
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	134
5.1. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DE PID COMPACT DEL TIA PORTAL.....	136
5.2. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DE SISOTOOL DE MATLAB.....	138
5.3. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DEL ALGORITMO DE HORMIGAS (ACO).....	139
5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA EXPERIMENTAL EN LA PLANTA.....	142
CONCLUSIONES	147
RECOMENDACIONES.....	149
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
ANEXO 1: CÓDIGO MATLAB: ACO.M.....	153
ANEXO 2: CÓDIGO MATLAB: COST_FUNC.M.....	156
ANEXO 3: CÓDIGO MATLAB: COMPARACIÓN.M.....	157
ANEXO 4: BLOQUES SIMULINK.....	158
ANEXO 5: BLOQUES DE PROGRAMACION LADDER	160
ANEXO 6: Tablas EXCEL IAE, ISE e ITAE.....	164
ANEXO 7: DATASHEET VÁLVULA 3/2 VÍAS ACCIONADA MECANICAMENTE FESTO	173
ANEXO 8: DATASHEET ACUMULADOR DE PRESIÓN 0.4 LITROS FESTO	174
ANEXO 9: DATASHEET MANÓMETRO FESTO.....	175
ANEXO 10: DATASHEET VÁLVULA REGULADORA DE CAUDAL FESTO	176
ANEXO 11: DATASHEET VÁLVULA PROPORCIONAL 5/3 VÍAS FESTO.....	177
ANEXO 12: DATASHEET SENSOR DE PRESIÓN ANALÓGICO FESTO.....	181
ANEXO 13: DATASHEET PLC SIEMENS S7-120	183
ANEXO 14: DATASHEET MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS SB-1232 SIEMENS	190

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Símbolos básicos de programación tipo escalera (LADDER).....	35
Tabla 2. Muestra de datos de 0 a 6.4 Bar, obtenidos con una rampa de 0 a 10 V.....	83
Tabla 3. Comparación de especificaciones de los controladores ideales PID utilizados.....	133
Tabla 4. Índices de desempeño de valores PID.....	140
Tabla 5. Valores K_p , K_i y K_d de los compensadores PID.....	140
Tabla 6. Valores K_p , T_i y T_d de los compensadores PID.....	141
Tabla 7. Tabla para hallar valores K_p , T_i y T_d	141
Tabla 8. Comparación de los controladores ideales PID utilizados en la planta física.....	146



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de flujo de señales	10
Figura 2. Depósito de aire comprimido	12
Figura 3. Unidad de mantenimiento FESTO	14
Figura 4. Tipos de Accionamientos Manuales.....	15
Figura 5. Válvula de 3/2 vías FESTO con pulsador y su esquema neumático	16
Figura 6. Electroválvula de Accionamiento Directo.....	17
Figura 7. Válvula Proporcional FESTO de 5/3 vías accionada eléctricamente	17
Figura 8. Válvula reguladora de caudal	18
Figura 9. Válvula reguladora de caudal unidireccional FESTO y su esquema neumático	19
Figura 10. Curva Presión de Salida vs Señal de mando.....	20
Figura 11. Válvula Proporcional Reguladora de Presión – Esquema Representativo	20
Figura 12. Representación neumática y eléctrica de válvula proporcional 5/3 vías	21
Figura 13. Construcción interna de válvula proporcional 5/3 vías	22
Figura 14. Curva de funcionamiento de válvula proporcional 5/3 vías	23
Figura 15. Detalle de conexión eléctrica de válvula proporcional 5/3 vías	23
Figura 16. Tipos de tubos de Bourdon para la medición de presión.....	24
Figura 17. Manómetro FESTO y su esquema neumático	25
Figura 18. Sensor de presión analógica FESTO	26
Figura 19. Simbología de sensor de presión FESTO	27
Figura 20. Curva de funcionamiento de sensor de presión FESTO	27
Figura 21. Tarjeta de Punto de Consigna FESTO.....	28
Figura 22. Diagrama de Bloques de un Controlador Lógico Programable.....	29
Figura 23. PLC Simatic S7-1200 AC/DC/RELAY.....	30
Figura 24. Módulo Siemens SB 1232	31
Figura 25. Módulo de entrenamiento S7-1200 de DINAUT	32
Figura 26. Lenguaje de programación visual (LADDER)	33
Figura 27. Lenguaje de diagrama de tipo escalera (LADDER)	34
Figura 28. Representación de un Sistema de Control	36
Figura 29. Sistema de Control de Lazo Abierto.....	37
Figura 30. Sistema de Control de Lazo Cerrado	38
Figura 31. Posición central de la válvula 5/3	43

Figura 32. Desplazamiento positivo de la corredera.....	43
Figura 33. Desplazamiento negativo de la corredera.....	44
Figura 34. Configuración de flujos de masa 4 y 2	46
Figura 35. Proceso de Diseño de un Sistema de Control	50
Figura 36. Diagrama de Bloques de un Controlador PID	55
Figura 37. Representación del bloque PID Compact.....	56
Figura 38. Representación del objeto PID Compact.....	57
Figura 39. Representación de la estructura interna del objeto PID Compact	57
Figura 40. Lugar de raíces y diagrama de Bode de Sisotool.....	59
Figura 41. Obtención de respuesta al escalón en bucle cerrado.....	59
Figura 42. Imagen de sección interactiva del controlador LTI viewer	60
Figura 43. Esquema de funcionamiento global del Algoritmo GRASP	65
Figura 44. Representación gráfica del recorrido de las hormigas	68
Figura 45. Esquema de funcionamiento del Algoritmo de Colonia de Hormigas ACO.....	71
Figura 46. Diagrama de conexiones para la adquisición de datos	73
Figura 47. Conexiones neumáticas del sistema para adquisición de datos	74
Figura 48. Conexiones eléctricas del sistema para adquisición de datos	75
Figura 49. Vista general de la planta conectada para adquisición de datos	75
Figura 50. Ingreso de datos analógicos.....	77
Figura 51. Bloques de escalamiento de valores	78
Figura 52. Bloque Data Log Create	79
Figura 53. Bloque de datos de planta.....	79
Figura 54. Bloque Data Log Write.....	80
Figura 55. Bloques de traslado de datos	80
Figura 56. Navegador de archivos Siemens.....	81
Figura 57. Gráfico de la rampa y la respuesta de la válvula (tension vs tiempo)	82
Figura 58. Entrada Rampa vs Salida Válvula	83
Figura 59. U1 (Voltios) vs Y1 (Bares).....	84
Figura 60. Vectores “u1” y “y1”.....	84
Figura 61. Datos importados al Workspace.....	85
Figura 62. Ventana de System Identification Tool	85
Figura 63. Importación de datos a System Identification Tool.....	86
Figura 64. Importación de datos y visualización con Time Plot.....	86
Figura 65. Opciones de estimación de modelos.....	87

Figura 66. Transfer Function Model en Ident de Matlab	87
Figura 67. Aproximación de TF1	88
Figura 68. Gráfica realizada por LTI Viewer	88
Figura 69. Configuración de parámetros de Hammerstein-Wiener	89
Figura 70. Model output de modelo no lineal.....	89
Figura 71. Respuesta de la función al sistema con la función LTI Viewer.....	90
Figura 72. Código en Matlab para obtener la función de transferencia	90
Figura 73. Exportación de tf1 a Workspace.....	91
Figura 74. Código en Matlab para obtener la función de transferencia	91
Figura 75. Escalón unitario aplicado a la planta modelada “G” en lazo abierto.....	92
Figura 76. Simulación en Fluidsim de la planta a implementar.....	94
Figura 77. Implementación física de la planta neumática.....	94
Figura 78. Simulación en Fluidsim de las conexiones eléctricas de la planta	95
Figura 79. Diagrama de bloques de diseño de planta.....	96
Figura 80. Conexiones físicas de la válvula y sensor con el PLC.....	96
Figura 81. Herramienta Sisotool	97
Figura 82. Tipo de arquitectura Sisotool.....	98
Figura 83. Valores del controlador PID encontrados con PIDtool	99
Figura 84. Ventana Compensador Editor.....	100
Figura 85. Ventana PID Tuning.....	100
Figura 86. Step del compensador y función de transferencia	101
Figura 87. Exportar compensador a Workspace	102
Figura 88. Visualización compensador en Command Window	102
Figura 89. Visualización en Simulink.....	103
Figura 90. Representación del Segmento 1.....	106
Figura 91. Representación del Segmento 2.....	106
Figura 92. Bloque PID_Compact_1.....	107
Figura 93. Configuración de parámetros entrada/salida	108
Figura 94. Configuración de los límites del valor real.....	108
Figura 95. Asignación de un valor forzado de set point	109
Figura 96. Sintonización de parámetros PID	110
Figura 97. Parámetros PID obtenidos de la sintonización	110
Figura 98. Comportamiento de las hormigas ante un obstáculo	113
Figura 99. Comportamiento de las hormigas artificiales ante un obstáculo	114

Figura 100. Diagrama de bloques de aplicación de algoritmo ACO a control PID	120
Figura 101. Representación gráfica de ACO para obtención de parámetros PID	121
Figura 102. Diagrama de flujo de funcionamiento de ACO para obtener parámetros PID	123
Figura 103. Programa de Simulink planta.mdl, se coloca función de transferencia	125
Figura 104. Programa de Simulink planta.mdl, configuración de bloques	125
Figura 105. Código de Matlab ACO.m, código principal	126
Figura 106. Código de Matlab cost_func.m, código de costo ITAE.....	126
Figura 107. Resultados obtenidos para los parámetros PID mediante el programa ACO.m	127
Figura 108. Figuras 1 y 2 del programa ACO.m, resultados de ACO	127
Figura 109. Comparación de resultados Scope de Simulink y Figure 2 de Matlab	128
Figura 110. Programa Comparacion.m de Matlab	128
Figura 111. Gráfica de comparación de respuesta del controlador PID con programa Comparacion.m..	129
Figura 112. Programa de corroboración Tesis.slx, Diagrama de bloques.....	130
Figura 113. Programa de corroboración Tesis.slx, Diagrama de bloques.....	130
Figura 114. Curva de respuesta al escalón unitario.....	131
Figura 115. Programa ITAE.slx de Simulink, permite exportar los datos de las respuestas	136
Figura 116. Configuración para exportar datos a Workspace desde Simulink	136
Figura 117. Exportación de datos al Workspace, Matlab y Excel	137
Figura 118. Índice de desempeño con PID Compact.....	137
Figura 119. Programa de Simulink con valores de PID Sisotool.....	138
Figura 120. Índices de desempeño de valores PID de Sisotool	138
Figura 121. Programa de Simulink con valores de PID de ACO.....	139
Figura 122. Índices de desempeño de valores PID ACO.....	139
Figura 123. Respuesta real obtenida por método PID Compact	142
Figura 124. Respuesta real obtenida por herramienta Sisotool de Matlab.....	143
Figura 125. Respuesta real obtenida por el Algoritmo Colonia de Hormigas	144
Figura 126. Comparación de las respuestas obtenidas por todos los métodos de sintonización de parámetros	145

RESUMEN

En la mayoría de industrias, ya sean éstas de cualquier tipo, se encuentra presente la variable de la presión en diversas clases de procesos, y a su vez, el control de la misma, ya sea en control de presión de tanques, tuberías, o sistemas de ajuste, reubicación, traslado de piezas, embotelladoras, etc. Siendo así el control de la misma un factor de mejora continua.

La finalidad de ésta tesis, es la aplicación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas (ACO) para la obtención de parámetros PID del controlador, con el propósito de controlar la variable de presión de una planta neumática que fue diseñada e implementada en el Laboratorio de Oleohidráulica y Neumática de la Universidad Católica de Santa María.

Se obtuvo la función de transferencia de la planta mediante el uso de la herramienta ident de MATLAB, y tras ésto, se implementó un controlador PID, cuyos parámetros se obtuvieron a partir de 3 distintos métodos: Herramienta PID Compact de TIA PORTAL, Sisotool de MATLAB, y mediante el algoritmo ACO.

La codificación implementada para encontrar los parámetros PID mediante el algoritmo ACO se basa en una serie de trabajos de investigación previos, y se adaptaron para poder ser aplicados a la planta implementada, midiendo su nivel de eficacia mediante el índice de desempeño ITAE.

Los mejores resultados obtenidos por el algoritmo ACO, se obtuvieron con parámetros de: 5 hormigas, 1000 nodos, 15 tours, 0.8 de coeficiente de evaporación, así como los mejores parámetros PID del controlador obtenidos fueron $K_p=3.09$, $K_i=8.46$ y $K_d=0.16$.

Palabras clave: Presión, ACO, PID, control de presión, neumática.

ABSTRACT

In most industries, whether they are of any type, the pressure variable is present in various kinds of processes, and at the same time, its control, whether in pressure control of tanks, pipes, or systems adjustment, relocation, moving parts, bottlers, etc. In this way, the pressure control is a factor of continuous improvement.

The purpose of this thesis is the application of the ant colony optimization algorithm (ACO) to obtain PID parameters for the controller, with the purpose of controlling the pressure variable of a pneumatic plant that was designed and implemented in the Oil Hydraulic and Pneumatics Laboratory of the Catholic University of Santa María.

The plant transfer function was obtained through the use of the MATLAB ident tool, and after this, a PID controller was implemented, whose parameters were obtained from 3 different methods: TIA PORTAL PID Compact tool, MATLAB Sisotool, and through the ACO algorithm.

The coding implemented to find the PID parameters through the ACO algorithm is based on a series of previous research works, and they were adapted to be applied to the implemented plant, measuring its level of efficiency using the ITAE performance index.

The best results obtained by the ACO algorithm were obtained with parameters of: 5 ants, 1000 nodes, 15 tours, 0.8 for evaporation coefficient, as well as the best PID parameters of the controller obtained were $K_p=3.09$, $K_i=8.46$ y $K_d=0.16$.

Keywords: Pressure, ACO, PID, pressure control, pneumatics.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la ingeniería en automatización y control industrial es un área que ha adquirido mucha relevancia, en vista de que los diversos procesos industriales tienden a ser cada vez más automatizados. Teniendo en cuenta los requerimientos de diversos tipos de procesos, es necesaria la aplicación de tecnologías y métodos que permitan realizar acciones de control y automatización acorde a las características específicas de los procesos en cuestión, es por ello que la ingeniería en el control de procesos tiende a implementar y optimizar diversos métodos y algoritmos que respondan acorde a los requerimientos planteados, tal es el caso que podemos mencionar el desarrollo de los sistemas de control de presión, que se encuentran en constante crecimiento y desarrollo en los distintos tipos de industria, siendo ésta una de las principales variables a controlar en muchos procesos de diversos tipos, ya sea que representen una variable crítica a controlar para algunos tipos de industrias, o en otros casos una variable secundaria a controlar.

En la presente tesis, se realizará el diseño e implementación de un sistema de control de presión neumática, aplicando un método de control dinámico mediante el Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO), con ello se pretende obtener los parámetros más óptimos para un controlador PID, y a su vez comparar los resultados obtenidos con los métodos de sintonización tradicionales.

Cabe resaltar en este proceso de diseño e implementación, se aplicará el uso de diversos componentes de automatización industrial comúnmente usados en procesos industriales, tales como elementos neumáticos, así como Controladores Lógico Programables (PLC).

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La problemática en el Perú llegó a un punto donde la investigación del control y automatización se estancó en métodos básicos de control, la aplicación del control de variables se basa actualmente en el uso del PID, y su sintonización se realiza mediante la aplicación de métodos tradicionales.

A su vez, se reconoce que, en los sistemas de control de presión neumática, debido a la compresibilidad de aire, se dificulta la aplicación de métodos de sintonización tradicionales como Ziegler Nichols, debido a que poseen mucho sobre impulso en el control.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En vista de que actualmente se evidencia la falta de investigación y aplicación de métodos heurísticos de control, se hace necesario ahondar en la investigación de estos métodos, lo que además nos permitirá realizar un aporte al aprendizaje y entrenamiento de los alumnos pertenecientes al Programa de Estudios Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María.

Es por ello, que se implementará un módulo que permita el control de la presión neumática, una variable presente en todo ámbito desde las industrias, transporte, clasificación, etc. De esta manera, se facilitará e impulsará la investigación de nuevas herramientas para el control de un sistema de presión neumática.

En éste tipo de problemática se busca diseñar un control dinámico que nos permita obtener una mejor eficiencia del sistema, nuestra investigación estará basada en la construcción de un algoritmo que se basa en el comportamiento que tienen las hormigas de cómo encontrar la mejor ruta o solución de una problemática partiendo de un mismo punto y llegando a un resultado por muchas rutas o caminos donde se elegirá la óptima, descartando a través del tiempo soluciones que consumen tiempo y recursos.

Una vez obtenida la ruta o camino determinado en el algoritmo de colonia de hormigas se necesitará plantear la forma en la que nuestro algoritmo pueda ser implementado en el módulo de presión neumática y nos permita generar los parámetros PID para el controlador, se usará un PLC (controlador lógico programable) que nos permitirá interactuar con el sistema mediante un determinado lenguaje de programación.

1.3. ANTECEDENTES

1.3.1. Antecedentes Nacionales

En el ámbito nacional tenemos el siguiente antecedente perteneciente a García Pereda, Jorge Pablo Ricardo (2018), donde dio a conocer el **“Empleo del algoritmo de colonia de hormigas para la sintonización de un controlador PID aplicado a un circuito RC”**, como su tesis en el departamento de Trujillo, Perú. La tesis busca dar a conocer la implementación de un programa basado en el algoritmo de colonia de hormigas multi objetivo con restricciones que sirva como método para sintonizar un controlador PID aplicado a un circuito RC de primer orden, y evaluar su desempeño comparándolo con métodos de sintonización convencionales.

De la misma manera, tenemos la tesis de doctorado perteneciente al Dr. Quispe Ccachuco, Marcelo Jaime (2019), que en **“Cálculo de los parámetros del controlador PID, por sintonización y simulación, para el posicionamiento lineal de un cilindro hidráulico”**, dio a conocer una comparativa entre los algoritmos PSO y ACO, destacando mediante distintos tipos de evaluaciones el gran funcionamiento del algoritmo de colonia de hormigas para la sintonización y obtención de los parámetros de un controlador PID.

1.3.2. Antecedentes Sudamericanos

En el ámbito sudamericano tenemos el siguiente antecedente de Centeno Valencia Jairo y Jiménez Herrera Víctor (2010), donde nos permite conocer de forma didáctica un **“Manual consultivo de control neumático y electro neumático utilizando el software FESTO”** en el departamento de Cotopaxi, Ecuador. Esta tesis muestra la elaboración y consecución de un manual de control neumático y electro neumático utilizando como herramienta principal para el diseño de circuitos neumáticos el software simulador fluidSIM el cual es una herramienta de complemento, este trabajo va dirigido al aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Electromecánica de la UTC.”

1.3.3. Antecedentes Internacionales

En el ámbito internacional, donde la tecnología y la automatización son los principales pasos de los países de primer mundo podemos tener el siguiente antecedente de Aparicio Guirao, Daniel (2012), donde implementó la **“Aplicación de los algoritmos de hormigas para la resolución de un RALBP”**, en Barcelona, España. En este estudio se centra en

la resolución de la falta de equilibrio en líneas de montaje en estaciones de trabajo de una línea de producción, por lo que se busca resolver mediante una meta heurística de optimización por colonia de hormigas, basada en el comportamiento de estos animales en el medio natural, donde cada hormiga deposita un rastro de feromonas en la ruta que sigue de la colonia a la fuente de alimento que el resto de los miembros de la colonia pueden seguir. Éste trabajo presenta la implementación del algoritmo de optimización por colonia de hormigas RALBP-MMAS.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1. Justificación técnica

- Diseño e implementación de un circuito neumático necesario para poder llevar a cabo las acciones de control.
- Aplicación de métodos heurísticos y conceptos del control dinámico para el control principal de la variable.
- Programación del controlador lógico (PLC) que llevará a cabo las acciones de control.

1.4.2. Justificación social

- Desarrollar un módulo que sirva a los estudiantes de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María en el estudio del control de variables con la aplicación de nuevos métodos.

- Adquisición de nuevos equipos para el laboratorio de neumática de la UCSM, que brindarán nuevas posibilidades para el desarrollo de la investigación, tanto como para el aprendizaje de los alumnos.
- Desarrollo de nuevos algoritmos de sintonización de parámetros PID para el control en aplicaciones usadas cotidianamente en distintos tipos de industrias, como es el control de la presión, lo que permitirá la optimización de los procesos y por consiguiente del uso de recursos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

- Diseñar e implementar un sistema de control de presión neumática basado en el Algoritmo de Colonia de Hormigas (ACO) para encontrar los parámetros PID del controlador.

1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un circuito neumático que cuente con los elementos necesarios para realizar las pruebas, haciendo uso de componentes Festo.
- Realizar la programación del PLC haciendo uso del lenguaje Ladder.
- Diseñar y adaptar el algoritmo de Colonia de hormigas para encontrar los parámetros de sintonización PID.
- Realizar la comparación de los parámetros obtenidos por ACO con los métodos convencionales.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de ésta tesis se basan en el diseño y construcción de un sistema de control de presión neumática aplicando un control PID haciendo uso de los equipos del laboratorio de neumática de la UCSM, para lo cual se realizará la implementación del sistema de control mediante un PLC Siemens S7-1200, en el cual se probarán dos métodos de sintonización de parámetros convencionales. Además, se estudiará la sintonización de los parámetros PID mediante la aplicación del algoritmo de colonia de hormigas (ACO), y se evaluarán los resultados obtenidos por los distintos métodos estudiados.

En la implementación de ésta tesis, utilizaremos elementos de la marca FESTO, debido a que al trabajar con componentes únicamente de esta marca, no habrá problemas de conexión durante la implementación de la planta en sí, y en caso se desee replicar ésta tesis, será necesario utilizar elementos de la misma marca, debido a que cada uno de ellos posee características propias, que determinarán las características de la planta. También se cumple el propósito de continuar la línea con la que trabaja el Laboratorio de Oleohidráulica y Neumática de la Universidad Católica de Santa María.

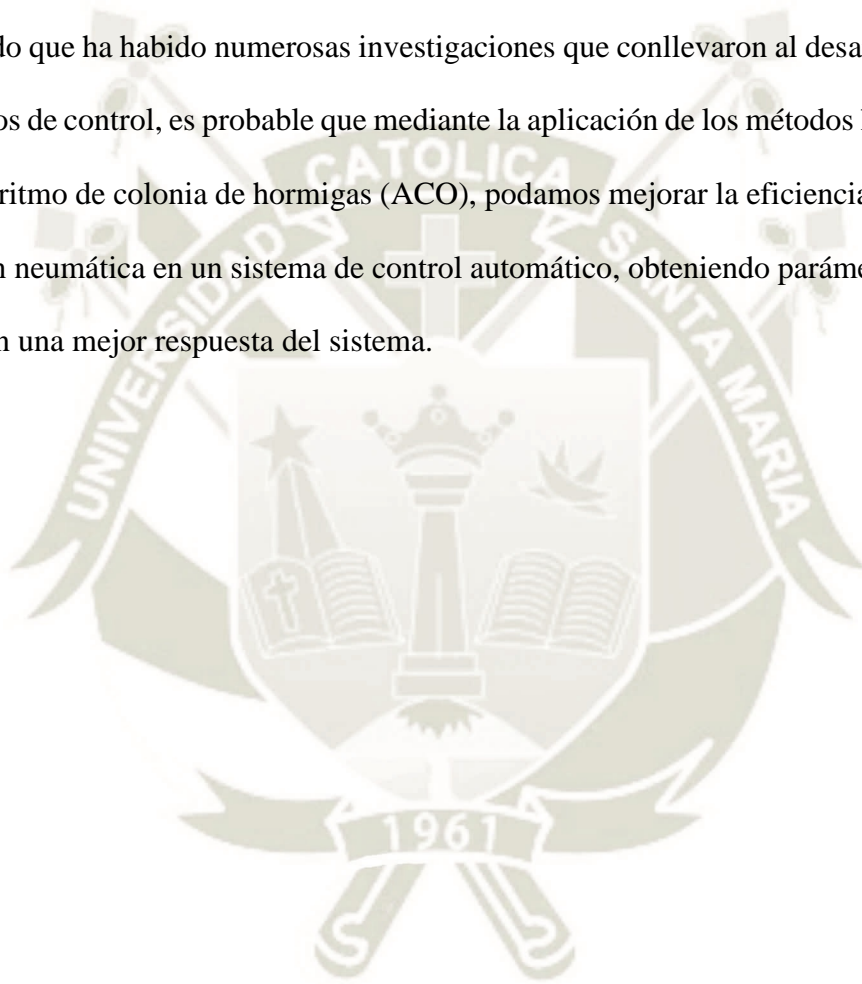
Al ser la presión una variable que varía su valor de manera constante debido a muchos factores tales como las características del compresor o de los elementos neumáticos propios de la planta, se dificulta particularmente realizar controlarla de una manera estable. A su vez, el compresor a usar nos proporciona una salida de 0 a 8 bar, lo que limita el rango de control de la planta a valores de 0 a 5 bares.

Finalmente, se presenta la limitación sobre el algoritmo ACO en sí, que debido a ser un nuevo algoritmo de búsqueda de parámetros PID, no ha sido ampliamente estudiado como

los métodos tradicionales de sintonización, es por ello que presenta ciertas restricciones y dificultades de diseño e implementación.

1.7. HIPÓTESIS

Dado que ha habido numerosas investigaciones que conllevaron al desarrollo de diversos métodos de control, es probable que mediante la aplicación de los métodos heurísticos, como el algoritmo de colonia de hormigas (ACO), podamos mejorar la eficiencia del control de la presión neumática en un sistema de control automático, obteniendo parámetros PID que nos brinden una mejor respuesta del sistema.



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DE PLANTA

2.1.1. Neumática

M. Moreno afirma que el aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que conoce y utiliza el hombre para reforzar sus recursos físicos, el primer lugar donde se inició el estudio y el uso de la neumática fue en la antigua Grecia en el siglo I, hace más de dos mil años.

De aquí mismo procede la expresión Pneuma que designa lo etéreo, lo puro los cuatro elementos fundamentales: aire, agua, fuego y tierra. Como derivación de la palabra Pneuma surge el concepto neumático que trata los movimientos y procesos del aire.

A partir de 1950 podemos hablar de una verdadera aplicación industrial de la neumática en los procesos de fabricación, la neumática en la industria no se inició hasta hacerse más necesaria la exigencia de automatizar y racionalizar los procesos de trabajo para bajar los costos de producción. En la actualidad, todo desarrollo industrial está concebido con aire comprimido, y en consecuencia se usan equipos neumáticos.

La neumática es la tecnología que emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos. El aire es un material elástico y por tanto, al aplicarle una fuerza, se comprime, mantiene esta compresión y devolverá la energía acumulada cuando se le permita expandirse, según la ley de los gases ideales (Moreno, 2011).

2.1.1.1. Aire comprimido

El aire comprimido también llamado aire compactado por medios mecánicos, confinado en un reservorio a una determinada presión.

Distinto de los líquidos que son virtualmente incomprensibles, el aire es fácilmente compresible y puede almacenarse en grandes cantidades en recipientes relativamente pequeños. Mientras más se comprima el aire, más alta la presión, a mayor presión mayor debe ser la resistencia del recipiente.

El aire comprimido tiene algunas ventajas tales como la generación de energía sin limitaciones ya que la materia prima es sin costo, fácil distribución y no precisa recuperación, también brindan la facilidad de acumulación en tanque o depósitos, puede ser usado en ambientes altamente explosivos o inflamables; no interfiere ni daña el medio ambiente. Los costos involucrados al aire comprimido son de bajo coste y de fácil obtención (Moreno, 2011).

Todas estas ventajas son de gran importancia, pero no debemos olvidar que toda tecnología también presenta inconvenientes y las desventajas más notables son:

- En circuitos de gran longitud o de tamaño considerable se producen pérdidas de energía demasiado considerables para los procesos.
- Las presiones con las cuales se trabajan no permiten aplicar grandes fuerzas.

Genera altos niveles de ruido debido a la descarga de aire hacia la atmósfera, por lo que requiere de medidas de seguridad para los procesos operativos (Vega, 2010).

2.1.1.2. Estructura de un sistema neumático

Los sistemas neumáticos están compuestos de una concatenación de diversos grupos de elementos. Estos grupos de elementos conforman una vía para la transmisión de señales de mando desde el lado de la emisión de señales (entrada) hasta el lado de la ejecución del trabajo (salida). En la **Figura 1** se representa el sistema de flujo de señales neumáticas (Moreno, 2011).

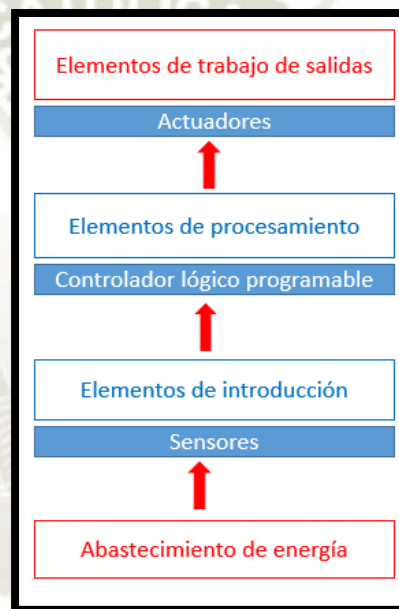


Figura 1. Sistema de flujo de señales
Fuente: Adaptado de Moreno (2011)

Abastecimiento de energía

El sistema de abastecimiento de aire comprimido para un sistema neumático, debe tener dimensiones suficientemente grandes y además, el aire comprimido debe tener la calidad necesaria. El aire es comprimido y guiado hacia el sistema de distribución de aire. Para tener la seguridad que el aire tiene la calidad requerida, se recurre a una unidad de mantenimiento (Vega, 2010).

Algunos equipos de abastecimiento son:

Compresor

Para producir aire comprimido se utilizan compresores, que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Todos los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central de generación.

El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías. Las centrales de generación pueden ser fijas, como en la mayoría de las industrias, o móviles, como en la construcción o en máquinas que se desplazan frecuentemente. Como norma general, al planificar una instalación, es necesario prever un tamaño superior de la red, para alimentar aparatos neumáticos que se adquieran en el futuro (Vega, 2010).

Depósito de aire comprimido

El acumulador o depósito tiene la función de estabilizar el suministro de aire comprimido. Compensa las oscilaciones de presión en la red de tuberías, a medida que se consume aire comprimido.

Gracias a la gran superficie del acumulador, el aire se refrigera adicionalmente. Por este motivo, en el acumulador se desprende directamente una parte de la humedad del aire en forma de agua (Moreno, 2011).

En la **Figura 2**, se identifica un depósito de aire comprimido con el detalle de las principales partes que lo componen.

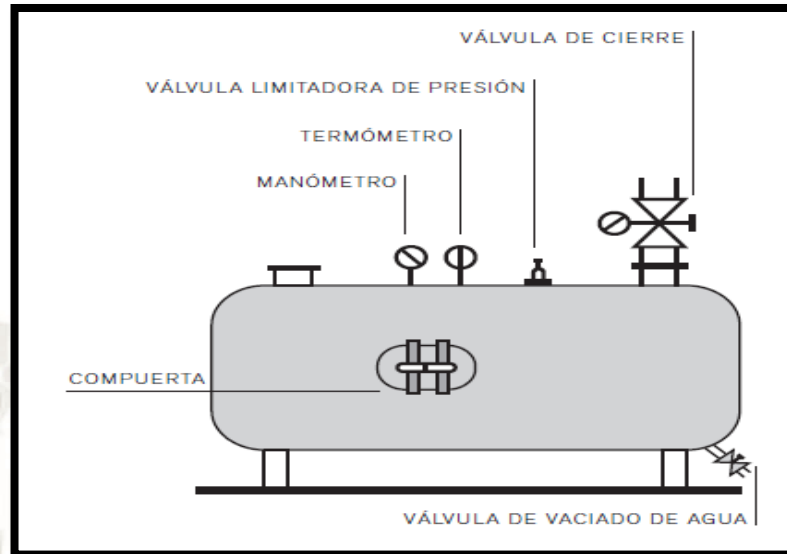


Figura 2. Depósito de aire comprimido
Fuente: Buenache (2010)

Para la construcción de la planta, incluiremos un acumulador de presión neumática de la marca FESTO, en el cual se ejercerá la acción de control de la presión que contenga, el acumulador que usaremos tendrá una capacidad de 0.4 lt de capacidad.

Unidad de mantenimiento

La unidad de mantenimiento combina los siguientes elementos:

- Filtro de aire comprimido.
- Regulador de aire comprimido.
- Lubricador de aire comprimido.
- Manómetro indicador de la presión.

La combinación correcta, el tamaño y el tipo de estos elementos son determinados por la aplicación concreta y por las exigencias que se planteen al sistema. Para

garantizar la calidad del aire necesaria en cada aplicación, se instalan unidades de mantenimiento en todos los sistemas de control de la red neumática (Vega, 2010).

Filtro para aire comprimido

El filtro para aire comprimido tiene la función de eliminar impurezas y condensado de aire a presión que pasa por él. El aire comprimido fluye hacia el vaso del filtro, donde se produce la separación de las partículas de líquido y de suciedad mediante fuerza centrífuga.

Las partículas de suciedad se depositan en el fondo del vaso. El condensado tiene que ser evacuado antes de que llegue al nivel máximo, ya que de lo contrario sería alimentado otra vez al flujo de aire (Vega, 2010).

Regulador de aire a presión

El regulador tiene la función de mantener constante la presión de servicio (presión secundaria), independientemente de las oscilaciones que se produzcan en la presión de potencia (presión primaria) y del consumo de aire.

Lubricador del aire a presión

Este tiene la función de agregar aceite al aire en determinado tramo del sistema de distribución de aire, en caso de que el funcionamiento del sistema neumático así lo

requiera (FESTO, Neumática e hidráulica. Sistemas de aprendizaje y servicios para la formación técnica., 2017).



Figura 3. Unidad de mantenimiento FESTO
Fuente: FESTO (2017)

2.1.2. Control de la planta

Con la finalidad de realizar el control de la planta neumática a implementar, será necesario identificar los principales componentes a utilizar.

2.1.2.1. Válvulas de control

Previamente han sido mencionados algunos elementos neumáticos que intervienen en el suministro y regulación de la presión que alimentará a nuestro sistema. De manera adicional es necesario identificar y clasificar a ciertos elementos neumáticos que son considerados como complementarios, pero serán imprescindibles en el sistema que posteriormente será presentado, ya que son los elementos responsables del control del caudal y presión del fluido del sistema.

Dependiendo de su construcción y aplicación, las válvulas pueden tener distintos tipos de accionamientos, los cuales son como se muestran a continuación (Serrano Nicolás, 2009).

Válvulas de accionamiento manual

Son aquellas que requieren una acción voluntaria del operador para que se pueda dar su funcionamiento.

En todo sistema neumático, independientemente del grado de automatización que éste tenga, siempre habrá una válvula de accionamiento manual, que cumplirá diversos propósitos de acuerdo a la finalidad del sistema (Serrano Nicolás, 2009).

En la **Figura 4** se muestran distintos tipos de accionamientos manuales: (a) Pulsador rasante protegido, (b) Pulsador tipo seta, (c) Pulsador tipo seta de mayores dimensiones, (d) Válvula selectora de llave, (e) Selector de Maneta de 2 o 3 posiciones fijas.

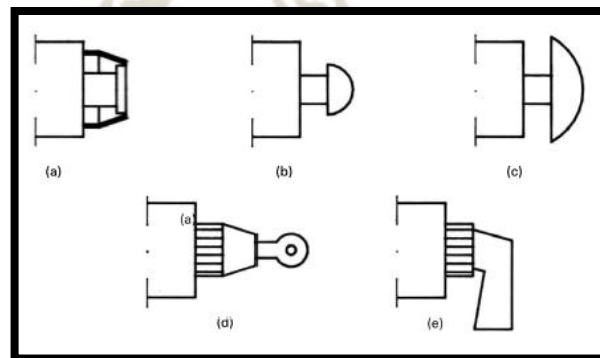


Figura 4. Tipos de Accionamientos Manuales
Fuente: Serrano Nicolás (2009)

En la **Figura 5** se identifica una válvula de 3/2 vías de accionamiento mecánico de la marca FESTO, así como su esquema neumático. Ésta válvula será aplicada en ésta tesis con distintos propósitos, siendo el principal representar una perturbación en el sistema de control.

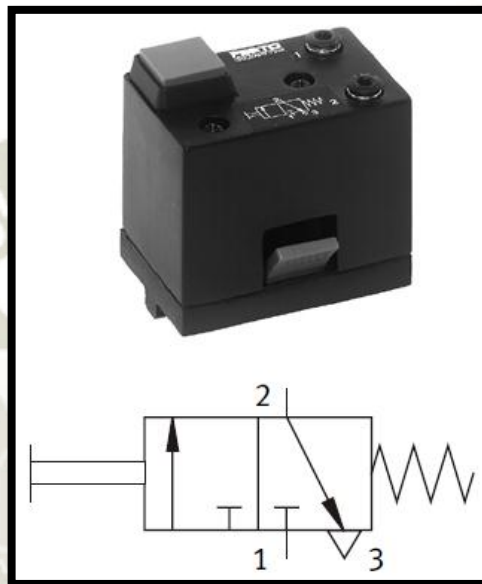


Figura 5. Válvula de 3/2 vías FESTO con pulsador y su esquema neumático
Fuente: FESTO (2002)

Válvulas de accionamiento eléctrico

Éste tipo de mando transforma la señal eléctrica en una señal neumática que accionara el mecanismo de cierre o apertura de las distintas vías de la válvula.

Pueden ser de tipo de accionamiento directo o indirecto, o servo pilotadas.

En la **Figura 6** se observa una electroválvula de accionamiento directo, en ella se puede observar el cuerpo de la válvula (3), una bobina electromagnética (1), la cual ejercerá un campo magnético al ser energizada al cerrarse el interruptor (2), y ejercerá una atracción sobre el núcleo móvil (4), venciendo la fuerza del resorte, permitiendo de esta manera el paso del fluido del punto P al A (Serrano Nicolás, 2009).

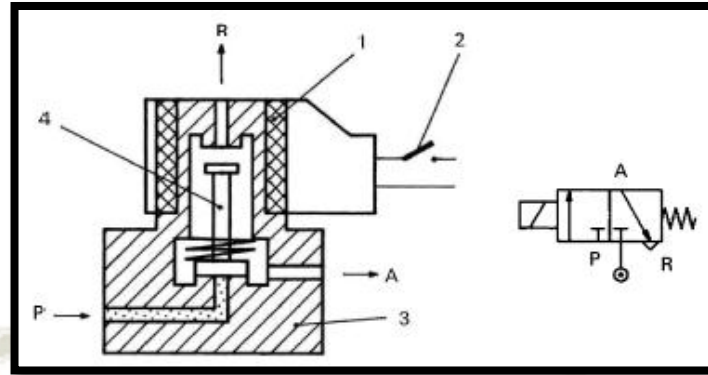


Figura 6. Electroválvula de Accionamiento Directo
Fuente: Serrano Nicolás (2009)

En la aplicación de ésta tesis, se aplicará la utilización de una válvula proporcional FESTO de 5/3 vías accionada de manera eléctrica, mediante una variación de 0 a 10 voltios, como se muestra en la **Figura 7**.

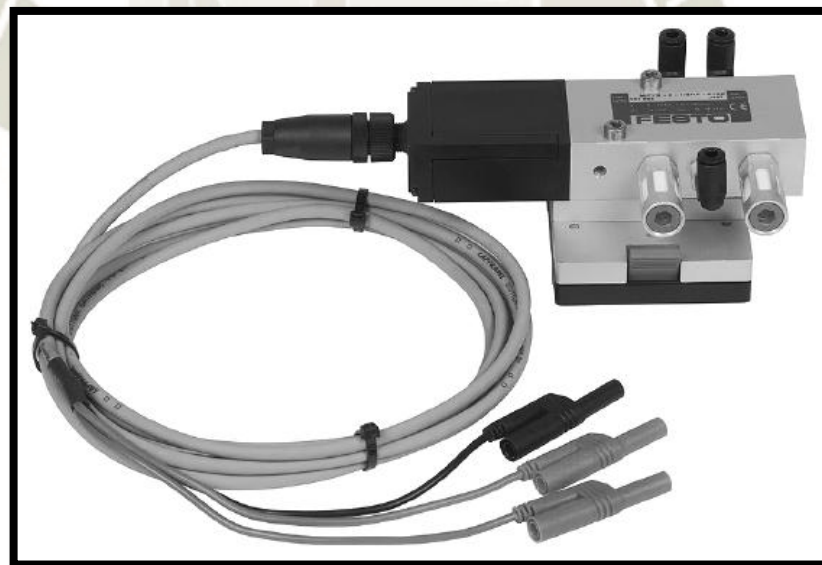


Figura 7. Válvula Proporcional FESTO de 5/3 vías accionada eléctricamente
Fuente: FESTO (2002)

Por su aplicación, podríamos identificar a los principales tipos de válvulas, tomando en consideración a las que se usarán en la implementación de la planta de ésta tesis, como se detallan a continuación.

Válvula reguladora de caudal

Ésta válvula el caudal que circula a través de un conducto de una manera simple, estrangulando el paso, disminuyendo así la sección o área transversal del paso del conducto. La regulación se puede realizar de dos maneras, sea en ambos sentidos, o sólo en uno de ellos, en éste caso se incorpora en paralelo una válvula anti retorno.

En la **Figura 8**, se muestran ambos tipos de válvulas reguladoras de caudal con sus respectivos esquemas neumáticos. Al lado izquierdo, se puede ver la válvula reguladora de caudal de sentido bidireccional (la que no cuenta con válvula anti retorno), y al lado derecha se muestra la válvula reguladora de caudal de sentido unidireccional (Serrano Nicolás, 2009).

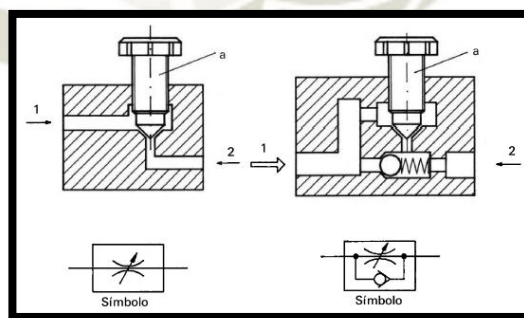


Figura 8. Válvula reguladora de caudal
Fuente: Serrano Nicolás (2009)

En la implementación, aplicaremos el uso de ésta válvula junto con la válvula de 3/2 vías accionada mecánicamente para poder regular el nivel de perturbación que se desea simular en la planta.

El datasheet de la válvula reguladora de caudal FESTO puede ser identificado en el **ANEXO 10**.

En la **Figura 9**, se muestra la válvula reguladora de caudal FESTO que aplicaremos en ésta tesis, así como su respectivo esquema neumático.

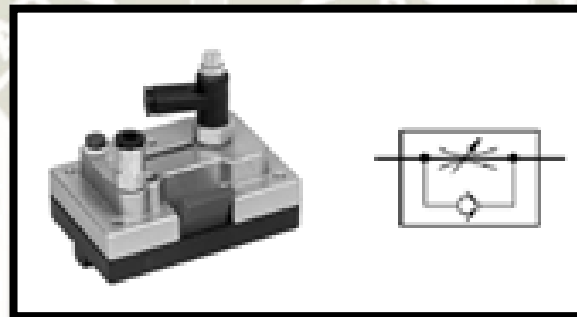


Figura 9. Válvula reguladora de caudal unidireccional FESTO y su esquema neumático
Fuente: FESTO (2002)

Válvula proporcional reguladora de presión

Con el aporte de la electrónica moderna, es posible lograr un control preciso del flujo neumático que se suministra a los distintos actuadores, esto se logra mediante la aplicación de las válvulas proporcionales, elementos que fueron recientemente incorporados al campo de la neumática.

Estos elementos permiten la regulación precisa de presiones neumáticas según una magnitud previamente fijada mediante una señal de tensión eléctrica, permitiendo también ajustar la curva de presión-señal (Serrano Nicolás, 2009).

De la curva mostrada en la **Figura 10**, se puede concluir que la presión de salida será proporcional a la tensión eléctrica en la bobina.



Figura 10. Curva Presión de Salida vs Señal de mando
Fuente: Serrano Nicolás (2009)

En la **Figura 11** se muestra un esquema representativo de la acción de control que ejerce la válvula, así como los principales elementos que intervienen en ésta acción.

