

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
VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMÁTICO CON SINTONIZACIÓN PID
POR ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)”**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Aquino Cuti, Isaac

Ortega Puma, Yenny Mercedes

Para optar el Título Profesional de

Ingeniero Mecatrónico

Asesor:

Dr. Siles Nates Fernando David

Arequipa – Perú

2023

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 20 de Diciembre del 2022

Dictamen: 003487-C-EPIMMEM-2022

Visto el borrador del expediente 003487, presentado por:

2010220251 - AQUINO CUTI ISAAC

2009241812 - ORTEGA PUMA YENNY MERCEDES

Titulado:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMÁTICO CON SINTONIZACIÓN PID POR ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)

Nuestro dictamen es:

APROBADO

1936 - MESTAS RAMOS SERGIO ORLANDO
DICTAMINADOR



2213 - QUISPE CCACHUCO MARCELO JAIME
DICTAMINADOR



2397 - CUADROS MACHUCA JUAN CARLOS
DICTAMINADOR



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMÁTICO CON SINTONIZACIÓN PID POR ALGORITMO DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	9%
2	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	4%
3	www.maximator.de Fuente de Internet	2%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	www.cp.com Fuente de Internet	1%
6	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	es.wikipedia.org Fuente de Internet	1%

8	Fuente de Internet	1 %
9	et4113neumatica.blogspot.com Fuente de Internet	1 %
10	ingenieriaei.com.mx Fuente de Internet	1 %
11	www.coursehero.com Fuente de Internet	1 %
12	pdfcoffee.com Fuente de Internet	1 %
13	docplayer.es Fuente de Internet	1 %
14	vdocumento.com Fuente de Internet	1 %
15	catedra.ing.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
16	como-funciona.com Fuente de Internet	<1 %
17	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
18	repositoriodspace.unipamplona.edu.co Fuente de Internet	<1 %
19	www.dynaparencoders.com.br Fuente de Internet	<1 %

20	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
21	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
22	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
23	geox.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
24	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
25	Submitted to Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid Trabajo del estudiante	<1 %
26	1library.co Fuente de Internet	<1 %
27	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
28	repositorio.ucsg.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
29	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.espe.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
31	www.mundocompresor.com	

Fuente de Internet

<1 %

32

Jorge Felipe Ramírez León, Luis Alfredo Moreno García, Fabio Restrepo Tello, Francisco Camacho García et al. "Guia de instrucción en artroscopia de hombro", Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología, 2019

Publicación

<1 %

33

Submitted to Instituto de Educación Superior Tecnológico Privado de la Construcción CAPECO S.A.C.

Trabajo del estudiante

<1 %

34

renati.sunedu.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

35

www.tdx.cat

Fuente de Internet

<1 %

36

issuu.com

Fuente de Internet

<1 %

37

uk.mathworks.com

Fuente de Internet

<1 %

38

tesis.ipn.mx

Fuente de Internet

<1 %

39

www.marianatoledanodiaz.com

Fuente de Internet

<1 %

40	laccei.org Fuente de Internet	<1 %
41	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
42	biblus.us.es Fuente de Internet	<1 %
43	Submitted to Universidad Internacional del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
44	repositorio.utp.edu.co Fuente de Internet	<1 %
45	renatiqa.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
46	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
47	Submitted to VIT University Trabajo del estudiante	<1 %
48	avesis.gazi.edu.tr Fuente de Internet	<1 %
49	fddocuments.es Fuente de Internet	<1 %
50	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
51	moam.info	

Fuente de Internet

<1 %

52

riubu.ubu.es

Fuente de Internet

<1 %

53

Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador

Trabajo del estudiante

<1 %

54

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

55

repositorio.undac.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

56

repositorio.unicach.mx

Fuente de Internet

<1 %

57

repositorio.upao.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

58

upcommons.upc.edu

Fuente de Internet

<1 %

59

www.buenastareas.com

Fuente de Internet

<1 %

60

www.morebooks.de

Fuente de Internet

<1 %

61

Submitted to Escuela Politecnica Nacional

Trabajo del estudiante

<1 %

62	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
63	Submitted to Universidad Técnica Nacional de Costa Rica Trabajo del estudiante	<1 %
64	de.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
65	tr-ex.me Fuente de Internet	<1 %
66	uvadoc.uva.es Fuente de Internet	<1 %
67	rd.udb.edu.sv:8080 Fuente de Internet	<1 %
68	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
69	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
70	busdoc.i.daimler.com Fuente de Internet	<1 %
71	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
72	view.genial.ly Fuente de Internet	<1 %

73	www.polodelconocimiento.com Fuente de Internet	<1 %
74	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
75	repository.udistrital.edu.co Fuente de Internet	<1 %
76	Submitted to Cranfield University Trabajo del estudiante	<1 %
77	Submitted to Universidad de Valladolid Trabajo del estudiante	<1 %
78	archive.org Fuente de Internet	<1 %
79	repositorio.utn.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
80	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
81	repositorio.upse.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
82	www.cpmlnic.org.ni Fuente de Internet	<1 %
83	www.mathworks.com Fuente de Internet	<1 %
84	Manuel Garcia-Lopez, Pedro Ponce, Luis Arturo Soriano, Arturo Molina, Jaime José	<1 %

Rodriguez. "Mejora de la vida útil en los Módulos de Electrónica de Potencia de un BLDCM mediante la Optimización de un Control Difuso", Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 2018

Publicación

85

baixardoc.com

Fuente de Internet

<1 %

86

dehesa.unex.es

Fuente de Internet

<1 %

87

okeanis.lib.teipir.gr

Fuente de Internet

<1 %

88

ri.ues.edu.sv

Fuente de Internet

<1 %

89

www.mysciencework.com

Fuente de Internet

<1 %

90

ccv.fhi.org.hk

Fuente de Internet

<1 %

91

doczz.fr

Fuente de Internet

<1 %

92

fr.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

93

repositorio.uax.es

Fuente de Internet

<1 %

94

repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx

Fuente de Internet

<1 %

95

repository.ucc.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

96

repository.usta.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

97

www.cien.org.gt

Fuente de Internet

<1 %

98

www.dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

99

www.itsup.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

100

www.metarevistas.org

Fuente de Internet

<1 %

101

Margaret K. Vernon. "Time Use as a Way of Examining Contexts of Adolescent Development in the United States", *Loisir et Société / Society and Leisure*, 2005

Publicación

<1 %

102

catalonica.bnc.cat

Fuente de Internet

<1 %

103

dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

104

idus.us.es

Fuente de Internet

<1 %

105	mecanicavirtual.iespana.es Fuente de Internet	<1 %
106	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
107	rockola.no-ip.com Fuente de Internet	<1 %
108	sigarra.up.pt Fuente de Internet	<1 %
109	txirlo.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %
110	www.cacic2016.unsl.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
111	www.cecytcampeche.edu.mx Fuente de Internet	<1 %
112	www.cs.uoi.gr Fuente de Internet	<1 %
113	www.if.ufrgs.br Fuente de Internet	<1 %
114	www.informativos.net Fuente de Internet	<1 %
115	Dilek Sabancı, Serhat Kılıçarslan, Kemal Adem. "An application on forecasting for stock market prices: hybrid of some metaheuristic algorithms with multivariate adaptive	<1 %

regression splines", International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2023

Publicación

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

“A Dios, que guía mi camino y me brinda todo lo necesario para crecer como ser humano y profesional, a mis padres Juan y Francisca, por su constante apoyo y pese a todas las complicaciones que tuve siempre estuvieron ahí deseosos que logré este paso en mi vida”

Isaac Aquino Cuti

“A Dios, a mi madre Evangelina y a toda mi familia que siempre me guiaron en toda mi carrera académica y me brindaron su apoyo incondicional para poder cumplir esta meta.”

Yenny Mercedes Ortega Puma

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.

A todos mis docentes en especial a los ingenieros Fernando Siles Nates, Marcelo Quispe Ccachuco y Sergio Mestas Ramos, que me dieron los conocimientos, recomendaciones y apoyo constante para poder realizar el presente proyecto de tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCION	xviii
CAPITULO I	1
1. Planteamiento del Problema	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Principal	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Justificación Técnica.....	3
1.3.2. Justificación Académica.....	3
1.3.3. Justificación Social.....	3
1.4. Hipótesis.....	4
1.5. Variables.....	4
1.6. Antecedentes	4
1.7. Alcances y Limitaciones.....	7
1.8. Campo, Área y Línea.....	8
1.9. Ubicación Espacial y Temporal.....	8

CAPITULO II	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. Neumática.....	10
2.2.1. Clasificación de la Neumática.....	11
2.2.1.1. Sistemas de alta presión.....	11
2.2.1.2. Sistemas de presión intermedia	11
2.2.1.3. Sistemas de baja presión.....	11
2.2.2. Componentes neumáticos	12
2.2.2.1. Sistema de producción de aire	13
2.2.2.2. Sistema de utilización.....	14
2.2.2.3. Válvula de retención.....	21
2.3. Neumática Proporcional	24
2.3.1. Válvulas proporcionales.....	24
2.3.1.1. Válvula proporcional de caudal 5/3	25
2.3.1.2. Válvula proporcional de presión.....	26
2.3.2. Controlador lógico programable (PLC)	28
2.3.2.1. Partes de los PLCs	29
2.3.2.2. Tipos de PLCs	30
2.3.3. Motor Neumático	30
Funcionamiento del motor Neumático	32
2.3.3.1. Motor de Engranaje	33
2.3.3.2. Motor de Pistones	33
2.3.3.3. Motor de Paletas	34
2.3.4. Encoder Rotativo	35
2.3.4.1. Tipos de Encoders	36

2.4.	Fundamentos del sistema de control.....	37
2.4.1.	Conceptos teóricos	39
2.4.1.1.	Error	39
2.4.1.2.	Exactitud.....	39
2.4.1.3.	Precisión	39
2.4.2.	Métodos clásicos de identificación de sistemas	39
2.4.3.	Métodos alternativos	41
2.4.3.1.	Análisis Espectral	41
2.4.4.	Sistemas no lineales	42
2.5.	Sistemas de control.....	43
2.5.1.	Controladores PID.....	44
2.5.1.1.	Control P.....	45
2.5.1.2.	Control I	46
2.5.1.3.	Control D.....	46
2.5.1.4.	Control PI	46
2.5.1.5.	Control PD.....	47
2.5.1.6.	Control PID	48
2.5.2.	Método clásico de sintonización de controladores PID	49
2.5.2.1.	Método de Ziegler-Nichols (lazo abierto)	49
2.6.	Algoritmo de enjambre de partículas.....	50
2.6.1.	Algoritmo de enjambre de partículas (PSO)	50
2.6.2.	Heurística y Metaheurística.....	51
2.6.3.	Optimización de algoritmo de enjambre de partículas	52
2.6.4.	Parámetros de control.....	54
CAPITULO III.....		56
3.	Implementación de la planta y modelamiento matemático	56

3.1.	Diseño e implementación	56
3.1.1.	Diseño del circuito neumático.....	56
3.1.2.	Diseño del circuito eléctrico.....	57
3.2.	Modelamiento matemático	59
3.2.1.	Adquisición de datos.....	60
3.2.1.1.	Diagrama de conexiones eléctricas para adquisición de datos	60
3.2.1.2.	Programación del controlador para la adquisición de datos	60
3.2.1.3.	Procedimiento de registro y adquisición de datos	65
3.2.2.	Modelamiento matemático de la planta	69
3.3.	Función de transferencia del sistema.....	74
CAPITULO IV.....		77
4.	Sintonización de parámetros PID para el sistema de control	77
4.1.	Sintonización a través de PID Compact de Tia Portal.....	77
4.1.1.	Procedimiento de declaración y escalamiento de variables	788
4.1.2.	Configuración del bloque PID Compact	79
4.1.3.	Optimización y obtención de parámetros PID	80
4.2.	Sintonización a través de Sisotool de Matlab.....	84
4.2.1.	Declaración de función de transferencia	84
4.3.	Sintonización a través de algoritmo PSO	88
4.3.1.	Metaheurística PSO.....	88
4.3.2.	Comportamiento de los individuos	89
4.3.3.	Comportamiento del individuo líder	90
4.3.4.	Nomenclatura del algoritmo PSO	91
4.3.5.	Modelamiento del algoritmo PSO.....	92
4.3.6.	Implementación del algoritmo PSO	97
4.3.7.	Sintonización de parámetros a través del algoritmo PSO	100

5.	Análisis y comparación de resultados	104
5.1.	Comparación de resultados a través de Simulink	104
5.2.	Comparación de resultados a través de Trace de Tia Portal	106
5.2.1.	Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por PID Compact	107
5.2.2.	Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por Sisotool de Matlab	107
5.2.3.	Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por el algoritmo PSO	108
5.2.4.	Comparación de los resultados obtenidos	109
5.3.	Análisis de resultados por estándares de desempeño.....	110
5.3.1.	Análisis de estándares de desempeño obtenidos por PID Compact	113
5.3.2.	Análisis de estándares de desempeño obtenidos por Sisotool de Matlab	114
5.3.3.	Análisis de estándares de desempeño obtenidos por algoritmo PSO	115
5.3.4.	Comparación de resultados obtenidos.....	116
	CONCLUSIONES	118
	RECOMENDACIONES	120
	REFERENCIA.....	121
	ANEXOS	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Formula de controladores de Ziegler Nichols de lazo abierto	50
Tabla 2.	Sintonizaciones de parámetros realizadas a través del algoritmo PSO.....	102
Tabla 3.	Parámetros PID para la comparación de resultados.....	104
Tabla 4.	Parámetros K_p , T_i y T_d	106
Tabla 5.	Descripción de características de cada tipo de sintonización	110
Tabla 6.	Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización PID Compact.....	114
Tabla 7.	Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización Sisotool.....	115
Tabla 8.	Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización PSO	116
Tabla 9.	Comparación de resultados de índices de desempeño para los 3 métodos de sintonización	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ilustración de un fuelle neumático.....	9
Figura 2.	Ilustración de la Ley de Boyle.....	11
Figura 3.	Descripción de componentes de un circuito neumático.....	13
Figura 4.	Corte lateral de compresor neumático Maximator tipo DEL 15 y leyenda	16
Figura 5.	Compresor neumático de pistones.....	19
Figura 6.	Tornillos helicoidales de un compresor doble rotor	20
Figura 7.	Eje de un turbocompresor.....	21
Figura 8.	Válvula antirretorno o válvula check.....	22
Figura 9.	Conexiones neumáticas rápidas.....	23
Figura 10.	Simbología válvula continua de 5/3.....	25
Figura 11.	Corte de válvula proporcional 5/3	25
Figura 12.	Válvula limitadora de presión	26
Figura 13.	Corte de válvula proporcional de presión	27
Figura 14.	Diagrama de bloques de un Controlador Lógico Programable (PLC)	29
Figura 15.	Tipos de PLC	30
Figura 16.	Ventajas de los motores neumáticos	31
Figura 17.	Motor Neumático	31
Figura 18.	Funcionamiento del motor	32
Figura 19.	Motor neumático de engranajes	33
Figura 20.	Motor neumático de pistones	34
Figura 21.	Motor neumático de paletas	34
Figura 22.	Encoder rotativo.....	35
Figura 23.	Esquema Encoder Rotativo	36
Figura 24.	Tipos de Encoders Rotativos.....	36

Figura 25.	Esquema de control clásico.....	44
Figura 26.	Diagrama de bloques.....	45
Figura 27.	Método de caracterización de Ziegler Nichols.....	49
Figura 28.	Fundamentos de PSO.....	50
Figura 29.	Modelos de topologías.....	54
Figura 30.	Vista del movimiento de una partícula en el algoritmo PSO.....	54
Figura 31.	Simulación en Fluidsim del circuito neumático del sistema.....	57
Figura 32.	Diagrama general de control del proceso.....	57
Figura 33.	Diagrama eléctrico del circuito de control del sistema.....	58
Figura 34.	Vista general de la planta.....	59
Figura 35.	Diagrama de conexiones eléctricas para la adquisición de datos.....	60
Figura 36.	Bits de marcas de ciclo internos del PLC.....	61
Figura 37.	Segmentos de generación de pulsos para la rampa de tensión.....	61
Figura 38.	Segmento de escalamiento de salida de la rampa de tensión.....	62
Figura 39.	Segmento de adquisición y escalamiento de la velocidad del motor neumático.....	62
Figura 40.	Bloque de adquisición de datos Datalog.....	63
Figura 41.	Bloques de configuración de parámetros Datalog.....	63
Figura 42.	Traslado de datos hacia el registro interno del Datablog.....	64
Figura 43.	Configuración de bloque de programa de la adquisición.....	64
Figura 44.	Configuración del servidor web del controlador.....	66
Figura 45.	Servidor web del PLC.....	66
Figura 46.	Menú principal servidor web del PLC.....	67
Figura 47.	Navegador de archivos del servidor web.....	67
Figura 48.	Muestra de los datos obtenidos de la adquisición.....	68
Figura 49.	Representación gráfica de la rampa para la adquisición de datos.....	68
Figura 50.	Representación gráfica de la respuesta en velocidad del motor neumático.....	69

Figura 51.	Representación gráfica de la rampa sin zona muerta	70
Figura 52.	Representación gráfica de la respuesta del sistema sin zona muerta.....	70
Figura 53.	Creación de variables y asignación de datos en Matlab	71
Figura 54.	Ventana de System Identification Tool.....	71
Figura 55.	Importación de datos a la herramienta ident	72
Figura 56.	Comprobación gráfica de datos ingresados.....	72
Figura 57.	Muestra de distintos modelos de estimación.....	73
Figura 58.	Análisis de distintos modelos de estimación.....	73
Figura 59.	Resultados obtenidos de la estimación.....	74
Figura 60.	Exportación del modelo al espacio de trabajo.....	75
Figura 61.	Construcción de la función de transferencia	75
Figura 62.	Respuesta de la función de transferencia al escalón.....	76
Figura 63.	Tabla de variables del proceso de control PID.....	78
Figura 64.	Escalamiento de la variable de salida del proceso	78
Figura 65.	Escalamiento de la variable de entrada del proceso	79
Figura 66.	Generación de bloque PID Compact y asignación de variables	79
Figura 67.	Parámetros de configuración de bloque PID Compact.....	80
Figura 68.	Forzando la variable del set point	81
Figura 69.	Optimización de parámetros PID	81
Figura 70.	Optimización de parámetros PID	82
Figura 71.	Parámetros PID obtenidos en la sintonización	83
Figura 72.	Prueba de distintos valores de consigna con los parámetros obtenidos.....	83
Figura 73.	Parámetros PID obtenidos en la sintonización	84
Figura 74.	Entorno de Sisotool.....	85
Figura 75.	Arquitectura del controlador	85
Figura 76.	Sintonizacion PID	86

Figura 77.	Respuesta al escalón del controlador	86
Figura 78.	Diagrama de Bode y lugar de raíces del controlador diseñado.	87
Figura 79.	Exportación y obtención de parámetros PID.....	87
Figura 80.	Ingreso de datos al algoritmo de Matlab	97
Figura 81.	Definición de variables del modelo matemático	98
Figura 82.	Cálculo del costo.....	98
Figura 83.	Asignación de parámetros del algoritmo.....	99
Figura 84.	Estructura del algoritmo PSO.....	99
Figura 85.	Impresión de datos generados por el algoritmo.....	100
Figura 86.	Ejecución del algoritmo PSO	100
Figura 87.	Resultados del algoritmo PSO	101
Figura 88.	Gráfico de evolución de los parámetros del algoritmo PSO	101
Figura 89.	Diagrama de bloques – comparación de parámetros PSO.....	102
Figura 90.	Gráfico de comparación de parámetros PID sintonizados por PSO	103
Figura 91.	Diagrama de bloques en Simulink para la comparación de resultados	105
Figura 92.	Respuesta de los controladores simulados en Simulink	105
Figura 93.	Muestra de trace obtenido en Tia Portal.....	106
Figura 94.	Respuesta obtenida a través de la sintonización por PID Compact.....	107
Figura 95.	Respuesta obtenida a través de la sintonización por Sisotool de Matlab	108
Figura 96.	Respuesta obtenida a través de la sintonización por el algoritmo PSO	108
Figura 97.	Comparación de respuestas obtenidas a través de los distintos métodos de sintonización ..	109
Figura 98.	Diagrama para comparación de respuestas de controladores PID.....	111
Figura 99.	Comparación de respuestas de controladores PID	112
Figura 100.	Logging de datos de simulink	112
Figura 101.	Variables exportadas al Workspace de Matlab	113
Figura 102.	Análisis de datos exportados para sintonización PID Compact	113

Figura 103.	Análisis de datos exportados para sintonización Sisotool.....	114
Figura 104.	Análisis de datos exportados para sintonización PSO.....	115



RESUMEN

En el control de distintos tipos de procesos industriales resalta como variable importante a tomar en cuenta la regulación de la velocidad de motores ya sean de tipo eléctrico, hidráulico o neumático. Particularmente los motores neumáticos cuentan con distintas ventajas y son más aplicables en distintos tipos de aplicaciones industriales, por lo que resulta necesario el análisis y estudio de nuevas tecnologías de ingeniería que incrementen la eficiencia de los procesos de control.

De manera inicial, en el capítulo 3, se procedió a realizar el diseño e implementación de la planta electro neumática haciendo uso de distintos componentes necesarios para el control del proceso. De igual manera, se realizó el modelamiento matemático de la planta, obteniendo la función de transferencia que caracteriza al sistema.

Posteriormente, en el capítulo 4, se realizó la sintonización de parámetros PID a través de distintos métodos convencionales y el algoritmo PSO, obteniendo información de las distintas respuestas que nos brinda cada método de sintonización.

Finalmente, en el capítulo 5, se realizó el análisis de los datos obtenidos en el capítulo 4, determinando de ésta manera qué método nos brinda una mejor respuesta de acuerdo a los requerimientos planteados a través de la aplicación de distintos estándares de desempeño.

Tras realizar las pruebas necesarias se obtuvo que para el algoritmo PSO, la mejor respuesta se obtuvo al realizar la sintonización con: 40 iteraciones, 60 partículas, $K_1=1.2$, $K_2=1.2$ y $\omega=1.5$. Basándonos en éstas condiciones en la sintonización, se obtuvieron los parámetros PID que nos brindaron la mejor respuesta, los cuales son $K_p=0,0345691$, $K_i= 0.0135271$ y $K_d=0$.

Palabras Clave: PID, PSO, Velocidad, Sintonización, Control

ABSTRACT

In the control of different types of industrial processes, the regulation of the speed of motors, whether electric, hydraulic or pneumatic, stands out as an important variable to take into consideration. In particular, pneumatic motors have different advantages and are more selectable in different types of industrial applications, which is why the analysis and study of new engineering technologies that increase the efficiency of control processes is necessary.

Initially, in chapter 3, the design and implementation of the electro-pneumatic plant was carried out using different components necessary for process control. In the same way, the mathematical modeling of the plant was carried out, obtaining the transfer function that characterizes the system.

Subsequently, in chapter 4, the tuning of PID parameters was carried out through different conventional methods and the PSO algorithm, obtaining information on the different responses provided by each tuning method.

Finally, in chapter 5, the analysis of the data obtained in chapter 4 was carried out, thus determining which method gives us a better response according to the requirements raised through the application of different performance standards.

After carrying out the necessary tests, it was obtained that for the PSO algorithm, the best response was obtained when tuning with: 40 iterations, 60 particles, $K_1=1.2$, $K_2=1.2$ and $\omega=1.5$. Based on these tuning conditions, the PID parameters that gave us the best response were obtained, which are $K_p=0.0345691$, $K_i=0.0135271$ and $K_d=0$.

Keywords: PID, PSO, Speed, Tuning, Control

INTRODUCCION

La optimización del control de procesos tiende a adquirir cada vez más importancia hoy en día, teniendo en cuenta que la tendencia de la industria es que los procesos sean cada vez más automatizados e independientes. Es por ello que resulta necesario optimizar el control de procesos aplicando nuevas técnicas de ingeniería con el propósito de incrementar la eficiencia de los procesos de control, lo cual también se traducirá en optimizar la obtención de distintos parámetros necesarios en la aplicación de sistemas de control.

Es así como podemos identificar distintos procesos y variables industriales, para los cuales se aplican distintas estrategias de control dependiendo de las características de cada planta o proceso industrial. Para el desarrollo de ésta tesis, tomamos en cuenta el control de la variable de velocidad.

De ésta manera, inicialmente se diseñará e implementará una planta neumática con el propósito de poder analizar distintas estrategias clásicas de sintonización de parámetros PID además de el algoritmo PSO, y posteriormente analizar la respuesta que da cada estrategia por distintos métodos.

Se comprobará que la aplicación de algoritmos genéticos como el PSO nos brindará una mejor respuesta desde el punto de vista de la teoría del control, así como nos permitirá realizar un mejor control de procesos reduciendo el coste computacional, incrementando así la eficiencia del control de los procesos y variables industriales.

En el desarrollo de ésta tesis se abordarán distintas disciplinas de la ingeniería, tomando en consideración que un sistema de control de velocidad se compondrá de elementos de distintos tipos que interactúan entre sí para poder controlar la variable.

CAPITULO I

1. Planteamiento del Problema

En la actualidad la mayoría de motores de la industria son de dos tipos principales, de combustión interna y eléctricos, paralelos a ellos, pero menos visibles, encontramos otras formas de energía como la neumática, la hidráulica, entre otras formas de dar movimiento a los equipos y sistemas actuales.

El empleo de nuevas tecnologías en el rubro de la neumática en los campos científicos e industriales da lugar a investigaciones y estudios sobre el funcionamiento de los motores neumáticos y su control, este medio de moción cuenta con la ventaja que no requiere de sistemas de lubricación o enfriamiento complejos como los otros sistemas.

Los procesos neumáticos requieren ser automatizados, ello con el fin de alcanzar el control y monitoreo de los mismos y buscando la implementación de sistemas de alta precisión y flexibilidad que permitan controlar variables físicas como posición, velocidad, fuerza, entre otros; en consecuencia a esto se hace pertinente el desarrollo de la aplicación industrial de determinar la velocidad del motor neumático en procesos donde se requiere registrar velocidades fijas, variables y de precisión como por ejemplo: manipuladores neumáticos, accionamiento de cuchillas, prensado, atornillado, donde se aplica el resultado de esta investigación.

1.1. Identificación del problema

Siendo este tipo de proceso de vital importancia en la industria, no se cuenta con este tipo de aplicación en el laboratorio de Automatización, por lo tanto, es que se propone el presente proyecto de investigación que atacará esta falencia; este problema

es medible y solucionable, ya que se desarrollará también el control PID y la utilización de algoritmos heurísticos como el PSO (algoritmo de enjambre de partículas) para encontrar los parámetros del controlador PID aplicado a sistemas no lineales, para esto es necesario acondicionar y contar con los equipos y accesorios adecuados que permitan el correcto aprendizaje, en este caso el control de la velocidad del motor neumático que posee una masa oscilante.

Al ser un módulo, su esencia es ser flexible, ya que se podrá acoplar a los módulos existentes o funcionar stand-alone; cabe mencionar que existe poca documentación acerca del tema, siendo esta una aplicación muy importante en el campo de la neumática siendo plausible su implementación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

Diseñar e implementar un sistema de control de velocidad de un motor neumático con sintonización PID por algoritmo de enjambre de partículas (PSO).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un módulo para el sistema de control de velocidad de un motor neumático.
- Realizar el modelamiento matemático del sistema implementado a través de la herramienta ident de Matlab.
- Sintonización de los parámetros PID utilizando el algoritmo de enjambre de partículas (PSO).
- Realizar el análisis y la comparación de los resultados de la sintonización de parámetros por PSO y métodos convencionales, tanto de manera simulada en el modelo obtenido como de manera real en la planta implementada.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación Técnica

- En la actualidad, en cuanto al uso de motores en entornos industriales, se encuentra mucho más propagado el uso de motores de combustión interna y motores eléctricos, por lo que se crea la necesidad de fomentar el desarrollo de nuevas energías como la neumática. Además de ello, teniendo en cuenta que se requiere profundizar más en el estudio de algoritmos genéticos y su aplicación en sistemas de automatización, se plantea el estudio del algoritmo PSO para el desarrollo de aplicaciones en sistemas de control.

1.3.2. Justificación Académica.

- Realizar la implementación de sistemas electroneumáticos aplicables a la industria que se implementen a través de controladores lógico programables, válvulas proporcionales y sensores de velocidad.
- Aplicar métodos convencionales en el diseño de controladores PID y la sintonización de sus parámetros, así como el estudio de nuevos métodos de sintonización a través de algoritmos genéticos.
- Promover la investigación y el desarrollo de métodos de control modernos basados en algoritmos heurísticos, como el PSO, y estudiar sus posibles aplicaciones en la automatización industrial.

1.3.3. Justificación Social.

- El modo de control PID, por sus ventajas, es utilizado en la mayoría de procesos industriales del ámbito industrial peruano.
- En el Perú y el resto del mundo, los sistemas neumáticos se encuentran en una amplia gama de procesos industriales, teniendo en cuenta las distintas ventajas

que nos da frente a otras tecnologías, especialmente en términos de automatización de procesos.

- Promover el entrenamiento de los estudiantes a través del uso de equipos y la aplicación de herramientas utilizados en entornos industriales reales, impulsando a que tengan una mejor proyección de cara al desarrollo de nuevas tecnologías en el campo del control de procesos industriales.

1.4. Hipótesis

- Hipótesis (Fundamentación): Dado los métodos de sintonización PID para control en lazo cerrado que se han desarrollado desde 1942 a la fecha, así como los métodos de identificación experimental de sistemas y las herramientas computacionales existentes. Argumentos o razonamientos científicos.
- Propositiones del marco teórico (Deducción): Es probable obtener los parámetros del control PID (K_p , K_i , K_d), para controlar la velocidad de un motor neumático, en cualquier rango de sus velocidades angulares nominales, con una performance óptima cuantificable y comparable con los parámetros de establecimiento de sistemas en lazo cerrado

1.5. Variables

- Independiente: Función de transferencia del sistema.
- Dependiente: Parámetros de sintonización PID, K_p , K_i , K_d , siendo estas variables del tipo cuantitativo.

1.6. Antecedentes

Para llevar a cabo la presente investigación se procedió a investigar distintos antecedentes locales, nacionales e internacionales, de manera inicial por los locales,

Basurco & Orihuela (Arequipa - 2019), en su tesis titulada “Implementación de un sistema de control de posición neumática de una carga referencial por medio de un actuador lineal y tarjetas PID”, planteó como objetivo implementar un sistema neumático de posicionamiento lineal con una carga de trabajo para el laboratorio de control y automatización. Siendo esta una investigación descriptiva donde finalmente se concluye con la implementación de sistema y evaluación de diversas propuestas para la implementación del módulo, la propuesta Festo fue de alta compatibilidad con el laboratorio además de no necesitar componentes extras para su adaptación y montaje; a nivel nacional, Checa (Piura - 2019), en su tesis titulada “Proyecto de construcción, ensamblaje y pruebas para un motor neumático”, ejecutó los procedimientos correspondientes para la construcción, ensamblaje y posteriormente las pruebas necesarias del motor neumático de aletas donde el perfil de estator se difiere a los convencionales. Siendo una investigación descriptiva, donde se concluye con la estimación de la velocidad de rotación cuando es sometida a una carga externa determinada y se instituye una presión de trabajo, donde los valores de mejor respuesta fueron los que se sometieron a una presión de trabajo de 7 bares. Ampliando la búsqueda a antecedentes internacionales, Ambriz (México - 2015), en su investigación titulada “Proyecto e implementación de un controlador PID autoajustable que tiene como base determinado algoritmo Híbrido”, con el objetivo de ejecutar el diseño e implementación algoritmo Híbrido Heurístico para la optimización y sintonizar parámetros de un controlador PID para control de respuesta del voltaje en capacitores flotados de un convertidor de energía estático de topología multicelular, al ser igualmente una investigación descriptiva, se concluyó la capacidad del algoritmo de no solo sintonizar sino también optimizar parámetros de controlador tipo PID, el control PID muestra resultados ideales en simulaciones.

Por su parte Kennedy y Eberhart (New York – 1995), en “A new optimizer using particle swarm theory”, describen a la optimización por enjambre de partículas basándose en un grupo de aves, a través del estudio de un ave que viaja en manada y se desplaza a lo largo de un espacio de búsqueda conforme a ciertas reglas. Los autores brindaron el concepto de utilizar el método de Optimización por enjambre de partículas para optimizar funciones no lineales. Similarmente, a nivel nacional, Ruben Lliuyacc Blas (Sevilla - 2014), “Sintonización de un controlador PID usando particle swarm optimization para el AGC de un sistema eléctrico multitarea”, menciona la utilización principal del algoritmo PSO, que es resolver complejos sistemas lineales y no lineales como un enfoque moderno y alternativo para la sintonización del controlador PID, por último, mencionando a Ismail Atacak, Bayram Küçük (Croacia - 2017), en su “PSO-based pid controller design for an energy conversion system using compressed air”, nos hace referencia a sus resultados experimentales que demuestran que el controlador PID basado en PSO proporciona un rendimiento de control más robusto que el controlador PID de tiempo discreto en diversas condiciones de funcionamiento de un motor neumático debido a sus características no lineales.

A su vez, en los artículos científicos y papers, Arturo Duque Marín (Cali – 2016) en “Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de enjambres” nos muestra la implementación en un PLC Allen Bradley de una técnica de inteligencia de enjambres cuya función es determinar el modelo matemático de un sistema o proceso, luego con el modelo del sistema encontrado, se calculan los parámetros de un controlador PID que garantizan un comportamiento deseado del sistema. La técnica usada es conocida como optimización por enjambre de partículas; ampliando, (López – 2014) en su paper titulado “Evaluación de desempeño de dos técnicas de optimización bio-inspiradas: Algoritmos Genéticos y

Enjambre de Partículas”, se enfocó en la resolución de problemas de estimación e identificación de las constantes para la sintonización de controladores PID a través del uso de dos técnicas de búsqueda bio-inspirada con la intención de evaluar su desempeño en el ajuste del bloque PID: Algoritmos Genéticos y Enjambre de Partículas viéndose que ambas estructuras han probado ser capaces resolver de forma eficiente problemas de búsquedas no informadas en sistemas complejos.

1.7. Alcances y Limitaciones

Este proyecto de investigación tiene por alcance el diseño e implementación de un sistema de control de velocidad de un motor neumático con sintonización PID aplicando el algoritmo de enjambre de partículas (PSO).

Se implementará un módulo para controlar el motor neumático mediante un controlador lógico programable (PLC) y una válvula proporcional reguladora de presión, un encoder rotativo y un generador de señales que permitirá la adquisición de datos, para así probar la eficacia de los diferentes métodos de sintonización de los parámetros PID.

El sistema contiene no linealidades y se hace muy dificultosa la labor del modelado mediante ecuaciones diferenciales o funciones de transferencia es por eso que se hace uso de herramientas computacionales, para la sintonización de los parámetros del controlador PID se opta por utilizar algoritmos como el PSO debido a que son más robustos en la optimización de problemas no lineales.

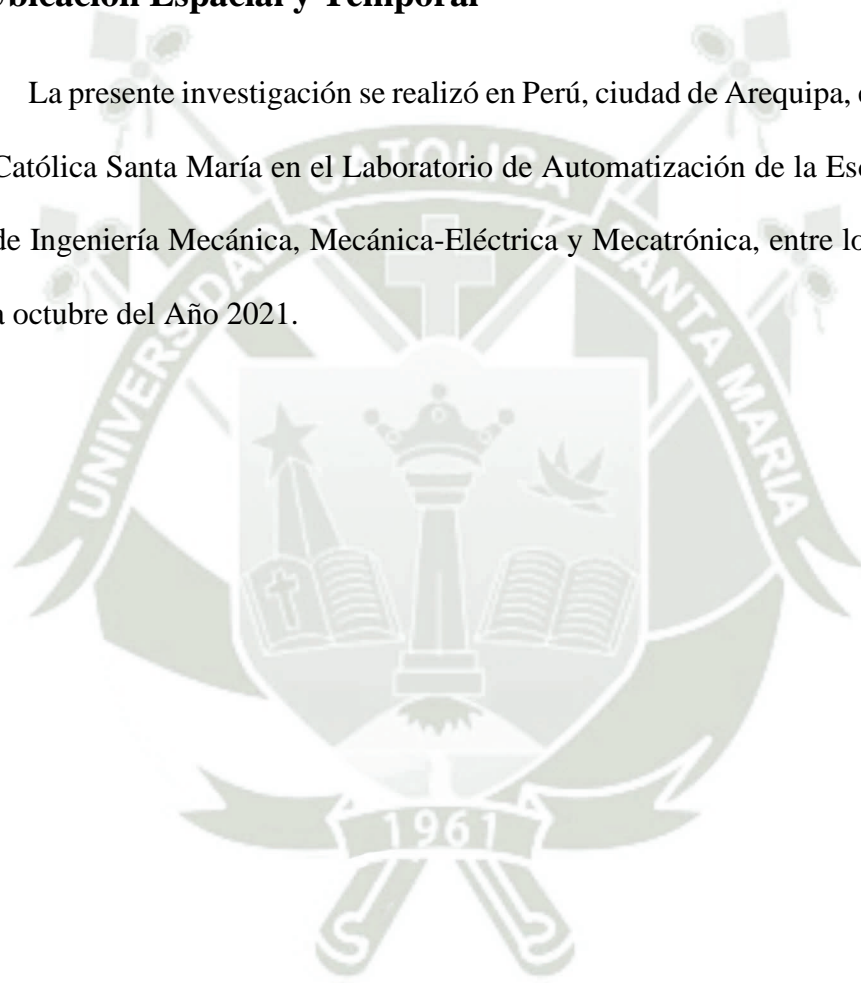
Escasas alternativas de proveedores para la adquisición de componentes neumáticos y de control, materiales tecnológicos de control de velocidad de motores neumáticos.

1.8. Campo, Área y Línea

- Campo: Ingeniería Mecatrónica
- Área: Automatización y control
- Línea: Automatización aplicada a la Neumática

1.9. Ubicación Espacial y Temporal

La presente investigación se realizó en Perú, ciudad de Arequipa, en la Universidad Católica Santa María en el Laboratorio de Automatización de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica, entre los meses de junio a octubre del Año 2021.



CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

De acuerdo a Peralta (2020), la neumática y sus primeras aplicaciones datan del año 2.500 a.C. con el uso de los primeros muelles de soplado, a partir de ese punto, siguió su desarrollo hasta que bastantes siglos después fue aplicada en la fabricación de órganos musicales, en la minería y en siderurgia; según la historia, hace aproximadamente 20 siglos, un griego llamado Tesibios se dice que construyó un cañón neumático comprimía aire en unos rudimentarios cilindros de madera, es así que, al efectuar el disparo, la expansión restablecía la energía almacenada aumentando así el alcance del mismo. En el siglo XIX se dio el desarrollo de las herramientas neumáticas, como martillos, en 1880 se inventó el primero, posteriormente los sistemas de tuberías neumáticas para envío de correspondencia y de dinero. La incorporación de la neumática en mecanismos y la automatización comienza a mediados del siglo XX.

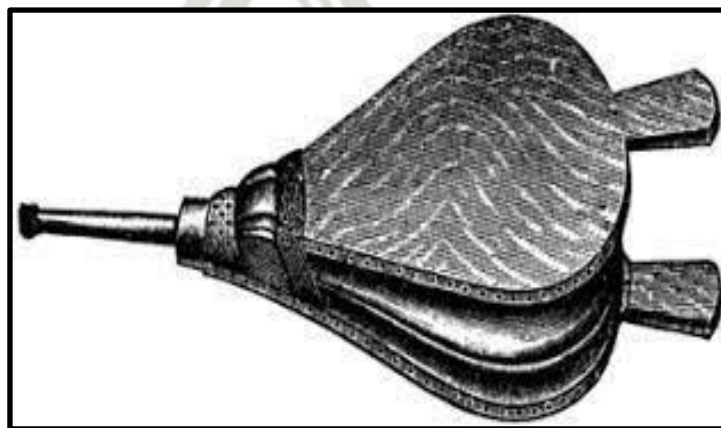


Figura 1. Ilustración de un fuelle neumático
Fuente: (wikiwand.com)

Una definición aceptada es que la neumática es la rama de la mecánica que estudia el equilibrio y movimiento de flujos gaseosos, además 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 fluido gaseoso y, por lo tanto, al aplicarle una fuerza se comprime en el recipiente que lo contiene, sigue manteniendo esta compresión y luego devuelve la energía acumulada cuando se le permite expandirse, según dicta la ley de los gases ideales.

Posteriormente el uso de la neumática e hidráulica se extendió a los frenos de los automóviles, actualmente la tendencia es el uso de una dirección asistida eléctrica, pero durante mucho tiempo, la asistencia ha sido únicamente hidráulica.

Todos los campos de producción, llámese manufactura, construcción, minería necesitan y prescinden de energía neumática para poder llevarse a cabo, por ejemplo, el prensado de chapas de acero, atornillado, roscados en automóviles, inflado de botellas, etc.

2.2. Neumática

Los sistemas neumáticos en general se basan en la ley de Boyle-Mariotte.

Para Baudilio (2011), la ley de Boyle: “Esta ley establece que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente, cuando la temperatura es constante.”

Edme Mariotte también llegó a la misma conclusión que Boyle, pero no publicó sus trabajos hasta 1676, esta es la razón por la que en muchos libros encontramos esta ley con el nombre de Ley de Boyle y Mariotte.

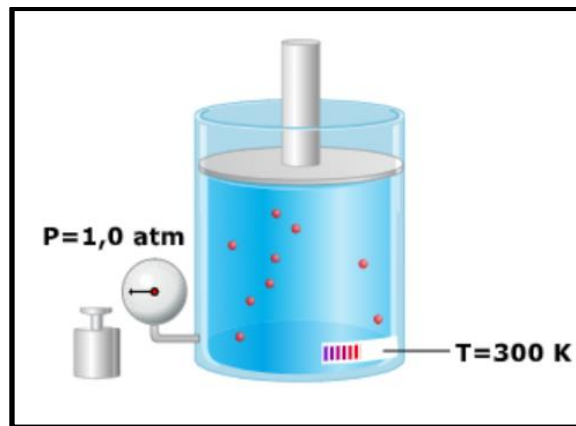


Figura 2. Ilustración de la Ley de Boyle
Fuente: https://www.educaplus.org/gases/ley_boyle.html

2.2.1. Clasificación de la Neumática

Por ejemplo, los sistemas neumáticos en aeronaves se clasifican en tres grupos:

2.2.1.1. Sistemas de alta presión

Oscilan de 65 kg/cm^2 a 350 kg/cm^2 . Son los sistemas neumáticos de potencia, propiamente dichos. El sistema no puede ser recargado durante el vuelo y está reservado para operaciones de emergencia (tren y frenos). Emplean un depósito con dos válvulas (de carga y de control) (Wikipedia, 2022).

2.2.1.2. Sistemas de presión intermedia

Oscilan entre presiones de 7 kg/cm^2 a 65 kg/cm^2 . No tienen depósito y toman el aire del compresor de la turbina. Se usan para deshielo del motor y ala (entre otros) (Wikipedia, 2022).

2.2.1.3. Sistemas de baja presión

Presiones que oscilan de $0,1 \text{ kg/cm}^2$ a 7 kg/cm^2 . Los sistemas neumáticos de baja presión se encuentran, sobre todo, en los aviones pequeños con motor de émbolo. Suministran aire para el accionamiento de instrumentos giroscópicos, circuitos de algunos pilotos automáticos, deshielo neumático,

etc. La mayoría de los sistemas neumáticos de potencia empleados tienen una presión nominal en torno a los 250 kg/cm² (3.500 psi), lo que supondría que generalmente son sistemas de alta presión (Wikipedia, 2022).

2.2.2. Componentes neumáticos

Los componentes de una instalación neumática que se verán y de las funciones principales que cumple cada componente, se verán en el siguiente mapa conceptual, los cilindros neumáticos, los actuadores de giro y los motores de aire suministran la fuerza y el movimiento para sujetar, mover, formar y procesar los materiales. Para poder accionar y controlar estos actuadores se requiere componentes neumáticos, por ejemplo, unidades de acondicionamiento de aire para preparar el aire comprimido y válvulas de control de la presión, el caudal y el sentido del movimiento de los actuadores como el cilindro de doble efecto (Cevallos y Tapia, 2015).

Un sistema neumático básico, se compone de dos secciones principales:

- El sistema de producción y distribución de aire.
- El sistema de consumo del aire o utilización.

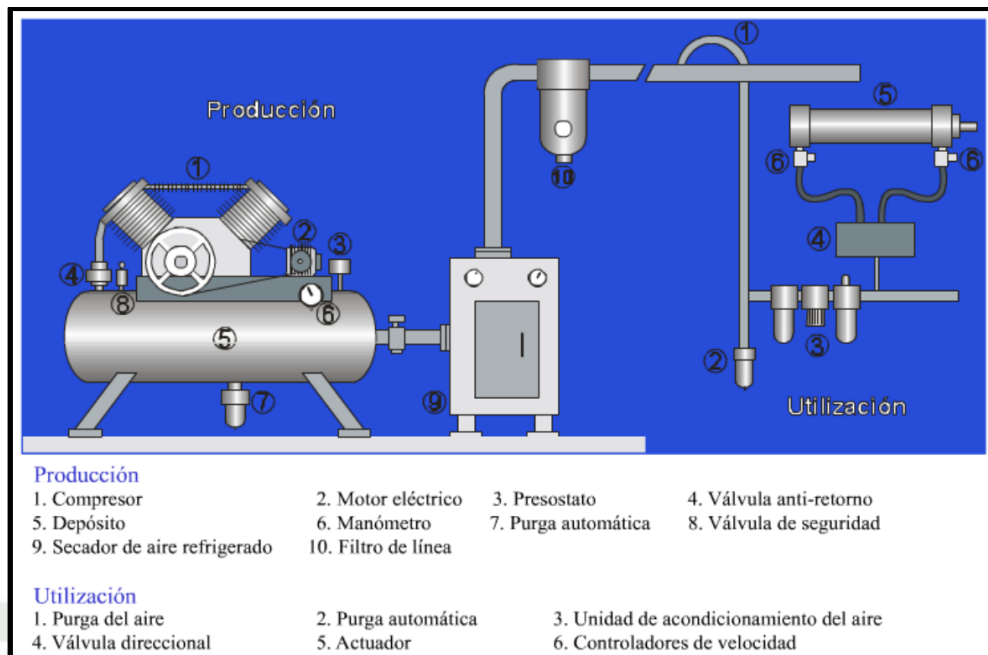


Figura 3. Descripción de componentes de un circuito neumático.

Fuente: et4113neumatica.blogspot.com

2.2.2.1. Sistema de producción de aire

1. **Compresor:** El aire aspirado a presión atmosférica se comprime y se entrega a presión más elevada al sistema neumático. Se transforma así la energía mecánica en energía neumática.
2. **Motor eléctrico:** Suministrará energía mecánica de compresor. Transformar la energía eléctrica en energía mecánica.
3. **Presostato:** Controlar el motor eléctrico detectando la presión en el depósito. Se regula a la presión máxima a la que desconecta el motor y a la presión mínima a la que vuelve a arrancar el motor.
4. **Válvula anti-retorno:** Deja pasar el aire comprimido del compresor al depósito e impide su retorno cuando el compresor o está parado.
5. **Depósito:** Almacenar el aire comprimido, su tamaño está definido por la capacidad del compresor. Cuanto más grande sea su volumen, más largo serán los intervalos de funcionamiento o del compresor.

6. Manómetro: Indica la presión del depósito.
7. Purga automática: Purga el agua que se condensa en el depósito sin necesidad de supervisión.
8. Válvula de seguridad: Expulsa el aire comprimido si la presión en el depósito sube por encima de la presión permitida.
9. Secador de aire refrigerado: Enfriar el aire comprimido hasta pocos grados por encima del punto de congelación y condensa la mayor parte de la humedad del aire, lo que evita tener agua en el resto del sistema.
10. Filtro de línea: Al encontrarse en la tubería principal, este filtro debe tener una caída de presión mínima y la capacidad de eliminar el aceite lubricante en suspensión. Sirve para mantener la línea libre de polvo, agua y aceite (SMC ESPAÑA, S.A., 2002).

2.2.2.2. Sistema de utilización

1. Purga del aire: Para el consumo, el aire es tomado de la parte superior de la tubería principal para permitir que la condensación ocasiona permanezca en la tubería principal; cuando alcanza un punto bajo, una salida de agua desde la parte inferior de la tubería irá a una purga automática eliminando así el condensado.
2. Purga automática: Cada tubo descendiente, debe tener una purga en su extremo inferior. El método más eficaz es una purga automática e impide que el agua se quere en el tubo en el caso en que se descuide la purga manual.
3. Unidad de acondicionamiento del aire: Acondiciona el aire comprimido para suministrar aire limpio a una presión óptima y ocasionalmente añade

lubricante para alargar la duración de los componentes del sistema neumático que necesitan lubricación.

4. Válvula direccional: Proporcionan presión y pone a escape alternativamente las dos conexiones del cilindro para controlar la dirección de movimiento.
5. Actuador: Transforma la energía potencial del aire comprimido en trabajo mecánico. En la figura se muestra un cilindro lineal, pero puede ser también un actuador de giro o una herramienta neumática, etcétera.
6. Controladores de velocidad: Permiten una regulación fácil y continua de la velocidad de movimiento del actuador (SMC ESPAÑA, S.A., 2002).

2.2.2.2.1. Compresor

Los compresores operan por medio de una transmisión de presión. Están destinados a la compactación de gases y aire comprimido a altas presiones y son accionados con una presión de pilotaje de hasta máximo 10 bar de aire comprimido. Esta presión de pilotaje es necesaria para comprimir el medio de provisión a una presión de servicio superior. La relación de transmisión resulta de la superficie del pistón neumático grande en relación con la del pistón de alta presión pequeño. La presión previa deberá seleccionarse en función del tipo de compresor (Maximator GmbH, 2021).

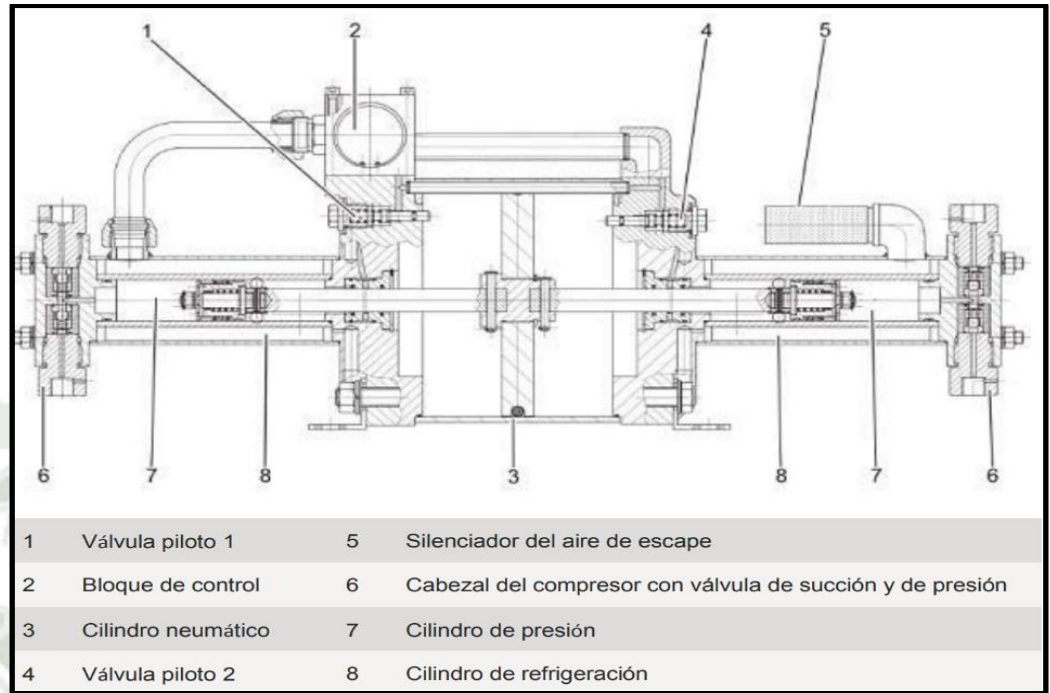


Figura 4. Corte lateral de compresor neumático Maximator tipo DEL 15 y leyenda

Fuente: Manual de Instrucciones MAXIMATOR GmbH, pag 15

El fabricante Maximator GmbH y su manual de instrucciones de su línea de compresores, nos dan las siguientes definiciones:

Válvula piloto: Las válvulas piloto alternan la posición final por medio del pistón neumático. El pistón neumático activa las válvulas piloto en las posiciones finales y estas transmiten los impulsos de aire al bloque de control. Las válvulas piloto ventilan y purgan así la caja de accionamiento del bloque de control. De este modo se desliza el bloque de control de una posición final a la otra (Maximator GmbH, 2021).

Bloque de control: El bloque de control carga de manera alterna la superficie superior e inferior del pistón neumático con aire comprimido. El accionamiento del bloque de control se realiza mediante las válvulas piloto y garantiza que el aire de pilotaje llegue al lado opuesto correspondiente del pistón neumático (Maximator GmbH, 2021).

Módulo de pilotaje: El módulo de pilotaje está destinado al alojamiento del aire de pilotaje (aire comprimido) y acciona el pistón de alta presión del compresor mediante una barra de pistones y comprime así el medio de provisión correspondiente a una presión más alta (Maximator GmbH, 2021).

Cabezal del compresor con válvulas de admisión y de escape: El cabezal del compresor cierra la cámara de compresión y la separa físicamente de la presión ambiental. El cabezal del compresor contiene las válvulas de admisión y de escape. A través de estas válvulas de admisión y de escape el gas que se va a comprimir entra en la cámara de compresión del compresor y la abandona (Maximator GmbH, 2021).

Módulo de compresión: El módulo de compresión del compresor comprime el gas correspondiente. El módulo de compresión consta de un cilindro de aire comprimido, el cabezal del compresor con las válvulas de admisión y de escape y el pistón de alta presión con los elementos sellantes y de guía (Maximator GmbH, 2021).

Silenciador del aire de escape: El silenciador del aire de escape tiene como fin la disipación silenciosa del aire de pilotaje en expansión hacia fuera del compresor. Una vez realizado el trabajo, el aire de pilotaje sale del compresor a través del silenciador del aire de escape. Dependiendo del modelo de compresor, el silenciador del aire de escape puede ser de plástico o de aluminio (Maximator GmbH, 2021).

Cilindro de refrigeración: El cilindro de refrigeración aísla y refrigera el módulo de compresión del compresor. El cilindro de refrigeración rodea al cilindro de alta presión. El aire de pilotaje en expansión (muy frío) es

conducido al espacio entre ambos cilindros para refrigerar el cilindro de alta presión durante el servicio (Maximator GmbH, 2021).

A su vez los compresores necesitan los siguientes accesorios:

Unidad de control neumático: El uso de la unidad de control neumático posibilita un manejo sencillo de los compresores. La unidad de control neumático se compone de un filtro de presión, un repelente de agua, una válvula de cierre, un regulador de presión, un manómetro y una válvula de seguridad (Maximator GmbH, 2021).

Juegos de juntas: Los juegos de juntas individuales de los componentes del compresor se necesitan en todas las tareas de reparación de averías (Maximator GmbH, 2021).

2.2.2.2.2. Tipos de compresores

La compresión de aire se basa en dos principios: compresión de desplazamiento positivo y compresión dinámica.

Los compresores de desplazamiento positivo incluyen:

- Compresores de pistón
- Compresores scroll (de doble rotor)
- Compresores de tornillo rotativo (un solo rotor)

Los compresores dinámicos, también llamados compresores centrífugos, funcionan a una presión constante, y en lugar de un flujo (Chicago Pneumatic, 2022). Estos son los principios detrás de cada una de estas tecnologías:

a. Compresores de desplazamiento positivo

Los compresores de desplazamiento positivo tienen una cavidad que permite la entrada de un volumen de aire a presión atmosférica hacia la máquina. Esta cámara se vuelve más pequeña, disminuyendo el volumen y, al mismo tiempo, aumentando la presión del aire.

Por ejemplo, en los compresores de pistón, un pistón sube por el cilindro, reduciendo el espacio de arriba, lo que significa que el aire tiene que aumentar de presión para poder caber en una cavidad más pequeña (Chicago Pneumatic, 2022).



Figura 5. Compresor neumático de pistones

Fuente: <https://www.cp.com/es-latinamerica/compressors>

Los compresores de pistón pueden incorporar múltiples etapas de compresión para lograr la presión deseada, lo que los hace particularmente adecuados para aplicaciones de alta presión. Tanto los diseños lubricados como los libres de aceite están disponibles con diseños especiales y pueden comprimir otros gases además del aire (Chicago Pneumatic, 2022).