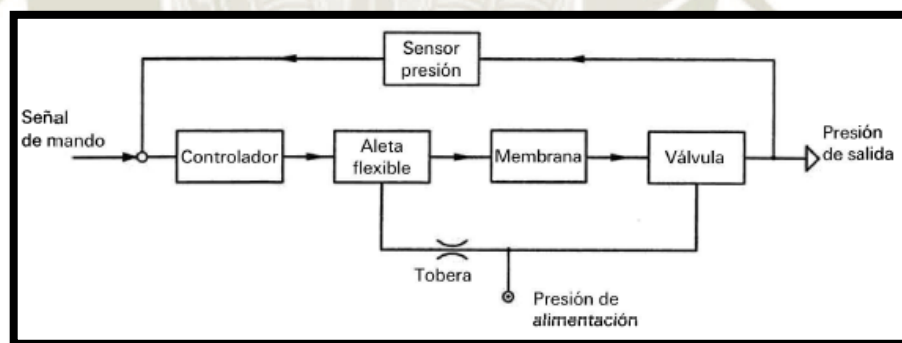


Figura 11. Válvula Proporcional Reguladora de Presión – Esquema Representativo
Fuente: Serrano Nicolás (2009)

La válvula proporcional que usaremos para construir la planta será una válvula de 5/3 vías de la marca FESTO, la cual se alimenta de 0 a 10 V o de 4 a 20 mA.

En la **Figura 12**, se muestra el diagrama de la válvula proporcional FESTO de 5/3 vías. Se puede apreciar que la válvula sólo será pilotada eléctricamente por un lado, contando por el otro con un retorno por muelle. Cuenta con una entrada de aire en 1 y 2 salidas, en 2 y 4. Por construcción de la planta, la salida 2 de la válvula será bloqueada, ya que la implementación de la planta únicamente de la salida 4.

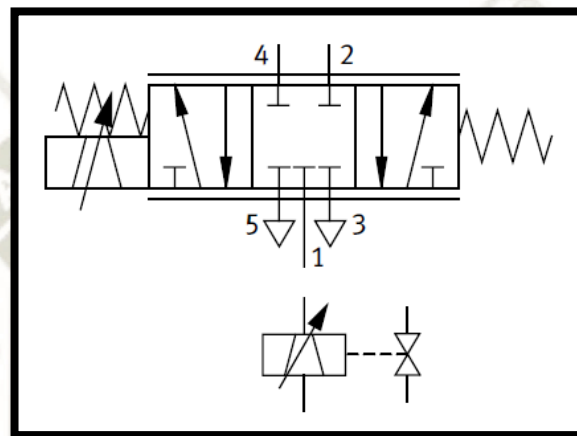


Figura 12. Representación neumática y eléctrica de válvula proporcional 5/3 vías
Fuente: FESTO (2002)

A su vez, en la **Figura 13**, se muestra la construcción interna de la válvula, con un listado de las partes internas que la componen.

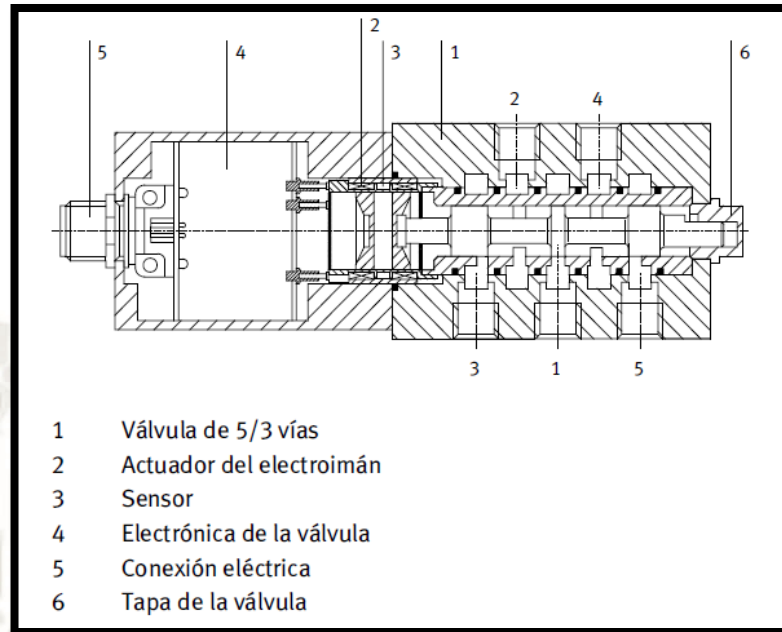


Figura 13. Construcción interna de válvula proporcional 5/3 vías
Fuente: FESTO (2002)

La válvula cuenta con un sensor interno de posición de la corredera, que mide la posición de la corredera, así como una electrónica interna que se encarga de regular la posición de la corredera (FESTO, 2002).

De la misma manera, en la **Figura 14**, se puede identificar su curva de funcionamiento en función de la tensión suministrada. De la curva podemos deducir que, al sólo trabajar con una salida de la válvula mencionada, sólo trabajaremos con un rango de voltaje aproximado de 5 a 10 voltios, ya que de 0 a 5 voltios tendremos una zona muerta.

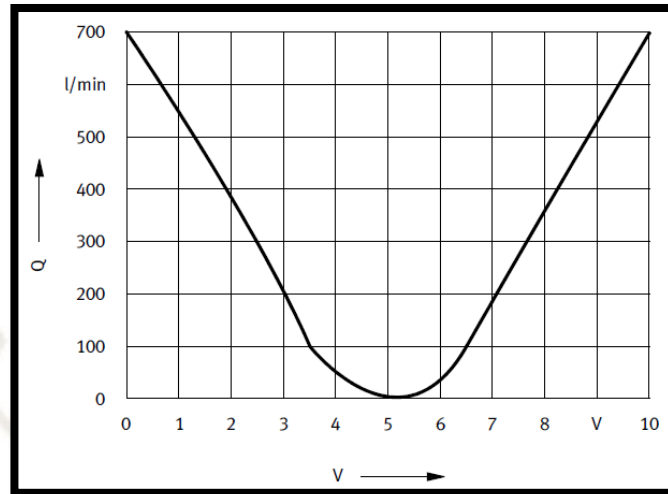


Figura 14. Curva de funcionamiento de válvula proporcional 5/3 vías
Fuente: FESTO (2002)

En la **Figura 15**, se identifica la correcta conexión de la válvula proporcional de acuerdo a un código de colores. Cabe resaltar que estimularemos a la válvula mediante voltaje, por lo que no será necesario utilizar la entrada de corriente (negra).

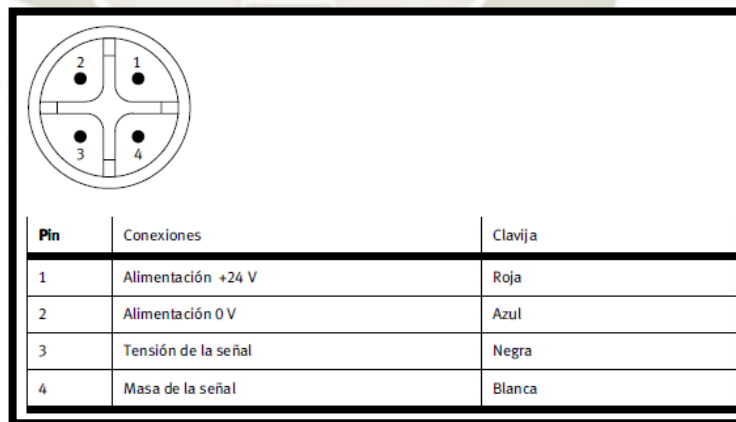


Figura 15. Detalle de conexión eléctrica de válvula proporcional 5/3 vías
Fuente: FESTO (2002)

El datasheet de la válvula proporcional de 5/3 vías FESTO puede ser identificado en el **ANEXO 11**.

2.1.2.2. Elementos de medición y sensado de la presión neumática

Manómetro

Según Cengel (2009), el manómetro es un dispositivo de medición de presión, que mediante un método de deformación elástica (Tubo de Bourdon), nos permite conocer la presión neumática en el sistema, esto debido a la deformación que sufren algunos materiales cuando se les aplica una presión, como se muestra en la **Figura 16**.

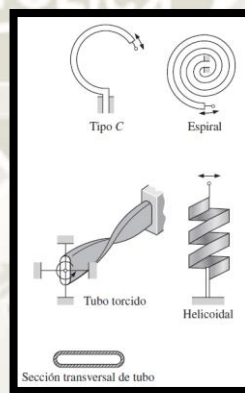


Figura 16. Tipos de tubos de Bourdon para la medición de presión
Fuente: Cengel (2009)

Como parte del módulo a implementar, se aplicará el uso de un manómetro para poder monitorear la presión presente en la línea de manera visual.

El manómetro proporcionado por FESTO consta de las siguientes características:

- Manómetro con tubo de Bourdon.
- Margen de indicación: 0-1000 kPa (0-10 bar).
- Clase de calidad: 1.6.
- Sistema de fijación rápida Quick-Fix.

En la **Figura 17**, se muestra un manómetro FESTO, así como su esquema neumático.

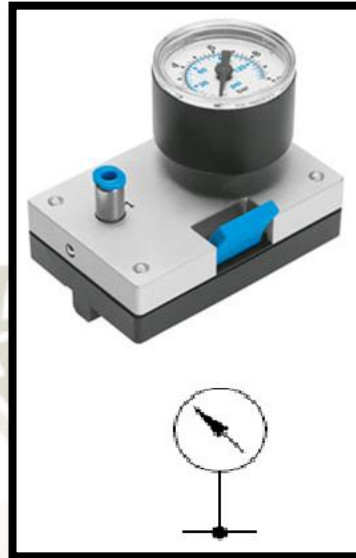


Figura 17. Manómetro FESTO y su esquema neumático
Fuente: FESTO (2017)

Sensor de Presión

Es el elemento encargado de proveer el valor de la variable física de presión de manera eléctrica. Para cumplir éste propósito, se utiliza un transductor eléctrico de presión, mediante la unión de un elemento que varía su resistencia con la presión, y un elemento eléctrico que lo transforma en una señal (Tecsup, 2018).

Para la construcción de la planta, usaremos un sensor de presión de la marca FESTO.

Según las hojas de datos de FESTO (2017), éste elemento es un sensor de presión relativa de resistencia piezoeléctrica con amplificador y compensación de temperatura, integrados en un cuerpo de aluminio.

Las características principales de este sensor son:

- Magnitud medida: Presión relativa.
- Procedimiento de medición: Sensor de presión piezorresistivo.
- Margen de medición: 0-1000 kPa (0-10 bar).
- Presión máxima: 1400 kPa (14 bar).
- Alimentación: 12-30 V DC.
- Salida analógica: 0-10 V, 0-20 mA.
- Error total: ± 1 % del valor final.
- Medio de funcionamiento: aire comprimido filtrado, grado de filtración 40 μm .
- Conexión eléctrica: conectores de seguridad de 4 mm.
- Frecuencia máxima: 100 Hz.
- Protección eléctrica: resistente a cortocircuitos, con protección de polaridad inversa.
- Sistema de fijación rápida Quick-Fix.



Figura 18. Sensor de presión analógica FESTO
Fuente: FESTO (2017)

A continuación, podemos identificar en primer lugar el símbolo eléctrico del sensor, el cual nos permitirá representar el elemento en la etapa de diseño de la planta, así como identificarlo para poder realizar la simulación correspondiente. El símbolo para el sensor de presión está representado en la **Figura 19**, en la parte superior se representa la entrada neumática del elemento, y en la parte inferior se representan los terminales eléctricos del sensor.

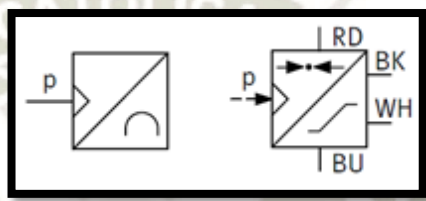


Figura 19. Simbología de sensor de presión FESTO
Fuente: FESTO (2002)

De igual manera, en la **Figura 20**, podemos identificar la curva de funcionamiento del sensor, la cual nos indica un funcionamiento lineal para una tensión de 0 a 10 voltios, con una salida de 0 a 10 bares.

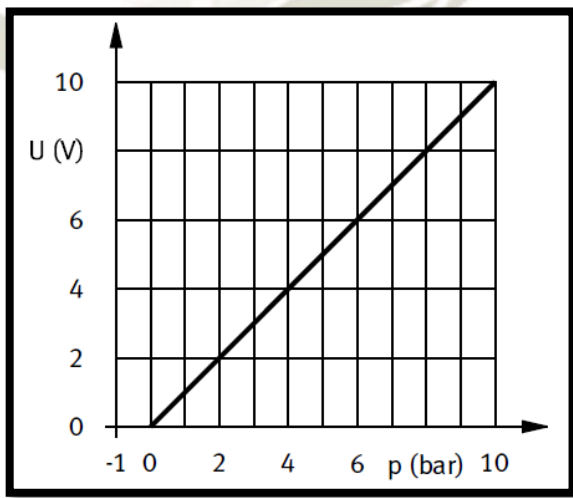


Figura 20. Curva de funcionamiento de sensor de presión FESTO
Fuente: FESTO (2002)

2.1.2.3. Tarjeta de valor de punto de consigna

Con la finalidad de generar rampas o escalones para poder realizar la etapa de modelamiento de la planta, se aplicará el uso de una tarjeta de consigna FESTO.

De acuerdo a las hojas de datos de FESTO (2017), éste tipo de tarjeta nos proporciona las siguientes funciones:

- Generación de puntos de consigna programable.
- Generación de rampa programable.
- Secuencia cíclica de puntos de consigna y rampas.
- Cronómetro.
- Margen de tensión de salida: $-10 - +10$ V (ajustable en pasos de 0.1V).
- Rampas: 4.
- Tensión de activación de entradas: Min. 15 V.

Este tipo de tarjeta proporcionará el valor de referencia que deseemos obtener en la salida del controlador PID, proporcionando un valor de tensión (FESTO, Neumática e hidráulica. Sistemas de aprendizaje y servicios para la formación técnica., 2017).



Figura 21. Tarjeta de Punto de Consigna FESTO
Fuente: FESTO (2017)

2.1.2.4. Controlador Lógico Programable (PLC)

De acuerdo a Ballcells y Romeral (1997), el controlador lógico programable, es un equipo electrónico de control independiente del proceso a controlar, que se adapta al mismo y contiene la secuencia de operaciones a realizar.

Esta serie de operaciones se define en señales de entrada y salida, ya sean digitales o analógicas, dependiendo del tipo de proceso controlado y sus características de control.

Se gobiernan las señales de salida a partir de un programa de control previamente introducido a la memoria del autómata, a través de una unidad de programación.

Un Controlador Lógico Programable se compone de los siguientes bloques:

- Unidad central de proceso o de control (CPU).
- Memorias internas.
- Memoria de programa.
- Interfaces de entrada y salida.
- Fuente de alimentación.

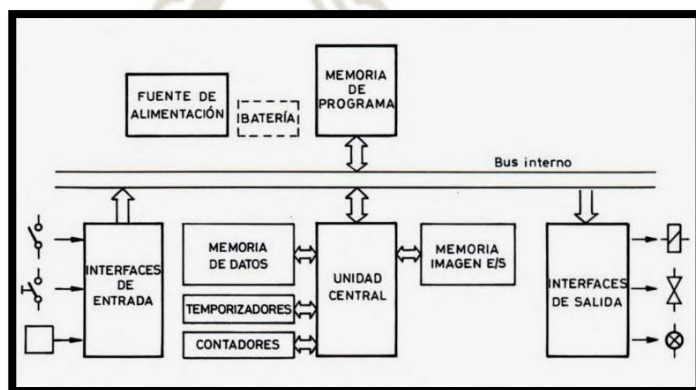


Figura 22. Diagrama de Bloques de un Controlador Lógico Programable
Fuente: Balcells y Romeral (1997)

Para implementar el sistema que controlará la planta neumática, utilizaremos un controlador lógico programable de la marca Siemens, en el modelo S7-1200 compact CPU 1214C AC/DC/RELAY, éste es un PLC compacto, que cuenta con las siguientes características principales:

- 14 entradas digitales.
- 10 salidas digitales como relés.
- 2 entradas analógicas.
- Voltaje de alimentación: 85-264 V AC.
- Cuenta con un puerto PROFINET para la comunicación.
- 100kB de memoria para programación y datos.

En la **Figura 23**, se muestra una imagen del PLC Siemens S7-1200, donde se pueden reconocer las principales entradas y salidas.



Figura 23. PLC Simatic S7-1200 AC/DC/RELAY
Fuente: Siemens (2015)

Para poder realizar el control será necesario controlar la válvula proporcional FESTO de 5/3 vías, que trabaja en un rango de 0 a 10 voltios, como una variable analógica, por lo que el PLC deberá estar equipado con el módulo SB 1232, AQ 1x12 bit, que brinda al PLC 1 salida analógica mediante la cual se podrá controlar la válvula proporcional.

Los datasheets del PLC Siemens S7-1200, tanto como del módulo SB-1232 pueden ser identificado en los **ANEXOS 13 y 14** respectivamente.



Figura 24. Módulo Siemens SB 1232
Fuente: Siemens (2019)

El PLC Siemens S7-1200 que se utilizará en el desarrollo de ésta tesis se encuentra instalado en un módulo de entrenamiento de propiedad de la Universidad Católica de Santa María, diseñado y fabricado por DINAUT, el cual se muestra en la **Figura 25**.



Figura 25. Módulo de entrenamiento S7-1200 de DINAUT
Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que aplicamos el uso particular de éste modelo de PLC, así como de la marca Siemens, tomando en cuenta la buena interconexión que la misma nos brinda con la marca FESTO, lo cual permite que la etapa de diseño y construcción se facilite en gran medida. También es destacable que éste PLC nos brinda prestaciones industriales, y su costo es relativamente bajo en comparación a equipos del mercado que cuentan con las mismas características.

Lenguajes de Programación

El lenguaje de programación es un lenguaje formal que nos permite ingresar un programa para expresar procesos de control en la memoria del PLC, usando una sintaxis establecida. Un programa es un conjunto de instrucciones, órdenes y símbolos reconocidos por el PLC que nos permitirá ejecutar una secuencia de control deseada.

Según el estándar IEC 61131, el que considero estos lenguajes para la programación de los PLC. Los lenguajes de programación se pueden clasificar en lenguaje de programación visual o escrito (DIEEC, 2011).

Los lenguajes de programación visual admiten estructurar el programa por medio de símbolos gráficos, similares a los que se han venido utilizando para describir los sistemas de automatización, planos esquemáticos y diagramas de bloques (SENA, 2005).

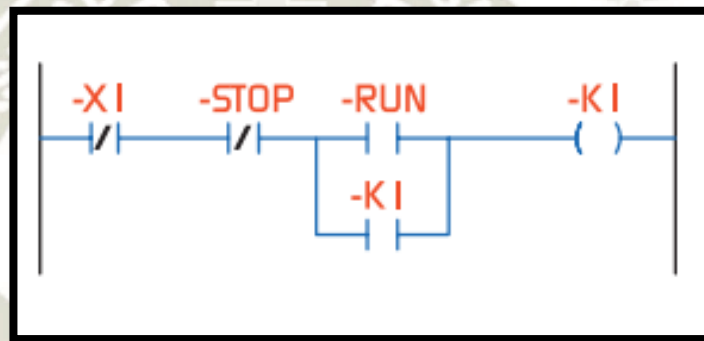


Figura 26. Lenguaje de programación visual (LADDER)

Fuente: Sena (2005)

El tipo de lenguaje visual se clasifica en el diagrama de bloque de funciones (FBD) y en el diagrama del tipo escalera (LADDER).

El PLC con el cual trabajaremos se programará mediante el software SIMATIC 7, por lo que se realizará todo tipo de programación en LADDER.

El lenguaje LADDER es el lenguaje más utilizado en la programación de PLC's ya que todos los lo soportan, se trata de una conexión grafica entre variables de tipo booleano, comparado a los controladores tipo relé donde se representa en diagramas

eléctricos, este tipo de programación también nos permite trabajar con entradas analógicas.

Sus características principales son el uso de barras de alimentación y elementos de enlace y estados (flujo de energía), es un tipo de programación sencillo y simplificado de un buen soporte y disponibilidad.

La estructura es simple con la facilidad de usar contactos, bobinas, bloques funcionales y el poder evaluar las redes en orden de arriba abajo y de izquierda a derecha (SENA, 2005).

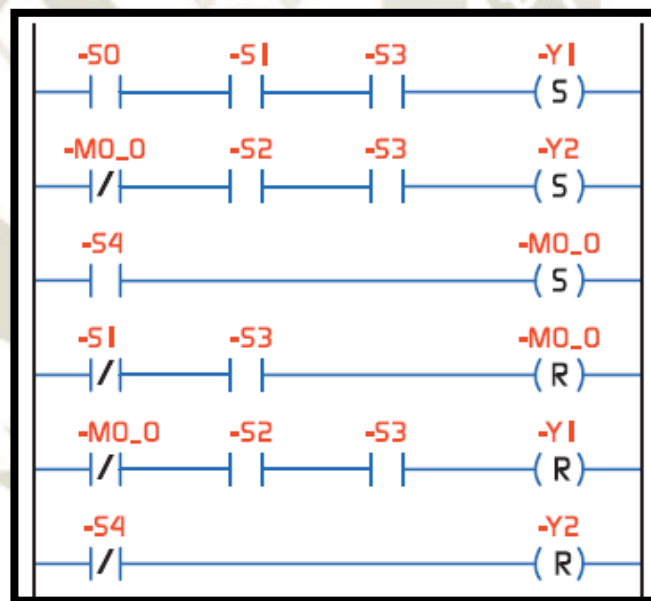
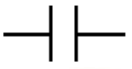
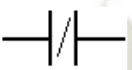






Figura 27. Lenguaje de diagrama de tipo escalera (LADDER)
Fuente: Sena (2005)

Tabla 1. Símbolos básicos de programación tipo escalera (LADDER)
Fuente: Sena (2005)

Símbolo	Nombre	Descripción
	Contacto NA	Se activa cuando hay un uno lógico en el elemento que representa, esto es, una entrada (para captar información del proceso a controlar), una variable interna o un bit de sistema.
	Contacto NC	Su función es similar al contacto NA anterior, pero en este caso se activa cuando hay un cero lógico, cosa que deberá de tenerse muy en cuenta a la hora de su utilización.
	Bobina NA	Se activa cuando la combinación que hay a su entrada (izquierda) da un uno lógico. Su activación equivale a decir que tiene un uno lógico. Suele representar elementos de salida, aunque a veces puede hacer el papel de variable interna.
	Bobina NC	Se activa cuando la combinación que hay a su entrada (izquierda) da un cero lógico. Su activación equivale a decir que tiene un cero lógico. Su comportamiento es complementario al de la bobina NA.
	Bobina SET	Una vez activa (puesta a 1) no se puede desactivar (puesta a 0) si no es por su correspondiente bobina en RESET. Sirve para memorizar bits y usada junto con la bina RESET dan una enorme potencia en la programación.
	Bobina SET	Permite desactivar una bobina SET previamente activada.

2.2. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

2.2.1. Introducción

Para poder llevar a cabo el control de la etapa neumática del Sistema, será necesario implementar un Sistema de Control, cuyo funcionamiento deberá estar basado en la Teoría de Control, y cumplir con diversos parámetros planteados y estudiados por diversos autores.

2.2.2. Sistema de control

Podemos definir a un *sistema* como un conjunto de elementos que poseen características comunes, los cuales además de ello, se caracterizan por poseer parámetros que los definen, y ser susceptibles a variaciones con el tiempo.

Podemos denominar *parámetros del sistema* a aquellos que se caracterizan por ser invariables en el tiempo y propios de cada elemento; a su vez, se denomina *variables del sistema* a aquellos parámetros que son variables en el tiempo, y de acuerdo a su configuración en el sistema, determinarán las características del mismo (Roca, 2014).

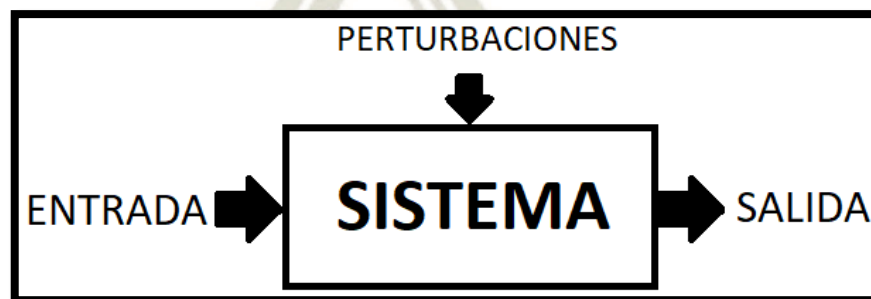


Figura 28. Representación de un Sistema de Control

Fuente: Elaboración propia

2.2.2.1. Sistemas de control de lazo abierto

Este tipo de sistemas se caracterizan porque la salida del mismo no influye en la entrada, es decir que la acción de control no es realimentada, debido a que la señal de salida no es medida ni tomada en cuenta para realizar la acción de control.

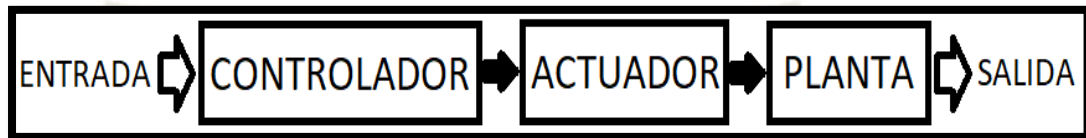


Figura 29. Sistema de Control de Lazo Abierto

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta esta premisa, se puede notar que este tipo de sistemas se encuentran vulnerables ante cualquier tipo de perturbación, debido a que ante la variación de la salida no se ejecutará una acción de control distinta. Es por ello que la precisión del sistema dependerá directamente de la calibración de los elementos que intervienen en él.

Éste tipo de sistemas es aplicable sólo cuando es conocida la relación entre la entrada y la salida, y en caso no se presenten perturbaciones internas ni externas (Ogata, 2010).

2.2.2.2. Sistemas de control de lazo cerrado

A diferencia de los sistemas de control de lazo abierto, este tipo de sistemas se caracterizan por ser retroalimentados, es decir que la señal de salida del sistema alimenta al controlador, por lo que influye en la acción de control.

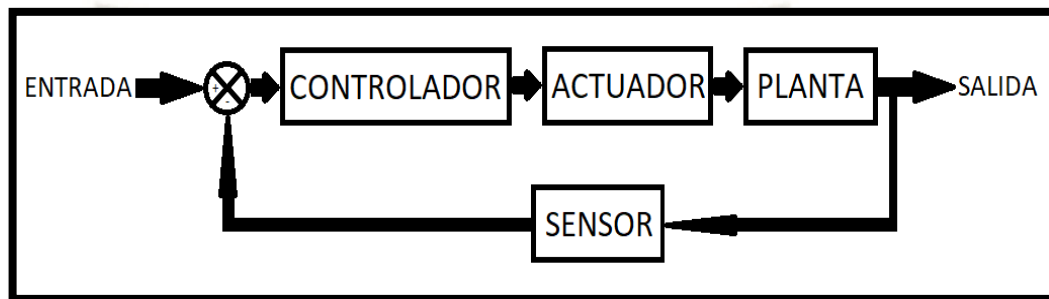


Figura 30. Sistema de Control de Lazo Cerrado
Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre la señal de entrada y la señal de la alimentación nos da la señal de error de actuación, que comparada con la señal de referencia (Set Point), nos permitirá reducir el error y así poder aproximarnos al valor deseado de salida del sistema.

Este tipo de sistema es aplicable a casos en los cuales existan perturbaciones internas o externas, lo cual afecte considerablemente a la relación existente entre la entrada y la salida del sistema.

Si se habla en términos de Control en Lazo Cerrado, será necesario referirnos a la retroalimentación del sistema con la señal del error obtenido del mismo (Ogata, 2010).

2.2.2.3. Sistemas de control de lazo abierto vs lazo cerrado

Para poder realizar una comparación entre ambos tipos de sistemas, será necesario identificar las distintas características y aplicaciones que cada uno de ellos tiene, debido a que ofrecen distintos tipos de prestaciones para el tipo de uso al cual se verán enfocados.

En caso deseamos aplicar un Sistema de Control de Lazo Abierto, será necesario usar elementos de alta precisión y costosos. Será recomendable aplicarlo cuando no existan perturbaciones considerables, ya sean internas o externas, y en caso se conozca con anticipación las entradas del sistema.

Para referirnos al Sistema de Control de Lazo Cerrado, tenemos en consideración que nos brinda una mayor potencia de salida, y nos permite usar elementos de menor costo. Sin embargo, este tipo de sistemas presentan problemas de estabilidad debido a la retroalimentación, y será necesario un mayor número de elementos para implementar el controlador (Ogata, 2010).

Ventajas de sistemas de control de lazo abierto

- Simplicidad de construcción y mantenimiento.
- No presenta problemas de estabilidad.
- Menos costoso.
- Aplicable cuando la salida del sistema no es fácil de medir.

Desventajas de sistemas de control de lazo abierto

- Es necesaria la recalibración constante de los sistemas para evitar errores.
- Susceptible a las perturbaciones internas o externas.

2.2.3. Elementos de un sistema de control

2.2.3.1. Controlador

La función del Controlador es de tomar decisiones y determinar la acción de control, ya sea basada en la señal de referencia y las relaciones de entrada y salida de los sistemas previamente conocidos (Sistemas de Lazo Abierto), o ya sea basada en la señal de referencia y la retroalimentación del sistema (Sistemas de Lazo Cerrado).

2.2.3.2. Actuador

El actuador es el elemento que cumple la función de recibir la señal proveniente del controlador, y a su vez, se encarga de ejercer una acción sobre la planta, la cual dependerá del valor deseado de control, así como del tipo de proceso y/o variable a controlar.

2.2.3.3. Planta

Se define como planta al proceso en el cual se controlará una o más variables, la misma se caracteriza por un modelo matemático, y además por una respuesta característica, dependiendo del tipo de entrada que se le dé.

2.2.3.4. Comparador

El comparador es un elemento propio de los Sistemas de Control de Lazo Cerrado, mediante éste es posible realizar la comparación de la señal de retroalimentación, con la señal de referencia, para poder de esta manera proveer al controlador con la señal de error, necesaria para realizar el control.

2.2.3.5. Sensor

Éste elemento es el encargado de realizar la medida de la variable controlada, y enviar ésta señal al bloque comparador, que posteriormente utilizará la señal provista por el sensor para de esta manera retroalimentar al controlador.

2.2.4. Modelado matemático de sistemas de control

Un modelo matemático de un sistema neumático se define como un conjunto de ecuaciones que representa la dinámica del sistema con precisión, tener en cuenta que el modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema se puede representar de muchas formas distintas por lo que pueden tener muchos modelos matemáticos.

Las dinámicas de cualquier tipo de sistema se describen con ecuaciones diferenciales, estas ecuaciones se obtienen de las leyes físicas como las Leyes de Newton en la parte mecánica y las leyes de Kirchhoff en sistema eléctricos (Ogata, 2010).

2.2.4.1. Modelamiento del sistema neumático

Para el desarrollo del modelo matemático del sistema se tiene en cuenta las siguientes suposiciones, el fluido de trabajo es aire y se considera un gas ideal donde aplicamos la ley de conservación de la masa en cada volumen de control, donde no se considera las pérdidas de presión por fricción en los conductos de aire, las propiedades como la densidad, presión del aire se considera uniforme en los diferentes volúmenes de control (Bacca, De Negri, & Assaf, 2010).

2.2.4.2. Modelamiento de la válvula proporcional de vías y flujos de masa

La válvula posee un diseño sencillo, económica y didáctico, y buenas características de una válvula 5/3 tales como buenas propiedades dinámicas y precisión (Bacca, De Negri, & Assaf, 2010).

En la **Figura 31** se muestra la válvula proporcional 5/3, donde podemos destacar que el puerto 1 de la válvula se comunica con la alimentación de aire comprimida, los puertos 3 y 5 son de escape y los puertos 2 y 4 de la válvula son los encargados de comunicar a las cámaras del cilindro (Bacca, De Negri, & Assaf, 2010).

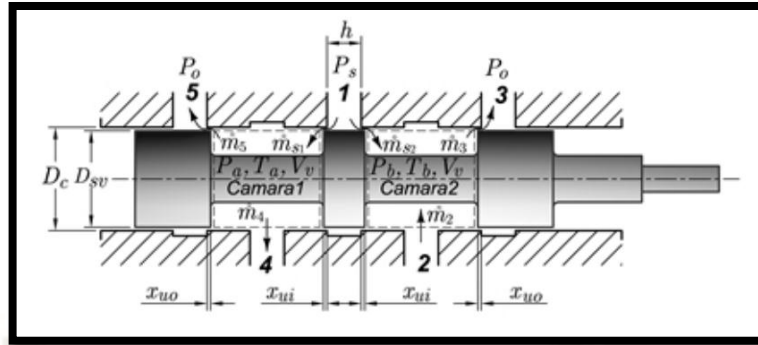


Figura 31. Posición central de la válvula 5/3
Fuente: Bacca, De Negri, & Assaf (2010)

Conectada la válvula al acumulador y bajo condiciones estables, los flujos de masa de suministro, son prácticamente iguales a los flujos de masa de escape a la atmosfera \dot{m}_5 y \dot{m}_3 , respectivamente por tanto los flujos de masa \dot{m}_4 y \dot{m}_2 son iguales a cero.

En la **Figura 32**, se muestran los flujos de masa que se generan cuando la corredera tiene un desplazamiento x_v^+ positivo. En este caso se produce un proceso de presurización en la cámara A del cilindro y un proceso de despresurización en la cámara B (Bacca, De Negri, & Assaf, 2010).

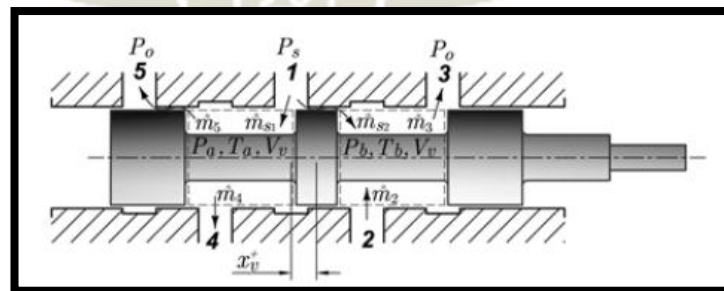


Figura 32. Desplazamiento positivo de la corredera
Fuente: Bacca, De Negri, & Assaf (2010)

En forma contraria a la anterior, cuando la corredera tiene un desplazamiento negativo, se generan los flujos de masa que se muestran en la **Figura 33**. En esta situación se produce un proceso de despresurización en la cámara A y un proceso de presurización en la cámara B del cilindro (Bacca, De Negri, & Assaf, 2010).

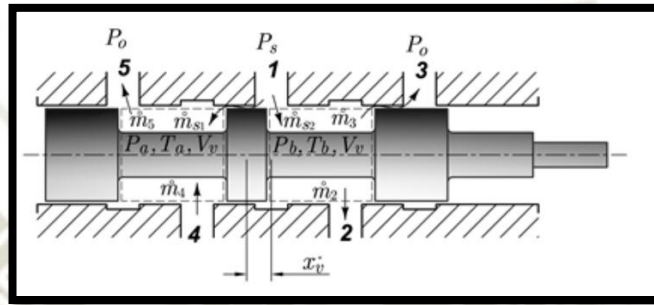


Figura 33. Desplazamiento negativo de la corredera
Fuente: Bacca, De Negri, & Assaf (2010)

Como nuestra válvula proporcional es pilotada eléctricamente aplicamos la ley de Kirchhoff a los flujos de masa que están presentes en los nodos (1) y (2) e igualando respectivamente a la rapidez de cambio de masa dentro de los volúmenes de control comprendidos en las cámaras 1 y 2 de la válvula, (véase **Figura 33**), se obtiene:

$$\dot{m}_{s1} - \dot{m}_4 - \dot{m}_5 = \frac{V_v}{nRT_a} \frac{dP_a}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{m}_{s2} + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = \frac{V_v}{nRT_b} \frac{dP_b}{dt} = 0 \quad (2)$$

Donde:

P_a, P_b son presión

T_a, T_b son temperatura

$$\dot{m}_1 = A_r f \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right) = \begin{cases} A_r f_1 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right), \frac{P_d}{P_u} \leq b \\ A_r f_2 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right), b < \frac{P_d}{P_u} \leq 0.999 \\ A_r f_3 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right), \frac{P_d}{P_u} \geq 0.999 \end{cases} \quad (3)$$

Donde

$$f_1 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right) = P_u C P_n \sqrt{\frac{T_n}{T_u}}$$

$$f_2 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right) = P_u C P_n \sqrt{\frac{T_n}{T_u} \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_d}{P_u} - b}{1 - b} \right)^2}}$$

$$f_3 \left(P_u, T_u, \frac{P_d}{P_u} \right) = P_u C \left(1 - \frac{P_d}{P_u} \right) \sqrt{\frac{T_n}{T_u}}$$

$$k_1 = 10 C P_n \sqrt{1 - \left(\frac{0.999 - b}{1 - b} \right)^2}$$

P_u, P_d son presión y alta presión

T_u es temperatura

T_n es temperatura = 293.15 K

$$P_n \text{ es densidad} = 1.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El área relativa se define como la relación entre el área geométrica variable del orificio de paso en un puerto de la válvula y el área geométrica máxima, o sea:

$$A_r = \frac{A_0}{A_{0 \max}}$$

El cálculo de los flujos se realiza teniendo en cuenta la configuración mostrada en la **Figura 34**.

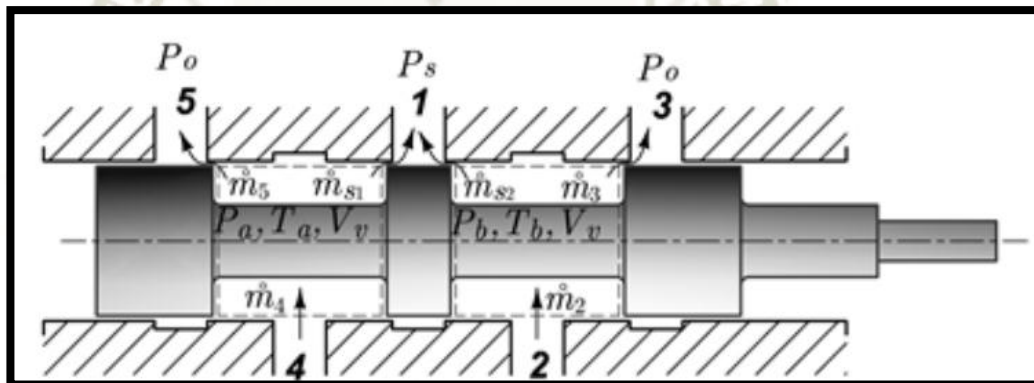


Figura 34. Configuración de flujos de masa 4 y 2
Fuente: Bacca, De Negri, & Assaf (2010)

Según esta configuración, las ecuaciones de flujo de masa en estado estable en los puertos 4 y 2 se pueden escribir como:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{s1} - \dot{m}_5 \quad (5)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{s2} - \dot{m}_3 \quad (6)$$

Se definen las relaciones de flujo de masa:

$$\alpha_4 = \frac{\dot{m}_{s1}}{\dot{m}_4}; \beta_4 = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_4} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{m}_{s2}}{\dot{m}_2}; \beta_2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \quad (8)$$

$$\alpha_4 + \beta_4 = 1 \quad (9)$$

$$\alpha_2 + \beta_2 = 1 \quad (10)$$

Ahora de (1) y (2) tenemos que:

$$\dot{m}_{s1} = \dot{m}_{s1} - \dot{m}_5 = A_{rs1} f_1 \left(P_s, T_s, \frac{P_d}{P_s} \right) - A_{r5} f_1 \left(P_a, T_a, \frac{P_0}{P_a} \right) \quad (11)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_{s2} = A_{r5} f_1 \left(P_s, T_s, \frac{P_d}{P_s} \right) - A_{rs2} f_1 \left(P_a, T_a, \frac{P_0}{P_a} \right) \quad (12)$$

Se establecen las siguientes relaciones:

$$\alpha_4 = \frac{\dot{m}_{s1}}{\dot{m}_4} = \frac{A_{rs1}}{A_{r4}}; \beta_4 = \frac{\dot{m}_5}{\dot{m}_4} = \frac{A_{r5}}{A_{r4}} \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{m}_{s2}}{\dot{m}_2} = \frac{A_{rs2}}{A_{r2}}; \beta_2 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} = \frac{A_{r3}}{A_{r2}} \quad (14)$$

Por tanto, las ecuaciones de flujo de masa a través de los puertos de trabajo de la válvula proporcional se expresan como:

$$\dot{m}_4 = A_{r4}\alpha_4f\left(P_s, T_s, \frac{P_d}{P_s}\right) - A_{r4}\beta_4f\left(P_a, T_a, \frac{P_0}{P_a}\right) \quad (15)$$

$$\dot{m}_2 = A_{r2}\alpha_2f\left(P_s, T_s, \frac{P_d}{P_s}\right) - A_{r2}\beta_2f\left(P_a, T_a, \frac{P_0}{P_a}\right) \quad (16)$$

2.2.5. Función de transferencia

En la ingeniería de control, se denomina función de transferencia de un sistema a la función que caracteriza las relaciones de entrada y de salida del mismo. Nuestra función de transferencia será hallada mediante métodos computacionales.

Se define como el cociente de la transformada de Laplace de la salida entre la transformada de Laplace de la entrada. Será necesario asumir que todas las condiciones iniciales son nulas o iguales a 0 (Ogata, 2010).

Se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} a_0y^{(n)} + a_1y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}y' + a_ny \\ = b_0x^{(m)} + b_1x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1}x' + b_mx \end{aligned}$$

Donde y es la salida, mientras x es la entrada del sistema, entonces podremos interpretar a la función de transferencia como:

$$\text{Función de transferencia} = G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]}; \text{condiciones iniciales cero}$$

$$G(s) = \frac{b_0s^{(m)} + b_1s^{(m-1)} + \dots + b_{m-1}s' + b_m}{a_0s^{(n)} + a_1s^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}s' + a_n}$$

La importancia que toma la función de transferencia, es cuando se desea representar la dinámica de cualquier sistema de manera matemática, haciendo uso de ecuaciones algebraicas. (Ogata, 2010)

2.2.6. Diseño de un sistema de control

Tal como es en el diseño de ingeniería, el diseño de sistemas de control deberá seguir una estricta metodología para poder así obtener la configuración, especificaciones y la respectiva identificación de parámetros, todo ello basado en cumplir satisfactoriamente con una necesidad específica.

Para poder diseñar un Sistema de Control, primero debemos conocer los objetivos que pretendemos lograr con el sistema. Posteriormente deben identificarse las variables a controlar, una vez identificadas las variables, debemos determinar cuál es el nivel de precisión que pretendemos lograr con el diseño, lo cual nos llevará a determinar la calidad de instrumentos de medición que usaremos.

Tras definir los parámetros deseados, podremos determinar el actuador que usaremos, que dependerá del tipo de proceso a controlar. La elección del controlador a usar, dependerá nuevamente de la respuesta que queremos obtener, además de las características de los instrumentos y del actuador.

Finalmente, en el proceso de diseño, se ajustarán los parámetros del sistema, hasta que éste alcance la respuesta deseada, para ello será necesario realizar una serie de pruebas, hasta que se alcance el resultado deseado, y en caso no sea posible, será necesario determinar una nueva configuración del sistema (Dorf & Bishop, 2005).

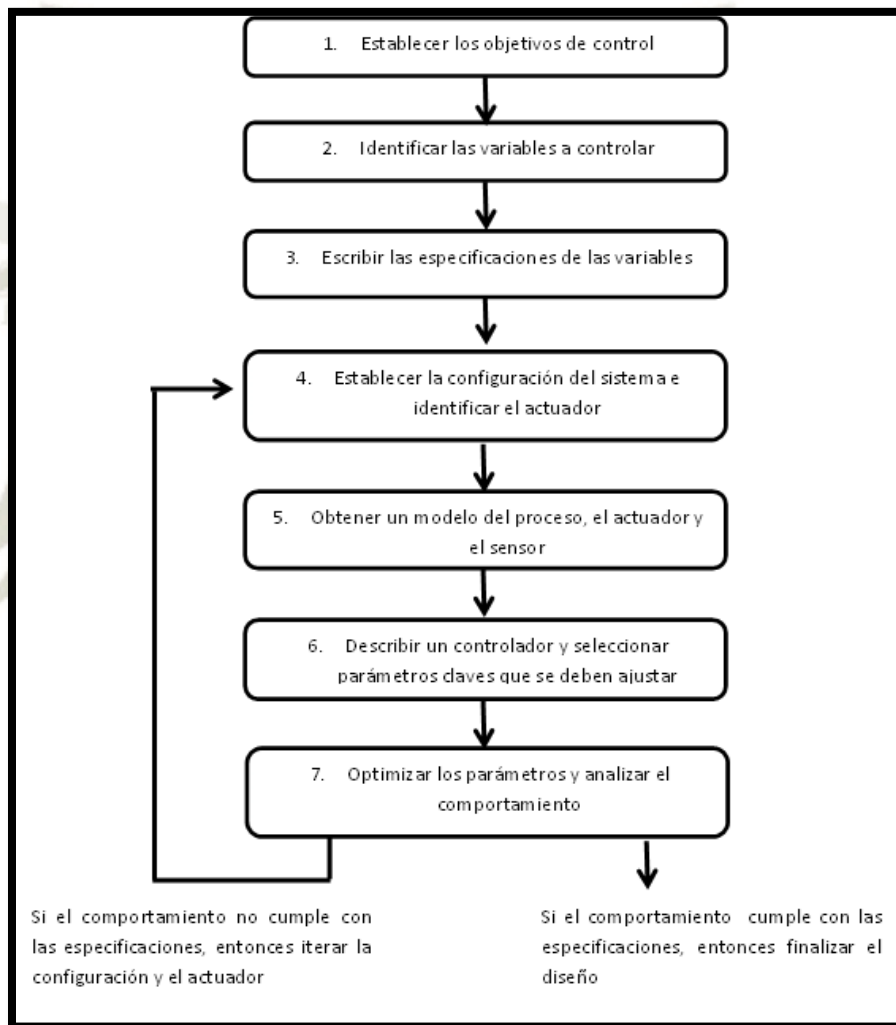


Figura 35. Proceso de Diseño de un Sistema de Control
Fuente: Dorf y Bishop (2005)

2.2.7. Modos de control

Se denomina modo de control al modo de actuación del controlador que determina su salida, y se basa en diferentes acciones de control. En esta tesis, describiremos a los principales modos de control que basan su funcionamiento en funciones lineales.

2.2.7.1. Control proporcional (P)

Según Roca (2014), el control proporcional es aquel en el cual el elemento final de control (Actuador), efectúa una acción de control proporcional a la magnitud de desviación provista por la retroalimentación.

El control proporcional se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = k_p e(t)$$

Donde K_p se considera la ganancia proporcional, y $e(t)$ como la señal de error.

En este tipo de control, solo se toma en cuenta la ganancia K_p , la cual determinará la salida del controlador.

2.2.7.2. Control integral (I)

También denominado *flotante de velocidad proporcional*, este tipo de control hace que el actuador realice su función de manera que éste se mueva a una velocidad proporcional a la señal de error. Es decir que mientras mayor sea la desviación, más rápida será la velocidad de desplazamiento del actuador.

La importancia de este modo de control, se basa en que mientras haya señal de error existirá una señal que lo corrija, y ésta persistirá y durará hasta que la desviación se haya corregido completamente y se equilibre el sistema.

El control integral se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_I e(t)$$

O bien

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt$$

Donde K_I se considera una constante ajustable, y $e(t)$ como la señal de error.

Como desventaja podemos resaltar que no se muestra de una manera enérgica en los instantes después de la aparición brusca de una desviación, en vista de que su efecto es paulatino, a comparación del control proporcional, que presenta una respuesta enérgica desde el primer momento que se presenta un cambio en la señal de error (Roca, 2014).

2.2.7.3. Control proporcional – integral (PI)

El tipo de modo de control PI, se caracteriza por reunir las características de los modos Proporcional e Integral, esto le permite aprovechar las ventajas de ambos modos, así como obviar los inconvenientes de los mismos (Roca, 2014).

El control proporcional - integral se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_I} \int_0^t e(t) dt$$

Donde K_p se considera como la ganancia proporcional, T_I como el tiempo integral y $e(t)$ como la señal de error.

2.2.7.4. Control proporcional – derivativo (PD)

El modo de control PD, tiene un comportamiento similar al PI, al realizar la acción de control proporcional, pero en lugar de realizar la acción integral, integra a su funcionamiento la acción derivativa, la cual responde únicamente a la magnitud de la velocidad de cambio de la desviación, oponiéndose a ella.

El control proporcional - derivativo se puede definir mediante la siguiente ecuación:

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

Donde K_p se considera como la ganancia proporcional, T_d como el tiempo derivativo y $e(t)$ como la señal de error.

Al realizar la acción derivativa, se aprecia un comportamiento de corrección anticipativo a los efectos de la desviación, es decir que esta acción brinda un efecto de estabilización en el control del sistema (Roca, 2014).

2.2.7.5. Control proporcional – integral – derivativo (PID)

De acuerdo a Roca (2014), éste tipo de control se basa en la combinación de los 3 modos de control previamente descritos (P, I y D), para de esta manera aprovechar las ventajas que nos brindan, suprimiendo sus desventajas.

El control proporcional – integral - derivativo se puede definir mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde K_P se considera como la ganancia proporcional, T_I como el tiempo integral, T_d como el tiempo derivativo y $e(t)$ como la señal de error.

A continuación, se define el comportamiento de las 3 acciones:

- La acción proporcional corrige la posición del actuador de manera proporcional a la desviación, de manera instantánea, pero a su vez, genera una desviación de manera permanente.
- La acción integral ejerce sobre el actuador, una acción lenta y progresiva, que va de manera proporcional a la señal de error. Actúa hasta que anula completamente la desviación.
- La acción derivativa ejerce el actuador, un efecto anticipativo a la desviación, de manera proporcional a la velocidad de cambio de la misma. Toma en cuenta la tendencia de la variable controlada para ejecutar su función.

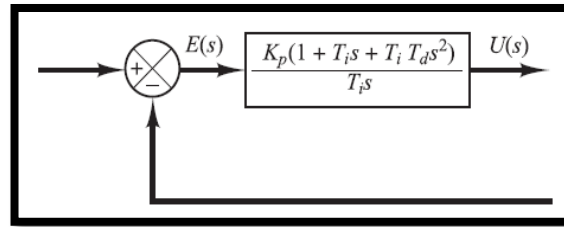


Figura 36. Diagrama de Bloques de un Controlador PID
Fuente: Ogata (2010)

2.2.8. Métodos tradicionales de sintonización de controladores PID

Para realizar la sintonización de los parámetros del controlador PID a implementar, haremos uso de dos métodos ampliamente usados en la actualidad para la obtención de los parámetros PID de cualquier sistema, tales como son la herramienta PID Compact de TIA Portal, así como la herramienta Sisotool de Matlab.

2.2.8.1. Método por herramienta PID Compact de TIA Portal

El bloque PID Compact es una herramienta propia del TIA Portal, el cual ofrece un regulador PID continuo con optimización integrada.

Éste objeto, compara una señal de consigna deseada (asignada previamente en el TIA Portal) con el valor real medido por el sensor de presión que se encuentra en nuestra planta, dentro de un lazo de regulación.

Producto de ésta comparación, se determina un error (diferencia entre el valor de consigna y el valor real), y se calcula un valor de salida (o valor de control), cuyo propósito es hacer que los valores de consigna y el valor real sean el mismo con la mayor rapidez y estabilidad posibles.

Internamente éste bloque, nos brinda un regulador PID, que contará con las 3 acciones de control, cuyos parámetros serán regulados de manera autónoma realizando en primera instancia una optimización inicial, la cual realizará un cálculo aproximado de los parámetros. Posteriormente podremos optimizar aún más el regulador mediante una optimización fina (Siemens, 2014).

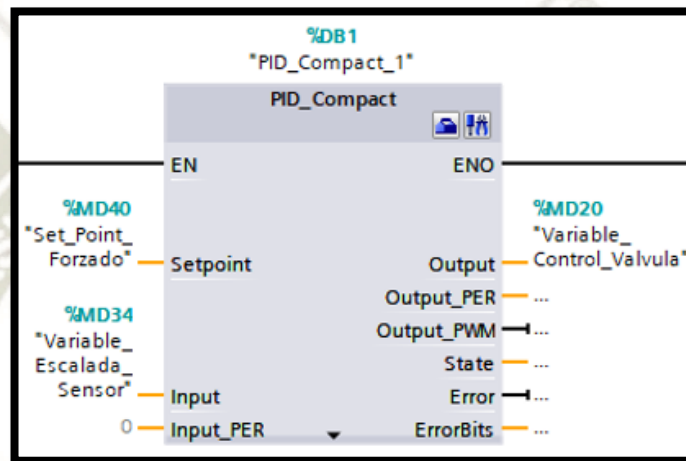


Figura 37. Representación del bloque PID Compact
Fuente: TIA Portal (2019)

Características del bloque PID Compact

Como se indicó anteriormente, éste bloque, además de proveer la optimización para obtener los parámetros PID, cuenta con un regulador PID incorporado, el cual nos permitirá variar los parámetros PID, para poder analizar la respuesta del sistema controlado ante distintos valores de parámetros PID (Siemens, 2014).

El algoritmo propio del regulador interno del bloque PID Compact trabaja de acuerdo fórmula que se muestra en la **Figura 38**.

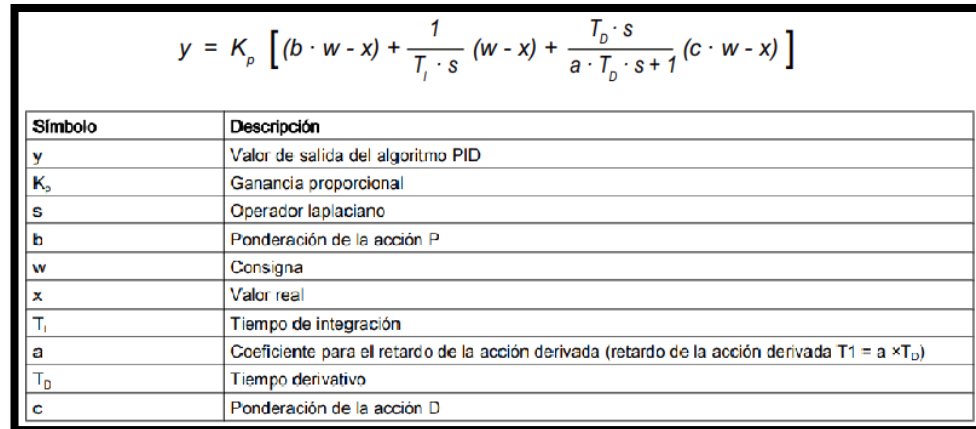


Figura 38. Representación del objeto PID Compact
Fuente: Siemens (2014)

Asimismo, podemos identificar la estructura interna del regulador PID del PID Compact como se muestra en la **Figura 39**.

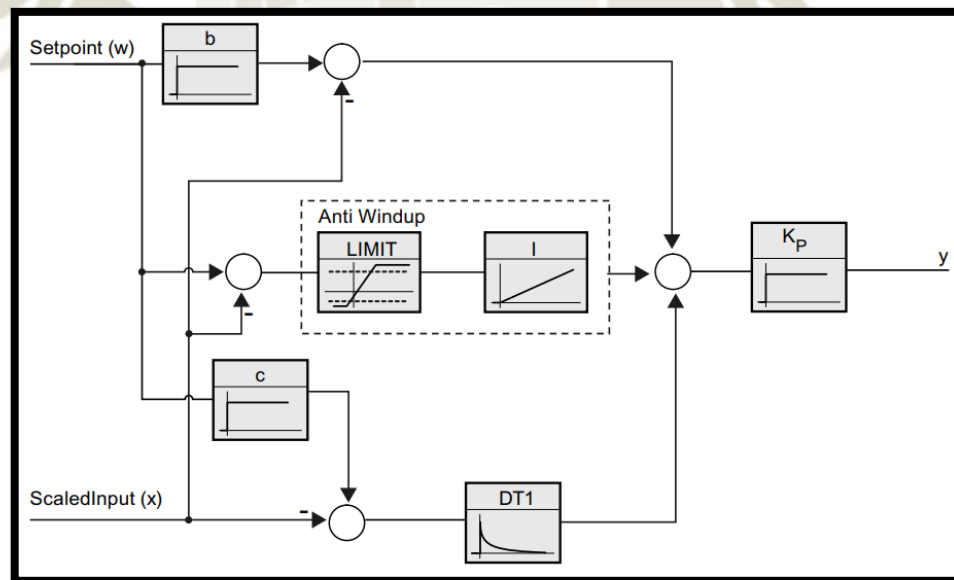


Figura 39. Representación de la estructura interna del objeto PID Compact
Fuente: Siemens (2014)

2.2.8.2. Método por herramienta Sisotool de Matlab

Ésta herramienta, la cual podemos encontrar en Matlab, proviene del diseñador de sistemas de control (Control System Designer), y nos permite diseñar controladores de entrada simple y salida simple, proveniente del inglés single-input, single-output (SISO), modelados a través de Matlab o Simulink (Mathworks, 2019).

Sisotool nos permite analizar sistemas lineales, conociendo la función de transferencia en lazo abierto, y graficando el lugar de raíces, podremos determinar el lugar geométrico de las soluciones para una ecuación característica al variar el valor de K en la ecuación. $G(s)$ representa la función de transferencia en lazo abierto (ISA, 2008).

$$1 + K \cdot G(s) = 0$$

En la ventana principal de Sisotool, podremos identificar el lugar de raíces del sistema, así como el diagrama de Bode en cadena abierta, con la ganancia indicada ($C(s)$). También se muestran los polos y zeros. Es en este diagrama donde podemos variar el regulador proporcional de ganancia, obteniendo así polos y zeros distintos para los valores ingresados. De igual manera, será posible variar el polo en cadena cerrada arrastrándolo en el diagrama, y la herramienta calculará el valor de la ganancia para que el polo pueda tomar esa posición (ISA, 2008).

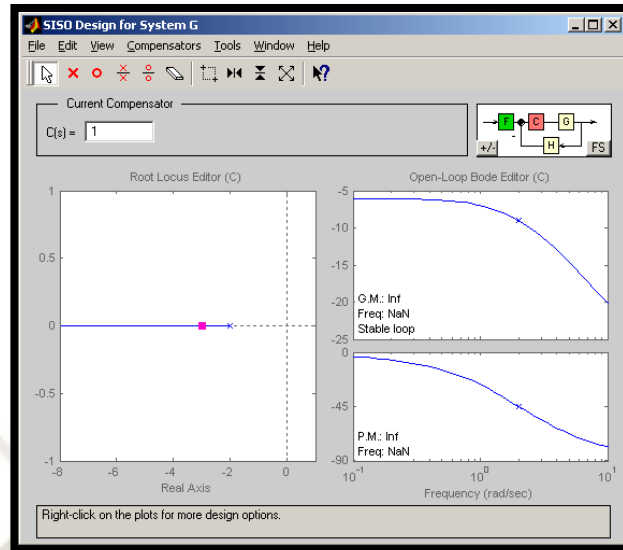


Figura 40. Lugar de raíces y diagrama de Bode de Sisotool
Fuente: ISA (2008)

Ésta herramienta nos permite también conocer respuestas del sistema en su lazo cerrado, permitiéndonos variar la entrada, salida y el tipo de representación (Bode, respuesta al escalón, impulso, etc.)

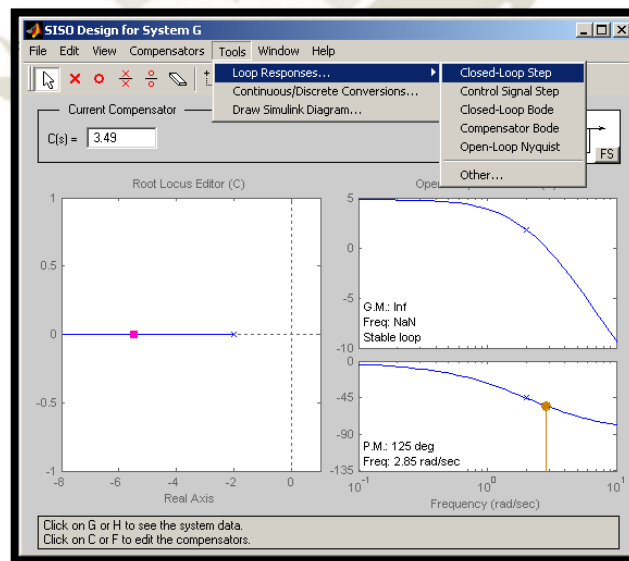


Figura 41. Obtención de respuesta al escalón en bucle cerrado
Fuente: ISA (2008)

En la **Figura 42**, se muestra el lugar de raíces para un controlador $C(s)$, así como su respuesta al escalón. Gracias a Sisotool, es posible arrastrar en el gráfico las distintas raíces, generando variaciones tanto como en la ganancia calculada así como en el gráfico de la respuesta del controlador. También es posible obtener distintos parámetros de la respuesta, tales como los valores pico, valor en régimen permanente, etc. Es de ésta manera, como podremos restringir éste tipo de parámetros para que la herramienta calcule los parámetros del controlador para cumplir con los requisitos que deseemos para nuestro controlador (ISA, 2008).

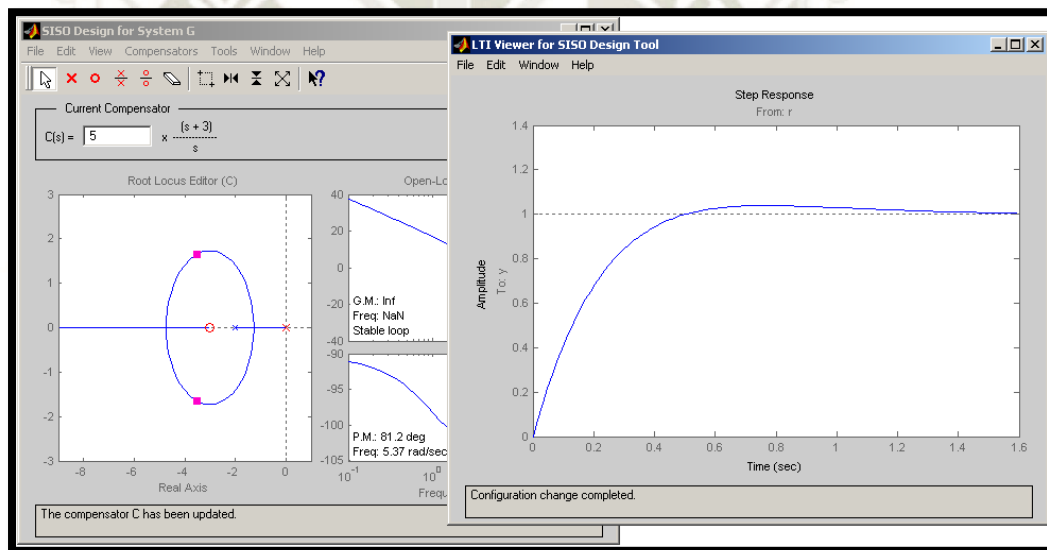


Figura 42. Imagen de sección interactiva del controlador LTI viewer
Fuente: ISA (2008)

2.3. ALGORITMO COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

En esta sección se introducen conceptos y definiciones que son utilizados en el resto de la investigación, los cuales son necesarios para una mejor comprensión de los temas a conocer:

2.3.1. Optimización combinatoria

El término optimizar significa algo más que mejorar; sin embargo, en el contexto científico la optimización es el proceso de tratar de encontrar la mejor solución posible para un determinado problema, en un problema de optimización existen diferentes soluciones, un criterio para diferenciar entre ellas y el objetivo es encontrar la mejor.

Muchos problemas de optimización de importancia teórica y/o práctica consisten en la búsqueda de una “mejor” configuración de un conjunto de variables para lograr ciertos objetivos.

Los problemas se dividen naturalmente en dos categorías: aquellos en los que las soluciones son codificadas con un valor real de las variables, y aquellos en los que las soluciones están codificadas con variables discretas.

Dentro de esta clase de problemas llamados Problemas de Optimización Combinatoria (POC) se busca un objeto de un conjunto finito (o posiblemente de un conjunto infinitamente contable). Este objeto puede ser un número entero, un subconjunto de ellos, una permutación, o una estructura de grafo (Steiglitz, 1982).

2.3.2. Heurística

El término heurístico está relacionado con la tarea de resolver problemas inteligentemente utilizando la información disponible, el término proviene de la palabra griega (heuriskein) que significa encontrar o descubrir, de la cual se deriva eureka, la famosa exclamación de Arquímedes al descubrir su principio. En el ámbito de la Inteligencia artificial se usa el término heurístico para describir una clase de algoritmos que aplicando el conocimiento propio del problema y técnicas realizables se acercan a la solución de problemas en un tiempo razonable.

Podemos obtener la siguiente definición a lo que es un método heurístico:

“Se califica de heurístico a un procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un coste computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto...” (Melián, 2003, pág. 28).

Los Métodos heurísticos o aproximados son procedimientos eficientes para encontrar buenas soluciones, aunque no se pueda comprobar que sean óptimas, pero en estos métodos, la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida.

Se considera un problema bien definido cuando están definidas las posibles entradas, la forma de la solución y lo que se quiere lograr (la función objetivo) aunque no haya un método de solución evidente.

Según Cañari (2005), el método heurístico más intuitivo es el de la búsqueda exhaustiva: dado un problema, analizar todas las posibles soluciones y escoger la mejor.

Como se debe usar un método heurístico:

- Para generar una solución inicial.
- Dada una solución inicial, el método heurístico participa en un paso intermedio del procedimiento para tratar de mejorarla.

2.3.3. Metaheurística

Son estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento. El término metaheurística fue introducido por Fred Glover en 1986 y a partir de entonces han aparecido muchas propuestas de pautas o guías para diseñar mejores procedimientos de solución de problemas combinatorios.

“Los procedimientos Metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Los Metaheurísticos proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos.” (Osman, 1996, pág. 15).

Según Cañari (2005), las metaheurísticas se sitúan conceptualmente “por encima” de las heurísticas en el sentido que guían el diseño de éstas, pueden estar compuestas por una combinación de algunas heurísticas, por ejemplo, una metaheurística puede usar una

heurística constructiva para generar una solución inicial y luego usar otra heurística de búsqueda para encontrar una mejor solución.

Según el tipo de metaheurísticas podemos tener una clasificación en:

- Metaheurísticas constructivas
- Metaheurísticas evolutivas
- Metaheurísticas de búsqueda

2.3.3.1. Métodos constructivos

Se tiene una estructura vacía que representa una solución a la cual se van incorporando elementos de esta manera la metaheurística constructiva da pautas para seleccionar los componentes que debe tener una buena solución.

Un ejemplo de metaheurística constructiva es la GRASP (Greedy Randomized Adaptative Search Procedures), procedimientos de búsqueda basados en funciones voraces aleatorizadas que se adaptan.

Es un método de multi arranque en donde cada paso consiste en una fase de construcción y otra de mejora. En la fase de construcción se aplica una heurística constructiva para obtener una solución inicial y en la segunda fase dicha solución se mejora mediante un algoritmo de búsqueda local. En cada iteración la elección del próximo elemento a ser añadido a la solución parcial está determinada por una función greedyx (voraz), la cual elige el elemento que da mejor resultado inmediato sin tener en cuenta una perspectiva más amplia.

Se dice que se adapta porque en cada iteración se actualizan los beneficios obtenidos al añadir el elemento seleccionado a la solución parcial (Cañari, 2005).

El siguiente esquema muestra el funcionamiento global del algoritmo GRASP:

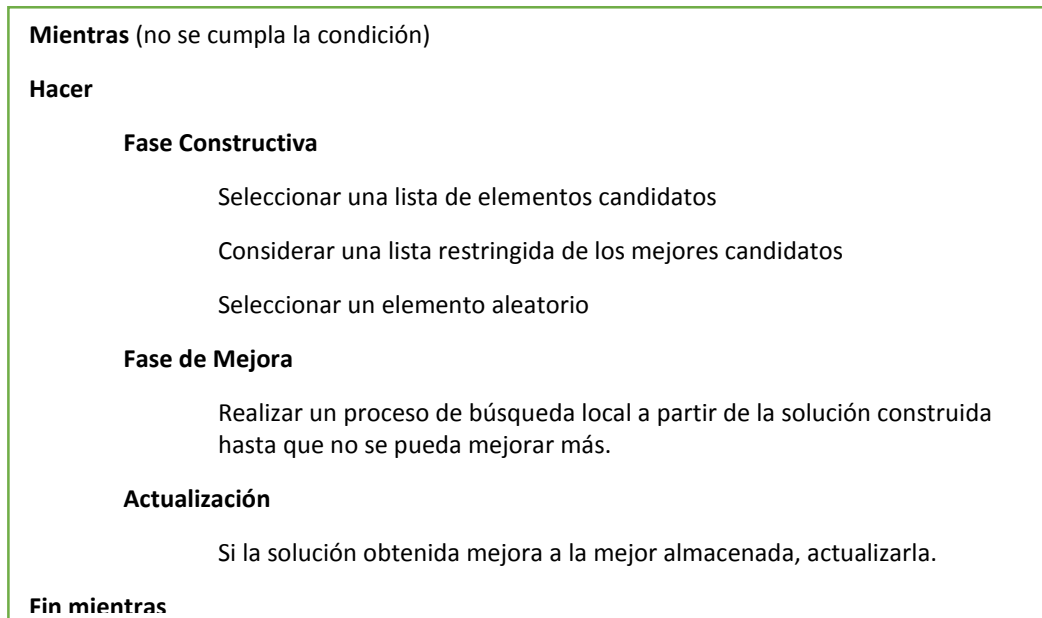


Figura 43. Esquema de funcionamiento global del Algoritmo GRASP
Fuente: Adaptado de Cañari (2005)

2.3.3.2. Métodos de búsqueda

Según Cañari (2005), son métodos que presuponen que existe una solución y realizan procedimientos de búsqueda, la diferencia con los métodos analíticos es que no necesariamente se encontrará la solución óptima.

Las principales metaheurísticas de búsqueda global surgen de las tres formas principales de escapar de los óptimos locales:

- a) Volver a comenzar la búsqueda desde otra solución inicial, (Multi start)
- b) modificar la estructura de entornos (metaheurística de entornos variables), y
- c) permitir movimientos de empeoramiento de la solución actual.

Ejemplos de metaheurísticas de búsqueda:

- Búsqueda tabú
- Templado simulado

2.3.3.3. Métodos evolutivos

Según Cañari (2005), son métodos que van construyendo un conjunto de soluciones a diferencia de los otros métodos que sólo pasan de una solución a otra en cada iteración. El procedimiento consiste en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones.

Algunos ejemplos de metaheurísticas evolutivas:

- Algoritmos Genéticos
- Búsqueda Dispersa (Scatter search).
- Modelos probabilísticos.
- Algoritmo cultural.
- Programación evolutiva.

2.3.3.4. Inteligencia de enjambre

Según Martin (2016), la inteligencia de enjambre es una rama de la inteligencia artificial que se encarga de estudiar el comportamiento natural, organizado.

Fue inspirada en la naturaleza, especialmente por ciertos sistemas biológicos, los sistemas de inteligencia de enjambre están formados por una población de agentes, individuos que interactúan entre ellos y el medio ambiente.

Los individuos siguen reglas simples y aunque no esté definida una estructura de control centralizada que dictamine su comportamiento.

Algunos ejemplos naturales son:

- Optimización de colonia de hormigas.
- Optimización enjambre de partículas.
- Optimización de múltiples enjambres.
- Algoritmo de colonia de abejas.
- Algoritmo de altruismo.
- Algoritmo de murciélago.
- Búsqueda de sistema cargado.
- Algoritmo de búsqueda diferencial.

2.3.4. Optimización de colonia de hormigas

Las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto desde su colonia hasta la fuente de alimento sin disponer del sentido de la vista. Además, presentan la capacidad de adaptarse al entorno cuando se producen cambios en él, volviendo a encontrar el mejor camino. Esta característica se debe a una sustancia denominada feromona.

Cuando la hormiga se desplaza deja un rastro que marca el camino que ha seguido de manera que las siguientes hormigas lo detectaran junto con el del resto de predecesoras.

Las hormigas que deban realizar el camino hasta el alimento, escogerán uno de los caminos según una función de probabilidad que dependerá de la intensidad del rastro. En el caso de los caminos utilizados por un gran número de hormigas, el rastro de feromona será más intenso.



Figura 44. Representación gráfica del recorrido de las hormigas
Fuente: Barán (2010)

Los algoritmos basados en el comportamiento de las colonias de hormigas, se han utilizado en los últimos años en disciplinas como la investigación operativa, las redes de comunicación, la robótica o la optimización combinatoria; este planteamiento es una nueva meta-heurística, denominado ACO (Ant Colony Optimization).

Estos algoritmos, se caracterizan por utilizar las hormigas “virtuales” como los agentes que se desplazan por el grafo asociado al problema, para evitar tener pocas soluciones viables, también se mantiene en la versión digital la propiedad de evaporación de la feromona. Cada individuo, cuando construye una solución, realiza una aportación a la comunidad con el único objetivo de colaborar a que otras hormigas obtengan mejores soluciones a través de la memoria histórica almacenada en forma de rastro (Joaquín Bautista, 2000).

2.3.4.1. Propiedades del Ant Colony Optimization

Parámetros de control

El camino de la hormiga depende de las propiedades y algoritmo programado, esta dependencia se muestra a través de los parámetros α y β que son los que controlan el peso de la información histórica y de la regla heurísticas, respectivamente. Es mediante éstos con los que se define si se desea proporcionar mayor importancia al instinto de la hormiga (heurística asociada) o si se prefiere priorizar el rastro dejado por la colonia (información histórica disponible por la cooperación del resto de hormigas).

Para evitar las soluciones no tan deseables se define el parámetro ρ como el porcentaje de evaporación en cada iteración del rastro. Esta evaporación tiene como objetivo “hacer olvidar” parte de la memoria histórica para no provocar una dependencia demasiado prematura de la resolución hacia la información del rastro.

Otros parámetros de control interesantes son los referentes a los rastros en “condiciones especiales” para las situaciones que precisan de un tratamiento diferente. Cuando se desea que el rastro quede amplificado, como por ejemplo para hacer más interesante el camino a la mejor solución conseguida, se debe establecer cuál es la cantidad extra de feromona.

Así mismo, para la situación inicial del problema es preciso establecer el valor del rastro a priori y no se pueden olvidar los parámetros ya que estas son las limitaciones del tamaño de la exploración (Joaquin Bautista, 2000).

Importancia del criterio heurístico asociado a la hormiga

Los algoritmos Greedy son aquellos que crean soluciones utilizando un único criterio de exploración constante durante toda la búsqueda de la solución.

En estos casos, las reglas funcionan bien durante las primeras etapas pero empeora cuando llegan a las etapas finales al estar obligados a aplicar la misma regla escogida en el inicio.

Es por ese motivo que en los algoritmos ACO se utilizan, durante los instantes iniciales, en mayor medida las reglas heurísticas y a medida que hay más experiencia, éstas perderán peso frente a la memoria del rastro. No obstante, hay que recordar que depende de una variable de probabilidad.

2.3.4.2. Esquema de funcionamiento

Es necesario establecer cuál será el criterio de finalización cuando se considere que no es posible mejorar la solución obtenida hasta el momento. Los criterios más conocidos y utilizados hacen referencia a la desviación de la solución aunque otros más simples como el tiempo de ejecución o el número de sub colonias también son utilizados. Para la resolución de los problemas de este trabajo se ha optado por este último criterio (Joaquin Bautista, 2000).

Se puede resumir en el siguiente esquema de funcionamiento:

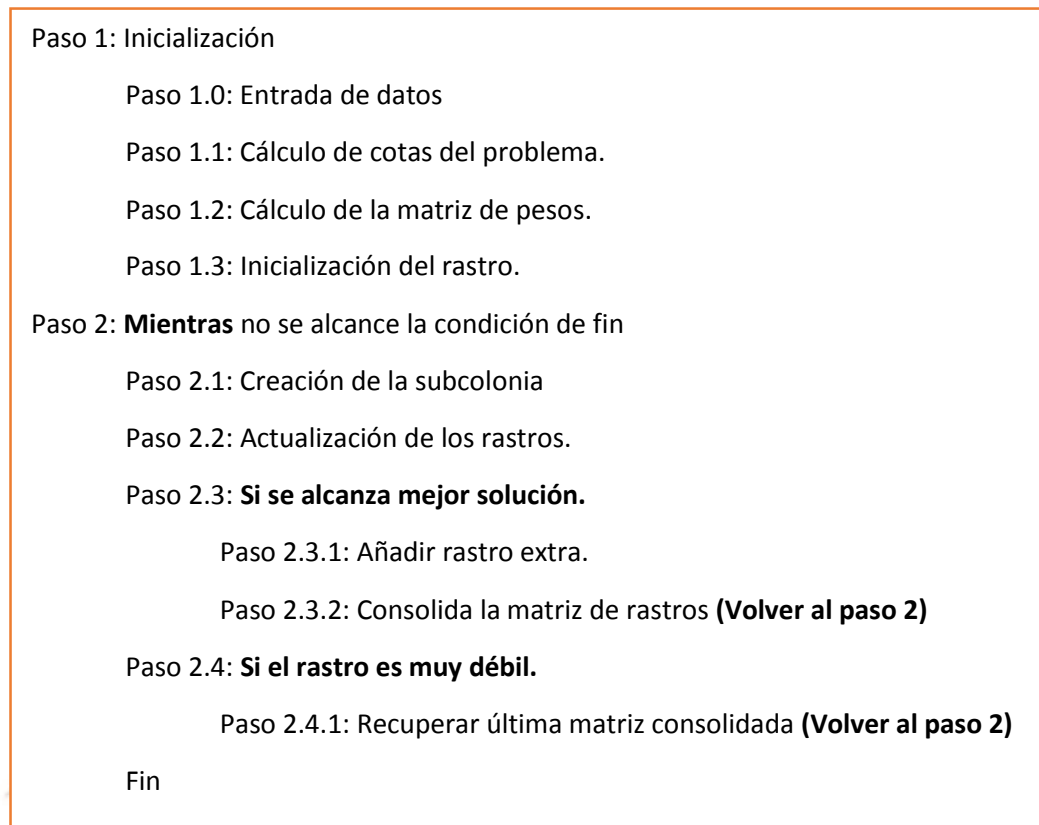


Figura 45. Esquema de funcionamiento del Algoritmo de Colonia de Hormigas ACO
Fuente: Adaptado de Joaquin Bautista (2000)

2.3.4.3. Procedimiento Ant Colony System

Se construye iterativamente una solución para el problema, las soluciones intermedias se denominan estados solución y en cada iteración del algoritmo, cada hormiga se mueve de un estado x a un estado y con una probabilidad:

$$\rho_{xy}^k = \frac{(\tau_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}{\sum(\tau_{xy}^\alpha)(n_{xy}^\beta)}$$

τ_{xy} = Cantidad de feromonas depositadas en la transición del estado x a y

n_{xy} = Conveniencia del estado de transición xy

α = Parámetro para controlar la influencia de τ_{xy} y es ≤ 0

β = Parámetro para controlar la influencia de n_{xy} y es ≥ 0

k = Número de la hormiga que realizara un estado

Cuando todas las hormigas han completado una solución, los rastros son actualizados con:

$$\tau_{xy} \leftarrow (1 - p)\tau_{xy} + \sum_k \Delta\tau_{xy}^k$$

τ_{xy} = Cantidad de feromonas depositadas en la transición del estado x a y

$\Delta\tau_{xy}^k$ = Cantidad de feromonas depositadas en K th hormiga

CAPÍTULO III

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA

3.1. MODELAMIENTO DE LA PLANTA

Para poder conocer el comportamiento de la planta ante distintos tipos de entradas y perturbaciones, es necesario realizar un modelamiento matemático de la misma, lo que posteriormente nos permitirá conocer su modelo y características matemáticas, así como poder diseñar controladores de diversos tipos para obtener una respuesta deseada.

Para obtener éste modelo, será necesario llevar a cabo una experimentación con los componentes de la planta conectados y funcionando entre sí, adquiriendo datos a la salida de la misma, ante distintos estímulos a la entrada. La **Figura 46** representa la conexión a realizar, se muestra a continuación:

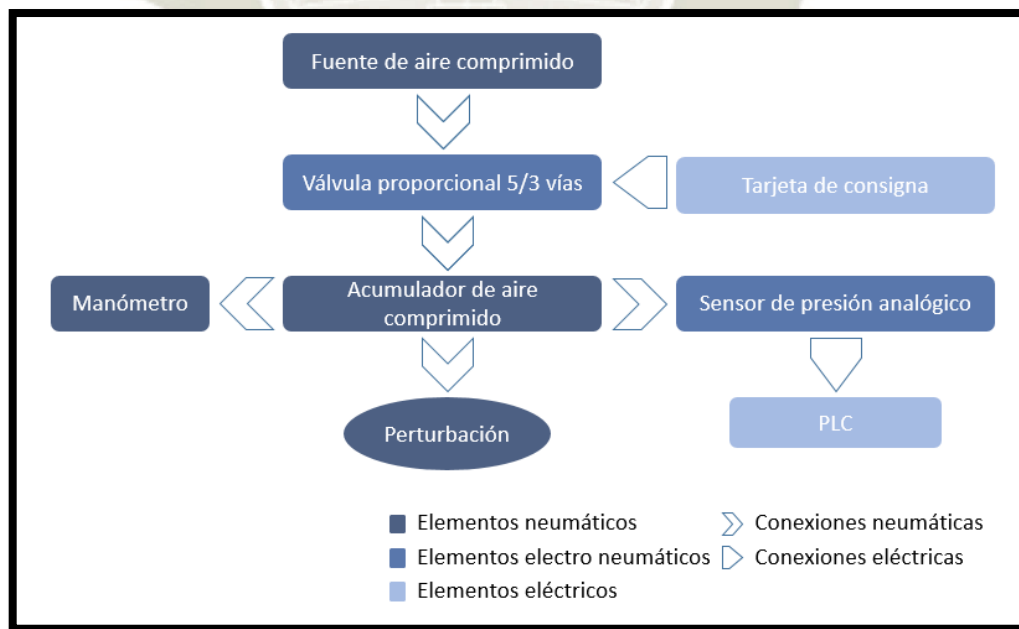


Figura 46. Diagrama de conexiones para la adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

En la implementación de éste modelo, se tomó como referencia el manual de entrenamiento del módulo del PLC S7-1200 por DINAUT, que precisa ciertos procedimientos para realizar la adquisición de datos (DINAUT, 2018).

Cabe resaltar que ésta figura representa las conexiones necesarias para realizar la adquisición de datos, más no la construcción final de la planta que se diseñará e implementará en esta tesis.

En la **Figura 47**, se muestra la representación esquemática del circuito neumático implementado para realizar la adquisición de datos de la planta, así como el circuito implementado físicamente en el laboratorio.

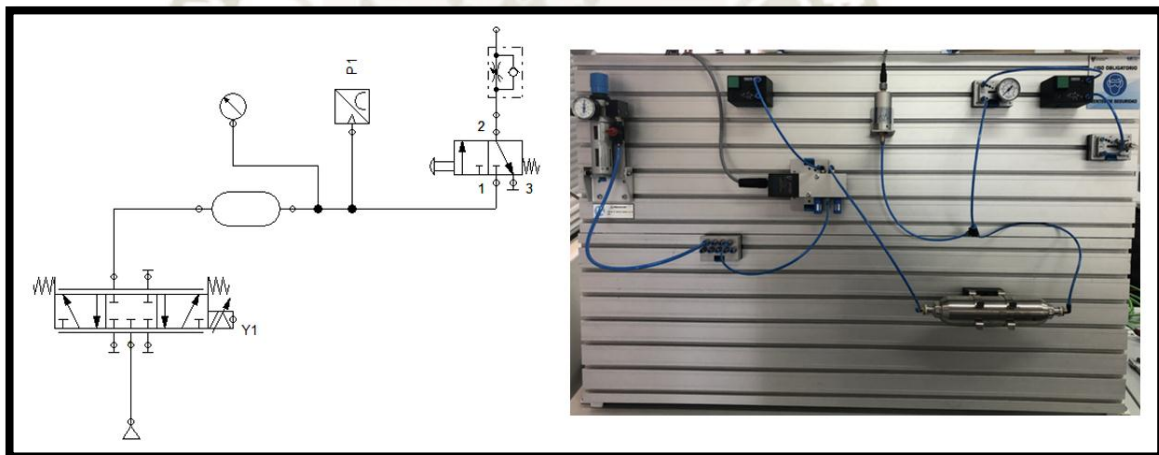


Figura 47. Conexiones neumáticas del sistema para adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

De manera análoga, en la **Figura 48** se muestra la representación esquemática del circuito eléctrico de conexión entre el sensor y válvula de 5/3 vías a la tarjeta de consigna y el PLC, que realizará la adquisición de datos, y su implementación física.

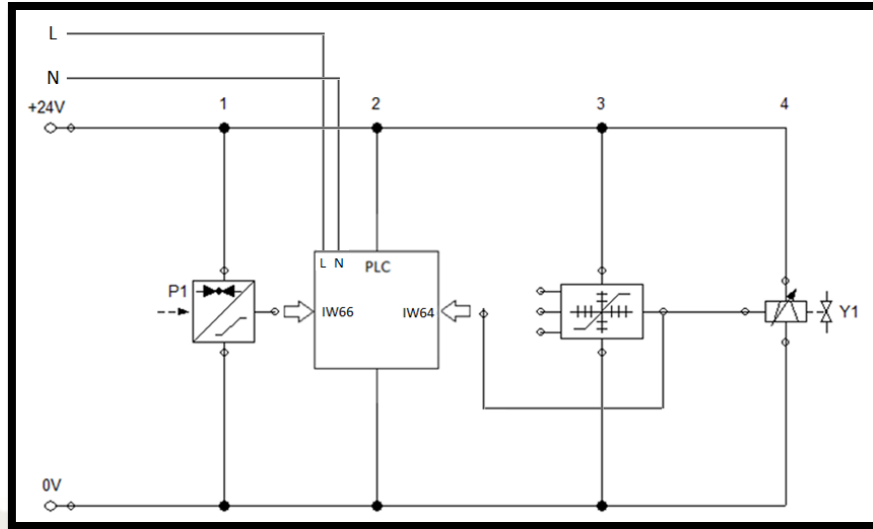


Figura 48. Conexiones eléctricas del sistema para adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 49**, se muestra una vista general de la planta, con las conexiones neumáticas y eléctricas necesarias para poder realizar la adquisición de datos.

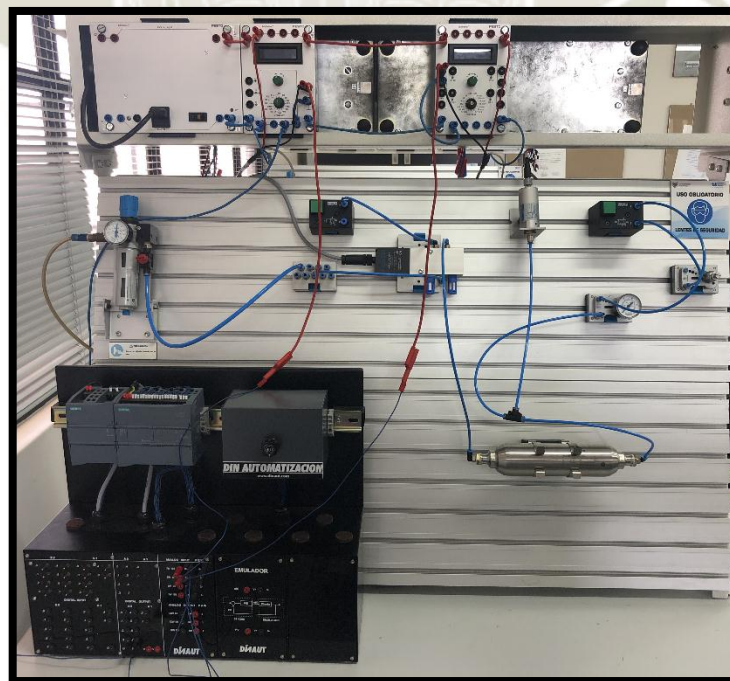


Figura 49. Vista general de la planta conectada para adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

3.1.1. Adquisición de datos

Para realizar la adquisición de datos, procederemos a usar la tarjeta de consigna con valores de 0 - 10 voltios para variar la respuesta de la válvula proporcional, y almacenar los valores de la presión registrados por el sensor de presión analógico conectado al acumulador de presión, en la memoria interna del PLC, y posteriormente exportar estos datos a una hoja de datos en la computadora.

3.1.1.1. Programación del Controlador Lógico Programable (PLC)

Al usar el PLC (Controlador Lógico Programable) para realizar una adquisición de datos, será necesario escribir un programa simple que registre los datos con un tiempo de muestreo determinado, y los almacene en su memoria interna para después poder acceder a ellos de manera remota.

Usaremos la herramienta Data Log, que se aplica para poder registrar datos leídos por el PLC en la memoria interna del mismo, y tras establecer parámetros, podremos acceder a los datos registrados mediante una conexión remota, ya que se almacenarán en una hoja de datos en formato CSV (DINAUT, 2018).

Procedemos a leer los datos leídos en las entradas analógicas IW64 e IW66 en el PLC, las cuales nos darán los valores ingresados por la tarjeta de consigna, y el sensor de presión.