Figura 6. Tornillos helicoidales de un compresor doble rotor
Fuente: <https://www.cp.com/es-latinamerica/compressors>

En un compresor de doble rotor (tornillos o dientes), el aire queda atrapado y sellado entre los tornillo macho y hembra del rotor. A medida que los rotores giran y engranan, el aire va fluyendo a través de los rotores hacia un espacio cada vez más minúsculo y así la presión aumentará para permitir que el volumen de aire entre en la cámara de compresión.

Algunos tipos de compresores de aire tienen un solo rotor: de paletas, de anillo líquido y de desplazamiento (compresor scroll), en este tipo de compresor, un solo rotor en forma de espiral oscila contra una espiral fija similar.

Los compresores de desplazamiento también son llamados compresores de flujo constante, ya que el compresor producirá el mismo flujo de aire a unas RPM determinadas del motor, sin importar la presión de salida (Chicago Pneumatic, 2022).

b. Compresores dinámicos

En esta industria, es poco probable encontrar este tipo de compresor de aire, ya que normalmente se utilizan para la industria aeronáutica, más

comúnmente como compresores centrífugos o turbo compresores para vehículos y maquinaria de línea amarilla.

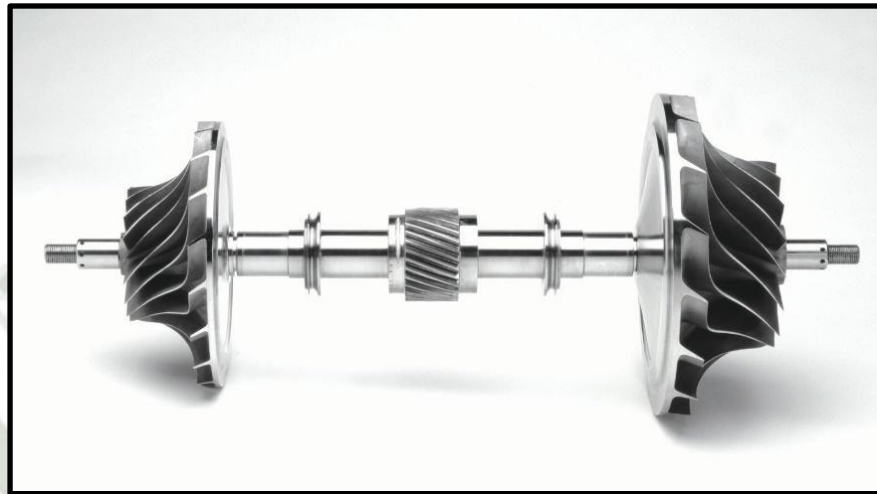


Figura 7. Eje de un turbocompresor

Fuente: <https://www.cp.com/es-latinamerica/compressors>

Lo que sucede en un compresor dinámico es que el aumento de presión se logra acelerando el aire usando un impulsor y luego desacelerando el aire en movimiento rápido en un difusor y una voluta para transferir la energía cinética a presión. Por lo general, encontrará un compresor centrífugo o turbo compresor en aplicaciones químicas y petroquímicas, generación de energía, plantas de fabricación de gases industriales, acero o vidrio e incluso en plantas de fertilizantes, de hecho, en cualquier lugar que necesite grandes volúmenes de aire (Chicago Pneumatic, 2022).

2.2.2.3. Válvula de retención

El fabricante alemán Festo nos da la siguiente definición:

“Otro elemento fundamental en las instalaciones son las válvulas de retención, las cuales se instalan en los compresores, en la tubería de salida a la red y antes de la brida de conexión. Su misión es evitar el retorno de aire cuando el compresor está parado. En algunos equipos, suele tener un doble trabajo porque también actúa como válvula de mínima presión.”



Figura 8. Válvula antirretorno o válvula check

Fuente: (https://www.festo.com/mx/es/p/valvula-de-antirretorno-id_H_HA_HB/)

2.2.2.3.1. Tuberías, cañerías y distribuciones

Siendo la mayoría de conexiones en la rama didáctica de Festo las mangueras plásticas, es que se usarán este tipo de distribuciones, cuya medida es de 4mm, pero veremos todo el resto de conexiones y tuberías. El tipo de tuberías son las siguientes:

- **Tubería de galvanizado:** Este tipo de tubería es la más utilizada en las redes neumáticas debido a su versatilidad y el bajo costo. Hay variedad de diámetros y sus componentes lo que facilita tener los materiales a la mano para una instalación. Entre sus desventajas del galvanizado se dan la corrosión que se forma al interior de la tubería con el tiempo aparte que ocasiona caídas de presión y que el flujo del aire comprimido no llegue con flujo laminar a los puntos de uso; además de la contaminación que se forma. Otra cuestión es las uniones pueden no ser estancas; aparte la instalación de la tubería lleva más tiempo (Ingeniería Energética Integral, 2017).
- **Tubería de PVC:** Este tipo de tuberías son ligeras, el precio y la disponibilidad de estos materiales son buenas. Entre sus desventajas, dependiendo de la temperatura del ambiente o la presión de trabajo,

puede ocurrir una dilatación en la tubería ocasionando un repentino desprendimiento de alguna parte de la red, también considerar que el aceite que desprenden los compresores puede no ser compatible con algunos plásticos (Ingeniería Energética Integral, 2017).

- **Tubería de acero inoxidable:** Las ventajas del acero inoxidable radica en la calidad de las paredes internas de la tubería, tiene un nivel de dilatación bajo y por lo regular se utiliza en instalaciones neumáticas que requieren una calidad del aire comprimido bastante rigurosa. La desventaja es el peso de este material, por lo cual la fijación de esta red debe ser por expertos incrementar el tiempo y el costo (Ingeniería Energética Integral, 2017).
- **Tubería de aluminio:** Este tipo de tubería, es la que tiene las mayores ventajas para una red de aire comprimido. Sus principales ventajas como material es su ligereza, baja dilatación, flexibilidad y principalmente que la calidad de las paredes internas las cuales evitan problemas como la corrosión u oxidación (Ingeniería Energética Integral, 2017).



Figura 9. Conexiones neumáticas rápidas

Fuente: <https://coperflex.com/producto/acoples-rapidos-neumaticos-2/>

2.3. Neumática Proporcional

“La técnica proporcional es novedosa en su aplicación neumática, aunque no tanto en el campo de la oleohidráulica. Está basada en el uso de válvulas proporcionales, bien sean éstas de caudal o de presión” (Jimenez, 2020).

2.3.1. Válvulas proporcionales

Una válvula continua o proporcional es aquella en la que la magnitud física del fluido (caudal o presión) a la salida de la válvula es proporcional a una señal eléctrica analógica de entrada, se explica con la fórmula: $X=K \cdot V$; donde X es presión o caudal; K es una constante de proporcionalidad y V es la señal analógica de tensión. Este tipo especial de válvulas al no ser ON/OFF, no se alimentan con 0 V ó 24 V, sino que se hace con una señal eléctrica que puede variar en un rango determinado (por ejemplo, de 0 a 10 V), cuyas salidas, en caso de ser realimentadas también pueden ser de 0-10 V, de 0-20 mA o de 4-20 mA (Jimenez, 2020).

De esta forma se obtienen valores intermedios de presión o caudal, a diferencia de las válvulas convencionales, las válvulas proporcionales se clasifican en:

- Válvulas de caudal: estas regulan este parámetro de manera continua entre un valor nulo y uno máximo. Por otra parte, son válvulas distribuidoras con corredera, teniendo un número de vías y de posiciones variable.
- Válvulas de presión: regulan este parámetro en su salida, entre un valor mínimo y un valor máximo, equivalente a la presión de entrada (Pilapinta, 2012).

Las válvulas proporcionales tienen infinitas posiciones en las cuales se cumple que la magnitud de salida es proporcional a la magnitud de la señal de entrada, en la figura siguiente se ve la representación de la válvula 5/3 según la norma ISO 1219 (Pilapinta, 2012).

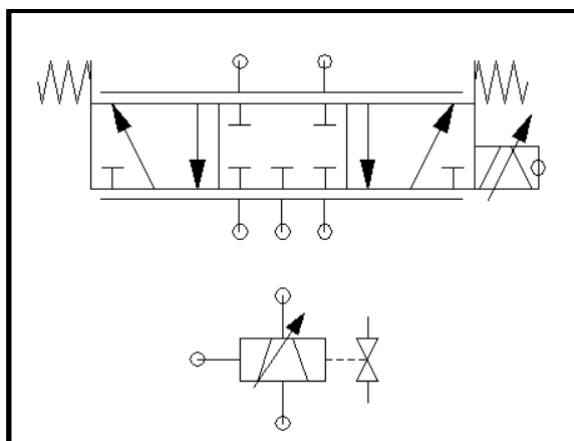


Figura 10. Simbología válvula continua de 5/3
Fuente: (Festo, Neumática Proporcional Nivel Básico, 1996)

2.3.1.1. Válvula proporcional de caudal 5/3

La válvula proporcional que se describe es la MPYE-5-1/8 de FESTO, representada en la figura 10. y esquematizada en la figura 11.

Su símbolo ISO, que aparece también en la figura 2.9., es análogo al de una válvula convencional 5/3 añadiendo dos rayas encima y debajo. Además, la flecha en el solenoide indica la posibilidad de variación en la señal de entrada, y el círculo a su costado del solenoide indica que recibe una señal de control (Pilapinta, 2012).

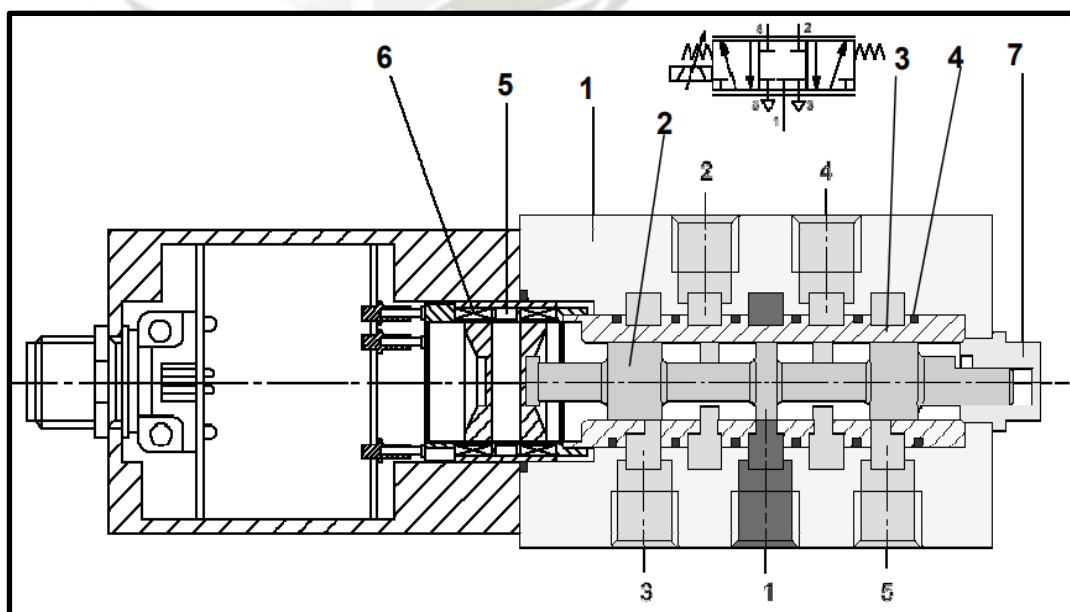


Figura 11. Corte de válvula proporcional 5/3
Fuente: Festo Didactics (2013)

El fabricante Festo nos da la siguiente definición sobre el funcionamiento y partes de la válvula proporcional 5/3:

La válvula proporcional dispone de un cuerpo (1) en el que se aloja la corredera (2), ésta se desplaza dentro de un casquillo fijo (3) alojado en el interior del cuerpo. Entre el casquillo y el cuerpo se disponen unas juntas (4) para mejorar la estanquidad. La corredera se desplaza directamente gracias a un solenoide proporcional (5), y por lo tanto puede posicionarse de manera variable y continua en función de la tensión de alimentación. Por otra parte, tiene un sensor de posición (6) que controla la posición de la corredera y permite su realimentación, es decir, modifica su posición si no se ha alcanzado la que debiera tener. El tapón (7) sirve para el mantenimiento, pudiendo extraer la corredera para su limpieza y puesta a punto (Pilapinta, 2012).

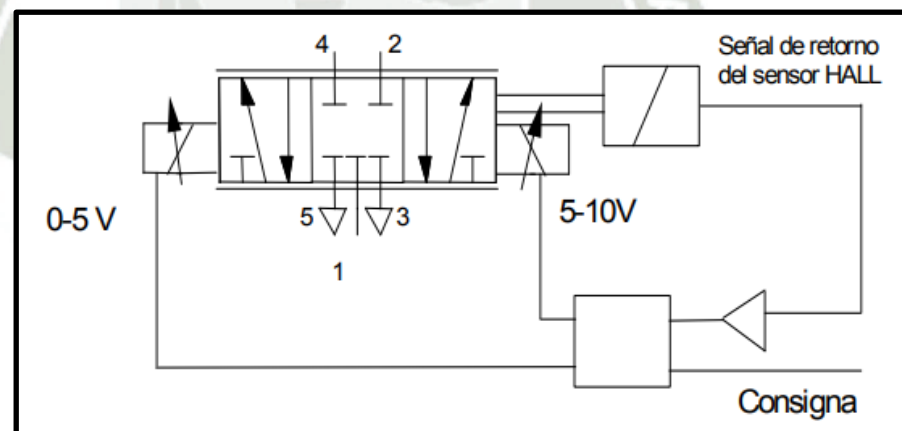


Figura 12. Válvula limitadora de presión

Fuente: Festo Didactics (2013)

2.3.1.2. Válvula proporcional de presión

Esta válvula proporcional tiene el mismo funcionamiento que la válvula reguladora de presión convencional: mantener constante la presión de salida, independiente de la magnitud de la presión a su entrada. Por otra parte, la presión constante de salida puede variarse, igual que en aquella.

La válvula proporcional de presión tiene una parte neumática análoga a la convencional, pero además posee determinados elementos electrónicos que la distinguen de aquella, y que la hace más exacta” (Pilapinta, 2012).

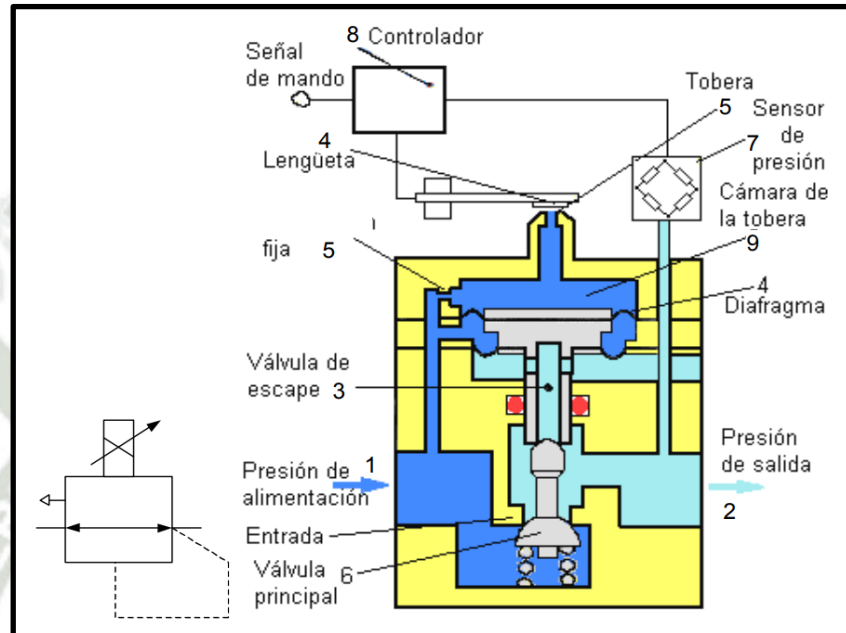


Figura 13. Corte de válvula proporcional de presión

Fuente: (Quispe, 2019)

2.3.1.2.1. Funcionamiento

Una tensión de alimentación de consigna hace que una lengüeta (4) (figura 2.12) ocupe una determinada posición ante una tobera (5), de tal manera que salga a escape un cierto caudal de aire, y se obtenga un determinado equilibrio, en el que la válvula principal (6) adquiera una determinada posición. En esta posición, esta válvula principal produce una pérdida de carga el punto de alimentación a la entrada de la válvula proporcional (1) y la de su salida (2), consiguiendo así que la presión de salida sea la de consigna. Si la presión obtenida en (2) fuese superior a la deseada, habría que aumentar la pérdida de carga, para ello el sensor de presión (7) se lo comunicaría al controlador (8), que haría que la lengüeta (4) abriese el paso hacia escape, disminuiría la presión en la cámara de la

tobera (9) y la válvula principal (6) se cerraría, produciendo mayor pérdida de carga, hasta alcanzar un nuevo equilibrio en el que la presión de salida fuese la deseada. Si la presión obtenida fuese inferior a la requerida las cosas sucederían a la inversa. La presión de salida de consigna puede variarse modificando la tensión de alimentación del controlador. (Almandoz, 2007)

2.3.2. Controlador lógico programable (PLC)

Se le conoce como PLC por sus siglas en inglés (Programmable Logic Controller) o controlador lógico programable; es una computadora que puede operar en ambientes de alto riesgo sirviendo como cerebro y enlace para los procesos industriales.

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.

Un autómata programable (AP) es un sistema electrónico programable diseñado para ser utilizado en un entorno industrial, que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones orientadas al usuario, para implantar unas soluciones específicas tales como funciones lógicas, secuencia, temporización, recuento y funciones aritméticas con el fin de controlar mediante entradas y salidas, digitales y analógicas diversos tipos de máquinas o procesos. (IEC 61131)

Para que un PLC pueda procesar y controlar cualquier sistema se necesita que este previamente programado para la tarea que va a realizar. Para poder programarlo se necesita un software que es específico dependiendo la marca y cada

programa cuenta con diversos lenguajes de programación en los cual escribes instrucción por instrucción lo que se va a procesar y controlar.

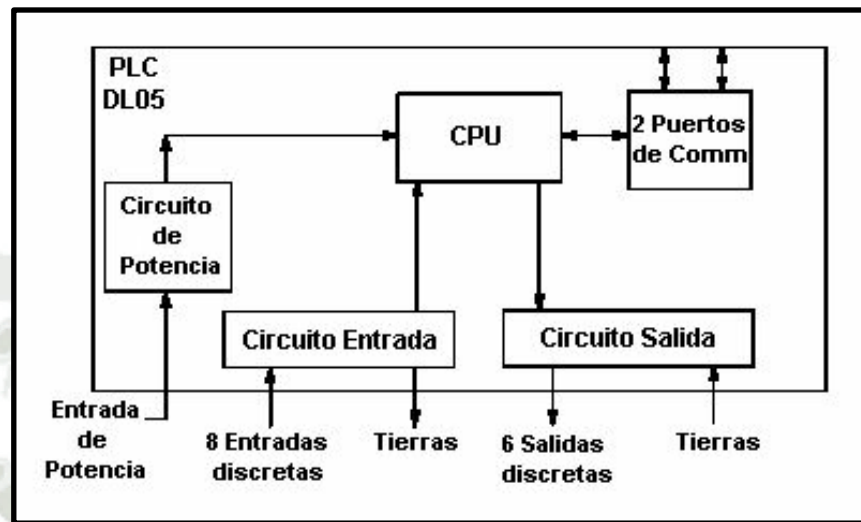


Figura 14. Diagrama de bloques de un Controlador Lógico Programable (PLC)

Fuente: <https://www.researchgate.net/profile/Fabio-Guerrero-2>

2.3.2.1. Partes de los PLCs

- Fuente de alimentación: La función de la fuente de alimentación, es suministrar la energía eléctrica a la CPU y demás tarjetas del PLC (García, 2020).
- CPU: La unidad central de procesamiento como su nombre lo indica se encarga de interpretar cada una de las instrucciones que tiene programado el PLC (García, 2020).
- Módulos: Son una de las características prescindibles ya que a través de los módulos de entrada y salida es posible hacer una conexión física entre el CPU y el sistema a controlar (García, 2020).
- Módulo de entrada A través de este módulo se le manda una retroalimentación al PLC para que este pueda procesar los datos (García, 2020).

2.3.2.2. Tipos de PLCs

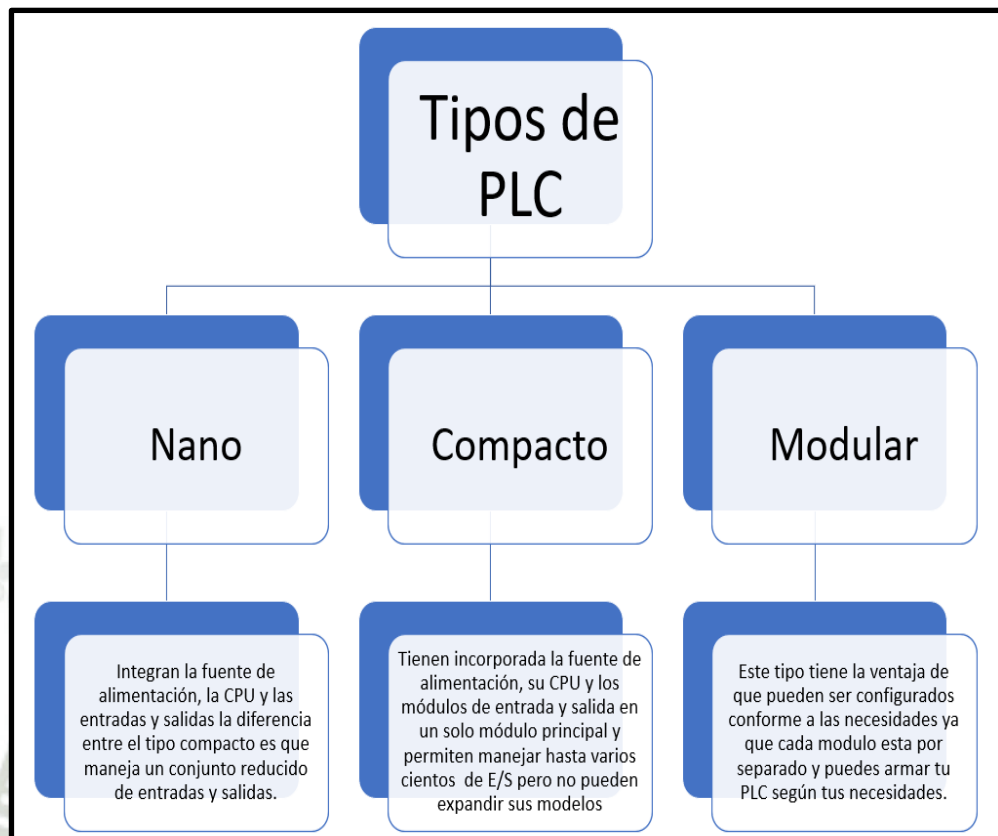


Figura 15. Tipos de PLC

Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Motor Neumático

El autor Creuss en Neumática e Hidráulica nos da la siguiente definición: “En los motores neumáticos, la energía potencial del aire comprimido es convertida a energía mecánica gracias a la diferencia de presiones entre el aire comprimido en la entrada y el aire a menor presión en la salida. Son parecidos a los contadores de desplazamiento positivo que cuentan el caudal por el número de volúmenes que el fluido ha llenado en la unidad de tiempo.”

Alguna de las ventajas en motores neumáticos:

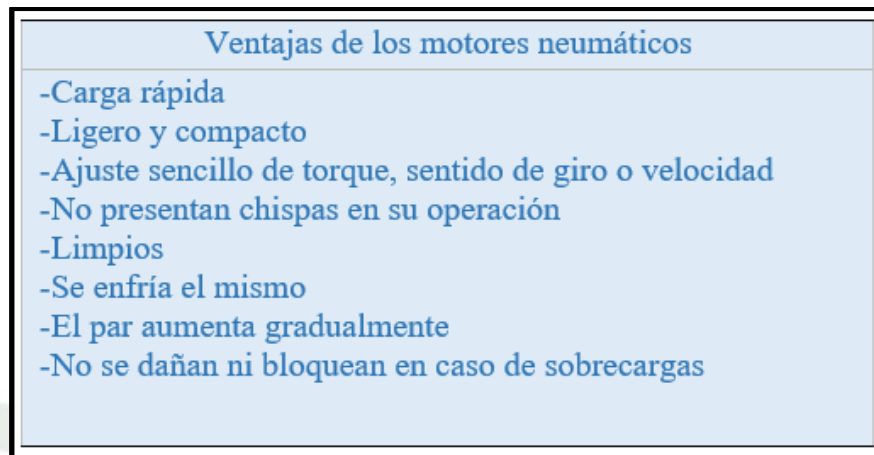


Figura 16. Ventajas de los motores neumáticos

Fuente: Elaboración propia

La velocidad libre en este tipo de motores varía a partir 0 hasta 30000 rpm para una velocidad con carga, esta deberá ser la mitad de la velocidad libre de un motor sin regular. En este tipo de motores neumáticos, con la finalidad de conseguir velocidades más bajas se equipan con otras reducciones, como se dijo ya, su diseño es ligero y compacto, es por ello que poseen menor peso y menor volumen en comparación de diferentes motores con misma potencia; en relación a la potencia es respectivamente constante dentro de una amplia gama de velocidad, el par de motor neumático acrecienta con la carga.



Figura 17. Motor Neumático

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/gast/product-7063-806363.html>

El cambio de sentido de giro, paro y arranque son instantáneos, lo que quiere decir que funcionan de manera eficaz frente a cualquier dirección y se invierten de manera fácil con el uso de una válvula direccional.

Funcionamiento del motor Neumático

1. El aire ingresa por la parte inferior del estator hacia la zona de trabajo, este es el volumen comprendido tanto entre estator y rotor y 2 aletas consecutivas de este último.
2. Posteriormente a hallar un volumen más amplio el aire se propaga ejerciendo presión sobre las aletas comprendida en el rotor. La presión es mayor mientras más cercana sea a la entrada y menos a más cercana a la salida.
3. Las presiones generan fuerzas sobre cada aleta que restringe a una zona de trabajo, al presentarse un área de presión similar y presión diferente la fuerza generada próxima a la entrada es mayor produciéndose así un par de fuerza que impulsa al rotor a girar, es así que se genera la fuerza centrífuga suficiente.
4. Cuando la cámara de trabajo entra en contacto con la salida, esta cambia de forma drástica al valor de presión ambiental, es así que el aire sale expulsado quedando listo nuevamente para repetir el ciclo de trabajo.

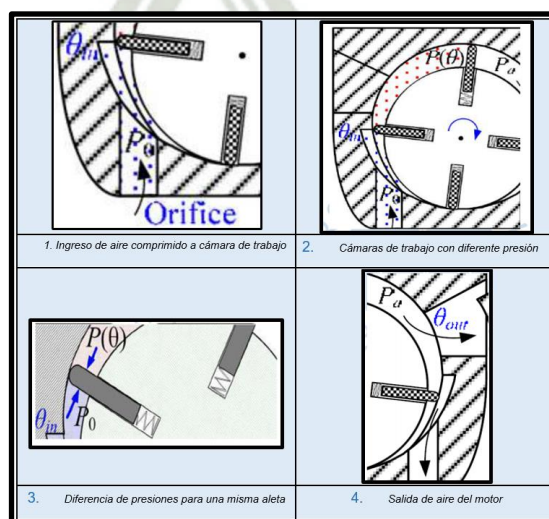


Figura 18. Funcionamiento del motor

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/gast/product-7063-806363.html>

2.3.3.1. Motor de Engranaje

Este tipo de motor de engranajes radica en dos de estos, uno de ellos conectado al eje y el otro se encuentra conectado al aire comprimido para formar su movimiento.

Con respecto a su funcionamiento radica en aceptar aire comprimido por un lado en la línea de contacto de las ruedas dentadas y dejar que escape por otro lado posteriormente de inducir la rotación de los engranajes. Tiene por característica un rendimiento bajo debido a que consume mucho más de lo que transmite.



Figura 19. Motor neumático de engranajes
Fuente: Checa (2019)

2.3.3.2. Motor de Pistones

Este tipo de motores suelen ser empleados para trabajos de elevada carga y baja velocidad, suele contar entre cuatro a seis pistones y de acuerdo a la disposición de los pistones pueden ser Radial y Axial.

Con respecto a otros motores neumáticos en este tipo sus revoluciones son más baja, además de contar con un óptimo control de velocidad.

Estos motores cuentan con un elevado par de giro y son perfectos para aquellos trabajos que requieren gran fuerza de giro, por tal vez algún mecanismo viscoso que estén moviendo.



Figura 20. Motor neumático de pistones

Fuente: <http://goldspray.com/familias/agitadores/neumatico/agitador-neumatico-3-pistones.html>

2.3.3.3. Motor de Paletas

Este tipo de motores consisten en un rotor montado de manera excéntrica sobre un cascarón cilíndrico, es así que el rotor posee cavidades las mismas que alojan paletas y de transportan aprovechando la fuerza centrífuga generada por el giro del rotor. Dentro de sus características son de menor costo y más ligeros con respecto a motores de pistones referente a una igual potencias sin embargo cuentan con menor par de arranque.

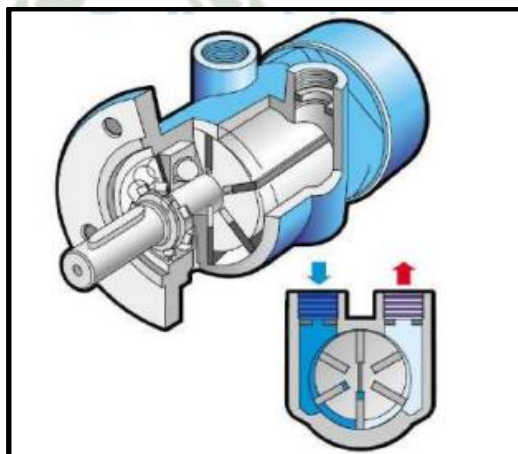


Figura 21. Motor neumático de paletas

Fuente: Checa (2019)

2.3.4. Encoder Rotativo

Un encoder es un transductor rotativo que transforma el giro y revoluciones captadas a través de su rotor, a una señal eléctrica la cual sirve para indicar la posición angular de un eje, velocidad y aceleración del rotor cualquier tipo de motor, en este caso uno neumático (Chavez, 2010).

Operación de encoder

El encoder es responsable de contar o reproducir a partir del movimiento rotacional de su eje, convirtiendo los movimientos rotacionales o desplazamientos lineales en impulsos eléctricos de onda cuadrada o senoidal, generando una cantidad de pulsos por rotación precisa a lo largo de su rotación.

Las variables esenciales para que el encoder tenga un control preciso son: la velocidad en la dirección de rotación y/o el ángulo exacto en el que se detiene.

Los encoders también se pueden usar con otros dispositivos como: contadores, tacómetros, controladores lógicos programables (PLC) o con convertidores de frecuencia para señales analógicas (Dynapar, 2021).



Figura 22. Encoder rotativo
Fuente: www.industrial.omron.es

Esta información es enviada al sistema de control y se procesa para enviar las correcciones necesarias con la finalidad de que el motor tenga la velocidad indicada por el set-point; el rango de salida del transductor tiene que estar de preferencia en el rango de la señal de consigna y del controlador, puede ser 0-10 VDC, 4 a 20 mA o 0 a 10 mA (Dynapar, 2021).

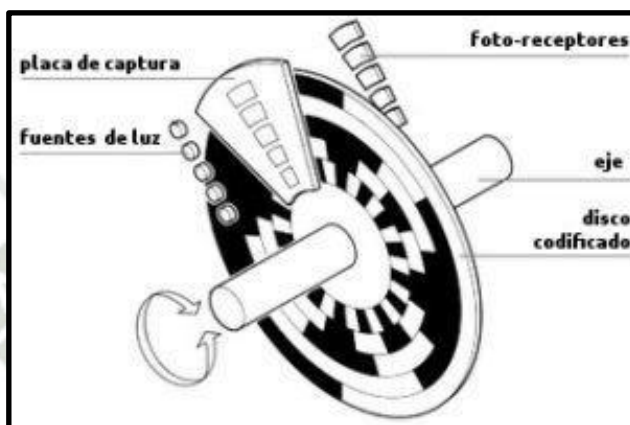


Figura 23. Esquema Encoder Rotativo

Fuente: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/>

2.3.4.1. Tipos de Encoders

En el siguiente cuadro sinóptico se hace un pequeño resumen de los tipos de Encoders.

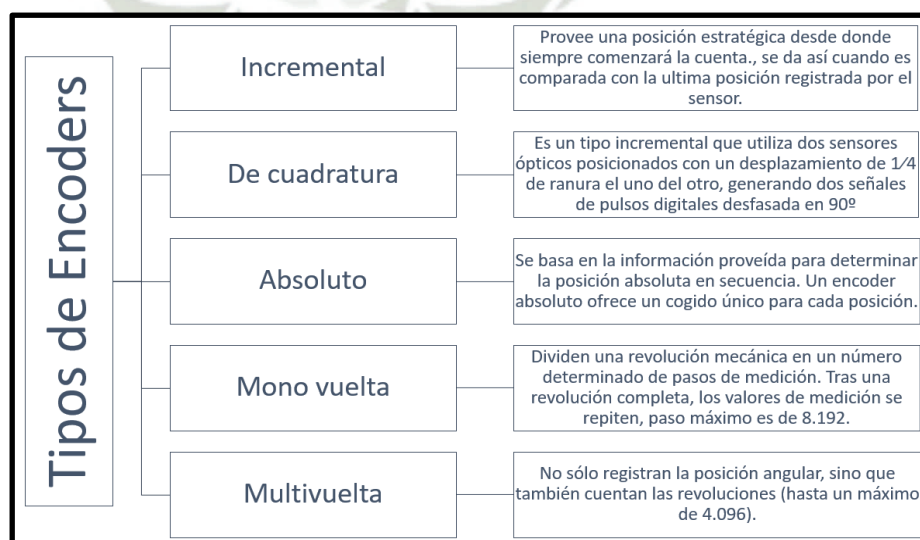


Figura 24. Tipos de Encoders Rotativos

Fuente: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/>

2.4. Fundamentos del sistema de control

Se puede definir un modelo matemático como la descripción matemática del comportamiento del sistema. Muchas veces en el análisis de un sistema, inicialmente se obtiene un modelo matemático simple, como por ejemplo ignorando no linealidades y parámetros distribuidos (como en el caso de líneas de transmisión eléctrica), con el fin de obtener ecuaciones diferenciales lineales y de parámetros concentrados. (Giraldo y Tabares, 1997)

Cualquier tentativa de diseño de un sistema debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes de que el sistema pueda diseñarse en detalle o construirse físicamente. Tal predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama *modelo matemático*. Para los sistemas físicos, la mayoría de los modelos matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales. La dinámica de sistemas trata del modelado matemático y el análisis de la respuesta de los sistemas dinámicos.

El proceso de modelado, nos permite conocer cómo funciona la planta o sistema desde distintas ópticas ante diversas entradas

Tipos de modelamientos:

- Teóricos: se dan a partir de ecuaciones diferenciales que relacionan las variables de entrada y salida.
- Empíricos: lo obtenemos a partir del comportamiento externo entrada-salida del sistema, de aquí parte la Identificación.

Podemos entender la identificación de sistemas como la acción de tratar de descubrir cómo es que se comporta el sistema de acuerdo a la observación de sus entradas y salidas.

El proceso de identificación consiste en obtener una representación del sistema a partir de la data disponible del mismo, generalmente esta tarea se lleva a cabo en dos etapas; la primera basada en el conocimiento previo del proceso, que estará dedicada a seleccionar el “tipo de modelo” (Baigiola, 2009, pag 97).

Ya que el software Matlab, será el elegido para realizar este proceso, debemos conocer lo que nos indica lo siguiente acerca del sistema de modelamiento.

System Identification Toolbox™ proporciona funciones de MATLAB®, bloques de Simulink® y una aplicación para construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada-salida. Le permite crear y usar modelos de sistemas dinámicos que no se pueden modelar fácilmente desde los primeros principios o especificaciones. Puede utilizar los datos de entrada y salida del dominio del tiempo y del dominio de la frecuencia para identificar las funciones de transferencia de tiempo continuo y tiempo discreto, los modelos de proceso y los modelos de espacio de estado. La caja de herramientas también proporciona algoritmos para la estimación de parámetros en línea incrustados. La caja de herramientas proporciona técnicas de identificación tales como máxima probabilidad, minimización de error de predicción (PEM) e identificación del sistema subespacial. Para representar la dinámica del sistema no lineal, puede estimar los modelos de Hammerstein-Wiener y los modelos ARX no lineales con redes de wavelets, particiones de árbol y no lineales de redes sigmoideas. La caja de herramientas realiza la identificación del sistema de caja gris para estimar los parámetros de un modelo definido por el usuario. Puede usar el modelo identificado para la predicción de respuesta del sistema y el modelado de plantas en Simulink. La caja de herramientas también admite el modelado de datos de series temporales y el pronóstico de series temporales. (Mathworks, 2016).

2.4.1. Conceptos teóricos

2.4.1.1. Error

El error es la diferencia que existe entre un valor medido y un valor de referencia. Basados en este concepto se dice, que para determinar el error que existe en el estado actual de un sistema con respecto a un valor de consigna o un estado deseado, se calcula la diferencia entre el estado actual del sistema (PV) y el valor de estado deseado o de referencia (SP). (Creuss. 2011)

2.4.1.2. Exactitud

Se entiende por exactitud que el valor verdadero de la variable se pueda detectar sin errores sistemáticos positivos o negativos en la medición.

Sobre varias mediciones de la variable, el promedio de error entre el valor real y el valor detectado tenderá a ser cero. (Creuss. 2011)

2.4.1.3. Precisión

El término precisión se refiere a que existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de la variable. La dispersión en los valores de una serie de mediciones será mínima.

2.4.2. Métodos clásicos de identificación de sistemas

Ya que la mayoría de los sistemas en la vida real no presentan un comportamiento lineal, a causa de 'n' factores, por lo menos en un determinado rango en los que sí pueden ser considerados medianamente lineales.

Este tipo de modelos se pueden aproximar a uno lineal mediante el acercamiento alrededor de su punto de operación, también llamado linealización. La desventaja del método de linealización, es que no se logrará abarcar completamente el comportamiento del sistema a menos que se acerque a un punto de operación estable y se deberá obligadamente recurrir a los modelos no-lineales.

Muchos sistemas no lineales pueden ser representados por la interconexión de sistemas lineales estacionarios y no linealidades estáticas. Estos modelos se denominan orientados a bloques (block-oriented nonlinear models). Las no linealidades estáticas aparecen por ejemplo debido a saturación de actuadores, sensores con características no lineales, etc. (Gomez, 2010)

Para poder “identificar” de manera más óptima un modelo, debemos conocer a grandes rasgos de qué tipo de sistema se trata, en nuestro caso, conocemos que, por ser un sistema hidráulico, está lleno de no-linealidades que pueden ir desde la viscosidad del aceite a una determinada temperatura, hasta la histéresis del potenciómetro lineal (Agramonte, 2019).

Las propiedades más importantes de los sistemas lineales consisten en que les puede aplicar el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de excitaciones diferentes o entradas, es la suma de dos respuestas individuales. En consecuencia, en los sistemas lineales la respuesta a varias entradas puede calcularse tratando una entrada cada vez y después sumando los resultados. Como resultado del principio de superposición, Las complicadas soluciones de las ecuaciones diferenciales lineales se pueden obtener de las sumas de soluciones simples. Aunque las relaciones físicas con frecuencia se representan mediante ecuaciones lineales, en muchos casos las relaciones reales pueden que no sean del todo lineales. De hecho, un estudio cuidadoso de los sistemas físicos revela que los llamados sistemas lineales son realmente lineales dentro del rango de operación limitado. Por ejemplo, muchos de los sistemas hidráulicos y neumáticos involucran relaciones no lineales entre sus variables. En los sistemas no lineales, la característica más importante es que el principio de superposición no es aplicable. En general, los

procedimientos para encontrar la solución a los problemas que involucran tales sistemas son extremadamente complicados. A causa de la dificultad matemática que representan los sistemas no lineales, con frecuencia es necesario linealizarlos alrededor de una condición de operación. Una vez que un sistema no lineal se aproxima mediante un modelo matemático lineal, lineales para propósito de análisis y diseño (Martin, 2010).

2.4.3. Métodos alternativos

Debido a que un sistema lineal invariante en el tiempo puede ser descrito por su función de transferencia, o bien por su correspondiente respuesta impulsiva, lo que iniciaremos ahora será un camino en busca de algunos métodos que nos permitan determinar estas funciones por técnicas directas y sin hacer una preselección de los posibles modelos. Estos métodos son frecuentemente denominados métodos no paramétricos debido a que no emplean (en forma explícita) un vector finito de parámetros en la búsqueda de una mejor descripción del sistema.” (Kunusch, 2003)

Tenemos entre ellos el Análisis Espectral, el Análisis por Correlación (estimación de la respuesta impulsiva)

2.4.3.1. Análisis Espectral

Este método para determinar funciones de transferencia de sistemas lineales fue desarrollado a partir de métodos de estimación espectral.

De acuerdo a (Kunush, 2003), la descripción para un sistema lineal con perturbación aditiva ($y(t) = G(q).u(t) + H(q).e(t)$), si queremos caracterizar un sistema bastaría con hallar su función de transferencia $G(e^{j\omega})$, como así también su comportamiento ante perturbaciones exógenas $H(e^{j\omega})$. Como resultado inmediato del análisis de $\phi_{yu}(\omega) = G(e^{j\omega}).\phi_{uu}(\omega)$, es claro que

estimando las tres densidades espectrales de potencia involucradas (hablamos de ϕ_{uu} , ϕ_{yy} y ϕ_{yu}) es posible estimar $G(e^{j\omega})$, como así también $\phi_{vv}(\omega)$, que a través de (1.19) se vincula con el módulo de $H(e^{j\omega})$, habremos perdido la fase de $H(e^{j\omega})$, sin embargo, esta función no es de vital importancia a la hora de analizar el comportamiento del ruido $v(t)$.

2.4.4. Sistemas no lineales

Cuando la salida de un sistema depende no linealmente de sus entradas, a veces es posible descomponer la relación entrada-salida en dos o más elementos interconectados. En este caso, puede representar la dinámica mediante una función de transferencia lineal y capturar las no linealidades mediante el uso de funciones no lineales de entradas y salidas del sistema lineal. El modelo Hammerstein-Wiener logra esta configuración como una conexión en serie de bloques estáticos no lineales con un bloque lineal dinámico. Estos modelos tienen una representación de bloque conveniente, una relación transparente con los sistemas lineales y son más fáciles de implementar que los modelos no lineales de servicio pesado, como las redes neuronales y los modelos de Volterra.

Puede utilizar un modelo de Hammerstein-Wiener como estructura de modelo de caja negra porque proporciona una parametrización flexible para modelos no lineales. Por ejemplo, puede estimar un modelo lineal e intentar mejorar su fidelidad agregando una no linealidad de entrada o salida a este modelo. También puede usar un modelo de Hammerstein-Wiener como una estructura de caja gris para capturar el conocimiento físico sobre las características del proceso. Por ejemplo, la no linealidad de entrada puede representar transformaciones físicas típicas en los actuadores y la no linealidad de salida puede describir características comunes del sensor.

Los modelos resultantes son objetos **idnlhw** que almacenan todos los datos del modelo, incluidos los parámetros del modelo y los estimadores de no linealidad. For more information about these objects, see .

Puede estimar los modelos de Hammerstein-Wiener en la aplicación de Identificación del Sistema o en la línea de comandos usando el comando “**nlhw**”. You can use uniformly sampled time-domain input-output data for estimating Hammerstein-Wiener models. Puede utilizar datos de entrada-salida de dominio de tiempo muestreados uniformemente para estimar modelos de Hammerstein-Wiener. Your data can have one or more input and output channels. Sus datos pueden tener uno o más canales de entrada y salida. You cannot use time series data (output only) or frequency-domain data for estimation. No puede usar datos de series de tiempo (solo de salida) o datos de dominio de frecuencia para la estimación. If you have time series data, to fit a nonlinear model, identify nonlinear ARX models or nonlinear grey-box models. Si tiene datos de series de tiempo, para ajustar un modelo no lineal, identifique los modelos ARX no lineales o los modelos de caja gris no lineales. (Mathworks. 2018)

2.5. Sistemas de control

Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida.

Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control. La Figura 2.23. ilustra de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema (Abril, 2015).

Un sistema de control tiene por composición un conjunto de dispositivos los mismos que tienen diversa naturaleza, los mismo que podrían ser: eléctricos, mecánicos, neumáticos, electrónicos, hidráulicos, etc.

Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna) (Casimiro, 2018).

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

- Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
- Ser eficiente según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, que tenga un tiempo de establecimiento corto y evitando comportamientos bruscos e irreales.
- Ser fácilmente implementable y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador, procesador, microprocesador, etc.

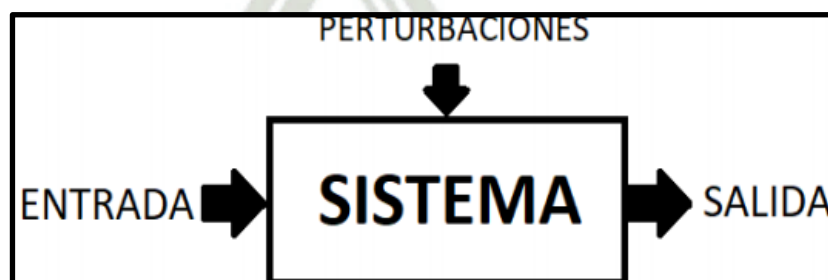


Figura 25. Esquema de control clásico

Fuente: (Wikipedia, MATLAB, 2018)

2.5.1. Controladores PID

Los controladores tipo PID son los más utilizados en las industrias y en general para casi cualquier tipo de proceso; aun siendo robusto, existe un grupo de plantas

inestables que no pueden ser estabilizadas por este tipo de controlador; pero nos viene bien para las aplicaciones de hidráulica en bucle cerrado.

Consideremos un lazo de control como se muestra en la figura:

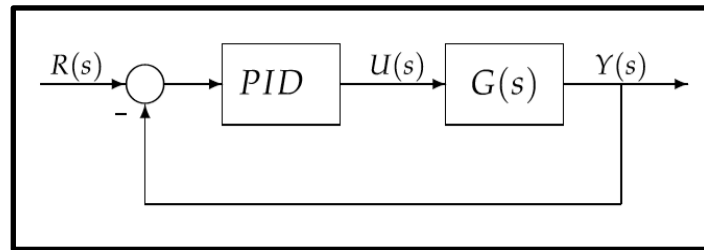


Figura 26. Diagrama de bloques

Fuente: Diagrama de bloques controlador PID

Dentro de la familia de controladores PID, se incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D) (Bravo, 2010).

Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID:

2.5.1.1. Control P

Acción de control proporcional, da una salida del controlador que es proporcional al error, tiene por objetivo que la señal de error se haga nula, es capaz de realizar un control pero es poco estable y sufre riesgo de sobre elongaciones esta descrita mediante la siguiente formula: $u(t) = K_P * e(t)$, que descripta desde su función transferencia queda:

$$C_p(s) = K_p$$

Donde:

$C_p(s)$: Controlador proporcional

K_p : Ganancia proporcional

Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set) (Aranda, 2020).

2.5.1.2. Control I

Acción de control integral, reduce el error debido a perturbaciones integrando la diferencia entre la señal y la desviación producida, por lo tanto, da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

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

Donde:

$u(t)$: Controlador integral

K_i : Ganancia integral

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero (Aranda, 2020).

2.5.1.3. Control D

Acción de control derivativo, relaciona los cambios en la señal de error y la velocidad con la que se produce el ajuste, este control se añade para aumentar la estabilidad del conjunto y esta multiplicada por la ganancia correspondiente K_d (Aranda, 2020).

$$u(t) = K_d \frac{de(\tau)}{d\tau}$$

Donde:

$u(t)$: Controlador derivativo

K_i : Ganancia derivativa

2.5.1.4. Control PI

Acción de control proporcional-integral, se define mediante:

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

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

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

Donde:

C_{PI} : Controlador PI

K_p : Ganancia proporcional

T_i : Tiempo integral

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control será decreciente. Este razonamiento sencillo nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón (Aranda, 2020).

2.5.1.5. Control PD

Acción de control proporcional-derivativa, se define mediante:

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

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante periodos transitorios. La función transferencia de un controlador PD resulta:

$$C_{PD}(s) = K_p + sK_pT_d$$

Donde:

C_{PD} : Controlador PD

K_p : Ganancia proporcional

T_i : Tiempo derivativo

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error en estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por tanto, permite un valor más grande que la ganancia K, lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable (Aranda, 2020).

2.5.1.6. Control PID

Acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales (Aranda, 2020). La ecuación de un controlador con esta acción combinada es:

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

Donde:

$u(t)$: Controlador PID

K_p : Ganancia proporcional

$e(t)$: Error

T_i : Tiempo integral

T_d : Tiempo derivativo

La función transferencia resulta:

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

Donde:

C_{PID} : Controlador PID

K_p : Ganancia proporcional

T_i : Tiempo integral

T_d : Tiempo derivativo

2.5.2. Método clásico de sintonización de controladores PID

2.5.2.1. Método de Ziegler-Nichols (lazo abierto)

Mok, Kim, Park, & Rhew (1988) se refiere a este método como el primer método de identificación propuesto. Este método consiste en trazar una línea tangente a la respuesta del sistema o curva de reacción en el punto de inflexión o punto de máxima pendiente. Para obtener el modelo, se debe identificar la ganancia del sistema, el tiempo de estabilización y el tiempo muerto.

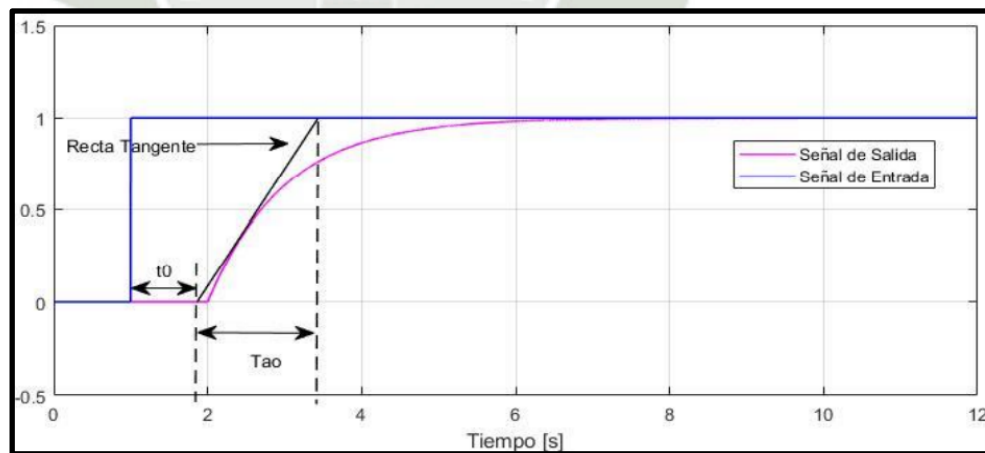


Figura 27. Método de caracterización de Ziegler Nichols

Fuente: (Henriquez y Martinez, 2019)

Sintonización de Ziegler-Nichols

Akshay & Subbulekshmi (2017) menciona que este método utiliza la respuesta temporal del sistema la cual tiene forma de “S”, se procede a trazar

la pendiente en el punto de inflexión y hallar las constantes t y t_0 donde pueden definirse como tiempo de estabilización y tiempo muerto respectivamente, también Sarić, Čustović, Jokić, & Jurić (2019) verifica que se puedan implementar estas ecuaciones con los parámetros anteriormente encontrados.

Tabla 1. Formula de controladores de Ziegler Nichols de lazo abierto

Control	K_p	t_i	t_d
P	$\frac{t}{\delta t_0}$		
Ziegler Nichols (Lazo abierto)	PI	$\frac{0.9t}{\delta t_0}$	$3t_0$
	PID	$\frac{1.2t}{\delta t_0}$	$2t_0$
			$0.5t_0$

Fuente: (Henriquez y Martinez, 2019)

2.6. Algoritmo de enjambre de partículas

2.6.1. Algoritmo de enjambre de partículas (PSO)

Este algoritmo fue desarrollado Eberhart y Kennedy (1995), considerado como herramienta de optimización de veloz crecimiento para la resolución de problemas de ciencia e ingeniería. Tiene por base la naturaleza con referencia en el comportamiento social de criaturas como bandadas de aves, cardumenes, etc. Este algoritmo remeda el comportamiento, pero no requiere de un líder para lograr el objetivo.

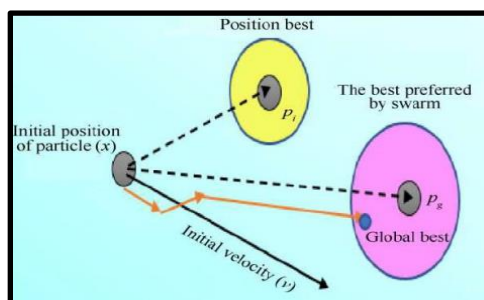


Figura 28. Fundamentos de PSO

Fuente: (Quispe, 2019)

Este algoritmo es considerado como una técnica de optimización en lo que refiere a búsqueda directa y no requiere de información de gradiente, es por ello que explora la función de coste final sin la necesidad de ejercicios matemáticos complejos.

2.6.2. Heurística y Metaheurística

La heurística se define como la resolución de problemas de manera inteligente empleando la información disponible, en lo que respecta al ámbito de la inteligencia artificial es empleado para describir determinada clase de algoritmo el propio que aplica las técnicas y conocimiento propio de la problemática para la solución en un tiempo razonable del mismo.

Considerado como un método eficiente para la obtención de óptimas soluciones, tiene importancia tanto la rapidez del proceso como calidad de solución obtenida.

En lo respecta a su empleo:

- Formar una solución inicial
- Participa como un paso intermedio del procedimiento para tratar de mejorarla

La metaheurística es definida como estrategias para la mejora y diseño de procedimientos heurísticos con la finalidad de obtener un elevado rendimiento.

Definido como una clase de métodos aproximados, los mismos que están diseñados para la resolución de problemas difíciles de optimización combinatoria, clasificación de acuerdo al tipo de metaheurística:

- Metaheurística constructiva
- Metaheurística evolutiva
- Metaheurística de búsqueda

2.6.3. Optimización de algoritmo de enjambre de partículas

El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), es un algoritmo del área de la inteligencia artificial de la rama de inteligencia de enjambres. Está inspirada en el comportamiento social de los seres vivos. Comparado con los algoritmos genéticos (GA) que se basa en el mecanismo de evolución biológica, el algoritmo de optimización por enjambre de partículas se inspira en la evolución en el comportamiento colectivo, principalmente trata de imitar el comportamiento social de varios grupos de animales como lo son los cardúmenes, parvadas, manadas, etc. Los dos algoritmos se basan en población de individuos, solo que con diferentes enfoques y han demostrado ser eficientes para la solución de problemas complejos, ambos son algoritmos de optimización metaheurísticos, ya que utilizan analogías con otros procesos para resolver el problema, los métodos metaheurísticos no se especializan a resolver un problema en particular, por lo que puede usarse para cualquier problema. Estos métodos no garantizan dar el mejor resultado, pero sí un resultado aceptable. (Velasquez y Mejía, 2016)

Este algoritmo es considerado como una técnica de optimización de búsqueda directa y no necesita información de gradiente de este modo explora la función de coste total sin ejercicios matemáticos complejos.

Cuando se considere no es posible optimizar la solución alcanzada hasta el momento será inevitable instaurar cuál será el criterio de finalización, los criterios más empleados hacen referencia a la desviación de la solución, sin embargo, otros más simples como número de sub colonias o tiempo de ejecución suelen ser empleados.

Otra característica de estos algoritmos, es que son no deterministas (estocásticos), esto quiere decir que los resultados obtenidos no siempre serán los mismos, aunque se trate de una misma función. En muchas de sus aplicaciones, tanto los algoritmos genéticos, como los algoritmos de enjambre de partículas, ofrecen resultados de calidad del 99%, sin embargo, se ha demostrado que los algoritmos de enjambre de partículas son superiores en cuanto a eficiencia, debido a su bajo costo computacional.