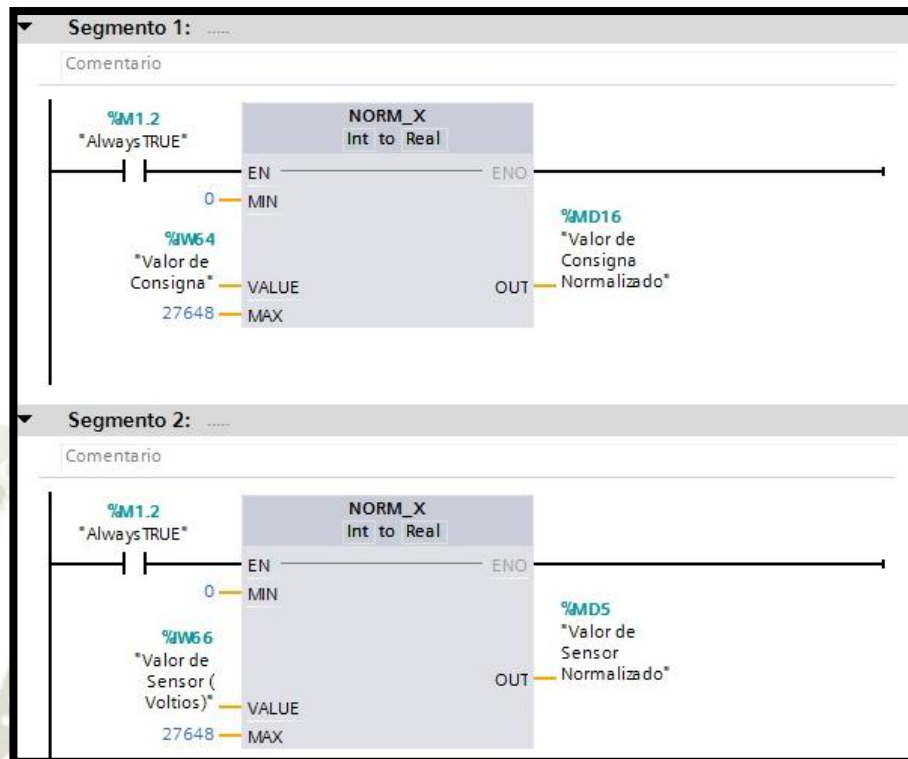


Figura 50. Ingreso de datos analógicos
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, éstos datos deben ser debidamente escalados, para que los valores registrados sean los deseados (ya sean éstos en voltios o bares), por lo que procedemos a crear 2 segmentos para escalar los valores obtenidos, en el caso de la consigna, de 0 a 10 Voltios, y para la presión, deberá ser escalada de 0 a 10 Bares.

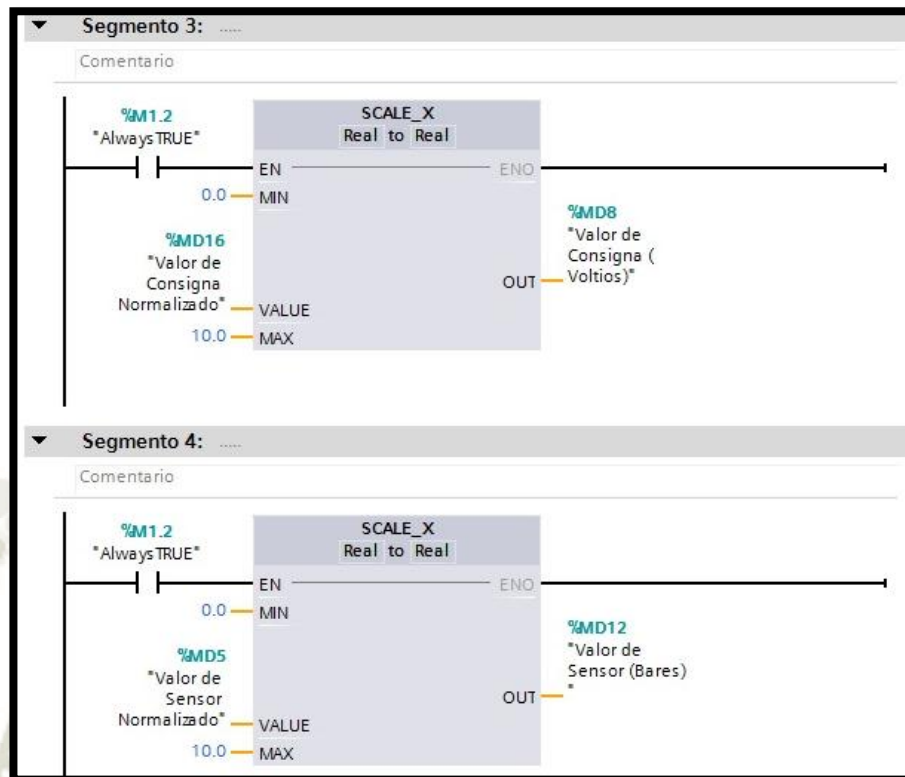


Figura 51. Bloques de escalamiento de valores

Fuente: Elaboración propia

Una vez establecidos los valores que se deben leer, así como su escalamiento, procedemos a crear el bloque Data Log Create, cuya función es crear un bloque de datos que contendrá las características de la tabla de salida de los valores adquiridos, y los ordenará de acuerdo a lo que se especifique, para que el controlador empiece a registrar los datos, activamos un valor booleano en la entrada digital I0.0, que activará en enable del bloque Data Log, dando inicio al registro de datos.

Para nuestro caso, los datos deberán clasificarse como valores de consigna y presión, en unidades voltios y bares respectivamente.

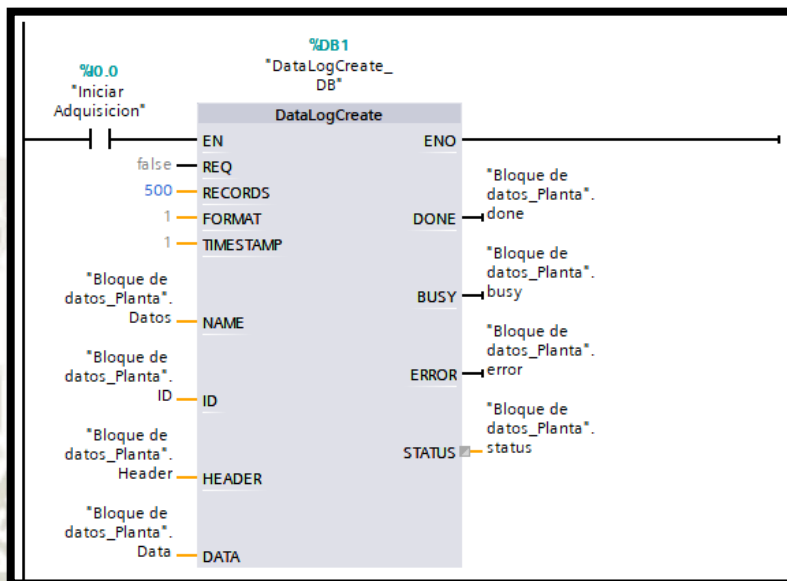


Figura 52. Bloque Data Log Create
Fuente: TIA Portal (2019)

Bloque de datos_Planta								
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranque	Remanencia	Accesible d...	Visible en ...	Valor de a...	Comentario
1	Static							
2	Datos	String	'Registro_Planta'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	ID	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Header	String	'Consigna,Presion'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Data	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Volt	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	Bar	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	done	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	busy	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	error	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	status	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 53. Bloque de datos de planta
Fuente: TIA Portal (2019)

Una vez creado e iniciado el bloque Data Log, éste dará inicio a el registro de los datos, escribiéndolos en la memoria del PLC mediante el bloque de datos. Para realizar el muestreo activaremos el bloque Data Log Write, que escribe los datos dado un tiempo de muestro. Configuraremos una frecuencia de 10 Hz, lo que nos dará una muestra cada 0.1 segundos, y posteriormente se procederá a trasladar los datos leídos cada 0.1 segundos al bloque de datos.

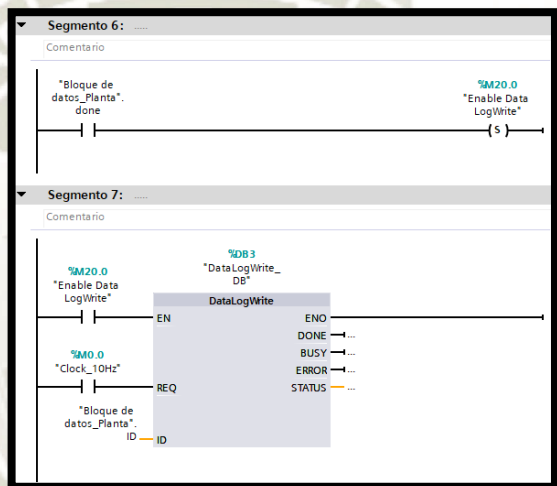


Figura 54. Bloque Data Log Write
Fuente: Elaboración propia

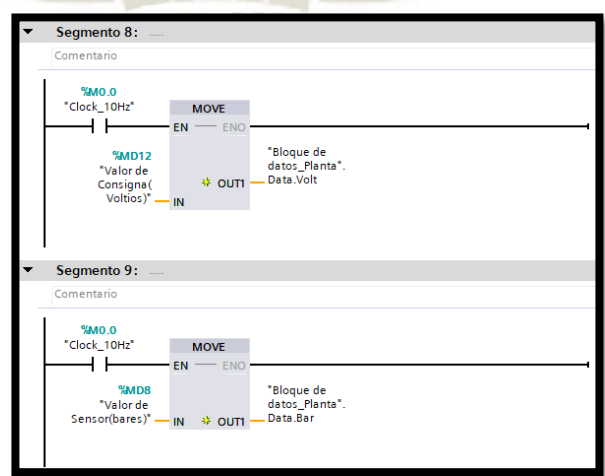


Figura 55. Bloques de traslado de datos
Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2. Generación de datos de planta

Una vez programado el PLC, se debe configurar la tarjeta de consigna para que ésta genere una señal de rampa, y activar la entrada del PLC que da inicio al proceso de adquisición de datos. Una vez iniciado el registro de datos, la tarjeta de consigna incrementará en voltaje de 0 a 10 V, con una rampa de 10 seg/1V, con un muestreo de 10 Hz, obtendremos un aproximado de 1000 muestras.

$$\#muestras = T * 10 \frac{seg}{V} * 10 V$$

$$\#muestras = 10 Hz * 10 seg * 10$$

$$\#muestras = 1000$$

Alcanzados los 10 V, procederemos a acceder a la memoria del PLC mediante el servidor web previamente configurado al cargar el programa, ingresando con la dirección IP del PLC, y podremos descargar el registro de datos en formato CSV.

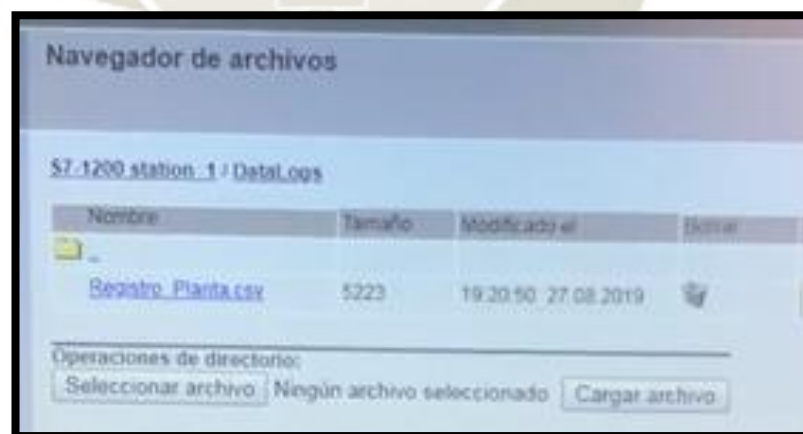


Figura 56. Navegador de archivos Siemens

Fuente: Elaboración propia

Para acceder a los bloques de programación LADDER completos, referirse al **ANEXO 5**.

Finalmente, los datos obtenidos se podrán analizar en una hoja de datos, lo cual posteriormente nos permitirá realizar el modelamiento de la planta. Cabe resaltar que aplicamos una entrada de rampa para estimular a la planta.

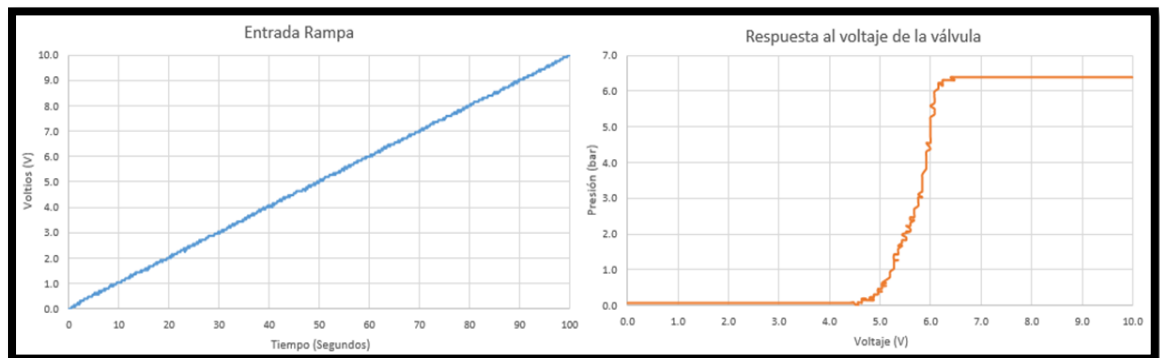


Figura 57. Gráfico de la rampa y la respuesta de la válvula (tension vs tiempo)
Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Modelamiento de la planta

Una vez generada la tabla de datos, procederemos a filtrarla, eliminando la zona muerta (valores de consigna para los cuales no se produce ninguna respuesta en la salida), debido a que podemos suprimir estos valores en el modelamiento matemático, al no producir alteraciones en la planta. Esta zona muerta comprenderá desde los 0 a 4.6 voltios, ya que trabajaremos desde los 4.7 a 10 voltios (Valores para los cuales opera la válvula).

No tomaremos en cuenta todos los datos registrados, debido a que resulta necesario seleccionarlos y filtrarlos, en vista de que la inclusión de datos erróneos o innecesarios podría resultar en un modelamiento matemático incorrecto.

Tabla 2. Muestra de datos de 0 a 6.4 Bar, obtenidos con una rampa de 0 a 10 V
Fuente: Elaboración propia

Tiempo(S)	U1(V)	Y1(Bares)	Tiempo(S)	U1(V)	Y1(Bares)
46.7	4.7	0.2	48.4	4.9	0.2
46.8	4.7	0.2	48.5	4.9	0.2
46.9	4.7	0.2	48.6	4.9	0.3
47	4.7	0.2	48.7	4.9	0.3
47.1	4.7	0.2	48.8	4.9	0.3
47.2	4.6	0.2	48.9	5	0.3
47.3	4.7	0.2	49	4.9	0.3
47.4	4.8	0.2	49.1	4.9	0.3
47.5	4.8	0.2	49.2	4.9	0.3
47.6	4.7	0.2	49.3	5	0.3
47.7	4.8	0.2	49.4	5	0.4
47.8	4.8	0.2	49.5	5	0.4
47.9	4.9	0.2	49.6	5	0.4
48	4.8	0.2	49.7	5	0.4
48.1	4.9	0.2	49.8	5	0.5
48.2	4.8	0.2	49.9	5	0.5
48.3	4.8	0.2	50	5	0.5

Usando Microsoft Excel podemos graficar nuestra entrada rampa de 4.7 a 10 voltios, y la respuesta de la válvula.

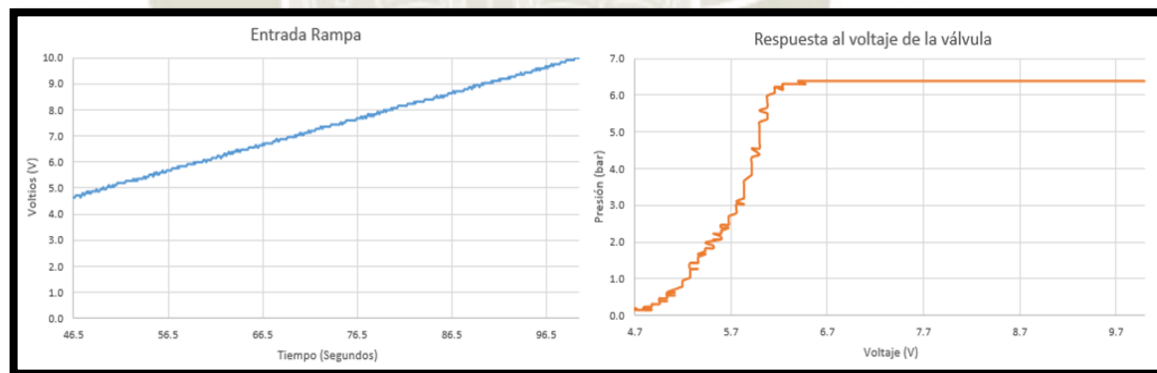


Figura 58. Entrada Rampa vs Salida Válvula
Fuente: Elaboración propia

Usando Microsoft Excel procedemos a graficar la data obtenida nuestra entrada “U1 (Voltios)” y “Y1 (Bares)”.

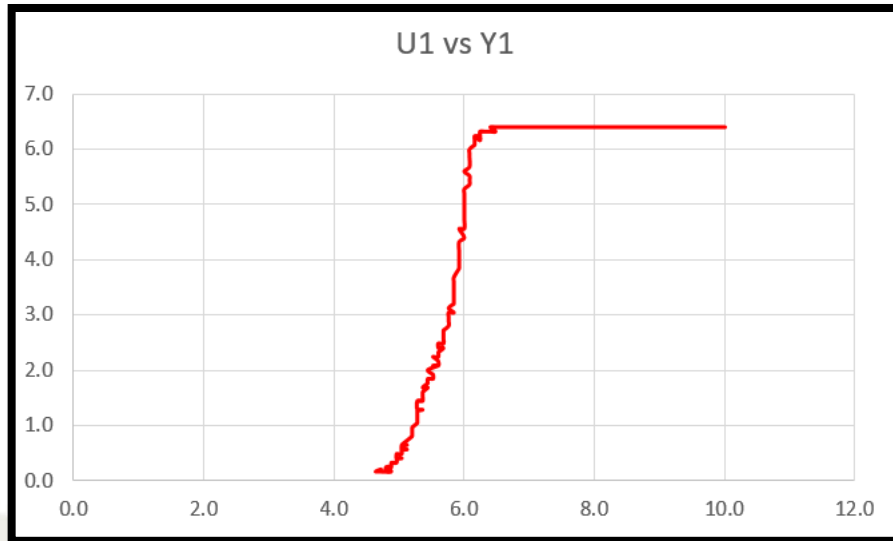


Figura 59. U1 (Voltios) vs Y1 (Bares)

Fuente: Elaboración propia

En el software Matlab se introdujo la data obtenida bajos el nombre de las variables “u1” y “y1”, entrada y salida correspondiente.

Se tomó parte de la muestra de datos para realizar el análisis y descartar las señales erráticas, las variables creadas aparecen en el Workspace y nos permitirá jalar los datos del Excel.

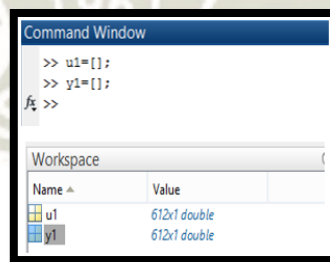


Figura 60. Vectores “u1” y “y1”

Fuente: Elaboración propia

Procedemos a importar los datos de nuestra tabla de muestra de datos a los vectores creados en Matlab.

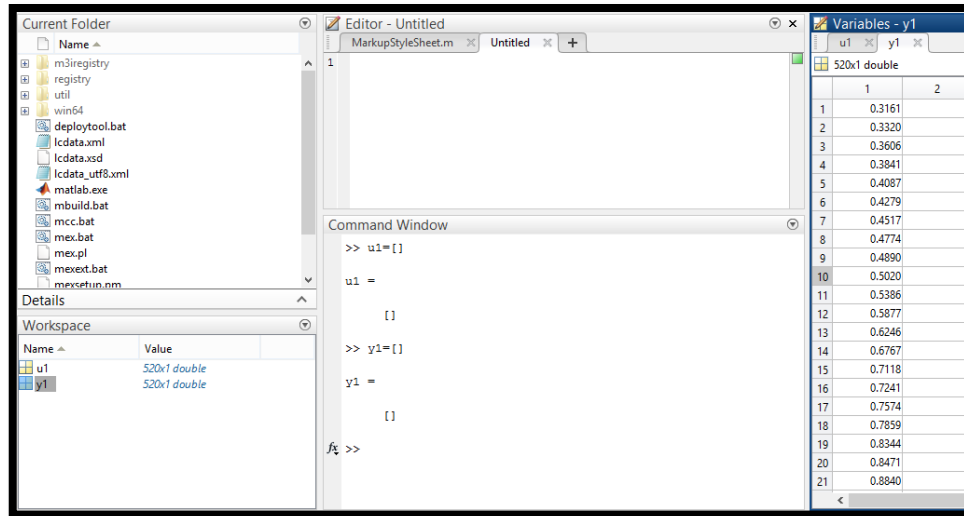


Figura 61. Datos importados al Workspace
Fuente: Elaboración propia

Se utiliza la herramienta “System identification” o en su forma abreviada ident, como se muestra a continuación en la siguiente figura.

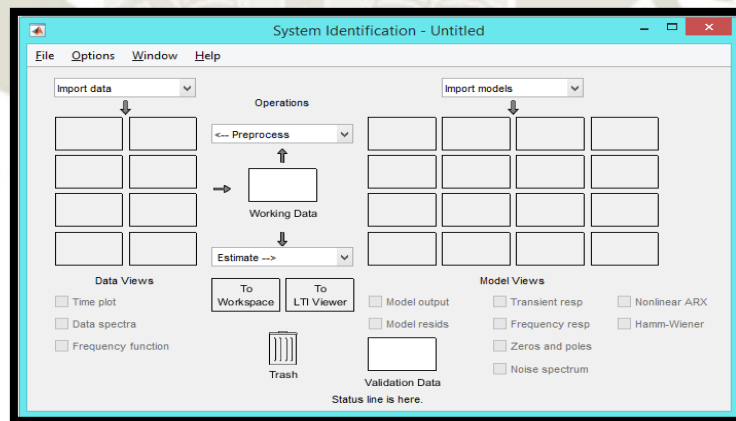


Figura 62. Ventana de System Identification Tool
Fuente: Matlab (2019)

Una vez abierta la herramienta, se procede a importar los datos que se encuentran en el Workspace, seleccionando la ventana desplegable “Import Data”, escogeremos la opción “Time-Domain Signals” y procedemos a importar nuestra entrada y salida.

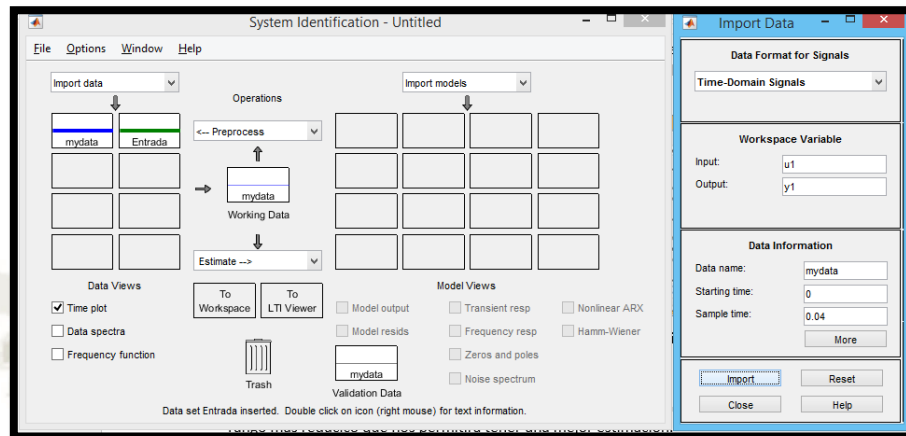


Figura 63. Importación de datos a System Identification Tool

Fuente: Matlab (2019)

Una vez se tiene la data seleccionada procedemos a comprobar que los datos son correctos, para eso usamos la opción “Time Plot” para poder visualizar la entrada de los datos.

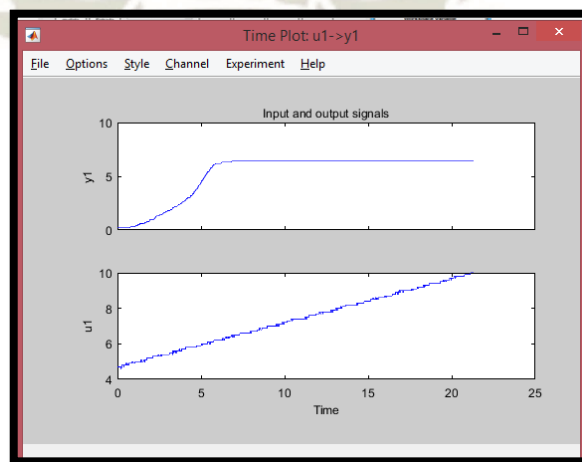


Figura 64. Importación de datos y visualización con Time Plot

Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionado el rango de data a procesar, continuamos con la estimación del modelo, donde desplegamos la opción “Estimate”, donde podemos escoger dentro de sus opciones la de “Transfer Model”, “Process Model”, “Nonlinear Models”.

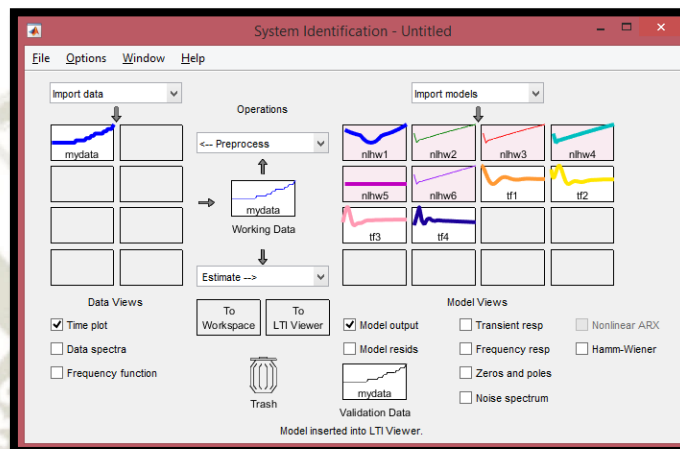


Figura 65. Opciones de estimación de modelos
Fuente: Elaboración propia

Procedemos a escoger la función “Transfer Function Model” donde escogeremos la cantidad de dos polos y un zero, nos dan como resultado una aproximación del 82.94%.

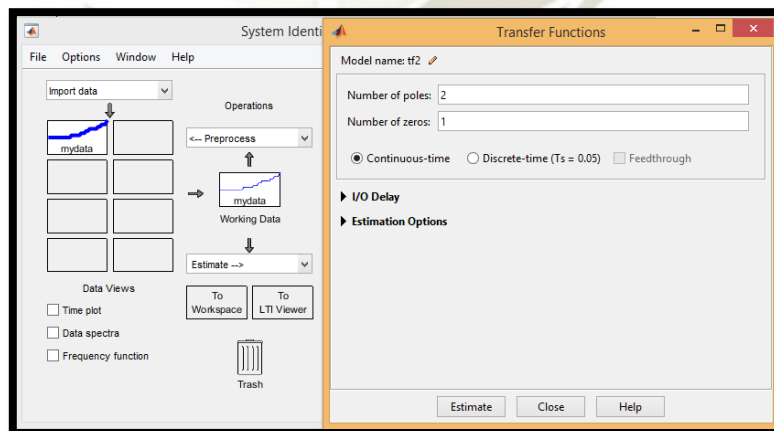


Figura 66. Transfer Function Model en Ident de Matlab
Fuente: Elaboración propia

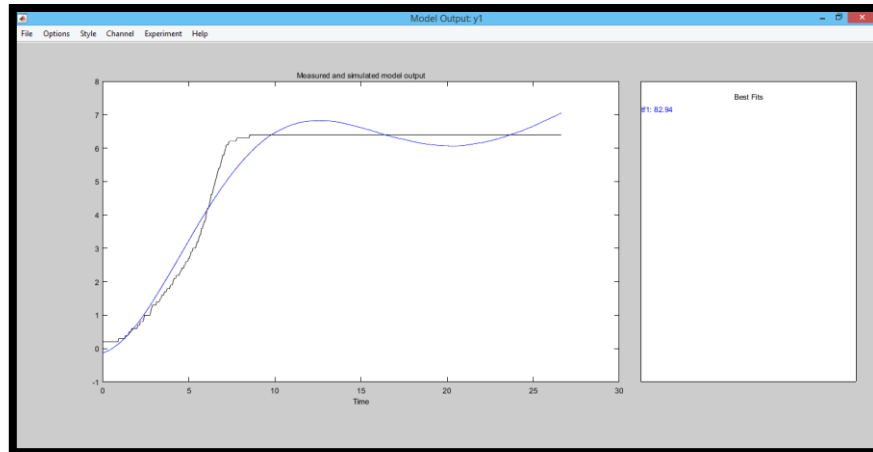


Figura 67. Aproximación de TF1

Fuente: Elaboración propia

Una vez que obtenemos nuestra aproximación procedemos a compararla en el LTI Viewer, que nos permitirá realizar un step o gráfica de la función de transferencia.

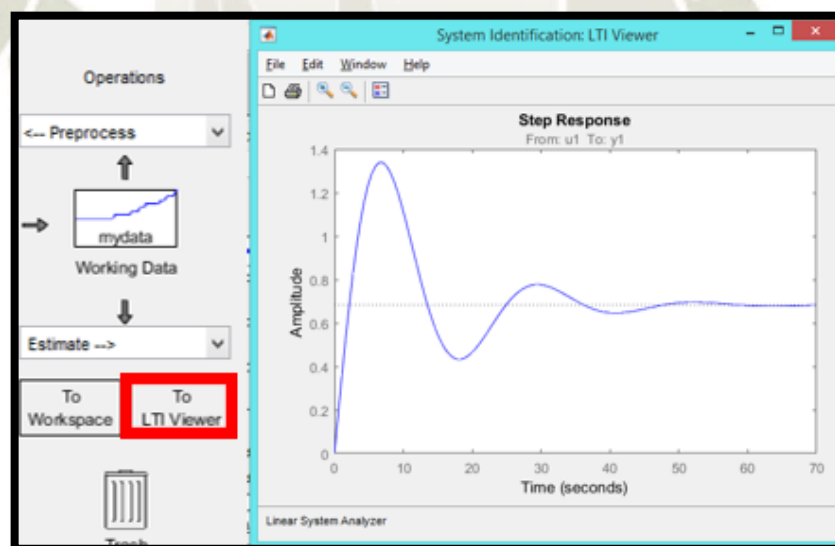


Figura 68. Gráfica realizada por LTI Viewer

Fuente: Elaboración propia

Observación importante acerca de los modelos encontrados

Se probó con varios modelos, pero el más cercano fue obtenido con la función “Nonlinear Models” por lo que nos llegó a brindar una aproximación del 98.88%, para poder obtener estos datos usamos el modelo Hammerstein-Wiener donde seleccionaremos que la zona muerta va desde 0 a 0.5.

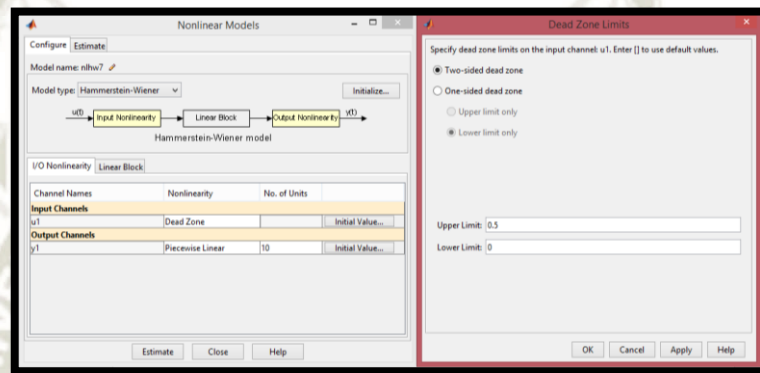


Figura 69. Configuración de parámetros de Hammerstein-Wiener
Fuente: Elaboración propia

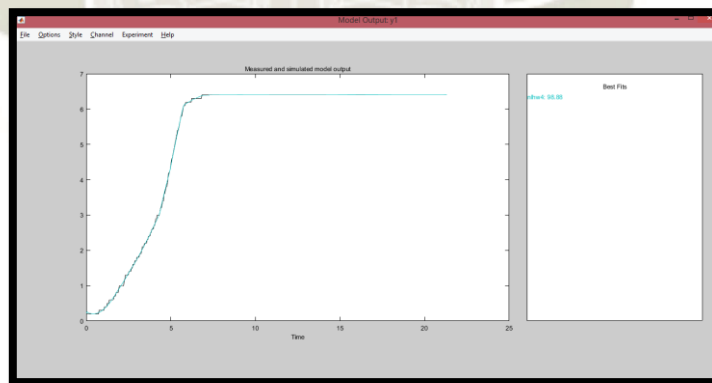


Figura 70. Model output de modelo no lineal
Fuente: Elaboración propia

Una vez escogido este modelo procedemos a graficarlo con “LTI Viewer”, para corroborar al linealizarlo y aplicarle una entrada escalón este nos muestre una curva aceptable, como se muestra en la **Figura 71**.

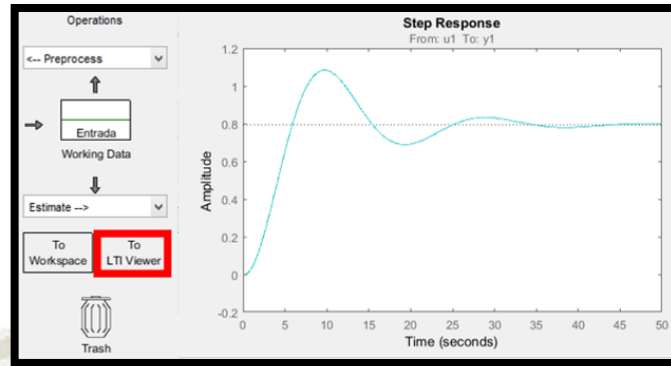


Figura 71. Respuesta de la función al sistema con la función LTI Viewer

Fuente: Elaboración propia

Al tener los sistemas en el Workspace de Matlab, comenzamos a trabajar con el siguiente código de Matlab que nos permitirá obtener la función de transferencia.

```

Command Window
>> linealModel=linapp(nlhv4,mydata)

linealModel =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
B(z) = -0.0008347 z^-1 + 0.001134 z^-2
F(z) = 1 - 0.9914 z^-1 - z^-2 + 0.9916 z^-3

Name: nlhv4
Sample time: 0.04 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: nb=2 nf=3 nk=1
Number of free coefficients: 5
Use "polydata", "getpvec", "getoov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Model modified after estimation.

/>> |

>> G=tf(d2c(linealModel))

G =

From input "u1" to output "y1":
-----
-0.01043 s^3 - 1.431 s^2 - 64.65 s + 579.9
-----
s^4 + 0.2106 s^3 + 6169 s^2 + 1299 s + 730.4

Continuous-time transfer function.

/>> |
    
```

Figura 72. Código en Matlab para obtener la función de transferencia

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que mejorar la complejidad y porcentaje de algunos métodos como “No linear model” no asegura una óptima función de transferencia para nuestra planta, además de requerir una función lineal para poder trabajar con el algoritmo de colonia de hormigas.

3.2. OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Se procede a exportar “tf1” todo al Workspace, entonces se comienza a trabajar con los datos exportados.

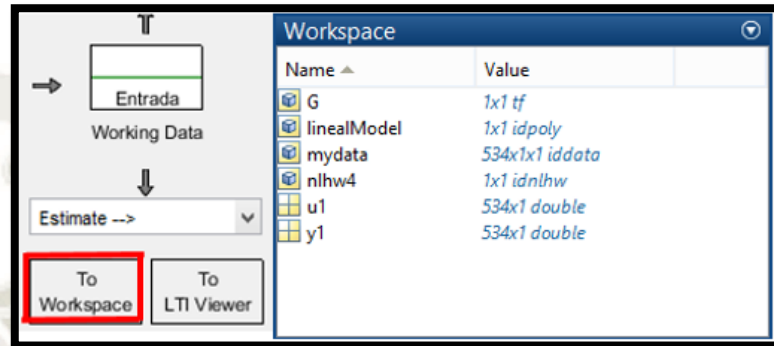


Figura 73. Exportación de tf1 a Workspace
Fuente: Elaboración propia

Al tener los sistemas en el Workspace de Matlab, llamamos a la función de transferencia con el siguiente código de Matlab que nos permitirá obtener la función de transferencia.

```
tf1 =

From input "u1" to output "y1":
      3.387 s + 5.705
-----
s^2 + 1.705 s + 8.363

Name: tf1
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 2   Number of zeros: 1
  Number of free coefficients: 4
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
  Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
  Fit to estimation data: 82.94% (stability enforced)
```

Figura 74. Código en Matlab para obtener la función de transferencia
Fuente: Elaboración propia

Aplicando una entrada de escalón unitario obtenemos la siguiente respuesta con el comando step que nos permite visualizar la función de transferencia, la cual debe ser la misma figura que la obtenida con el LTI Viewer.

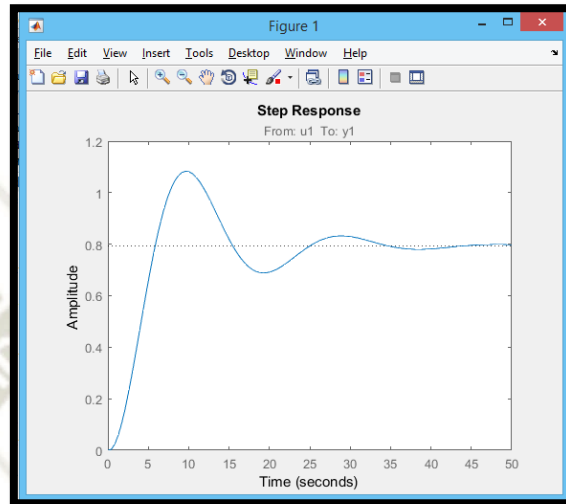


Figura 75. Escalón unitario aplicado a la planta modelada “G” en lazo abierto
Fuente: Elaboración propia

3.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA

En el proceso de diseñar e implementar la planta neumática de presión a controlar, es necesario tomar en cuenta los distintos circuitos que intervendrán en el proceso, tales como el circuito neumático y el circuito eléctrico, que serán los circuitos principales que nos permitirán realizar las etapas de adquisición de datos y la etapa final de implementación del controlador.

3.3.1. Diseño neumático de la planta

En la parte neumática, la planta a diseñar será relativamente de sencilla construcción, debido a que el objeto de estudio de esta tesis se centra en su mayoría en la construcción y aplicación del algoritmo ACO.

Cabe resaltar que la presión máxima proporcionada por el compresor varía entre 0 y 8 bares, tomando en cuenta que será calibrado a 6 bares para fines de realizar un mejor control. Ésta calibración se da de ésta manera para poder restringir el rango de valores entre los cuales podremos asignar una consigna, tomando en cuenta que los valores de presión necesarios producto del control no deberán exceder la capacidad del compresor.

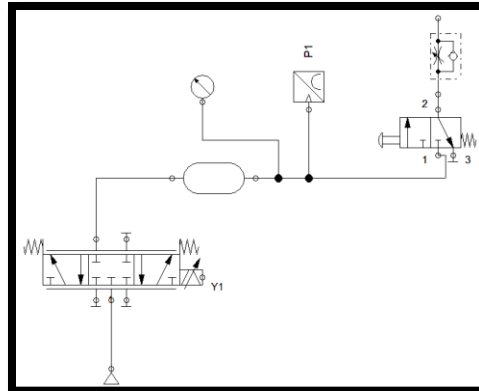


Figura 76. Simulación en Fluidsim de la planta a implementar
Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la **Figura 77**, la planta neumática cuenta con una válvula proporcional de 5/3 vías, que se controla electrónicamente, la salida N°2 de la válvula será bloqueada, teniendo en cuenta que no la utilizaremos, y la salida N°4 se conectará a un acumulador de presión de 0.4 litros, que a su vez estará conectado a un sensor de presión analógico, un indicador de presión y a una válvula de 3/2 vías accionada mecánicamente, la cual, conectada a una válvula reguladora de caudal unidireccional, nos permitirá variar el nivel de la perturbación que se desea simular en la planta.



Figura 77. Implementación física de la planta neumática
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Diseño eléctrico de la planta

Para realizar la implementación eléctrica de la planta, deberemos tomar en cuenta las dos señales necesarias para realizar el control PID, es decir la señal proveniente del sensor de presión conectado al acumulador, así como la señal que controla al solenoide que acciona la válvula proporcional de 5/3 vías.

Cabe resaltar que si bien la planta neumática permanece igual a la etapa de adquisición de datos, la parte eléctrica si cambiará, teniendo en cuenta que el controlador que usaremos será el PLC, por lo que tanto el sensor analógico como la válvula proporcional deberán ser conectados al mismo.

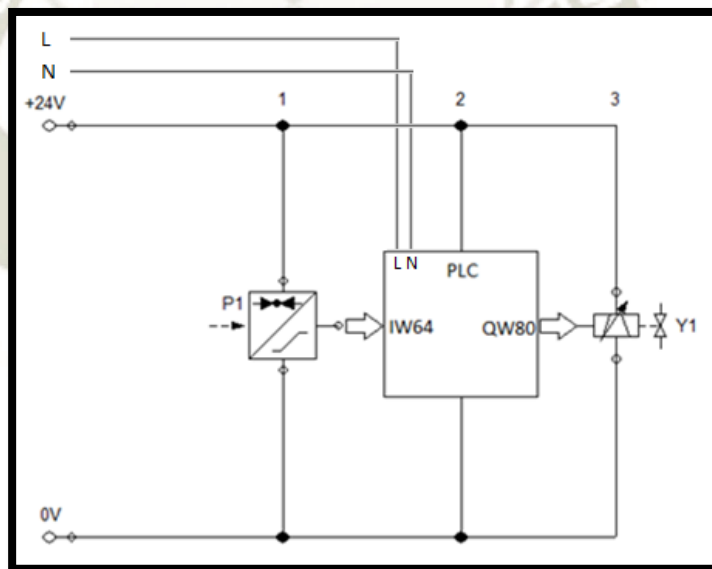


Figura 78. Simulación en Fluidsim de las conexiones eléctricas de la planta
Fuente: Elaboración propia

En la implementación eléctrica, usaremos como fuente de poder la fuente propia del PLC (24 voltios), desde donde se alimentará al sensor de presión analógica, así como a la válvula proporcional.

La señal proveniente del sensor será conectada a la entrada analógica IW64, registrando el valor de 0-10 voltios que brinda el sensor indicando la presión a la cual se encuentra el sistema. La señal de control, que será conectada al solenoide de la válvula proporcional, deberá ser conectada en la salida analógica QW80, que varía los valores de 0 a 10 voltios dependiendo del controlador PID.

En el diagrama de bloques de la **Figura 79**, se muestra la conexión eléctrica que se realiza entre el PLC y la planta neumática, tomando como entrada analógica IW64 y como salida analógica QW80.

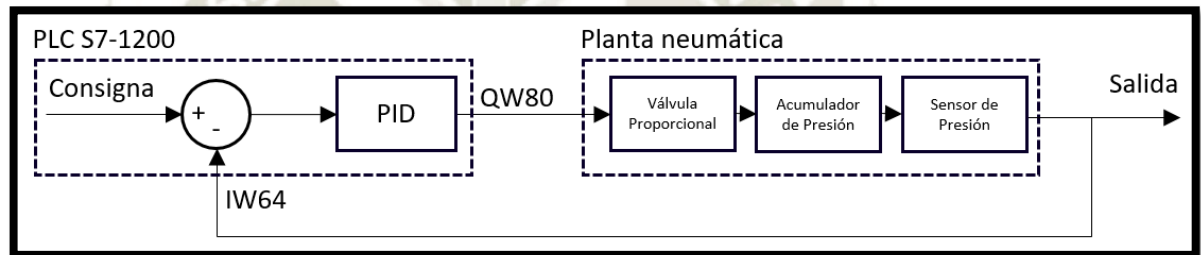


Figura 79. Diagrama de bloques de diseño de planta

Fuente: Elaboración propia

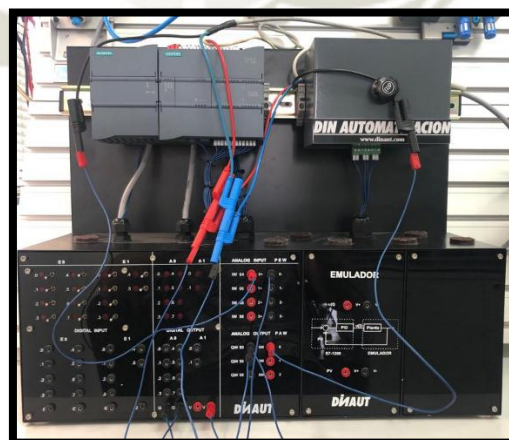


Figura 80. Conexiones físicas de la válvula y sensor con el PLC

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4. CÁLCULO DE PARÁMETROS PID DEL CONTROLADOR

Para poder realizar el adecuado control de la presión en la planta implementada, será necesario determinar los parámetros del controlador PID, para lo cual se aplicarán 3 distintos métodos de sintonización de parámetros. Se aplicarán 2 métodos convencionales de sintonización, aplicando herramientas computacionales y herramientas propias del PLC, así como también se aplicará el algoritmo de colonia de hormigas.