Comparado con el algoritmo clásico, el estándar, agregó el factor social, cognitivo, de inercia y constricción. También se cambió el modo en que las partículas se comunicaban por medio de topologías definidas. (Velasquez y Mejía, 2016)

Topologías

La PSO básica suele incurrir fácilmente en óptimos locales. Esta convergencia prematura puede evitarse ignorando la mejor posición global g conocida, y atendiendo en su lugar a la mejor posición l conocida del sub-enjambre "circundante" a la partícula en movimiento. Este sub-enjambre puede definirse geoméricamente –por ej. "las m partículas más cercanas"– o bien de forma social.

Si suponemos que existe un vínculo de información entre cada partícula y sus adyacentes, el conjunto de estos vínculos constituye un grafo, una red de comunicación, denominada topología. Una topología social muy frecuente es el anillo, en donde cada partícula tiene sólo dos partículas adyacentes (Wikipedia, 2022).

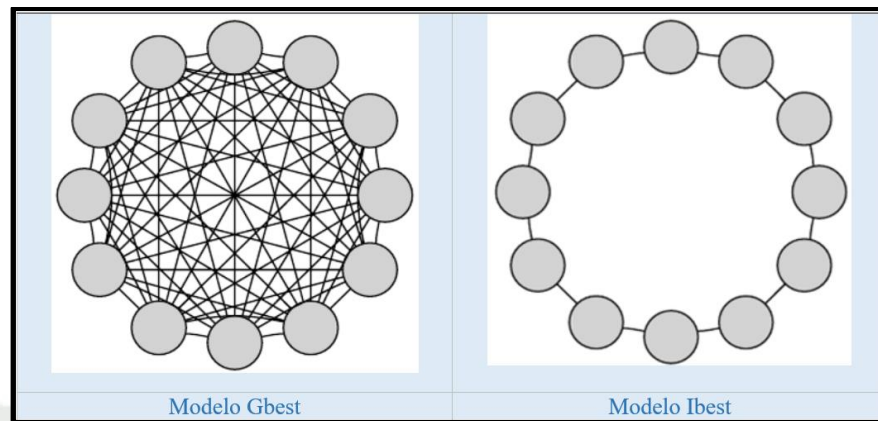


Figura 29. Modelos de topologías

Fuente: Elaboración propia

2.6.4. Parámetros de control

El APSO utiliza una población de individuos para descubrir la alta solución en un área de búsqueda entre soluciones vecinas. El individuo está definido por una partícula, que se desplaza estocásticamente bajo la guía de su posición más fina anterior y la mejor ubicación pasada del enjambre (Ghoulemallah Boukhalfa, 2018).

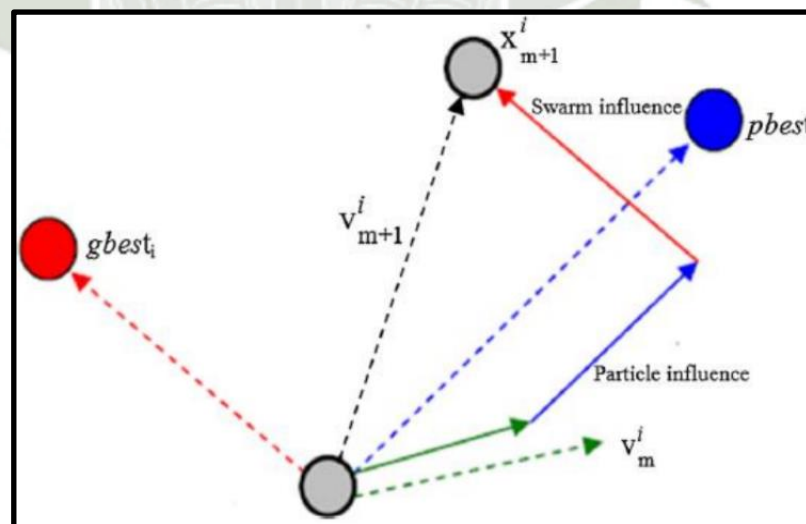


Figura 30. Vista del movimiento de una partícula en el algoritmo PSO.

Fuente: (Boukhalfa, 2018)

Tiene numerosos beneficios sobre otros meta-algoritmos en cuanto a la velocidad de convergencia, la robustez y la función de costos. El algoritmo de PSO es una de esas técnicas de optimización de búsqueda directa y no necesita

información de gradiente y, por lo tanto, explora la función de coste total sin ejercicios matemáticos complejos.

Para mejorar la capacidad de rendimiento de PSO, diferentes variantes como adaptativo PSO (APSO) en el 2015, canónico PSO (CPSO) en el 2011, y totalmente informado PSO (FPSO) en el 2004, había sido propuesto por los investigadores para lograr una aceleración de la convergencia esperada, evitando el retroceso de la locomoción loca (SudarshanK.Valluru, 2017).

Descripción del diseño de control PID basado en PSO.

Si asumimos que el tamaño del enjambre es n y el área de búsqueda es m , a continuación la posición de la partícula i -ésima es dada por $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$. Las mejores posiciones anteriores de cada i -ésima partícula son considerados como: $pbest_i = (pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{id})$ (Ghoulemallah Boukhalifa, 2018).

El índice de la mejor partícula entre el grupo es $gbest_d$. La velocidad de la i -ésima partícula es representada como: $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ (Quispe, 2019).

La posición y velocidad modificada de cada particular puede ser calculada usando el valor actual y la distancia de $pbest_{i,d}$ a $gbest_d$ como se expresa en las siguientes ecuaciones (Ghoulemallah Boukhalifa, 2018):

$$v_{i,m}^{t+1} = \underbrace{w \cdot v_{i,m}^t}_{\text{inertia}} + \underbrace{C_1 * \text{rand}() * (pbest_{i,m}^t - x_{i,m}^t)}_{\text{personelinfluence}} + \underbrace{C_2 * \text{rand}() * (gbest_{i,m}^t - x_{i,m}^t)}_{\text{socialinfluence}}$$

$$X_{i,m}^{t+1} = X_{i,m}^t + V_{i,m}^{t+1} \quad i = 1, 2, \dots, n; m = 1, 2, \dots, d$$

CAPITULO III

3. Implementación de la planta y modelamiento matemático

Para realizar la implementación del módulo del proyecto, haremos uso de distintos elementos, tanto neumáticos, como eléctricos y mecánicos. Posteriormente aplicaremos una serie de procedimientos y estrategias para poder realizar el modelamiento matemático de la planta y así posteriormente poder realizar la sintonización de parámetros del controlador por los distintos métodos planteados y así finalmente verificar cuál de ellos nos brinda la mejor respuesta.

3.1. Diseño e implementación

3.1.1. Diseño del circuito neumático

Tomando en consideración que el objetivo central de éste proyecto de investigación se centra en el análisis del algoritmo de optimización por enjambre de partículas aplicado a la ingeniería de control, podemos corroborar que el circuito neumático constará de un limitado número de elementos y de una sencilla construcción.

En la construcción de la planta se pueden identificar algunas restricciones, tales como la capacidad del compresor de aire, la cual afectará de manera directa al funcionamiento del sistema, y de esta forma también tendrá un impacto considerable a la hora de realizar el modelamiento del mismo.

En la construcción de la planta se tendrá entonces como componente inicial un compresor regulado a una presión de trabajo de 6 bares, el cual alimentará a una válvula reguladora de presión proporcional, la cual se controla de manera electrónica. A la salida de la válvula, se tendrá el componente central de la planta,

el cual será un motor neumático, el cual podrá ser alimentado con una presión máxima de 7 bares y podrá tener una velocidad máxima de 3000 rpm de acuerdo a su hoja de datos.

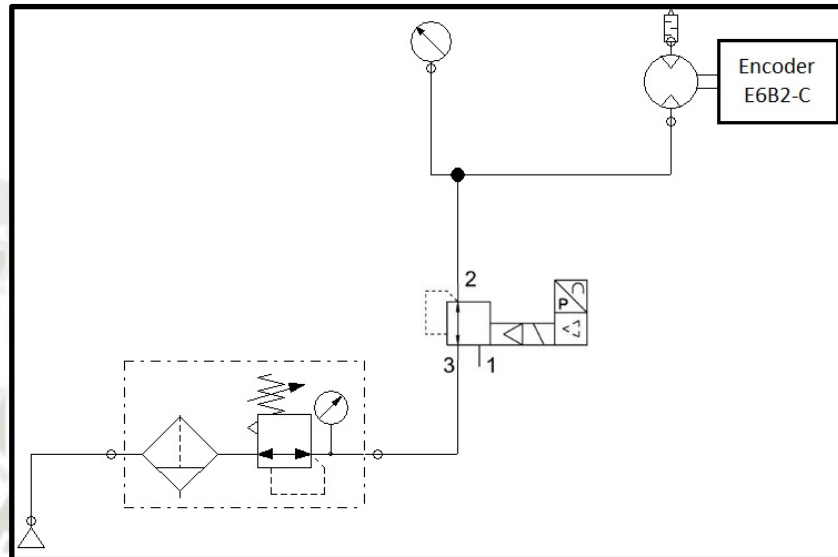


Figura 31. Simulación en Fluidsim del circuito neumático del sistema

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Diseño del circuito eléctrico

Para realizar la implementación del circuito eléctrico de control del sistema, tendremos en cuenta que el mismo se controlará a través de un controlador lógico programable Siemens S7-1200, el cual tendrá 1 entrada digital que nos brindará la señal del encoder, y a su vez tendrá una salida analógica con la cual controlará de manera electrónica a la válvula reguladora de presión, constituyendo así un diagrama de control.

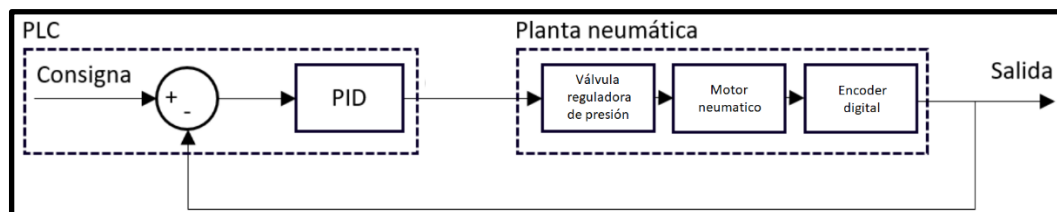


Figura 32. Diagrama general de control del proceso

Fuente: Elaboración propia

Se tendrán en cuenta entonces los siguientes componentes para poder implementar el circuito eléctrico del sistema de control: El controlador lógico programable Siemens S7-1200, que además de realizar la acción de control del proceso, proveerá una tensión de 24 voltios para la alimentación de los distintos componentes eléctricos tales como la tarjeta de consigna para regular el valor de consigna del proceso, la válvula reguladora de presión y el encoder digital.

Así pues, el PLC tendrá como entrada digital la señal del encoder en el puerto digital de dirección ID1000, mientras que como entrada analógica la señal de la tarjeta de consigna en el puerto analógico IW66. Respecto a la única salida que tendrá conectada, será la que controle la válvula reguladora de presión, conectada en la salida analógica de dirección QW80.

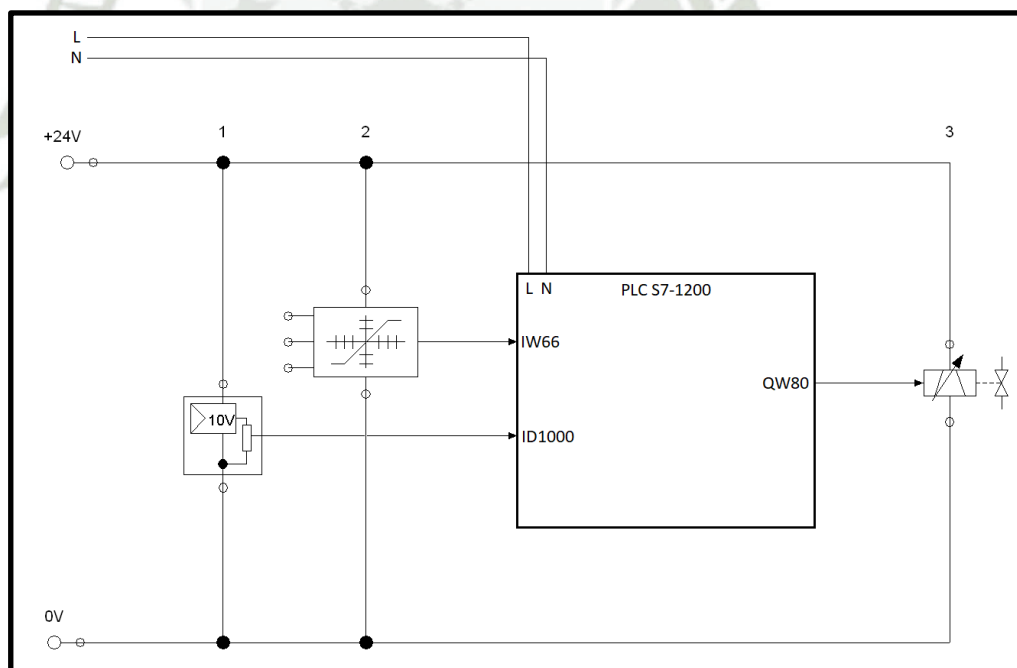


Figura 33. Diagrama eléctrico del circuito de control del sistema

Fuente: Elaboración propia

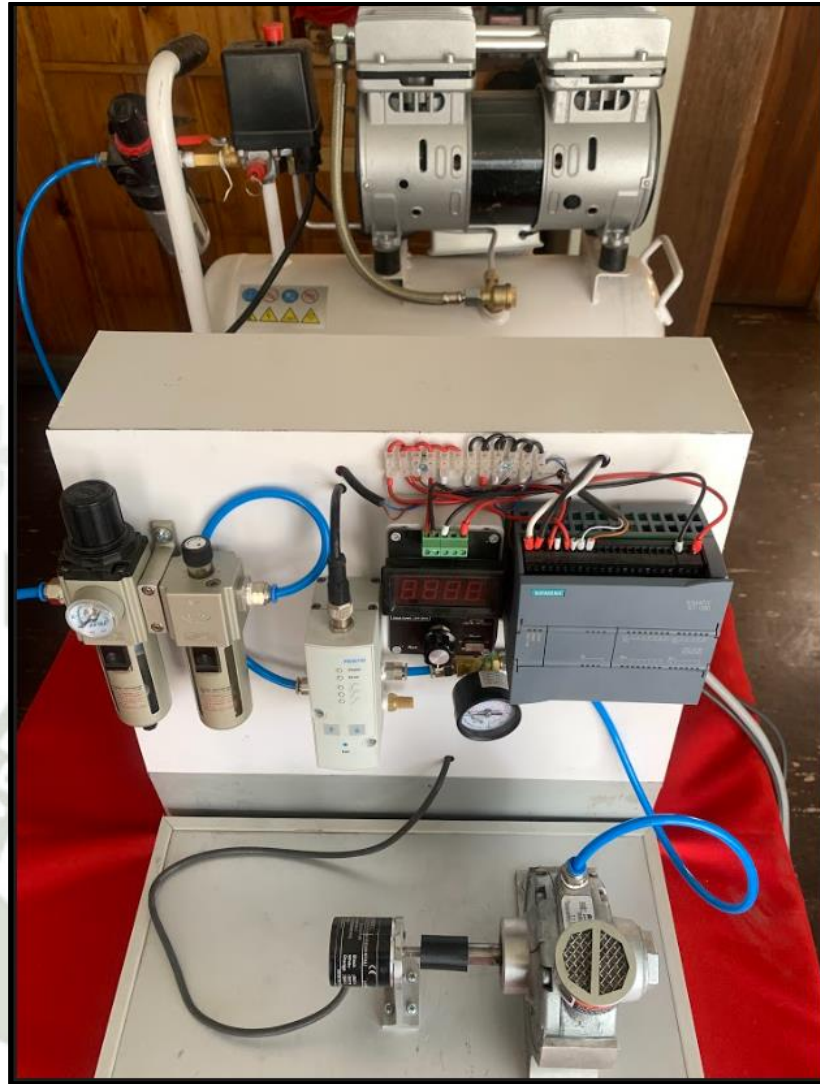


Figura 34. Vista general de la planta
Fuente: Elaboración propia

3.2. Modelamiento matemático

Como parte de la obtención de parámetros y posterior comparación de respuestas ante las distintas sintonizaciones de parámetros por todos los métodos, será necesario realizar el modelamiento matemático de la planta, para poder de ésta forma poder realizar el diseño del controlador, analizando el comportamiento de la misma ante distintas señales de entrada, tras conocer sus principales características matemáticas.

Como parte del proceso de modelamiento será necesario estimular a la planta con una entrada de tipo rampa, y registrar los datos de salida mediante una adquisición,

para posteriormente realizar el modelamiento a través de un método de aproximación de modelos mediante la herramienta Matlab.

3.2.1. Adquisición de datos

En cuanto a las conexiones necesarias para poder realizar ésta adquisición, el circuito neumático permanecerá igual, mientras que en cuanto a las conexiones eléctricas tendremos algunas variaciones.

3.2.1.1. Diagrama de conexiones eléctricas para adquisición de datos

Las conexiones eléctricas a implementar en el sistema para realizar la adquisición de datos serán bastante similares a las conexiones del sistema en sí, con la excepción de que no haremos uso de la tarjeta de consigna, ya que la entrada de rampa necesaria será provista por el propio controlador a través de programación.

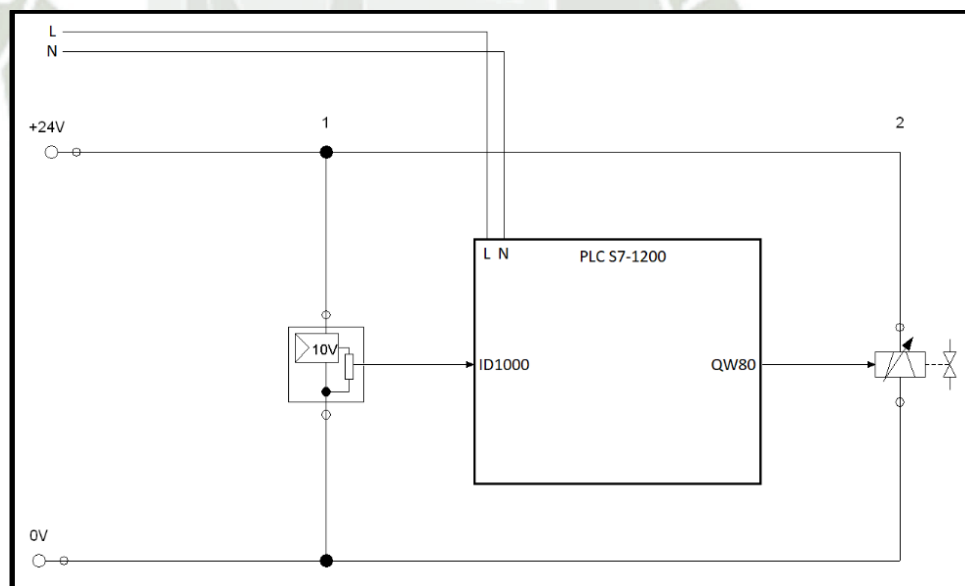


Figura 35. Diagrama de conexiones eléctricas para la adquisición de datos
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2. Programación del controlador para la adquisición de datos

Para poder realizar la adquisición de datos, debemos programar el controlador para que se pueda generar una señal de rampa hacia la válvula

reguladora de presión, lo cual se logrará a través de la programación en ladder del PLC.

Para poder crear una señal de rampa, primero deberá establecerse una frecuencia a la cual la rampa incremente su señal, lo cual se hará a través de las marcas internas del PLC.

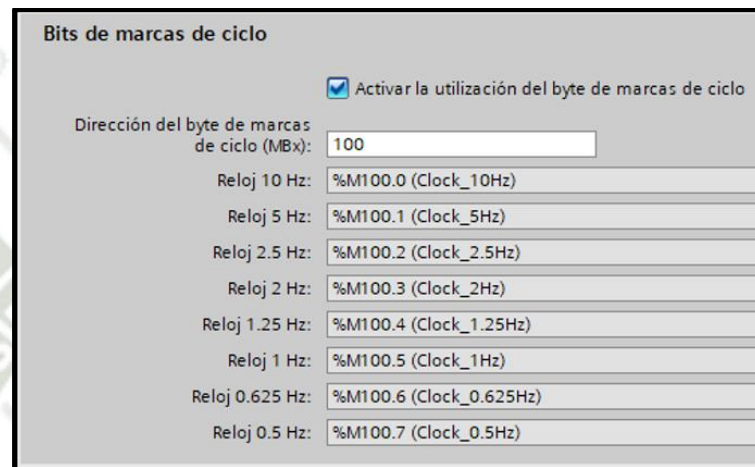


Figura 36. Bits de marcas de ciclo internos del PLC
Fuente: Elaboración propia

Asignaremos una frecuencia de 1 Hz, la cual incrementará el valor de un contador ascendente, a través de la marca M100.5, lo cual generará un pulso por segundo, lo cual generará una rampa de voltaje de salida hacia la válvula.

Los pulsos se enviarán a la entrada de un contador, y la salida del mismo se multiplicará en el segundo segmento por un valor previamente calculado de 0.027, el cual incrementará la salida de la rampa.

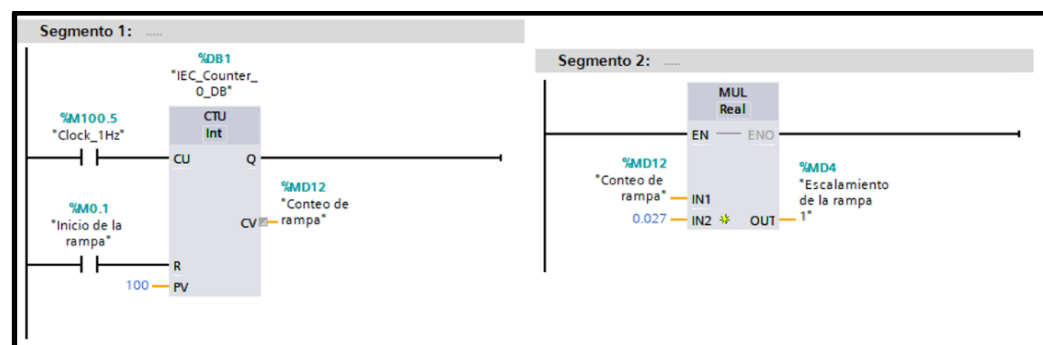


Figura 37. Segmentos de generación de pulsos para la rampa de tensión
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procede a escalar la salida de la variable “Escala-
miento de la rampa 1”, añadiendo una restricción de un voltaje máximo de 2.75 voltios,
debido a que, a ésta tensión, se alcanza el valor máximo de velocidad del motor
neumático. Tomando como referencia que la máxima escala para una salida de
10 voltios es de 27468 en la salida analógica del PLC, realizando el cálculo, el
valor entero máximo que representará una salida de 2.75 voltios será de 7465.



Figura 38. Segmento de escalamiento de salida de la rampa de tensión

Fuente: Elaboración propia

Al estimular la válvula proporcional con la tensión mencionada previamente,
se obtendrá una salida de velocidad del motor neumático, la cual será registrada
a través de un encoder digital, el cual deberá también ser registrado y escalado
para poder obtener posteriormente una curva de respuesta de velocidad ante la
tensión de excitación.



Figura 39. Segmento de adquisición y escalamiento de la velocidad del motor neumático

Fuente: Elaboración propia

Tras programar la rampa que estimulará a la válvula proporcional y escalar
la lectura de datos de velocidad, se procederá a programar el bloque Datalog, el
cual cumple la función de realizar la adquisición de datos, que serán registrados

en la memoria interna del controlador, para posteriormente ser accesibles a través de su dirección IP. Se considerará una marca M0.2, la cual cumplirá la función de disparar el bloque e iniciar la respectiva adquisición de datos.

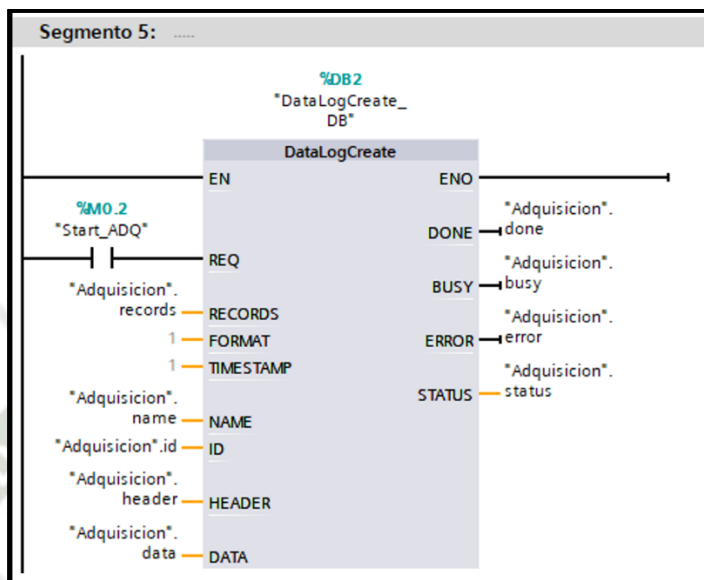


Figura 40. Bloque de adquisición de datos Datalog
Fuente: Elaboración propia

Al crear el bloque Datalog, es necesario también ajustar algunos parámetros que cumplirán la función de escribir la información que se adquiere en el bloque de datos.

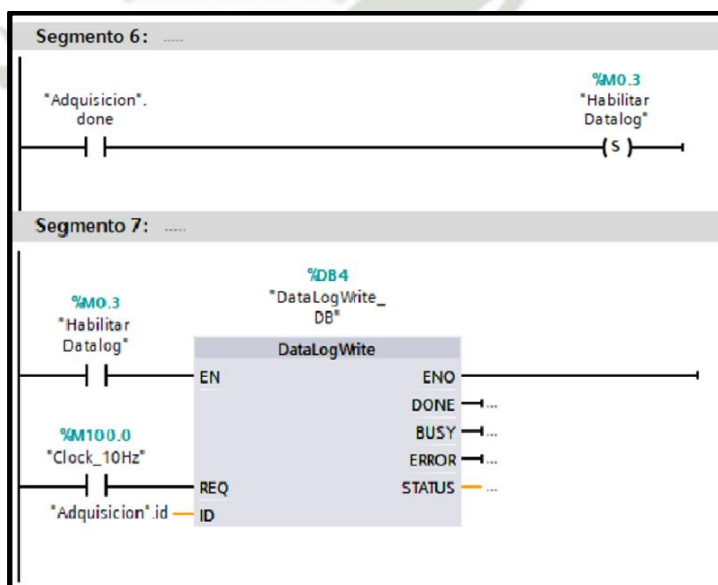


Figura 41. Bloques de configuración de parámetros Datalog
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se procede a trasladar los datos que se registran en la memoria del PLC hacia el registro del bloque de datos, para lo cual asignaremos nuevamente marcas internas de frecuencia, las cuales determinarán el número de muestras que se tomarán por segundo, para lo cual se asigna una frecuencia de 10 Hz, lo que significa que el bloque almacenará 10 registros por segundo.

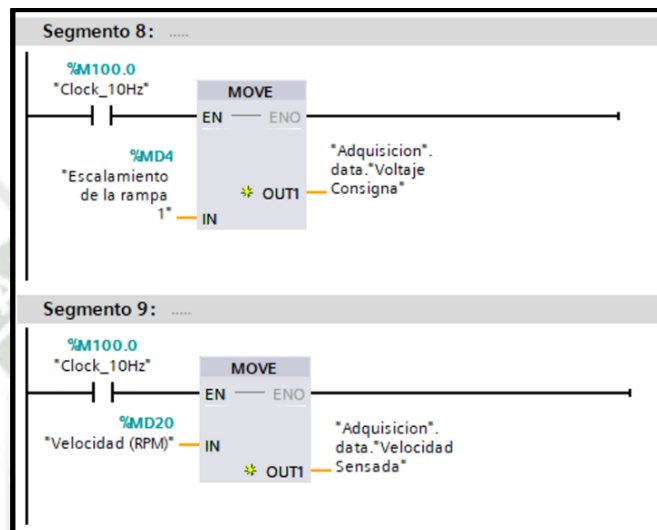


Figura 42. Traslado de datos hacia el registro interno del Datablog
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tras implementar el programa se configura el bloque de programa de la adquisición de datos, donde clasificaremos los datos que se registrarán y almacenarán en el bloque, con el propósito de poder realizar el respectivo análisis de los datos obtenidos posteriormente.

Adquisicion									
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ...	Valor de a...	Comentario
1	Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	records	UDInt	150	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	name	String	'Registro'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	id	DWord	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	header	String	'Voltaje,Velocid...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	data	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	done	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	busy	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	error	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	status	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 43. Configuración de bloque de programa de la adquisición
Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3. Procedimiento de registro y adquisición de datos

Una vez realizada la programación e implementación del circuito de adquisición de datos, se da inicio al procedimiento de registro de datos para poder posteriormente realizar el modelamiento obteniendo así la función de transferencia.

Para iniciar el procedimiento de adquisición de datos, el PLC debe estar energizado, así como la línea neumática presurizada a 6 bares. Tras estas verificaciones, se procede a forzar la marca M0.2, que dará inicio a la escritura de datos en el bloque, y posteriormente a la marca M0.1, la cual se encargará de iniciar la rampa de tensión que alimentará a la válvula proporcional.

Una vez finalizado el proceso de adquisición, será necesario forzar nuevamente la marca M0.1, lo cual detendrá el motor, previniendo así cualquier incidente en el mismo, y posteriormente también la marca M0.2, la cual se encargará de finalizar la escritura de datos.

El tiempo en el cual se alcanzará el valor máximo al cual puede trabajar la planta será de aproximadamente 50 segundos, teniendo así el siguiente número de muestras obtenidas:

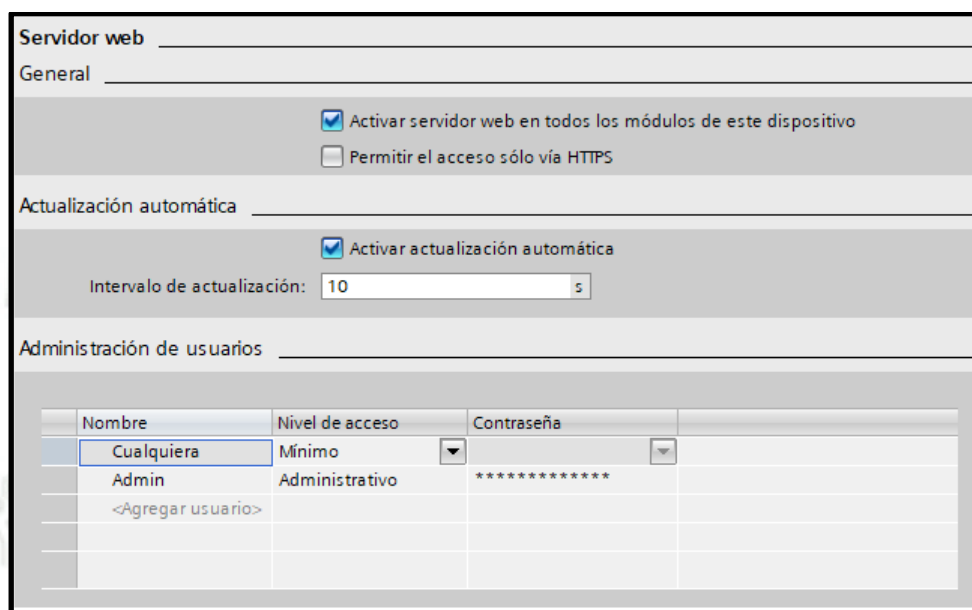
$$\# \text{ muestras} = \text{frecuencia de muestreo} * \text{tiempo}$$

$$\# \text{ muestras} = 10 \frac{\text{muestras}}{\text{seg}} * 50 \text{ seg}$$

$$\# \text{ muestras} = 500 \text{ muestras}$$

Como se mencionó previamente, las muestras obtenidas serán almacenadas en la memoria interna del controlador, las cuales podrán ser accedidas a través

del servidor web del mismo. Para ello será necesario que configuremos el servidor web en Tia Portal.



Nombre	Nivel de acceso	Contraseña
Cualquiera	Mínimo	
Admin	Administrativo	*****
<Agregar usuario>		

Figura 44. Configuración del servidor web del controlador

Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el proceso de adquisición, podremos acceder a la memoria interna del PLC a través de un navegador web, haciendo uso del Datalogger para poder acceder a su dirección IP.

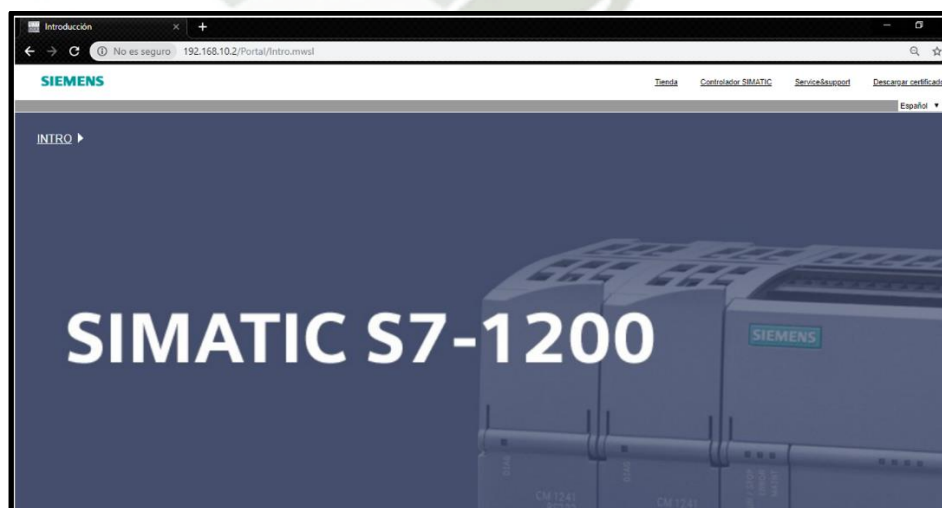


Figura 45. Servidor web del PLC

Fuente: Elaboración propia

El menú principal del servidor web nos permite acceder a una serie de distintos parámetros y características de operación del controlador, desde donde podremos acceder a los distintos estados de sus variables y marcas internas, así como también podremos manipular distintos valores y estados de operación.

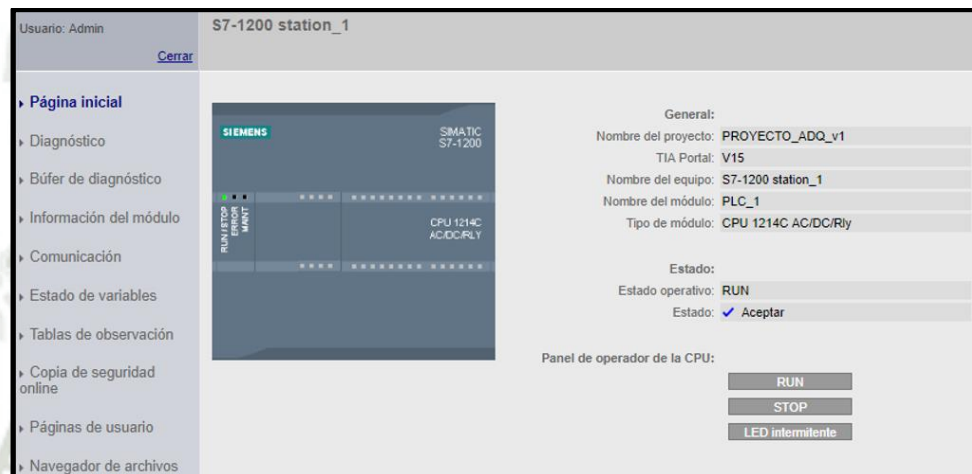


Figura 46. Menú principal servidor web del PLC

Fuente: Elaboración propia

En el menú del servidor web procedemos a identificarnos con el usuario y la clave que definimos previamente en Tia Portal, y en la pestaña de navegador de archivos podemos acceder a todos los registros de datos que se hallan almacenados en la memoria del controlador. Es aquí donde encontraremos el registro de datos que previamente realizamos.



Figura 47. Navegador de archivos del servidor web

Fuente: Elaboración propia

Al descargar el archivo de datos que contiene la información adquirida en el registro de datos, podremos corroborar que la información se clasifica de manera ordenada de acuerdo a como se realizó la programación del bloque de datos Datalog.

	A	B	C	D	E
1	Record	Date	UTC Time	Voltaje	Velocidad
125	124	2/17/2022	16:16:02	0.2430	0.0000
126	125	2/17/2022	16:16:02	0.2700	0.0000
127	126	2/17/2022	16:16:02	0.2700	0.0000
128	127	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000
129	128	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000
130	129	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000
131	130	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000
132	131	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000

Figura 48. Muestra de los datos obtenidos de la adquisición

Fuente: Elaboración propia

Revisando los datos obtenidos de la adquisición, podemos graficar la forma de la rampa de tensión, y la respuesta que ésta genera en el motor neumático, del cual se obtiene el dato de velocidad de giro en rpm.

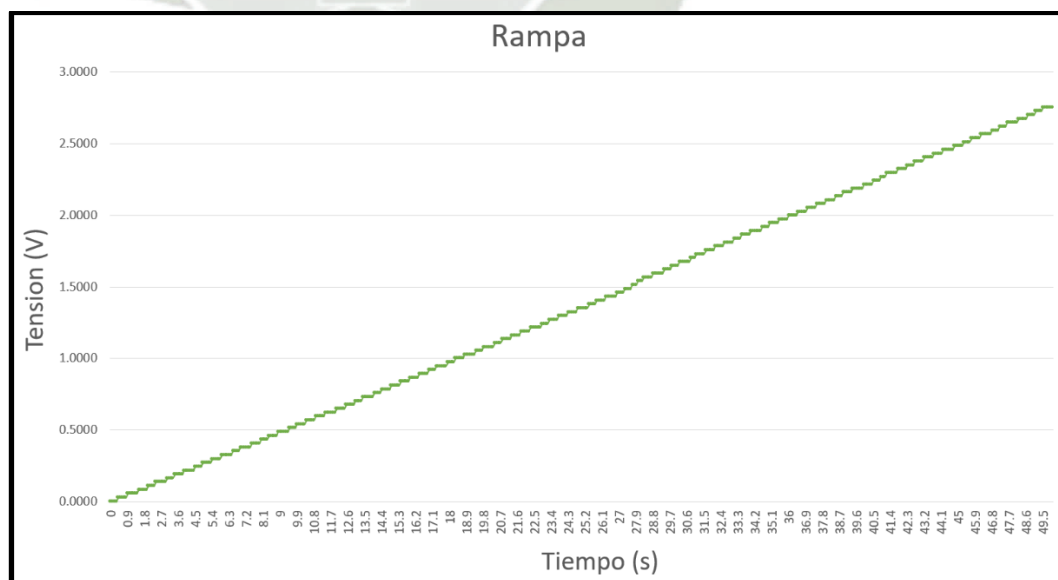


Figura 49. Representación gráfica de la rampa para la adquisición de datos

Fuente: Elaboración propia

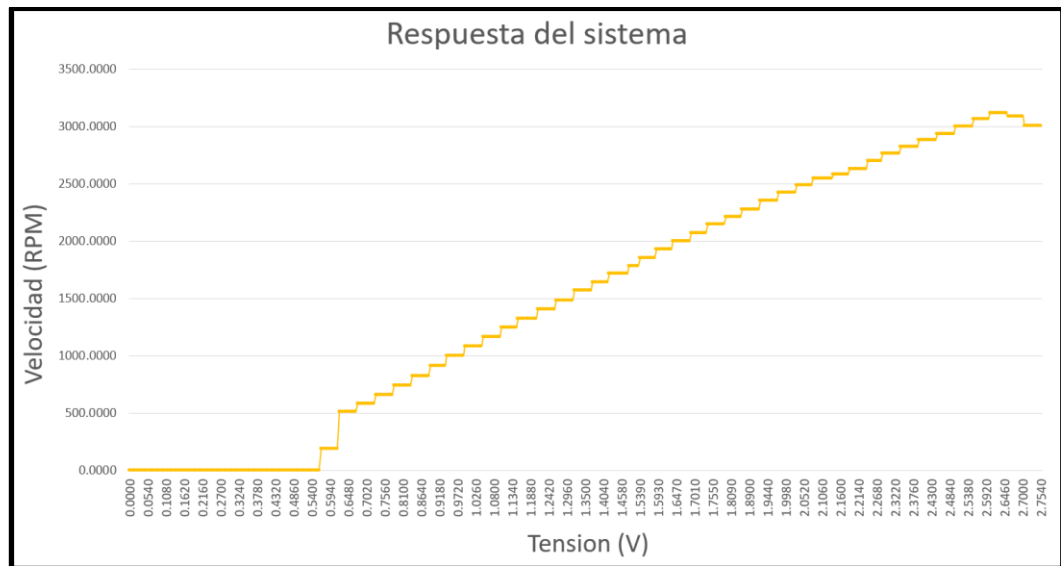


Figura 50. Representación gráfica de la respuesta en velocidad del motor neumático
Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Modelamiento matemático de la planta

Cuando se ha realizado la adquisición de datos de tensión de la rampa, así como la respuesta que tiene la válvula, se procede con la eliminación de la zona muerta. Comprendemos por zona muerta a la región de la rampa para la cual no se produce respuesta alguna del sistema. Cabe resaltar que es factible omitir esta zona en el cálculo debido a que representa una región de datos innecesarios en el cálculo, lo que podría ocasionar un incorrecto modelamiento de la planta en etapas posteriores.

Del análisis de la tabla de daos obtenidos, podemos observar que la zona muerta para nuestro sistema se encuentra comprendida entre los valores de 0 a 0.5 voltios, valores para los cuales la salida del sistema será de 0 rpm. De acuerdo a lo establecido previamente, procedemos a omitir ésta región, y los datos a considerar en el modelamiento se pueden representar en los siguientes gráficos.

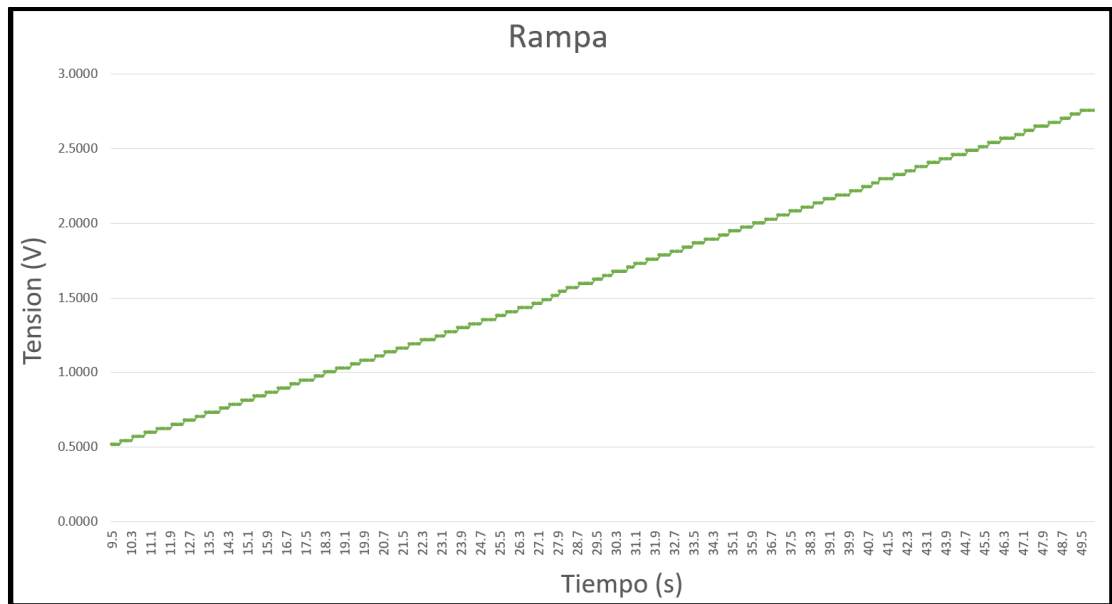


Figura 51. Representación gráfica de la rampa sin zona muerta
Fuente: Elaboración propia

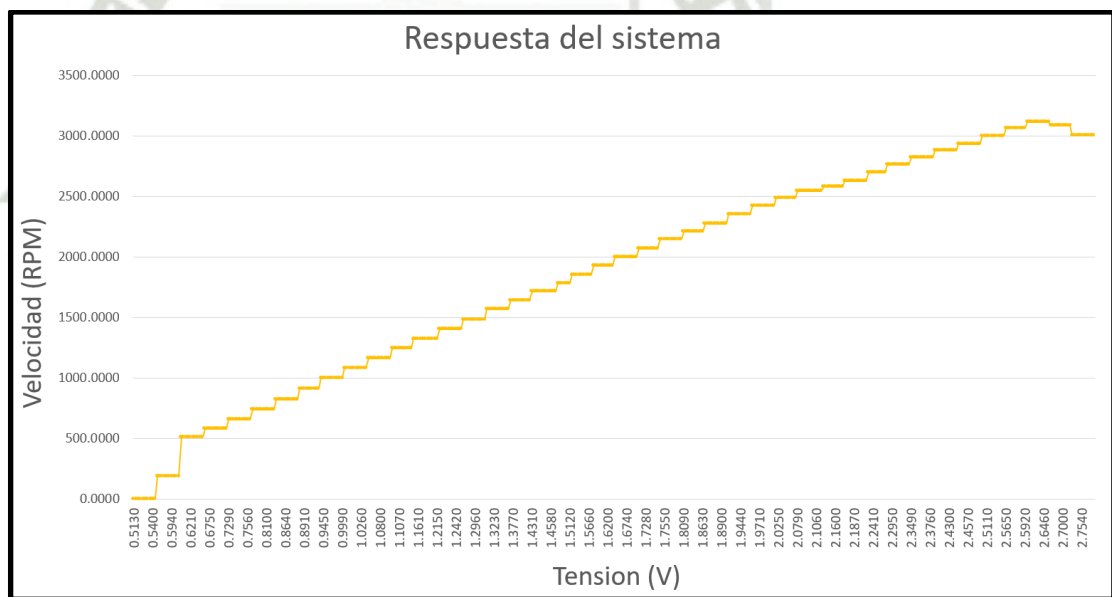


Figura 52. Representación gráfica de la respuesta del sistema sin zona muerta
Fuente: Elaboración propia

Para poder realizar el respectivo modelamiento de la planta y posteriormente obtener la función de transferencia del sistema, haremos uso del software Matlab, en el cual procederemos a importar los datos obtenidos de manera experimental en la adquisición de datos de la planta. Para esto, procedemos a crear dos variables,

tanto como para la entrada de rampa y para la salida de velocidad, y posteriormente cargamos los datos en el espacio de trabajo de Matlab.

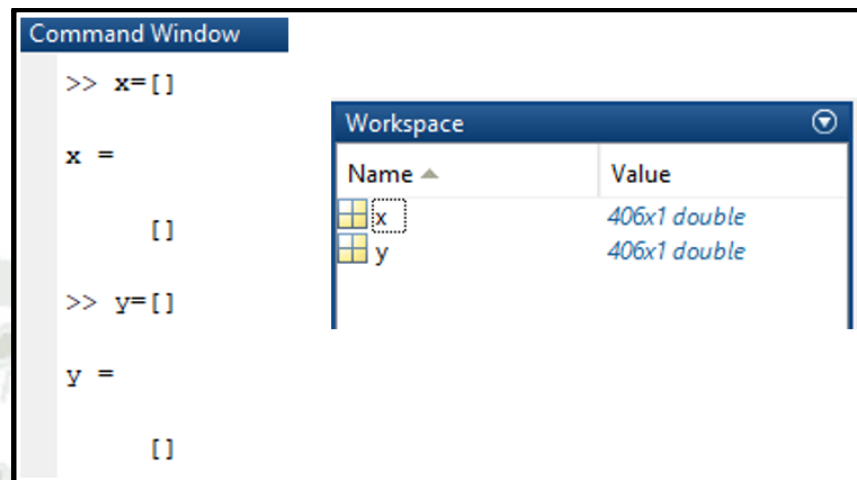


Figura 53. Creación de variables y asignación de datos en Matlab

Fuente: Elaboración propia

Una vez introducidos los datos a las variables, haremos uso de la herramienta “ident” de Matlab, la cual nos sirve para poder introducir los datos de la adquisición y poder realizar el modelamiento de la planta a través de un método de aproximaciones.

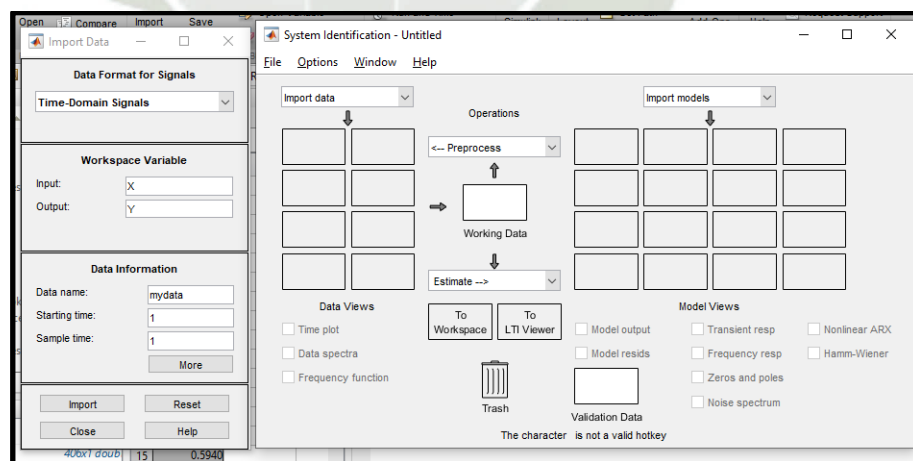


Figura 54. Ventana de System Identification Tool

Fuente: Matlab (2022)

Al ejecutar la herramienta, se procede a importar los datos de las variables X y Y que representan a la entrada y la salida del sistema del espacio de trabajo, es

importante saber que las variables a importar serán del tipo de señales en dominio del tiempo.

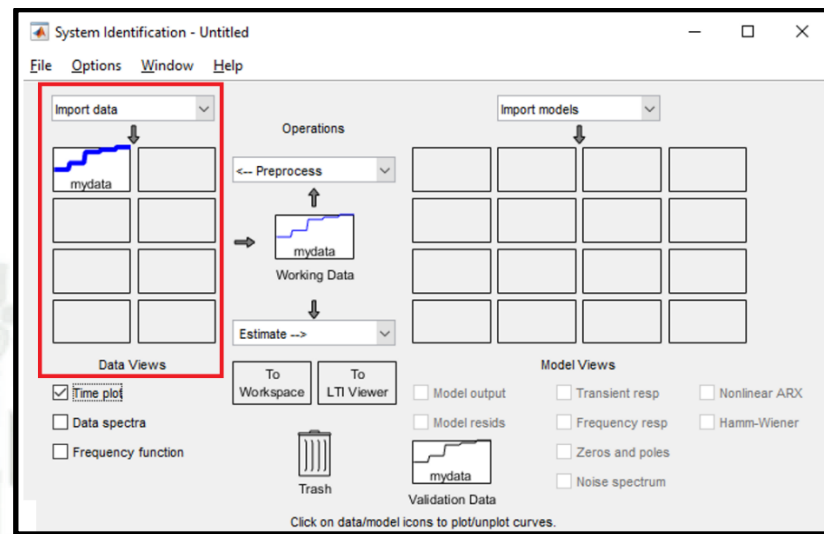


Figura 55. Importación de datos a la herramienta ident
Fuente: Elaboración propia

Podemos corroborar que la data fue ingresada de manera correcta graficándola en el dominio del tiempo, y verificando que la respuesta para ambos casos será a la que pudimos estudiar previamente.

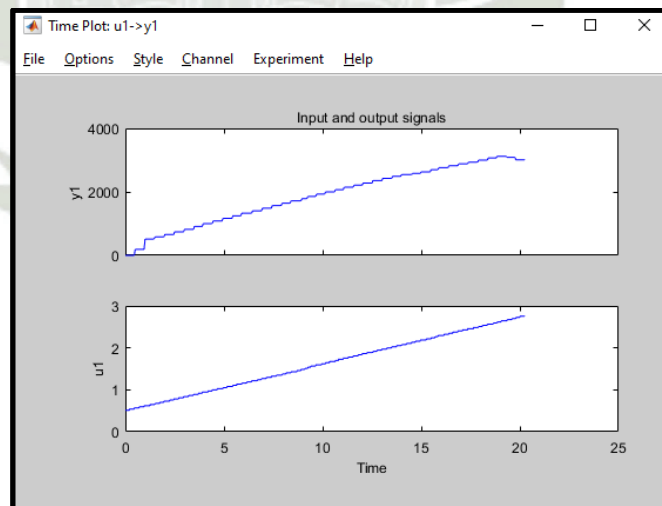


Figura 56. Comprobación gráfica de datos ingresados
Fuente: Elaboración propia

Posterior a ello, podemos realizar una serie de estimaciones basándonos en distintos modelos que nos proporciona Matlab para poder aproximar la función de transferencia a modelar.

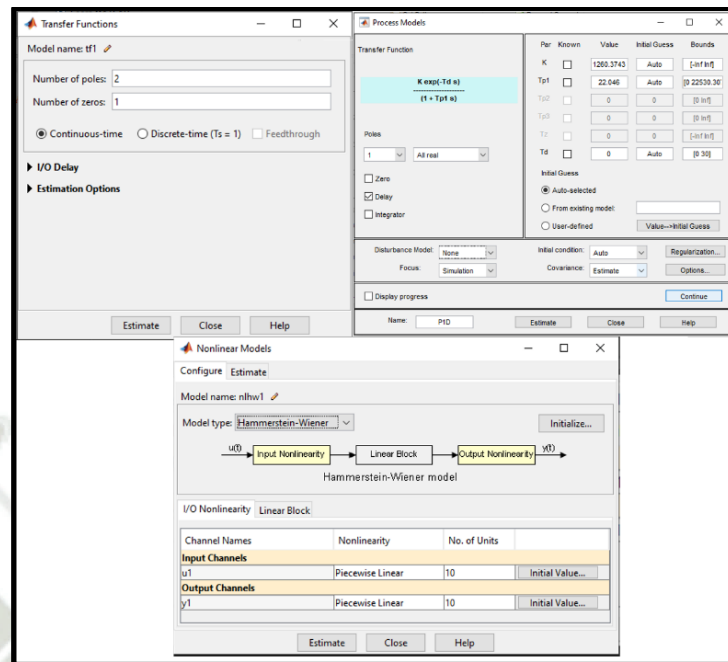


Figura 57. Muestra de distintos modelos de estimación
Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionados una serie de modelos de estimación para la función de transferencia, procedemos a analizar la salida de los distintos modelos, para corroborar el porcentaje de coincidencia que tienen.

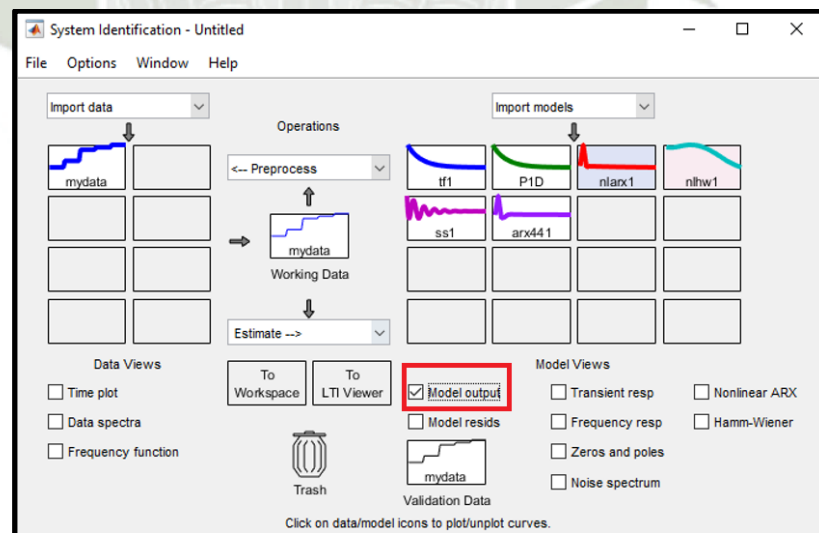


Figura 58. Análisis de distintos modelos de estimación
Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos, podemos identificar que el modelo que más porcentaje de coincidencia tiene es el modelo no lineal de Hammerstein Wiener, con una coincidencia del 96.85%.