4.1. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID APLICANDO LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL SISOTOOL DE MATLAB

Como primer método de obtención de parámetros PID, haremos uso de la herramienta computacional Control and Estimation Tools Manager conocida como Sisotool de Matlab, ésta es una herramienta gráfica que permite el análisis de sistemas lineales, donde podremos obtener las raíces del sistema y obtendremos los valores del controlador de la planta.

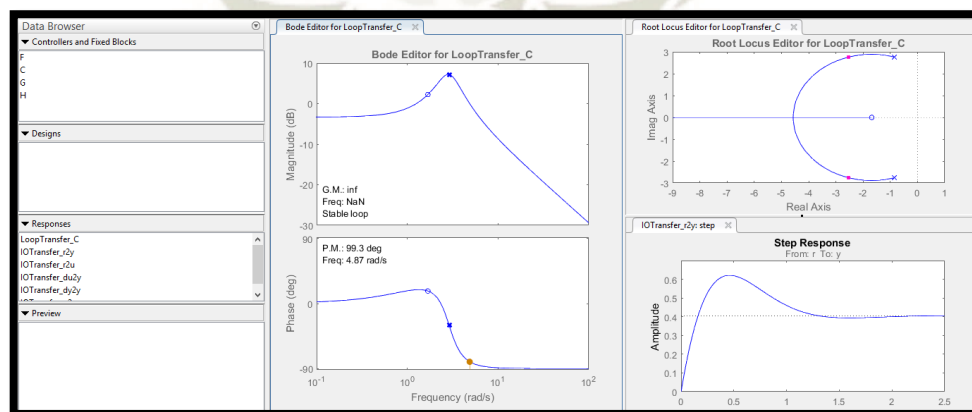


Figura 81. Herramienta Sisotool
Fuente: Matlab (2019)

4.1.1. Herramienta computacional Sisotool de Matlab

Como indicamos anteriormente Sisotool es una herramienta computacional propia de Matlab, esta herramienta tiene algunas condiciones de diseño ya que al ser un sistema neumático requerimos que actúe a mayor velocidad que un sistema hidráulico por lo que colocaremos los siguientes datos como condiciones de diseño:

- $M_p=20\%$
- $T_s < 2 \text{ seg}$

También escogeremos el tipo de arquitectura dentro de Sisotool, que nos permitirá definir el lazo cerrado y el tipo de compensador C que actuara como el sistema PID.

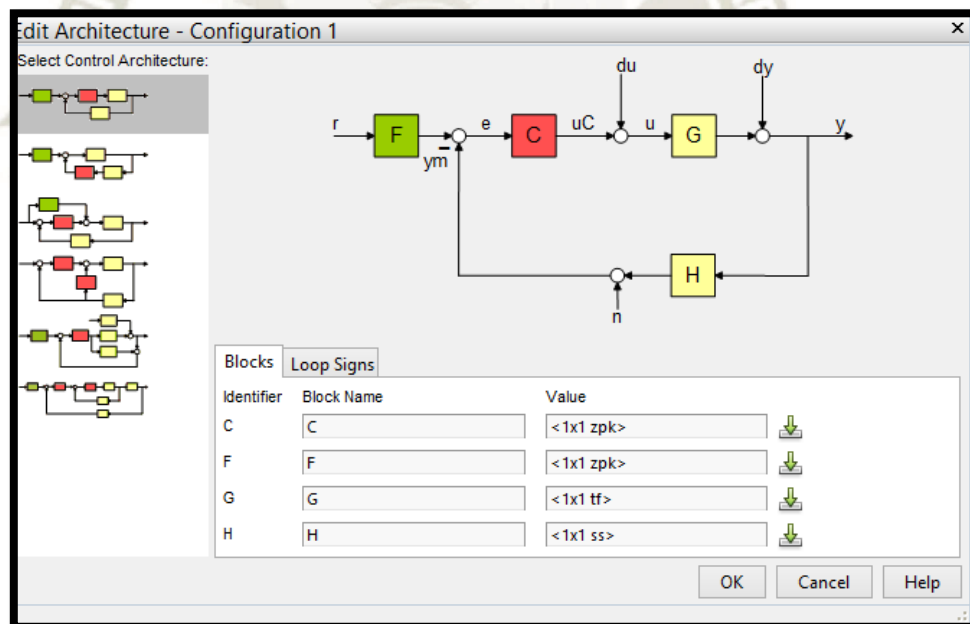


Figura 82. Tipo de arquitectura Sisotool
Fuente: Matlab (2019)

En ventana mostrada en la **Figura 83**, podremos editar el compensador, al querer obtener un controlador PID obtenemos valores que brindan una respuesta oscilatoria, pero al obtener un controlador PI obtenemos una respuesta mucho más rápida y eficaz.

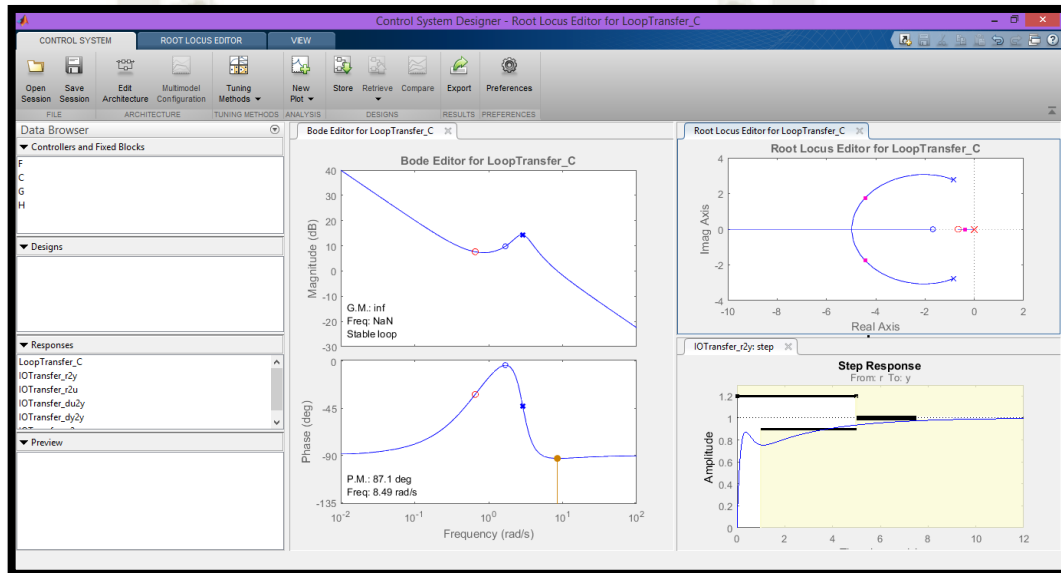


Figura 83. Valores del controlador PID encontrados con PIDtool

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 84** podemos observar cómo añadimos a nuestro compensador un integrador y un Zero real, los cuales nos darán el compensador de nuestro sistema de lazo cerrado.

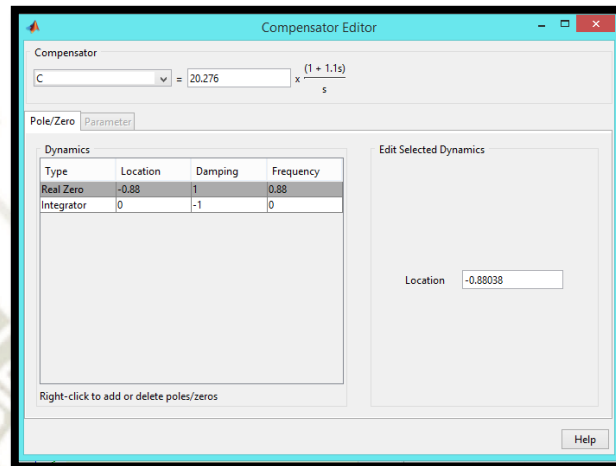


Figura 84. Ventana Compensator Editor
Fuente: Matlab (2019)

En la **Figura 85**, utilizamos el PID Tuning de Sisotool que nos permitirá obtener los valores del compensador en la Workspace de Matlab.

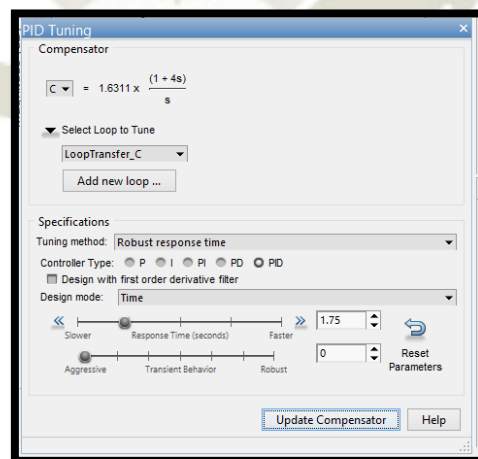


Figura 85. Ventana PID Tuning
Fuente: Matlab (2019)

Para poder finalizar podemos observar como la herramienta Sisotool nos muestra como el compensador actúa sobre nuestra función de transferencia y brinda un step de nuestro sistema de lazo cerrado con el compensador PID.

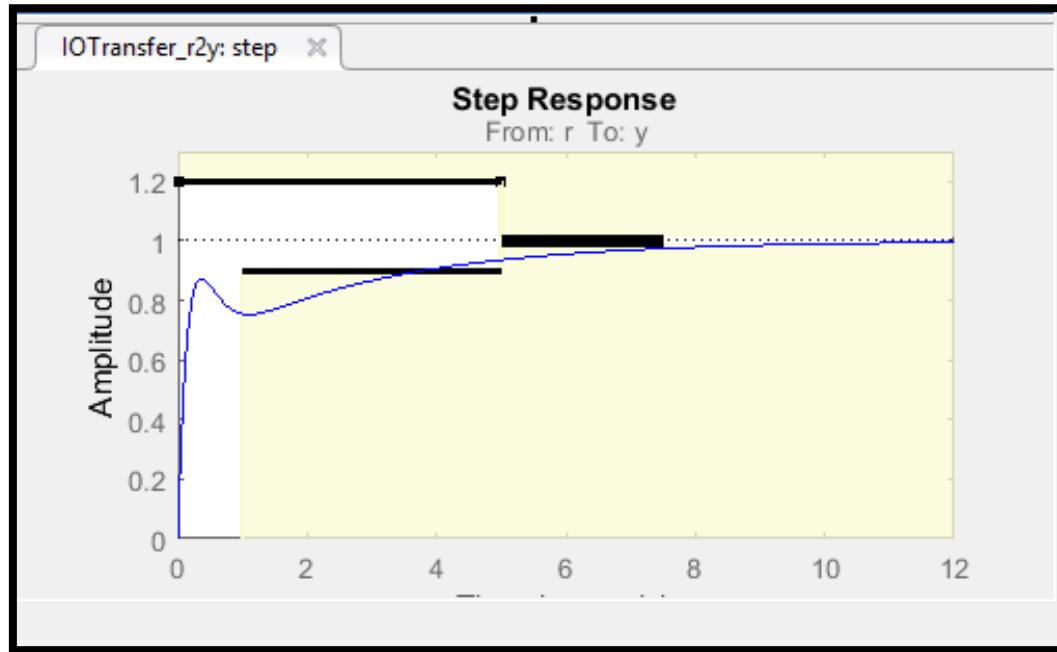


Figura 86. Step del compensador y función de transferencia

Fuente: Elaboración propia

Para poder obtener los valores del PID en el Workspace tendremos que exportar el compensador que está identificado con la letra "C".

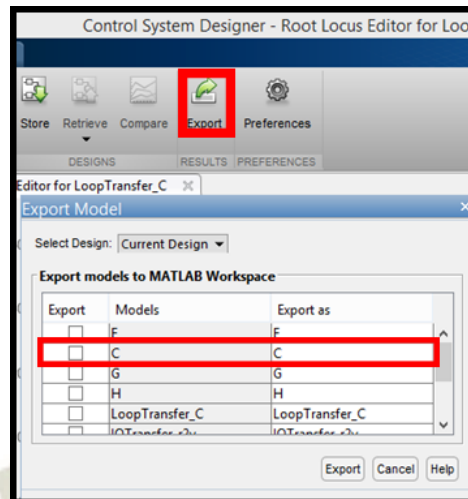


Figura 87. Exportar compensador a Workspace

Fuente: Elaboración propia

Una vez tengamos el compensador en el Workspace procedemos a pasarlo a command window para su visualización y a su vez también tener los valores del compensador PID.

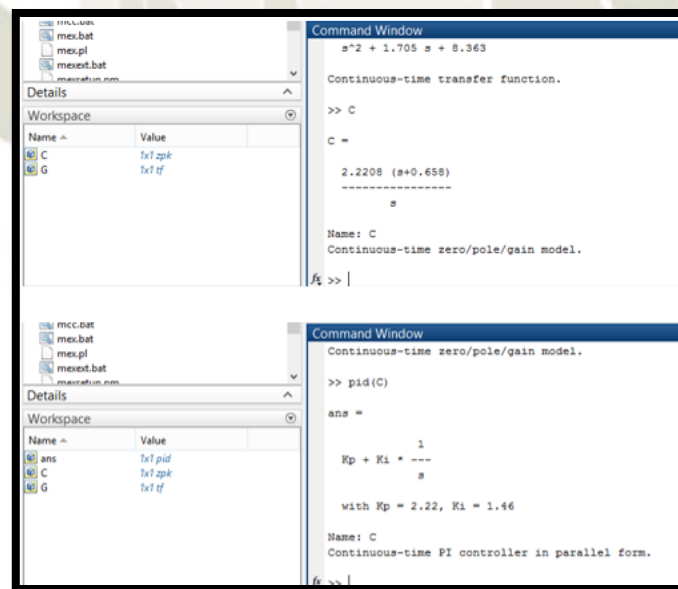


Figura 88. Visualización compensador en Command Window

Fuente: Elaboración propia

Para culminar comprobamos en Simulink que los valores obtenidos del controlador PI son viables para nuestra función de transferencia, y comprobamos la gráfica obtenida por el Sisotool y la que obtendremos con Simulink.

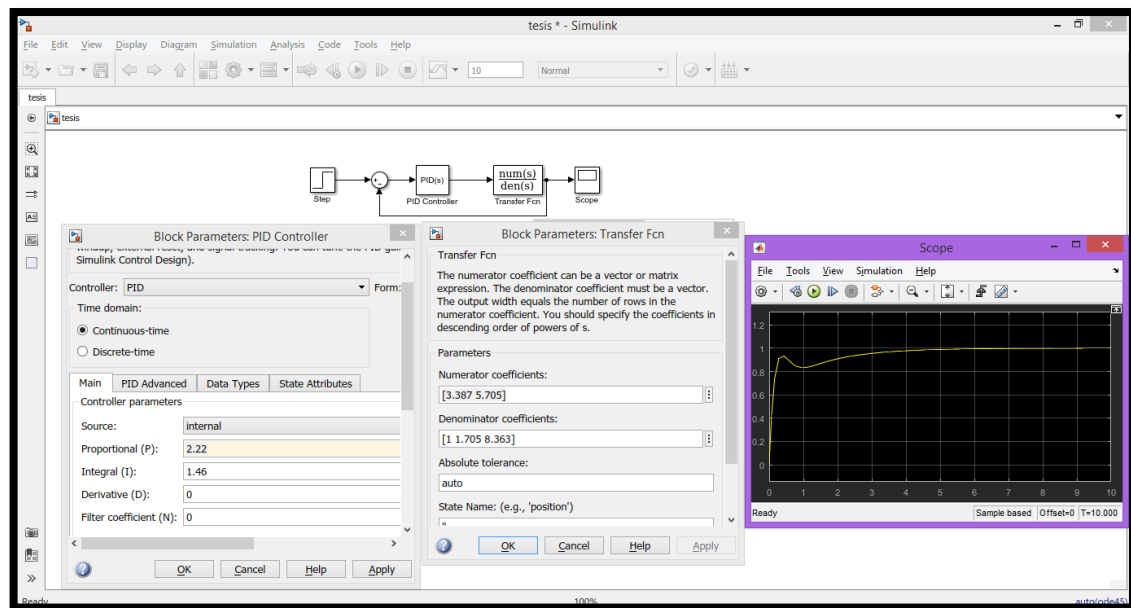


Figura 89. Visualización en Simulink

Fuente: Elaboración propia

Podemos concluir que en Sisotool y Simulink obtenemos la misma gráfica de cómo actúa el compensador en nuestra función de transferencia, dando como resultado un control mucho más rápido en tiempo de subida y mucho más rápido en estabilización.

4.2. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID APLICANDO LA HERRAMIENTA PID COMPACT DEL SOFTWARE TIA PORTAL

Como segundo método de obtención de parámetros PID, aplicaremos el uso de una herramienta computacional que nos proporciona el TIA Portal, la cual nos permitirá realizar una sintonización automática de la planta, la cual posteriormente determinará los parámetros PID para poder controlar la planta previamente implementada, de una manera óptima.

La herramienta mencionada es el objeto tecnológico PID Compact, el cual se implementará en un programa que realizará una interfaz entre las distintas señales que tenemos tanto en la entrada como en la salida del PLC.

4.2.1. Procedimiento de obtención de parámetros PID con PID Compact

Para poder obtener los parámetros PID de la planta será necesario identificar las distintas etapas o partes del programa que implementaremos y cargaremos en el controlador, para poder hacer uso de la herramienta PID Compact.

En el proceso de obtención de los parámetros PID haciendo uso de la herramienta PID Compact de TIA Portal, se tomó como referencia el manual de entrenamiento del módulo del PLC S7-1200 por DINAUT (DINAUT, 2018).

Las principales etapas del programa se detallan a continuación.

4.2.1.1. Ingreso, salida y escalamiento de variables de control

Como primera etapa, en el bloque de programa “Main”, se crearán 2 segmentos, cada uno con 2 bloques, los cuales se encargarán en primer lugar, de leer los datos

provenientes del sensor de presión (valor real), así como de escribir los datos para el control de la válvula proporcional (valor de control).

En segundo lugar, cumplirán la función de escalar los valores, teniendo en cuenta que los valores con los cuales el software realiza cálculos en el PLC, no son los mismos valores que se leerán a la salida del sensor de presión, así como los valores con los cuales se controlará la válvula proporcional.

En la **Figura 90**, se muestra el segmento 1, en el cual se procede a escalar y asignar los valores de salida hacia la válvula proporcional.

Los valores que nos proporciona el PID Compact como variable de control se darán en un valor de 0 a 100 %, lo cual se asignará a una variable denominada “Escalamiento_Valvula”, como se puede apreciar en el recuadro de color rojo.

Posteriormente, ésta variable se ingresará en un bloque de escalamiento, que escalará los valores de 0 a 100 a valores de 13270 a 27648 (éste tipo de valores son los que el PLC escribe para la salida analógica que posee, la cual varía entre 0-10 V). Cabe resaltar que no tomamos en cuenta la salida desde el valor de 0, debido a que consideramos una zona muerta desde los 0 a los 4.6 V para la válvula proporcional.

Finalmente, la salida del bloque de escalamiento (recuadro azul) será llevada a la salida analógica del PLC, que variará los valores de control de la válvula proporcional de 4.7 a 10 voltios.

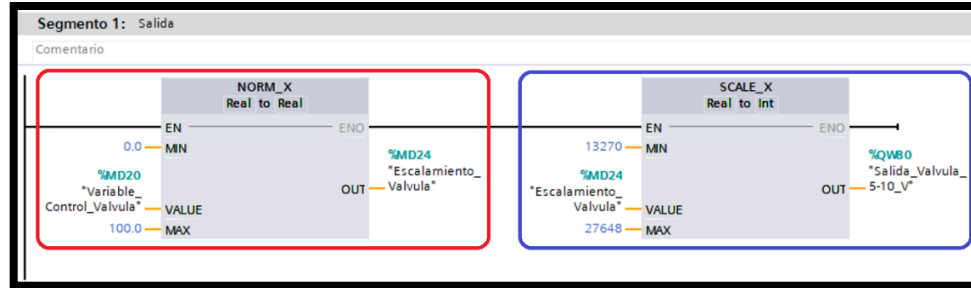


Figura 90. Representación del Segmento 1

Fuente: Elaboración propia

En la **Figura 91**, se muestra el segmento 2, en el cual se procede a leer y escalar los valores obtenidos del sensor de presión.

Los valores de presión (que varían entre 0 y 10 voltios), serán leídos por el PLC como valores de 0 a 27648, y asignados a “Escalamiento_Sensor”, como se muestra en el recuadro rojo.

Posteriormente, se escalará los valores de 0 a 27648 a valores de 0 a 100 (como se puede observar en el recuadro azul), esto debido a que para poder trabajar con el bloque de PID Compact, necesitaremos una entrada porcentual del valor real, que será comparado con la consigna posteriormente asignada.

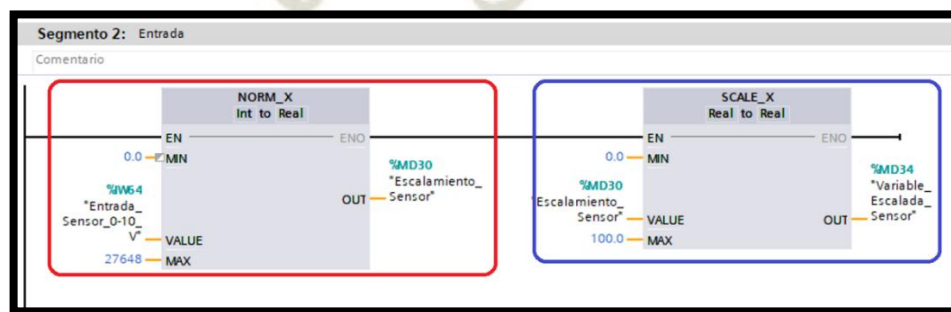


Figura 91. Representación del Segmento 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Creación y configuración del objeto PID Compact

Crearemos un nuevo bloque de programa “Cyclic interrupt”, en el cual se encontrará el bloque “PID_Compact_1”, como muestra la **Figura 92**.

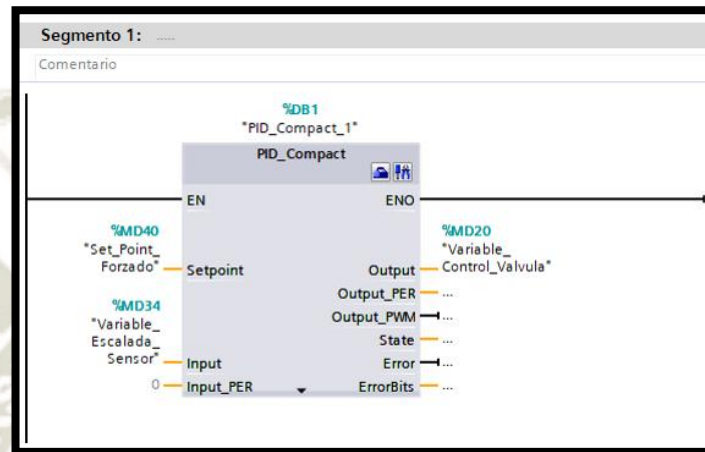


Figura 92. Bloque PID_Compact_1

Fuente: TIA Portal (2019)

Como se aprecia en la **Figura 92** se asigna un “Set_Point_Forzado”, la cual será la variable que posteriormente se forzará para asignar el set point, así como la entrada escalada del sensor, y la salida de control hacia la válvula proporcional.

Posteriormente, procederemos a configurar el bloque, asignando los parámetros de entrada y salida (**Figura 93**), así como indicando los límites del valor real, teniendo en cuenta que trabajaremos con una escala porcentual para el cálculo de los parámetros PID (**Figura 94**).

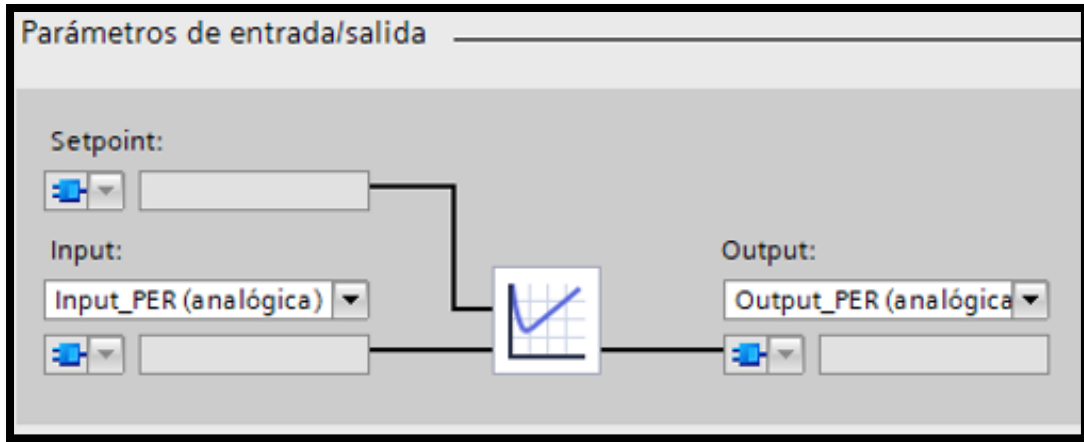


Figura 93. Configuración de parámetros entrada/salida

Fuente: Elaboración propia

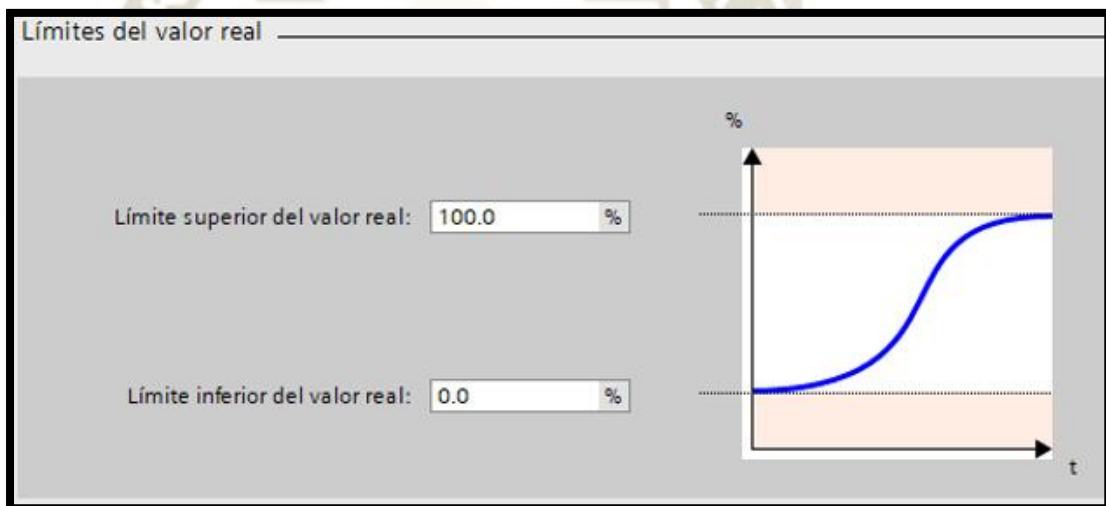


Figura 94. Configuración de los límites del valor real

Fuente: TIA Portal (2019)

4.2.1.3. Optimización y obtención de parámetros PID

Tras haber configurado los parámetros del PID Compact, procederemos a cargar el programa en el PLC y a observarlo en tiempo real. Posteriormente, nos ubicaremos en la variable de set point, y la forzaremos asignándole un valor de 40%, como se muestra en la **Figura 95**.

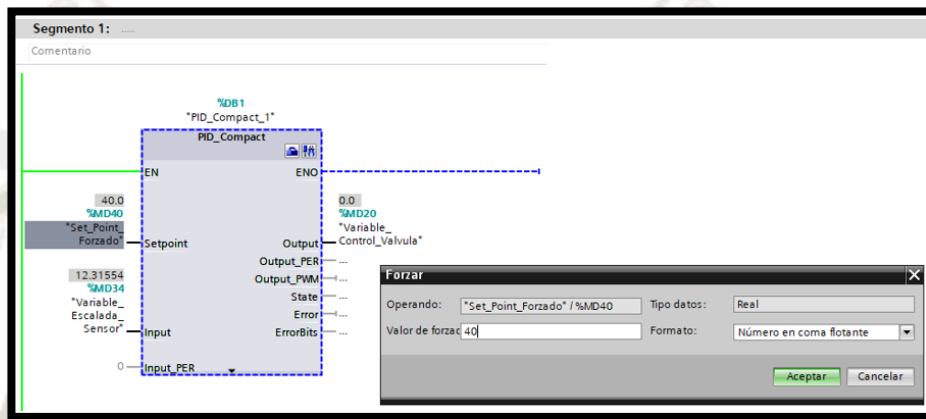


Figura 95. Asignación de un valor forzado de set point

Fuente: Elaboración propia

Tomando como referencia la **Figura 96**, en el menú interno del bloque, se deberá realizar en primer lugar una medición (recuadro rojo), y posteriormente una optimización fina (recuadro azul).

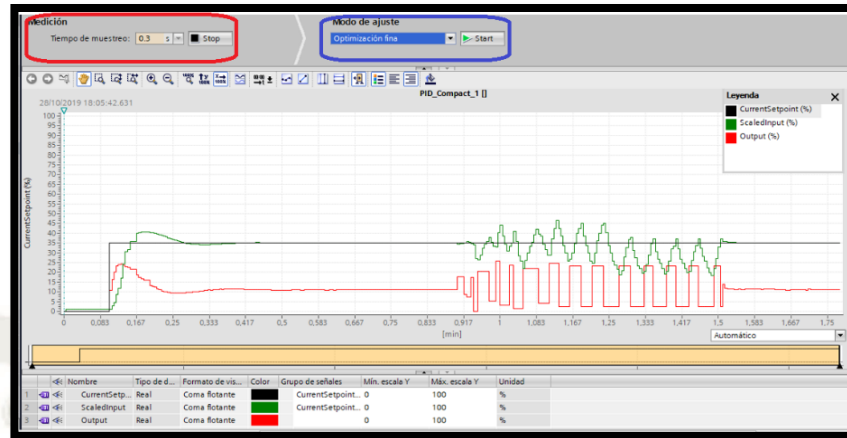


Figura 96. Sintonización de parámetros PID

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la **Figura 96**, obtenida a partir de la sintonización, el bloque genera un sobre impulso en el valor de control (línea roja), lo que hace variar al valor sensado por la planta (línea verde) hasta sobrepasar al valor de consigna (línea negra), y posteriormente varía el valor de control en repetidas ocasiones, optimizando así los valores PID, a los que posteriormente podremos acceder mediante la ventana de configuraciones del bloque, como se muestra en la **Figura 97**.

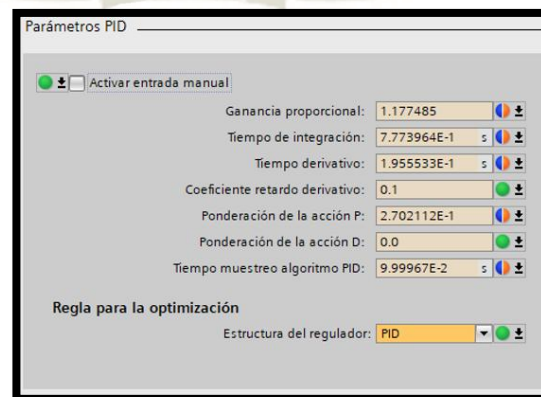


Figura 97. Parámetros PID obtenidos de la sintonización

Fuente: TIA Portal (2019)

4.3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID DEL CONTROLADOR POR EL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

El algoritmo de colonia de hormigas es un algoritmo de optimización genético, que basa su funcionamiento en los principios de selección natural y en la genética de una población determinada, funcionando de manera iterativa en base a diversos parámetros que dependen de la población.

El principal objetivo del algoritmo es encontrar la mejor solución que desarrolle la población determinada, previamente asignados los parámetros que limitarán esta búsqueda.

En la búsqueda de la solución más óptima, el algoritmo pretende equilibrar 2 objetivos opuestos, tales como encontrar la mejor solución y expandir el espacio de búsqueda, y en consecución del objetivo, éste algoritmo de optimización genética, realiza la búsqueda paralela de soluciones basadas en distintos nodos, en los cuales no se registra un alto grado de conocimiento de la solución, y todo este proceso dependerá de la interacción de los alrededores y de los operadores genéticos (Ünal, Ak, Topuz, & Erdal, 2013).

4.3.1. DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO

Como se mencionó previamente en el marco teórico, este algoritmo se construye a partir del estudio del comportamiento de las hormigas, y cómo éstas al ser ciegas, logran establecer las rutas más cortas entre su colonia y la fuente de alimento. Se determinó que el medio de comunicación entre ellas es un *rastros de feromonas*, el cual se crea a partir de la ruta tomada por una hormiga. Es muy importante conocer el comportamiento de las hormigas ante éste tipo de comunicación, resaltando que optarán a seguir el camino que

contenga mayor concentración de feromonas en él, además de reforzar la concentración de las mismas con las mismas feromonas que dejan al recorrerlo.

A éste comportamiento se le denomina comportamiento auto catalítico, y éste caracteriza a la población de hormigas, de manera que a mayor concentración de feromonas, la ruta se hace más atractiva para cada individuo de la población. De ésta manera se puede inferir el comportamiento de la población, tomando en cuenta que mientras más individuos hayan recorrido previamente una ruta, mayor será la probabilidad de que los próximos individuos recorran la misma (Dorigo, Maniezzo, & Coloni, 1996).

Para poder implementar el algoritmo, será necesario tener en cuenta algunas consideraciones (que se establecen en base a lo estudiado previamente a partir del comportamiento de las hormigas). Las hormigas artificiales que se crearán como una herramienta de optimización se podrán diferenciar de las reales en las siguientes características:

- Las hormigas artificiales poseerán una remota memoria.
- Las hormigas artificiales no serán completamente ciegas.
- Las hormigas artificiales realizarán todo tipo de decisiones en tiempo discreto.

Para poder comprender de una mejor manera cómo funciona el sistema de feromonas y cómo éste varía en función al tiempo, haremos uso de un clásico ejemplo del comportamiento de las hormigas ante un obstáculo.

La **Figura 98** ilustra el comportamiento de las hormigas ante un obstáculo en su trayectoria.

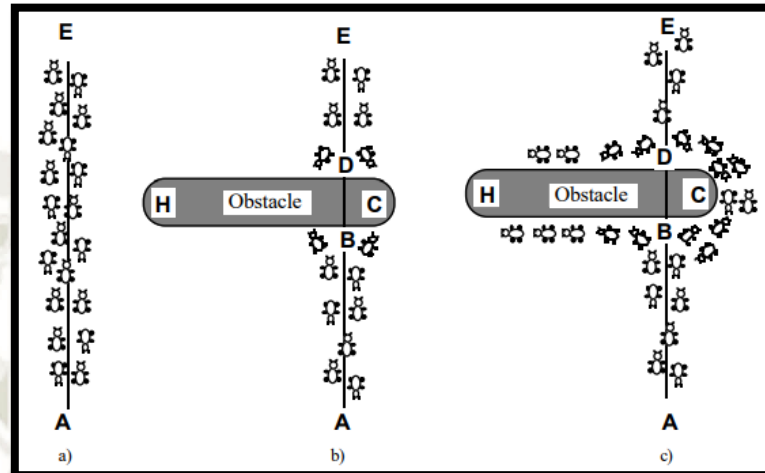


Figura 98. Comportamiento de las hormigas ante un obstáculo

Fuente: Laporte (1996)

Como se observa en el apartado (a) de la figura, sería un caso en el cual las hormigas recorren la ruta de manera natural, en vista de que no existe la presencia de obstáculos, así que los niveles de feromonas se mantienen de manera regular en el trayecto.

En el apartado (b) se muestra la presencia de un obstáculo nuevo, y ante el mismo, se puede considerar que las hormigas iniciarán el recorrido al mismo tiempo del trayecto D-B y viceversa.

En el apartado (c) se muestra cómo el número de hormigas que rodean el obstáculo por el lado C del mismo es claramente mayor al número de hormigas que lo rodean por el lado H, esto debido a que el rastro de feromonas es mayor por C, teniendo en cuenta que al ser la distancia de D-B menor por el lado C el tiempo que se requiere para recorrerlo

es menor que por H, lo que provoca que mayor número de hormigas rodeen al obstáculo por C, incrementando el rastro de feromonas (Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1996).

Para poder llegar a un mejor entendimiento del ejemplo previamente mostrado, será explicado de una manera numérica. En la **Figura 99**, se muestra un sistema de hormigas artificiales simple, que muestra dos trayectorias distintas al igual que el anterior ejemplo.

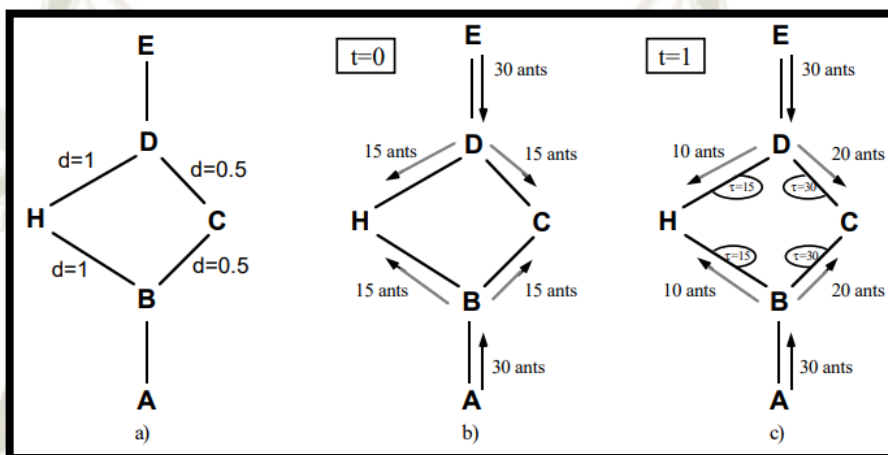


Figura 99. Comportamiento de las hormigas artificiales ante un obstáculo

Fuente: Dorigo (1996)

En el apartado (a) de la figura, se muestra la distancia entre el punto A y el punto E, cruzando dos caminos distintos, siendo el que atraviesa por H, el doble de largo que el camino que atraviesa el punto C.

En el apartado (b), se introducen 30 hormigas artificiales al sistema, las cuales en un tiempo $t = 0$, llegan a los puntos D y B, y dividen su trayectoria en igual cantidad (15 hormigas por H y otras 15 por C).

En el apartado (c), se puede apreciar que para $t=1$, teniendo en cuenta que la distancia a recorrer por el punto H es el doble que la que se recorrerá por el punto C, el número de hormigas que atraviesan la segunda ruta es el doble de las que recorren la primera.

Es necesario tener en cuenta que además de simplemente recorrer las distintas trayectorias, cada hormiga deja un rastro de feromonas para las siguientes hormigas a recorrer la ruta, y como la segunda trayectoria es recorrida por un mayor número de hormigas debido a que éstas realizan el recorrido en un tiempo considerablemente menor, el rastro de feromonas irá incrementando gradualmente al incrementar también el número de hormigas que la transitan, mientras que el de la otra ruta irá disminuyendo, lo que concluirá en que todas las hormigas opten por transitar ésta ruta, optimizando así su recorrido al adoptar la ruta más corta desde su colonia hasta la fuente de alimento (Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1996).

La idea central de éste algoritmo es realizar iteraciones de trayectorias de las hormigas artificiales, de manera que cada nueva iteración se base en el mejor rastro de feromonas dejado por iteraciones previas, optimizando así las soluciones a cada iteración para poder obtener los parámetros PID que nos brinden una mejor respuesta.

4.3.2. PARÁMETROS Y CONSTRUCCIÓN DEL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

Para poder determinar cómo se realizará la construcción del algoritmo, haremos mención del problema del vendedor viajero, que busca determinar la distancia más cercana entre una serie de ciudades, dadas las distancias entre ellas, recorriendo todas ellas y volviendo al punto de origen.

De ésta manera, podremos estimar en primer lugar, la distancia d_{ij} , que será la euclídea (Pitágoras) que representa el camino que une a las ciudades i y j .

$$d_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2}$$

Podemos definir igualmente, a la población de hormigas que se encuentran en el pueblo i , en el tiempo t como:

$$b_i(t) (i = 1, 2, \dots, n)$$

Y por consiguiente, al número total de hormigas en el sistema como:

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t)$$

En la creación y formulación del algoritmo, debemos establecer el comportamiento de las hormigas que crearemos, asignando las siguientes características:

- Cada hormiga puede elegir a qué pueblo ir, tomando en cuenta la probabilidad de función de la distancia, así como la cantidad de rastro de feromona presente en la ruta.

- Para poder forzar el uso de “tours legales” (esto se refiere a que no se pueden repetir los pueblos previamente visitados en el mismo tour), deshabilitaremos las visitas a pueblos repetidos, hasta que el tour se dé por completado. Esto se controlará mediante una lista denominada *tabú*.
- Cada hormiga dejará un rastro de feromonas al realizar un determinado tour.

Tomando éstas consideraciones en cuenta, podemos establecer a $\tau_{ij}(t)$ como la intensidad del rastro de feromonas dejado por las hormigas entre i y j , en un tiempo t , y debemos resaltar que t es el tiempo en el cual se escoge el pueblo en el cuál se estará en el tiempo $t + 1$.

De ésta manera, podemos denominar *iteración* al m movimientos que realizan las m hormigas entre los tiempos t y $t+1$.

n tours → 1 ciclo → cada hormiga completa 1 recorrido

Cada vez que se completa 1 ciclo, será necesario actualizar la intensidad del rastro de feromonas que dejan las hormigas a través del tour realizado.

$$\tau_{ij}(t + n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}$$

Se define ρ como el coeficiente de evaporación del rastro de feromonas, tal es que podemos definir a $(1-\rho)$ como la tasa de evaporación del rastro de feromonas en un tiempo comprendido entre t y $(t+n)$.

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$$

Se define a $\Delta\tau_{ij}^k$ como la cantidad por unidad de distancia marcada por la feromona entre el camino (i,j) por la hormiga **k** entre los tiempos **t** y (**t+n**), y se determina en base a lo siguiente:

$$\Delta\tau_{ij}^k \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si la hormiga } k \text{ usa el camino } (i,j) \text{ en el tour entre } t \text{ y } (t+n) \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Donde:

Q: constante relacionada a la cantidad de rastro dejado por las hormigas.

L_k : Longitud del tour recorrido por la hormiga **k**.

Como fue previamente explicado, se debe utilizar una herramienta que nos permita restringir los recorridos de las hormigas artificiales, de manera que éstas no recorran las mismas ciudades en el tour completado, es por ello que se crea y asigna una estructura denominada *lista tabú*.

Ésta estructura, guarda los pueblos que ya fueron previamente visitados por las hormigas hasta un tiempo **t** y prohíbe a las mismas volver a visitarlos, hasta que las **n** iteraciones (1 tour) hayan sido completadas.

Es mediante ésta herramienta, que se calcula la distancia o solución, que la hormiga recorrió, ya que se almacena en ella la ruta por la que la hormiga realizó su recorrido. Tras registrar éste recorrido, la lista tabú se limpia y es entonces que la hormiga está preparada para realizar un nuevo recorrido (Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1996).

Se define a **tabu_k** como un vector que crece de manera dinámica, conteniendo así a la lista tabú de la hormiga **k**. Para poder llenar el vector **tabu_k**, haremos uso de **tabu_k(s)**. El

elemento s será la lista de las ciudades que fueron recorridas por la hormiga k durante el tour realizado.

A diferencia de las hormigas reales, las hormigas artificiales contarán con visibilidad, parámetro que junto con el rastro de feromonas determinarán la probabilidad con la cual las hormigas tomarán decisiones para realizar su recorrido. A diferencia del rastro de feromonas, éste parámetro no cambiará en el tiempo, permanecerá siempre constante.

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

Es así, que se puede definir a la probabilidad de transición entre los nodos i y j para k hormigas como:

$$P_{ij}^k(t) \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [n_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in perm_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [n_{ik}]^\beta}; & \text{si } j \in perm_k \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Donde:

$$Perm_k = \{N - tabu_k\}$$

α : Importancia relativa del rastro de feromonas, $\alpha \geq 0$.

β : Importancia relativa de la visibilidad de las hormigas, $\beta \geq 0$.

La probabilidad de transición es un intercambio entre visibilidad (parámetro que define qué pueblos escoger, aplicando un criterio heurístico) y la intensidad de feromonas presentes en el tiempo t (determina el tráfico de hormigas en (i,j) que es altamente deseable, aplicando de ésta manera el proceso auto catalítico) (Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1996).

4.3.3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS PID MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

Tras conocer el funcionamiento del algoritmo de colonia de hormigas, podremos realizar el procedimiento mediante el cual se calculen los parámetros PID optimizados mediante el mismo.

Para ello, será necesario implementar a su vez, una herramienta que nos permita comparar los resultados obtenidos a partir de las soluciones que plantea el algoritmo de colonia de hormigas. Para ello, usaremos una función de costo, que evaluará las respuestas obtenidas por el algoritmo, hasta obtener la mejor respuesta, que será la que implique el menor costo computacional.

Para lograr el propósito de realizar una retroalimentación del algoritmo comparando los costos obtenidos a partir de las rutas, hasta poder encontrar la más óptima, será necesario entrelazar los bloques correspondientes a cada proceso, como se muestra en la

Figura 100.