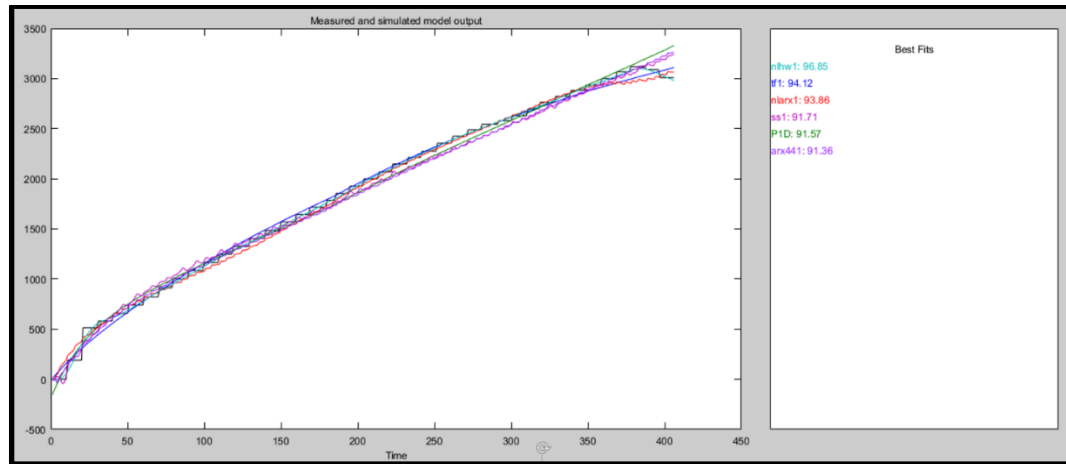


Figura 59. Resultados obtenidos de la estimación

Fuente: Elaboración propia

3.3. Función de transferencia del sistema

Tras haber realizado la estimación con los datos introducidos a partir de la adquisición de la planta, se puede ver que se presentan varios modelos con porcentajes bastante altos de aproximación.

Es necesario tener en consideración que si bien es cierto es importante tener un alto porcentaje de aproximación, no resulta conveniente trabajar con modelos que presenten no linealidades, ya que presentarán complicaciones de distintos tipos a la hora de realizar la sintonización de los parámetros PID. Es por ello que, del análisis realizado, tomaremos como función de transferencia la que nos provee el modelo Process Models. Procederemos así a exportar el modelo al espacio de trabajo.

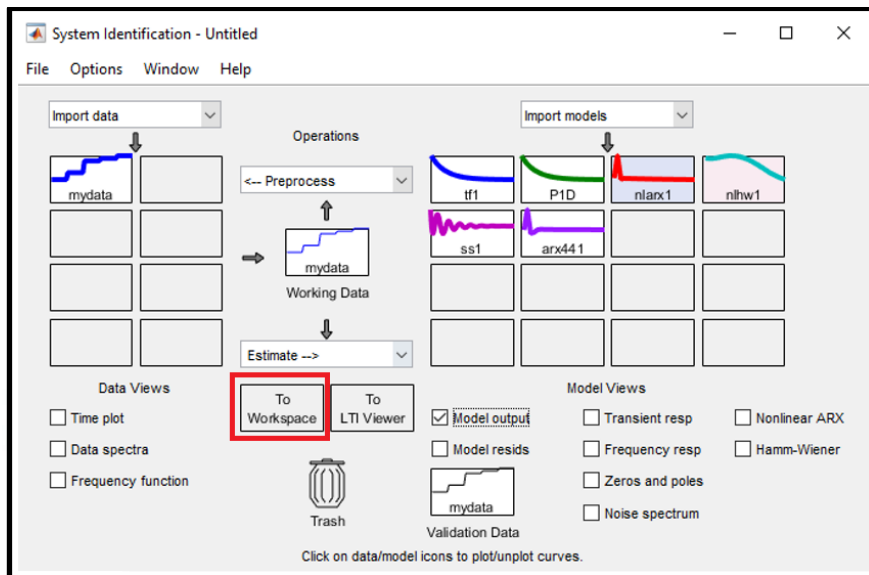


Figura 60. Exportación del modelo al espacio de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Al analizar el modelo que fue exportado al espacio de trabajo, se puede obtener la función de transferencia al operar la ecuación que dé como resultado con las respectivas ganancias asignadas. Es así que obtenemos la función de transferencia de la planta, que nos permitirá más adelante obtener la sintonización de parámetros a través de distintos métodos.

```
>> P1D

P1D =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      1+Tpl*s

      Kp = 1260.4
      Tpl = 22.046
      Td = 0

Name: P1D
Parameterization:
'P1D'
Number of free coefficients: 3
Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 91.57%
FPE: 5632, MSE: 5522
>> TF=tf([1260],[22.05 1])

TF =

      1260
-----
    22.05 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Figura 61. Construcción de la función de transferencia

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, podemos comprobar la respuesta que nos da la función de transferencia obtenida a una entrada de señal escalón.

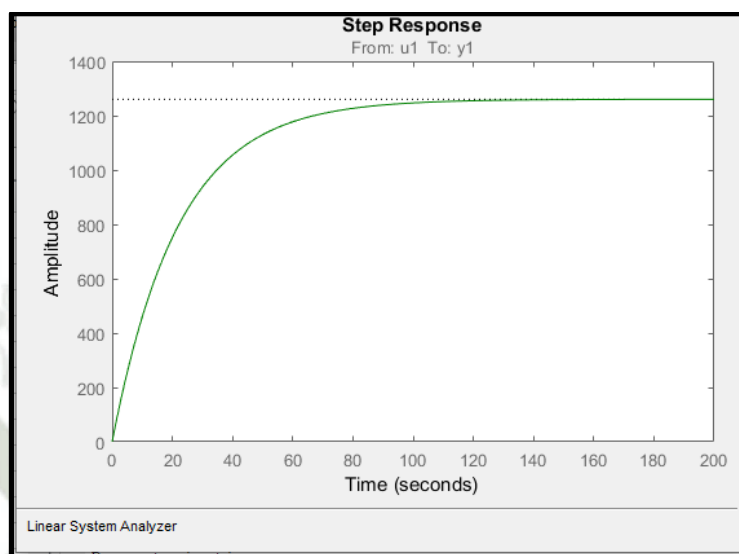


Figura 62. Respuesta de la función de transferencia al escalón
Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

4. Sintonización de parámetros PID para el sistema de control

La finalidad principal de éste proyecto de investigación es de comprobar el funcionamiento de los métodos heurísticos en la sintonización de controladores PID, para lo cual tras haber realizado el modelamiento de la planta y obtenido la función de transferencia, será necesario sintonizar los parámetros PID por distintos métodos convencionalmente aplicados, y finalmente por el algoritmo PSO, para así poder analizar su funcionamiento y poder compararlo.

Cabe resaltar que, para la sintonización de parámetros a través de todos los métodos, consideraremos como el valor máximo sobre impulso el 20% del valor de referencia, un tiempo de subida máximo de 3 segundos y el tiempo de establecimiento de 4 segundos.

4.1. Sintonización a través de PID Compact de Tia Portal

El software Tia Portal cuenta con una serie de herramientas aplicadas al control de procesos, que nos permitirán realizar la sintonización de parámetros PID del controlador de manera experimental y automática.

El bloque PID Compact nos proporcionará además una interfaz visual a través de la cual podemos comprobar y comparar las distintas respuestas del sistema ante distintos parámetros PID, que más adelante nos servirá para realizar la comparación de resultados.

4.1.1. Procedimiento de declaración y escalamiento de variables

Generamos un nuevo documento en el cual procederemos a realizar en primer lugar la declaración de las variables analógicas de entrada y salida que intervendrán en el proceso de control PID.

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...
1	Pulsos encoder	DWord	%ID1000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Valvula proporcional	Int	%QW80	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Control_Valvula	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Escalamiento_Valvula	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Escalamiento encoder	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Velocidad (RPM)	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	SP_Forzado	Real	%MDO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	<Agregar>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 63. Tabla de variables del proceso de control PID
Fuente: Elaboración propia

Tras declarar las variables e identificar adecuadamente el tipo de señales que son y el tamaño que tienen, se realiza un proceso de escalamiento simple, teniendo en cuenta que sólo trabajaremos con 2 variables principales, las cuales serán la entrada del encoder que registra la velocidad del motor y la válvula proporcional que regulará el flujo de presión hacia el motor neumático.

Tener en cuenta que, en el proceso de escalamiento de la salida de control de válvula, la salida se encuentra restringida para que no exceda la tensión máxima de 2.7 voltios, ya que se pudo comprobar que, a éste valor, se da la velocidad máxima de trabajo del motor neumático.



Figura 64. Escalamiento de la variable de salida del proceso
Fuente: Elaboración propia

Al escalar el encoder, se realiza la multiplicación por el valor numérico indicado de acuerdo a especificaciones del fabricante, lo cual nos dará una lectura adecuada de las revoluciones por minuto a las cuales gira el actuador.

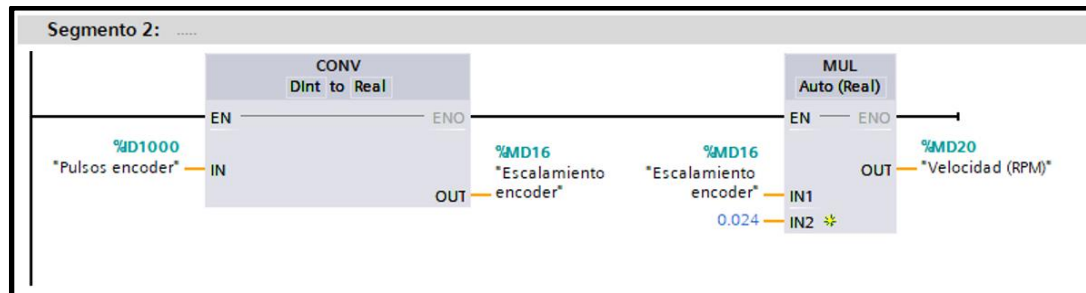


Figura 65. Escalamiento de la variable de entrada del proceso

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Configuración del bloque PID Compact

Se genera un nuevo bloque “Cyclic Interrupt”, en éste bloque se generará en bloque PID Compact para el control PID y la sintonización de parámetros. Al bloque se le asignan 2 entradas, tanto como el set point forzado, variable que posteriormente forzaremos para realizar el control, el valor escalado de velocidad del encoder, y 1 salida, que será la salida que controlará a la válvula reguladora de presión del proceso.

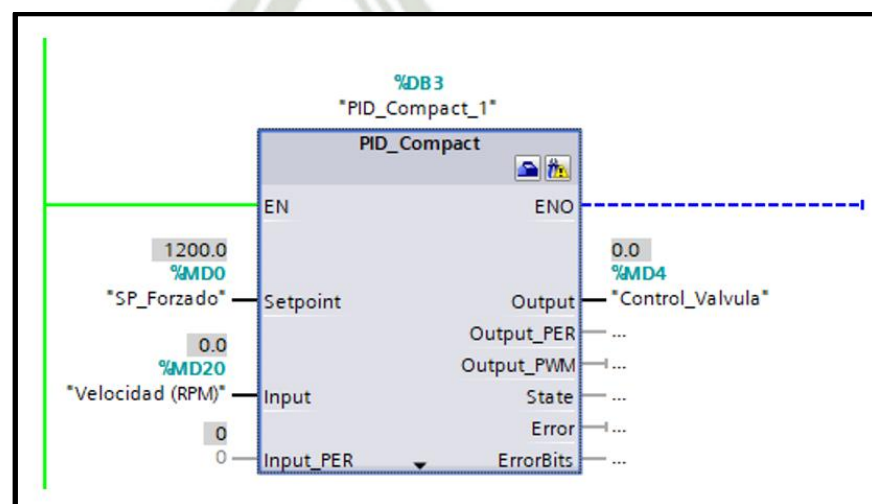


Figura 66. Generación de bloque PID Compact y asignación de variables

Fuente: Elaboración propia

En la configuración del bloque PID Compact, se deben configurar una serie de parámetros para realizar la optimización, así como para poder generar las respectivas gráficas relativas al control del proceso.

Se regula en primer lugar, la regulación en la variable del proceso, que será la velocidad del motor en revoluciones por minuto, además de asignar tanto la entrada como la salida del proceso que se utilizarán respectivamente. Finalmente, con términos de poder realizar las gráficas respectivas finalmente se asignan los límites inferior y superior que representarán el rango dentro del cual trabajará el sistema de control.

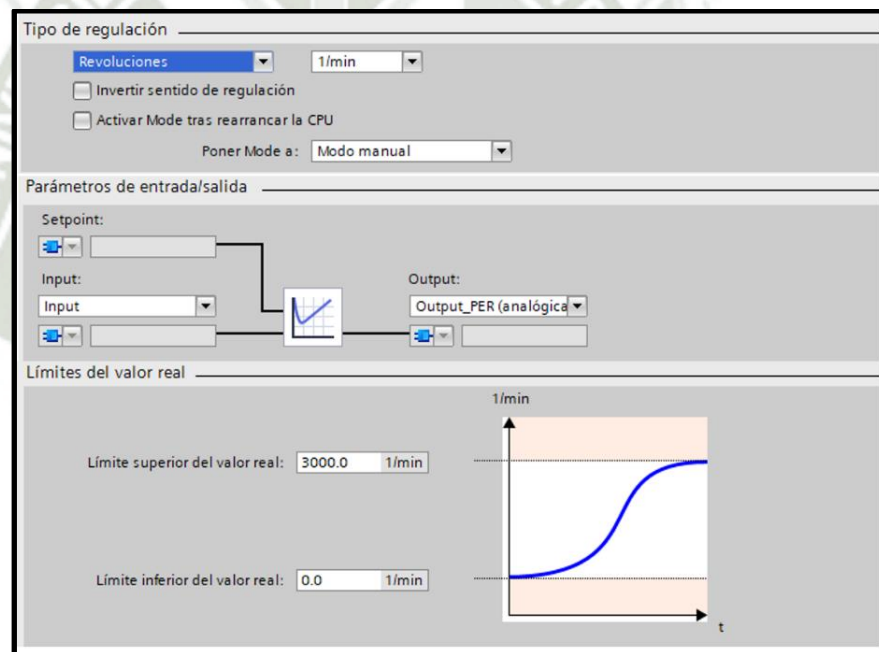


Figura 67. Parámetros de configuración de bloque PID Compact

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Optimización y obtención de parámetros PID

Una vez configurado el bloque PID Compact, se procederá a realizar la optimización que más adelante nos permitirá sintonizar los parámetros PID. Tras cargar el programa en el controlador tendremos que forzar la variable del set point,

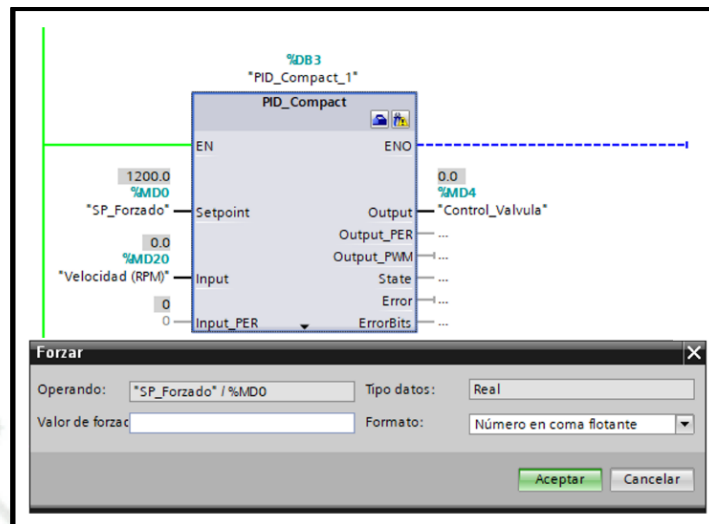


Figura 68. Forzando la variable del set point

Fuente: Elaboración propia

Asignaremos un set point de 1200 rpm para realizar la sintonización de parámetros, y posteriormente, procederemos a iniciar el bloque PID Compact.

Como se muestra en la figura a continuación, debemos iniciar en primer lugar la medición con un tiempo de muestreo de 0.3 segundos, para poder registrar los gráficos correspondientes del proceso (recuadro de color naranja). Posteriormente se iniciará la optimización fina del proceso (recuadro de color verde), lo cual generará la respuesta que se muestra en la gráfica.



Figura 69. Optimización de parámetros PID

Fuente: Elaboración propia

La gráfica que se obtiene de la optimización representará de manera visual la respuesta del sistema a la optimización que realiza de manera automática el controlador. La línea negra representará el valor de set point que asignamos previamente (1200 rpm), mientras que la curva verde representará el valor sentido de la velocidad del motor neumático, finalmente, la línea roja representará de manera porcentual la variación de la válvula de control que realiza el controlador PID.

Como se aprecia en la gráfica, al iniciar la optimización fina, el controlador enviará una serie de pulsos que estimularán al actuador. Inicialmente abrirá la válvula totalmente, lo que generará un sobre impulso en el sistema, y posteriormente el controlador irá variando gradualmente la variable de salida, ajustando en primer lugar la variable proporcional al introducir inestabilidad al sistema. Una vez sintonizado el parámetro de ganancia proporcional, finalmente se procederá a sintonizar el parámetro de tiempo de integración y el tiempo derivativo.

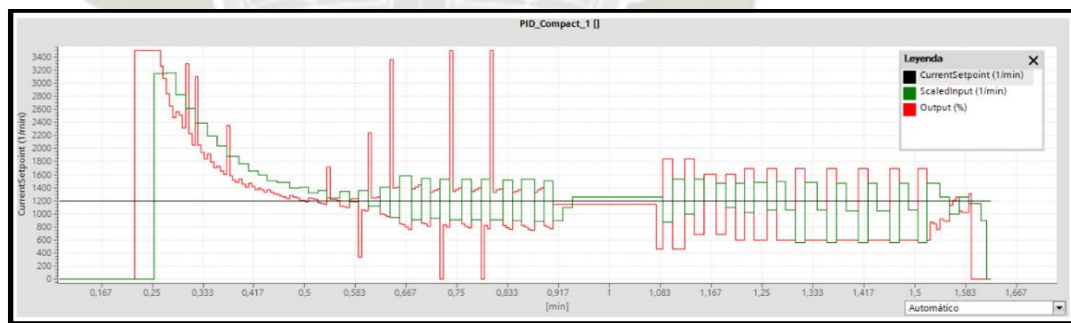


Figura 70. Optimización de parámetros PID

Fuente: Elaboración propia

Una vez que el sistema finaliza la optimización de parámetros en el procedimiento previamente mostrado, se puede acceder a los parámetros del controlador que se obtuvieron a partir de la sintonización automática de parámetros a través del bloque PID Compact.

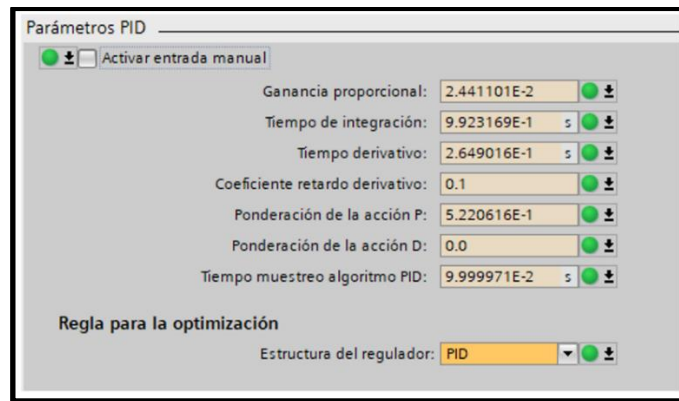


Figura 71. Parámetros PID obtenidos en la sintonización

Fuente: Elaboración propia

Realizando la respectiva conversión de las ganancias obtenidas, obtendremos los siguientes valores para las ganancias del controlador.

$$K_p = 0.0244$$

$$K_i = 0.0246$$

$$K_d = 0.00647$$

Finalmente, podemos probar los parámetros obtenidos mediante la sintonización realizada variando el valor de la referencia para distintos valores de velocidad. Como podemos ver, la respuesta que se registra es estable y precisa, aunque registra un ligero retraso en el control.

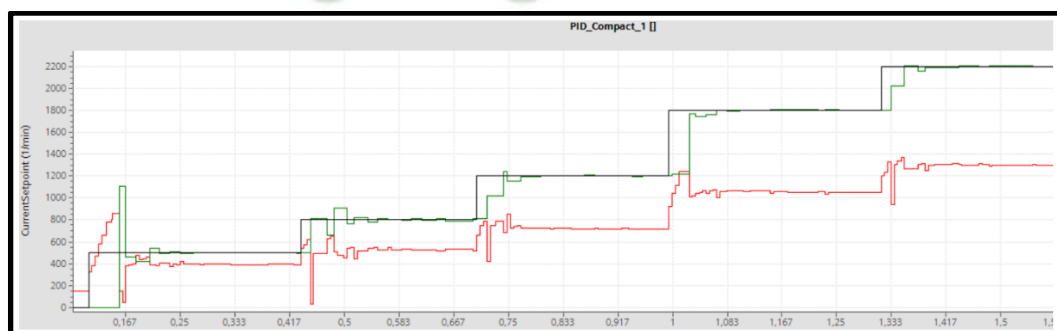


Figura 72. Prueba de distintos valores de consigna con los parámetros obtenidos

Fuente: Elaboración propia

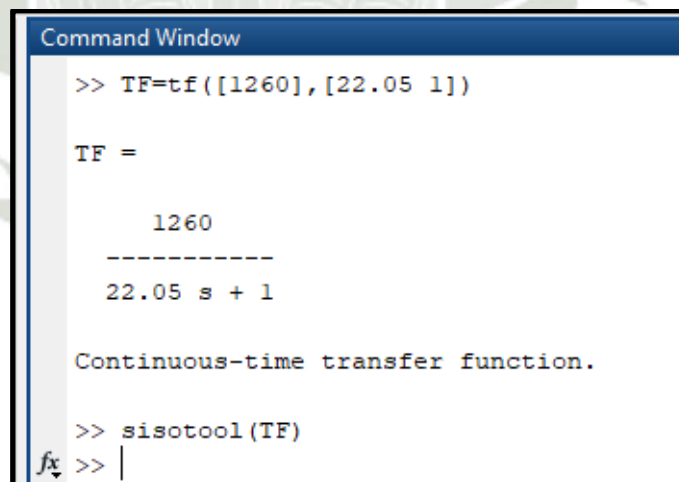
4.2. Sintonización a través de Sisotool de Matlab

A través del uso de la herramienta Control and Estimation Tools Manager o conocida como Sisotool, podemos realizar el diseño de una serie de distintos controladores de diversos tipos, basándonos en sistemas lineales que se analizarán gráficamente, ya sea a través de establecer polos y zeros en el lugar de raíces o a través del diagrama de Bode.

Es factible añadir ciertas restricciones de diseño basándose en la respuesta del sistema, para poder variar los parámetros mencionados previamente y obtener así los parámetros del controlador.

4.2.1. Declaración de función de transferencia

Tras haber construido la función de transferencia en el espacio de trabajo de Matlab, procedemos a llamar a la herramienta Sisotool asignándole como entrada la función de transferencia previamente implementada.



```
Command Window
>> TF=tf([1260],[22.05 1])

TF =

      1260
-----
 22.05 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> sisotool(TF)
fx >> |
```

Figura 73. Parámetros PID obtenidos en la sintonización

Fuente: Elaboración propia

Se ejecutará entonces la herramienta Sisotool, en la cual podremos analizar gráficamente distintos aspectos de la función de transferencia, como el diagrama de Bode así como el lugar de raíces.

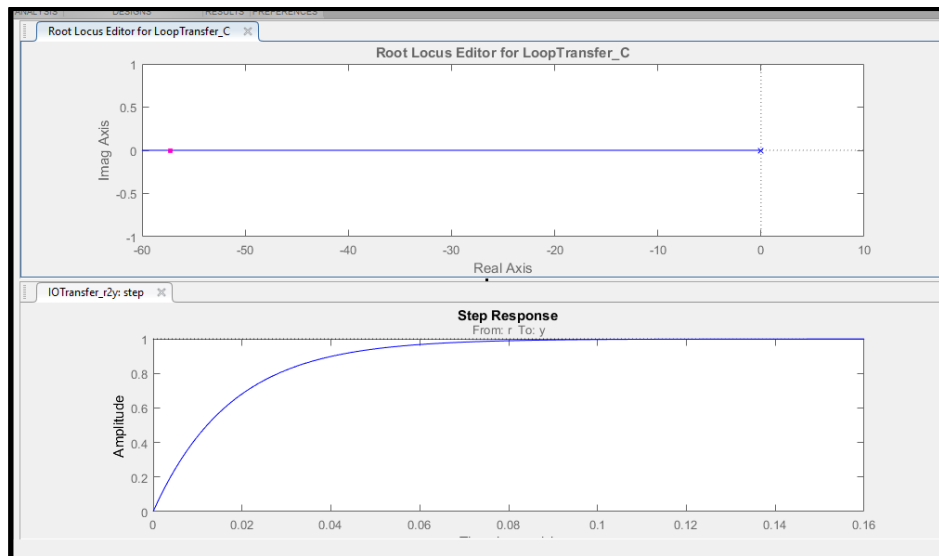


Figura 74. Entorno de Sisotool

Fuente: Elaboración propia

Para proceder con el respectivo análisis y diseño, será necesario establecer algunos parámetros y características para el controlador que deseamos diseñar, así como la respuesta deseada del mismo.

Establecemos primero la arquitectura con la cual sintonizaremos los parámetros de nuestro controlador.

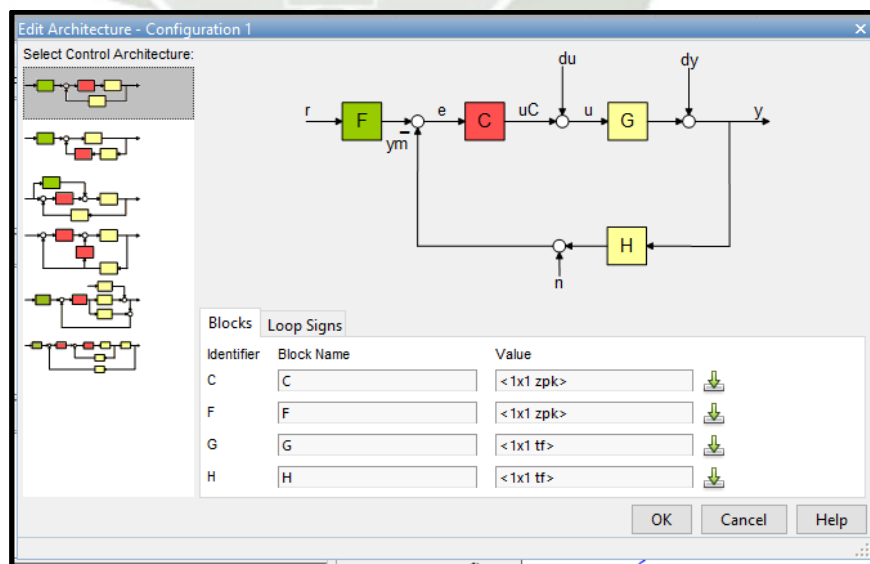


Figura 75. Arquitectura del controlador

Fuente: Elaboración propia

Además de ello, en la gráfica que representa la respuesta al escalón del sistema de control, añadiremos una restricción para que el sobre impulso no exceda el 20%, así como también estableceremos que el tiempo de subida no excederá los 3 segundos y finalmente el tiempo de establecimiento será de 4 segundos.

Una vez asignadas las restricciones, procederemos a realiza una sintonización PID, estableciendo valores que permitan a la respuesta cumplir con las condiciones previamente establecidas.

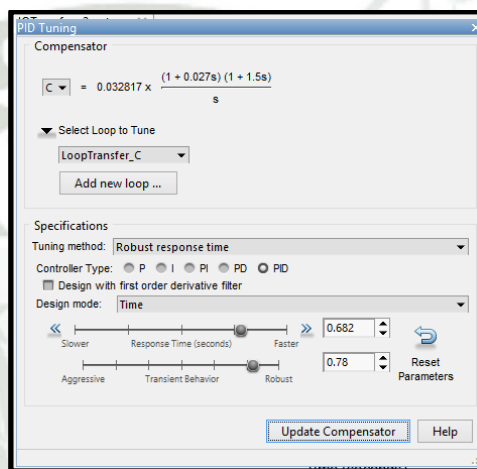


Figura 76. Sintonizacion PID
Fuente: Elaboración propia

Tras realizar la sintonización correspondiente, se obtuvo la siguiente respuesta a una entrada de escalón.

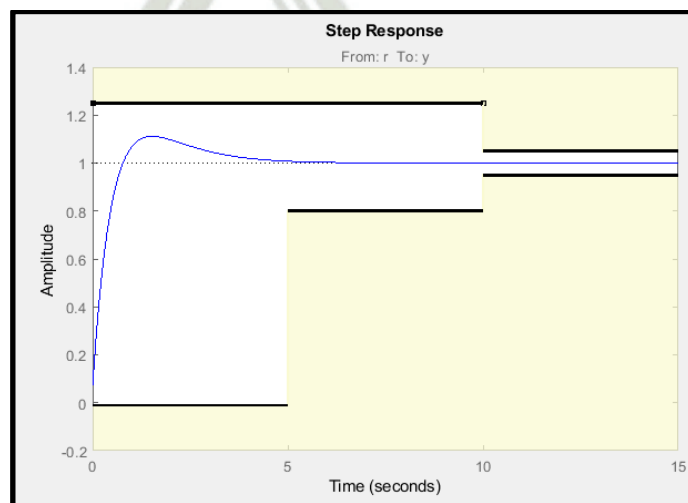


Figura 77. Respuesta al escalón del controlador
Fuente: Elaboración propia

De igual forma, la asignación realizada generará una variación tanto en el diagrama de Bode como en el lugar de raíces del sistema, como se muestra a continuación.

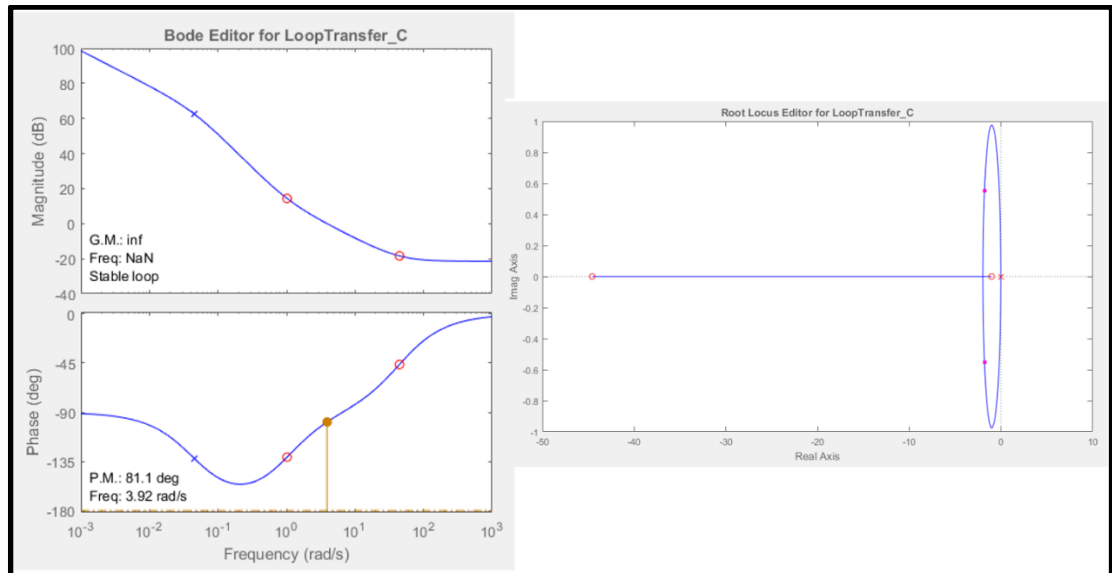


Figura 78. Diagrama de Bode y lugar de raíces del controlador diseñado.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, tras haber realizado la sintonización y haber comprobado la respuesta del sistema de control diseñado, se procede a exportar la función de transferencia del controlador al espacio de trabajo, para poder así obtener los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa.

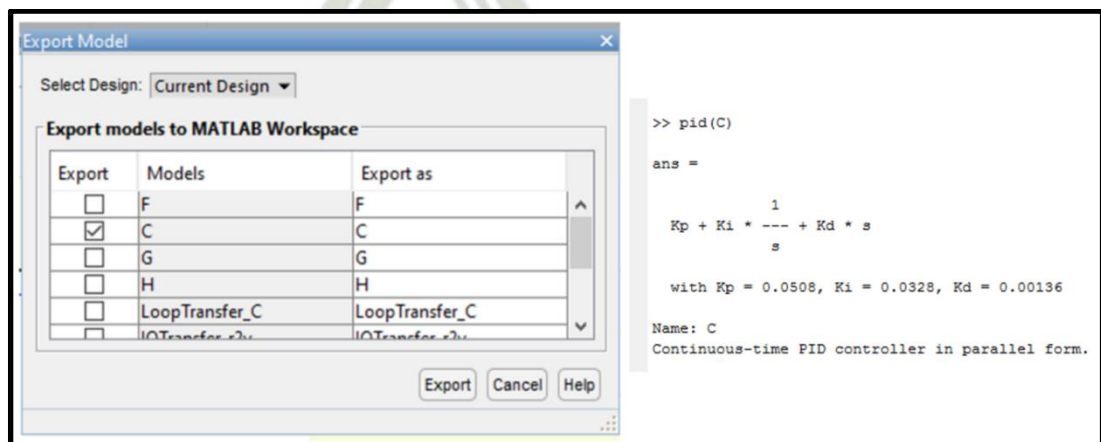


Figura 79. Exportación y obtención de parámetros PID

Fuente: Elaboración propia

Tras haber realizado el procedimiento de sintonización de parámetros PID haciendo uso de la herramienta Sisotool de Matlab, los parámetros de las ganancias PID obtenidos son los siguientes.

$$Kp = 0.0508$$

$$Ki = 0.0328$$

$$Kd = 0.00136$$

4.3. Sintonización a través de algoritmo PSO

El propósito central de éste trabajo de investigación, está enfocado en la sintonización de los parámetros PID a través de la aplicación del algoritmo de enjambre de partículas PSO, para su posterior análisis y comparación con la sintonización por los medios comúnmente usados en la sintonización de parámetros PID.

Para ello, haremos uso de un algoritmo que se procederá a detallar y desarrollar a continuación, el cual posteriormente se implementará haciendo uso de Matlab, donde se introducirá la función de transferencia previamente obtenida del sistema, para poder obtener los valores de las ganancias para los parámetros previamente introducidos, los cuales determinarán el comportamiento del algoritmo y sus características principales.

4.3.1. Metaheurística PSO

La optimización por enjambre de partículas inspira su funcionamiento en los distintos comportamientos de enjambres, manadas, etc. Se basa en el comportamiento social de los individuos, mas no en la evolución de los mismos, como otros algoritmos heurísticos.

En primera instancia, el algoritmo analiza las interacciones que realiza un individuo con su grupo y entorno social al cual pertenece, así como la influencia que el mismo ejerce en el enjambre.

4.3.2. Comportamiento de los individuos

El algoritmo PSO, se enfocará en el análisis de la dinámica de la conducta social de determinado grupo, analizando el comportamiento que tendrá cada individuo que componga a ésta población.

Cuando analizamos la conducta de cada individuo del grupo, podemos identificar una serie de factores que determinarán el comportamiento que tendrán en su grupo social:

- **Conocimiento sobre el entorno**

Los individuos deben tener conocimiento sobre el entorno en el cual se encuentran, a través de compartir información con los otros individuos a través de la comunicación.

- **Conocimiento histórico**

Los individuos tendrán un registro histórico de las distintas soluciones obtenidas por cada iteración del algoritmo, las cuales tomarán en cuenta y comunicarán a los demás individuos para poder obtener una solución óptima.

- **Experiencia de los demás individuos**

Los individuos tendrán conocimiento de la experiencia de los demás individuos, debido a que existe una constante comunicación entre ellos, con la finalidad de dar a entender cuál es la solución óptima del proceso.

La base del algoritmo PSO será entonces, el comportamiento social de los individuos y la información que comparten entre sí en el entorno en el que se desarrollan como grupo social. Tras explorar una serie de soluciones posibles, de

distintas calidades, la finalidad del algoritmo será entonces determinar cuál de ellas es la solución óptima.

4.3.3. Comportamiento del individuo líder

Se puede definir como individuo líder, al individuo cuya solución obtenida sea la que tenga la mejor calidad o posición respecto a la solución óptima que se busca, lo que ocasionará que, de acuerdo a una relación matemática que se detallará más adelante, los demás individuos tiendan a acercarse al líder, agrupando así las soluciones a una tendencia cada vez más óptima.

El comportamiento de cada individuo se regirá entonces, por el comportamiento del líder, además de la memoria que tiene del espacio, determinando su trayectoria en base a la mejor posición a la cual puede desplazarse, a través de una búsqueda constante de soluciones de mejor calidad.

Puede decirse entonces, que mientras el individuo se inflencia por su conocimiento y habilidades, el individuo líder del grupo tendrá el mismo comportamiento, pero a su vez ocasionará un agrupamiento de soluciones al ir encontrando soluciones cada vez más óptimas.

Son características del individuo líder:

- Será el individuo que tenga mejores características o habilidades.
- Los miembros del grupo social seguirán al líder.
- El rol del líder podrá pertenecer a distintos individuos en distintos momentos, dependiendo de los que tengan mejores características.
- El líder se basará en su experiencia para guiar a los demás individuos.

4.3.4. Nomenclatura del algoritmo PSO

Como se ha explicado previamente, el algoritmo PSO estudiará subespacios relativamente cercanos entre sí, encontrando así alternativas de distintas características, las cuales poco a poco irán convergiendo a un punto, el cual denominaremos solución óptima, en un número determinado de iteraciones.

Los parámetros asociados a cada individuo que compone el algoritmo serán los siguientes:

- $X_i(t)$: Posición del individuo en un tiempo t .
- $V_i(t)$: Velocidad del individuo en un tiempo t .
- P_{best} : Mejor posición histórica obtenida por el individuo.
- G_{best} : Mejor posición histórica obtenida por el individuo líder.

Cabe resaltar que es necesario establecer una correcta relación entre los parámetros P_{best} y G_{best} , ya que éste peso que asignaremos en un momento inicial, determinará las decisiones que irán tomando los individuos a medida que se desarrolla el algoritmo, pudiendo en un caso tender a acercarse más a la solución óptima planteada por el individuo líder, o teniendo la capacidad de explorar más el entorno, encontrando así un mayor número de soluciones posibles.

Mientras mayor sea la tendencia a aproximarse al líder del grupo, es posible incurrir en la aparición de cúmulos atraídos por soluciones subóptimas, a la vez que, si se da mayor prioridad a la búsqueda individual de cada individuo, se puede incurrir en un mayor número de individuos errantes.

4.3.5. Modelamiento del algoritmo PSO

Para poder realizar el modelamiento del algoritmo y que pueda describir el funcionamiento previamente descrito, será necesario seguir los siguientes principios en la construcción del mismo:

- Principio de proximidad

Este principio define la ubicación en el espacio y la distancia de los individuos entre sí.

- Principio de calidad

Este principio se basa en la reacción de los individuos, reaccionando de manera positiva tras analizar las soluciones más óptimas obtenidas.

- Principio de respuesta diversa

Este principio hace referencia a los distintos comportamientos que deben tener los individuos en su entorno social, con lo cual se obtienen nuevas soluciones, no solo siguiendo al líder.

- Principio de estabilidad

Es importante que, ante perturbaciones en el entorno, no se presenten variaciones bruscas en los distintos individuos, los cuales deben trasladarse lentamente de una manera estable.

- Principio de adaptabilidad

Representa el cambio del comportamiento de los individuos cuando se presenta una solución de mayor calidad en su entorno.

Función de vuelo

A través de la función de vuelo, podremos modelar de manera artificial el comportamiento que se da de manera real en un grupo de individuos. Podemos definir a la función de vuelo de la siguiente manera.

$$V(t + 1) = \omega \cdot V_i(t) + K_1 \cdot \text{rand.} (P_{best} - X_i(t)) + \dots + K_2 \cdot \text{rand.} (G_{best} - X_i(t))$$

Donde:

$X_i(t)$: Posición actual de la búsqueda

$V_i(t)$: Dirección de búsqueda de la partícula i en el momento inicial de la búsqueda

ω : Factor de inercia

K_1 : Constante de aceleración 1

K_2 : Constante de aceleración 2

P_{best} : Mejor posición del individuo

G_{best} : Mejor posición del individuo líder

La función de vuelo entonces, realizará la siguiente iteración, tomando en cuenta la velocidad anterior de la partícula, la posición anterior de la misma, así como la mejor posición que tuvo la partícula en su recorrido, guardando una relación basada en la experiencia propia, y la posición del líder del grupo de individuos.

En cuanto al factor de inercia, determinará el balance existente entre la diversificación, que se entiende como las soluciones alternas que cada partícula del grupo busca de manera individual, y la intensificación, que se entiende como el factor que determina el agrupamiento de partículas, lo que dará pie a que se reduzca el número de soluciones obtenidas.

Para el factor de inercia podemos establecer la siguiente función:

$$\omega = \left[\frac{\omega_{min} - \omega_{max}}{(Iter_{max} - 1)} \cdot (Iter - 1) \right] + \omega_{max}$$

Donde:

ω : Factor de inercia

ω_{min} : Factor de inercia mínimo

ω_{max} : Factor de inercia máximo

Iter: Número de iteración

Iter_{max}: Número de iteración máximo

De acuerdo a la función previa entonces, el valor del factor de inercia variará de manera lineal a lo largo del desarrollo del algoritmo, ocasionando que, en las primeras iteraciones, los individuos le den más importancia a la diversificación, y a medida que el algoritmo progresa en el tiempo, se irán agrupando al dar mayor importancia a la intensificación.

De ésta manera, al no tener información en un momento inicial, en la primera iteración las partículas se basarán en lo que determine el líder y esta tendencia irá variando en el tiempo.

Se definirán las constantes K1 y K2, denominadas constantes de aceleración, las mismas, determinarán la relación entre la importancia que se le da a la experiencia propia de cada partícula y a la experiencia colectiva del grupo. De ésta manera, determinarán la agresividad de los movimientos de las partículas, determinando cuán abruptos serán los movimientos.

Para $K2 = 0$ y $K1 > 0$, las partículas serán independientes sin tomar en cuenta la experiencia del grupo.

Para $K1 = K2$, las partículas se verán atraídas por el valor promedio entre la experiencia individual y grupal.

Si $K1$ es mayor, se dará prioridad a la experiencia individual de cada partícula, mientras que en el caso de que $k2$ sea mayor, se dará mayor prioridad a la experiencia grupal de las partículas.

$$K1 = \frac{(K1_{min} - K1_{max})}{iter_{max}} * iter + K1_{max}$$

$$K2 = \frac{(K2_{min} - K2_{max})}{iter_{max}} * iter + K2_{max}$$

Donde:

$K1$: Constante de aceleración 1

$K2$: Constante de aceleración 2

$K1_{min}$: Constante mínima de aceleración 1

$K2_{min}$: Constante mínima de aceleración 2

$K1_{max}$: Constante máxima de aceleración 1

$K2_{max}$: Constante máxima de aceleración 2

$iter$: Número de iteración

$iter_{max}$: Número de iteración máximo

Las ecuaciones previas determinarán los valores de $K1$ y $K2$, de manera que en las primeras iteraciones se tendrá el valor máximo de $K1$, dando pie a que las partículas tengan mayor capacidad de explorar su entorno, y a medida que avance el número de iteraciones, éste valor irá decrementándose, mientras que el valor de $K2$, que arranca en un valor mínimo ira incrementándose. Esto determinará el

comportamiento del enjambre, dando pie a que en un momento inicial las partículas tengan libertad de explorar su entorno tendiendo cada vez más a encontrar soluciones optimas a medida que avanza el número de iteraciones, para finalmente darle más prioridad a la experiencia colectiva agrupándose cerca a los mejores resultados obtenidos.

Es así entonces que el algoritmo tendrá el siguiente funcionamiento:

- Inicialmente, se define el número de individuos de la población, y los valores de $K1$ y $K2$.
- Se definen las velocidades iniciales de las partículas y el factor de inercia.
- Se calcula la función de adaptabilidad, y tras ello, se determinará si la posición de la partícula es la mejor, y en caso sea, actualizarla.
- Tras registrar los mejores valores de todas las partículas, se actualiza el mejor valor al $Gbest$, con lo que se asignara el rol de líder a la partícula que haya determinado la mejor solución.
- Tras haber asignado el rol de líder a la partícula con mejor solución, se actualizan las velocidades y posiciones. Finalmente se recalcula el peso de las partículas, y tras ello se cierra el bucle del algoritmo, ya sea tras el número de iteraciones definidas inicialmente o cuando se determine que se ha alcanzado una solución óptima.

Para actualizar tanto las velocidades como las posiciones se usarán entonces las siguientes ecuaciones:

$$V_i(t + 1) = \omega \cdot V_i(t) + K1 + K2$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1)$$

Donde:

$X_i(t)$: Posición actual de la búsqueda

$X_i(t+1)$: Posición siguiente de la búsqueda

$V_i(t)$: Dirección de búsqueda de la partícula i en el momento inicial de la búsqueda

$V_i(t+1)$: Dirección de búsqueda de la partícula i

K_1 : Constante de aceleración 1

K_2 : Constante de aceleración 2

ω : Factor de inercia

4.3.6. Implementación del algoritmo PSO

Tras explicar el comportamiento, así como el modelamiento del algoritmo, procederemos a comprobar el funcionamiento del mismo haciendo uso de Matlab.

El código implementado se compondrá inicialmente por un script denominado **PSO_FT_Costo.m**, en el cual declararemos la función de transferencia previamente modelada.

```
%% Ingresando la función de transferencia previamente modelada
G1=tf([1260],[22.05 1]);
Gc=tf([kd kp ki],[1 0]);
Gla=series(Gc,G1);
Glc=feedback(Gla,1);
[Y,T,X]=lsim(Glc,u,t);
reference=u;
output=Y;
err=reference-output;
[n,~]=size(err);
```

Figura 80. Ingreso de datos al algoritmo de Matlab

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, será necesario asignar los principales parámetros de la respectiva respuesta del controlador que deseamos obtener.

```
%% Ingresando la función de transferencia previamente modelada
G1=tf([1260],[22.05 1]);
Gc=tf([kd kp ki],[1 0]);
Gla=series(Gc,G1);
Glc=feedback(Gla,1);
[Y,T,X]=lsim(Glc,u,t);
reference=u;
output=Y;
err=reference-output;
[n,~]=size(err);

%% Máximo sobreimpulso(:)Mp
for k=1:n
mp(k)=(output(k)-reference(k))/reference(k)*100;
end
Mp=(max(output)-reference(n))/reference(n)*100;%Mp=max(mp);
```

Figura 81. Definición de variables del modelo matemático

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la respuesta del algoritmo, evaluaremos el costo de la sintonización haciendo uso del criterio del error integral.

```
%% Criterio de Error Integral:IAE
Itae=0;
for i=1:n
% Itse=Itse+t(i)*err(i)^2;
Itae=Itae+t(i)*abs(err(i));
end

%% Costo Total:cost_value
%costo_total=Mp+t_est+Itse;
costo_total=Itae;
```

Figura 82. Cálculo del costo

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, tendremos un script denominado **PSO_PID.m**, en el cual haremos uso de la función implementada en el script previamente explicado. De manera inicial, se asignan los valores de valores del número de iteraciones, número de partículas, así como las constantes y peso necesarios para el correcto funcionamiento del algoritmo.

```

%% Sintonización de parámetros por PSO
%% Parámetros del algoritmo

fprintf('Sintonización del controlador PID haciendo uso de algoritmo PSO\n')
fprintf('-----\n\n')
fprintf('Establecer parámetros del algoritmo\n\n')
iteraciones=input('1.Ingrese el número de iteraciones = ');
N=input('2.Ingrese el número de partículas = ');

D=3;
K_P=linspace(0,250,500); K_I=linspace(0,250,500);
K_D=linspace(0,75,500);

%Asignando los parámetros que determinarán la búsqueda del algoritmo
C1=1.2;C2=1.2;w=1.5;g=0;Vdmax=1;
    
```

Figura 83. Asignación de parámetros del algoritmo

Fuente: Elaboración propia

Basándose en el algoritmo entonces, se procederán a calcular distintos valores de ganancias K_p , K_i y K_d iteración a iteración, calculando el costo global y guardando los valores de los parámetros para los cuales se obtenga el menor costo.

```

%Inicializar el arreglo de N partículas con posiciones y velocidades aleatorias en D dimensiones.
%Se definen 4 vectores para graficar la respuesta obtenida
for i=1:N %Se determinarán posiciones de manera aleatoria, así como la velocidad
for d=1:D
X(i,d)=randi(100,1); V(i,d)=rand; %Parámetros iniciales

P(i,d)=X(i,d);
end
end
PBEST=inf*ones(1,N);%De manera inicial, se establece como infinito
G_Best=inf;%La mejor posición
for m=1:iteraciones
for i=1:N
[cost(i),M(i),Test(i),Ita(i)]=APSO2_costo(K_P(X(i,1)),K_I(X(i,2)),K_D(X(i,3)));
if cost(i)<PBEST(i)
PBEST(i)=cost(i);%Se actualiza el mejor costo local obtenido
P(i,1)=X(i,1);P(i,2)=X(i,2);P(i,3)=X(i,3);%Se actualiza la mejor posición local obtenida
if cost(i)<G_Best
G_Best=cost(i);g=i;
end
end
for d=1:D
V(i,d)=w*V(i,d)+C1*rand*(P(i,d)-X(i,d))+C2*rand*(P(g,d)-X(i,d));
    
```

Figura 84. Estructura del algoritmo PSO

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se imprimen los datos de los parámetros obtenidos, de igual manera que se graficará la evolución de la sintonización en los parámetros para el número de iteraciones realizadas.

```
fprintf('Sintonización del controlador PID haciendo uso de algoritmo PSO\n')
fprintf('-----\n\n')
disp(['Cantidad de interacciones: ' num2str(m)])
fprintf('-----\n\n')
disp(['Mejor costo Global obtenido: ' num2str(J(m))])
fprintf('Parametros PID sintonizados\n')
fprintf('-----\n\n')
fprintf('-----Kp-----Ki-----Kd-----\n\n')
disp(['Parámetros PID de la partícula: ' num2str([kp(m) ki(m) kd(m)])])
end
```

Figura 85. Impresión de datos generados por el algoritmo

Fuente: Elaboración propia

4.3.7. Sintonización de parámetros a través del algoritmo PSO

Una vez que se han asignado las características del modelamiento previamente realizado, así como las características de respuesta deseadas del controlador en el algoritmo PSO implementado en Matlab, procedemos a ejecutarlo.

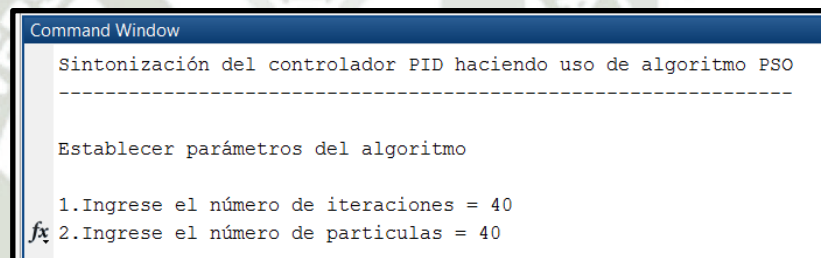


Figura 86. Ejecución del algoritmo PSO

Fuente: Elaboración propia

En la ventana de comandos, será necesario asignar el número de iteraciones y el número de partículas con los cuales se ejecutará el algoritmo PSO.

Iteración a iteración el algoritmo calculará los parámetros obtenidos, al igual que el costo global del cálculo realizado, y finalmente mostrará los resultados como se muestra en la figura.

```

Command Window

Sintonización del controlador PID haciendo uso de algoritmo PSO
-----

Cantidad de iteraciones: 40
-----

Mejor costo Global obtenido: 0.0039854
Parametros PID sintonizados
-----
-----Kp-----Ki-----Kd-----
Parámetros PID de la partícula: 42.0842      2.50501      3.90782
    
```

Figura 87. Resultados del algoritmo PSO

Fuente: Elaboración propia

De igual forma, se graficará la evolución de los valores obtenidos iteración a iteración en todo el proceso de sintonización del algoritmo, identificando de ésta manera, la progresión que presenta el algoritmo.

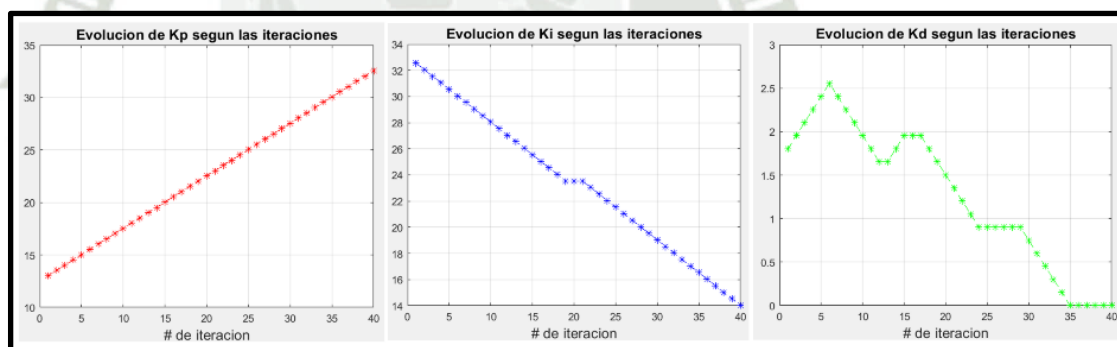


Figura 88. Gráfico de evolución de los parámetros del algoritmo PSO

Fuente: Elaboración propia

Para poder obtener los mejores parámetros posibles que se puedan obtener de la sintonización de parámetros del algoritmo, se realizaron distintas pruebas con distintos valores de número de iteraciones y de partículas.

Tabla 2. Sintonizaciones de parámetros realizadas a través del algoritmo PSO

Prueba	Algoritmo PSO					
	1	2	3	4	5	6
Iteraciones/Partículas	40/20	60/20	40/40	60/40	40/60	60/60
Kp	43.5872	45.0902	37.0741	47.5952	34.5691	21.0421
Ki	1.50301	1.002	12.024	9.01804	13.5271	1.002
Kd	6.31263	6.46293	7.06413	2.55511	0	0
Costo	0.0006233	0.0036156	0.0076267	0.0022139	0.00001587	0.00002383

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenido el juego de parámetros mostrado previamente, podemos realizar una comparación de resultados a través de Simulink, como se muestra en la siguiente figura.

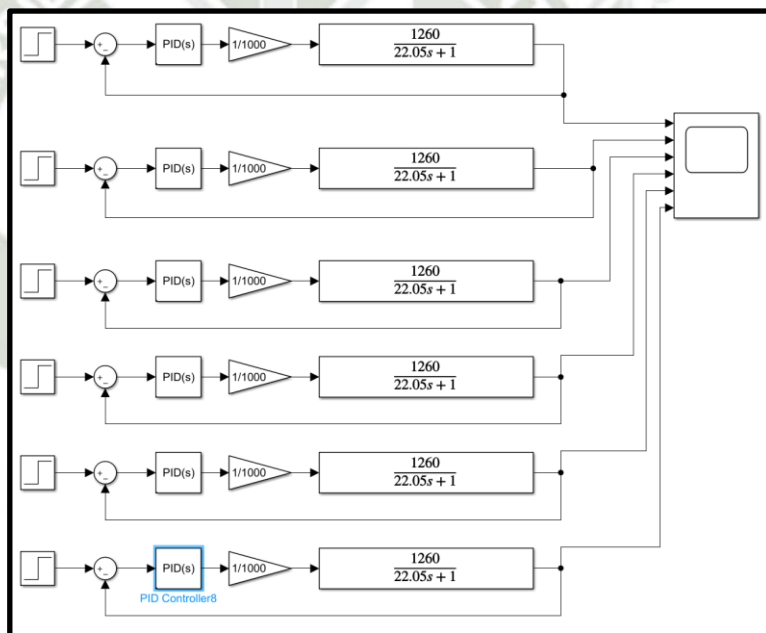


Figura 89. Diagrama de bloques – comparación de parámetros PSO

Fuente: Elaboración propia

Tomar en consideración que se realizó un escalamiento en la ganancia de todos los parámetros para poder adaptarlos al rango de ganancias con las cuales trabaja el controlador.

El gráfico obtenido del diagrama de bloques previamente implementado, que representa la comparación de respuestas para todos los parámetros sintonizados, se muestra en la siguiente figura.

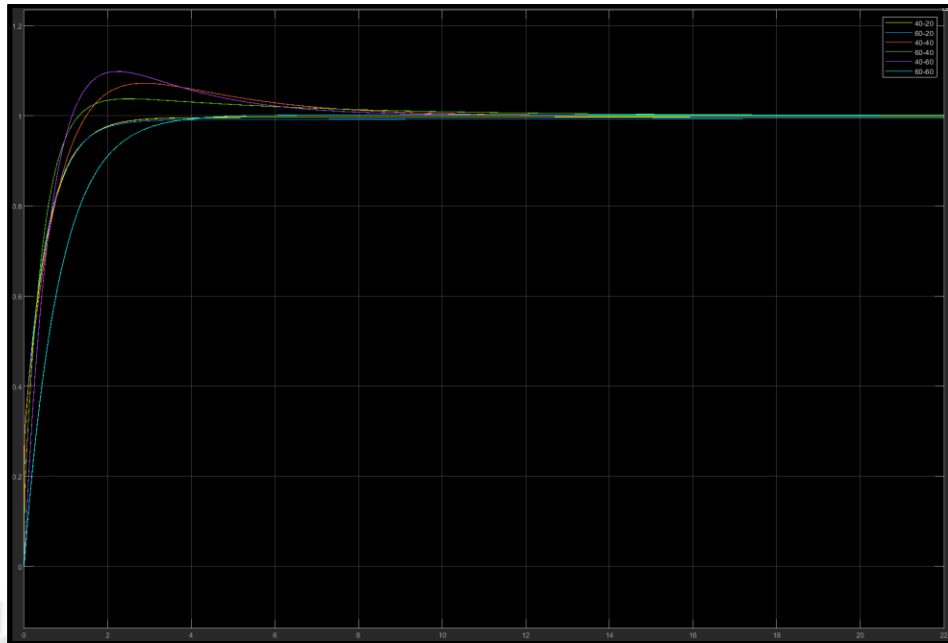


Figura 90. Gráfico de comparación de parámetros PID sintonizados por PSO

Fuente: Elaboración propia

Tras el análisis de las respuestas obtenidas en la simulación, procederemos a seleccionar la sintonización que representó el menor costo global obtenido del algoritmo, que como se aprecia, representa un buen tiempo de respuesta y un sobreimpulso que se encuentra dentro de las características deseadas del controlador.

Los parámetros PID seleccionados para 40 iteraciones y 60 partículas, con el menor costo global que se obtuvo en todas las pruebas, son los que se muestran a continuación.

$$Kp = 0.0345691$$

$$Ki = 0.0135271$$

$$Kd = 0$$

5. Análisis y comparación de resultados

Tras la sintonización de parámetros por distintos métodos desarrollada en el capítulo previo, será necesario realizar un análisis de la data obtenida, como realizar una comparación de resultados basándose en distintos métodos y técnicas, con la finalidad de poder analizar el rendimiento de cada método.

De ésta forma, para la comparación de resultados, tendremos en cuenta los siguientes parámetros.

Tabla 3. Parámetros PID para la comparación de resultados

	Métodos de sintonización		
	TIA Portal	Sisotool	PSO
Kp	0.0244	0.0508	0.0345691
Ki	0.0246	0.0328	0.0135271
Kd	0.00647	0.00136	0

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que los parámetros mostrados previamente, se encuentran escalados al ser multiplicados por un valor de ganancia de 1/1000, debido a que ésta operación será necesaria para poder ser posteriormente probados en el bloque PID Compact.

5.1. Comparación de resultados a través de Simulink

Haciendo uso de la herramienta de Simulink de Matlab, se puede implementar un diagrama de bloques, en el cual se simularán 3 lazos de control PID para la planta previamente modelada. Cada lazo de control se configurará con los parámetros PID detallados previamente.

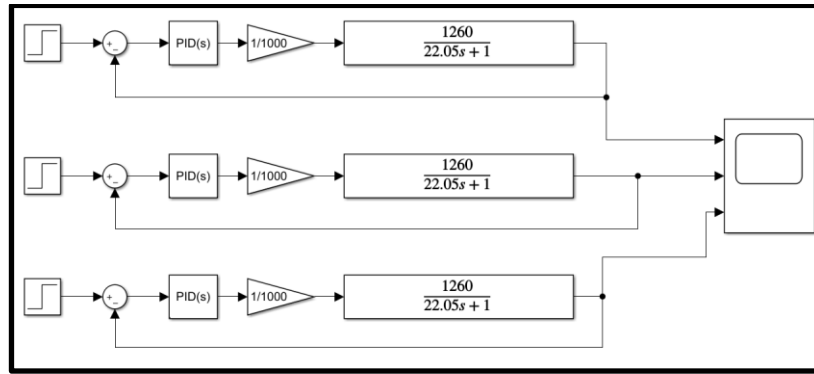


Figura 91. Diagrama de bloques en Simulink para la comparación de resultados
Fuente: Elaboración propia

De ésta forma, obtendremos la comparación de la respuesta de los 3 controladores de manera gráfica.

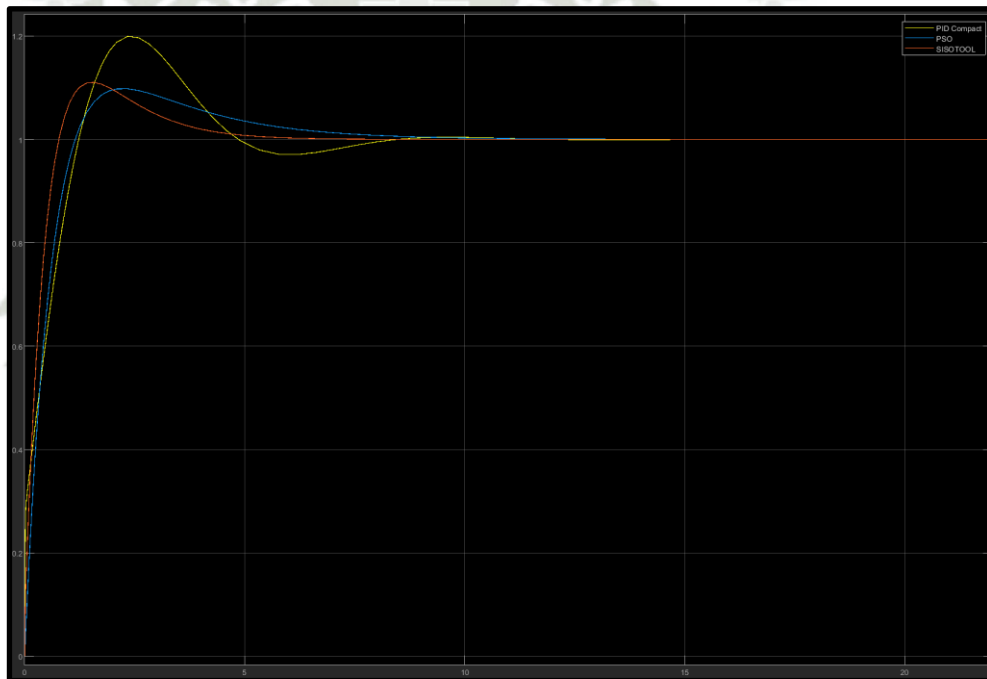


Figura 92. Respuesta de los controladores simulados en Simulink
Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la gráfica obtenida, si bien es cierto los 3 métodos de sintonización tienen una respuesta relativamente similar en cuanto al tiempo de establecimiento, se puede apreciar que la sintonización de parámetros a través de PID Compact, tiene un elevado sobre impulso, lo cual resulta perjudicial para el control del proceso, teniendo en cuenta que si bien es cierto el tiempo de establecimiento es bueno, el sistema tiende a ser más inestable.

5.2. Comparación de resultados a través de Trace de Tia Portal

Como segundo método de comparación de resultados, nos basaremos en la herramienta Trace de Tia Portal, la cual nos permite realizar una serie de muestreos en el tiempo de distintas direcciones de memoria del PLC, las cuales posteriormente se almacenarán en un bloque de datos de controlador.

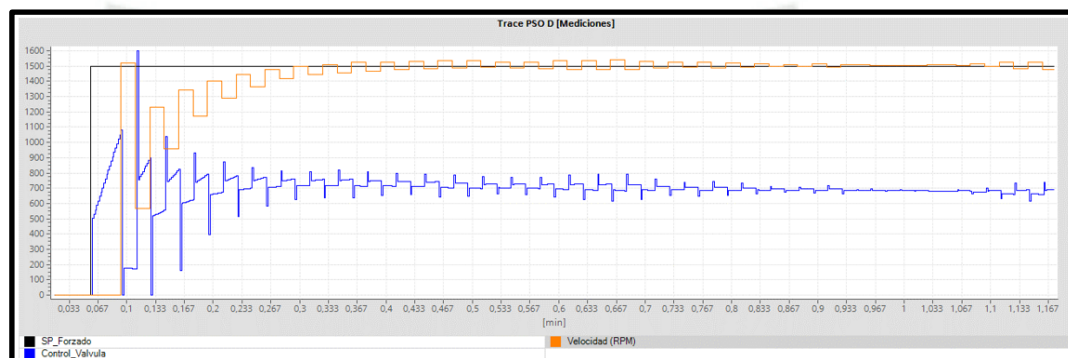


Figura 93. Muestra de trace obtenido en Tia Portal

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que con el propósito de poder ingresar los parámetros PID obtenidos previamente, es necesario convertirlos a través de fórmulas predeterminadas de K_p , K_i y K_d a K_p , T_i y T_d . De ésta manera podemos cargarlos y probarlos en el bloque PID Compact.

Tabla 4. Parámetros K_p , T_i y T_d

	Métodos de sintonización		
	TIA Portal	Sisotool	PSO
K_p	0.0244	0.0508	0.0345691
T_i	0.991869919	1.54878049	2.55554406
T_d	0.265163934	0.02677165	0

Fuente: Elaboración propia

Como configuración para la adquisición de datos, configuraremos un muestreo a 10 muestras por segundo, lo que generará un total de 250 muestras en 25 segundos, las cuales se procederán a exportar a una tabla de Excel, donde deberán ser debidamente filtradas, para poder así proceder a graficarlas y analizarlas.

5.2.1. Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por PID Compact

Al aplicar la sintonización de parámetros a través de PID Compact de TIA Portal, se obtiene un sobre impulso de 32 %, un tiempo de retardo de 2.1 segundos, un tiempo de subida de 2.2 segundos, un tiempo pico de 2.5 segundos y un tiempo de establecimiento (aplicando el criterio del 2 %) de 8.2 segundos.

En la figura se puede apreciar la respuesta que se obtuvo a través de éste método.

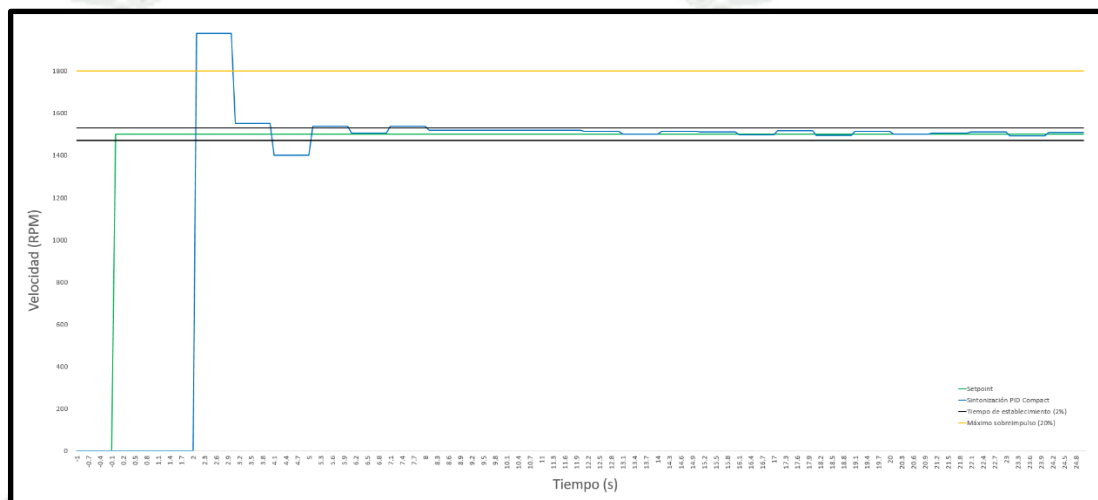


Figura 94. Respuesta obtenida a través de la sintonización por PID Compact
Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por Sisotool de Matlab

Al aplicar la sintonización de parámetros a través de la herramienta Sisotool de Matlab, se obtiene un sobre impulso de 16 %, un tiempo de retardo de 1.1 segundos, un tiempo de subida de 4.1 segundos, un tiempo pico de 4.5 segundos y un tiempo de establecimiento (aplicando el criterio del 2 %) de 18.1 segundos.

En la figura se puede apreciar la respuesta que se obtuvo a través de éste método.

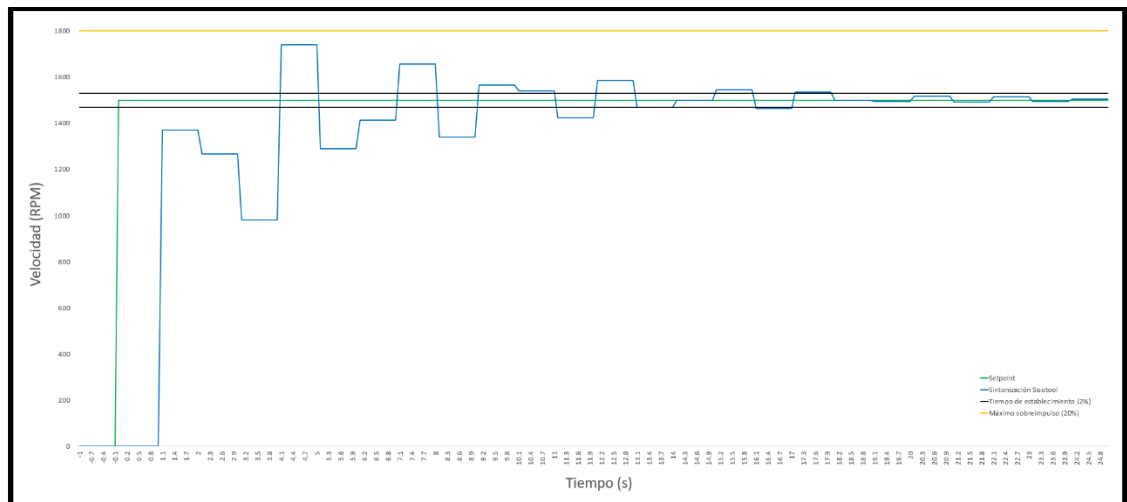


Figura 95. Respuesta obtenida a través de la sintonización por Sisotool de Matlab
Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Análisis de resultados obtenidos a través de la sintonización por el algoritmo PSO

Al aplicar la sintonización de parámetros a través de la implementación del algoritmo PSO en Matlab, se obtiene un sobre impulso de 9.7 %, un tiempo de retardo de 2.1 segundos, un tiempo de subida de 2.1 segundos, un tiempo pico de 2.5 segundos y un tiempo de establecimiento (aplicando el criterio del 2 %) de 13.1 segundos.

En la figura se puede apreciar la respuesta que se obtuvo a través de éste método.

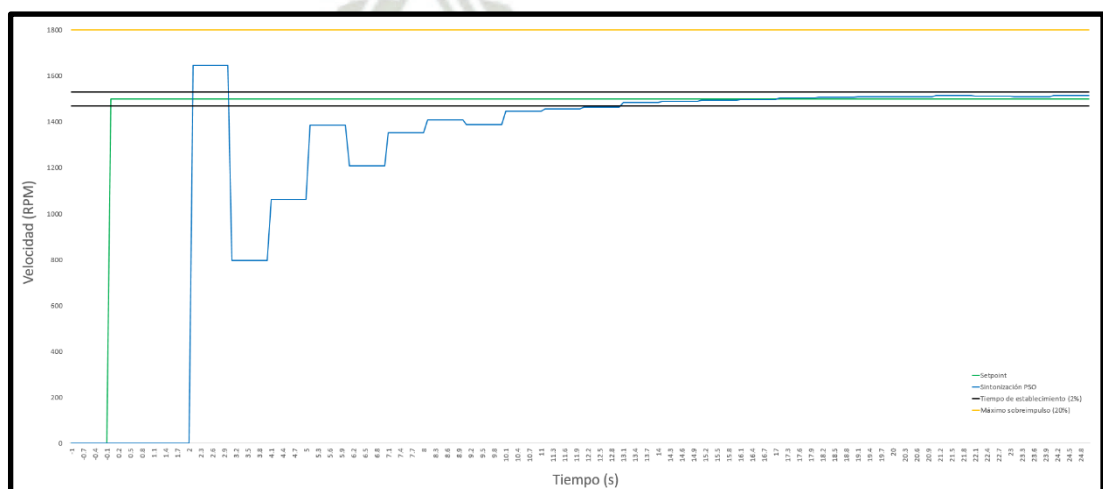


Figura 96. Respuesta obtenida a través de la sintonización por el algoritmo PSO
Fuente: Elaboración propia

5.2.4. Comparación de los resultados obtenidos

Si procedemos a analizar los datos obtenidos para los 3 métodos de sintonización aplicados, obtendremos el siguiente gráfico, que se basa en los datos obtenidos de ensayos reales en la planta a través del PLC haciendo uso de la herramienta Trace.

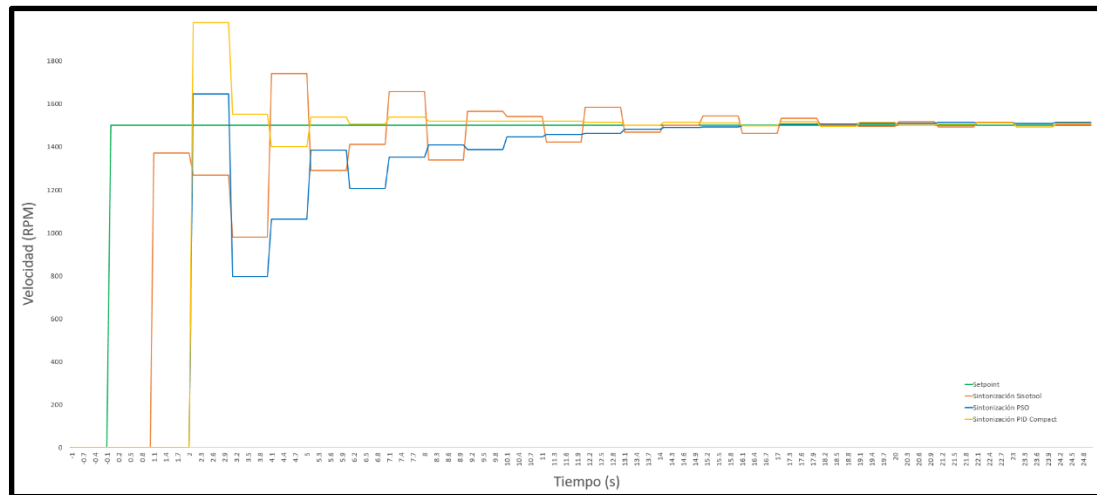


Figura 97. Comparación de respuestas obtenidas a través de los distintos métodos de sintonización

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura, todos los métodos aplicados tienen respuestas similares. Si bien es cierto los parámetros sintonizados a través de la optimización por PID Compact brindan un mejor tiempo de establecimiento en relación a la sintonización por Sisotool y PSO, el sobre impulso que presenta excede ampliamente a los criterios de diseño del controlador, por lo que resulta mucho más conveniente aplicar el método de sintonización por el algoritmo PSO, que nos brinda un buen tiempo de respuesta, y el sobre impulso es mínimo en comparación al sobre impulso máximo permitido.

En la tabla mostrada a continuación, se detallan mejor las principales características obtenidas de manera experimental al probar los parámetros por los 3 métodos.

Tabla 5. Descripción de características de cada tipo de sintonización

Metodo de sintonización	Mp(%)	Td(s)	Tr(s)	Tp(s)	Ts(s)
PID Compact	32	2.1	2.2	2.5	8.2
SISOTOOL	16	1.1	4.1	4.5	18.1
PSO	9.7	2.1	2.2	2.5	13.1

Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis de resultados por estándares de desempeño

Como parte del análisis y comparación de resultados obtenidos a partir de la implementación de diversos métodos para la sintonización de parámetros, resulta necesario el cálculo de distintos índices de desempeño, los cuales registrarán el valor de costo de cada una de las soluciones planteadas.

Es así entonces que se tomará en cuenta el error de las distintas soluciones para el análisis, definiendo la diferencia que existe entre la referencia y la respuesta, como se muestra a continuación (Trujillo, 2018).

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

Para el análisis, se tomarán en cuenta 3 indicadores de desempeño para cada método de sintonización analizado.

Integral del valor absoluto del error (IAE), se define:

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

Acumula el error presente en el estado transitorio, sin asignar peso alguno al error. Se caracteriza por dar una respuesta con poco sobre impulso y bien amortiguada. No cancela los cambios de signo (Trujillo, 2018).

Integral del error cuadrático (ISE), se define:

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

Para éste caso, se eleva la función del error al cuadrado, lo que ocasiona que se supriman valores negativos, ocasionando así que se asigne un mayor peso a errores grandes mientras que se asigne un peso menor a errores pequeños (Trujillo, 2018).

Integral del tiempo multiplicado por el valor absoluto del error (ITAE), se define:

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

Debido a su acción, los errores que al principio son amplios son relativamente ignorados debido a que se multiplican por valores pequeños de tiempo, dándole así un peso menor a errores grandes, mientras que se les da más peso a errores pequeños (Trujillo, 2018).

De ésta forma, procederemos a implementar el siguiente programana en Simulink, a través del cual se podrá analizar las respuestas que brinda cada método de sintonización de parámetros y visualizándolas en un mismo osciloscopio.

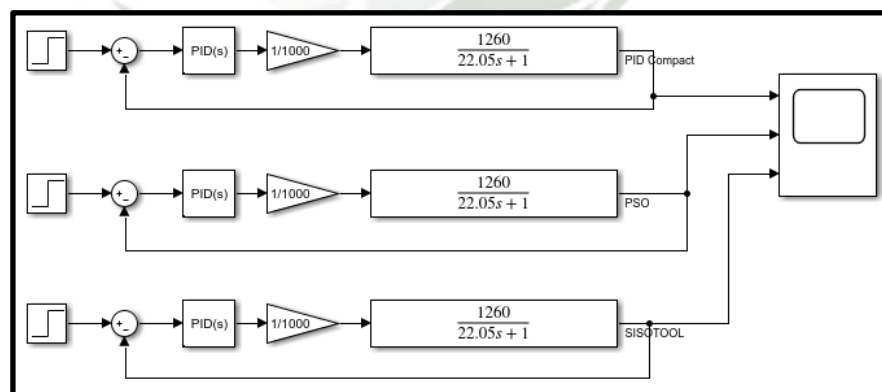


Figura 98. Diagrama para comparación de respuestas de controladores PID

Fuente: Elaboración propia

Es así como se obtiene la siguiente gráfica, que nos permite analizar las distintas respuestas que se obtienen de los métodos de sintonización.

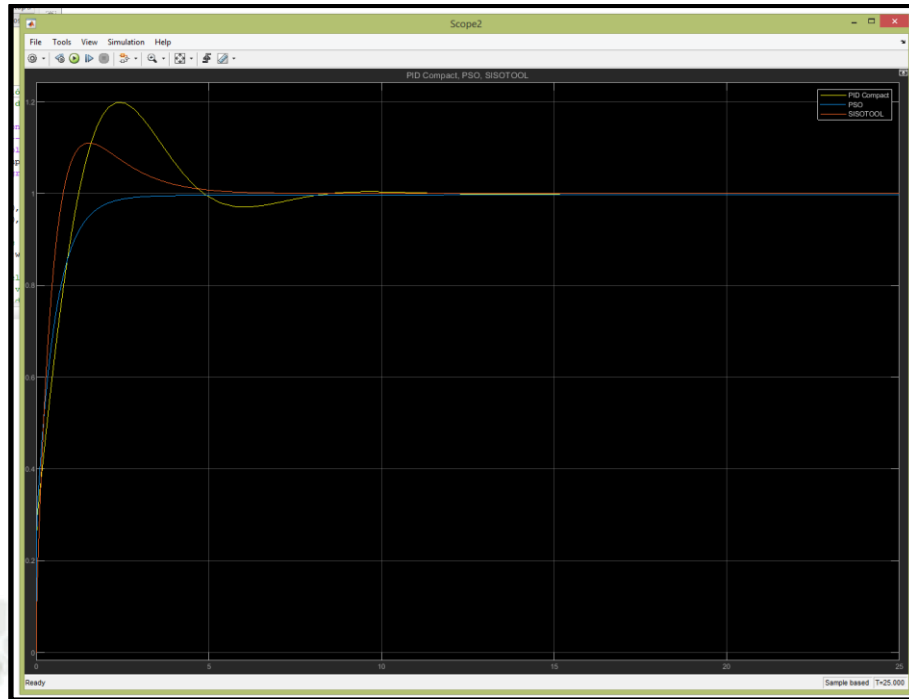


Figura 99. Comparación de respuestas de controladores PID
Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, será necesario exportar los datos correspondientes al gráfico previamente mostrado, para posteriormente poder realizar el cálculo de los distintos estándares de desempeño mediante una hoja de cálculo Excel.

Con el propósito de la exportación de resultados, configuraremos la herramienta Logging en el osciloscopio, asignando el formato de Dataset, y el nombre de “Desempeno”.

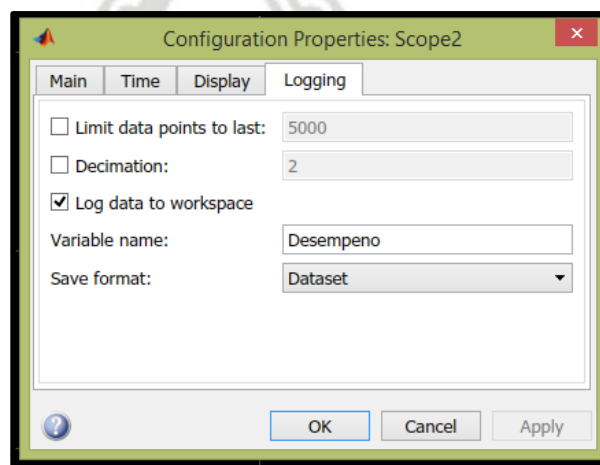
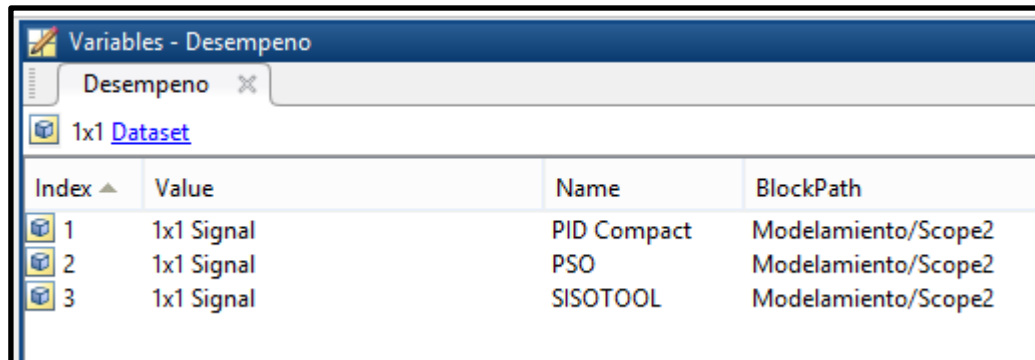


Figura 100. Logging de datos de simulink
Fuente: Elaboración propia

Una vez que Simulink genere los bloques de datos correspondientes, podremos acceder a ellos a través del Workspace de Matlab.



Index	Value	Name	BlockPath
1	1x1 Signal	PID Compact	Modelamiento/Scope2
2	1x1 Signal	PSO	Modelamiento/Scope2
3	1x1 Signal	SISOTOOL	Modelamiento/Scope2

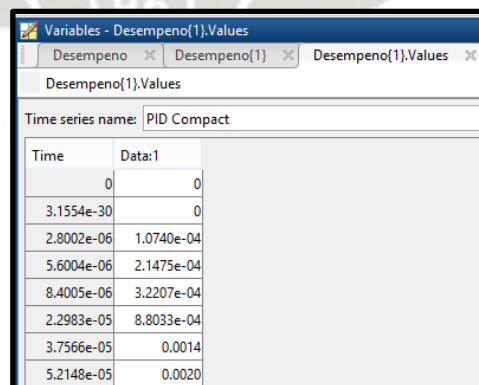
Figura 101. Variables exportadas al Workspace de Matlab

Fuente: Elaboración propia

En el dataset creado, encontraremos los bloques de datos para cada uno de los 3 métodos de sintonización de parámetros estudiados.

5.3.1. Análisis de estándares de desempeño obtenidos por PID Compact

Para el análisis de los resultados obtenidos por PID Compact, realizaremos el cálculo de los estándares de desempeño exportando los datos a una tabla de Excel. Como se puede apreciar en la figura, se obtendrán dos columnas de datos, correspondientes al tiempo de muestreo, así como al valor de velocidad.



Time	Data:1
0	0
3.1554e-30	0
2.8002e-06	1.0740e-04
5.6004e-06	2.1475e-04
8.4005e-06	3.2207e-04
2.2983e-05	8.8033e-04
3.7566e-05	0.0014
5.2148e-05	0.0020

Figura 102. Análisis de datos exportados para sintonización PID Compact

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los resultados obtenidos del controlador PID sintonizado por PID Compact, realizaremos el cálculo de los estándares de desempeño exportando los datos a una tabla de Excel en la cual se realiza el cálculo de los valores para IAE, ISE e ITAE.

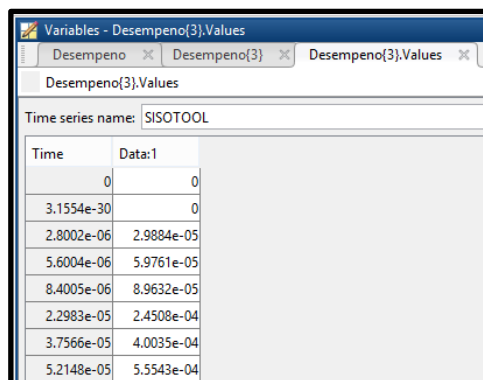
Tabla 6. Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización PID Compact

Setpoint	1			
PID Compact				
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE
0	0	1	1	0
3.16E-30	0	1	1	3.155E-30
2.80E-06	0.0001074	0.9998926	0.9997852	2.8E-06
5.60E-06	0.0002148	0.9997852	0.9995705	5.599E-06
8.40E-06	0.0003221	0.9996779	0.999356	8.398E-06
2.30E-05	0.0008803	0.9991197	0.9982401	2.296E-05
3.76E-05	0.0014375	0.9985625	0.997127	3.751E-05
5.21E-05	0.0019936	0.9980064	0.9960167	5.204E-05
6.67E-05	0.0025486	0.9974514	0.9949092	6.656E-05
0.0001	0.0038116	0.9961884	0.9923914	9.964E-05
0.0001333	0.0050689	0.9949311	0.9898879	0.0001326
0.0001666	0.0063206	0.9936794	0.9873988	0.0001655
0.0001999	0.0075666	0.9924334	0.984924	0.0001984
0.0002332	0.0088071	0.9911929	0.9824633	0.0002311
0.0003189	0.0119768	0.9880232	0.9761899	0.0003151
0.0004047	0.01511	0.98489	0.9700083	0.0003986
0.0004904	0.0182073	0.9817927	0.9639169	0.0004815

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Análisis de estándares de desempeño obtenidos por Sisotool de Matlab

De igual manera al paso previo, para realizar el análisis de los resultados obtenidos por la sintonización a través de Sisotool, analizamos el bloque de datos correspondiente en el arreglo obtenido previamente a través de la exportación de datos de Simulink.



Time	Data:1
0	0
3.1554e-30	0
2.8002e-06	2.9884e-05
5.6004e-06	5.9761e-05
8.4005e-06	8.9632e-05
2.2983e-05	2.4508e-04
3.7566e-05	4.0035e-04
5.2148e-05	5.5543e-04

Figura 103. Análisis de datos exportados para sintonización Sisotool

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los resultados obtenidos del controlador PID sintonizado por Sisotool, realizaremos el cálculo de los estándares de desempeño exportando los datos a una tabla de Excel en la cual se realiza el cálculo de los valores para IAE, ISE e ITAE.

Tabla 7. Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización Sisotool

Setpoint	1				
SISOTOOL					
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE	
0	0	1	1	0	
3.16E-30	0	1	1	3.155E-30	
2.80E-06	2.99E-05	0.9999701	0.9999402	2.8E-06	
5.60E-06	5.98E-05	0.9999402	0.9998805	5.6E-06	
8.40E-06	8.96E-05	0.9999104	0.9998207	8.4E-06	
2.30E-05	2.45E-04	0.9997549	0.9995099	2.298E-05	
3.76E-05	4.00E-04	0.9995997	0.9991995	3.755E-05	
5.21E-05	0.0005554	0.9994446	0.9988895	5.212E-05	
6.67E-05	0.0007103	0.9992897	0.9985799	6.668E-05	
0.0001	0.0010632	0.9989368	0.9978747	9.991E-05	
0.0001333	0.0014151	0.9985849	0.9971717	0.0001331	
0.0001666	0.0017661	0.9982339	0.996471	0.0001663	
0.0001999	0.0021161	0.9978839	0.9957724	0.0001995	
0.0002332	0.0024651	0.9975349	0.9950759	0.0002326	
0.0003189	0.0033596	0.9966404	0.9932921	0.0003179	
0.0004047	0.0042478	0.9957522	0.9915225	0.000403	
0.0004904	0.0051297	0.9948703	0.9897668	0.0004879	

Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Análisis de estándares de desempeño obtenidos por algoritmo PSO

Finalmente, para realizar el análisis de los resultados obtenidos por la sintonización a través de la aplicación del algoritmo PSO, analizamos el bloque de datos correspondiente en el arreglo obtenido previamente a través de la exportación de datos de Simulink.

Time	Data:1
0	0
3.1554e-30	0
2.8002e-06	1.0795e-04
5.6004e-06	2.1586e-04
8.4005e-06	3.2373e-04
2.2983e-05	8.8488e-04
3.7566e-05	0.0014
5.2148e-05	0.0020

Figura 104. Análisis de datos exportados para sintonización PSO

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los resultados obtenidos del controlador PID sintonizado por el algoritmo PSO, realizaremos el cálculo de los estándares de desempeño exportando los datos a una tabla de Excel en la cual se realiza el cálculo de los valores para IAE, ISE e ITAE.

Tabla 8. Muestra de valores obtenidos para indicadores por sintonización PSO

Setpoint	1			
PSO				
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE
0	0	1	1	0
3.16E-30	0	1	1	3.155E-30
2.80E-06	1.08E-04	0.9998921	0.9997841	2.8E-06
5.60E-06	2.16E-04	0.9997841	0.9995683	5.599E-06
8.40E-06	3.24E-04	0.9996763	0.9993526	8.398E-06
2.30E-05	8.85E-04	0.9991151	0.998231	2.296E-05
3.76E-05	1.44E-03	0.998555	0.9971121	3.751E-05
5.21E-05	0.002004	0.997996	0.995996	5.204E-05
6.67E-05	0.0025619	0.9974381	0.9948827	6.656E-05
0.0001	0.0038317	0.9961683	0.9923513	9.964E-05
0.0001333	0.0050958	0.9949042	0.9898343	0.0001326
0.0001666	0.0063544	0.9936456	0.9873316	0.0001655
0.0001999	0.0076075	0.9923925	0.9848429	0.0001984
0.0002332	0.0088551	0.9911449	0.9823683	0.0002311
0.0003189	0.0120433	0.9879567	0.9760584	0.0003151
0.0004047	0.0151957	0.9848043	0.9698396	0.0003985
0.0004904	0.0183126	0.9816874	0.9637102	0.0004814

Fuente: Elaboración propia

5.3.4. Comparación de resultados obtenidos

Tras realizar el cálculo de los distintos índices de desempeño para los métodos de sintonización de parámetros analizados hasta éste momento, se obtiene la siguiente tabla de datos.

Tabla 9. Comparación de resultados de índices de desempeño para los 3 métodos de sintonización

Método de sintonización	IAE	ISE	ITAE
PID Compact	62.59	51.61	8.29
Sisotool	64.50	57.98	4.07
PSO	59.97	50.10	4.49

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los índices obtenidos, podemos definir que, de manera general, el algoritmo PSO es el que nos brinda una mejor relación entre el costo y la respuesta que nos da, al eliminar el sobre impulso que se genera por otros métodos, logrando que el control de la planta se haga más estable.



CONCLUSIONES

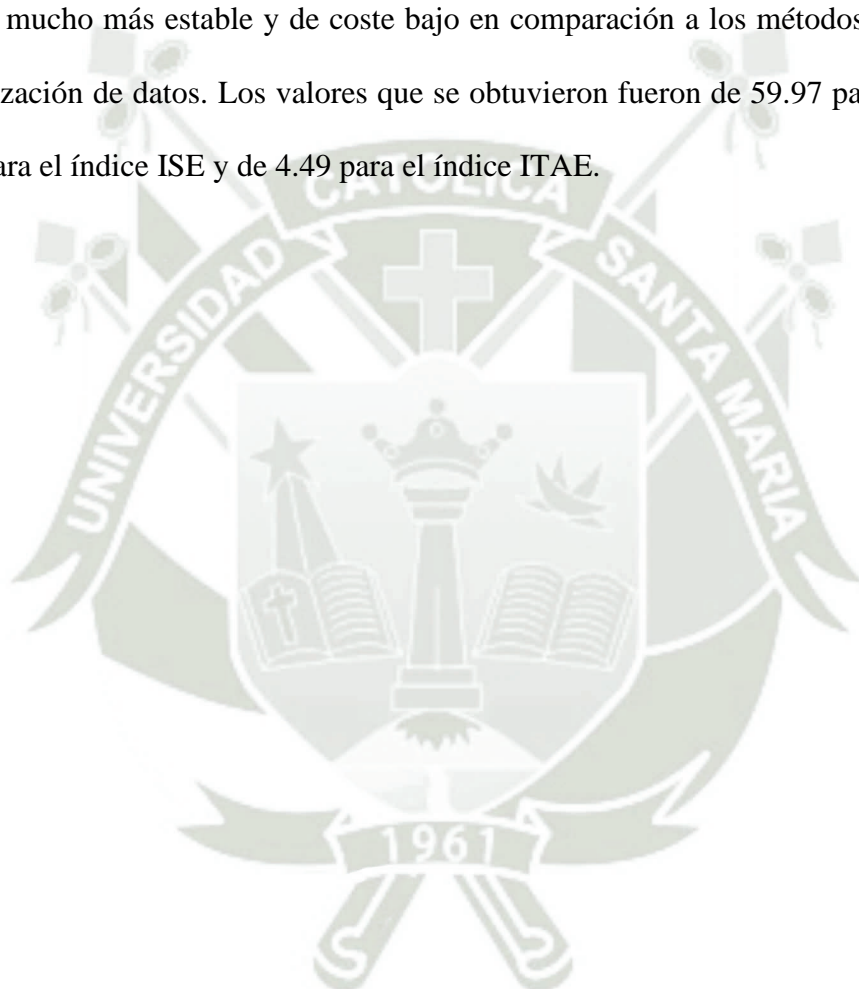
Se realizó el diseño e implementación de un sistema electroneumático para el control de velocidad de un motor neumático, se utilizó una válvula reguladora de presión, un encoder para sensar la velocidad del motor y un motor neumático. Los parámetros del controlador implementado se sintonizaron a través del algoritmo PSO, obteniendo así: $K_p= 0.0345691$, $K_i= 0.0135271$ y $K_d=0$.

Se realizó el diseño e implementación del módulo de control de la planta construida, utilizando para ello un controlador lógico programable Siemens S7-1200. El controlador regula el proceso gracias a la utilización del bloque PID Compact, el cual para su operación, controla la válvula reguladora de presión y recibe la retroalimentación del encoder de velocidad.

Se realizó de manera correcta el modelamiento de la planta previamente diseñada e implementada, en primera instancia se aplicó el uso de la herramienta Datalogging del PLC y Tia Portal para poder realizar la adquisición de datos y posteriormente los datos fueron modelados a través de la herramienta ident de Matlab.

Se implementó adecuadamente el algoritmo de enjambre de partículas PSO para la sintonización de los parámetros PID del controlador PLC, siendo los parámetros PSO más eficientes: 40 iteraciones, 60 partículas, $K_1=1.2$, $K_2=1.2$ y $\omega=1.5$. Mediante la aplicación de estos parámetros, el algoritmo obtuvo la mejor respuesta en comparación a los métodos convencionales de sintonización de parámetros.

Se realizó el análisis y la comparación de los resultados obtenidos tanto de manera simulada en el modelo obtenido a través de Simulink, como de manera real en la planta implementada. A través del análisis de distintas funciones de costo se pudo obtener que, para los escenarios planteados en la planta diseñada, el método de sintonización de parámetros PID por algoritmo PSO es el que brinda la mejor relación entre respuesta y costo, siendo mucho más estable y de coste bajo en comparación a los métodos tradicionales de sintonización de datos. Los valores que se obtuvieron fueron de 59.97 para el índice IAE, 50.1 para el índice ISE y de 4.49 para el índice ITAE.



RECOMENDACIONES

La capacidad de los componentes es referencial. Siendo el propósito de la elaboración de esta tesis la investigación y análisis de la respuesta del algoritmo PSO, el diseño consideró componentes con los cuales podía probarse el correcto funcionamiento del algoritmo. Es posible realizar el control de motores de mayor capacidad siempre y cuando el compresor sea de mayor capacidad también.

Se recomienda limitar el rango de control, teniendo en cuenta que tanto la acción misma del controlador PID, así como el proceso de modelamiento se verán afectados de manera directa por la capacidad de entrega de flujo de aire por el compresor. Es así que la región en la cual se realiza el control de la variable del proceso no abarca la capacidad de velocidad total del motor.

Es necesario tener en cuenta que el algoritmo PSO es un algoritmo genético de búsqueda, por lo que pueden existir un número elevado de soluciones que muestren mejor o peor comportamiento que el analizado, por lo que resulta importante realizar un adecuado análisis para poder identificar la calidad de las soluciones halladas.

Es necesario ajustar de manera adecuada la restricción que debe tener el algoritmo de búsqueda PSO teniendo en cuenta que el rango de los valores de las ganancias PID será distinto para distintos tipos de sistemas de control.

REFERENCIA

¿Qué es y para qué sirve un PLC? - Recuperado de
<https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/que-es-un-plc/>

Abril, R. (2015). Sistema de control de bombeo agua freática PIT Dewatering CV1 de SMCV: Universidad Nacional de San Agustín.

Agramonte, J. (2019). Diseño e Implementación de un Sistema de Control de posicionamiento Lineal para un Cilindro Hidráulico con Tarjetas PID. Universidad Católica de Santa María

Alfaro. (2003). Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos.

Almandoz, J., Mongelos, B., Pellejero, I. (2007). Sistemas Neumáticos y Oleohidráulicos.

Ambriz, J. (2015). Diseño e implementación de un controlador PID autoajustable basado en un algoritmo Híbrido. Atlacomulco: Universidad Autónoma del Estado de México.

Aranda, G. (2020). Herramienta educativa para el control automático del nivel de tensión por medio de bancos de compensación para cargas industriales dinámicas con demandas súbitas: Universidad de Pamplona.

Basurco, D., y Orihuela, U. (2019). Implementación de un sistema de control de posición neumática de una carga referencial de 5 KG mediante un actuador lineal y tarjetas PID aplicado al laboratorio de control y automatización. UCSM

Baudilio, L. (2011). “Automatización del aire comprimido para ahorro de energía”. (Tesis de Pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

Bolton, W. (2001). “Ingeniería de control”. México D.F. Alfa Omega.

- Boubertakh, H. (2017). Knowledge-based Ant Colony Optimization Method to Design Fuzzy Proportional Integral Derivative Controllers. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 681-700.
- Bravo, E. & Piscal, E. (2010). Supervisor remoto, mediante comunicación ethernet, con sintonización del PID a partir del modelo – Planta de temperatura.
- Casimiro, F. (2018). Implementación de una aplicación web Syscoer para la gestión de información por el centro de operaciones de emergencia regional del gobierno regional Pasco: Universidad Nacional Daniel Alcides Carreón.
- Cevallos, O. & Tapia, M. (2015). Diseño e implementación de un laboratorio neumático y elaboración de guías prácticas para la carrera de ingeniería en electromecánica, año 2014: Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Chávez, D. (2010). Aplicación de un transductor óptico en la medición de velocidad y posición de una máquina eléctrica rotativa: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Checa, N. (2019). Construcción, ensamblaje y pruebas de motor neumático.
- Creuss, Solé. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Editorial Alfaomega.
- Creuss, Solé. (2011). *Instrumentación Industrial*, 8va Edición. Editorial Alfaomega.
- Duque, A. (2016). Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de enjambres. Universidad de Cali
- Encoder funcionamiento: El mejor resumen de cómo funciona un encoder - Recuperado de <https://www.dynaparencoders.com.br/blog/es/encoder-funcionamiento/>
- García, P. (2020). Estudio de las etapas de automatización de un proceso industrial y sus implicaciones en la gestión de la producción: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Henriquez, J., Martinez, W. (2019). Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración.

Ismail, B. (2017), Pso-based PID controller design for an energy conversion system using compressed air.

Jiménez, W. & Tituaña, E. (2020). Implementación de un módulo de neumática proporcional en el laboratorio de control y manipulación automática de la facultad de mecánica: Escuela superior politécnica de Chimborazo.

Kunusch, (2003) Identificación de Sistemas dinámicos.

Lliuyacc, R. (2014), Sintonización de un controlador PID usando particle swarm optimization para el agc de un sistema eléctrico multitarea.

López, O (2014). Evaluación de desempeño de dos técnicas de optimización bio-inspiradas: Algoritmos Genéticos y Enjambre de Partículas.

Martin, O. (2010). Modelado y simulación de un sistema hidráulico: Universidad de Sanbuenaventura.

Mateos, F. (2001) Sistemas automatizados - Autómatas Programables (PLC's)

Mathworks (2018) Que son los sistemas Hammerstein Wiener. Obtenido de <https://www.mathworks.com/help/ident/ug/what-are-hammerstein-wiener-models.html>

Maximator GmbH (2021). Compresor neumático de gas DEL, 8DLE, 14DLE, MDLE, SDLE.

Ogata, K. (2010). Ingeniería de Control Moderna. Madrid: Pearson Educación S.A.

Optimización por enjambre de partículas - Recuperado de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Optimizaci%C3%B3n_por_enjambre_de_part%C3%ADculas&oldid=141846308

Paredes, J. Metodología de la investigación

Pilapanta, E. (2012). Implementación y automatización de un módulo didáctico para la simulación del control proporcional neumático de presión: Escuela superior politécnica de Chimborazo.

Quispe, M. (2019). Cálculo de los parámetros del controlador PID, por sintonización y simulación para el posicionamiento lineal de un cilindro hidráulico. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.

Rojas, Á. (2015). Topologías de optimización por enjambre de partículas basadas en información mutua. Guanajuato: Centro de investigación en Matemáticas A.C.

Russ, E. and Kennedy, J (1995). A new optimizer using particle swarm theory in Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, volume 1..

Santander, D. (2010). Obtención del modelo matemático de una planta de flujo mediante el uso de técnicas de identificación paramétricas y no paramétricas. Investigación aplicada e Innovación, 5-14.

Scholz. (1996). Neumática Proporcional TP-501 - Hojas de datos. Esslingen: Festo Didactic.

Serrano, A. (2009). “Neumática Práctica”. Zaragoza, España. Paraninfo.

Sistema neumático de una aeronave - Recuperado de https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_neum%C3%A1tico_de_una_aeronave&oldid=147201221

SMC España, S.A. (2002). “Neumática”. España. Paraninfo.

Tipos de compresores de aire - Recuperado de <https://compressors.cp.com/es-latinamerica/products/compresor-de-aire/tipos-de-compresores-de-aire>

Tipos de materiales para las redes neumáticas - Recuperado de <https://www.ingenieriaei.com.mx/tipos-materiales-las-redes-neumaticas/>

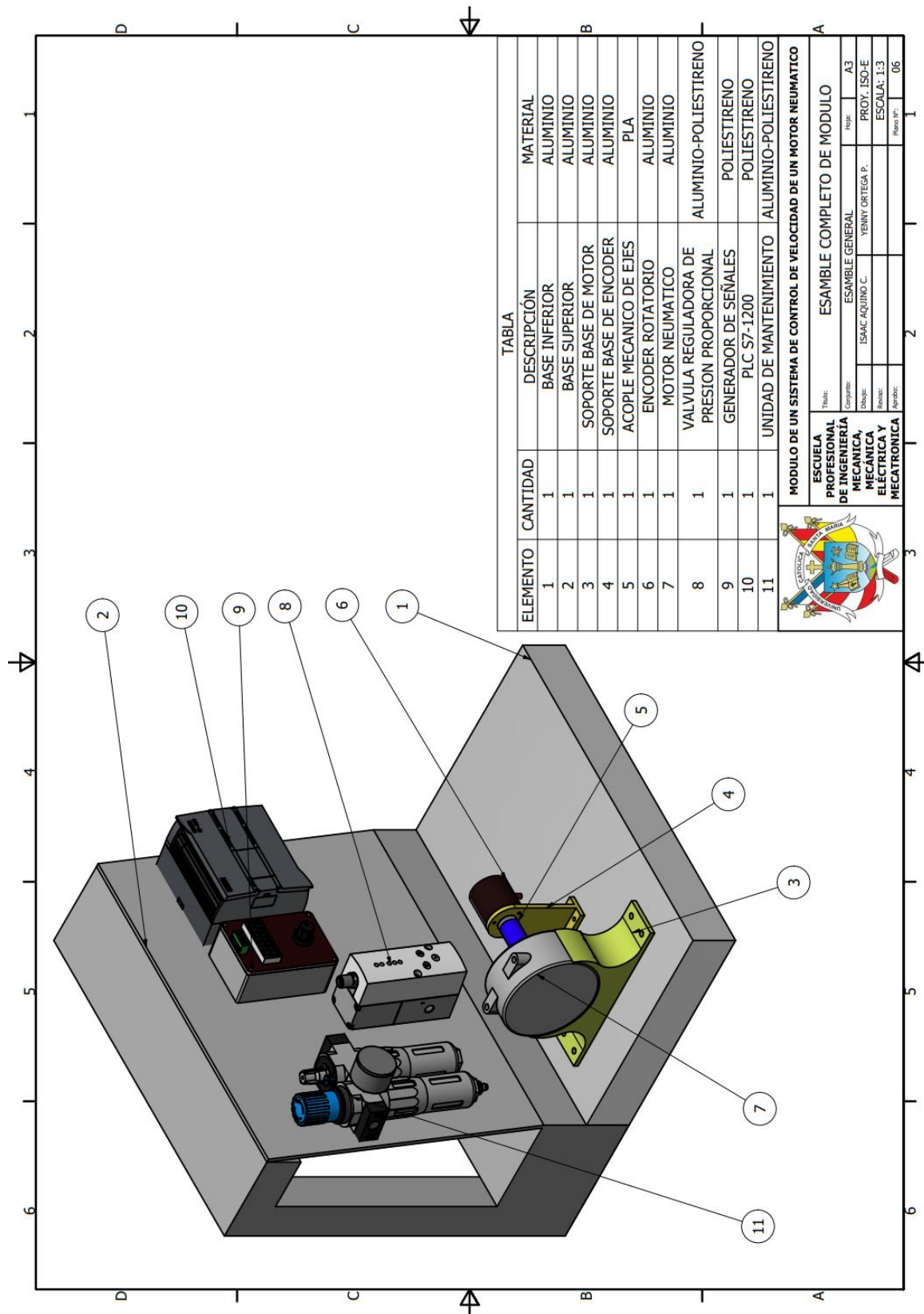
Velázquez, C. y Mejía, M. (2016). Análisis del algoritmo de optimización por enjambre de partículas por medio de una aplicación gráfica 3D.

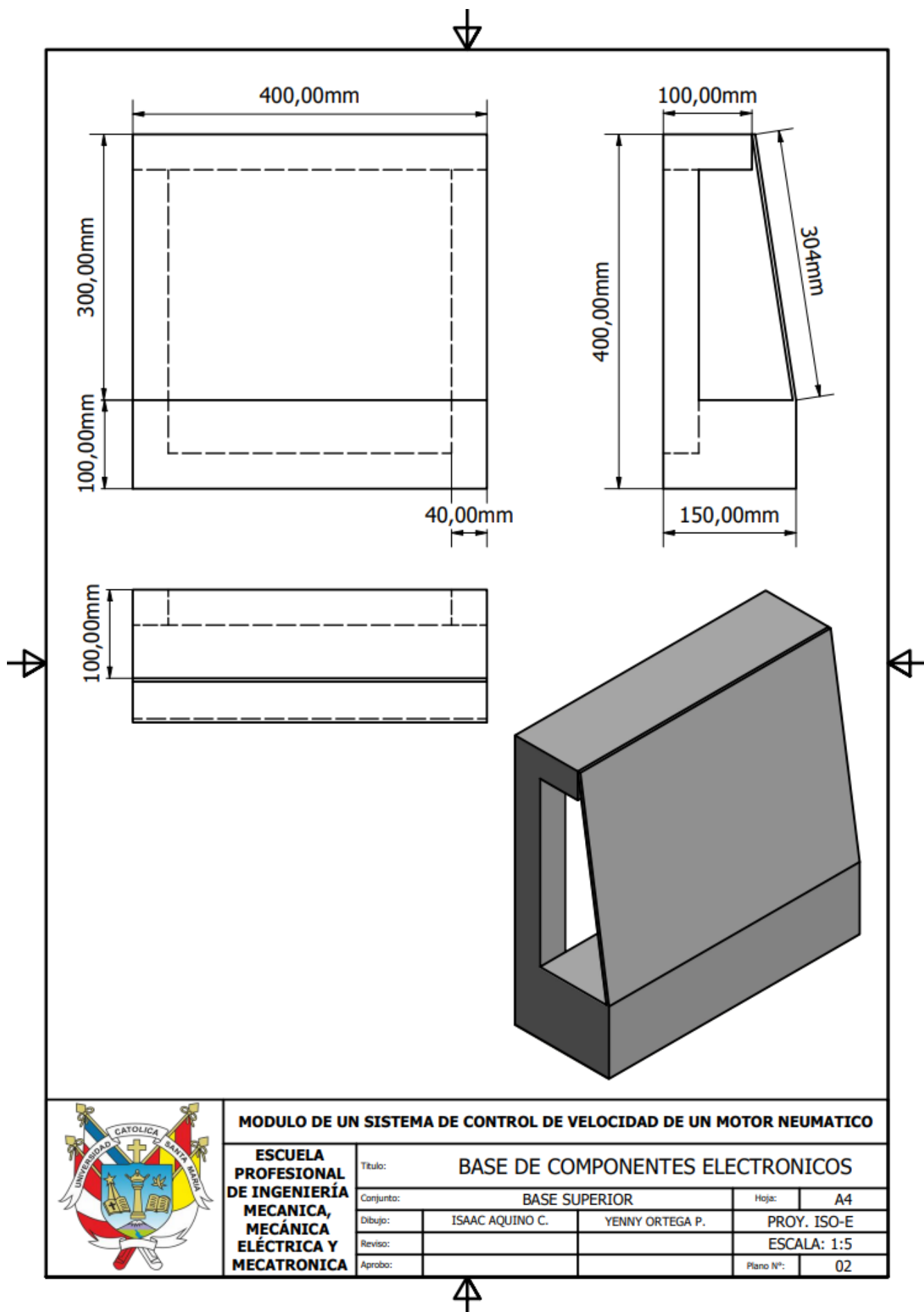
Ziegler, J., & Nichols, N. (1942). Optimum Settings for Automatic Controller. ASME, 1-7.

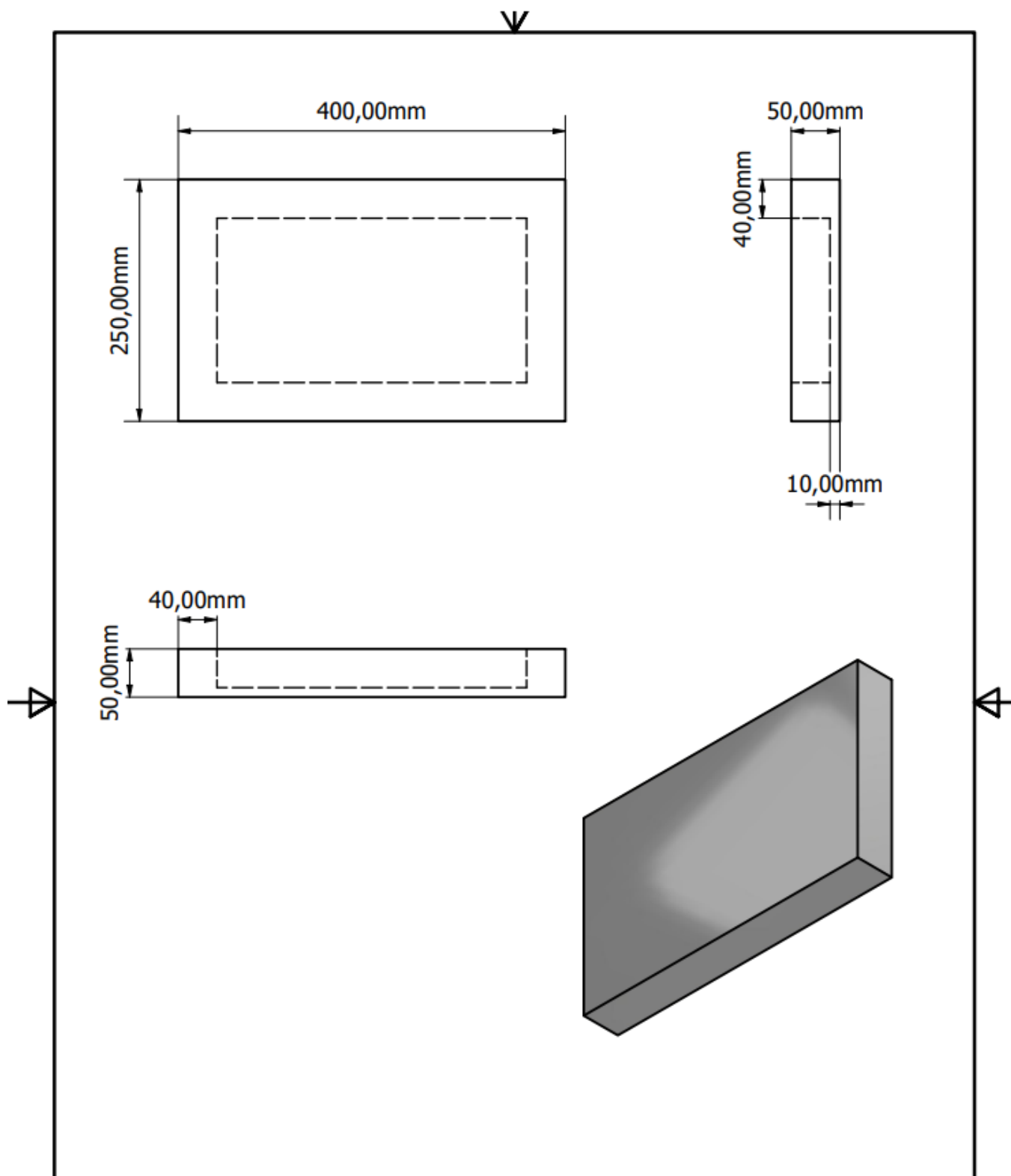


ANEXOS

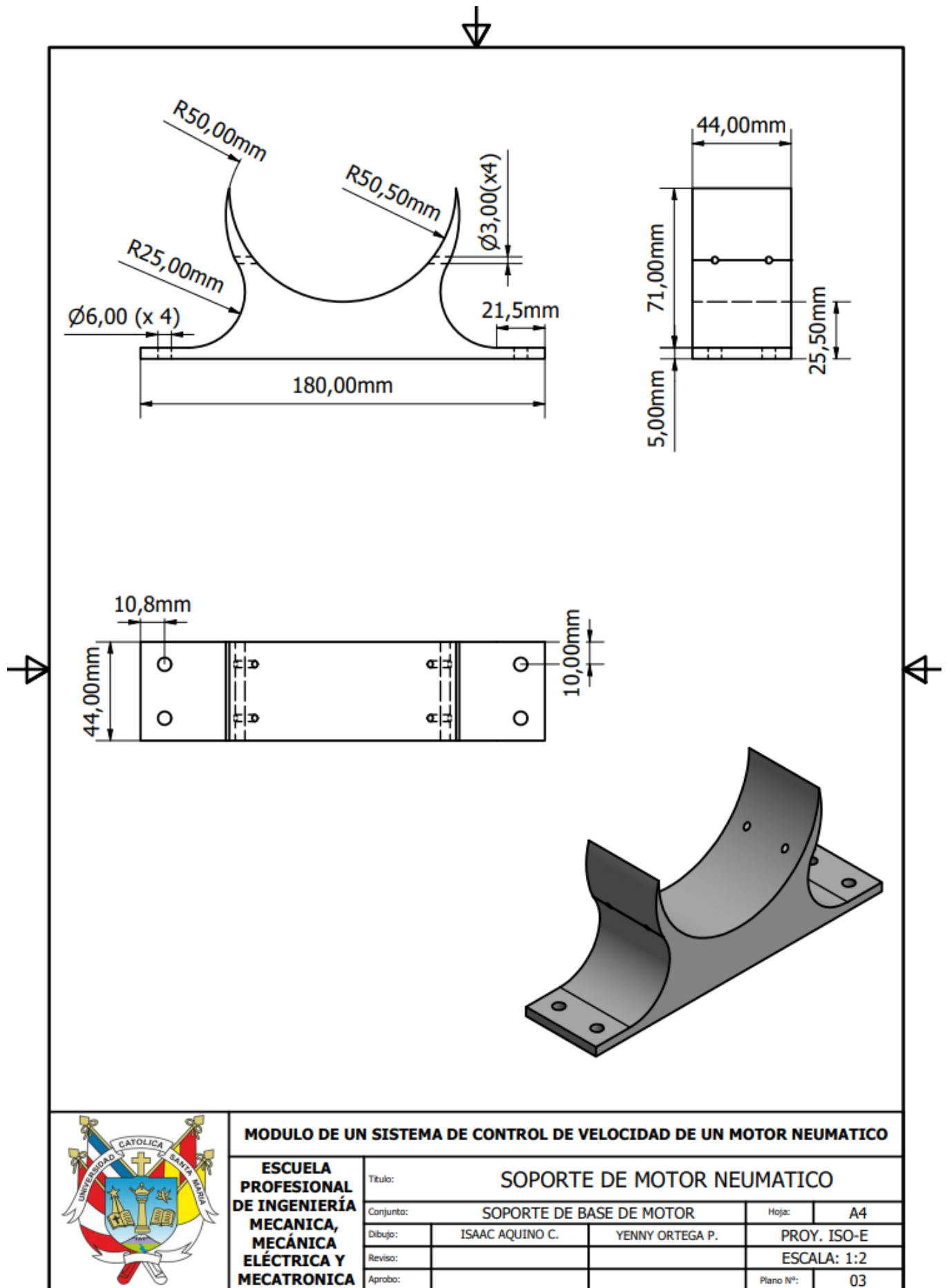
ANEXO 1: Planos de construcción







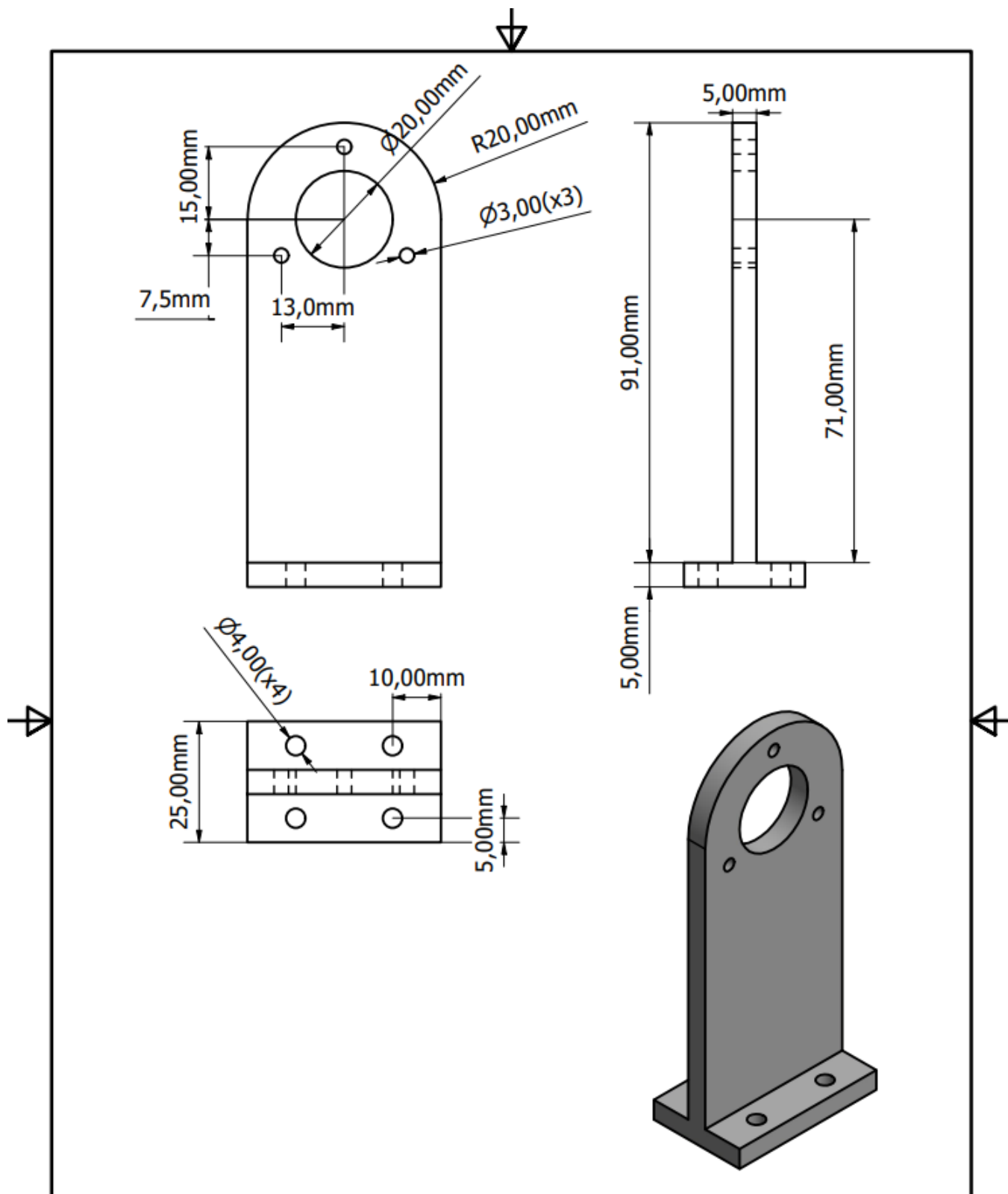
	MODULO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMATICO			
	ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRONICA		Título: BASE DE MOTOR NEUMATICO	
	Conjunto: BASE INFERIOR		Hoja: A4	
	Dibujo: ISAAC AQUINO C. YENNY ORTEGA P.		PROY. ISO-E	
	Reviso:		ESCALA: 1:5	
Aprobo:		Plano N°: 01		



MODULO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMATICO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y MECATRONICA

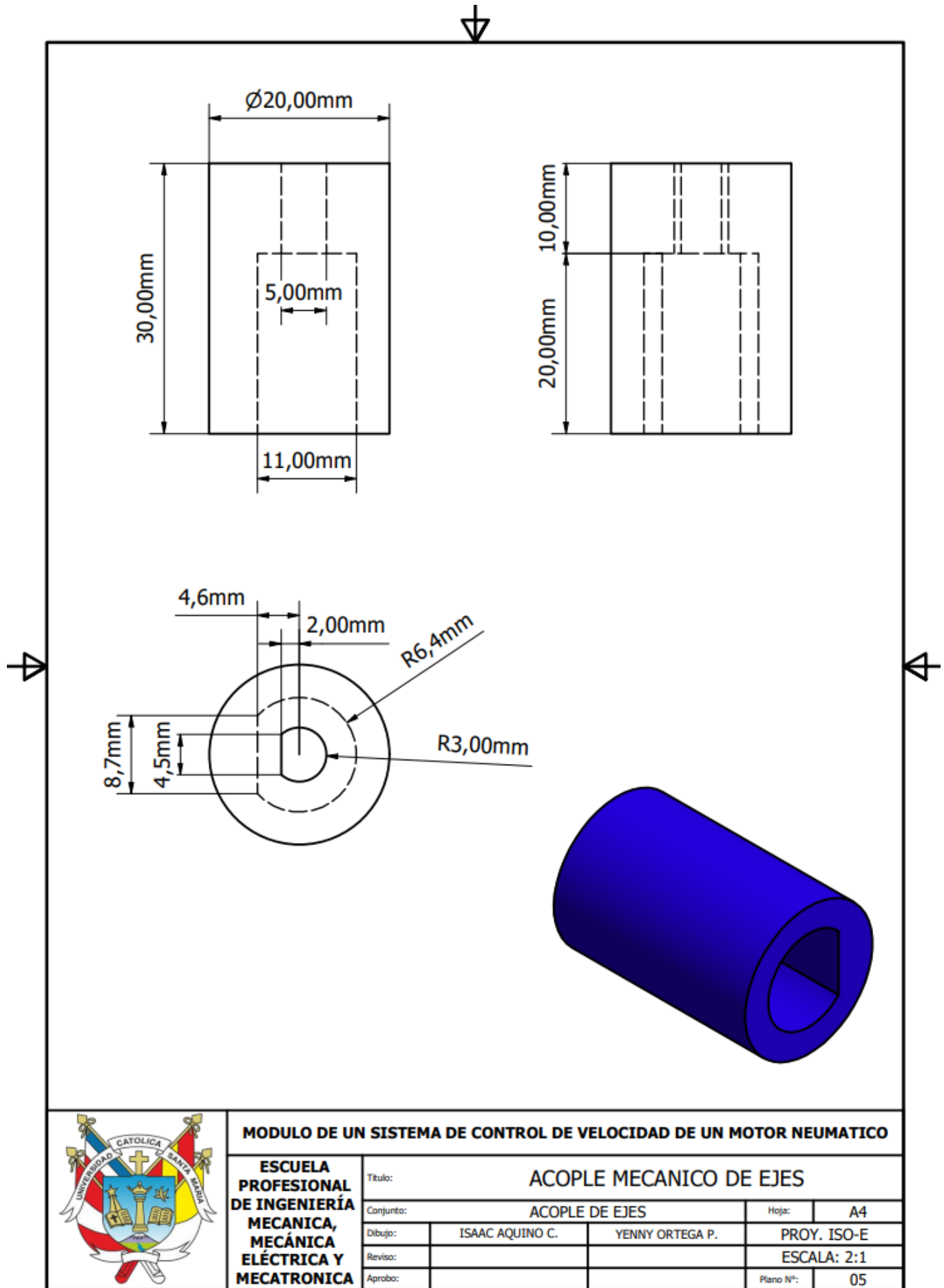
Titulo:		SOPORTE DE MOTOR NEUMATICO	
Conjunta:	SOPORTE DE BASE DE MOTOR		Hoja: A4
Dibujo:	ISAAC AQUINO C.	YENNY ORTEGA P.	PROY. ISO-E
Revisa:			ESCALA: 1:2
Aprobo:			Plano N°: 03



MODULO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMATICO

**ESCUELA
PROFESIONAL
DE INGENIERÍA
MECÁNICA,
MECÁNICA
ELÉCTRICA Y
MECATRÓNICA**

Título:		SOPORTE DE ENCODER INCREMENTAL	
Conjunto:		SORPOTE BASE DE ENCONDER	
Dibuja:	ISAAC AQUINO C.	YENNY ORTEGA P.	Hoja: A4
Revisa:			PROY. ISO-E
Aproba:			ESCALA: 1:1
			Plano N°: 04

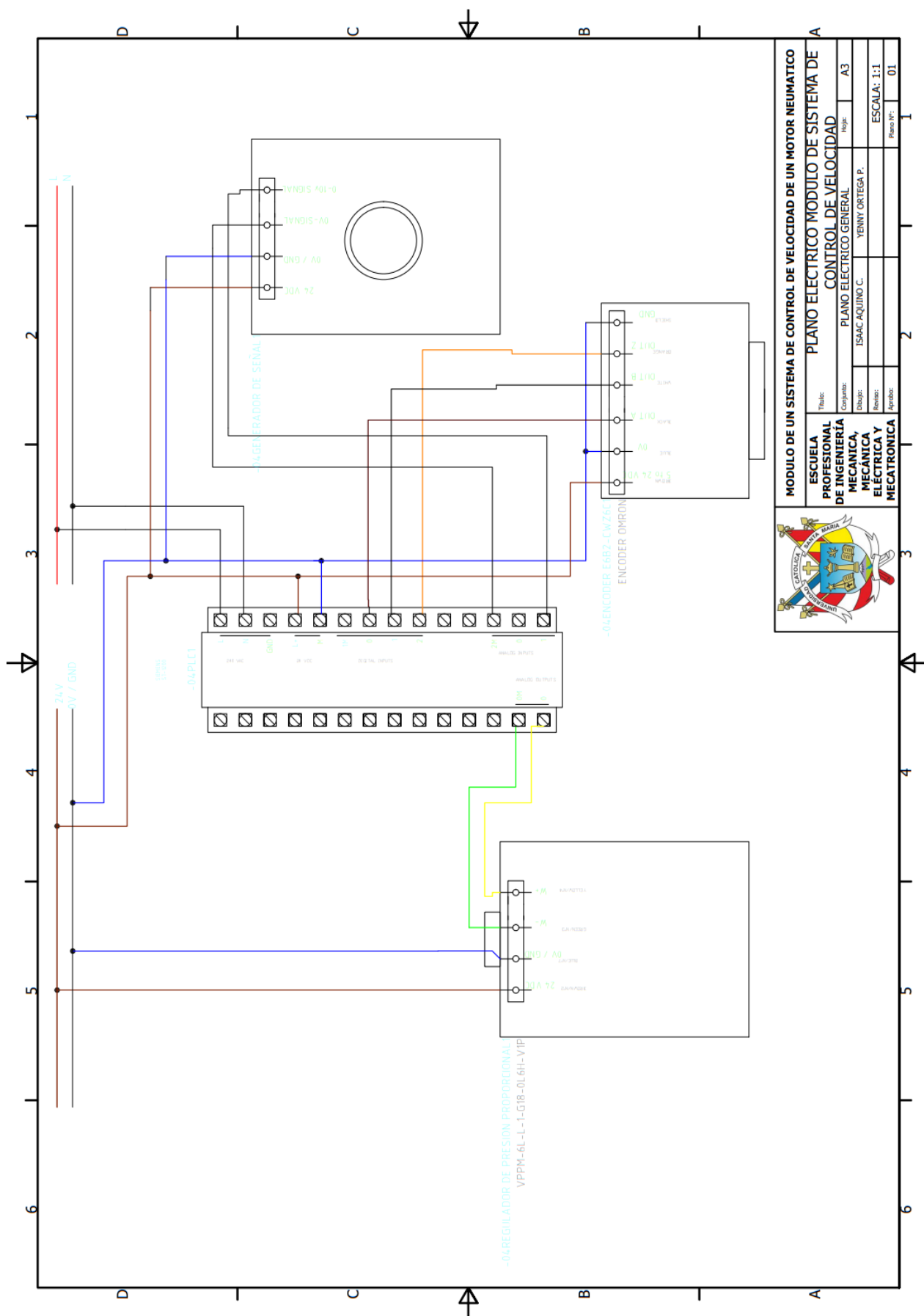


MODULO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMATICO

**ESCUELA
PROFESIONAL
DE INGENIERÍA
MECÁNICA,
MECÁNICA
ELÉCTRICA Y
MECATRÓNICA**

Titulo:		ACOPLE MECANICO DE EJES	
Conjunto:		ACOPLE DE EJES	Hoja: A4
Dibujo:	ISAAC AQUINO C.	YENNY ORTEGA P.	PROY. ISO-E
Reviso:			ESCALA: 2:1
Aprobo:			Plano N°: 05

ANEXO 2: Planos eléctrico general



MODULO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR NEUMATICO			
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECANICA, ELECTRICA Y MECATRONICA			
Título:	PLANO ELECTRICO MODULO DE SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD		
Conjunta:	PLANO ELECTRICO GENERAL		
Diseño:	ISAAC AQUINO C.		
Revisó:	YENNY ORTEGA P.		
Escala:	ESCALA: 1:1		
Folio No.:	01		

ANEXO 3: PSO_PID.m