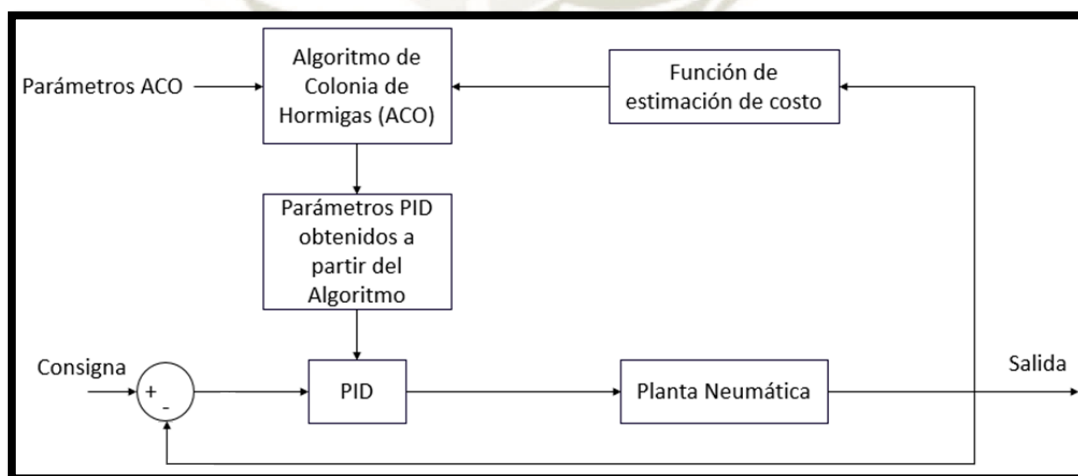


Figura 100. Diagrama de bloques de aplicación de algoritmo ACO a control PID

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura, una vez configurados los parámetros del ACO en el respectivo bloque, el cálculo de parámetros PID se realizará a partir de lo previamente configurado, lo que determinará la respuesta del algoritmo, y generará los parámetros del controlador PID, que ejercerán la acción de control sobre la planta neumática. Posteriormente, la respuesta de la planta ante los distintos valores obtenidos a partir del algoritmo será medida a partir de la función de estimación de costo, que determinará qué solución es la más óptima.

Para resolver éste tipo de circunstancia (obtener el valor de los parámetros K_p , K_i y K_d), las hormigas artificiales deben recorrer 3 distintos pueblos entre el inicio y el fin de su recorrido, creando así un vector con los 3 valores a hallar, como se muestra en la **Figura 101** (Ünal, Ak, Topuz, & Erdal, 2013).

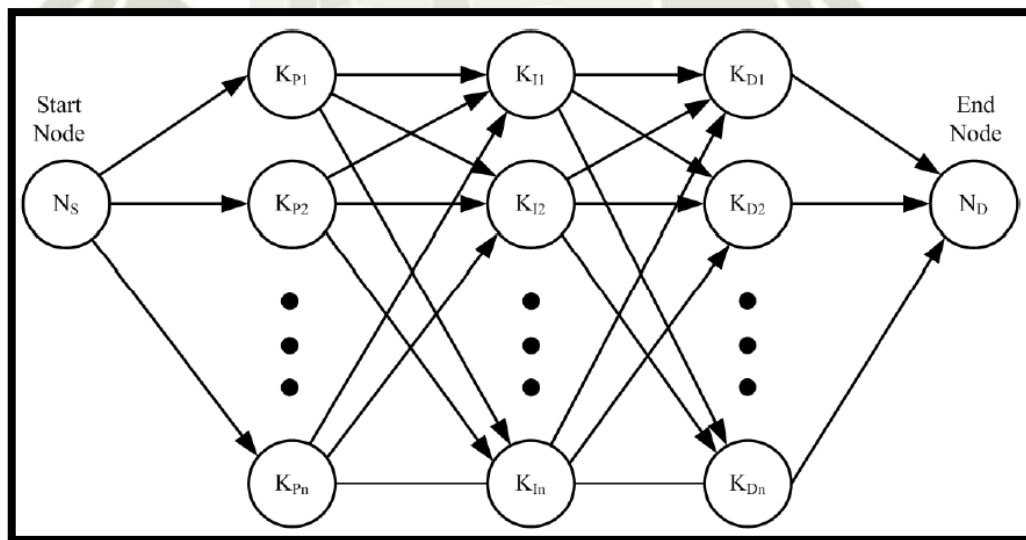


Figura 101. Representación gráfica de ACO para obtención de parámetros PID

Fuente: Ünal (2013)

Para poder establecer una relación entre los diversos parámetros propios del ACO, y la función de costo que determinará la solución más óptima, se tiene:

$$\tau(k)_{ij} = \tau(k-1)_{ij} + \frac{0.01 \theta}{J}$$

Donde:

$\tau(k)_{ij}$: Valor del rastro de feromona entre i y j en la iteración k.

θ : Coeficiente general de actualización de feromona

J: Función de costo para el tour realizado por la hormiga

Como es sabido, el rastro que tour que contenga un mayor rastro de feromonas será el más óptimo, por lo que podemos considerar al mayor rastro de feromonas, como el que tenga el menor de costo posible, como se muestra a continuación:

$$\tau(k)_{ij}^{mejor} = \tau(k)_{ij}^{mejor} + \frac{\theta}{J_{mejor}}$$

Al igual que en la ecuación previamente descrita, donde el rastro incrementa con las iteraciones realizadas, para el peor rastro de feromonas determinado, se obtendrá el mayor costo, por lo que éste rastro tenderá a desaparecer en el tiempo, como se describe a continuación:

$$\tau(k)_{ij}^{peor} = \tau(k)_{ij}^{peor} - \frac{0.3 \theta}{J_{peor}}$$

Finalmente, tras entender cómo a medida que se incrementan las iteraciones en el tiempo, mientras el camino más óptimo tiende a incrementar su rastro de feromonas, y el

menos óptimo tiende a desaparecer, podemos interpretarlo mediante la siguiente ecuación:

$$\tau(k)_{ij} = \tau(k)_{ij}^{\lambda} + [\tau(k)_{ij}^{mejor} + \tau(k)_{ij}^{peor}]$$

Donde:

λ : Constante de evaporación de la feromona

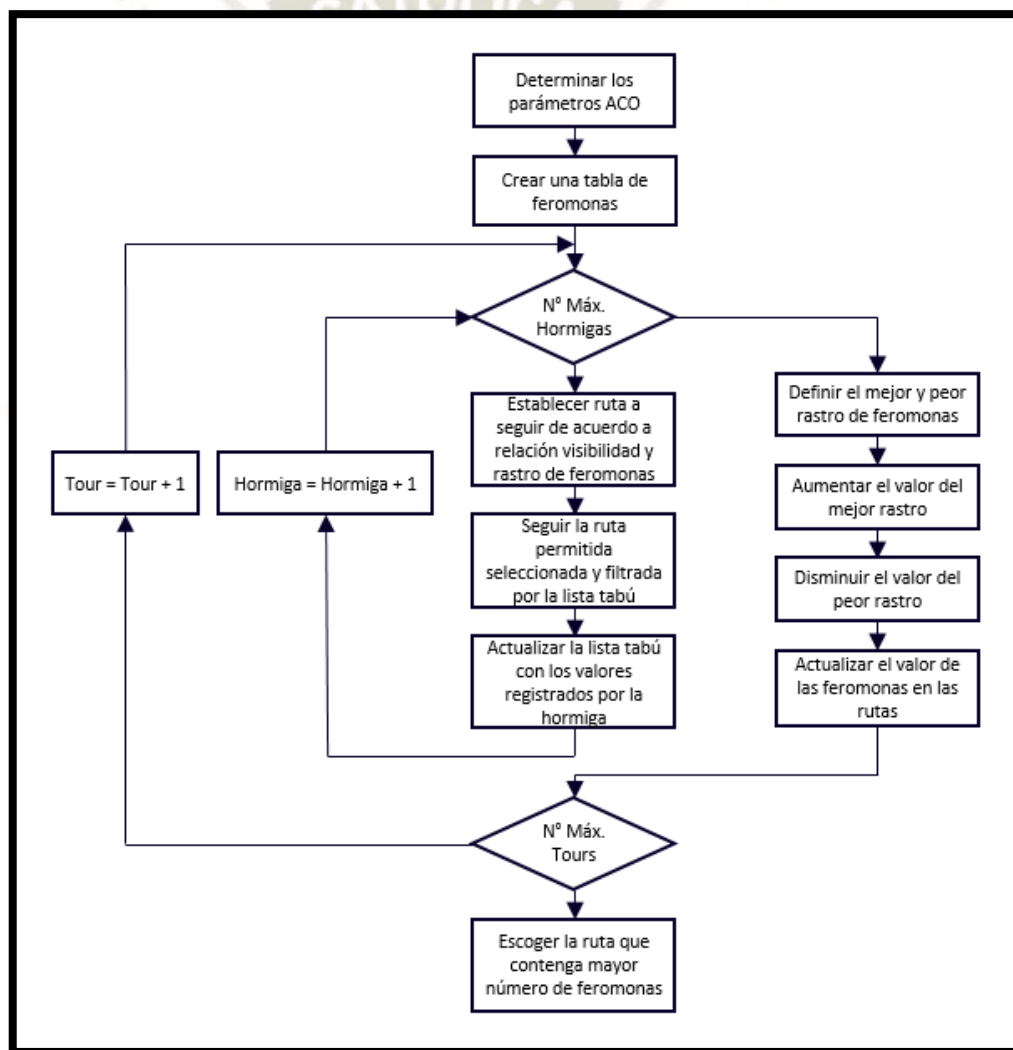


Figura 102. Diagrama de flujo de funcionamiento de ACO para obtener parámetros PID

Fuente: Adaptado de Ünal, Ak, Topuz, & Erdal (2013)

En el diagrama de flujo que se muestra en la **Figura 102**, se detalla el funcionamiento del algoritmo, que en una primera instancia, limita el número de hormigas como el de tours (previamente definidos por el usuario, así como el número de nodos). Para la acción de cada hormiga, además de realizar los tours de acuerdo a las distintas funciones estudiadas, actualiza el rastro de feromonas para cada ruta posible. En paralelo al trabajo de las hormigas, la función de costo recaba todos los datos obtenidos por las hormigas, los registra y clasifica, determinando en cada iteración el mejor tour obtenido hasta el momento, y guardándolo hasta que se haya completado el máximo número de tours, obteniendo así la mejor solución posible.

4.3.4. PRUEBA CON VALORES PID HALLADO CON EL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

Nuestro código está compuesto por dos partes, ya que es una interfaz que trabajara tanto con el workspace de Matlab y el entorno de Simulink, el algoritmo de Colonia de hormigas necesita trabajar con funciones de transferencia lineales.

Como se muestra en la **Figura 103**, procedemos a revisar nuestro programa **planta.mdl** donde podemos ver el entorno de simulink, procederemos a cargar nuestra función de transferencia de nuestra planta.

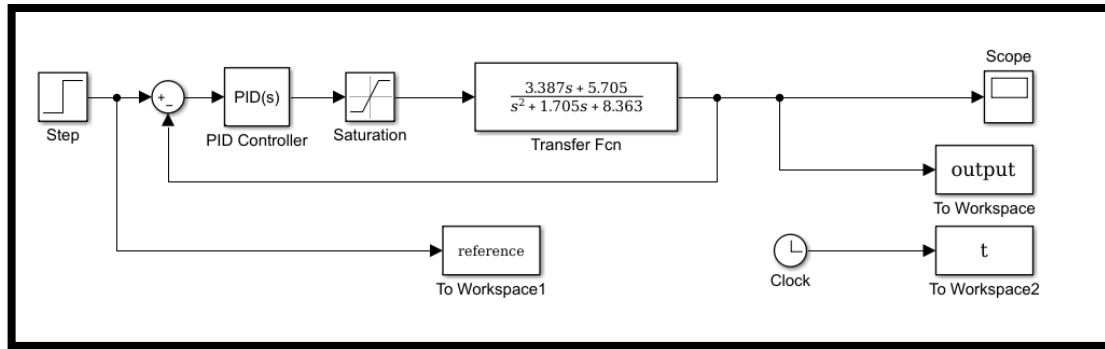


Figura 103. Programa de Simulink planta.mdl, se coloca función de transferencia

Fuente: Elaboración propia

Configuramos para exportar los datos de nuestra entrada escalón del Step al workspace de Matlab, de igual manera con el Clock y la salida output del Scope. Del workspace traeremos los parámetros PID estos valores serán hallados con nuestro programa ACO.m de Matlab.

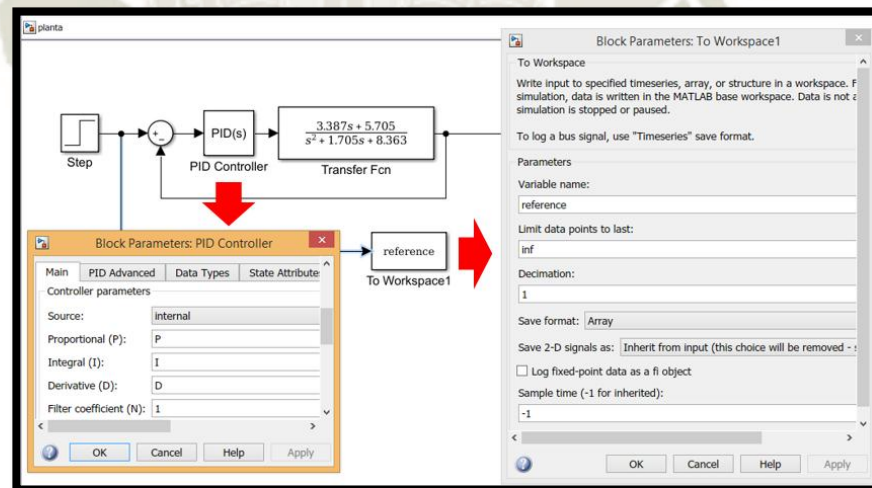


Figura 104. Programa de Simulink planta.mdl, configuración de bloques

Fuente: Elaboración propia

Una vez culminado el programa **ACO.m** de Matlab procedemos a realizar las pruebas correspondientes de compatibilidad con nuestro subprograma **cost_func.m** mostrado en la **Figura 105** que nos permitirá evaluar el costo de nuestro algoritmo.

```

1 %%PROGRAMA ANT COLONY OPTIMIZATION ACO
2
3
4 clear all
5
6 %% Parámetros ACO
7 n_iter=15; %Número de tours
8 NA=5; % Número de hormigas
9 alpha=0.8; % Importancia relativa del rastro de la feromona
10 beta=0.2; % Importancia relativa de la visibilidad de las hormigas
11 roh=0.7; % Constante de evaporación de feromona
12 n_param=3; % Número de parámetros
13 LB=(0.01).*ones(1,27); % Limite inferior
14 UB=10.*ones(1,27); % Limite superior
15 n_node=500; % Cantidad de nodos para cada parámetro
16 cost_best_prev=inf;
17 %% Generación de nodos
18 T=ones(n_node,n_param).*eps; % Matriz de feromonas
19 d=zeros(n_node,n_param); % Cambio de feromona

```

Figura 105. Código de Matlab ACO.m, código principal

Fuente: Elaboración propia

```

1 %%Función costo para el programa ACO
2 function cost_value=cost_func(k,plotfig)
3
4 assignin('base', 'P',k(1))
5 assignin('base', 'I',k(2))
6 assignin('base', 'D',k(3))
7
8 sim('planta.mdl')
9
10 err=reference-output;
11 [n,~]=size(err);
12 cost_value=0;
13 %%Bucle para evaluación de costo
14 for i=1:n
15 % cost_value=cost_value+(err(i))^2; % ISE
16 % cost_value=cost_value+abs(err(i)); % IAE
17 % cost_value=cost_value+t(i)*abs(err(i)); % ITAE
18 % cost_value=cost_value+t(i)*err(i)^2; % MSE

```

Figura 106. Código de Matlab cost_func.m, código de costo ITAE

Fuente: Elaboración propia

Una vez culminado la revisión procedemos a correr el programa **ACO.m** que nos permitirá hallar los valores de K_p , K_i y K_d , para poder trabajar en nuestra planta transformamos los datos a K_p , T_i y T_d como se muestra en la **Figura 107**.

```

Command Window
Número de hormiga: 5
Costo de la hormiga: 163.4036
Parámetros PID obtenidos
-----Kp-----Ki-----Kd---
Parámetros de la hormiga      : 3.09      8.46      0.16
Tour: 15
-----
Parámetros PID obtenidos
-----Kp-----Ti-----Td---
Parámetros PID de la hormiga: 3.09      0.32362  0.05178
fx >> |
    
```

Figura 107. Resultados obtenidos para los parámetros PID mediante el programa ACO.m

Fuente: Elaboración propia

El programa también nos permitirá visualizar dos Step como se visualiza en la **Figura 108**, el primer step llamado Figure 1 nos muestra la comparación del costo ITAE con cada tour realizado por las hormigas seleccionadas en el algoritmo. En el segundo step nos muestra la respuesta del compensador PID con nuestra función de transferencia.

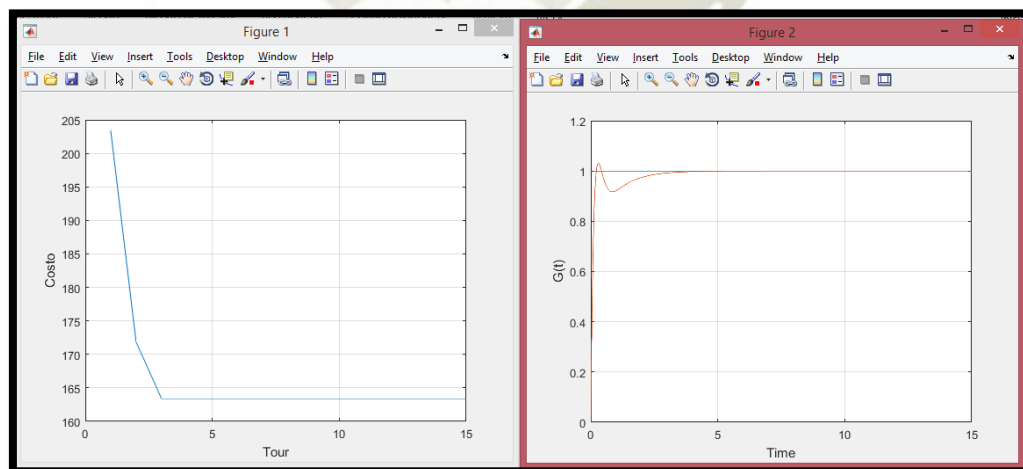


Figura 108. Figuras 1 y 2 del programa ACO.m, resultados de ACO

Fuente: Elaboración propia

Para corroborar que nuestro código **ACO.m** está funcionando de manera correcta podemos comparar la Figure 2 con el Scope mostrado por nuestro programa de Simulink donde ambas gráficas deben mostrar el mismo resultado.

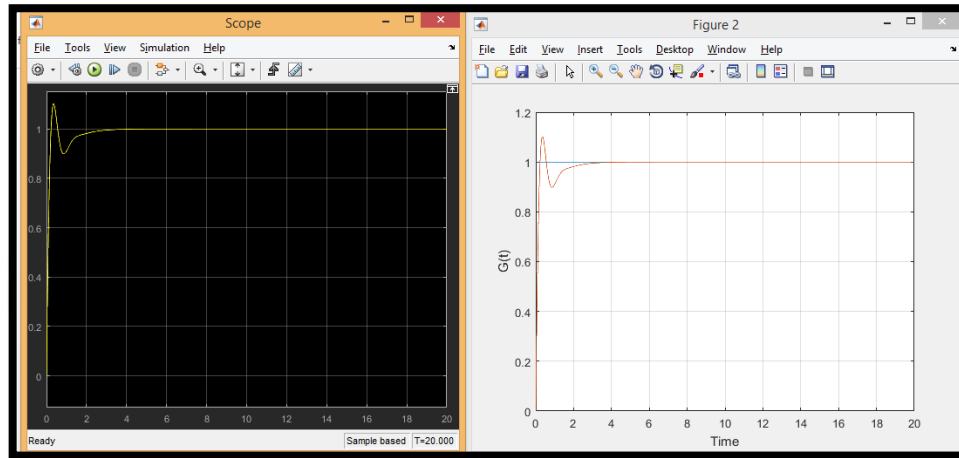


Figura 109. Comparación de resultados Scope de Simulink y Figure 2 de Matlab

Fuente: Elaboración propia

Una vez tengamos las pruebas realizadas por cada método mencionado, procedemos a comparar los resultados con nuestro programa de Matlab llamado **Comparacion.m** como podemos ver a continuación en la **Figura 110**.

```

prueba.m x APSO.m x APSO2_costo.m x ant_cost.m x Principal_ACO_C.m x ant.m x Comparacion.m x ACO.m x cost_func.m x
1 %Programa de visualización de controladores PID
2 clear all;
3 close all;
4 clc;
5 %Funcion de transferencia
6 num=[3.387 5.705];
7 den=[1 1.705 8.363];
8 G=tf(num,den)
9 %Parámetros PID hallados con PID Compact
10 kpt=1.177;
11 kit=2.2870;
12 kdt=0.2295;
13 nt=[kdt kpt kit];
14 dk=[0.7 0];
15 gc=tf(nt,dk);
16 gd=series(G,gc);
17

```

Figura 110. Programa Comparacion.m de Matlab

Fuente: Elaboración propia

Para acceder a los códigos de programación de Matlab completos, referirse al **ANEXO 1, 2 y 3**.

En la siguiente **Figura 111** podemos observar como el programa Comparacion.m nos muestra las tres curvas correspondientes a cada uno de los controladores PID.

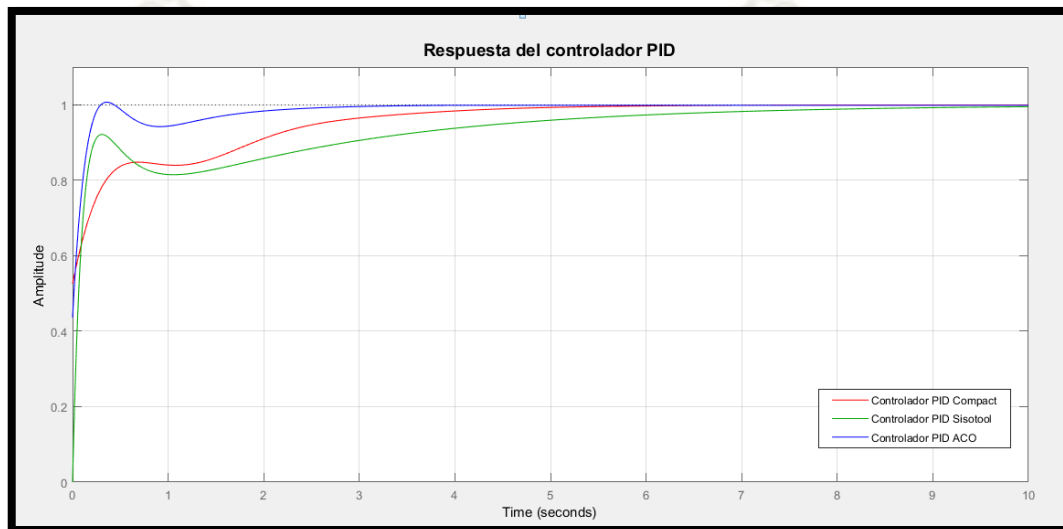


Figura 111. Gráfica de comparación de respuesta del controlador PID con programa Comparacion.m

Fuente: Elaboración propia

De igual manera procedemos a corroborar que nuestras gráficas de los controladores correspondientes sean correctas con nuestro programa de Simulink **Tesis.slx** como se muestra en la **Figura 112**.

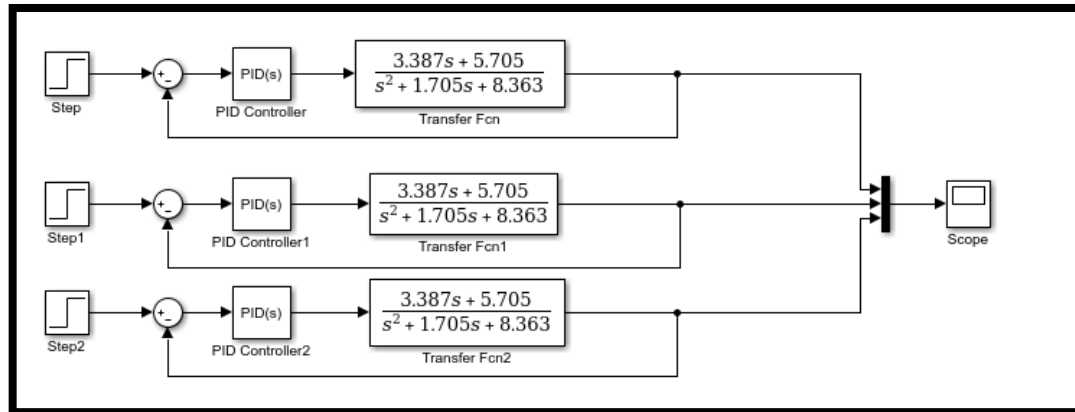


Figura 112. Programa de corroboración Tesis.slx, Diagrama de bloques

Fuente: Elaboración propia

Probamos el programa de corroboración **Tesis.slx** de Simulink, el resultado es el Scope mostrado en la **Figura 113**, la cual debe ser igual a la gráfica de comparación de Matlab.

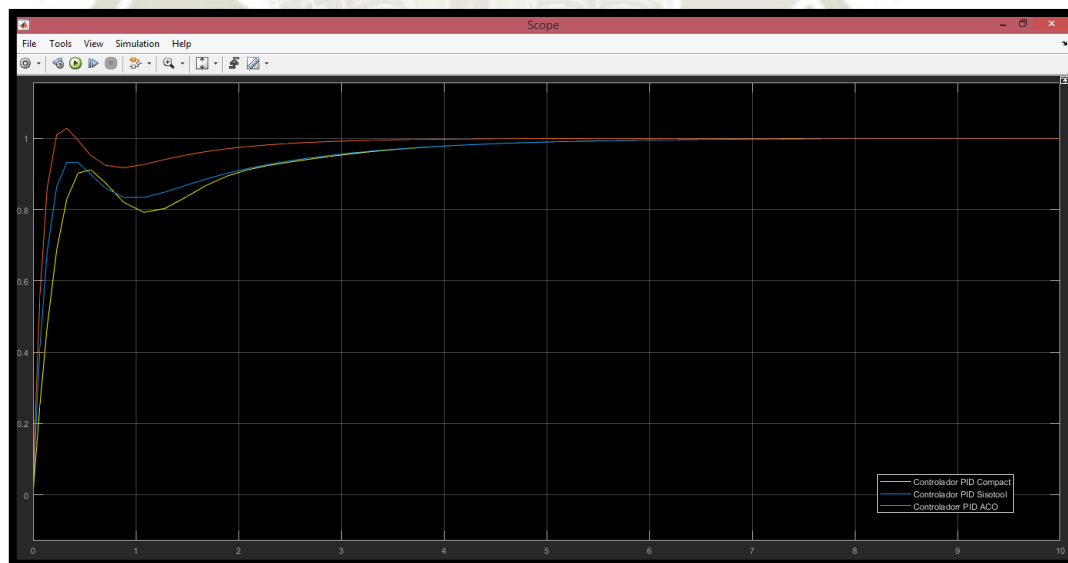


Figura 113. Programa de corroboración Tesis.slx, Diagrama de bloques

Fuente: Elaboración propia

Para acceder a los bloques de programa de Simulink, referirse al **ANEXO 4**.

Una vez obtenidas las respuestas transitorias de nuestro sistema de control nos muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario, es común especificar lo siguiente:

1. Sobreelongación **M_p**
2. Tiempo de retardo **T_d**
3. Tiempo de subida **T_r**
4. Tiempo pico **T_p**
5. Tiempo de asentamiento **T_s**

Estas especificaciones se definen y se muestran en la **Figura 114**.

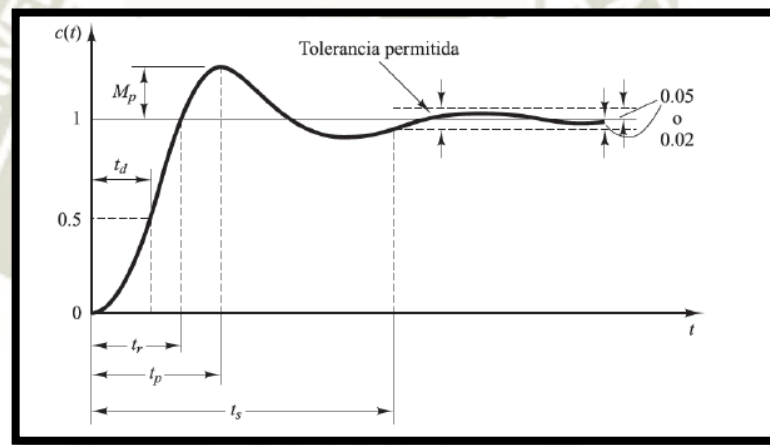


Figura 114. Curva de respuesta al escalón unitario

Fuente: Ogata (2010)

En la **Tabla 3** se muestra los resultados para cada una de las especificaciones de las respuestas obtenidas por nuestros controladores PID.

1. **Sobreelongación máxima (porcentaje), M_p** : la máxima Sobreelongación es el máximo valor del pico de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad. Si el valor

final en estado estacionario de la respuesta es diferente de la unidad, es frecuente utilizar el porcentaje de sobreelongación máxima. Definido por:

$$M_p = \frac{C(T_p) - C(\infty)}{C(\infty)} \times 100\%$$

La cantidad de sobreelongación máxima (en porcentaje) indica de manera directa la estabilidad relativa del sistema (Ogata, 2010).

2. **Tiempo de retardo Td:** el tiempo de retardo es el tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final (Ogata, 2010).
3. **Tiempo de subida, Tr:** Según Ogata (2010) el tiempo de subida es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final. Para sistemas subamortiguados de segundo orden, por lo general se usa el tiempo de subida de 0 a 100%. Para sistemas sobreamortiguados, suele usarse el tiempo de levantamiento de 10 a 90%. Definido por:

$$Tr = \frac{1}{W_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \times \arctan\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta}\right)$$

4. **Tiempo pico, Tp:** Según Ogata (2010), el tiempo pico es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobreelongación. Definido por:

$$Tp = \frac{\pi}{W_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

5. **Tiempo de asentamiento, Ts:** Según Ogata (2010), el tiempo de asentamiento es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del

valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 o 5%). El tiempo de asentamiento se relaciona con la mayor constante de tiempo del sistema de control. Los objetivos del diseño del sistema en cuestión determinan qué criterio de error en porcentaje utilizar.

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad \text{criterio del 2\%}$$

Tabla 3. Comparación de especificaciones de los controladores ideales PID utilizados

Fuente: Elaboración propia

Controlador	Mp	Td	Tr	Tp	Ts
PID Compact	0	0.189 s	6.1 s	0.494 s	7.16 s
PID Sisotool	0	0.153 s	6.7 s	0.354 s	8.62 s
ACO PID	5.10%	0.108 s	0.302 s	0.453 s	3.15 s

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para los resultados obtenidos una parte fundamental es la función de costo o índices de desempeño que nos permite evaluar el desempeño de nuestro sistema y elegir el que minimice o tenga el valor menor en dicho índice.

Los índices de desempeño se calculan con base a un tiempo definido de forma arbitraria T, de forma que el sistema alcance su estado estacionario, nos conviene elegir T como tiempo de asentamiento o tiempo requerido para que la curva alcance un rango alrededor del valor final especificado por el valor final (T_s) (Quispe Ccachuco, 2019).

Los índices de desempeño se obtienen en función del error, definido por la diferencia entre la referencia del sistema y la salida del sistema, como se muestra en la siguiente ecuación (Trujillo, 2018).

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t)$$

IAE: El IAE o integral del valor absoluto del error, que se define como:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

Solamente va acumulando el error presente en el transitorio sin añadir peso a algún error, no cancela los cambios del signo, da una respuesta bien amortiguada y con muy poco sobrepaso.

ISE: El ISE o integral del error cuadrático que se define como se muestra a continuación (Trujillo, 2018).

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

Dará siempre un resultado positivo, esto debido a que la función de error está al cuadrado, lo que hace que se penalicen valores tanto positivos como negativos. Este criterio da mayor peso a errores grandes, pero da muy poco peso a errores pequeños. Es fácil de calcular tanto analíticamente como computacionalmente (Trujillo, 2018).

ITAE: El ITAE o integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error que se define como:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e| dt$$

Al ponderar el valor absoluto del error con el tiempo, los errores grandes presentes al inicio pasan desapercibidos ya que se multiplican con tiempos muy pequeños, lo que nos indica que da poco peso a los errores grandes y un mayor peso a los errores pequeños. Genera sobrepaso y oscilaciones más pequeñas que el IAE e ISE (Trujillo, 2018).

5.1. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DE PID COMPACT DEL TIA PORTAL

Como primer paso analizamos nuestro programa de Simulink **ITAE.slx** la señal obtenida de nuestra función de transferencia y cómo actúa el control hallado por cualquiera de los 3 métodos utilizados, como observamos en la **Figura 115**.

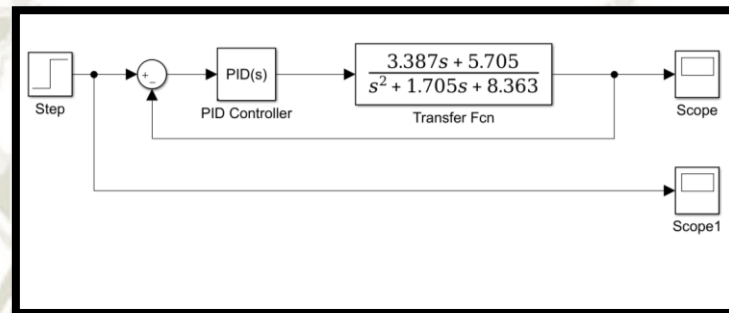


Figura 115. Programa ITAE.slx de Simulink, permite exportar los datos de las respuestas

Fuente: Elaboración propia

Analizando el resultado de nuestro compensador PID hallado con el PID compact, primero exportaremos las gráficas del Simulink hasta el Workspace de Matlab para ello se modificará los parámetros del Scope que nos permitirá exportar los datos del Scope en una tabla Excel.

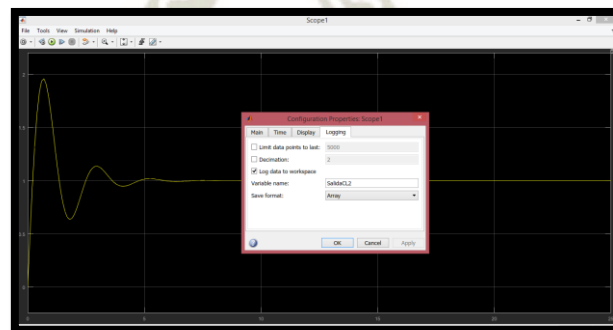


Figura 116. Configuración para exportar datos a Workspace desde Simulink

Fuente: Elaboración propia

Una vez configurado el Scope procedemos a llevar los datos de las gráficas al Workspace, como se muestra en la siguiente **Figura 117**, tendremos los datos en un Excel donde la primera columna es el tiempo de muestreo y la segunda es el resultado en presión (Bares).

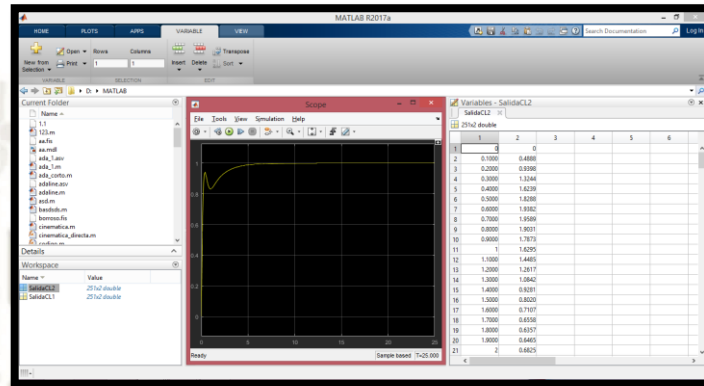


Figura 117. Exportación de datos al Workspace, Matlab y Excel

Fuente: Elaboración propia

Una vez culminado la exportación de datos procedemos a crear nuestra tabla en Excel que nos permitirá hallar los valores de IAE, ISE e ITAE correspondientes al compensador hallado del PID Compact del TIA Portal como se muestra en la **Figura 118**.

Set Point				
1.00				
PID Compact		$\sum_0^N Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^N (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^N t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $
Tiempo(s)	Presión(Bar)	IAE	ISE	ITAE
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00
0.10	0.3523	0.65	0.42	0.06
0.20	0.6079	0.39	0.15	0.08
0.30	0.7701	0.23	0.05	0.07
0.40	0.8548	0.15	0.02	0.06
0.50	0.8830	0.12	0.01	0.06
0.60	0.8756	0.12	0.02	0.07
0.70	0.8505	0.15	0.02	0.10
0.80	0.8208	0.18	0.03	0.14
0.90	0.7953	0.20	0.04	0.18
1.00	0.7783	0.22	0.05	0.22
1.10	0.7711	0.23	0.05	0.25
1.20	0.7728	0.23	0.05	0.27
1.30	0.7816	0.22	0.05	0.28
1.40	0.7950	0.21	0.04	0.29

Figura 118. Índice de desempeño con PID Compact

Fuente: Elaboración propia

5.2. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DE SISOTOOL DE MATLAB

De la misma manera ahora procedemos a analizar el compensador PID hallado con el Sisotool de Matlab, como primer paso exportamos los datos del Simulink hacia el Workspace.

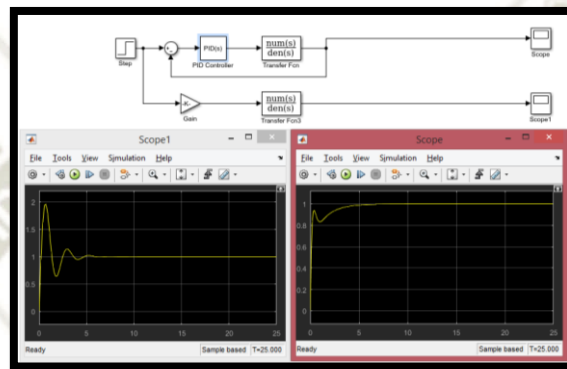


Figura 119. Programa de Simulink con valores de PID Sisotool

Fuente: Elaboración propia

Trasladamos nuestros datos a la tabla de Excel que nos permitirá hallar los valores de IAE, ISE e ITAE de nuestro PID Sisotool como se muestra en la **Figura 120**.

Set Point				
1.00				
PID SISOTOOL		$\sum_0^n Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^n (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^n t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $
Tiempo(s)	Presión(Bar)	IAE	ISE	ITAE
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00
0.10	0.5416	0.46	0.21	0.05
0.20	0.7836	0.22	0.05	0.04
0.30	0.8679	0.13	0.02	0.04
0.40	0.8763	0.12	0.02	0.05
0.50	0.8538	0.15	0.02	0.07
0.60	0.8235	0.18	0.03	0.11
0.70	0.7959	0.20	0.04	0.14
0.80	0.7752	0.22	0.05	0.18
0.90	0.7617	0.24	0.06	0.21
1.00	0.7546	0.25	0.06	0.25
1.10	0.7525	0.25	0.06	0.27
1.20	0.7541	0.25	0.06	0.30
1.30	0.7582	0.24	0.06	0.31
1.40	0.7639	0.24	0.06	0.33
1.50	0.7700	0.23	0.06	0.34

Figura 120. Índices de desempeño de valores PID de Sisotool

Fuente: Elaboración propia

5.3. COMPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE DESEMPEÑO POR EL MÉTODO DEL ALGORITMO DE HORMIGAS (ACO)

De igual forma evaluamos el compensador hallado por el algoritmo de colonia de hormigas (ACO), como primer paso exportamos los datos del Simulink al Workspace.

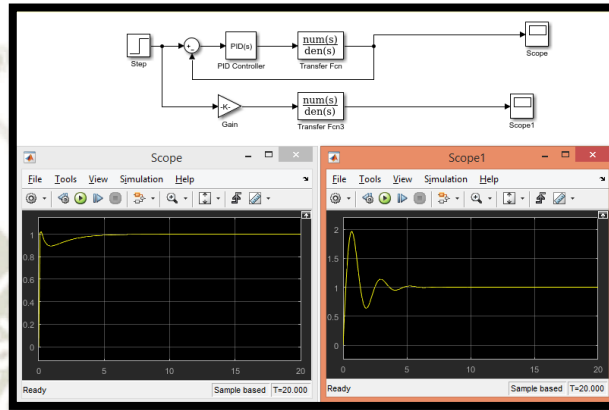


Figura 121. Programa de Simulink con valores de PID de ACO

Fuente: Elaboración propia

Trasladamos nuestros datos a la tabla de Excel que nos permitirá hallar los valores de IAE, ISE e ITAE de nuestro PID Sisotool como se muestra en la **Figura 122**.

Para acceder a las tablas de datos de índices de desempeño, referirse al **ANEXO 6**.

Set Point					
1.0000					
PID ACO		$\sum_0^n Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^n (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^n t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	
Tiempo(s)	Presión(Bar)	IAE	ISE	ITAE	
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00	
0.10	0.5847	0.42	0.17	0.04	
0.20	0.9359	0.06	0.00	0.01	
0.30	1.0825	0.08	0.01	0.02	
0.40	1.0946	0.09	0.01	0.04	
0.50	1.0431	0.04	0.00	0.02	
0.60	0.9790	0.02	0.00	0.01	
0.70	0.9301	0.07	0.00	0.05	
0.80	0.9049	0.10	0.01	0.08	
0.90	0.9007	0.10	0.01	0.09	
1.00	0.9099	0.09	0.01	0.09	
1.10	0.9250	0.07	0.01	0.08	
1.20	0.9404	0.06	0.00	0.07	
1.30	0.9531	0.05	0.00	0.06	

Figura 122. Índices de desempeño de valores PID ACO

Fuente: Elaboración propia

Para acceder a las tablas de datos de índices de desempeño, referirse al **ANEXO 6**.

Después de analizar los distintos métodos utilizados para obtener el control más óptimo de la planta de control de presión neumática, podemos definir que el algoritmo de hormigas nos brinda el mejor índice de desempeño IAE, ISE e ITAE.

Tabla 4. Índices de desempeño de valores PID

Fuente: Elaboración propia

Método	IAE	ISE	ITAE
PID Compact	6.93	2.26	9.8
Sisotool Matlab	10.29	2.54	25.73
Algoritmo de hormigas(ACO)	2.57	1.24	1.35

Después de analizar los distintos métodos utilizados para obtener el control más óptimo de la planta, podemos observar los valores de K_p , K_i y K_d por cada controlador hallado.

Tabla 5. Valores K_p , K_i y K_d de los compensadores PID

Fuente: Elaboración propia

Método	K_p	K_i	K_d
PID Compact	1.777	2.287	0.229
Sisotool Matlab	2.22	1.46	0
Algoritmo de hormigas(ACO)	3.09	8.46	0.16

Para poder realizar las pruebas necesitamos hallar los valores T_i y T_d ya que el Tia Portal nos solicita estos datos, como se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Valores K_p , T_i y T_d de los compensadores PID

Fuente: Elaboración propia

Método	K_p	T_i	T_d
PID Compact	1.777	0.777	0.195
Sisotool Matlab	2.22	0.45	0
Algoritmo de hormigas(ACO)	3.09	0.3236	0.0517

Como podemos observar en la **Tabla 6** los resultados obtenidos se muestran en T_i , T_d , para esto hacemos uso de la **Tabla 7** para realizar la conversión de los valores K_i y K_d a T_i y T_d para la prueba experimental.

Tabla 7. Tabla para hallar valores K_p , T_i y T_d .

Fuente: Ogata (2010)

Método	K_p	T_i	T_d
P	0.5 K_p Crítico	--	--
PI	0.45 K_p Crítico	K_p/K_i	--
PID	0.6 K_p Crítico	K_p/K_i	K_d/K_p

5.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA EXPERIMENTAL EN LA PLANTA

Se procedió a probar los valores obtenidos en la planta real. Mediante la herramienta Trace de TIA PORTAL, fue posible graficar las respuestas obtenidas y asignarles parámetros para poder realizar una mejor comparación de los resultados.

5.4.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO PID COMPACT DE TIA PORTAL

Mediante la optimización aplicada por el método de PID Compact de TIA PORTAL, se obtuvo un sobre impulso de 9 %, tiempo de retardo de 0.85 segundos, tiempo de subida de 2.05 segundos, tiempo pico de 3.8 segundos y tiempo de asentamiento de 8 segundos.