```

clc
close all
clear all
tic;

%% Sintonización de parámetros por PSO
%% Parámetros del algoritmo

fprintf('Sintonización del controlador PID haciendo uso de algoritmo PSO\n')
fprintf('-----\n\n')
fprintf('Establecer parámetros del algoritmo\n\n')
iteraciones=input('1.Ingrese el número de iteraciones = ');
N=input('2.Ingrese el número de partículas = ');

D=3;
K_P=linspace(0,250,500); K_I=linspace(0,250,500); %Se definen los límites para
sintonización de ganancias
K_D=linspace(0,75,500);

%Asignando los parámetros que determinarán la búsqueda del algoritmo
C1=1.2;C2=1.2;w=1.5;g=0;Vdmax=1;

%Inicializar el arreglo de N partículas con posiciones y velocidades aleatorias en
D dimensiones.
%Se definen 4 vectores para graficar la respuesta obtenida
for i=1:N %Se determinarán posiciones de manera aleatoria, así como la velocidad
for d=1:D
X(i,d)=randi(100,1); V(i,d)=rand; %Parámetros iniciales

P(i,d)=X(i,d);
end
end
PBEST=inf*ones(1,N);%De manera inicial, se establece como infinito
G_Best=inf;%La mejor posición

for m=1:iteraciones
for i=1:N
[cost(i),M(i),Test(i),Ita(i)]=APSO2_costo(K_P(X(i,1)),K_I(X(i,2)),K_D(X(i,3)));
if cost(i)<PBEST(i)
PBEST(i)=cost(i);%Se actualiza el mejor costo local obtenido
P(i,1)=X(i,1);P(i,2)=X(i,2);P(i,3)=X(i,3);%Se actualiza la mejor posición local
obtenida
if cost(i)<G_Best
G_Best=cost(i);g=i;
end
end

%Bucle que almacena y compara los mejores parámetros obtenidos

for d=1:D
V(i,d)=w*V(i,d)+C1*rand*(P(i,d)-X(i,d))+C2*rand*(P(g,d)-X(i,d));

if V(i,d)>Vdmax
V(i,d)=Vdmax;

end
if V(i,d)<=-Vdmax
V(i,d)=-Vdmax;
end
X(i,d)=round(X(i,d)+V(i,d));
if X(i,d)<=0
X(i,d)=1;
end
if X(i,d)>100
X(i,d)=100;

```

```
end
end
k_p(i)=K_P(X(i,1)); k_i(i)=K_I(X(i,2));
k_d(i)=K_D(X(i,3));
end
[Y I]=min(PBEST);
if Y<G_Best;
G_Best=Y;
g=I;
end

J(m)=G_Best;
kp(m)=K_P(X(i,1));
ki(m)=K_I(X(i,2));
kd(m)=K_D(X(i,3));
clc

%Para mostrar datos en la ventana de comandos a medida que se ejecuta el
%algoritmo

fprintf('Sintonización del controlador PID haciendo uso de algoritmo PSO\n')
fprintf('-----\n\n')
disp(['Cantidad de interacciones: ' num2str(m)])
fprintf('-----\n\n')
disp(['Mejor costo Global obtenido: ' num2str(J(m))])
fprintf('Parametros PID sintonizados\n')
fprintf('-----\n\n')
fprintf('-----Kp-----Ki-----Kd-----\n\n')
disp(['Parámetros PID de la partícula: ' num2str([kp(m) ki(m) kd(m)])])
end

%Se definen los puntos, y se grafica la evolución de la sintonización de
%los parámetros

iter=1:iteraciones;
figure(1)
plot(iter,kp,'--*r','MarkerIndices',1:1:length(kp));
grid on
title('Evolucion de Kp segun las iteraciones','FontSize',14)
xlabel('# de iteracion','FontSize',14)
figure(2)
plot(iter,ki,'--*b','MarkerIndices',1:1:length(ki));
grid on
title('Evolucion de Ki segun las iteraciones','FontSize',14)
xlabel('# de iteracion','FontSize',14)
figure(3)
plot(iter,kd,'--*g','MarkerIndices',1:1:length(kd));
grid on
title('Evolucion de Kd segun las iteraciones','FontSize',14)
xlabel('# de iteracion','FontSize',14)
```

ANEXO 4: PSO_FT_Costo.m

```
function [costo_total Mp t_est Itae] =cost_func(kp,ki,kd)
t=0:0.01:2.5;
u=ones(length(t),1);

%% Ingresando la función de transferencia previamente modelada

G1=tf([1260],[22.05 1]);
Gc=tf([kd kp ki],[1 0]);
Gla=series(Gc,G1);
Glc=feedback(Gla,1);
[Y,T,X]=lsim(Glc,u,t);
reference=u;
output=Y;
err=reference-output;
[n,~]=size(err);

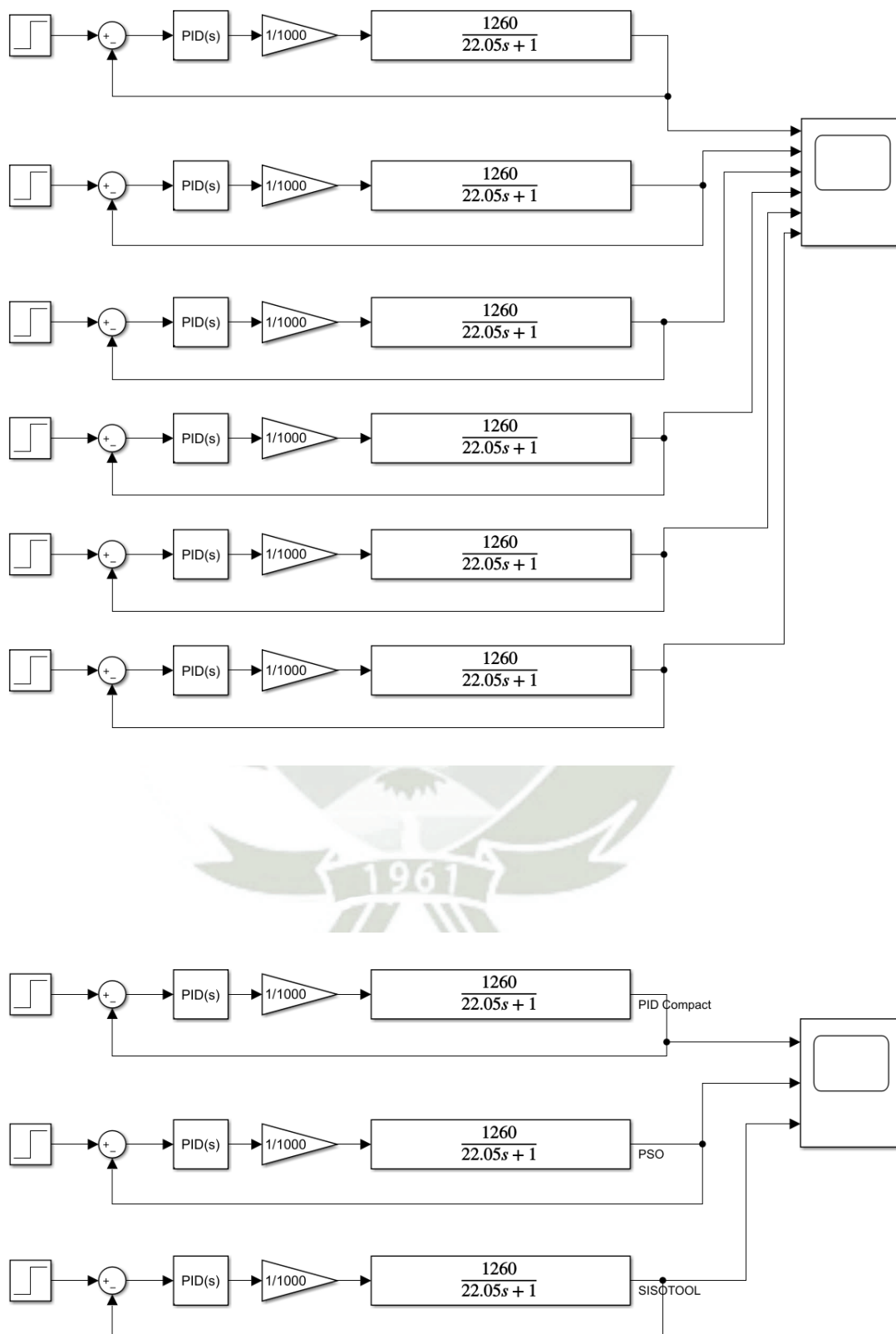
%% Máximo sobreimpulso(%) :Mp
for k=1:n
mp(k)=(output(k)-reference(k))/reference(k)*100;
end
Mp=(max(output)-reference(n))/reference(n)*100;%Mp=max(mp);

%% Tiempo de Establecimiento (Criterio del 2%):t_est
t_est=1;
for j=n:-1:1
if (output(j)>0.98*reference(j) && output(j)<reference(j)*1.02)
t_est=t(j);
else
break
end
end

%% Criterio de Error Integral:IAE
Itae=0;
for i=1:n
% Itse=Itse+t(i)*err(i)^2;
Itae=Itae+t(i)*abs(err(i));
end

%% Costo Total:cost_value
%costo_total=Mp+t_est+Itse;
costo_total=Itae;
end
```

ANEXO 5: Modelamiento.slx



ANEXO 6: PROYECTO_PID.ap15

PROYECTO_PID ▸ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▸ Variables PLC ▸ Tabla de variables estándar [40]

Tabla de variables estándar

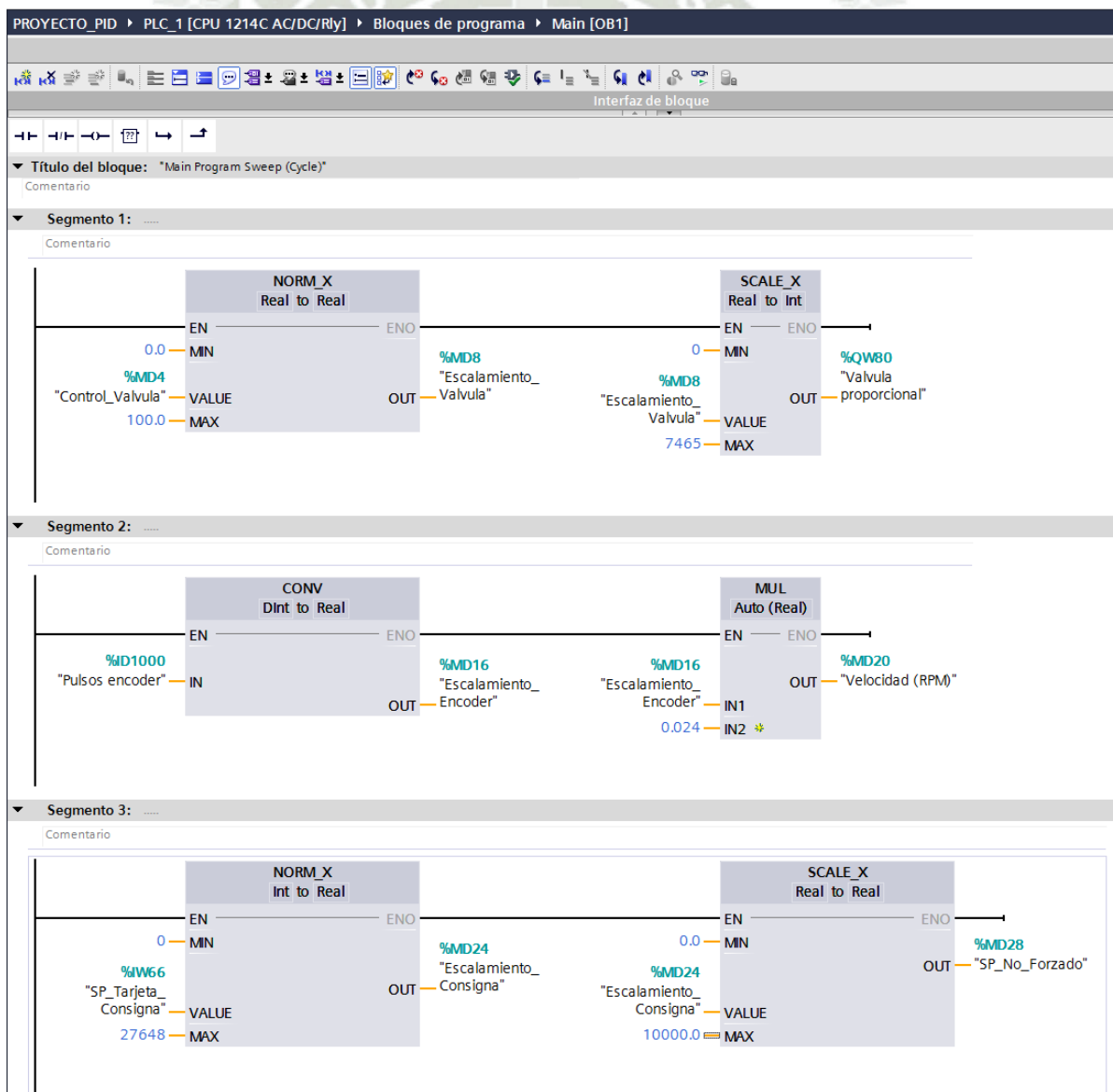
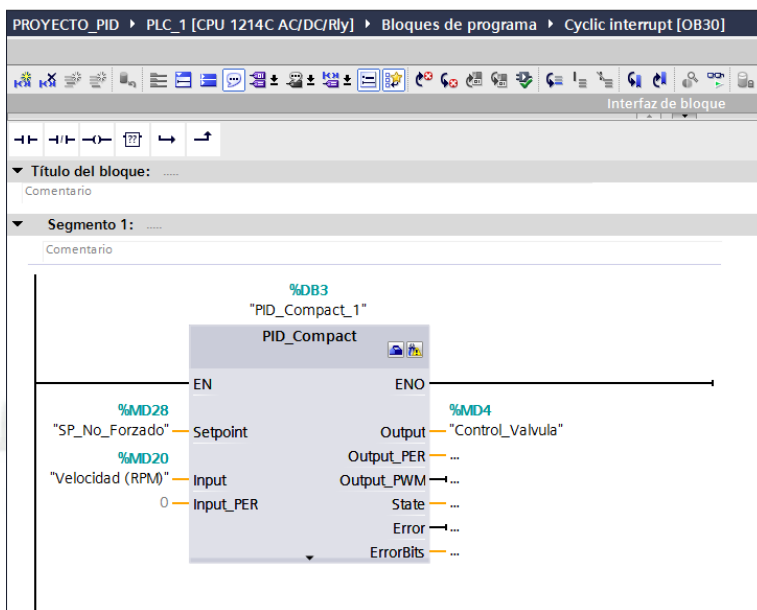
	Nombre	Tipo de datos	Dirección ▲	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentari
1	SP_Tarjeta_Consigna	Int	%IW66	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Pulsos encoder	DWord	%ID1000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Valvula proporcional	Int	%QW80	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	SP_Forzado	Real	%MD0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Control_Valvula	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	Escalamiento_Valvula	Real	%MD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	Escalamiento_Encoder	Real	%MD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	Velocidad (RPM)	Real	%MD20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	Escalamiento_Consigna	Real	%MD24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	SP_No_Forzado	Real	%MD28	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	<Agregar>			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

PROYECTO_PID ▸ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▸ Información del programa

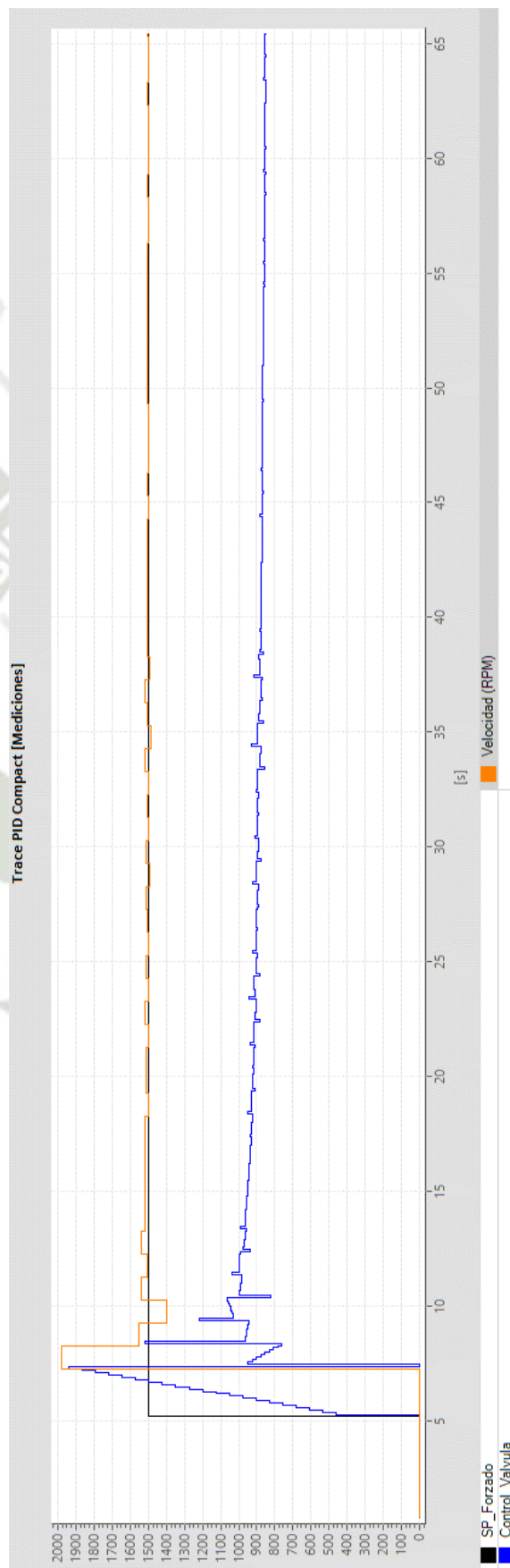
Estructura de llamadas | Estructura de dependencias | **Plano de ocupación**

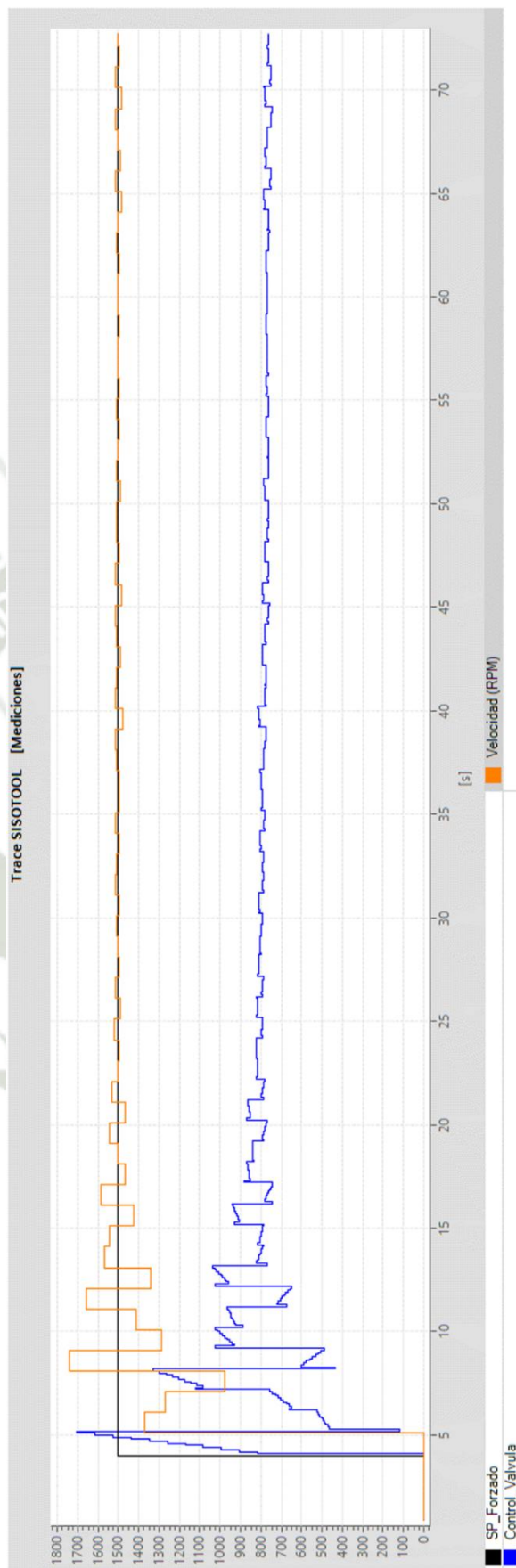
Plano de ocupación de PLC_1

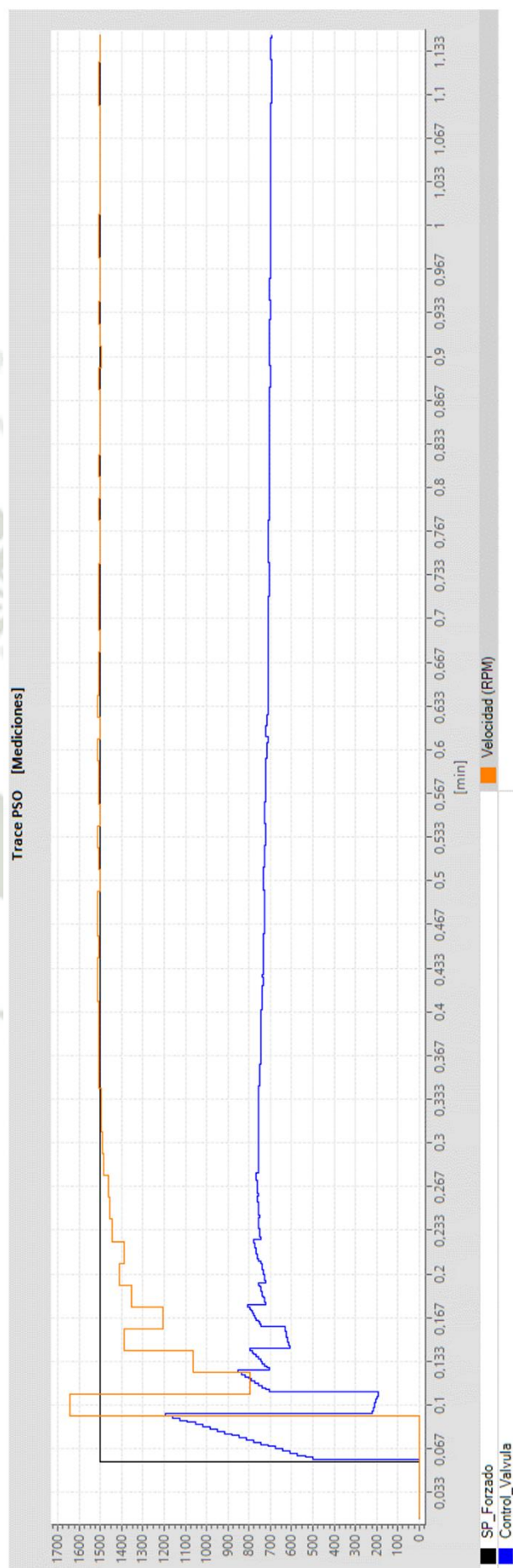
Entrada_salida											Marca														
Dirección	7	6	5	4	3	2	1	0	B	W	DWORD	LWORD	Dirección	7	6	5	4	3	2	1	0	B	W	DWORD	LWORD
IB0													MB4												
IB1													MB5												
IB64													MB6												
IB65													MB7												
IB66													MB8												
IB67													MB9												
IB1000													MB10												
IB1001													MB11												
IB1002													MB16												
IB1003													MB17												
IB1004													MB18												
IB1005													MB19												
IB1006													MB20												
IB1007													MB21												
IB1008													MB22												
IB1009													MB23												
IB1010													MB24												
IB1011													MB25												
IB1012													MB26												
IB1013													MB27												
IB1014													MB28												
IB1015													MB29												
IB1016													MB30												
IB1017													MB31												
IB1018																									
IB1019																									
IB1020																									
IB1021																									
IB1022																									
IB1023																									
OB0																									
OB1																									
OB80																									
OB81																									
OB1000																									
OB1001																									
OB1002																									
OB1003																									
OB1004																									
OB1005																									
OB1006																									
OB1007																									



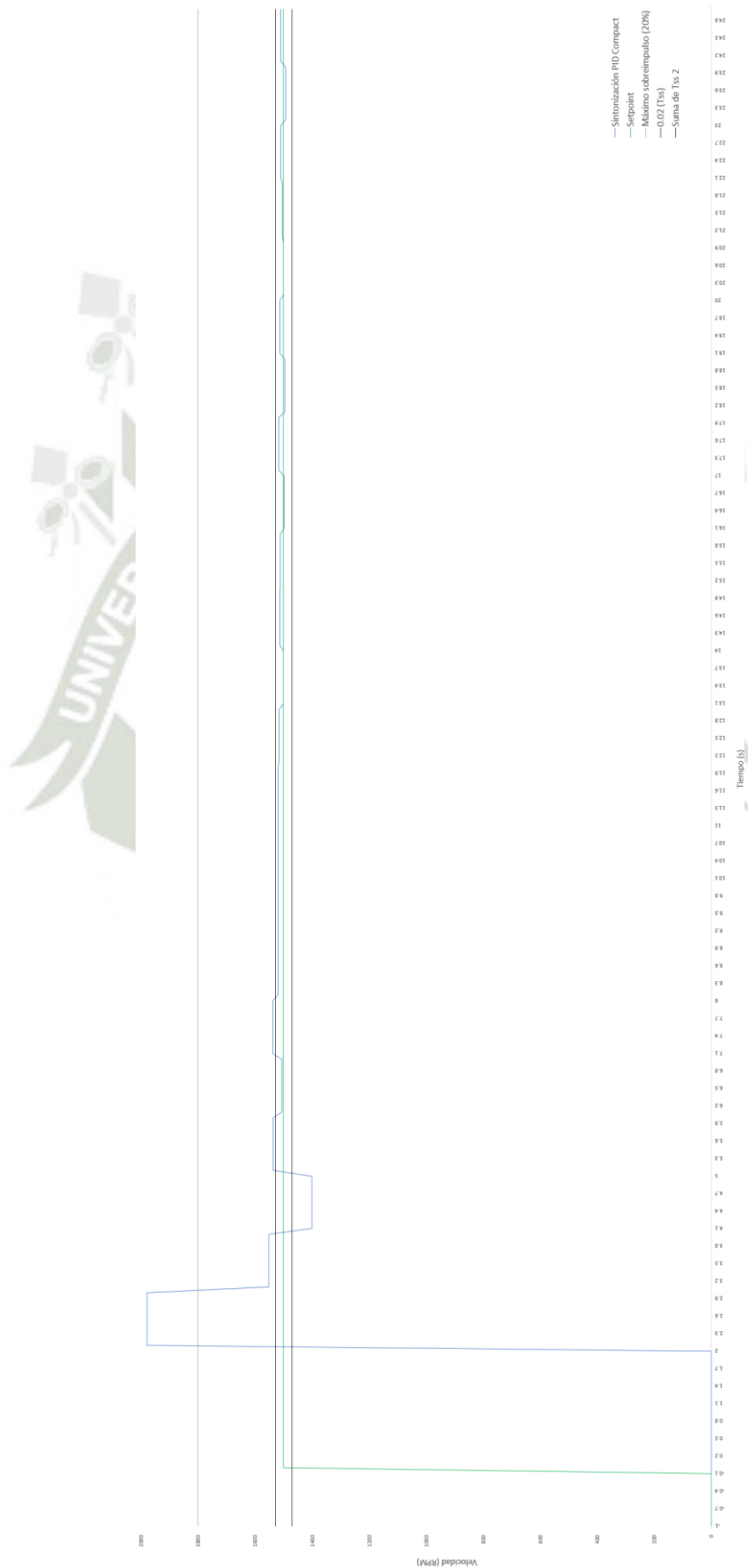
ANEXO 7: Traces obtenidos de Tia Portal

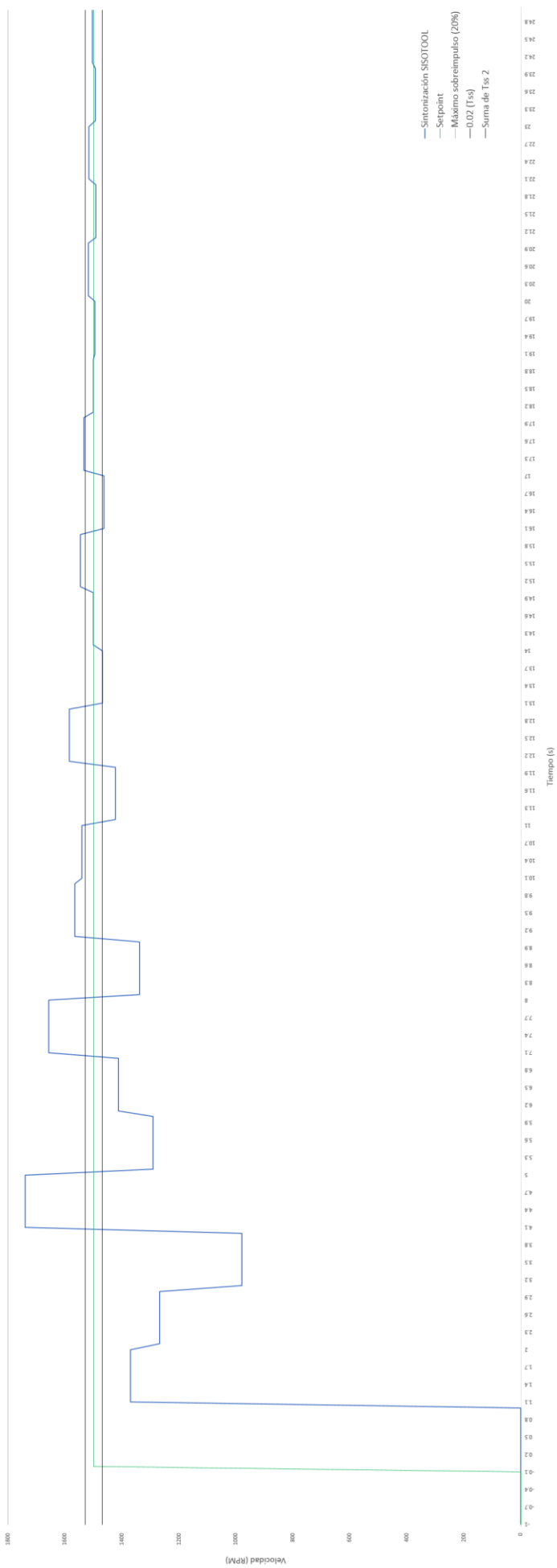


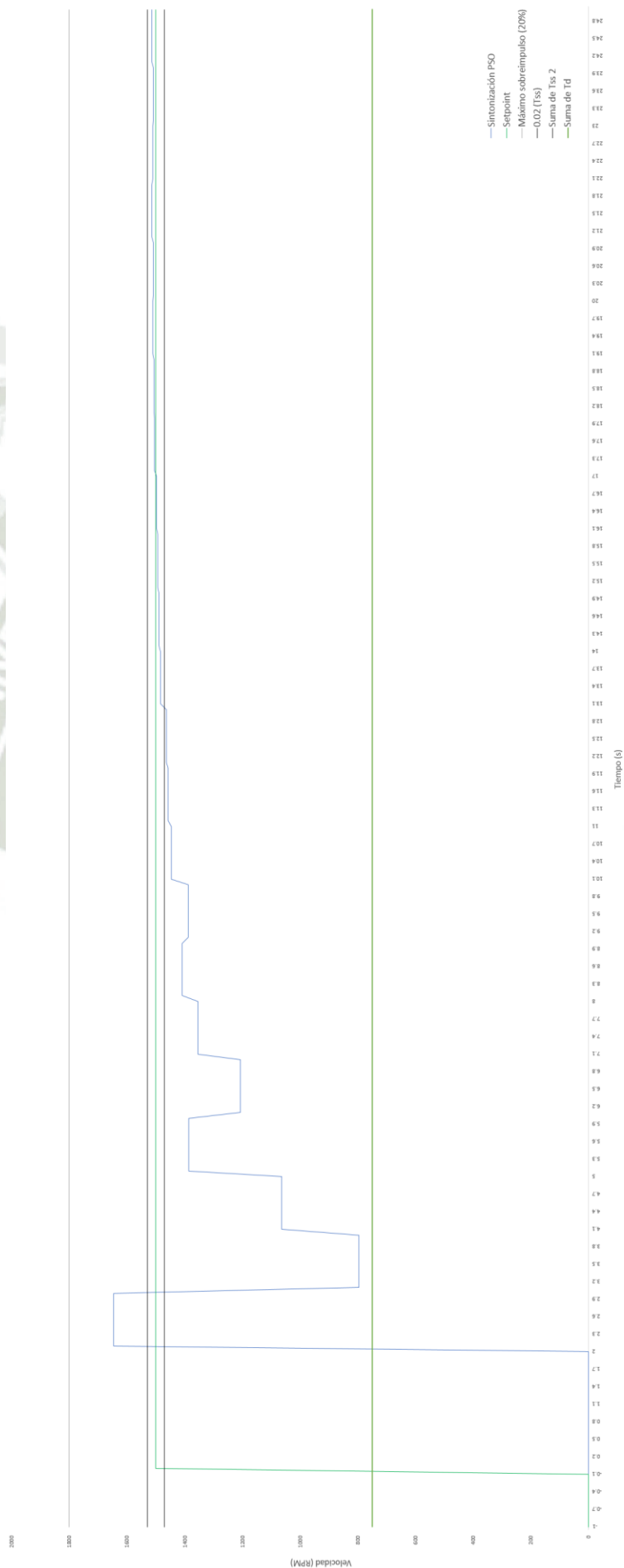




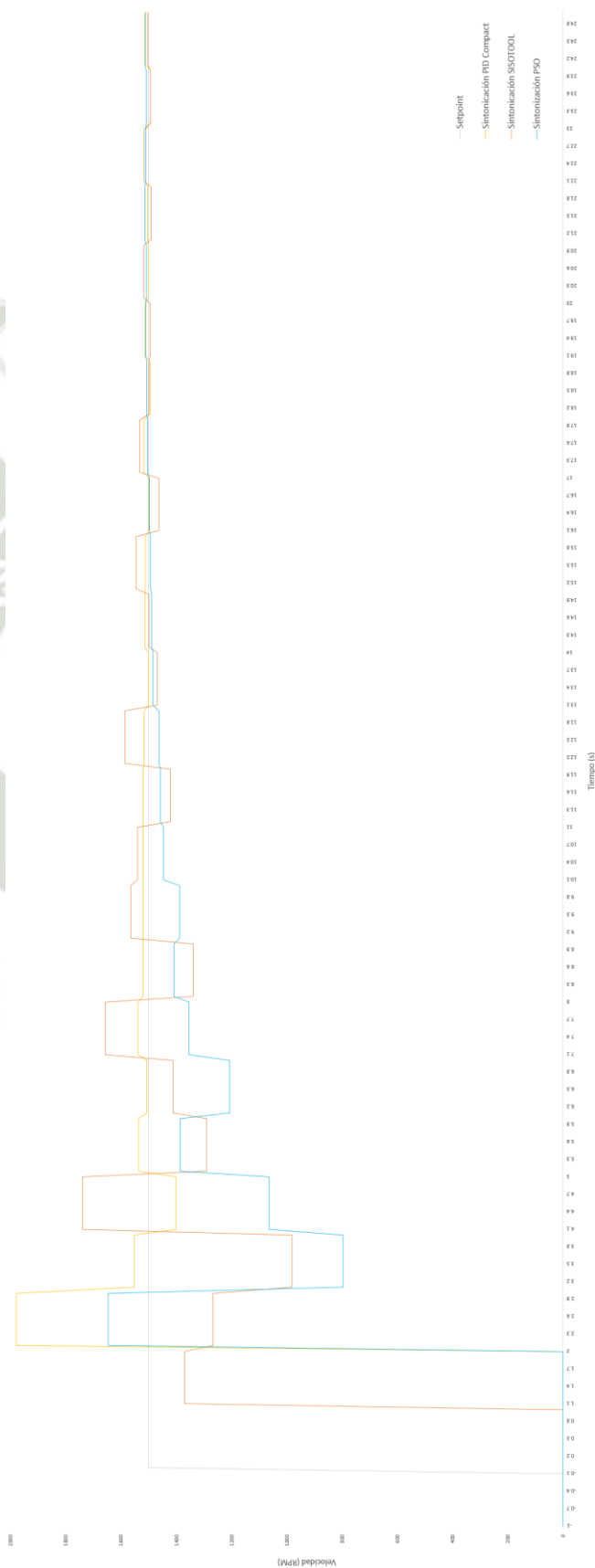
ANEXO 8: Análisis en Excel de datos obtenidos a través de Trace







ANEXO 9: Comparación en Excel de resultados a través de Trace



ANEXO 10: PROYECTO_ADQ.ap15

PROYECTO_ADQ_v1 ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Variables PLC ▶ Tabla de variables estándar [53]

Tabla de variables estándar

	Nombre	Tipo de datos	Dirección	Rema...	Acces...	Escrib...	Visibl...	Comentario
1	Pulsos encoder	DWord	%ID1000		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Valvula proporcional	Int	%QW80		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Inicio de la rampa	Bool	%M0.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	Start_ADQ	Bool	%M0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Habilitar Datalog	Bool	%M0.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	System_Byte	Byte	%MB1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	FirstScan	Bool	%M1.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	DiagStatusUpdate	Bool	%M1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	AlwaysTRUE	Bool	%M1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	AlwaysFALSE	Bool	%M1.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	Escalamiento de la rampa 1	Real	%MD4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
12	Escalamiento de la rampa 2	Real	%MD8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
13	Conteo de rampa	Real	%MD12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
14	Escalamiento encoder	Real	%MD16		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
15	Velocidad (RPM)	Real	%MD20		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
16	Clock_Byte	Byte	%MB100		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
17	Clock_10Hz	Bool	%M100.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
18	Clock_5Hz	Bool	%M100.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
19	Clock_2.5Hz	Bool	%M100.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
20	Clock_2Hz	Bool	%M100.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
21	Clock_1.25Hz	Bool	%M100.4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
22	Clock_1Hz	Bool	%M100.5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
23	Clock_0.625Hz	Bool	%M100.6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
24	Clock_0.5Hz	Bool	%M100.7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
25	<Agrega>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

PROYECTO_ADQ_v1 ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Información del programa

Estructura de llamadas | Estructura de dependencias | Plano de ocupación

Plano de ocupación de PLC_1

Entrada_salida

Dirección	7	6	5	4	3	2	1	0	B	W	DWORD	LWORD
IB0												
IB1												
IB64												
IB65												
IB66												
IB67												
IB1000												
IB1001												
IB1002												
IB1003												
IB1004												
IB1005												
IB1006												
IB1007												
IB1008												
IB1009												
IB1010												
IB1011												
IB1012												
IB1013												
IB1014												
IB1015												
IB1016												
IB1017												
IB1018												
IB1019												
IB1020												
IB1021												
IB1022												
IB1023												
OB0												
OB1												
OB80												
OB81												
OB1000												
OB1001												
OB1002												
OB1003												
OB1004												
OB1005												
OB1006												
OB1007												

Marca

Dirección	7	6	5	4	3	2	1	0	B	W	DWORD	LWORD
MB0												
MB4												
MB5												
MB6												
MB7												
MB8												
MB9												
MB10												
MB11												
MB12												
MB13												
MB14												
MB15												
MB16												
MB17												
MB18												
MB19												
MB20												
MB21												
MB22												
MB23												
MB100												

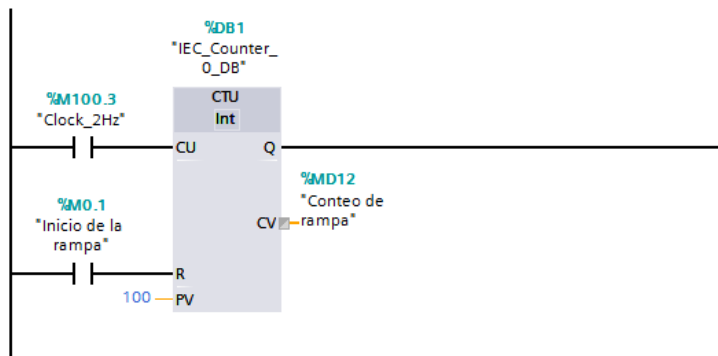
PROYECTO_ADQ_v1 ▶ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▶ Bloques de programa ▶ Main [OB1]



Interfaz de bloq

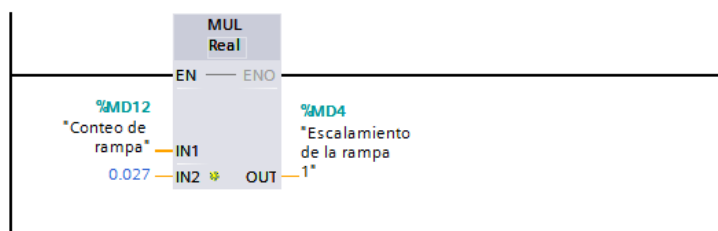
▼ Segmento 1:

Comentario



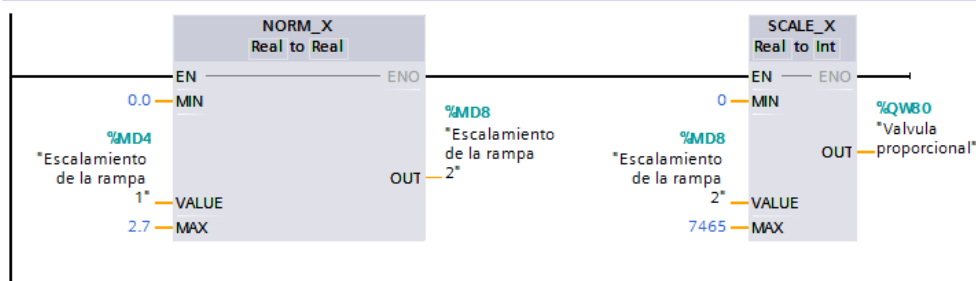
▼ Segmento 2:

Comentario



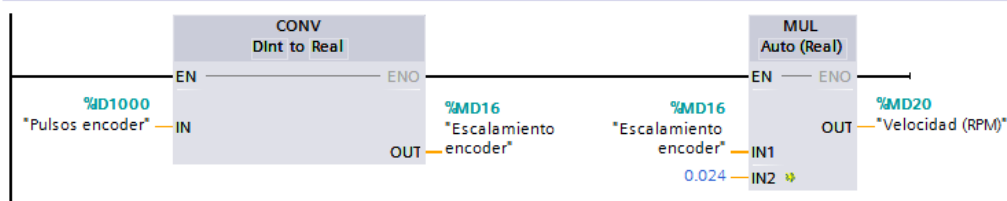
▼ Segmento 3:

Comentario



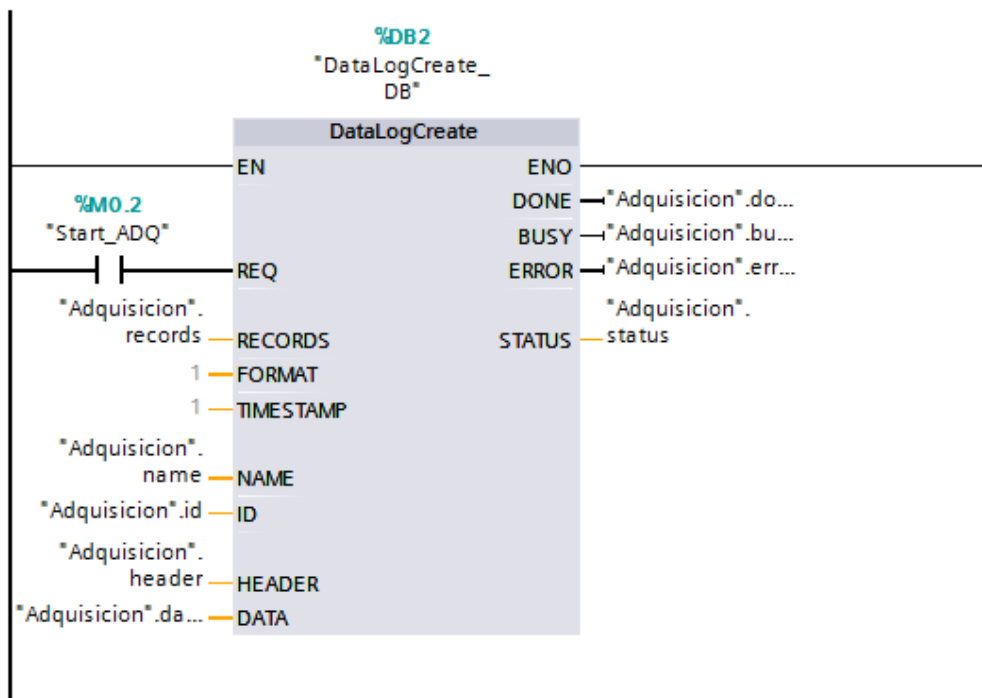
▼ Segmento 4:

Comentario



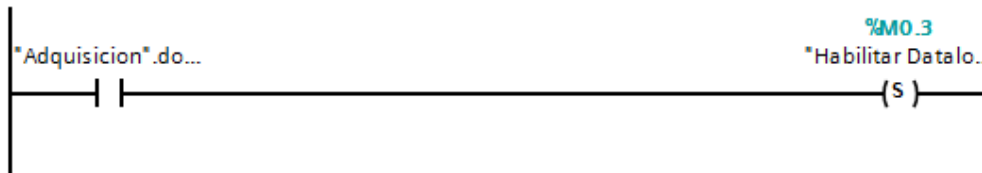
▼ Segmento 5:

Comentario



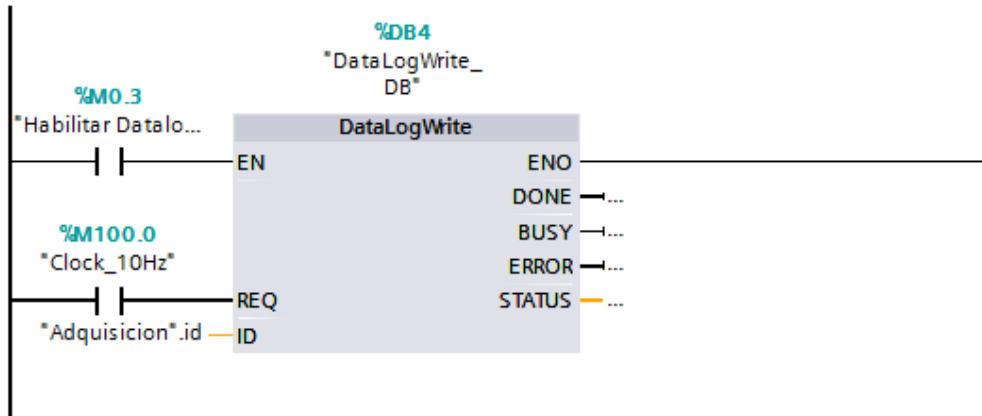
▼ Segmento 6:

Comentario



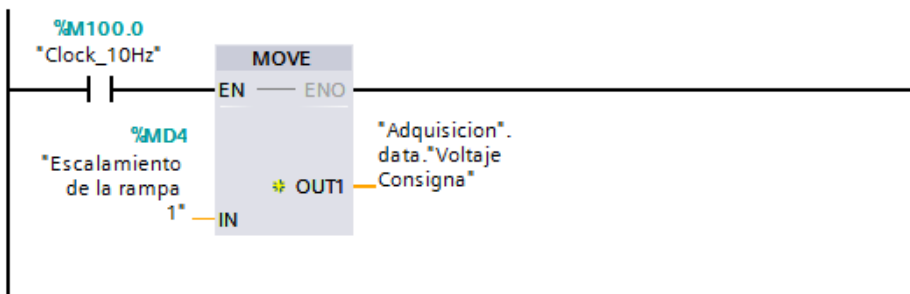
▼ Segmento 7:

Comentario



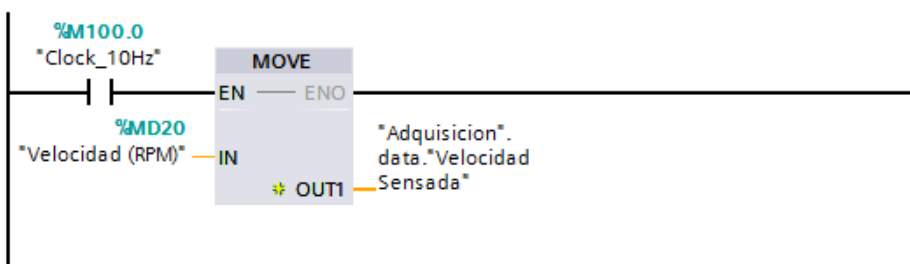
▼ Segmento 8:

Comentario



▼ Segmento 9:

Comentario

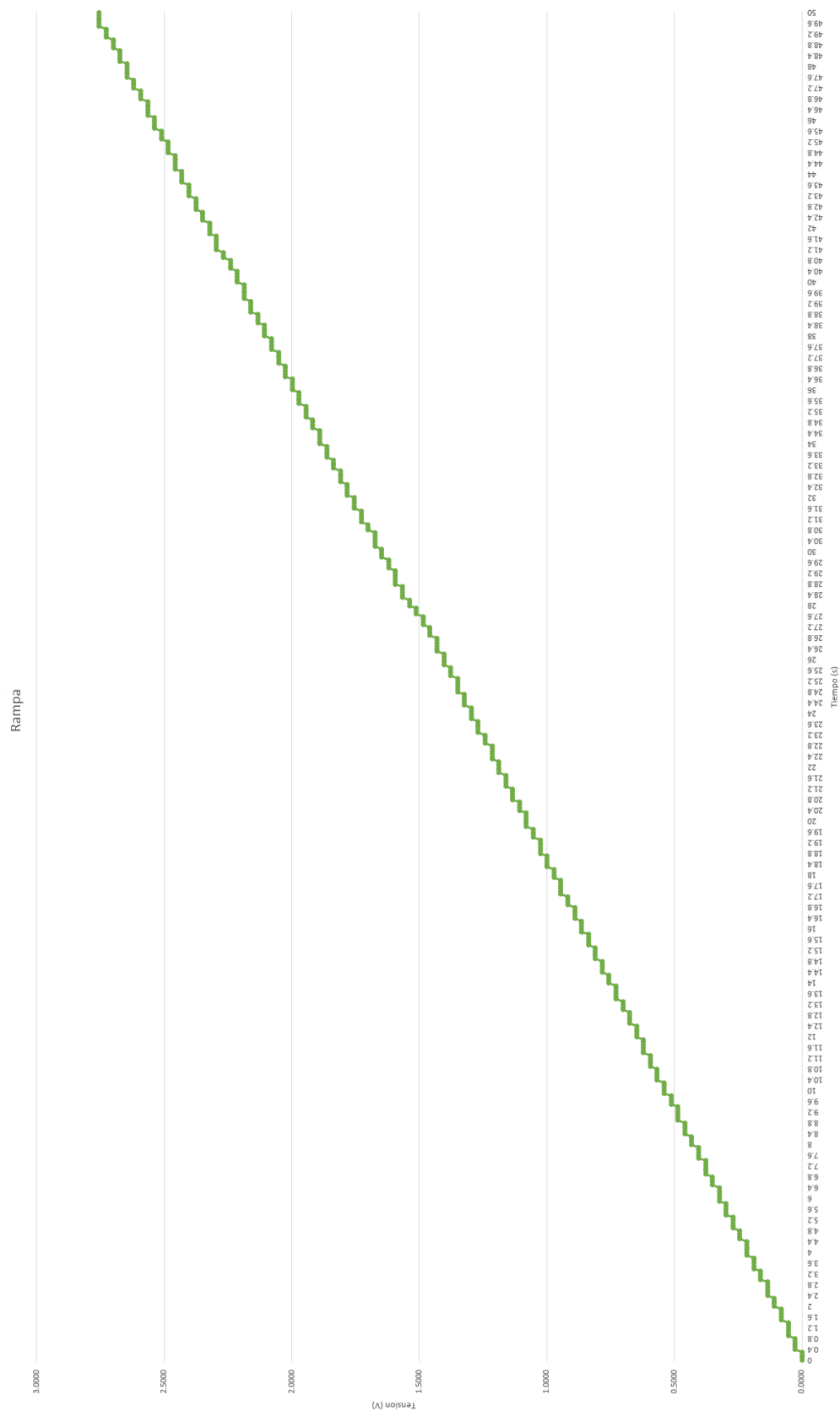


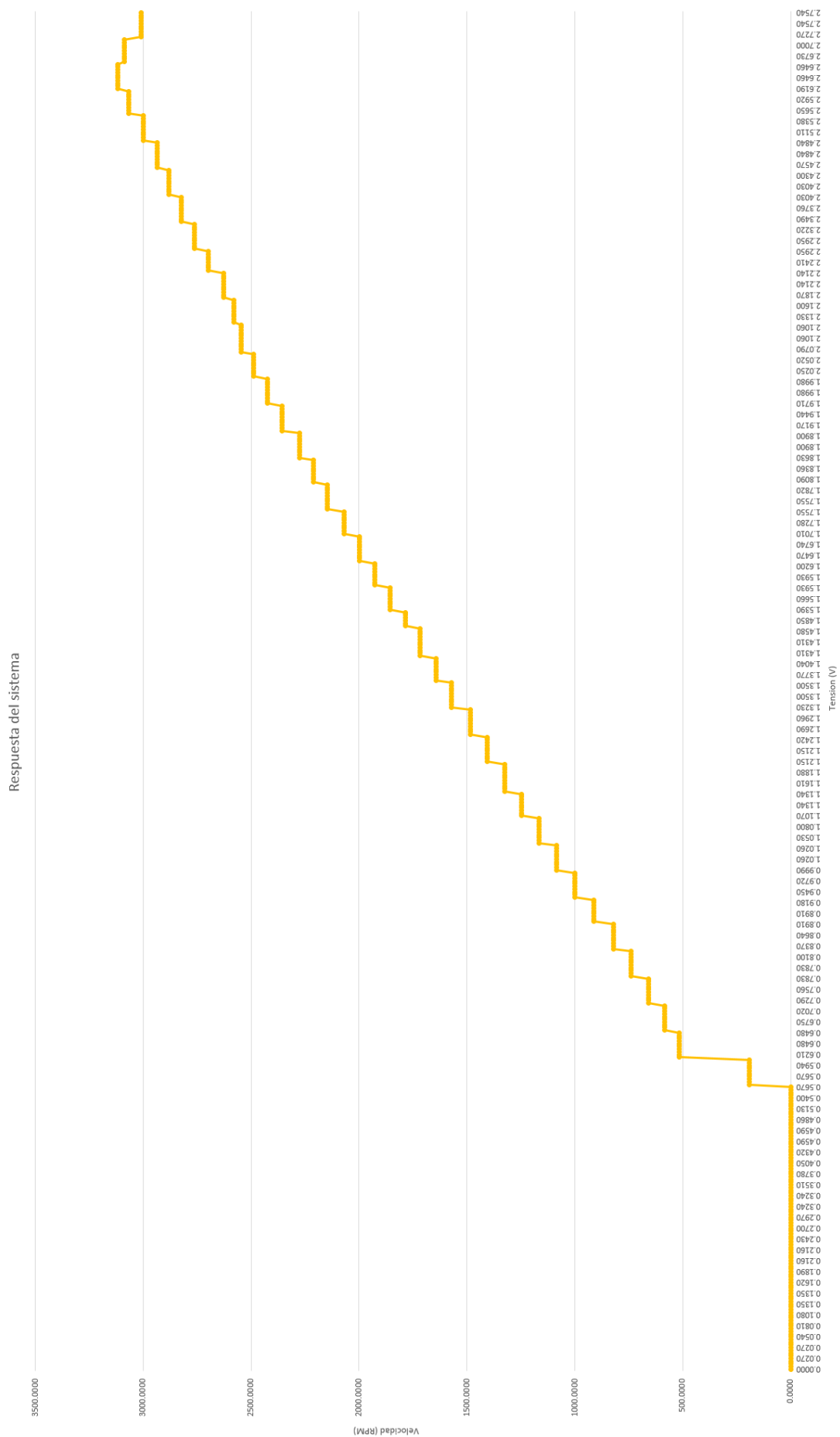
PROYECTO_ADQ_v1 ▸ PLC_1 [CPU 1214C AC/DC/Rly] ▸ Bloques de programa ▸ Adquisición [DB3]

Conservar valores actuales Instantánea Copiar instantáneas a valores de arranque

Adquisición									
	Nombre	Tipo de datos	Valor de arranq...	Remanen...	Accesible d...	Escrib...	Visible en ..	Valor de a..	Cor
1	▼ Static			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	records	UDInt	1000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	name	String	'Registro'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	id	DWord	1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	header	String	'Voltaje,Velocid..	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	data	Struct		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	done	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	busy	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	error	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	status	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

ANEXO 11: Curvas de rampa y respuesta de la planta





ANEXO 12: Tabla de datos obtenida de la adquisición

Record	Date	UTC Time	Voltaje	Velocidad	Tiempo
76	2/17/2022	16:15:57	0.0000	0.0000	0
77	2/17/2022	16:15:58	0.0000	0.0000	0.1
78	2/17/2022	16:15:58	0.0000	0.0000	0.2
79	2/17/2022	16:15:58	0.0000	0.0000	0.3
80	2/17/2022	16:15:58	0.0270	0.0000	0.4
81	2/17/2022	16:15:58	0.0270	0.0000	0.5
82	2/17/2022	16:15:58	0.0270	0.0000	0.6
83	2/17/2022	16:15:58	0.0270	0.0000	0.7
84	2/17/2022	16:15:58	0.0270	0.0000	0.8
85	2/17/2022	16:15:58	0.0540	0.0000	0.9
86	2/17/2022	16:15:58	0.0540	0.0000	1
87	2/17/2022	16:15:59	0.0540	0.0000	1.1
88	2/17/2022	16:15:59	0.0540	0.0000	1.2
89	2/17/2022	16:15:59	0.0540	0.0000	1.3
90	2/17/2022	16:15:59	0.0540	0.0000	1.4
91	2/17/2022	16:15:59	0.0810	0.0000	1.5
92	2/17/2022	16:15:59	0.0810	0.0000	1.6
93	2/17/2022	16:15:59	0.0810	0.0000	1.7
94	2/17/2022	16:15:59	0.0810	0.0000	1.8
95	2/17/2022	16:15:59	0.0810	0.0000	1.9
96	2/17/2022	16:15:59	0.1080	0.0000	2
97	2/17/2022	16:16:00	0.1080	0.0000	2.1
98	2/17/2022	16:16:00	0.1080	0.0000	2.2
99	2/17/2022	16:16:00	0.1080	0.0000	2.3
100	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.4
101	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.5
102	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.6
103	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.7
104	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.8
105	2/17/2022	16:16:00	0.1350	0.0000	2.9
106	2/17/2022	16:16:00	0.1620	0.0000	3
107	2/17/2022	16:16:01	0.1620	0.0000	3.1
108	2/17/2022	16:16:01	0.1620	0.0000	3.2
109	2/17/2022	16:16:01	0.1620	0.0000	3.3
110	2/17/2022	16:16:01	0.1890	0.0000	3.4
111	2/17/2022	16:16:01	0.1890	0.0000	3.5
112	2/17/2022	16:16:01	0.1890	0.0000	3.6
113	2/17/2022	16:16:01	0.1890	0.0000	3.7
114	2/17/2022	16:16:01	0.1890	0.0000	3.8
115	2/17/2022	16:16:01	0.2160	0.0000	3.9
116	2/17/2022	16:16:01	0.2160	0.0000	4

117	2/17/2022	16:16:02	0.2160	0.0000	4.1
118	2/17/2022	16:16:02	0.2160	0.0000	4.2
119	2/17/2022	16:16:02	0.2160	0.0000	4.3
120	2/17/2022	16:16:02	0.2160	0.0000	4.4
121	2/17/2022	16:16:02	0.2430	0.0000	4.5
122	2/17/2022	16:16:02	0.2430	0.0000	4.6
123	2/17/2022	16:16:02	0.2430	0.0000	4.7
124	2/17/2022	16:16:02	0.2430	0.0000	4.8
125	2/17/2022	16:16:02	0.2700	0.0000	4.9
126	2/17/2022	16:16:02	0.2700	0.0000	5
127	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000	5.1
128	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000	5.2
129	2/17/2022	16:16:03	0.2700	0.0000	5.3
130	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000	5.4
131	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000	5.5
132	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000	5.6
133	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000	5.7
134	2/17/2022	16:16:03	0.2970	0.0000	5.8
135	2/17/2022	16:16:03	0.3240	0.0000	5.9
136	2/17/2022	16:16:03	0.3240	0.0000	6
137	2/17/2022	16:16:04	0.3240	0.0000	6.1
138	2/17/2022	16:16:04	0.3240	0.0000	6.2
139	2/17/2022	16:16:04	0.3240	0.0000	6.3
140	2/17/2022	16:16:04	0.3240	0.0000	6.4
141	2/17/2022	16:16:04	0.3510	0.0000	6.5
142	2/17/2022	16:16:04	0.3510	0.0000	6.6
143	2/17/2022	16:16:04	0.3510	0.0000	6.7
144	2/17/2022	16:16:04	0.3510	0.0000	6.8
145	2/17/2022	16:16:04	0.3780	0.0000	6.9
146	2/17/2022	16:16:04	0.3780	0.0000	7
147	2/17/2022	16:16:05	0.3780	0.0000	7.1
148	2/17/2022	16:16:05	0.3780	0.0000	7.2
149	2/17/2022	16:16:05	0.3780	0.0000	7.3
150	2/17/2022	16:16:05	0.3780	0.0000	7.4
151	2/17/2022	16:16:05	0.4050	0.0000	7.5
152	2/17/2022	16:16:05	0.4050	0.0000	7.6
153	2/17/2022	16:16:05	0.4050	0.0000	7.7
154	2/17/2022	16:16:05	0.4050	0.0000	7.8
155	2/17/2022	16:16:05	0.4050	0.0000	7.9
156	2/17/2022	16:16:05	0.4320	0.0000	8
157	2/17/2022	16:16:06	0.4320	0.0000	8.1
158	2/17/2022	16:16:06	0.4320	0.0000	8.2
159	2/17/2022	16:16:06	0.4320	0.0000	8.3
160	2/17/2022	16:16:06	0.4590	0.0000	8.4

161	2/17/2022	16:16:06	0.4590	0.0000	8.5
162	2/17/2022	16:16:06	0.4590	0.0000	8.6
163	2/17/2022	16:16:06	0.4590	0.0000	8.7
164	2/17/2022	16:16:06	0.4590	0.0000	8.8
165	2/17/2022	16:16:06	0.4860	0.0000	8.9
166	2/17/2022	16:16:06	0.4860	0.0000	9
167	2/17/2022	16:16:07	0.4860	0.0000	9.1
168	2/17/2022	16:16:07	0.4860	0.0000	9.2
169	2/17/2022	16:16:07	0.4860	0.0000	9.3
170	2/17/2022	16:16:07	0.4860	0.0000	9.4
171	2/17/2022	16:16:07	0.5130	0.0480	9.5
172	2/17/2022	16:16:07	0.5130	0.0480	9.6
173	2/17/2022	16:16:07	0.5130	0.0480	9.7
174	2/17/2022	16:16:07	0.5130	0.0480	9.8
175	2/17/2022	16:16:07	0.5400	0.0480	9.9
176	2/17/2022	16:16:07	0.5400	0.0480	10
177	2/17/2022	16:16:08	0.5400	0.0480	10.1
178	2/17/2022	16:16:08	0.5400	0.0480	10.2
179	2/17/2022	16:16:08	0.5400	0.0480	10.3
180	2/17/2022	16:16:08	0.5670	0.0480	10.4
181	2/17/2022	16:16:08	0.5670	190.1760	10.5
182	2/17/2022	16:16:08	0.5670	190.1760	10.6
183	2/17/2022	16:16:08	0.5670	190.1760	10.7
184	2/17/2022	16:16:08	0.5670	190.1760	10.8
185	2/17/2022	16:16:08	0.5940	190.1760	10.9
186	2/17/2022	16:16:08	0.5940	190.1760	11
187	2/17/2022	16:16:09	0.5940	190.1760	11.1
188	2/17/2022	16:16:09	0.5940	190.1760	11.2
189	2/17/2022	16:16:09	0.5940	190.1760	11.3
190	2/17/2022	16:16:09	0.6210	190.1760	11.4
191	2/17/2022	16:16:09	0.6210	514.4640	11.5
192	2/17/2022	16:16:09	0.6210	514.4640	11.6
193	2/17/2022	16:16:09	0.6210	514.4640	11.7
194	2/17/2022	16:16:09	0.6210	514.4640	11.8
195	2/17/2022	16:16:09	0.6210	514.4640	11.9
196	2/17/2022	16:16:09	0.6480	514.4640	12
197	2/17/2022	16:16:10	0.6480	514.4640	12.1
198	2/17/2022	16:16:10	0.6480	514.4640	12.2
199	2/17/2022	16:16:10	0.6480	514.4640	12.3
200	2/17/2022	16:16:10	0.6480	514.4640	12.4
201	2/17/2022	16:16:10	0.6750	582.6000	12.5
202	2/17/2022	16:16:10	0.6750	582.6000	12.6
203	2/17/2022	16:16:10	0.6750	582.6000	12.7
204	2/17/2022	16:16:10	0.6750	582.6000	12.8

205	2/17/2022	16:16:10	0.6750	582.6000	12.9
206	2/17/2022	16:16:10	0.7020	582.6000	13
207	2/17/2022	16:16:11	0.7020	582.6000	13.1
208	2/17/2022	16:16:11	0.7020	582.6000	13.2
209	2/17/2022	16:16:11	0.7020	582.6000	13.3
210	2/17/2022	16:16:11	0.7290	582.6000	13.4
211	2/17/2022	16:16:11	0.7290	656.5680	13.5
212	2/17/2022	16:16:11	0.7290	656.5680	13.6
213	2/17/2022	16:16:11	0.7290	656.5680	13.7
214	2/17/2022	16:16:11	0.7290	656.5680	13.8
215	2/17/2022	16:16:11	0.7290	656.5680	13.9
216	2/17/2022	16:16:11	0.7560	656.5680	14
217	2/17/2022	16:16:12	0.7560	656.5680	14.1
218	2/17/2022	16:16:12	0.7560	656.5680	14.2
219	2/17/2022	16:16:12	0.7560	656.5680	14.3
220	2/17/2022	16:16:12	0.7830	656.5680	14.4
221	2/17/2022	16:16:12	0.7830	739.6080	14.5
222	2/17/2022	16:16:12	0.7830	739.6080	14.6
223	2/17/2022	16:16:12	0.7830	739.6080	14.7
224	2/17/2022	16:16:12	0.7830	739.6080	14.8
225	2/17/2022	16:16:12	0.8100	739.6080	14.9
226	2/17/2022	16:16:12	0.8100	739.6080	15
227	2/17/2022	16:16:13	0.8100	739.6080	15.1
228	2/17/2022	16:16:13	0.8100	739.6080	15.2
229	2/17/2022	16:16:13	0.8100	739.6080	15.3
230	2/17/2022	16:16:13	0.8370	739.6080	15.4
231	2/17/2022	16:16:13	0.8370	821.6400	15.5
232	2/17/2022	16:16:13	0.8370	821.6400	15.6
233	2/17/2022	16:16:13	0.8370	821.6400	15.7
234	2/17/2022	16:16:13	0.8370	821.6400	15.8
235	2/17/2022	16:16:13	0.8640	821.6400	15.9
236	2/17/2022	16:16:13	0.8640	821.6400	16
237	2/17/2022	16:16:14	0.8640	821.6400	16.1
238	2/17/2022	16:16:14	0.8640	821.6400	16.2
239	2/17/2022	16:16:14	0.8640	821.6400	16.3
240	2/17/2022	16:16:14	0.8910	821.6400	16.4
241	2/17/2022	16:16:14	0.8910	913.2720	16.5
242	2/17/2022	16:16:14	0.8910	913.2720	16.6
243	2/17/2022	16:16:14	0.8910	913.2720	16.7
244	2/17/2022	16:16:14	0.8910	913.2720	16.8
245	2/17/2022	16:16:14	0.9180	913.2720	16.9
246	2/17/2022	16:16:14	0.9180	913.2720	17
247	2/17/2022	16:16:15	0.9180	913.2720	17.1
248	2/17/2022	16:16:15	0.9180	913.2720	17.2

249	2/17/2022	16:16:15	0.9450	913.2720	17.3
250	2/17/2022	16:16:15	0.9450	1001.1840	17.4
251	2/17/2022	16:16:15	0.9450	1001.1840	17.5
252	2/17/2022	16:16:15	0.9450	1001.1840	17.6
253	2/17/2022	16:16:15	0.9450	1001.1840	17.7
254	2/17/2022	16:16:15	0.9450	1001.1840	17.8
255	2/17/2022	16:16:15	0.9720	1001.1840	17.9
256	2/17/2022	16:16:16	0.9720	1001.1840	18
257	2/17/2022	16:16:16	0.9720	1001.1840	18.1
258	2/17/2022	16:16:16	0.9720	1001.1840	18.2
259	2/17/2022	16:16:16	0.9990	1001.1840	18.3
260	2/17/2022	16:16:16	0.9990	1084.5120	18.4
261	2/17/2022	16:16:16	0.9990	1084.5120	18.5
262	2/17/2022	16:16:16	0.9990	1084.5120	18.6
263	2/17/2022	16:16:16	0.9990	1084.5120	18.7
264	2/17/2022	16:16:16	1.0260	1084.5120	18.8
265	2/17/2022	16:16:16	1.0260	1084.5120	18.9
266	2/17/2022	16:16:17	1.0260	1084.5120	19
267	2/17/2022	16:16:17	1.0260	1084.5120	19.1
268	2/17/2022	16:16:17	1.0260	1084.5120	19.2
269	2/17/2022	16:16:17	1.0260	1084.5120	19.3
270	2/17/2022	16:16:17	1.0530	1164.9360	19.4
271	2/17/2022	16:16:17	1.0530	1164.9360	19.5
272	2/17/2022	16:16:17	1.0530	1164.9360	19.6
273	2/17/2022	16:16:17	1.0530	1164.9360	19.7
274	2/17/2022	16:16:17	1.0800	1164.9360	19.8
275	2/17/2022	16:16:17	1.0800	1164.9360	19.9
276	2/17/2022	16:16:18	1.0800	1164.9360	20
277	2/17/2022	16:16:18	1.0800	1164.9360	20.1
278	2/17/2022	16:16:18	1.0800	1164.9360	20.2
279	2/17/2022	16:16:18	1.0800	1164.9360	20.3
280	2/17/2022	16:16:18	1.1070	1247.3040	20.4
281	2/17/2022	16:16:18	1.1070	1247.3040	20.5
282	2/17/2022	16:16:18	1.1070	1247.3040	20.6
283	2/17/2022	16:16:18	1.1070	1247.3040	20.7
284	2/17/2022	16:16:18	1.1340	1247.3040	20.8
285	2/17/2022	16:16:18	1.1340	1247.3040	20.9
286	2/17/2022	16:16:19	1.1340	1247.3040	21
287	2/17/2022	16:16:19	1.1340	1247.3040	21.1
288	2/17/2022	16:16:19	1.1340	1247.3040	21.2
289	2/17/2022	16:16:19	1.1610	1326.3360	21.3
290	2/17/2022	16:16:19	1.1610	1326.3360	21.4
291	2/17/2022	16:16:19	1.1610	1326.3360	21.5
292	2/17/2022	16:16:19	1.1610	1326.3360	21.6

293	2/17/2022	16:16:19	1.1610	1326.3360	21.7
294	2/17/2022	16:16:19	1.1880	1326.3360	21.8
295	2/17/2022	16:16:19	1.1880	1326.3360	21.9
296	2/17/2022	16:16:20	1.1880	1326.3360	22
297	2/17/2022	16:16:20	1.1880	1326.3360	22.1
298	2/17/2022	16:16:20	1.1880	1326.3360	22.2
299	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1326.3360	22.3
300	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1404.6720	22.4
301	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1404.6720	22.5
302	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1404.6720	22.6
303	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1404.6720	22.7
304	2/17/2022	16:16:20	1.2150	1404.6720	22.8
305	2/17/2022	16:16:20	1.2420	1404.6720	22.9
306	2/17/2022	16:16:21	1.2420	1404.6720	23
307	2/17/2022	16:16:21	1.2420	1404.6720	23.1
308	2/17/2022	16:16:21	1.2420	1404.6720	23.2
309	2/17/2022	16:16:21	1.2690	1404.6720	23.3
310	2/17/2022	16:16:21	1.2690	1485.4560	23.4
311	2/17/2022	16:16:21	1.2690	1485.4560	23.5
312	2/17/2022	16:16:21	1.2690	1485.4560	23.6
313	2/17/2022	16:16:21	1.2690	1485.4560	23.7
314	2/17/2022	16:16:21	1.2960	1485.4560	23.8
315	2/17/2022	16:16:21	1.2960	1485.4560	23.9
316	2/17/2022	16:16:22	1.2960	1485.4560	24
317	2/17/2022	16:16:22	1.2960	1485.4560	24.1
318	2/17/2022	16:16:22	1.2960	1485.4560	24.2
319	2/17/2022	16:16:22	1.3230	1485.4560	24.3
320	2/17/2022	16:16:22	1.3230	1570.5600	24.4
321	2/17/2022	16:16:22	1.3230	1570.5600	24.5
322	2/17/2022	16:16:22	1.3230	1570.5600	24.6
323	2/17/2022	16:16:22	1.3230	1570.5600	24.7
324	2/17/2022	16:16:22	1.3500	1570.5600	24.8
325	2/17/2022	16:16:22	1.3500	1570.5600	24.9
326	2/17/2022	16:16:23	1.3500	1570.5600	25
327	2/17/2022	16:16:23	1.3500	1570.5600	25.1
328	2/17/2022	16:16:23	1.3500	1570.5600	25.2
329	2/17/2022	16:16:23	1.3500	1570.5600	25.3
330	2/17/2022	16:16:23	1.3770	1644.1680	25.4
331	2/17/2022	16:16:23	1.3770	1644.1680	25.5
332	2/17/2022	16:16:23	1.3770	1644.1680	25.6
333	2/17/2022	16:16:23	1.3770	1644.1680	25.7
334	2/17/2022	16:16:23	1.4040	1644.1680	25.8
335	2/17/2022	16:16:23	1.4040	1644.1680	25.9
336	2/17/2022	16:16:24	1.4040	1644.1680	26

337	2/17/2022	16:16:24	1.4040	1644.1680	26.1
338	2/17/2022	16:16:24	1.4040	1644.1680	26.2
339	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.3
340	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.4
341	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.5
342	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.6
343	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.7
344	2/17/2022	16:16:24	1.4310	1716.5760	26.8
345	2/17/2022	16:16:24	1.4580	1716.5760	26.9
346	2/17/2022	16:16:25	1.4580	1716.5760	27
347	2/17/2022	16:16:25	1.4580	1716.5760	27.1
348	2/17/2022	16:16:25	1.4580	1716.5760	27.2
349	2/17/2022	16:16:25	1.4850	1716.5760	27.3
350	2/17/2022	16:16:25	1.4850	1785.9120	27.4
351	2/17/2022	16:16:25	1.4850	1785.9120	27.5
352	2/17/2022	16:16:25	1.4850	1785.9120	27.6
353	2/17/2022	16:16:26	1.5120	1785.9120	27.7
354	2/17/2022	16:16:26	1.5120	1785.9120	27.8
355	2/17/2022	16:16:26	1.5120	1785.9120	27.9
356	2/17/2022	16:16:26	1.5390	1854.9840	28
357	2/17/2022	16:16:26	1.5390	1854.9840	28.1
358	2/17/2022	16:16:26	1.5390	1854.9840	28.2
359	2/17/2022	16:16:26	1.5660	1854.9840	28.3
360	2/17/2022	16:16:26	1.5660	1854.9840	28.4
361	2/17/2022	16:16:27	1.5660	1854.9840	28.5
362	2/17/2022	16:16:27	1.5660	1854.9840	28.6
363	2/17/2022	16:16:27	1.5660	1854.9840	28.7
364	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1854.9840	28.8
365	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1928.7840	28.9
366	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1928.7840	29
367	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1928.7840	29.1
368	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1928.7840	29.2
369	2/17/2022	16:16:27	1.5930	1928.7840	29.3
370	2/17/2022	16:16:27	1.6200	1928.7840	29.4
371	2/17/2022	16:16:28	1.6200	1928.7840	29.5
372	2/17/2022	16:16:28	1.6200	1928.7840	29.6
373	2/17/2022	16:16:28	1.6200	1928.7840	29.7
374	2/17/2022	16:16:28	1.6470	1999.4880	29.8
375	2/17/2022	16:16:28	1.6470	1999.4880	29.9
376	2/17/2022	16:16:28	1.6470	1999.4880	30
377	2/17/2022	16:16:28	1.6470	1999.4880	30.1
378	2/17/2022	16:16:28	1.6740	1999.4880	30.2
379	2/17/2022	16:16:28	1.6740	1999.4880	30.3
380	2/17/2022	16:16:29	1.6740	1999.4880	30.4

381	2/17/2022	16:16:29	1.6740	1999.4880	30.5
382	2/17/2022	16:16:29	1.6740	1999.4880	30.6
383	2/17/2022	16:16:29	1.6740	1999.4880	30.7
384	2/17/2022	16:16:29	1.7010	2069.2560	30.8
385	2/17/2022	16:16:29	1.7010	2069.2560	30.9
386	2/17/2022	16:16:29	1.7010	2069.2560	31
387	2/17/2022	16:16:29	1.7280	2069.2560	31.1
388	2/17/2022	16:16:29	1.7280	2069.2560	31.2
389	2/17/2022	16:16:30	1.7280	2069.2560	31.3
390	2/17/2022	16:16:30	1.7280	2069.2560	31.4
391	2/17/2022	16:16:30	1.7280	2069.2560	31.5
392	2/17/2022	16:16:30	1.7550	2069.2560	31.6
393	2/17/2022	16:16:30	1.7550	2148.1440	31.7
394	2/17/2022	16:16:30	1.7550	2148.1440	31.8
395	2/17/2022	16:16:30	1.7550	2148.1440	31.9
396	2/17/2022	16:16:30	1.7550	2148.1440	32
397	2/17/2022	16:16:30	1.7820	2148.1440	32.1
398	2/17/2022	16:16:30	1.7820	2148.1440	32.2
399	2/17/2022	16:16:31	1.7820	2148.1440	32.3
400	2/17/2022	16:16:31	1.7820	2148.1440	32.4
401	2/17/2022	16:16:31	1.7820	2148.1440	32.5
402	2/17/2022	16:16:31	1.8090	2148.1440	32.6
403	2/17/2022	16:16:31	1.8090	2212.5600	32.7
404	2/17/2022	16:16:31	1.8090	2212.5600	32.8
405	2/17/2022	16:16:31	1.8090	2212.5600	32.9
406	2/17/2022	16:16:31	1.8090	2212.5600	33
407	2/17/2022	16:16:31	1.8360	2212.5600	33.1
408	2/17/2022	16:16:32	1.8360	2212.5600	33.2
409	2/17/2022	16:16:32	1.8360	2212.5600	33.3
410	2/17/2022	16:16:32	1.8360	2212.5600	33.4
411	2/17/2022	16:16:32	1.8630	2212.5600	33.5
412	2/17/2022	16:16:32	1.8630	2275.4640	33.6
413	2/17/2022	16:16:32	1.8630	2275.4640	33.7
414	2/17/2022	16:16:32	1.8630	2275.4640	33.8
415	2/17/2022	16:16:32	1.8630	2275.4640	33.9
416	2/17/2022	16:16:32	1.8900	2275.4640	34
417	2/17/2022	16:16:32	1.8900	2275.4640	34.1
418	2/17/2022	16:16:33	1.8900	2275.4640	34.2
419	2/17/2022	16:16:33	1.8900	2275.4640	34.3
420	2/17/2022	16:16:33	1.8900	2275.4640	34.4
421	2/17/2022	16:16:33	1.8900	2275.4640	34.5
422	2/17/2022	16:16:33	1.9170	2355.6480	34.6
423	2/17/2022	16:16:33	1.9170	2355.6480	34.7
424	2/17/2022	16:16:33	1.9170	2355.6480	34.8

425	2/17/2022	16:16:33	1.9170	2355.6480	34.9
426	2/17/2022	16:16:33	1.9440	2355.6480	35
427	2/17/2022	16:16:33	1.9440	2355.6480	35.1
428	2/17/2022	16:16:34	1.9440	2355.6480	35.2
429	2/17/2022	16:16:34	1.9440	2355.6480	35.3
430	2/17/2022	16:16:34	1.9440	2355.6480	35.4
431	2/17/2022	16:16:34	1.9710	2355.6480	35.5
432	2/17/2022	16:16:34	1.9710	2425.7280	35.6
433	2/17/2022	16:16:34	1.9710	2425.7280	35.7
434	2/17/2022	16:16:34	1.9710	2425.7280	35.8
435	2/17/2022	16:16:34	1.9710	2425.7280	35.9
436	2/17/2022	16:16:34	1.9980	2425.7280	36
437	2/17/2022	16:16:34	1.9980	2425.7280	36.1
438	2/17/2022	16:16:35	1.9980	2425.7280	36.2
439	2/17/2022	16:16:35	1.9980	2425.7280	36.3
440	2/17/2022	16:16:35	1.9980	2425.7280	36.4
441	2/17/2022	16:16:35	2.0250	2425.7280	36.5
442	2/17/2022	16:16:35	2.0250	2489.8560	36.6
443	2/17/2022	16:16:35	2.0250	2489.8560	36.7
444	2/17/2022	16:16:35	2.0250	2489.8560	36.8
445	2/17/2022	16:16:35	2.0250	2489.8560	36.9
446	2/17/2022	16:16:35	2.0520	2489.8560	37
447	2/17/2022	16:16:35	2.0520	2489.8560	37.1
448	2/17/2022	16:16:36	2.0520	2489.8560	37.2
449	2/17/2022	16:16:36	2.0520	2489.8560	37.3
450	2/17/2022	16:16:36	2.0520	2489.8560	37.4
451	2/17/2022	16:16:36	2.0790	2545.2000	37.5
452	2/17/2022	16:16:36	2.0790	2545.2000	37.6
453	2/17/2022	16:16:36	2.0790	2545.2000	37.7
454	2/17/2022	16:16:36	2.0790	2545.2000	37.8
455	2/17/2022	16:16:36	2.0790	2545.2000	37.9
456	2/17/2022	16:16:36	2.1060	2545.2000	38
457	2/17/2022	16:16:36	2.1060	2545.2000	38.1
458	2/17/2022	16:16:37	2.1060	2545.2000	38.2
459	2/17/2022	16:16:37	2.1060	2545.2000	38.3
460	2/17/2022	16:16:37	2.1060	2545.2000	38.4
461	2/17/2022	16:16:37	2.1330	2545.2000	38.5
462	2/17/2022	16:16:37	2.1330	2581.4640	38.6
463	2/17/2022	16:16:37	2.1330	2581.4640	38.7
464	2/17/2022	16:16:37	2.1330	2581.4640	38.8
465	2/17/2022	16:16:37	2.1600	2581.4640	38.9
466	2/17/2022	16:16:37	2.1600	2581.4640	39
467	2/17/2022	16:16:38	2.1600	2581.4640	39.1
468	2/17/2022	16:16:38	2.1600	2581.4640	39.2

469	2/17/2022	16:16:38	2.1600	2581.4640	39.3
470	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2581.4640	39.4
471	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2629.3440	39.5
472	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2629.3440	39.6
473	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2629.3440	39.7
474	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2629.3440	39.8
475	2/17/2022	16:16:38	2.1870	2629.3440	39.9
476	2/17/2022	16:16:39	2.2140	2629.3440	40
477	2/17/2022	16:16:39	2.2140	2629.3440	40.1
478	2/17/2022	16:16:39	2.2140	2629.3440	40.2
479	2/17/2022	16:16:39	2.2140	2629.3440	40.3
480	2/17/2022	16:16:39	2.2140	2629.3440	40.4
481	2/17/2022	16:16:39	2.2410	2699.0400	40.5
482	2/17/2022	16:16:39	2.2410	2699.0400	40.6
483	2/17/2022	16:16:39	2.2410	2699.0400	40.7
484	2/17/2022	16:16:39	2.2410	2699.0400	40.8
485	2/17/2022	16:16:40	2.2680	2699.0400	40.9
486	2/17/2022	16:16:40	2.2680	2699.0400	41
487	2/17/2022	16:16:40	2.2680	2699.0400	41.1
488	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2699.0400	41.2
489	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2764.3920	41.3
490	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2764.3920	41.4
491	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2764.3920	41.5
492	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2764.3920	41.6
493	2/17/2022	16:16:40	2.2950	2764.3920	41.7
494	2/17/2022	16:16:40	2.3220	2764.3920	41.8
495	2/17/2022	16:16:41	2.3220	2764.3920	41.9
496	2/17/2022	16:16:41	2.3220	2764.3920	42
497	2/17/2022	16:16:41	2.3220	2764.3920	42.1
498	2/17/2022	16:16:41	2.3220	2764.3920	42.2
499	2/17/2022	16:16:41	2.3490	2822.6160	42.3
500	2/17/2022	16:16:41	2.3490	2822.6160	42.4
501	2/17/2022	16:16:41	2.3490	2822.6160	42.5
502	2/17/2022	16:16:41	2.3490	2822.6160	42.6
503	2/17/2022	16:16:41	2.3760	2822.6160	42.7
504	2/17/2022	16:16:41	2.3760	2822.6160	42.8
505	2/17/2022	16:16:42	2.3760	2822.6160	42.9
506	2/17/2022	16:16:42	2.3760	2822.6160	43
507	2/17/2022	16:16:42	2.3760	2822.6160	43.1
508	2/17/2022	16:16:42	2.4030	2822.6160	43.2
509	2/17/2022	16:16:42	2.4030	2882.2560	43.3
510	2/17/2022	16:16:42	2.4030	2882.2560	43.4
511	2/17/2022	16:16:42	2.4030	2882.2560	43.5
512	2/17/2022	16:16:42	2.4030	2882.2560	43.6

513	2/17/2022	16:16:42	2.4300	2882.2560	43.7
514	2/17/2022	16:16:42	2.4300	2882.2560	43.8
515	2/17/2022	16:16:43	2.4300	2882.2560	43.9
516	2/17/2022	16:16:43	2.4300	2882.2560	44
517	2/17/2022	16:16:43	2.4300	2882.2560	44.1
518	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2882.2560	44.2
519	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2936.1360	44.3
520	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2936.1360	44.4
521	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2936.1360	44.5
522	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2936.1360	44.6
523	2/17/2022	16:16:43	2.4570	2936.1360	44.7
524	2/17/2022	16:16:43	2.4840	2936.1360	44.8
525	2/17/2022	16:16:44	2.4840	2936.1360	44.9
526	2/17/2022	16:16:44	2.4840	2936.1360	45
527	2/17/2022	16:16:44	2.4840	2936.1360	45.1
528	2/17/2022	16:16:44	2.4840	2936.1360	45.2
529	2/17/2022	16:16:44	2.5110	3001.4160	45.3
530	2/17/2022	16:16:44	2.5110	3001.4160	45.4
531	2/17/2022	16:16:44	2.5110	3001.4160	45.5
532	2/17/2022	16:16:44	2.5110	3001.4160	45.6
533	2/17/2022	16:16:44	2.5380	3001.4160	45.7
534	2/17/2022	16:16:44	2.5380	3001.4160	45.8
535	2/17/2022	16:16:45	2.5380	3001.4160	45.9
536	2/17/2022	16:16:45	2.5380	3001.4160	46
537	2/17/2022	16:16:45	2.5380	3001.4160	46.1
538	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3001.4160	46.2
539	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3068.6640	46.3
540	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3068.6640	46.4
541	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3068.6640	46.5
542	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3068.6640	46.6
543	2/17/2022	16:16:45	2.5650	3068.6640	46.7
544	2/17/2022	16:16:45	2.5920	3068.6640	46.8
545	2/17/2022	16:16:46	2.5920	3068.6640	46.9
546	2/17/2022	16:16:46	2.5920	3068.6640	47
547	2/17/2022	16:16:46	2.5920	3068.6640	47.1
548	2/17/2022	16:16:46	2.6190	3118.0080	47.2
549	2/17/2022	16:16:46	2.6190	3118.0080	47.3
550	2/17/2022	16:16:46	2.6190	3118.0080	47.4
551	2/17/2022	16:16:46	2.6190	3118.0080	47.5
552	2/17/2022	16:16:46	2.6460	3118.0080	47.6
553	2/17/2022	16:16:46	2.6460	3118.0080	47.7
554	2/17/2022	16:16:47	2.6460	3118.0080	47.8
555	2/17/2022	16:16:47	2.6460	3118.0080	47.9
556	2/17/2022	16:16:47	2.6460	3118.0080	48

557	2/17/2022	16:16:47	2.6460	3118.0080	48.1
558	2/17/2022	16:16:47	2.6730	3089.4480	48.2
559	2/17/2022	16:16:47	2.6730	3089.4480	48.3
560	2/17/2022	16:16:47	2.6730	3089.4480	48.4
561	2/17/2022	16:16:47	2.6730	3089.4480	48.5
562	2/17/2022	16:16:47	2.6730	3089.4480	48.6
563	2/17/2022	16:16:47	2.7000	3089.4480	48.7
564	2/17/2022	16:16:48	2.7000	3089.4480	48.8
565	2/17/2022	16:16:48	2.7000	3089.4480	48.9
566	2/17/2022	16:16:48	2.7000	3089.4480	49
567	2/17/2022	16:16:48	2.7270	3008.9520	49.1
568	2/17/2022	16:16:48	2.7270	3008.9520	49.2
569	2/17/2022	16:16:48	2.7270	3008.9520	49.3
570	2/17/2022	16:16:48	2.7270	3008.9520	49.4
571	2/17/2022	16:16:48	2.7540	3008.9520	49.5
572	2/17/2022	16:16:48	2.7540	3008.9520	49.6
573	2/17/2022	16:16:49	2.7540	3008.9520	49.7
574	2/17/2022	16:16:49	2.7540	3008.9520	49.8
575	2/17/2022	16:16:49	2.7540	3008.9520	49.9
576	2/17/2022	16:16:49	2.7540	3008.9520	50



ANEXO 13: Tabla de índice de desempeño para PID Compact

Setpoint	1
----------	---

PID Compact				
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE
0	0	1	1	0
3.16E-30	0	1	1	3.1554E-30
2.80E-06	0.0001074	0.9998926	0.99978522	2.7999E-06
5.60E-06	0.00021475	0.99978525	0.99957054	5.5992E-06
8.40E-06	0.00032207	0.99967793	0.99935596	8.3978E-06
2.30E-05	0.00088033	0.99911967	0.99824011	2.2963E-05
3.76E-05	0.00143752	0.99856248	0.99712703	3.7512E-05
5.21E-05	0.00199362	0.99800638	0.99601673	5.2044E-05
6.67E-05	0.00254863	0.99745137	0.99490924	6.6561E-05
0.00010002	0.00381158	0.99618842	0.99239136	9.964E-05
0.00013331	0.00506888	0.99493112	0.98988793	0.00013264
0.0001666	0.00632055	0.99367945	0.98739885	0.00016555
0.00019989	0.00756662	0.99243338	0.98492401	0.00019838
0.00023318	0.00880712	0.99119288	0.98246332	0.00023113
0.00031893	0.01197676	0.98802324	0.97618992	0.00031511
0.00040467	0.01511002	0.98488998	0.97000827	0.00039856
0.00049042	0.01820733	0.98179267	0.96391685	0.00048149
0.00057617	0.0212691	0.9787309	0.95791418	0.00056391
0.00066191	0.02429576	0.97570424	0.95199877	0.00064583
0.00074766	0.02728771	0.97271229	0.9461692	0.00072725
0.00089406	0.03231719	0.96768281	0.93641003	0.00086517
0.00104046	0.03724866	0.96275134	0.92689014	0.00100171
0.00118687	0.04208409	0.95791591	0.91760289	0.00113692
0.00133327	0.04682538	0.95317462	0.90854186	0.00127084
0.00147968	0.05147441	0.94852559	0.8997008	0.00140351
0.00162608	0.05603301	0.94396699	0.89107368	0.00153497
0.00186934	0.06341232	0.93658768	0.87719649	0.0017508
0.0021126	0.07055498	0.92944502	0.86386805	0.00196354
0.00235586	0.07746876	0.92253124	0.85106389	0.00217335
0.00259912	0.08416119	0.91583881	0.83876072	0.00238037
0.00284238	0.09063955	0.90936045	0.82693643	0.00258475
0.00308564	0.09691086	0.90308914	0.81557	0.00278661
0.00406228	0.12013903	0.87986097	0.77415533	0.00357424
0.00437706	0.12700513	0.87299487	0.76212004	0.00382115
0.00469183	0.13359042	0.86640958	0.75066556	0.00406505
0.00500661	0.1399068	0.8600932	0.73976031	0.00430615
0.00532139	0.14596565	0.85403435	0.72937467	0.00454465
0.00563616	0.15177786	0.84822214	0.7194808	0.00478072
0.00595094	0.15735385	0.84264615	0.71005253	0.00501454

0.00661535	0.16839232	0.83160768	0.69157134	0.00550138
0.00727976	0.17851041	0.82148959	0.67484514	0.00598025
0.00794417	0.18778838	0.81221162	0.65968771	0.00645235
0.00860858	0.19629948	0.80370052	0.64593453	0.00691872
0.00927299	0.20411059	0.79588941	0.63343996	0.00738027
0.0099374	0.21128277	0.78871723	0.62207487	0.0078378
0.01200479	0.23006117	0.76993883	0.59280579	0.00924296
0.01407219	0.24456018	0.75543982	0.57068932	0.01063069
0.01613958	0.25586294	0.74413706	0.55373996	0.01201006
0.01820698	0.26476053	0.73523947	0.54057708	0.01338649
0.02027437	0.27183869	0.72816131	0.5302189	0.01476301
0.02346352	0.28013982	0.71986018	0.51819867	0.01689045
0.02665267	0.28632937	0.71367063	0.50932577	0.01902122
0.02984181	0.2911761	0.7088239	0.50243132	0.02115259
0.03303096	0.29514563	0.70485437	0.49681969	0.02328202
0.03622011	0.29853517	0.70146483	0.49205291	0.02540713
0.04145559	0.30330891	0.69669109	0.48537848	0.02888174
0.04669107	0.30760095	0.69239905	0.47941645	0.03232885
0.05192655	0.31167458	0.68832542	0.47379188	0.03574236
0.05716203	0.31562692	0.68437308	0.46836651	0.03912015
0.06239751	0.31950533	0.68049467	0.463073	0.04246117
0.07204466	0.32655943	0.67344057	0.4535222	0.0485178
0.08169182	0.33358791	0.66641209	0.44410508	0.05444041
0.09133897	0.34061268	0.65938732	0.43479164	0.06022776
0.10098613	0.34762364	0.65237636	0.42559492	0.06588096
0.11063328	0.35461868	0.64538132	0.41651705	0.07140065
0.14893742	0.38229517	0.61770483	0.38155926	0.09199937
0.18724156	0.40978932	0.59021068	0.34834865	0.11051197
0.2255457	0.43707237	0.56292763	0.31688752	0.12696591
0.26384984	0.46410745	0.53589255	0.28718082	0.14139517
0.34676406	0.52164438	0.47835562	0.2288241	0.16587654
0.42967827	0.57760501	0.42239499	0.17841753	0.18149395
0.51259249	0.63174254	0.36825746	0.13561356	0.18876601
0.5955067	0.68384013	0.31615987	0.09995707	0.18827532
0.67842092	0.73371698	0.26628302	0.07090665	0.18065197
0.79096866	0.7976128	0.2023872	0.04096058	0.16008193
0.9035164	0.85685431	0.14314569	0.02049069	0.12933448
1.01606414	0.9112313	0.0887687	0.00787988	0.09019469
1.12861188	0.96062336	0.03937664	0.00155052	0.04444095
1.24115962	1.0049866	0.0049866	2.4866E-05	0.00618917
1.41160657	1.06268292	0.06268292	0.00392915	0.08848362
1.58205353	1.10920992	0.10920992	0.01192681	0.17277593
1.75250048	1.1451148	0.1451148	0.02105831	0.25431376
1.92294743	1.17117469	0.17117469	0.02930077	0.32915992
2.09339439	1.18831227	0.18831227	0.03546151	0.39421184
2.34185938	1.19940442	0.19940442	0.03976212	0.4669771

2.59032437	1.19689358	0.19689358	0.03876708	0.51001824
2.83878937	1.18402477	0.18402477	0.03386512	0.52240757
3.08725436	1.1638993	0.1638993	0.02686298	0.50599882
3.33571936	1.13931342	0.13931342	0.01940823	0.46471047
3.64848935	1.10561467	0.10561467	0.01115446	0.38533401
3.96125934	1.07238284	0.07238284	0.00523928	0.28672722
4.27402933	1.04233194	0.04233194	0.00179199	0.18092797
4.58679933	1.01712981	0.01712981	0.00029343	0.07857101
4.89956932	0.99755608	0.00244392	5.9727E-06	0.01197415
5.33397584	0.97965147	0.02034853	0.00041406	0.10853856
5.76838236	0.97149992	0.02850008	0.00081225	0.16439938
6.20278887	0.97082693	0.02917307	0.00085107	0.1809544
6.63719539	0.97495375	0.02504625	0.00062731	0.16623688
7.07160191	0.98143188	0.01856812	0.00034477	0.13130632
7.56194776	0.98926684	0.01073316	0.0001152	0.08116362
8.05229362	0.99597213	0.00402787	1.6224E-05	0.03243359
8.54263947	1.00071303	0.00071303	5.0841E-07	0.00609116
9.03298533	1.00337706	0.00337706	1.1405E-05	0.0305049
9.52333118	1.00430134	0.00430134	1.8502E-05	0.04096306
10.0233312	1.00400771	0.00400771	1.6062E-05	0.0401706
10.5233312	1.00303795	0.00303795	9.2291E-06	0.03196937
11.0233312	1.00187562	0.00187562	3.5179E-06	0.02067555
11.5233312	1.00084352	0.00084352	7.1153E-07	0.00972017
12.0233312	1.00008777	8.7771E-05	7.7038E-09	0.00105531
12.5233312	0.999627	0.000373	1.3913E-07	0.0046712
13.0233312	0.99941787	0.00058213	3.3888E-07	0.00758133
13.5233312	0.99939657	0.00060343	3.6413E-07	0.00816044
14.0233312	0.99949552	0.00050448	2.545E-07	0.00707453
14.5233312	0.99965083	0.00034917	1.2192E-07	0.00507116
15.0233312	0.99980992	0.00019008	3.6129E-08	0.00285557
15.5233312	0.99994589	5.4109E-05	2.9278E-09	0.00083995
16.0233312	1.00004078	4.078E-05	1.663E-09	0.00065343
16.5233312	1.00008943	8.9434E-05	7.9984E-09	0.00147775
17.0233312	1.00009933	9.933E-05	9.8664E-09	0.00169092
17.5233312	1.00008419	8.4195E-05	7.0888E-09	0.00147538
18.0233312	1.00005786	5.7859E-05	3.3476E-09	0.0010428
18.5233312	1.00003077	3.0771E-05	9.4686E-10	0.00056998
19.0233312	1.000009	9.001E-06	8.1018E-11	0.00017123