En la **Figura 123**, se puede observar la respuesta obtenida por este método

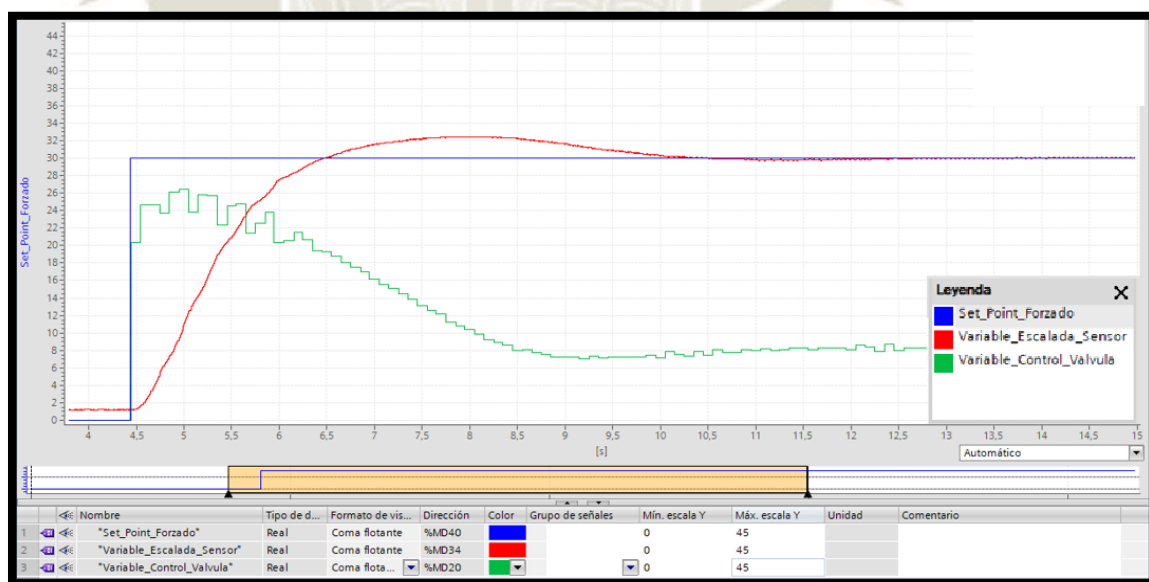


Figura 123. Respuesta real obtenida por método PID Compact

Fuente: Elaboración propia

5.4.2. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO SISOTOOL DE MATLAB

Mediante la optimización aplicada por el método de la herramienta Sisotool de MATLAB, se obtuvo un sobre impulso de 5.5 %, tiempo de retardo de 0.375 segundos, tiempo de subida de 1.49 segundos, tiempo pico de 2.3 segundos y tiempo de asentamiento de 7 segundos.

En la **Figura 124**, se puede observar la respuesta obtenida a partir de éste método de optimización.

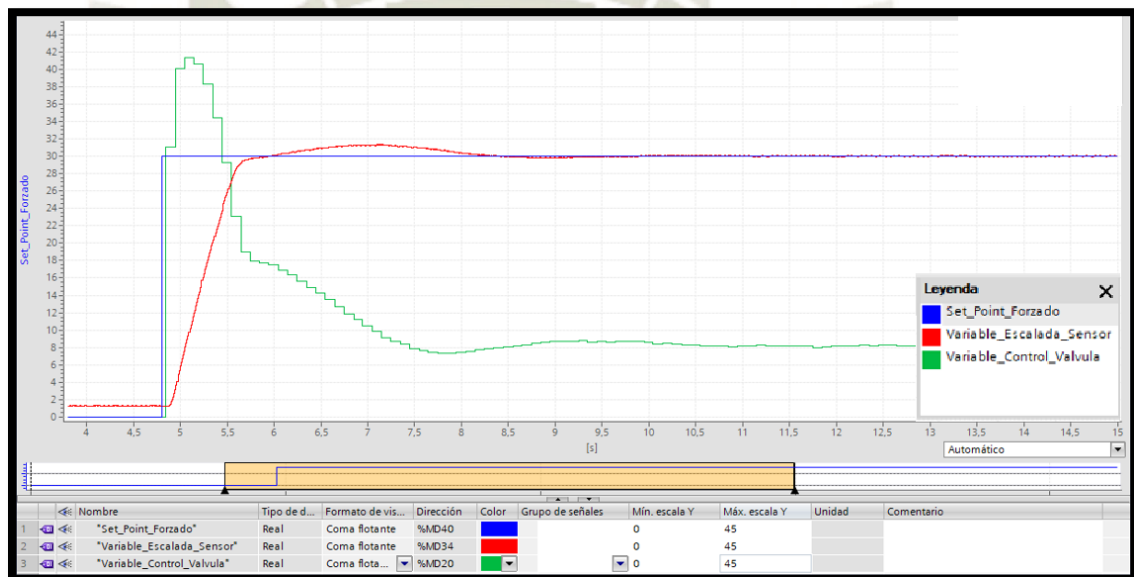


Figura 124. Respuesta real obtenida por herramienta Sisotool de Matlab

Fuente: Elaboración propia

5.4.3. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MÉTODO ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS (ACO)

Mediante la optimización aplicada por el método de algoritmo de colonia de hormigas (ACO), se obtuvo un sobre impulso de 12 %, tiempo de retardo de 0.375 segundos, tiempo de subida de 0.75 segundos, tiempo pico de 1.2 segundos y tiempo de asentamiento de 4 segundos.

En la **Figura 125**, se puede observar la respuesta obtenida a partir de éste método de optimización.

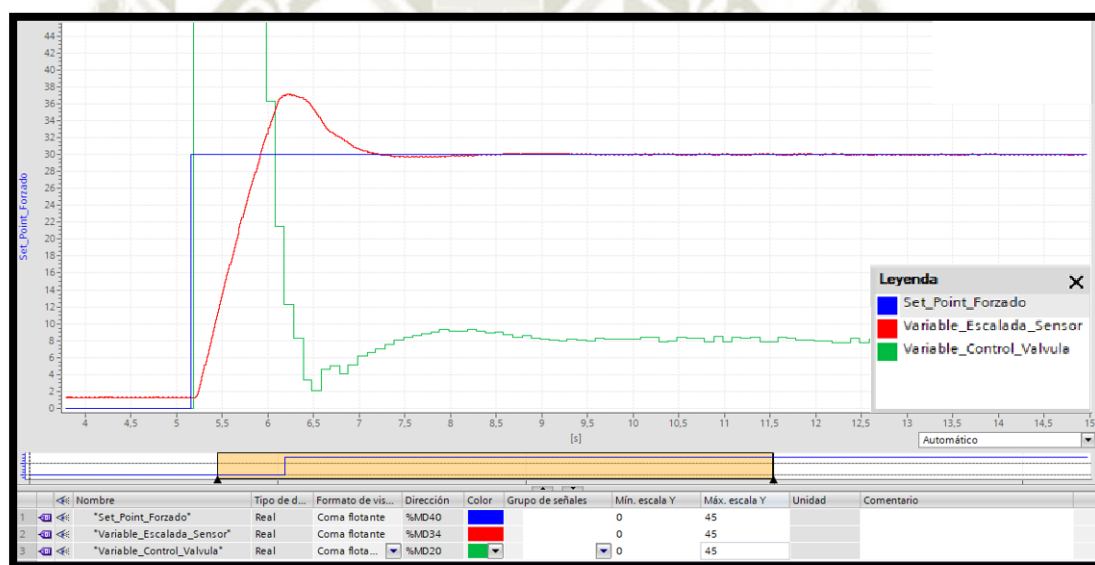


Figura 125. Respuesta real obtenida por el Algoritmo Colonia de Hormigas

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en los distintos gráficos de respuestas obtenidas en todos los casos, que el método de sintonización mediante el algoritmo de colonia de hormigas, es el que brinda una mejor respuesta, alcanzando el valor de consigna en un rango de 40 a 50 % más rápido que los métodos previamente estudiados.

En la **Figura 126**, se muestra la respuesta real obtenida de manera experimental para todos los métodos de sintonización de parámetros PID, previamente mostrados de manera individual, mostrando de forma visual que los valores de K_p , K_i y K_d encontrados con el ACO son los más eficientes como se muestra a continuación.

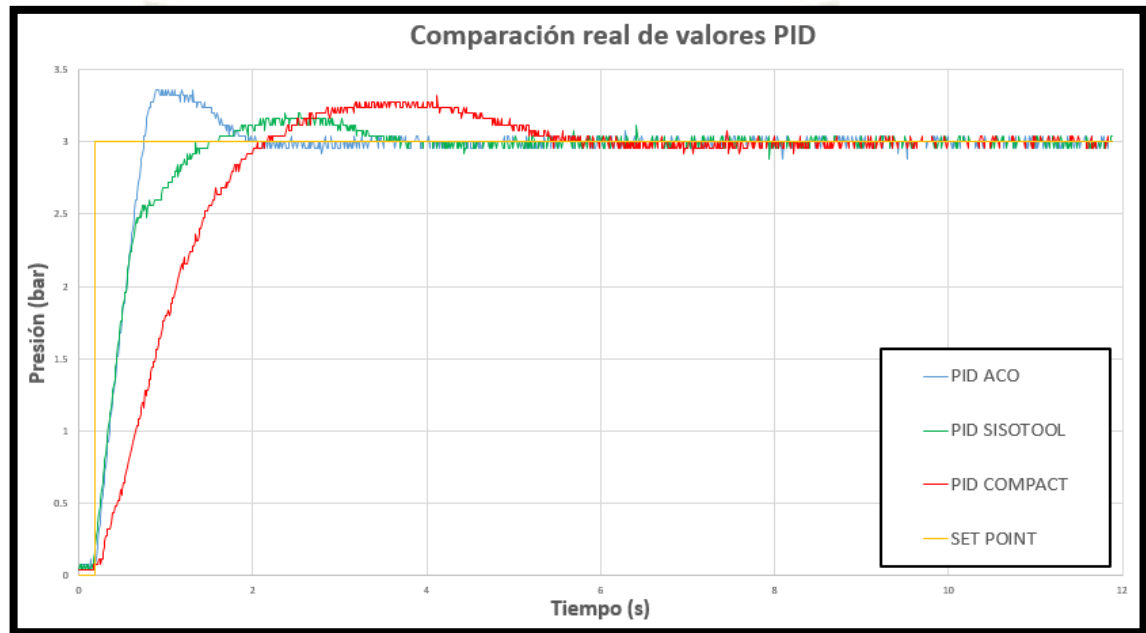


Figura 126. Comparación de las respuestas obtenidas por todos los métodos de sintonización de parámetros

Fuente: Elaboración propia

La **Tabla 8**, muestra los valores reales que caracterizan a los 3 controladores, obtenidos de manera experimental en la planta implementada, y registrados mediante la herramienta Trace de TIA PORTAL.

Tabla 8. Comparación de los controladores ideales PID utilizados en la planta física

Fuente: Elaboración propia

Controlador	Mp	Td	Tr	Tp	Ts
PID Compact	9%	0.85 s	2.05 s	3.8 s	8 s
PID Sisotool	5.5%	0.375 s	1.49 s	2.3 s	7 s
ACO PID	12%	0.375 s	0.75 s	1.2 s	4 s



CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó una planta de control de presión neumática, así como su sistema de control mediante el uso de una válvula proporcional de 5/3 vías, controlada por un PLC, cuyos parámetros de control PID fueron obtenidos a partir del algoritmo de colonia de hormigas, siendo $K_p=3.09$, $K_i=8.46$ y $K_d=0.16$.

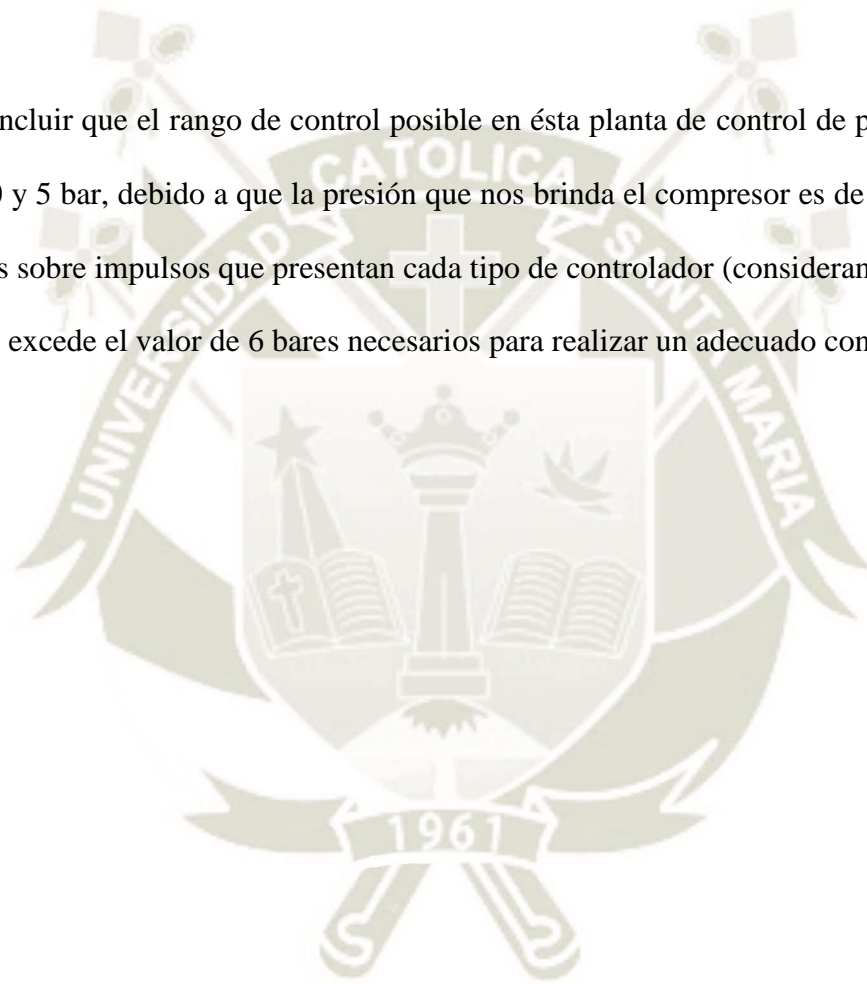
Para la implementación del sistema, se optó por el uso de elementos neumáticos de la marca FESTO, con la finalidad de permitir que ésta tesis sea posteriormente implementada y mejorada de manera didáctica por los alumnos de la Escuela de Ingeniería Mecatrónica de la UCSM.

Se realizó la programación del PLC haciendo uso del lenguaje Ladder, así como herramientas propias del software TIA PORTAL para poder realizar la adquisición de datos para el modelamiento matemático de la planta, la sintonización de parámetros PID, el análisis de resultados obtenidos por los métodos estudiados y el control del proceso de la planta en sí.

Se implementó el algoritmo de colonia de hormigas para obtener los parámetros PID del controlador, estableciendo de manera experimental los parámetros ACO más eficientes, siendo éstos: 5 hormigas, 1000 nodos, 15 tours y un 0.8 como coeficiente de evaporación de la feromona. Además, se restringió también el valor de K_p entre 0.01 y 10, el valor de K_i entre 0.01 y 10, y el valor de K_d entre 0.01 y 10, con la finalidad de obtener valores estables para el control de la planta.

Se comprobó experimentalmente, y mediante el uso de una función de costo (ITAE), que el algoritmo de colonia de hormigas (ACO) es el que brinda una mejor solución, siendo su tiempo de respuesta mejor al obtenido a partir de los métodos de sintonización estudiados y aplicados previamente.

Se puede concluir que el rango de control posible en ésta planta de control de presión neumática varía entre 0 y 5 bar, debido a que la presión que nos brinda el compresor es de 6 bar, y teniendo en cuenta los sobre impulsos que presentan cada tipo de controlador (considerando un 17% como máximo), se excede el valor de 6 bares necesarios para realizar un adecuado control.



RECOMENDACIONES

Se puede recomendar que al hacer uso de compresor se tiene que trabajar entre 0 y 5 bar, debido a que la presión que nos brinda el compresor es de 6 bar, y teniendo en cuenta los sobre impulsos que presentan cada tipo de controlador (considerando un 17% como máximo), se excede el valor de 6 bares necesarios para realizar un adecuado control.

Para futuras investigaciones se debe considerar que si la planta es un sistema lineal se debe aproximar una función de transferencia lineal, porque el código ACO solo trabaja con funciones lineales, se podría optimizar el código para que resuelva funciones de transferencia no lineales.

Se puede optimizar cualquier valor de los parámetros de comparación de la función de transferencia no solo el tiempo de establecimiento, también se puede optimizar los procesos mediante las variaciones que posee el algoritmo de Colonia de hormigas.

Se puede reemplazar los componentes neumáticos como el compresor a uno que nos entregue más de 12 bares para tener un rango de control de 0-10 bares y usar todo el rango de control de la válvula, se puede hacer uso de un PLC más potente como un S7-300.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arito, F. L. (2010). *Algoritmos de Optimización basados en Colonias de Hormigas aplicados al problema de asignación cuadrática y otros problemas relacionados*. Argentina.
- Bacca, G., De Negri, V., & Assaf, Y. (2010). MODELO MATEMÁTICO NO-LINEAL PARA UN SERVOSISTEMA NEUMÁTICO DE POSICIONAMIENTO PRECISO.
- Balcells, J., & Romeral, J. (1997). *Autómatas Programables*. Barcelona: S.A. Marcombo.
- Cañari, A. C. (2005). *Búsqueda tabú: Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas*. Lima, Perú.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- DIEEC. (2011). *Controladores Industriales Inteligentes - Controladores lógicos programables*. Madrid, España.
- DINAUT. (2018). Módulo de entrenamiento S7-1200. *Módulo de entrenamiento S7-1200*.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de Control Moderno*. Madrid: Pearson.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. Milan: IEEE.
- FESTO. (2002). *Hojas de datos - Neumatica bucle cerrado*.
- FESTO. (2017). *Neumática e hidráulica. Sistemas de aprendizaje y servicios para la formación técnica*.
- Guamán, C., & Bravo, E. (2012). Diseño de un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA). *Diseño de un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA)*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- ISA. (2008). *Manejo de Sisotool en Matlab*. Obtenido de http://isa.uniovi.es/wiki/isa/index.php/Manejo_de_Sisotool_en_Matlab
- Joaquin Bautista, J. B. (2000). *META HEURISTICA ACO (Ant Colony optimization) para la resolución de problemas de producción*. Cataluña, España.
- Martin, A. O. (2016). *Desarrollo de un algoritmo Ant Colony Optimization para tareas de clustering en apache stark*. Madrid.
- Mathworks. (2019). *Control System Designer*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/help/control/ref/controlsystemdesigner-app.html>
- Mazzone, V. (2002). *Control Automático 1. Control Automático 1*.

- Melián, B. P. (2003). "Metaheurísticas: una visión global". *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7-28.
- Moreno, M. (2011). *Introducción a la neumática*. Buenos Aires, Argentina.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: Pearson.
- Osman, G. L. (1996). *Metaheuristics: A bibliography*. Annals of Operations Research. Francia: Springer US.
- Quispe Ccachuco, M. J. (2019). *Cálculo de parámetros del controlador PID, por sintonización y simulación para el funcionamiento de un pistón*. Arequipa: Universidad Católica Santa María.
- Roca, A. (2014). *Control Automático de Procesos Industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
- SENA, D. (2005). *PLC - Controladores Lógicos Programables*.
- Serrano Nicolás, A. (2009). *Neumática Práctica*. Madrid: Paraninfo.
- Siemens. (2014). *STEP 7 Basic V13 SP1*. Nurnberg: Division Digital Factory.
- Steiglitz, C. H. (1982). *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Upper Saddle River, NJ, USA: Courier Corporation.
- Tecsup. (2018). *Fundamentación de Control y Variables Industriales. (Curso Virtual)*. Tecsup, Lima.
- Trujillo, M. (2018). *Algoritmos bioinspirados para la sintonización de sistemas de control con retardo*. Baja California: Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensanada.
- Ünal, M., Ak, A., Topuz, V., & Erdal, H. (2013). *Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms*. Estambul: Springer.
- Vega, A. J. (2010). *"Tecnología neumática" Teoría, diseño y simulación de componentes y circuitos para la docencia interactiva vía web*.

ANEXOS

ANEXO 1: CÓDIGO MATLAB: ACO.M

ANEXO 2: CÓDIGO MATLAB: COST_FUNC.M

ANEXO 3: CÓDIGO MATLAB: COMPARACIÓN.M

ANEXO 4: BLOQUES SIMULINK

ANEXO 5: BLOQUES DE PROGRAMACION LADDER

ANEXO 6: Tablas EXCEL IAE, ISE e ITAE

ANEXO 7: DATASHEET VÁLVULA 3/2 VÍAS ACCIONADA MECANICAMENTE FESTO

ANEXO 8: DATASHEET ACUMULADOR DE PRESIÓN 0.4 LITROS FESTO

ANEXO 9: DATASHEET MANÓMETRO FESTO

ANEXO 10: DATASHEET VÁLVULA REGULADORA DE CAUDAL UNIDIRECCIONAL
FESTO

ANEXO 11: DATASHEET VÁLVULA PROPORCIONAL 5/3 VÍAS FESTO

ANEXO 12: DATASHEET SENSOR DE PRESIÓN ANALÓGICO FESTO

ANEXO 13: DATASHEET PLC SIEMENS S7-1200

ANEXO 14: DATASHEET MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS SB-1232 SIEMENS

ANEXO 1: CÓDIGO MATLAB: ACO.M

ACO.m

```

%%PROGRAMA ANT COLONY OPTIMIZATION ACO
clc
close all
clear all
%% Parámetros ACO
n_iter=15; %Número de tours
NA=5;% Número de hormigas
alpha=0.8; % Importancia relativa del rastro de la feromona
beta=0.2; % Importancia realtiva de la visibilidad de las hormigas
roh=0.7; % Constante de evaporación de feromona
n_param=3; % Número de parametros
LB=(0.01).*ones(1,27); % Límite inferior
UB=10.*ones(1,27); % Límite superior
n_node=500; % Cantidad de nodos para cada parámetro
cost_best_prev=inf;
%% Generación de nodos
T=ones(n_node,n_param).*eps; % Matriz de feromonas
dT=zeros(n_node,n_param); % Cambio de feromona
for i=1:n_param
    Nodes(:,i) =linspace(LB(i),UB(i),n_node); % Generación de nodos en el
espacio
end
%% Bucle de tours
for iter=1:n_iter
%% Probabilidad de transición
    for tour_i=1:n_param
        prob(:,tour_i)= (T(:,tour_i).^alpha) .* ((1./Nodes(:,tour_i)).^beta);
        prob(:,tour_i)=prob(:,tour_i)./sum(prob(:,tour_i));
    end
%% Bucle de hormigas
    for A=1:NA
        for tour_i=1:n_param
            node_sel=rand;
            node_ind=1;
            prob_sum=0;
            for j=1:n_node
                prob_sum=prob_sum+prob(j,tour_i);
                if prob_sum>=node_sel
                    node_ind=j;
                    break
                end
            end
            ant(A,tour_i)=node_ind;
        end
        cost(A)=cost_func(Nodes(ant(A,:)),0);
        clc
        disp(['Número de hormiga: ' num2str(A)])
        disp(['Costo de la hormiga: ' num2str(cost(A))])
        fprintf('Parametros PID obtenidos\n')
    end
end

```

```

fprintf('_____ \n\n'
)
    fprintf('-----Kp-----Ki-----
Kd---\n\n')
    disp(['Parametros de la hormiga      : ' num2str(Nodes(ant(A,:)))]
    if iter~=1
    disp(['Tour: ' num2str(iter)])
    disp('_____')
    ti=I/P;
    td=D/P;
    fprintf('\n\n')
    fprintf('Parametros PID obtenidos\n')

fprintf('_____ \n\n'
)
    fprintf('-----Kp-----Ti-----
Td---\n\n')
    disp(['Parámetros PID de la hormiga: ' num2str([P ti td])]
    end

end
[cost_best,cost_best_ind]=min(cost);

% Elitsem
if (cost_best>cost_best_prev) && (iter~=1)
    [cost_worst,cost_worst_ind]=max(cost);
    ant(cost_worst_ind,:)=best_prev_ant;
    cost_best=cost_best_prev;
    cost_best_ind=cost_worst_ind;
else
    cost_best_prev=cost_best;
    best_prev_ant=ant(cost_best_ind,:);
end

dT=zeros(n_node,n_param); % Change of Phormone
for tour_i=1:n_param
    for A=1:NA

dT(ant(A,tour_i),tour_i)=dT(ant(A,tour_i),tour_i)+cost_best/cost(A);
        end
    end
    %%uso de constante de evaporación de feromona
    T= roh.*T + dT;

    %% Figuras y steps del ACO
    cost_mat(iter)=cost_best;
    %%Evaluación del costo con respecto a los tours
    figure(1)
    plot(cost_mat)
    grid on
    xlabel Tour
    ylabel Costo
    %%Evaluación de la función de transferencia con mejor respuesta PID

```

```
figure(2)
cost_func(Nodes(ant(cost_best_ind,:),1);
param_mat(iter,:)=Nodes(ant(cost_best_ind,:));
save('ACO_data.mat','cost_mat','param_mat')
grid on
xlabel Time
ylabel G(t)
drawnow
end
```



ANEXO 2: CÓDIGO MATLAB: COST_FUNC.M

cost_func.m

```
%%Función costo para el programa ACO
function cost_value=cost_func(k,plotfig)

assignin('base', 'P',k(1))
assignin('base', 'I',k(2))
assignin('base', 'D',k(3))
%%Comando de interacción entre Matlab y Simulink
sim('planta.mdl')
%%Referencia y salida
err=reference-output;
[n,~]=size(err);
cost_value=0;
%%Bucle para evaluación de costo
for i=1:n
%   cost_value=cost_value+(err(i))^2 ; % ISE
%   cost_value=cost_value+abs(err(i)); % IAE
    cost_value=cost_value+t(i)*abs(err(i)); % ITAE
%   cost_value=cost_value+t(i)*(err(i))^2; % MSE
end
%   cost_value=cost_value/t(n); % MSE
%Grafica de la función de transferencia
if plotfig
    figure(2)
    grid on
    xlabel Time
    ylabel G(t)
    plot(t,reference,t,output)
end
end
```

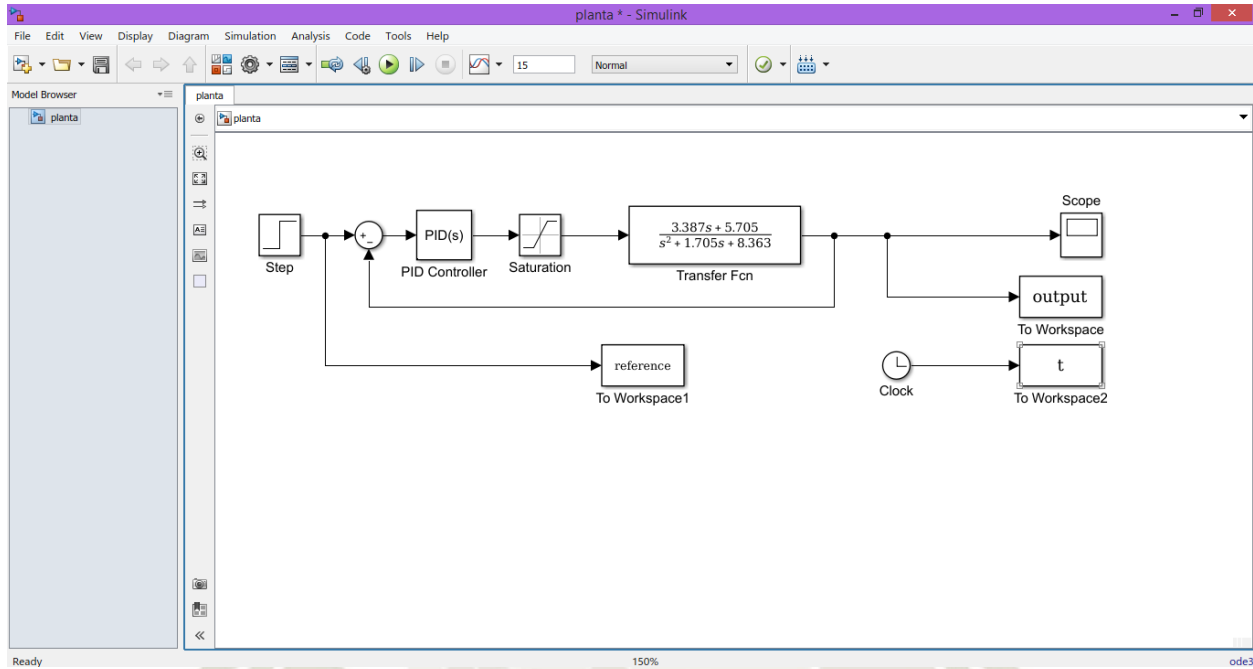
ANEXO 3: CÓDIGO MATLAB: COMPARACIÓN.M

Comparación.m

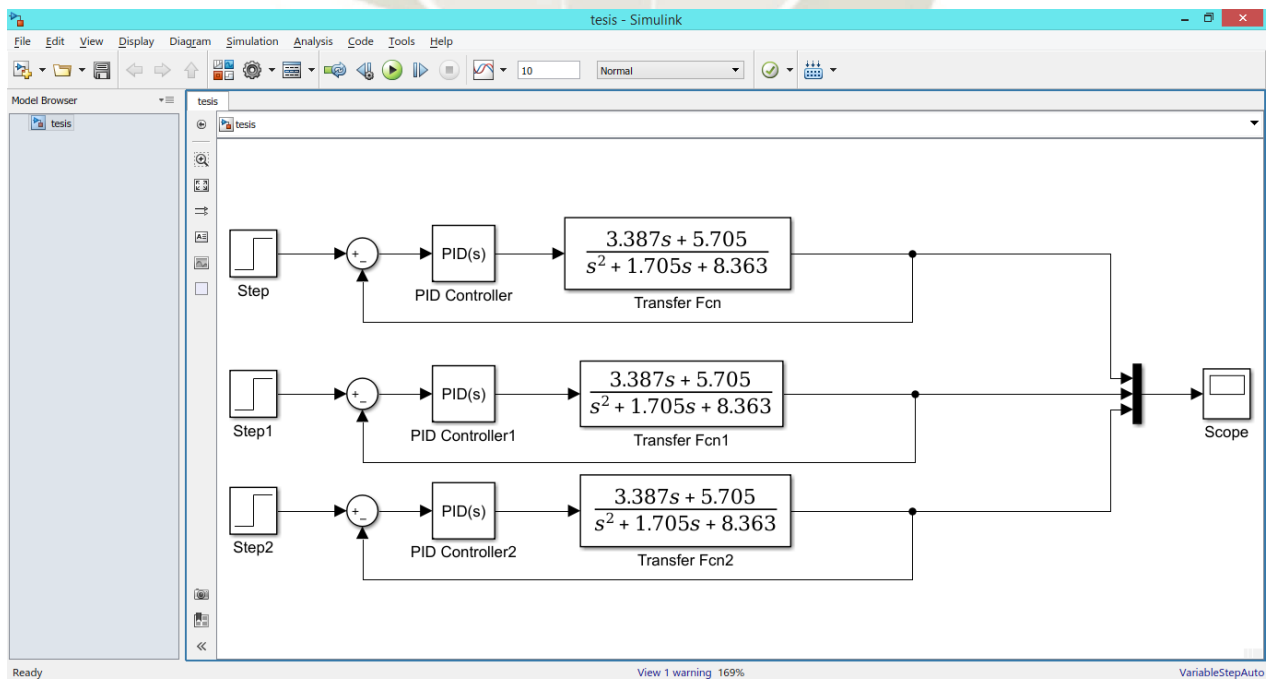
```
%Programa de visualización de controladores PID
clear all,
close all,
clc;
%Funcion de transferencia
num=[3.387 5.705];
den=[1 1.705 8.363];
G=tf(num,den)
%Parámetros PID hallados con PID Compact
kpt=1.177;
kit=2.2870;
kdt=0.2295;
nt=[kdt kpt kit];
dk=[0.7 0];
gc=tf(nt,dk);
gd=series(G,gc);
GT=feedback(gd,1)
%parametros PID hallados con PID Sisotool
kpm=2.22;
kim=1.46;
kdm=0;
nm=[kdm kpm kim];
gm=tf(nm,dk);
ga=series(G,gm);
GM=feedback(ga,1)
%Parámetros PID hallados con ACO
kpa=1.972;
kia=9.3193;
kda=0.09008;
na=[kda kpa kia];
gaco=tf(na,dk);
gz=series(G,gaco);
GACO=feedback(gz,1)
%Gráficas de los controladores PID
step(GT,'r') %Escalon rojo para la función de transferencia con el regulador
TIA PORTAL
hold on
grid on
step(GM,'g') %Escalon Verde para la funcion de transferencia Sisotool
Matlab
grid on
title('Respuesta del controlador PID','FontSize',14)
step(GACO,'b') %Escalon azul para la funcion de transferencia ACO
grid on
```

ANEXO 4: BLOQUES SIMULINK

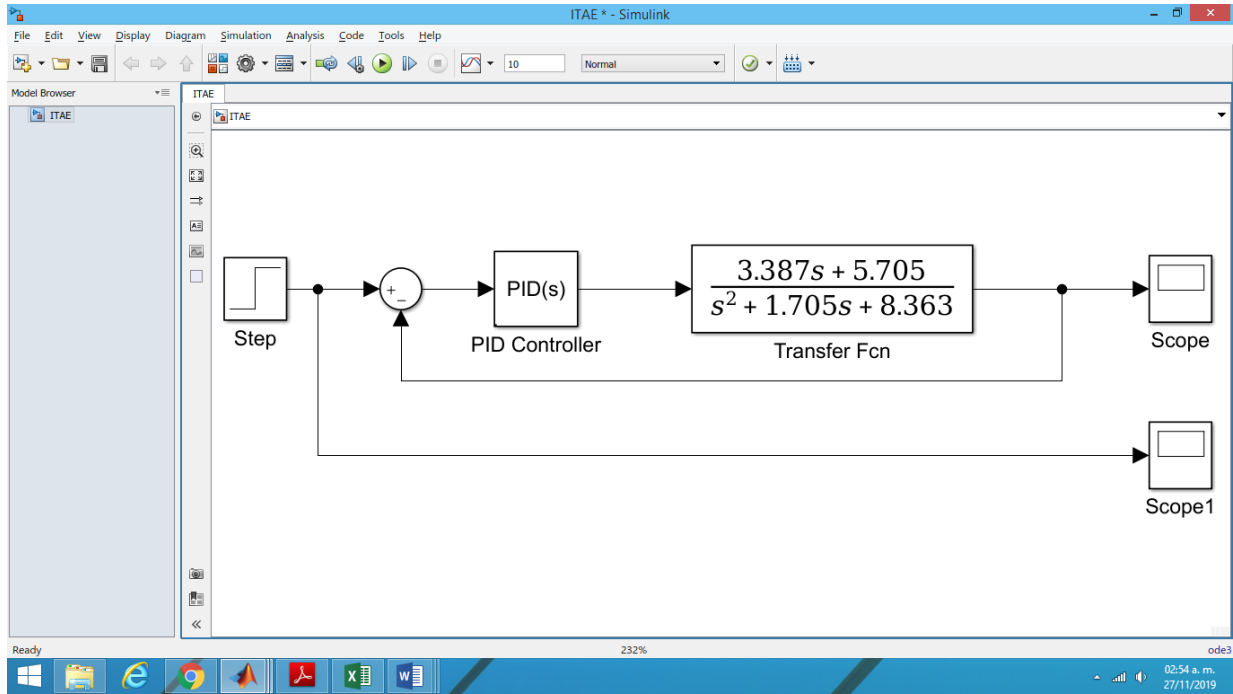
Planta.mdl



Tesis.mdl



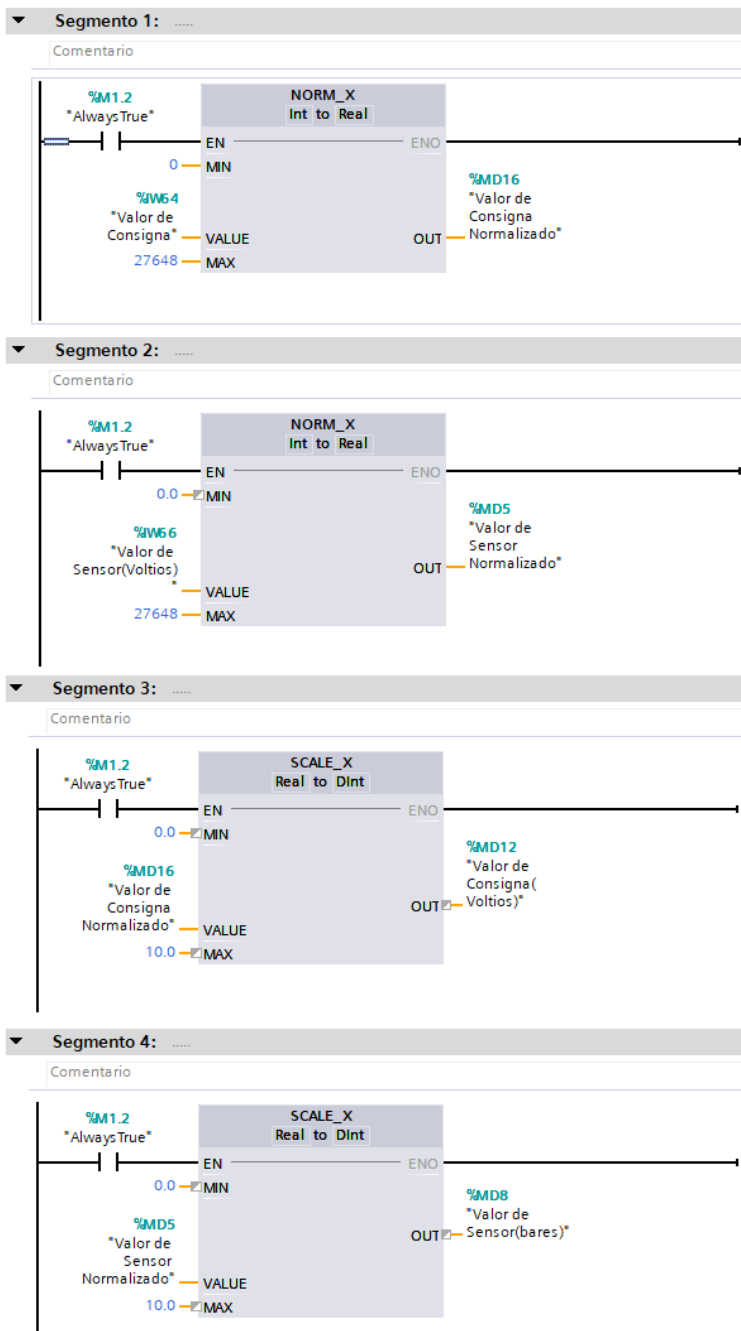
ITAE.mdl

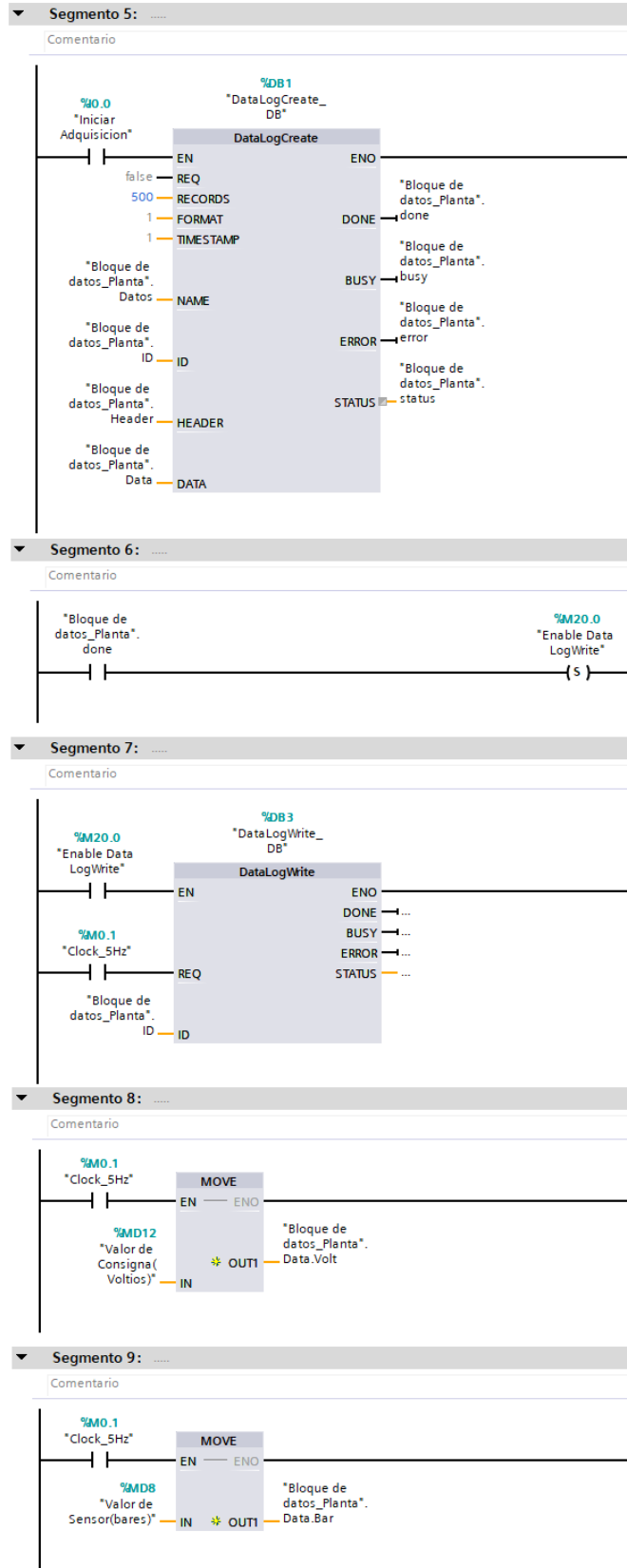


ANEXO 5: BLOQUES DE PROGRAMACION LADDER

ADQUISICION DE DATOS

MAIN





CONFIGURACION DEL BLOQUE DATA LOG

Adquisición_Datos_Planta ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Bloques de programa ▶ Bloque de datos_Planta [DB4]

Conservar valores actuales Instantánea Copiar instantáneas a valores de arranque Cargar valores de arranque como valores actuales

Bloque de datos_Planta (instantánea generada: 28/10/2019 16:11:45)

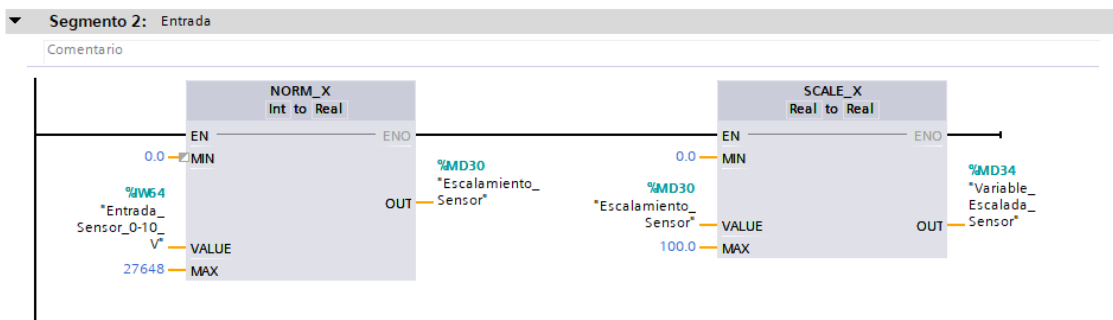
Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ...	Valor de a...	Comentario
Static								
Datos	String	'Registro_Planta'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
ID	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Header	String	'Consigna.Presi...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Data	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
done	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
busy	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
error	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
status	DWord	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Propiedades Información Diagnóstico

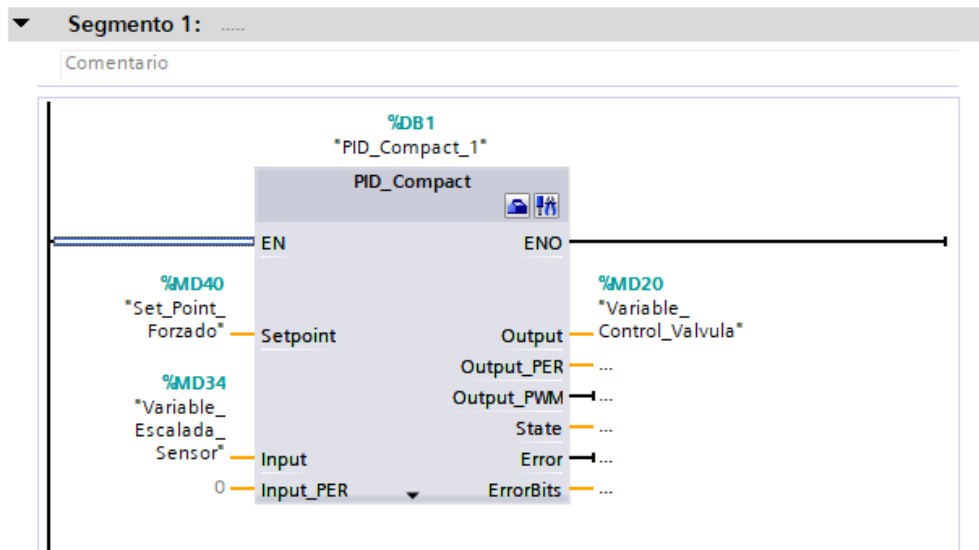


BLOQUES DE PROGRAMACION LADDER CONTROL PID

MAIN



CYCLIC INTERRUPT



ANEXO 6: Tablas EXCEL IAE, ISE e ITAE

ACO

Set Point
1.00

PID ACO		$\sum_0^n Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^n (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^n t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $
T(s)	P(Bar)	IAE	ISE	ITAE
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00
0.10	0.5847	0.42	0.17	0.04
0.20	0.9359	0.06	0.00	0.01
0.30	1.0825	0.08	0.01	0.02
0.40	1.0946	0.09	0.01	0.04
0.50	1.0431	0.04	0.00	0.02
0.60	0.9790	0.02	0.00	0.01
0.70	0.9301	0.07	0.00	0.05
0.80	0.9049	0.10	0.01	0.08
0.90	0.9007	0.10	0.01	0.09
1.00	0.9099	0.09	0.01	0.09
1.10	0.9250	0.07	0.01	0.08
1.20	0.9404	0.06	0.00	0.07
1.30	0.9531	0.05	0.00	0.06
1.40	0.9624	0.04	0.00	0.05
1.50	0.9686	0.03	0.00	0.05
1.60	0.9727	0.03	0.00	0.04
1.70	0.9755	0.02	0.00	0.04
1.80	0.9777	0.02	0.00	0.04
1.90	0.9797	0.02	0.00	0.04
2.00	0.9817	0.02	0.00	0.04
2.10	0.9837	0.02	0.00	0.03
2.20	0.9856	0.01	0.00	0.03
2.30	0.9874	0.01	0.00	0.03
2.40	0.9890	0.01	0.00	0.03
2.50	0.9904	0.01	0.00	0.02
2.60	0.9916	0.01	0.00	0.02
2.70	0.9926	0.01	0.00	0.02
2.80	0.9935	0.01	0.00	0.02
2.90	0.9943	0.01	0.00	0.02

3.00	0.9950	0.01	0.00	0.02
3.10	0.9956	0.00	0.00	0.01
3.20	0.9961	0.00	0.00	0.01
3.30	0.9966	0.00	0.00	0.01
3.40	0.9970	0.00	0.00	0.01
3.50	0.9973	0.00	0.00	0.01
3.60	0.9977	0.00	0.00	0.01
3.70	0.9979	0.00	0.00	0.01
3.80	0.9982	0.00	0.00	0.01
3.90	0.9984	0.00	0.00	0.01
4.00	0.9986	0.00	0.00	0.01
4.10	0.9988	0.00	0.00	0.01
4.20	0.9989	0.00	0.00	0.00
4.30	0.9991	0.00	0.00	0.00
4.40	0.9992	0.00	0.00	0.00
4.50	0.9993	0.00	0.00	0.00
4.60	0.9994	0.00	0.00	0.00
4.70	0.9994	0.00	0.00	0.00
4.80	0.9995	0.00	0.00	0.00
4.90	0.9996	0.00	0.00	0.00
5.00	0.9996	0.00	0.00	0.00
5.10	0.9997	0.00	0.00	0.00
5.20	0.9997	0.00	0.00	0.00
5.30	0.9997	0.00	0.00	0.00
5.40	0.9998	0.00	0.00	0.00
5.50	0.9998	0.00	0.00	0.00
5.60	0.9998	0.00	0.00	0.00
5.70	0.9999	0.00	0.00	0.00
5.80	0.9999	0.00	0.00	0.00
5.90	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.00	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.10	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.20	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.30	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.40	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.50	0.9999	0.00	0.00	0.00
6.60	1.0000	0.00	0.00	0.00
6.70	1.0000	0.00	0.00	0.00
6.80	1.0000	0.00	0.00	0.00
6.90	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.10	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.20	1.0000	0.00	0.00	0.00

7.30	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.40	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.50	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.60	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.70	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.80	1.0000	0.00	0.00	0.00
7.90	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.10	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.20	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.30	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.40	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.50	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.60	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.70	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.80	1.0000	0.00	0.00	0.00
8.90	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.10	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.20	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.30	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.40	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.50	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.60	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.70	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.80	1.0000	0.00	0.00	0.00
9.90	1.0000	0.00	0.00	0.00
10.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
TOTAL		2.57	1.24	1.35



PID SISOTOOL

Set Point
1.00

PID SISOTOOL		$\sum_0^n Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^n (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^n t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $
T(s)	P(Bar)	IAE	ISE	ITAE
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00
0.10	0.5416	0.46	0.21	0.05
0.20	0.7836	0.22	0.05	0.04
0.30	0.8679	0.13	0.02	0.04
0.40	0.8763	0.12	0.02	0.05
0.50	0.8538	0.15	0.02	0.07
0.60	0.8235	0.18	0.03	0.11
0.70	0.7959	0.20	0.04	0.14
0.80	0.7752	0.22	0.05	0.18
0.90	0.7617	0.24	0.06	0.21
1.00	0.7546	0.25	0.06	0.25
1.10	0.7525	0.25	0.06	0.27
1.20	0.7541	0.25	0.06	0.30
1.30	0.7582	0.24	0.06	0.31
1.40	0.7639	0.24	0.06	0.33
1.50	0.7706	0.23	0.05	0.34
1.60	0.7778	0.22	0.05	0.36
1.70	0.7852	0.21	0.05	0.37
1.80	0.7926	0.21	0.04	0.37
1.90	0.7999	0.20	0.04	0.38
2.00	0.8071	0.19	0.04	0.39
2.10	0.8140	0.19	0.03	0.39
2.20	0.8207	0.18	0.03	0.39
2.30	0.8272	0.17	0.03	0.40
2.40	0.8334	0.17	0.03	0.40
2.50	0.8394	0.16	0.03	0.40
2.60	0.8452	0.15	0.02	0.40
2.70	0.8508	0.15	0.02	0.40
2.80	0.8562	0.14	0.02	0.40
2.90	0.8613	0.14	0.02	0.40
3.00	0.8663	0.13	0.02	0.40
3.10	0.8711	0.13	0.02	0.40

3.20	0.8758	0.12	0.02	0.40
3.30	0.8803	0.12	0.01	0.40
3.40	0.8846	0.12	0.01	0.39
3.50	0.8887	0.11	0.01	0.39
3.60	0.8927	0.11	0.01	0.39
3.70	0.8966	0.10	0.01	0.38
3.80	0.9003	0.10	0.01	0.38
3.90	0.9039	0.10	0.01	0.37
4.00	0.9073	0.09	0.01	0.37
4.10	0.9107	0.09	0.01	0.37
4.20	0.9139	0.09	0.01	0.36
4.30	0.9170	0.08	0.01	0.36
4.40	0.9200	0.08	0.01	0.35
4.50	0.9229	0.08	0.01	0.35
4.60	0.9256	0.07	0.01	0.34
4.70	0.9283	0.07	0.01	0.34
4.80	0.9309	0.07	0.00	0.33
4.90	0.9334	0.07	0.00	0.33
5.00	0.9358	0.06	0.00	0.32
5.10	0.9381	0.06	0.00	0.32
5.20	0.9403	0.06	0.00	0.31
5.30	0.9425	0.06	0.00	0.30
5.40	0.9445	0.06	0.00	0.30
5.50	0.9465	0.05	0.00	0.29
5.60	0.9485	0.05	0.00	0.29
5.70	0.9503	0.05	0.00	0.28
5.80	0.9521	0.05	0.00	0.28
5.90	0.9538	0.05	0.00	0.27
6.00	0.9555	0.04	0.00	0.27
6.10	0.9571	0.04	0.00	0.26
6.20	0.9586	0.04	0.00	0.26
6.30	0.9601	0.04	0.00	0.25
6.40	0.9616	0.04	0.00	0.25
6.50	0.9629	0.04	0.00	0.24
6.60	0.9643	0.04	0.00	0.24
6.70	0.9656	0.03	0.00	0.23
6.80	0.9668	0.03	0.00	0.23
6.90	0.9680	0.03	0.00	0.22
7.00	0.9691	0.03	0.00	0.22
7.10	0.9703	0.03	0.00	0.21
7.20	0.9713	0.03	0.00	0.21
7.30	0.9724	0.03	0.00	0.20
7.40	0.9734	0.03	0.00	0.20

7.50	0.9743	0.03	0.00	0.19
7.60	0.9752	0.02	0.00	0.19
7.70	0.9761	0.02	0.00	0.18
7.80	0.9770	0.02	0.00	0.18
7.90	0.9778	0.02	0.00	0.18
8.00	0.9786	0.02	0.00	0.17
8.10	0.9794	0.02	0.00	0.17
8.20	0.9801	0.02	0.00	0.16
8.30	0.9808	0.02	0.00	0.16
8.40	0.9815	0.02	0.00	0.16
8.50	0.9822	0.02	0.00	0.15
8.60	0.9828	0.02	0.00	0.15
8.70	0.9835	0.02	0.00	0.14
8.80	0.9840	0.02	0.00	0.14
8.90	0.9846	0.02	0.00	0.14
9.00	0.9852	0.01	0.00	0.13
9.10	0.9857	0.01	0.00	0.13
9.20	0.9862	0.01	0.00	0.13
9.30	0.9867	0.01	0.00	0.12
9.40	0.9872	0.01	0.00	0.12
9.50	0.9877	0.01	0.00	0.12
9.60	0.9881	0.01	0.00	0.11
9.70	0.9885	0.01	0.00	0.11
9.80	0.9889	0.01	0.00	0.11
9.90	0.9893	0.01	0.00	0.11
10.00	0.9897	0.01	0.00	0.10
TOTAL		10.29	2.54	25.73



PID COMPACT

Set Point
1.00

PID Compact		$\sum_0^n Y_{sp}(t) - Y_s(t) $	$\sum_0^n (Y_{sp}(t) - Y_s(t))^2$	$\sum_0^n t * Y_{sp}(t) - Y_s(t) $
T(s)	P(Bar)	IAE	ISE	ITAE
0.00	0.0000	1.00	1.00	0.00
0.10	0.3523	0.65	0.42	0.06
0.20	0.6079	0.39	0.15	0.08
0.30	0.7701	0.23	0.05	0.07
0.40	0.8548	0.15	0.02	0.06
0.50	0.8830	0.12	0.01	0.06
0.60	0.8756	0.12	0.02	0.07
0.70	0.8505	0.15	0.02	0.10
0.80	0.8208	0.18	0.03	0.14
0.90	0.7953	0.20	0.04	0.18
1.00	0.7783	0.22	0.05	0.22
1.10	0.7711	0.23	0.05	0.25
1.20	0.7728	0.23	0.05	0.27
1.30	0.7816	0.22	0.05	0.28
1.40	0.7950	0.21	0.04	0.29
1.50	0.8107	0.19	0.04	0.28
1.60	0.8271	0.17	0.03	0.28
1.70	0.8428	0.16	0.02	0.27
1.80	0.8570	0.14	0.02	0.26
1.90	0.8695	0.13	0.02	0.25
2.00	0.8801	0.12	0.01	0.24
2.10	0.8891	0.11	0.01	0.23
2.20	0.8968	0.10	0.01	0.23
2.30	0.9034	0.10	0.01	0.22
2.40	0.9093	0.09	0.01	0.22
2.50	0.9147	0.09	0.01	0.21
2.60	0.9197	0.08	0.01	0.21
2.70	0.9245	0.08	0.01	0.20
2.80	0.9291	0.07	0.01	0.20
2.90	0.9335	0.07	0.00	0.19
3.00	0.9377	0.06	0.00	0.19
3.10	0.9417	0.06	0.00	0.18

3.20	0.9455	0.05	0.00	0.17
3.30	0.9491	0.05	0.00	0.17
3.40	0.9524	0.05	0.00	0.16
3.50	0.9556	0.04	0.00	0.16
3.60	0.9585	0.04	0.00	0.15
3.70	0.9612	0.04	0.00	0.14
3.80	0.9638	0.04	0.00	0.14
3.90	0.9661	0.03	0.00	0.13
4.00	0.9683	0.03	0.00	0.13
4.10	0.9704	0.03	0.00	0.12
4.20	0.9723	0.03	0.00	0.12
4.30	0.9741	0.03	0.00	0.11
4.40	0.9758	0.02	0.00	0.11
4.50	0.9773	0.02	0.00	0.10
4.60	0.9788	0.02	0.00	0.10
4.70	0.9802	0.02	0.00	0.09
4.80	0.9814	0.02	0.00	0.09
4.90	0.9827	0.02	0.00	0.09
5.00	0.9838	0.02	0.00	0.08
5.10	0.9848	0.02	0.00	0.08
5.20	0.9858	0.01	0.00	0.07
5.30	0.9867	0.01	0.00	0.07
5.40	0.9876	0.01	0.00	0.07
5.50	0.9884	0.01	0.00	0.06
5.60	0.9892	0.01	0.00	0.06
5.70	0.9899	0.01	0.00	0.06
5.80	0.9905	0.01	0.00	0.06
5.90	0.9911	0.01	0.00	0.05
6.00	0.9917	0.01	0.00	0.05
6.10	0.9922	0.01	0.00	0.05
6.20	0.9927	0.01	0.00	0.04
6.30	0.9932	0.01	0.00	0.04
6.40	0.9937	0.01	0.00	0.04
6.50	0.9941	0.01	0.00	0.04
6.60	0.9945	0.01	0.00	0.04
6.70	0.9948	0.01	0.00	0.03
6.80	0.9951	0.00	0.00	0.03
6.90	0.9955	0.00	0.00	0.03
7.00	0.9958	0.00	0.00	0.03
7.10	0.9960	0.00	0.00	0.03
7.20	0.9963	0.00	0.00	0.03
7.30	0.9965	0.00	0.00	0.03
7.40	0.9968	0.00	0.00	0.02

7.50	0.9970	0.00	0.00	0.02
7.60	0.9972	0.00	0.00	0.02
7.70	0.9973	0.00	0.00	0.02
7.80	0.9975	0.00	0.00	0.02
7.90	0.9977	0.00	0.00	0.02
8.00	0.9978	0.00	0.00	0.02
8.10	0.9980	0.00	0.00	0.02
8.20	0.9981	0.00	0.00	0.02
8.30	0.9982	0.00	0.00	0.01
8.40	0.9983	0.00	0.00	0.01
8.50	0.9984	0.00	0.00	0.01
8.60	0.9985	0.00	0.00	0.01
8.70	0.9986	0.00	0.00	0.01
8.80	0.9987	0.00	0.00	0.01
8.90	0.9988	0.00	0.00	0.01
9.00	0.9989	0.00	0.00	0.01
9.10	0.9990	0.00	0.00	0.01
9.20	0.9990	0.00	0.00	0.01
9.30	0.9991	0.00	0.00	0.01
9.40	0.9992	0.00	0.00	0.01
9.50	0.9992	0.00	0.00	0.01
9.60	0.9993	0.00	0.00	0.01
9.70	0.9993	0.00	0.00	0.01
9.80	0.9994	0.00	0.00	0.01
9.90	0.9994	0.00	0.00	0.01
10.00	0.9994	0.00	0.00	0.01
TOTAL		6.93	2.26	9.80



ANEXO 7: DATASHEET VÁLVULA 3/2 VÍAS ACCIONADA MECANICAMENTE

FESTO

152860

Válvula de 3/2 vías con pulsador, cerrada en reposo



- Diseño** La válvula de 3/2 vías con racores rápidos está montada en un cuerpo de polímero. La unidad se monta sobre una placa perfilada por medio de un sistema de fijación rápido con palanca azul (alternativa de montaje "A").
- Fundón** La válvula se acciona presionando un pulsador. Al soltar el pulsador, la válvula regresa a su posición normal de reposo a través de un muelle de retorno.

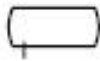
Datos técnicos

Neumática	
Fluido	Aire comprimido (con o sin lubricación) (o vacío; conexión 1)
Diseño	Válvula de asiento, accionada directamente y con muelle de retorno
Accionamiento	Pulsador
Margen de presión	-95 – 800 kPa (-0,95 – 8 bar)
Caudal nominal estándar 1...2	60 l/min
Fuerza de accionamiento a 600 kPa (6 bar)	6 N
Conexión	Racores QSM-4 para tubo de plástico PUN 4 x 0.75

ANEXO 8: DATASHEET ACUMULADOR DE PRESIÓN 0.4 LITROS FESTO

152912

Depósito



Diseño

Este depósito está equipado con el sistema de fijación rápido (alternativa de montaje "A"), adecuado para montaje en placa perfilada y está dotado de racores rápidos en ambos extremos.

Función

El depósito puede utilizarse para las siguientes funciones:

- Generación de presiones estáticas con la ayuda de reguladores de caudal de un sólo sentido.
- Generación de largos tiempos de retardo junto con un temporizador y una válvula reguladora de caudal.
- Compensación de fluctuaciones de presión.
- Compensación de caídas de presión bruscas.
- Creación de un sistema regulado con un retardo de 1er orden (PT1).

Datos técnicos

Neumática	
Tipo	VZS-0.4
Fluido	Aire comprimido filtrado (con o sin lubricación)
Diseño	Depósito de presión soldado
Método de montaje	Clips de retención, sistema de fijación para placa perfilada
Conexiones	QSL- 1/8-4 en cada extremo para tubo de plástico PUN 4 x 0.75
Capacidad	400 ml
Margen de presión	0 – 1400 kPa (0 – 16 bar)
Margen de temperatura	Depende del tubo o conductos utilizados
Materiales	Latón pintado en azul Clips de retención: acero para muelles
Peso	730 g

ANEXO 9: DATASHEET MANÓMETRO FESTO

152865

Manómetro



- Diseño** El manómetro está atornillado en una placa de función que se está dotada de dos conexiones con racores rápidos que se hallan comunicadas. La unidad se monta en la placa perfilada a través de un sistema de retención rápido con leva azul (alternativa de montaje "A").
- Función** El manómetro indica la presión en un sistema de control neumático.
- Nota** Durante el funcionamiento continuo, el manómetro sólo debe ser cargado al 75% del final de la escala, y en caso de una variación alternativa de la presión, al 66% del final de la escala de lectura.

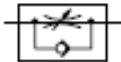
Datos técnicos

Neumática	
Fluido	Aire comprimido filtrado (con o sin lubricación)
Diseño	Manómetro con tubo de Bourdon
Margen de indicación	0 – 1000 kPa (0 – 10 bar)
Conexión	Racores QSM-M5-4 para tubo de plástico PUN 4 x 0.75
Grado de calidad	1.6

ANEXO 10: DATASHEET VÁLVULA REGULADORA DE CAUDAL UNIDIRECCIONAL FESTO

152881

Regulador de caudal unidireccional



- Diseño** El regulador de caudal unidireccional está atornillado en una placa de función, que incorpora un racor rápido. La unidad se inserta en la placa perfilada, a través de un sistema de fijación rápido con leva azul (alternativa de montaje "A").
- Función** El regulador consiste en la combinación de una válvula de estrangulación y de una válvula de antirretorno. Mientras el aire atraviesa la estrangulación en un sentido, la válvula de antirretorno bloquea el flujo del aire en el otro sentido. La sección de paso estrangulada puede ajustarse mediante un tornillo moleteado. El ajuste puede asegurarse por una contratuerca moleteada. Dos flechas indican el sentido del flujo en el cuerpo. En sentido opuesto, el aire puede fluir libremente sin restricción a través de la válvula de antirretorno.

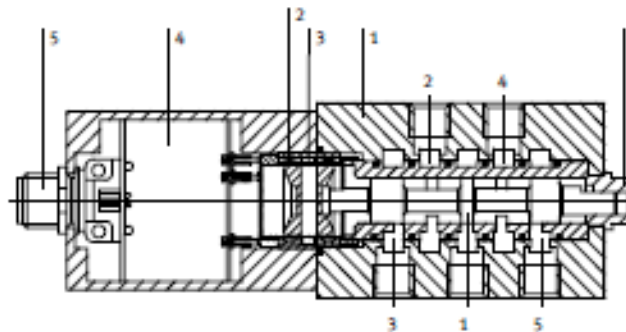
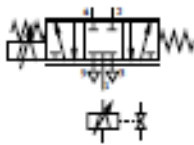
Datos técnicos

Neumática	
Fluido	Aire comprimido filtrado (con o sin lubricación)
Diseño	Válvula reguladora unidireccional
Margen de presión	20 – 1000 kPa (0.2 – 10 bar)
Caudal nominal estándar	en sentido regulado: 0 – 150 l/min en sentido libre: 160 l/min (regulador abierto) 130 l/min (regulador cerrado)
Conexión	QSM-M5-4 para tubo de plástico PUN 4 x 0.75

ANEXO 11: DATASHEET VÁLVULA PROPORCIONAL 5/3 VÍAS FESTO

167078

Válvula proporcional de 5/3 vías



- 1 Válvula de 5/3 vías
- 2 Actuador del electroimán
- 3 Sensor
- 4 Electrónica de la válvula
- 5 Conexión eléctrica
- 6 Tapa de la válvula

Diseño

La válvula proporcional MPYE-5-1/8 está montada en una base que incorpora el sistema de retención rápido (alternativa de montaje "A"), adecuado para montaje en placa perfilada. La válvula está equipada con racores rápidos LCU y dos silenciadores. Los principales componentes internos de una válvula distribuidora de control proporcional son:

- Una válvula neumática de 5/3 vías en versión de corredera, cerrada en posición media (1)
- Un actuador del electroimán (2) para posicionar la corredera de la válvula
- Un sensor (3) para medir la posición de la corredera de la válvula
- Electrónica de la válvula integrada (4) para regular la posición de la corredera.

Válvula proporcional de 5/3 vías

Función

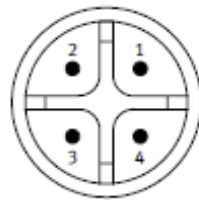
La válvula de control proporcional convierte una señal de entrada eléctrica analógica en las correspondientes aberturas de las salidas. A la mitad de la tensión nominal, es decir a 5 V, la válvula asume su posición media, en la que todos los bordes de control están cerrados, de forma que, aparte de unas mínimas fugas, no pasa aire a través de la válvula. A 0 y 10 V respectivamente, la válvula asume sus posiciones finales, con una máxima sección de abertura.

Un actuador de electroimán accionando directamente sobre la corredera de la válvula hace las veces de transductor electromecánico. Un control electrónico integrado para el recorrido de la corredera de la válvula (posición subordinada en bucle cerrado) permite obtener unas buenas características estáticas y dinámicas, que se reflejan en una baja histéresis (por debajo del 0,3%), cortos tiempos de respuesta (típicamente 5 ms) y elevada frecuencia máxima (aprox. 100 Hz).

La válvula es así especialmente adecuada para ser utilizada como elemento final de control junto con un controlador de posición de alto nivel para el posicionado de cilindros neumáticos.

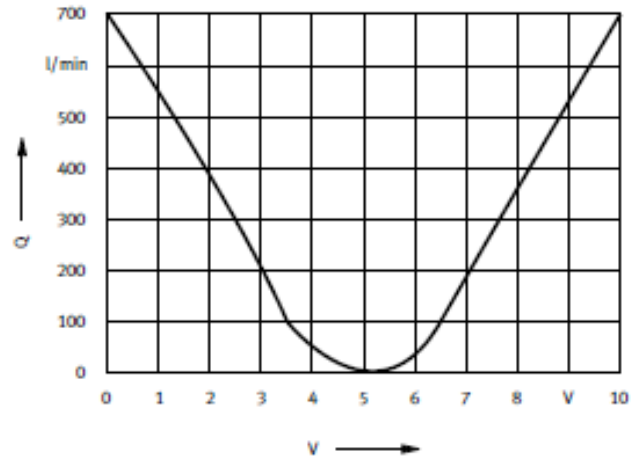
Si la corredera de la válvula se atasca, por ejemplo debido a suciedad, puede retirarse la tapa de la válvula (6) y desatascar la corredera a mano.

Conexión eléctrica

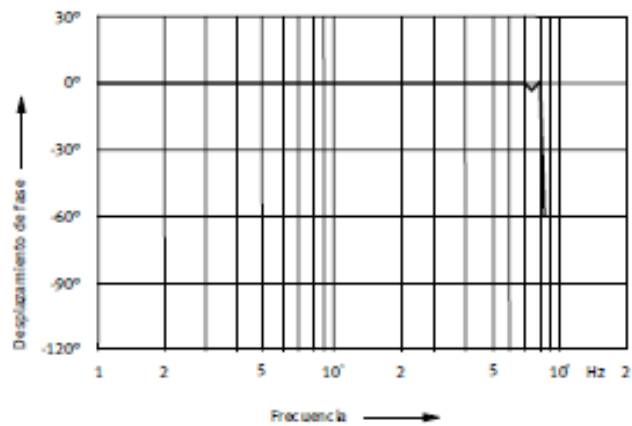
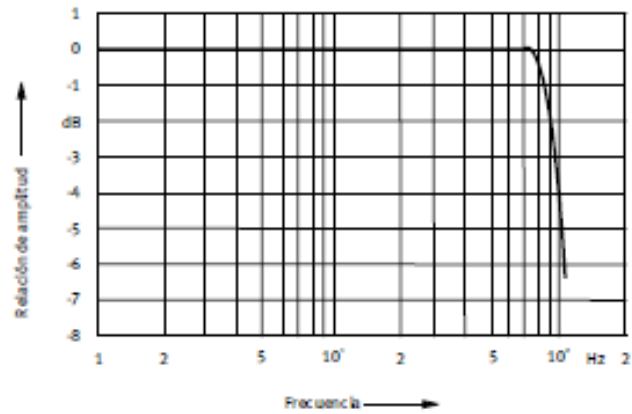


La asignación de pines del zócalo de conexión y el código de colores para las clavijas del cable, se muestran en la tabla siguiente.

Pin	Conexiones	Clavija
1	Alimentación +24 V	Roja
2	Alimentación 0 V	Azul
3	Tensión de la señal	Negra
4	Masa de la señal	Blanca



Características de frecuencia MPYE-5-1/8



Características de caudal MPYE-5-1/8

Válvula proporcional de 5/3 vías

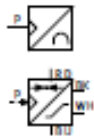
Datos técnicos

Neumáticos, Eléctricos	
Fluido	Aire comprimido microfiltrado (sin lubricar)
Margen de temperatura del fluido	+5 – +40 °C, sin condensar
Paso nominal	6 mm
Presión de funcionamiento, valor nominal/máximo	6 bar/10 bar
Caudal máximo a la presión nominal	700 l/min
Fuga normal máxima (de origen)	20 l/min
Tensión nominal de funcionamiento	24 V DC
Consumo, émbolo en posición media	2 Watt
Consumo, valor máximo	20 Watt
Tensión de consigna analógica	0 – 10 VDC
Valor nominal en posición media	5 V DC
Resistencia de entrada	70 kΩ
Tiempo de funcionamiento según VDE 0580	100 %
Grado de protección según DIN 40.050 con la clavija SIM-GD 18.494	IP 65
Frecuencia límite (-3 dB) a P_{max} y con cámara de corredera del 20 % al 80 %	100 Hz
Tiempo de accionamiento a p_{max} y con cámara de corredera del 20 % al 80 %	5 ms
Histéresis relativa a la posición de la válvula	0.4 %
Linealidad relativa a la posición de la válvula	1,0 %
Conexiones neumáticas	G 1/8, QSL para tubo de plástico PUN 4 x 0.75
Conexiones eléctricas	para clavijas de seguridad de 4 mm A prueba de inversión de polaridad
Compatibilidad electromagnética	CE
Interferencias emitidas	verificada según EN 500 81-1
Inmunidad a ruidos	verificada según EN 500 82-1

ANEXO 12: DATASHEET SENSOR DE PRESIÓN ANALÓGICO FESTO

167094

Sensor de presión analógico



Diseño

Este sensor analógico de presión se halla montado en una escuadra de soporte que está dotada de un sistema de retención rápido (alternativa de montaje "A") adecuado para montaje en placa perfilada.

Función

Este sensor de presión analógico es un detector de presión relativa piezoresistivo con un amplificador integrado y compensación de temperatura incorporado en un cuerpo de aluminio.

La presión a medir actúa a través de una capa de silido sobre un elemento piezoresistivo. El cambio de señal producido dentro de este elemento es emitido a través de un amplificador como tensión o como corriente en el conector. La señal de salida es calibrada, asegurando así que los sensores son fácilmente intercambiables

Asignación de pines



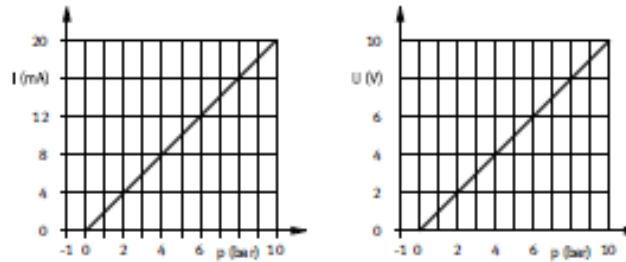
- 1 Alimentación (+24 V)
- 2 Masa
- 3 Salida por tensión
- 4 Salida por corriente

Código de colores en la clavija

Las clavijas del cable están codificadas por colores como sigue:		
rojo	(RD)	+24 V
azul	(BL)	0 V
negro	(BK)	Salida por tensión
blanco	(WH)	Salida por corriente

Sensor de presión analógico

Curvas características



Datos técnicos

Neumáticos, Eléctricos	
Margen de presión *	0 – 1000 kPa (0 – 10 bar)
Presión máxima admisible p_{max}	1400 kPa (14 bar)
Alimentación	12 – 30 V DC
Rizado residual de UB	10% según DIN 41 755
Consumo de corriente	Con salida por corriente: 35 mA Con salida por tensión: 15 mA
Resistencia de carga	Salida por corriente: 300 Ω max. RB x (UB - 3 V)/30 mA Salida por tensión: 4 k Ω max.
Error total	$\pm 1\%$ del valor de final de escala
Deriva térmica del punto cero	<0,3% del valor de final de escala/10 K
Deriva térmica del valor final de escala	<0,3% del valor de final de escala/10 K
Frecuencia máxima	100 Hz
Fluido	Aire comprimido, (con o sin lubricación)
Temperatura de funcionamiento	0 – +85 °C
Margen compensado	+10 – +70 °C
Temperatura de almacenamiento	-25 – +125 °C
Protección eléctrica	A prueba de cortocircuito y de polaridad inversa
Grado de protección	IP 65
Materiales	Al, anodizado; Silicio
Peso	265 g
Cable	4-hilo, 2 m
Conexión eléctrica	Para clavijas de seguridad de 4 mm
Conexión neumática	G 1/4, QSL para tubo de plástico PUN 4 x 0,75

* El sensor también suministrará una señal con presiones de <0 bar. En este caso no pueden garantizarse la linealidad y la proporcionalidad.

ANEXO 13: DATASHEET PLC SIEMENS S7-120

SIEMENS

Hoja de datos

6ES7214-1BG40-0XB0



SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, CPU COMPACTA, AC/DC/RELES, E/S INTEGRADAS: 14 DI 24VDC; 10 DO RELES 2A; 2 AI 0 - 10V DC, ALIMENTACION: AC 86 - 264 V AC BEI 47 -63 HZ, MEMORIA DE PROGRAMA/DATOS 76 KB

Display	
Con display	No
Tensión de alimentación	
Valor nominal (AC)	
• 120 V AC	Sí
• 230 V AC	Sí
Rango admisible, límite inferior (AC)	86 V
Rango admisible, límite superior (AC)	264 V
Frecuencia de red	
• Rango admisible de frecuencia, límite inferior	47 Hz
• Rango admisible de frecuencia, límite superior	63 Hz
Intensidad de entrada	
Consumo (valor nominal)	100 mA con 120 V AC; 60 mA con 240 V AC
Intensidad de cierre, máx.	20 A; con 264 V
Alimentación de sensores	
Alimentación de sensores 24 V	
• 24 V	Rango permitido: 20,4 a 28,8 V
Intensidad de salida	
Intensidad en bus de fondo (5 V DC), máx.	1 600 mA; máx. 5 V DC para SM y CM
Pérdidas	
Pérdidas, típ.	14 W
Memoria	
Tipo de memoria	EEPROM

Memoria de usuario	76 kb/te
Memoria de trabajo	
• integrado	100 kb/te
• Ampliable	No
Memoria de carga	
• integrado	4 Mb/te
• enchufable (SIMATIC Memory Card), máx.	2 Gb/te; con SIMATIC Memory Card
Respaldo	
• existente	Sí; Libre de mantenimiento
• sin pila	Sí
Tiempos de ejecución de la CPU	
para operaciones a bits, típ.	0,085 µs; /Operación
para operaciones a palabras, típ.	1,7 µs; /Operación
para aritmética de coma flotante, típ.	2,3 µs; /Operación
CPU-bloques	
Nº de bloques (total)	DBs, FCs, FBs, contadores y temporizadores. El número máximo de bloques direccionables es de 1 a 65535. No hay ninguna restricción, uso de toda la memoria de trabajo
OB	
• Cantidad, máx.	Limitada únicamente por la memoria de trabajo para código
Áreas de datos y su remanencia	
Área de datos remanentes total (incl. temporizadores, contadores, marcas), máx.	10 kb/te
Marcas	
• Cantidad, máx.	8 kb/te; Tamaño del área de marcas
Área de direcciones	
Área de direcciones de periferia	
• Entradas	1 024 b/te
• Salidas	1 024 b/te
Imagen del proceso	
• Entradas, configurables	1 kb/te
• Salidas, configurables	1 kb/te
Configuración del hardware	
Nº de módulos por sistema, máx.	3 Communication Module, 1 Signal Board, 8 Signal Module
Hora	
Reloj	
• Reloj por hardware (reloj tiempo real)	Sí
• Desviación diaria, máx.	+/- 60 s/mes a 25 °C
• Duración del respaldo	480 h; típicamente
Entradas digitales	

Nº de entradas digitales	14; integrado
• De ellas, entradas usable para funciones tecnológicas	6; HSC (High Speed Counting)
Canales integrados (DI)	14
de tipo M	Sí
Número de entradas atacables simultáneamente	
Todas las posiciones de montaje	
— hasta 40 °C, máx.	14
Tensión de entrada	
• Valor nominal (DC)	24 V
• para señal "0"	6 V DC, con 1 mA
• para señal "1"	16 VDC at 2.6 mA
Intensidad de entrada	
• para señal "1", típ.	1 mA
Retardo de entrada (a tensión nominal de entrada)	
para entradas estándar	
— parametrizable	0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,6 / 3,2 / 6,4 / 10,0 / 12,8 / 20,0 µs; 0,05 / 0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,6 / 3,2 / 6,4 / 10,0 / 12,8 / 20,0 ms
— en transición "0" a "1", máx.	0,1 µs
— en transición "0" a "1", máx.	20 ms
para entradas de alarmas	
— parametrizable	Sí
para contadores/funciones tecnológicas:	
— parametrizable	Sí; Monofásica: 3 con 100 kHz / 3 con 30 kHz, Diferencial: 3 con 80 kHz / 3 con 30 kHz
Longitud del cable	
• Longitud del cable apantallado, máx.	500 m; 50 m para funciones tecnológicas
• Longitud de cable no apantallado, máx.	300 m; Para funciones tecnológicas: No
Salidas digitales	
Número de salidas	10; Relé
Canales integrados (DO)	10
Protección contra cortocircuito	No; a prever externamente
Poder de corte de las salidas	
• Con carga resistiva, máx.	2 A
• con carga tipo lámpara, máx.	30 W con DC, 200 W con AC
Retardo a la salida con carga resistiva	
• "0" a "1", máx.	10 ms; máx.
• "1" a "0", máx.	10 ms; máx.
Frecuencia de conmutación	
• de las salidas de impulsos, con carga óhmica, máx.	1 Hz
Salidas de relé	

• Nº máx. de salidas de relé, integradas	10
• Nº de salidas relé	10
• Número de ciclos de maniobra, máx.	mecánicos: 10 millones, con tensión nominal de carga: 100000
Longitud del cable	
• Longitud del cable apantallado, máx.	600 m
• Longitud de cable no apantallado, máx.	160 m
Entradas analógicas	
Nº de entradas analógicas	2
Canales integrados (AI)	2; 0 a 10 V
Rangos de entrada	
• Tensión	Sí
Rangos de entrada (valores nominales), tensiones	
• 0 a +10 V	Sí
• Resistencia de entrada (0 a 10 V)	≥100 kohmios
Longitud del cable	
• Longitud del cable apantallado, máx.	100 m; trenzado y apantallado
Salidas analógicas	
Nº de salidas analógicas	0
Formación de valores analógicos	
Tiempo de integración y conversión/resolución por canal	
• Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.	10 bit
• Tiempo de integración parametrizable	Sí
• Tiempo de conversión (por canal)	625 µs
Sensor	
Sensores compatibles	
• Sensor a 2 hilos	Sí
1. Interfaz	
Tipo de interfaz	PROFINET
Norma física	Ethernet
con aislamiento galvánico	Sí
Detección automática de la velocidad de transferencia	Sí
Autonegociación	Sí
Autocrossing	Sí
Funcionalidad	
• PROFINET IO-Device	Sí
• PROFINET IO-Controller	Sí
PROFINET IO-Controller	
• Soporta arranque priorizado	
— Nº de IO-Devices posibles, máx.	16

Funciones de comunicación	
Comunicación S7	
• Soporta servidor iPAR	Sí
• como servidor	Sí
• Como cliente	Sí
Comunicación IE abierta	
• TCP/IP	Sí
• ISO-on-TCP (RFC1006)	Sí
• UDP	Sí
servidores web	
• Soporta servidor iPAR	Sí
• Páginas web definidas por el usuario	Sí
Funciones de test y puesta en marcha	
Estado/forzado	
• Estado/Forzado de variables	Sí
• Variables	Entradas/salidas, marcas, DB, E/S de periferia, tiempos, contadores
Forzado permanente	
• Forzado permanente	Sí
Búfer de diagnóstico	
• existente	Sí
Traces	
• Número de Traces configurables	2; por cada Trace son posible 612 kb/tes datos
Funciones integradas	
Nº de contadores	6
Frecuencia de contaje (contadores), máx.	100 kHz
Frecuencímetro	Sí
Posicionamiento en lazo abierto	Sí
Regulador PID	Sí
Nº de entradas de alarma	4
Nº de salidas de impulsos	4
Aislamiento galvánico	
Aislamiento galvánico módulos de E digitales	
• Aislamiento galvánico módulos de E digitales	500 V AC durante 1 minuto
• entre los canales, en grupos de	1
Aislamiento galvánico módulos de S digitales	
• Aislamiento galvánico módulos de S digitales	Relé
• entre los canales	No
• entre los canales, en grupos de	1
Diferencia de potencial admisible	

entre diferentes circuitos	500 V DC entre 24 V DC / 5 V DC
CEM	
Inmunidad a perturbaciones por descargas de electricidad estática	
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad a perturbaciones por descargas de electricidad estática IEC 61000-4-2 	Sí
— Tensión de ensayo con descarga en aire	8 kV
— Tensión de ensayo para descarga por contacto	6 kV
Inmunidad a perturbaciones conducidas	
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad a perturbaciones en cables de alimentación según IEC 61000-4-4 	Sí
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad a perturbaciones por cables de señales IEC 61000-4-4 	Sí
Inmunidad a perturbaciones por tensiones de choque (sobretensión transitoria)	
<ul style="list-style-type: none"> • por los cables de alimentación según IEC 61000-4-6 	Sí
Inmunidad a perturbaciones conducidas, inducidas mediante campos de alta frecuencia	
<ul style="list-style-type: none"> • Inmunidad a campos electromagnéticos radiados a frecuencias radioeléctricas según IEC 61000-4-6 	Sí
Emisión de radiointerferencias según EN 55 011	
<ul style="list-style-type: none"> • Clase de límite A, para aplicación en la industria 	Sí; Grupo 1
<ul style="list-style-type: none"> • Clase de límite B, para aplicación en el ámbito residencial 	Sí; Si se garantiza mediante medidas oportunas que se cumplen los valores límite de la clase B según EN 55011
Grado de protección y clase de protección	
Grado de protección según EN 60529	
<ul style="list-style-type: none"> • IP20 	Sí
Normas, homologaciones, certificados	
Marcado CE	Sí
Homologación UL	Sí
cULus	Sí
RCM (anterior C-TICK)	Sí
Homologación FM	Sí
Homologaciones navales	
<ul style="list-style-type: none"> • Homologaciones navales 	Sí
Condiciones ambientales	
Caída libre	
<ul style="list-style-type: none"> • Altura de caída máx. (en el embalaje) 	0,3 m; Cinco veces, en embalaje de envío
Temperatura ambiente en servicio	
<ul style="list-style-type: none"> • Durante fase de servicio, mínima 	-20 °C
<ul style="list-style-type: none"> • máx. 	60 °C

• Montaje horizontal, mín.	-20 °C
• Montaje horizontal, máx.	60 °C
• Montaje vertical, mín.	-20 °C
• Montaje vertical, máx.	60 °C
Temperatura de almacenaje/transporte	
• mín.	-40 °C
• máx.	70 °C
Presión atmosférica	
• En servicio mín.	796 hPa
• En servicio máx.	1 080 hPa
• Almacenamiento/transporte, mín.	660 hPa
• Almacenamiento/transporte, máx.	1 080 hPa
• Altitud de servicio permitida	-1000 a 2000 m
Humedad relativa del aire	
• En servicio máx.	96 %; sin condensación
• Rango permitido (sin condensación) a 25 °C	96 %
Vibraciones	
• Vibraciones	Montaje en pared 2 g; perfil DIN, 1 g
• En servicio, según DIN IEC 60068-2-6	Sí
Ensayo de choques	
• ensayado según DIN IEC 60068-2-27	Sí; IEC 68, parte 2-27; semisinusoide: fuerza de choque 16 g (valor de cresta), duración 11 ms
Concentraciones de sustancias contaminantes	
— SO2 con HR < 60% sin condensación	SO2: < 0,5 ppm; H2S: < 0,1 ppm; HR < 60% sin condensación
programación	
Lenguaje de programación	
— KOP	Sí
— FUP	Sí
— SCL	Sí
Vigilancia de tiempo de ciclo	
• configurable	Sí
Dimensiones	
Ancho	110 mm
Alto	100 mm
Profundidad	76 mm
Pesos	
Peso, aprox.	476 g
Última modificación:	06.02.2016

ANEXO 14: DATASHEET MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS SB-1232 SIEMENS

SIEMENS

Data sheet

6ES7232-4HA30-0XB0

SIMATIC S7-1200, Analog output, SB 1232, 1 AO, +/-10 V DC (12 bit resol.) or 0-20mA (11 bit resol.)



General information	
Product type designation	SB 1232, AO 1x12 bit
Input current	
from backplane bus 5 V DC, t _{fp} .	16 mA
Output voltage	
Power supply to the transmitters	
• Supply current, max.	25 mA
Power loss	
Power loss, t _{fp} .	1.6 W
Analog inputs	
Number of analog inputs	0
Analog outputs	
Number of analog outputs	1
Cycle time (all channels) max.	Voltage: 300 μS (R), 750 μS (1 uF) Current: 600 ms (1 mH); 2 ms (10 mH)
Output ranges, voltage	
• -10 V to +10 V	Yes

Output ranges, current	
• 0 to 20 mA	Yes
Load impedance (in rated range of output)	
• with voltage outputs, min.	1 000 Ω
• with current outputs, max.	600 Ω
Cable length	
• shielded, max.	100 m; shielded, twisted pair
Analog value generation for the outputs	
Conversion principle	Differential
Integration and conversion time/resolution per channel	
• Resolution with overrange (bit including sign), max.	12 bit
Errors/accuracies	
Temperature error (relative to output range), (+/-)	25 °C ±0.5%, to 55 °C ±1%
Interrupts/diagnostics/status information	
Alarms	Yes
Diagnostics function	Yes
Diagnostics indication LED	
• for status of the outputs	Yes
Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
CSA approval	Yes
UL approval	Yes
cULus	Yes
FM approval	Yes
RCM (formerly C-TICK)	Yes
KC approval	Yes
Marine approval	Yes
Ambient conditions	
Free fall	
• Fall height, max.	0.3 m; five times, in product package
Ambient temperature during operation	
• min.	-20 °C
• max.	60 °C
• horizontal installation, min.	-20 °C
• horizontal installation, max.	60 °C
• vertical installation, min.	-20 °C
• vertical installation, max.	60 °C
Ambient temperature during storage/transportation	
• min.	-40 °C
• max.	70 °C

Air pressure acc. to IEC 60068-2-13	
• Storage/transport, min.	660 hPa
• Storage/transport, max.	1 080 hPa
Relative humidity	
• Operation at 25 °C without condensation, max.	95 %
Pollutant concentrations	
• SO ₂ at RH < 60% without condensation	SO ₂ : < 0.5 ppm; H ₂ S: < 0.1 ppm; RH < 60% condensation-free
Mechanics/material	
Enclosure material (front)	
• Plastic	Yes
Dimensions	
Width	38 mm
Height	62 mm
Depth	21 mm
Weights	
Weight, approx.	40 g
last modified:	11/26/2019 