19.5233312	0.9999948	5.2022E-06	2.7063E-11	0.00010156
20.0233312	0.99998781	1.2189E-05	1.4856E-10	0.00024406
20.5233312	0.99998634	1.3662E-05	1.8664E-10	0.00028038
21.0233312	0.99998823	1.177E-05	1.3852E-10	0.00024743
21.5233312	0.99999154	8.4604E-06	7.1578E-11	0.0001821
22.0233312	0.99999506	4.9408E-06	2.4411E-11	0.00010881
22.5233312	0.99999809	1.9108E-06	3.651E-12	4.3037E-05
23.0233312	1.00000027	2.6945E-07	7.2606E-14	6.2037E-06

23.5233312	1.00000152	1.5235E-06	2.3211E-12	3.5838E-05
24.0233312	1.00000198	1.9776E-06	3.9107E-12	4.7507E-05
24.5233312	1.00000187	1.8669E-06	3.4854E-12	4.5783E-05
25	1.00000148	1.4753E-06	2.1765E-12	3.6882E-05
TOTAL		62.5869514	51.6071329	8.28964082



ANEXO 14: Tabla de índice de desempeño para Sisotool

Setpoint	1
----------	---

SISOTOOL				
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE
0	0	1	1	0
3.16E-30	0	1	1	3.1554E-30
2.80E-06	2.99E-05	0.99997012	0.99994023	2.8001E-06
5.60E-06	5.98E-05	0.99994024	0.99988048	5.6E-06
8.40E-06	8.96E-05	0.99991037	0.99982074	8.3998E-06
2.30E-05	2.45E-04	0.99975492	0.9995099	2.2977E-05
3.76E-05	4.00E-04	0.99959965	0.99919947	3.7551E-05
5.21E-05	0.00055543	0.99944457	0.99888946	5.2119E-05
6.67E-05	0.00071032	0.99928968	0.99857987	6.6683E-05
0.00010002	0.00106321	0.99893679	0.99787471	9.9915E-05
0.00013331	0.00141513	0.99858487	0.99717175	0.00013312
0.0001666	0.00176607	0.99823393	0.99647097	0.00016631
0.00019989	0.00211605	0.99788395	0.99577237	0.00019947
0.00023318	0.00246507	0.99753493	0.99507595	0.00023261
0.00031893	0.00335959	0.99664041	0.99329211	0.00031786
0.00040467	0.00424779	0.99575221	0.99152246	0.00040296
0.00049042	0.00512973	0.99487027	0.98976685	0.0004879
0.00057617	0.00600547	0.99399453	0.98802513	0.00057271
0.00066191	0.00687505	0.99312495	0.98629716	0.00065736
0.00074766	0.00773854	0.99226146	0.9845828	0.00074187
0.00089406	0.00919897	0.99080103	0.98168668	0.00088584
0.00104046	0.01064207	0.98935793	0.97882912	0.00102939
0.00118687	0.01206811	0.98793189	0.97600941	0.00117254
0.00133327	0.01347737	0.98652263	0.97322691	0.0013153
0.00147968	0.01487009	0.98512991	0.97048093	0.00145767
0.00162608	0.01624655	0.98375345	0.96777085	0.00159966
0.00186934	0.01849833	0.98150167	0.96334553	0.00183476
0.0021126	0.02070703	0.97929297	0.95901473	0.00206885
0.00235586	0.02287375	0.97712625	0.9547757	0.00230197
0.00259912	0.02499959	0.97500041	0.95062581	0.00253414
0.00284238	0.02708558	0.97291442	0.94656247	0.00276539
0.00308564	0.02913276	0.97086724	0.9425832	0.00299574
0.00406228	0.03698088	0.96301912	0.92740582	0.00391206
0.00437706	0.03939052	0.96060948	0.92277057	0.00420464
0.00469183	0.04174501	0.95825499	0.91825262	0.00449597
0.00500661	0.04404619	0.95595381	0.91384769	0.00478609
0.00532139	0.04629582	0.95370418	0.90955167	0.00507503
0.00563616	0.04849559	0.95150441	0.90536063	0.00536283
0.00595094	0.05064718	0.94935282	0.90127078	0.00564954

0.00661535	0.05503747	0.94496253	0.89295417	0.00625126
0.00727976	0.05923431	0.94076569	0.88504009	0.00684855
0.00794417	0.06325092	0.93674908	0.87749884	0.00744169
0.00860858	0.06709962	0.93290038	0.87030312	0.00803095
0.00927299	0.07079189	0.92920811	0.86342771	0.00861654
0.0099374	0.07433841	0.92566159	0.85684938	0.00919867
0.01200479	0.08454131	0.91545869	0.83806462	0.01098989
0.01407219	0.09368312	0.90631688	0.82141028	0.01275386
0.01613958	0.10197555	0.89802445	0.80644791	0.01449374
0.01820698	0.10958479	0.89041521	0.79283925	0.01621177
0.02027437	0.11664233	0.88335767	0.78032078	0.01790952
0.02346352	0.12667635	0.87332365	0.7626942	0.02049124
0.02665267	0.13594147	0.86405853	0.74659715	0.02302946
0.02984181	0.14465125	0.85534875	0.73162149	0.02552516
0.03303096	0.15295208	0.84704792	0.71749017	0.02797881
0.03622011	0.16094684	0.83905316	0.7040102	0.0303906
0.04145559	0.1735831	0.8264169	0.68296489	0.0342596
0.04669107	0.18580912	0.81419088	0.66290678	0.03801544
0.05192655	0.1977519	0.8022481	0.64360202	0.04165797
0.05716203	0.20947644	0.79052356	0.6249275	0.04518793
0.06239751	0.22101932	0.77898068	0.60681091	0.04860645
0.07204466	0.24187993	0.75812007	0.57474604	0.0546185
0.08169182	0.26228557	0.73771443	0.54422258	0.06026523
0.09133897	0.28227017	0.71772983	0.5151361	0.0655567
0.10098613	0.30184436	0.69815564	0.4874213	0.07050403
0.11063328	0.32101645	0.67898355	0.46101866	0.07511818
0.14893742	0.39341541	0.60658459	0.36794487	0.09034315
0.18724156	0.46009673	0.53990327	0.29149554	0.10109233
0.2255457	0.52145589	0.47854411	0.22900447	0.10793357
0.26384984	0.57787222	0.42212778	0.17819187	0.11137835
0.34676406	0.6846272	0.3153728	0.09946	0.10935995
0.42967827	0.7730489	0.2269511	0.0515068	0.09751596
0.51259249	0.84596857	0.15403143	0.02372568	0.07895536
0.5955067	0.90576835	0.09423165	0.0088796	0.05611558
0.67842092	0.95446372	0.04553628	0.00207355	0.03089277
0.79096866	1.00578608	0.00578608	3.3479E-05	0.00457661
0.9035164	1.04341157	0.04341157	0.00188456	0.03922306
1.01606414	1.07027636	0.07027636	0.00493877	0.07140529
1.12861188	1.08871779	0.08871779	0.00787085	0.10012796
1.24115962	1.10060796	0.10060796	0.01012196	0.12487053
1.41160657	1.10929421	0.10929421	0.01194522	0.15428042
1.58205353	1.11035132	0.11035132	0.01217741	0.1745817
1.75250048	1.10662842	0.10662842	0.01136962	0.18686636
1.92294743	1.1000444	0.1000444	0.01000888	0.19238012
2.09339439	1.09190519	0.09190519	0.00844656	0.19239381
2.34185938	1.07893654	0.07893654	0.00623098	0.18485827

2.59032437	1.0662706	0.0662706	0.00439179	0.17166235
2.83878937	1.05478057	0.05478057	0.00300091	0.15551049
3.08725436	1.04476105	0.04476105	0.00200355	0.13818875
3.33571936	1.03623663	0.03623663	0.00131309	0.12087522
3.64848935	1.02748038	0.02748038	0.00075517	0.10026189
3.96125934	1.02066615	0.02066615	0.00042709	0.081864
4.27402933	1.01545085	0.01545085	0.00023873	0.06603738
4.58679933	1.01149905	0.01149905	0.00013223	0.05274385
4.89956932	1.0085248	0.0085248	7.2672E-05	0.04176786
5.33397584	1.00560904	0.00560904	3.1461E-05	0.02991848
5.76838236	1.00367994	0.00367994	1.3542E-05	0.02122728
6.20278887	1.00240673	0.00240673	5.7923E-06	0.01492842
6.63719539	1.00156871	0.00156871	2.4608E-06	0.01041182
7.07160191	1.00101963	0.00101963	1.0396E-06	0.00721042
7.56194776	1.00062779	0.00062779	3.9412E-07	0.00474732
8.05229362	1.00038662	0.00038662	1.4948E-07	0.0031132
8.54263947	1.00023766	0.00023766	5.6482E-08	0.00203024
9.03298533	1.00014569	0.00014569	2.1225E-08	0.00131599
9.52333118	1.00008915	8.9151E-05	7.9479E-09	0.00084902
10.0233312	1.00005407	5.4071E-05	2.9237E-09	0.00054197
10.5233312	1.0000328	3.2802E-05	1.076E-09	0.00034519
11.0233312	1.0000199	1.9897E-05	3.9587E-10	0.00021933
11.5233312	1.00001207	1.2071E-05	1.457E-10	0.0001391
12.0233312	1.00000733	7.3317E-06	5.3754E-11	8.8152E-05
12.5233312	1.00000446	4.4585E-06	1.9878E-11	5.5835E-05
13.0233312	1.00000271	2.7119E-06	7.3542E-12	3.5317E-05
13.5233312	1.00000165	1.6489E-06	2.7189E-12	2.2299E-05
14.0233312	1.000001	1.0027E-06	1.0055E-12	1.4062E-05
14.5233312	1.00000061	6.1036E-07	3.7253E-13	8.8644E-06
15.0233312	1.00000037	3.6894E-07	1.3612E-13	5.5427E-06
15.5233312	1.00000022	2.2161E-07	4.9111E-14	3.4401E-06
16.0233312	1.00000013	1.3238E-07	1.7525E-14	2.1212E-06
16.5233312	1.00000008	7.873E-08	6.1984E-15	1.3009E-06
17.0233312	1.00000005	4.6657E-08	2.1768E-15	7.9425E-07
17.5233312	1.00000003	2.7582E-08	7.6079E-16	4.8333E-07
18.0233312	1.00000002	1.6284E-08	2.6515E-16	2.9348E-07
18.5233312	1.00000001	9.6069E-09	9.2293E-17	1.7795E-07
19.0233312	1.00000001	5.6662E-09	3.2105E-17	1.0779E-07
19.5233312	1	3.341E-09	1.1162E-17	6.5228E-08
20.0233312	1	1.9693E-09	3.8782E-18	3.9432E-08
20.5233312	1	1.1603E-09	1.3464E-18	2.3814E-08
21.0233312	1	6.879E-10	4.7321E-19	1.4462E-08
21.5233312	1	4.1189E-10	1.6965E-19	8.8652E-09
22.0233312	1	2.4853E-10	6.1767E-20	5.4735E-09
22.5233312	1	1.5039E-10	2.2617E-20	3.3873E-09
23.0233312	1	9.099E-11	8.2792E-21	2.0949E-09

23.5233312	1	5.503E-11	3.0283E-21	1.2945E-09
24.0233312	1	3.333E-11	1.1109E-21	8.007E-10
24.5233312	1	2.025E-11	4.1006E-22	4.966E-10
25	1	1.261E-11	1.5901E-22	3.1525E-10
TOTAL		64.5048638	57.9760705	4.07490706



ANEXO 15: Tabla de índice de desempeño para algoritmo PSO

Setpoint	1
----------	---

PSO				
T(s)	Vel RPM	IAE	ISE	ITAE
0	0	1	1	0
3.16E-30	0	1	1	3.1554E-30
2.80E-06	1.08E-04	0.99989205	0.99978411	2.7999E-06
5.60E-06	2.16E-04	0.99978414	0.99956833	5.5992E-06
8.40E-06	3.24E-04	0.99967627	0.99935264	8.3978E-06
2.30E-05	8.85E-04	0.99911512	0.99823101	2.2963E-05
3.76E-05	1.44E-03	0.99855502	0.99711213	3.7511E-05
5.21E-05	0.002004	0.997996	0.99599601	5.2044E-05
6.67E-05	0.00256195	0.99743805	0.99488267	6.656E-05
0.00010002	0.00383167	0.99616833	0.99235135	9.9638E-05
0.00013331	0.00509581	0.99490419	0.98983434	0.00013263
0.0001666	0.00635441	0.99364559	0.98733156	0.00016554
0.00019989	0.00760748	0.99239252	0.98484291	0.00019837
0.00023318	0.00885507	0.99114493	0.98236828	0.00023112
0.00031893	0.0120433	0.9879567	0.97605843	0.00031509
0.00040467	0.01519567	0.98480433	0.96983956	0.00039853
0.00049042	0.01831259	0.98168741	0.96371018	0.00048144
0.00057617	0.02139446	0.97860554	0.9576688	0.00056384
0.00066191	0.02444171	0.97555829	0.95171399	0.00064573
0.00074766	0.02745472	0.97254528	0.94584431	0.00072713
0.00089406	0.03252125	0.96747875	0.93601512	0.00086498
0.00104046	0.03749112	0.96250888	0.92642335	0.00100146
0.00118687	0.04236623	0.95763377	0.91706245	0.00113659
0.00133327	0.04714846	0.95285154	0.90792606	0.00127041
0.00147968	0.05183966	0.94816034	0.89900802	0.00140297
0.00162608	0.05644164	0.94355836	0.89030239	0.0015343
0.00186934	0.06389556	0.93610444	0.87629152	0.0017499
0.0021126	0.0711159	0.9288841	0.86282566	0.00196236
0.00235586	0.0781103	0.9218897	0.84988062	0.00217184
0.00259912	0.08488614	0.91511386	0.83743338	0.00237849
0.00284238	0.09145056	0.90854944	0.82546208	0.00258244
0.00308564	0.09781049	0.90218951	0.81394591	0.00278383
0.00406228	0.12141776	0.87858224	0.77190676	0.00356905
0.00437706	0.12841325	0.87158675	0.75966347	0.00381499
0.00469183	0.13513107	0.86486893	0.74799827	0.00405782
0.00500661	0.14158294	0.85841706	0.73687986	0.00429776
0.00532139	0.14778005	0.85221995	0.72627885	0.00453499
0.00563616	0.15373311	0.84626689	0.71616765	0.0047697
0.00595094	0.1594524	0.8405476	0.70652027	0.00500205

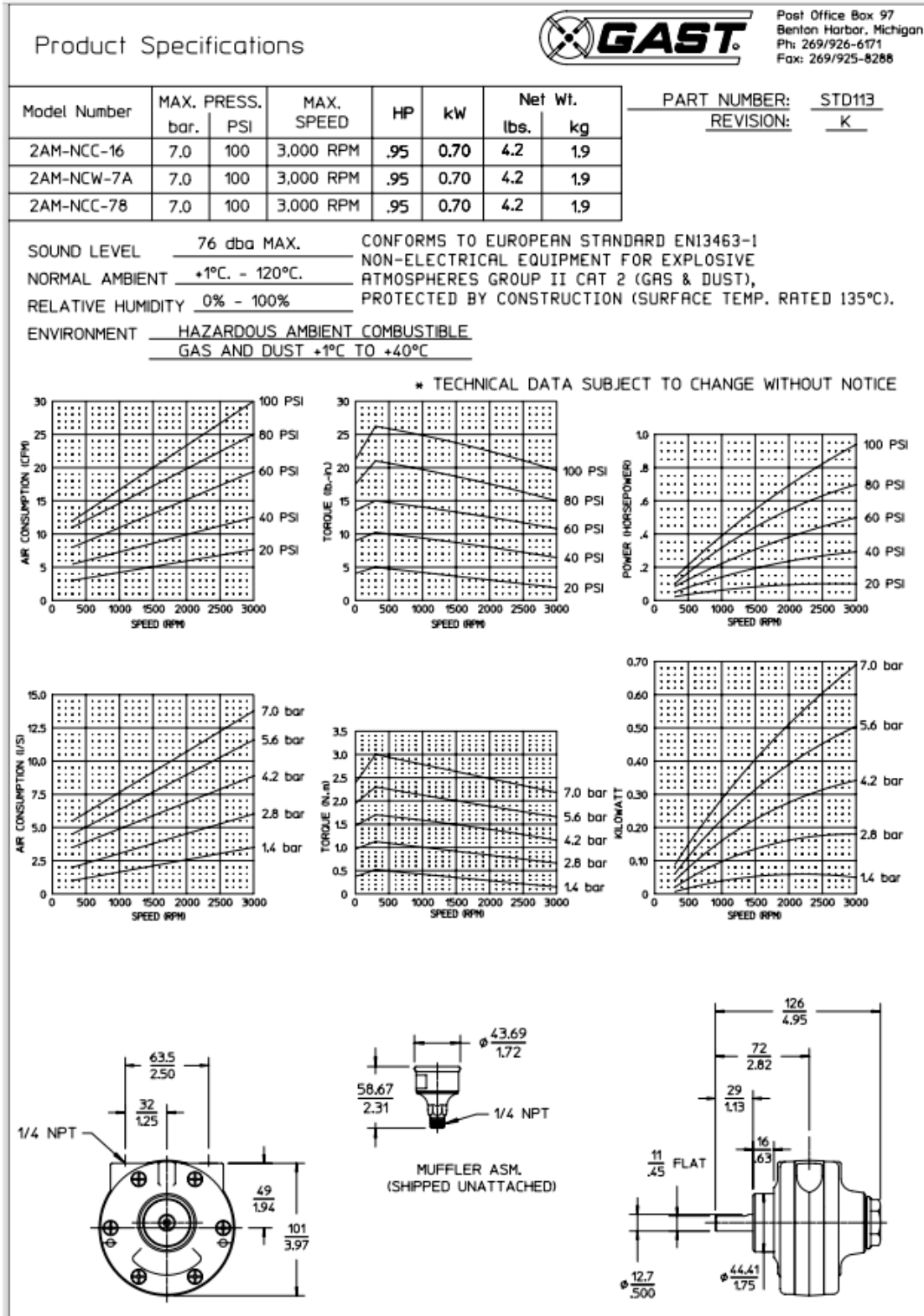
0.00661535	0.17080062	0.82919938	0.6875716	0.00548544
0.00727976	0.1812373	0.8187627	0.67037235	0.0059604
0.00794417	0.19084149	0.80915851	0.65473749	0.00642809
0.00860858	0.19968537	0.80031463	0.6405035	0.00688957
0.00927299	0.2078349	0.7921651	0.62752555	0.00734574
0.0099374	0.2153503	0.7846497	0.61567516	0.00779738
0.01200479	0.23522027	0.76477973	0.58488803	0.00918102
0.01407219	0.25083122	0.74916878	0.56125386	0.01054244
0.01613958	0.26325437	0.73674563	0.54279413	0.01189077
0.01820698	0.27327484	0.72672516	0.52812945	0.01323147
0.02027437	0.28147464	0.71852536	0.51627869	0.01456765
0.02346352	0.29149713	0.70850287	0.50197632	0.01662397
0.02665267	0.29938318	0.70061682	0.49086393	0.01867331
0.02984181	0.30589913	0.69410087	0.48177601	0.02071323
0.03303096	0.31151439	0.68848561	0.47401244	0.02274134
0.03622011	0.31652811	0.68347189	0.46713383	0.02475543
0.04145559	0.32391867	0.67608133	0.45708596	0.02802735
0.04669107	0.33075739	0.66924261	0.44788567	0.03124765
0.05192655	0.33731197	0.66268803	0.43915542	0.0344111
0.05716203	0.34368843	0.65631157	0.43074488	0.0375161
0.06239751	0.34993692	0.65006308	0.42258201	0.04056232
0.07204466	0.36120865	0.63879135	0.40805438	0.04602151
0.08169182	0.37225934	0.62774066	0.39405834	0.05128127
0.09133897	0.38311812	0.61688188	0.38054325	0.05634536
0.10098613	0.39378469	0.60621531	0.367497	0.06121934
0.11063328	0.40426102	0.59573898	0.35490494	0.06590856
0.14893742	0.44411523	0.55588477	0.30900788	0.08279205
0.18724156	0.48128793	0.51871207	0.26906221	0.09712446
0.2255457	0.51595472	0.48404528	0.23429984	0.10917433
0.26384984	0.54828365	0.45171635	0.20404767	0.11918529
0.34676406	0.61095727	0.38904273	0.15135425	0.13490604
0.42967827	0.66483247	0.33516753	0.11233727	0.1440142
0.51259249	0.71116823	0.28883177	0.08342379	0.148053
0.5955067	0.75102461	0.24897539	0.06198875	0.14826652
0.67842092	0.78530333	0.21469667	0.04609466	0.14565471
0.79096866	0.82425572	0.17574428	0.03088605	0.13900822
0.9035164	0.856003	0.143997	0.02073513	0.13010365
1.01606414	0.88188966	0.11811034	0.01395005	0.12000768
1.12861188	0.90299396	0.09700604	0.00941017	0.10948216
1.24115962	0.92019251	0.07980749	0.00636923	0.09905383
1.41160657	0.94031538	0.05968462	0.00356225	0.0842512
1.58205353	0.9550988	0.0449012	0.00201612	0.07103611
1.75250048	0.96598992	0.03401008	0.00115669	0.05960268
1.92294743	0.97400294	0.02599706	0.00067585	0.04999098
2.09339439	0.9798784	0.0201216	0.00040488	0.04212244
2.34185938	0.98569326	0.01430674	0.00020468	0.03350436

2.59032437	0.98939386	0.01060614	0.00011249	0.02747334
2.83878937	0.99178494	0.00821506	6.7487E-05	0.02332084
3.08725436	0.99333821	0.00666179	4.4379E-05	0.02056664
3.33571936	0.99434362	0.00565638	3.1995E-05	0.01886809
3.64848935	0.99511242	0.00488758	2.3888E-05	0.01783228
3.96125934	0.99556601	0.00443399	1.966E-05	0.0175642
4.27402933	0.99584601	0.00415399	1.7256E-05	0.01775428
4.58679933	0.99602538	0.00397462	1.5798E-05	0.01823078
4.89956932	0.99614451	0.00385549	1.4865E-05	0.01889025
5.33397584	0.99625299	0.00374701	1.404E-05	0.01998645
5.76838236	0.99633215	0.00366785	1.3453E-05	0.02115754
6.20278887	0.99639889	0.00360111	1.2968E-05	0.0223369
6.63719539	0.99645865	0.00354135	1.2541E-05	0.02350465
7.07160191	0.99651387	0.00348613	1.2153E-05	0.02465251
7.56194776	0.99657314	0.00342686	1.1743E-05	0.02591371
8.05229362	0.99663082	0.00336918	1.1351E-05	0.02712961
8.54263947	0.9966875	0.0033125	1.0973E-05	0.02829748
9.03298533	0.9967432	0.0032568	1.0607E-05	0.02941859
9.52333118	0.99679789	0.00320211	1.0254E-05	0.03049476
10.0233312	0.99685265	0.00314735	9.9058E-06	0.03154694
10.5233312	0.99690646	0.00309354	9.57E-06	0.0325543
11.0233312	0.99695938	0.00304062	9.2454E-06	0.03351781
11.5233312	0.99701139	0.00298861	8.9318E-06	0.03443871
12.0233312	0.99706252	0.00293748	8.6288E-06	0.03531835
12.5233312	0.99711276	0.00288724	8.3362E-06	0.03615791
13.0233312	0.99716214	0.00283786	8.0535E-06	0.03695844
13.5233312	0.99721068	0.00278932	7.7803E-06	0.03772096
14.0233312	0.99725839	0.00274161	7.5164E-06	0.03844654
14.5233312	0.99730528	0.00269472	7.2615E-06	0.03913627
15.0233312	0.99735138	0.00264862	7.0152E-06	0.03979116
15.5233312	0.99739668	0.00260332	6.7773E-06	0.04041221
16.0233312	0.99744121	0.00255879	6.5474E-06	0.04100037
16.5233312	0.99748498	0.00251502	6.3253E-06	0.04155657
17.0233312	0.997528	0.002472	6.1108E-06	0.04208174
17.5233312	0.99757028	0.00242972	5.9035E-06	0.04257677
18.0233312	0.99761184	0.00238816	5.7033E-06	0.04304255
18.5233312	0.99765269	0.00234731	5.5099E-06	0.04347995
19.0233312	0.99769284	0.00230716	5.323E-06	0.04388978
19.5233312	0.99773231	0.00226769	5.1424E-06	0.04427287
20.0233312	0.9977711	0.0022289	4.968E-06	0.04463002
20.5233312	0.99780923	0.00219077	4.7995E-06	0.04496199
21.0233312	0.9978467	0.0021533	4.6367E-06	0.04526954
21.5233312	0.99788353	0.00211647	4.4794E-06	0.04555342
22.0233312	0.99791974	0.00208026	4.3275E-06	0.04581436
22.5233312	0.99795532	0.00204468	4.1807E-06	0.04605307
23.0233312	0.99799029	0.00200971	4.0389E-06	0.04627021

23.5233312	0.99802467	0.00197533	3.9019E-06	0.04646645
24.0233312	0.99805845	0.00194155	3.7696E-06	0.04664243
24.5233312	0.99809166	0.00190834	3.6418E-06	0.0467988
25	0.99812279	0.00187721	3.5239E-06	0.04693018
TOTAL		59.968447	50.1041337	4.49442612



ANEXO 16: Datasheet del motor neumático



ANEXO 17: Datasheet del Encoder Rotativo

Incremental 40-mm-día. Rotary Encoder

E6B2-C

CSM_E6B2-C_DS_E_6_1

**General-purpose Encoder with
External Diameter of 40 mm**

- Incremental model
- External diameter of 40 mm.
- Resolution of up to 2,000 ppr.



Be sure to read *Safety Precautions* on page 4.

For the most recent information on models that have been certified for safety standards, refer to your OMRON website.

Ordering Information

Encoders [Refer to *Dimensions* on page 4.]

Power supply voltage	Output configuration	Resolution (pulses/rotation)	Model
5 to 24 VDC	NPN open-collector output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	E6B2-CWZ6C (resolution) 0.5M Example: E6B2-CWZ6C 10P/R 0.5M
		720, 800, 1,000, 1,024 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	
12 to 24 VDC	PNP open-collector output	100, 200, 360, 500, 600	E6B2-CWZ5B (resolution) 0.5M Example: E6B2-CWZ5B 100P/R 0.5M
		1,000 2,000	
5 to 12 VDC	Voltage output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	E6B2-CWZ3E (resolution) 0.5M Example: E6B2-CWZ3E 10P/R 0.5M
		1,000 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	
5 VDC	Line-driver output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600	E6B2-CWZ1X (resolution) 0.5M Example: E6B2-CWZ1X 10P/R 0.5M
		1,000, 1,024 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	

Accessories (Order Separately) [Refer to *Dimensions* on *Rotary Encoder Accessories*.]

Name	Model	Remarks
Couplings	E69-C06B	Provided with the product.
	E69-C68B	Different end diameter
	E69-C610B	Different end diameter
	E69-C06M	Metal construction
Flanges	E69-FBA	---
	E69-FBA02	E69-2 Servo Mounting Bracket provided.
Servo Mounting Bracket	E69-2	---

Note: 1. Refer to *Rotary Encoders Accessories* on your OMRON website for details.
2. Refer to *Precautions For Correct Use of Rotary Encoders* on your OMRON website when using the Rotary Encoders together with a Coupling.

E6B2-C

Ratings and Specifications

Item	Model	E6B2-CWZ6C	E6B2-CWZ5B	E6B2-CWZ3E	E6B2-CWZ1X
Power supply voltage		5 VDC -5% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	12 VDC -10% to 24 VDC +15%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC -5% to 12 VDC +10%, ripple (p-p): 5% max.	5 VDC ±5%, ripple (p-p): 5% max.
Current consumption *1		80 mA max.	100 mA max.		160 mA max.
Resolution (pulses/rotation)		10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 720, 800, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	100, 200, 360, 500, 600, 1,000, 2,000	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 1,000, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 1,000, 1,024, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000
Output phases		Phases A, B, and Z			Phases A, Ā, B, B̄, Z, and Z̄
Phase difference between outputs		90°±45° between A and B (1/4 T ± 1/8 T)			
Output configuration		NPN open-collector output	PNP open-collector output	Voltage output (NPN output)	Line driver output *2
Output capacity		Applied voltage: 30 VDC max. Sink current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 35 mA)	Applied voltage: 30 VDC max. Source current: 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at source current of 35 mA)	Output resistance: 2 kΩ Sink current: 20 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (at sink current of 20 mA)	AM26LS31 equivalent Output current High level: I _o = -20 mA Low level: I _s = 20 mA Output voltage: V _o = 2.5 V min. V _s = 0.5 V max.
Maximum response frequency *3		100 kHz	50 kHz	100 kHz	
Rise and fall times of output		1 μs max. (Control output voltage: 5 V, Load resistance: 1 kΩ, Cable length: 2 m max.)	1 μs max. (Cable length: 2 m max., Sink current: 10 mA)		0.1 μs max. (Cable length: 2 m max., I _o = -20 mA, I _s = 20 mA)
Starting torque		0.98 mN·m max.			
Moment of inertia		1×10 ⁻⁶ kg·m ² max.; 3 × 10 ⁻⁷ kg·m ² max. at 600 P/R max.			
Shaft loading	Radial	30 N			
	Thrust	20 N			
Maximum permissible speed		6,000 r/min			
Protection circuits		Power supply reverse polarity protection, Load short-circuit protection			---
Ambient temperature range		Operating: -10 to 70°C (with no icing), Storage: -25 to 85°C (with no icing)			
Ambient humidity range		Operating/Storage: 35% to 85% (with no condensation)			
Insulation resistance		20 MΩ min. (at 500 VDC) between current-carrying parts and case			
Dielectric strength		500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between current-carrying parts and case			
Vibration resistance		Destruction: 10 to 500 Hz, 150 m/s ² or 2-mm double amplitude for 11 min 3 times each in X, Y, and Z directions			
Shock resistance		Destruction: 1,000m/s ² 3 times each in X, Y, and Z directions			
Degree of protection		IEC 60529 IP50			
Connection method		Pre-wired Models (Standard cable length: 500 mm)			
Materials		Case: ABS, Main unit: Aluminum, Shaft: SUS420J2			
Weight (packed state)		Approx. 100 g			
Accessories		Coupling, Hexagonal wrench, Instruction manual			

*1. An inrush current of approximately 9 A will flow for approximately 0.3 ms when the power is turned ON.

*2. The line driver output is a data transmission circuit compatible with RS-422A and long-distance transmission is possible with a twisted-pair cable. The quality is equivalent to AM26LS31.

*3. The maximum electrical response speed is determined by the resolution and maximum response frequency as follows:

$$\text{Maximum electrical response speed (rpm)} = \frac{\text{Maximum response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60$$

This means that the E6B2-C Rotary Encoder will not operate electrically if its speed exceeds the maximum electrical response speed.

E6B2-C

I/O Circuit Diagrams

Model/Output Circuits	Output mode	Connection																		
<p>E6B2-CWZ6C</p> <p>E6B2-CWZ5B</p>	<p>E6B2-CWZ6C NPN Open-collector Output Model E6B2-CWZ5B PNP Open-collector Output Model</p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ faster than phase B. Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ slower than phase B.</p> <p>(The ONs in the above timing chart mean that the output transistor is ON and the OFFs mean that the output transistor is OFF.)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	White	Output phase B	Orange	Output phase Z	Blue	0 V (common)						
Color	Terminal																			
Brown	Power supply (+Vcc)																			
Black	Output phase A																			
White	Output phase B																			
Orange	Output phase Z																			
Blue	0 V (common)																			
<p>E6B2-CWZ3E</p>	<p>E6B2-CWZ3E Voltage Output Model</p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ faster than phase B. Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ slower than phase B.</p> <p>(“H” and “L” in the diagrams are the output voltage levels of phases A, B, and Z.)</p>																			
<p>E6B2-CWZ1X</p>	<p>E6B2-CWZ1X Line Driver Output Model</p> <p>Direction of rotation: CW (as viewed from end of shaft) Direction of rotation: CCW (as viewed from end of shaft)</p> <p>Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ faster than phase B. Note: Phase A is $1/4 T \pm 1/8 T$ slower than phase B.</p> <p>(“H” and “L” in the diagrams are the output voltage levels of phases A, B, and Z.)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Color</th> <th>Terminal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brown</td> <td>Power supply (+Vcc)</td> </tr> <tr> <td>Black</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>Black/red stripes</td> <td>Output phase A</td> </tr> <tr> <td>White</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>White/red stripes</td> <td>Output phase B</td> </tr> <tr> <td>Orange</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Orange/red stripes</td> <td>Output phase Z</td> </tr> <tr> <td>Blue</td> <td>0 V (common)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Note: Receiver: AM26LS32 equivalent</p>	Color	Terminal	Brown	Power supply (+Vcc)	Black	Output phase A	Black/red stripes	Output phase A	White	Output phase B	White/red stripes	Output phase B	Orange	Output phase Z	Orange/red stripes	Output phase Z	Blue	0 V (common)
Color	Terminal																			
Brown	Power supply (+Vcc)																			
Black	Output phase A																			
Black/red stripes	Output phase A																			
White	Output phase B																			
White/red stripes	Output phase B																			
Orange	Output phase Z																			
Orange/red stripes	Output phase Z																			
Blue	0 V (common)																			

Note: 1. The shielded cable outer core (shield) is not connected to the inner area or to the case.
 2. The phase A, phase B, and phase Z circuits are all identical.
 3. Normally, connect GND to 0 V or to an external ground.

E6B2-C

Safety Precautions

Be sure to read the precautions for all models in the website at: <http://www.ia.omron.com/>.

⚠ WARNING

This product is not designed or rated for ensuring safety of persons either directly or indirectly. Do not use it for such purposes.

Precautions for Safe Use

Incorrect wiring may damage internal circuits.

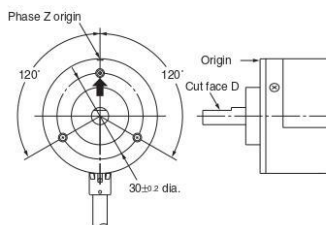
Precautions for Correct Use

Do not use the Encoder under ambient conditions that exceed the ratings.

● Mounting

• Origin Indication

It is easy to adjust the position of phase Z with the origin indication function. The following illustration shows the relationship between phase Z and the origin. Set cut face D to the phase Z origin as shown in the illustration.



- Do not extend the length of the cable to more than 2 m. If the cable must be more than 2 m, use a Model with a Line-driver Output (max. length: 100 m).

● Wiring

Spurious pulses may be generated when power is turned ON and OFF. Wait at least 0.1 s after turning ON the power to the Encoder before using the connected device, and stop using the connected device at least 0.1 s before turning OFF the power to the Encoder. Also, turn ON the power to the load only after turning ON the power to the Encoder.

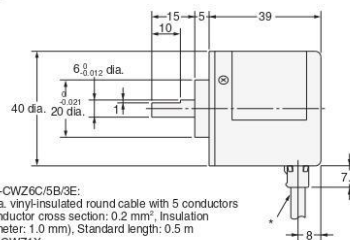
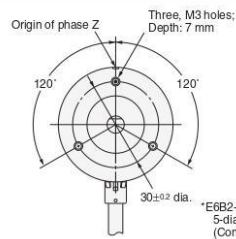
(Unit: mm)

Dimensions

Tolerance class IT16 applies to dimensions in this datasheet unless otherwise specified.

Encoder

E6B2-C



*E6B2-CW26C/5B/3E:
5-dia. vinyl-insulated round cable with 5 conductors
(Conductor cross section: 0.2 mm², insulation diameter: 1.0 mm), Standard length: 0.5 m
E6B2-CW1X:
5-dia. vinyl-insulated round cable with 8 conductors
(Conductor cross section: 0.2 mm², insulation diameter: 1.0 mm), Standard length: 0.5 m

Accessories (Order Separately)

Couplings

E69-C06B
E69-C68B
E69-C610B
E69-C06M

Flanges

E69-FBA
E69-FBA02

Servo Mounting Bracket

E69-2

Refer to *Rotary Encoders Accessories* on your OMRON website for details.

Terms and Conditions Agreement

Read and understand this catalog.

Please read and understand this catalog before purchasing the products. Please consult your OMRON representative if you have any questions or comments.

Warranties.

(a) Exclusive Warranty. Omron's exclusive warranty is that the Products will be free from defects in materials and workmanship for a period of twelve months from the date of sale by Omron (or such other period expressed in writing by Omron). Omron disclaims all other warranties, express or implied.

(b) Limitations. OMRON MAKES NO WARRANTY OR REPRESENTATION, EXPRESS OR IMPLIED, ABOUT NON-INFRINGEMENT, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OF THE PRODUCTS. BUYER ACKNOWLEDGES THAT IT ALONE HAS DETERMINED THAT THE PRODUCTS WILL SUITABLY MEET THE REQUIREMENTS OF THEIR INTENDED USE.

Omron further disclaims all warranties and responsibility of any type for claims or expenses based on infringement by the Products or otherwise of any intellectual property right. (c) Buyer Remedy. Omron's sole obligation hereunder shall be, at Omron's election, to (i) replace (in the form originally shipped with Buyer responsible for labor charges for removal or replacement thereof) the non-complying Product, (ii) repair the non-complying Product, or (iii) repay or credit Buyer an amount equal to the purchase price of the non-complying Product; provided that in no event shall Omron be responsible for warranty, repair, indemnity or any other claims or expenses regarding the Products unless Omron's analysis confirms that the Products were properly handled, stored, installed and maintained and not subject to contamination, abuse, misuse or inappropriate modification. Return of any Products by Buyer must be approved in writing by Omron before shipment. Omron Companies shall not be liable for the suitability or unsuitability or the results from the use of Products in combination with any electrical or electronic components, circuits, system assemblies or any other materials or substances or environments. Any advice, recommendations or information given orally or in writing, are not to be construed as an amendment or addition to the above warranty.

See <http://www.omron.com/global/> or contact your Omron representative for published information.

Limitation on Liability: Etc.

OMRON COMPANIES SHALL NOT BE LIABLE FOR SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES, LOSS OF PROFITS OR PRODUCTION OR COMMERCIAL LOSS IN ANY WAY CONNECTED WITH THE PRODUCTS, WHETHER SUCH CLAIM IS BASED IN CONTRACT, WARRANTY, NEGLIGENCE OR STRICT LIABILITY.

Further, in no event shall liability of Omron Companies exceed the individual price of the Product on which liability is asserted.

Suitability of Use.

Omron Companies shall not be responsible for conformity with any standards, codes or regulations which apply to the combination of the Product in the Buyer's application or use of the Product. At Buyer's request, Omron will provide applicable third party certification documents identifying ratings and limitations of use which apply to the Product. This information by itself is not sufficient for a complete determination of the suitability of the Product in combination with the end product, machine, system, or other application or use. Buyer shall be solely responsible for determining appropriateness of the particular Product with respect to Buyer's application, product or system. Buyer shall take application responsibility in all cases.

NEVER USE THE PRODUCT FOR AN APPLICATION INVOLVING SERIOUS RISK TO LIFE OR PROPERTY OR IN LARGE QUANTITIES WITHOUT ENSURING THAT THE SYSTEM AS A WHOLE HAS BEEN DESIGNED TO ADDRESS THE RISKS, AND THAT THE OMRON PRODUCT(S) IS PROPERLY RATED AND INSTALLED FOR THE INTENDED USE WITHIN THE OVERALL EQUIPMENT OR SYSTEM.

Programmable Products.

Omron Companies shall not be responsible for the user's programming of a programmable Product, or any consequence thereof.

Performance Data.

Data presented in Omron Company websites, catalogs and other materials is provided as a guide for the user in determining suitability and does not constitute a warranty. It may represent the result of Omron's test conditions, and the user must correlate it to actual application requirements. Actual performance is subject to the Omron's Warranty and Limitations of Liability.

Change in Specifications.

Product specifications and accessories may be changed at any time based on improvements and other reasons. It is our practice to change part numbers when published ratings or features are changed, or when significant construction changes are made. However, some specifications of the Product may be changed without any notice. When in doubt, special part numbers may be assigned to fix or establish key specifications for your application. Please consult with your Omron's representative at any time to confirm actual specifications of purchased Product.

Errors and Omissions.

Information presented by Omron Companies has been checked and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for clerical, typographical or proofreading errors or omissions.

2017.7

In the interest of product improvement, specifications are subject to change without notice.

OMRON Corporation
Industrial Automation Company

<http://www.ia.omron.com/>

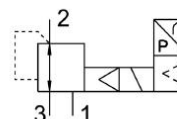
(c)Copyright OMRON Corporation 2017 All Right Reserved.

ANEXO 18: Datasheet de la válvula reguladora proporcional

**Regulador de presión proporcional
VPPM-6L-L-1-G18-0L6H-V1P**

Número de artículo: 554043

FESTO



Hoja de datos

Característica	Valor
Diámetro nominal alimentación de aire	6 mm
Diámetro nominal purga de aire	4.5 mm
Abreviatura de tipo	VPPM
Tipo de accionamiento	Eléctrico
Principio de sellado	Blando
Posición de montaje	Cualquiera
Forma constructiva	Regulador de diafragma servopilotado
Resistencia a cortocircuitos	Para todas las conexiones eléctricas
Indicación de seguridad	Posición de seguridad VPPM: en caso de una ruptura del cable de alimentación se mantiene la presión de salida sin regulación.
Símbolo	00995303
Protección contra inversión de polaridad	Para todas las conexiones eléctricas
Tipo de reposición	Muelle mecánico
Tipo de control	Servopilotado
Función de la válvula	Regulador de presión proporcional de 3 vías
Tipo de indicación	LED
Margen de regulación de presión	0.06 bar ... 6 bar
Presión de entrada 1	0 bar ... 8 bar
Histéresis máxima de la presión	0.03 bar
Caudal nominal normal	900 l/min
Margen de tensiones de servicio DC	21.6 V ... 26.4 V
Consumo de corriente máx.	300 mA
Tiempo de conexión	100%
Consumo máximo de potencia eléctrica	7 W
Ondulación residual	10 %
Salida	PNP
Margen de señal de la salida analógica	0-10 V
Margen de señal de la entrada analógica	0-10 V
Medio de funcionamiento	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4] Gases inertes
Nota sobre el medio de trabajo/mando	Funcionamiento con lubricación imposible
Certificación	RCM c UL us - Listed (OL)
Símbolo KC	KC-CEM
Marcado CE (véase la declaración de conformidad)	Según Directiva de máquinas CEM de la UE
Clase de resistencia a la corrosión CRC	2 - riesgo de corrosión moderado

Característica	Valor
Temperatura del medio	10 °C ... 50 °C
Grado de protección	IP65
Temperatura ambiente	0 °C ... 60 °C
Peso del producto	400 g
Error de linealidad FS	2 %
Coefficiente de temperatura	0.04 %/K
Precisión de repetición FS	0.5 %
Conexión eléctrica	8 pines M12 Conector
Tipo de fijación	A elegir: Con taladro pasante Con accesorios
Conexión neumática 1	G1/8
Conexión neumática 2	G1/8
Conexión neumática 3	G1/8
Nota sobre el material	Conformidad con la Directiva RoHS
Material del cuerpo	Aleación de aluminio forjado Anodizado

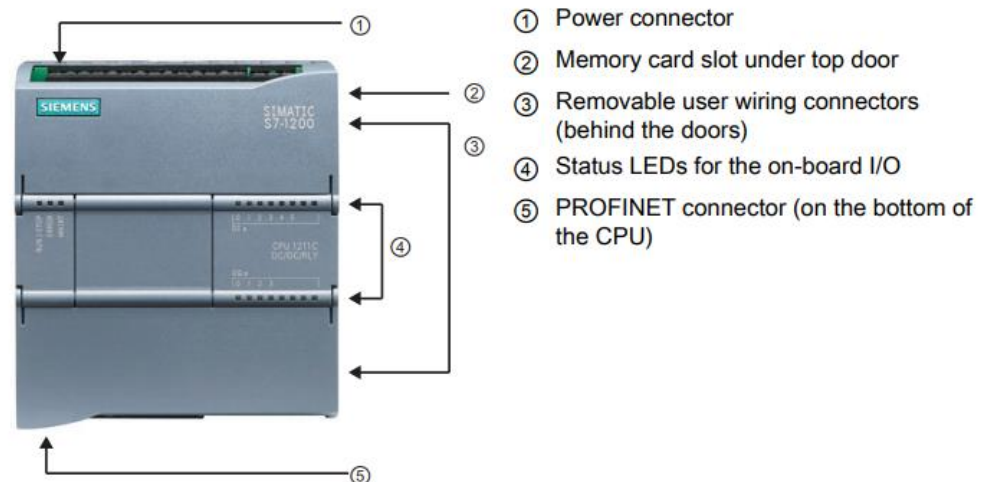
ANEXO 19: Datasheet del PLC Siemens S7 - 1200

1.1 Introducing the S7-1200 PLC

The S7-1200 controller provides the flexibility and power to control a wide variety of devices in support of your automation needs. The compact design, flexible configuration, and powerful instruction set combine to make the S7-1200 a perfect solution for controlling a wide variety of applications.

The CPU combines a microprocessor, an integrated power supply, input and output circuits, built-in PROFINET, high-speed motion control I/O, and on-board analog inputs in a compact housing to create a powerful controller. After you download your program, the CPU contains the logic required to monitor and control the devices in your application. The CPU monitors the inputs and changes the outputs according to the logic of your user program, which can include Boolean logic, counting, timing, complex math operations, and communications with other intelligent devices.

The CPU provides a PROFINET port for communication over a PROFINET network. Additional modules are available for communicating over PROFIBUS, GPRS, RS485 or RS232 networks.



Several security features help protect access to both the CPU and the control program:

- Every CPU provides password protection (Page 164) that allows you to configure access to the CPU functions.
- You can use "know-how protection" (Page 165) to hide the code within a specific block.
- You can use copy protection (Page 166) to bind your program to a specific memory card or CPU.

Table 1- 1 Comparing the CPU models

Feature		CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C	CPU 1215C
Physical size (mm)		90 x 100 x 75	90 x 100 x 75	110 x 100 x 75	130 x 100 x 75
User memory	Work	30 Kbytes	50 Kbytes	75 Kbytes	100 Kbytes
	Load	1 Mbyte	1 Mbyte	4 Mbytes	4 Mbytes
	Retentive	10 Kbytes	10 Kbytes	10 Kbytes	10 Kbytes
Local on-board I/O	Digital	6 inputs/4 outputs	8 inputs/6 outputs	14 inputs/10 outputs	14 inputs/10 outputs
	Analog	2 inputs	2 inputs	2 inputs	2 inputs / 2 outputs
Process image size	Inputs (I)	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes
	Outputs (Q)	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes	1024 bytes
Bit memory (M)		4096 bytes	4096 bytes	8192 bytes	8192 bytes
Signal module (SM) expansion		None	2	8	8
Signal board (SB), Battery board (BB), or communication board (CB)		1	1	1	1
Communication module (CM) (left-side expansion)		3	3	3	3
High-speed counters	Total	3 built-in I/O, 5 with SB	4 built-in I/O, 6 with SB	6	6
	Single phase	3 at 100 kHz SB: 2 at 30 kHz	3 at 100 kHz 1 at 30 kHz SB: 2 at 30 kHz	3 at 100 kHz 3 at 30 kHz	3 at 100 kHz 3 at 30 kHz
		Quadrature phase	3 at 80 kHz SB: 2 at 20 kHz	3 at 80 kHz 1 at 20 kHz SB: 2 at 20 kHz	3 at 80 kHz 3 at 20 kHz
Pulse outputs ¹		4	4	4	4
Memory card		SIMATIC Memory card (optional)			
Real time clock retention time		20 days, typ. / 12 day min. at 40 degrees C (maintenance-free Super Capacitor)			
PROFINET		1 Ethernet communication port		2 Ethernet communication ports	
Real math execution speed		2.3 µs/instruction			
Boolean execution speed		0.08 µs/instruction			

¹ For CPU models with relay outputs, you must install a digital signal board (SB) to use the pulse outputs.

Each CPU provides dedicated HMI connections to support up to 3 HMI devices. The total number of HMI is affected by the types of HMI panels in your configuration. For example, you could have up to three SIMATIC Basic panels connected to your CPU, or you could have up to two SIMATIC Comfort panels with one additional Basic panel.

Table 1- 2 Blocks, timers and counters supported by S7-1200

Element	Description	
Blocks	Type	OB, FB, FC, DB
	Size	30 Kbytes (CPU 1211C)
		50 Kbytes (CPU 1212C)
		64 Kbytes (CPU 1214C and CPU 1215C)
	Quantity	Up to 1024 blocks total (OBs + FBs + FCs + DBs)
	Address range for FBs, FCs, and DBs	1 to 65535 (such as FB 1 to FB 65535)
	Nesting depth	16 from the program cycle or start up OB; 4 from the time delay interrupt, time-of-day interrupt, cyclic interrupt, hardware interrupt, time error interrupt, or diagnostic error interrupt OB
Monitoring	Status of 2 code blocks can be monitored simultaneously	
OBs	Program cycle	Multiple: OB 1, OB 200 to OB 65535
	Startup	Multiple: OB 100, OB 200 to OB 65535
	Time-delay interrupts and cyclic interrupts	4 ¹ (1 per event): OB 200 to OB 65535
	Hardware interrupts (edges and HSC)	50 (1 per event): OB 200 to OB 65535
	Time error interrupts	1: OB 80
	Diagnostic error interrupts	1: OB 82
Timers	Type	IEC
	Quantity	Limited only by memory size
	Storage	Structure in DB, 16 bytes per timer
Counters	Type	IEC
	Quantity	Limited only by memory size
	Storage	Structure in DB, size dependent upon count type <ul style="list-style-type: none"> • SInt, USInt: 3 bytes • Int, UInt: 6 bytes • DInt, UDInt: 12 bytes

¹ Time-delay and cyclic interrupts use the same resources in the CPU. You can have only a total of 4 of these interrupts (time-delay plus cyclic interrupts). You cannot have 4 time-delay interrupts and 4 cyclic interrupts.

