

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA
PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN
CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).**

**OSCAR ANDRES TARAZONA VILLAMIZAR
JEISSON MAURICIO QUINTERO CARVALLIDO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2012

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA
PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN
CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).**

OSCAR ANDRES TARAZONA VILLAMIZAR

JEISSON MAURICIO QUINTERO CARVALLIDO

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero mecánico**

Director

JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ

M.Sc.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2012**

DEDICATORIAS

“A Dios por obsequiarme el hermoso regalo de la vida y la ubicación de está, en mi familia”

“A mi padre Alfonso Quintero y mi madre Rosario Carvallido por su amor y apoyo incondicional en la consecución de mis metas”

“A mi hermano Sergio por su apoyo y estar siempre conmigo”

“A mis amigos que me brindaron su respaldo y buenos consejos en momentos que más los necesitaba”

Jeisson M. Quintero Carvallido

“A maría, mi madre, por su cariño y apoyo incondicional en el logro de mis metas”

“A Germán, mi padre, que aunque no está con nosotros sus concejos y valores inculcados me han servido para el cumplimiento de mis metas.”

“A Germán, mi hermano por su respaldo incondicional.

“A mis amigos y compañeros de estudio por su ánimo, apoyo y alegría.

Oscar Andrés Tarazona

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jorge Enrique Meneses Flórez por su orientación en este proyecto, por su confianza, consejos y recomendaciones para nuestra formación personal y profesional.

Al profesor Omar Gelves por su apoyo técnico que nos permitió resolver inconvenientes.

Al ingeniero Raúl Cadena del grupo ERA de electrónica, por sus consejos y apoyo técnico para el desarrollo y construcción de este proyecto.

A Henry Cruz jefe de taller de la escuela de ingeniería mecánica, por la colaboración en la construcción de este proyecto.

A todos los amigos y compañeros de laboratorio que contribuyeron de alguna u otra manera en el desarrollo de este proyecto.

Jeisson M. Quintero Carvallido

Oscar Andrés Tarazona

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	25
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	25
1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	26
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	26
1.3.1 Objetivo general.....	26
1.3.2 Objetivos específicos	27
2 SINTESIS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS	30
3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE APRENDIZAJE	38
3.1 Módulos	38
3.2 Soportes.....	41
3.3 Estructura.....	45
3.4 Tren de engranajes	48
3.5 Tubo de pitot	50
3.6 Diseño térmico	52
3.7 Caja de dispositivos eléctricos	55
4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS	57

4.1	SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR	57
4.1.1	Lazo de control de posición angular	58
4.2	SISTEMA DE CONTROL REGULADO DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA DE AIRE TIPO MIMO	60
4.2.1	Lazo de control regulado de temperatura	61
4.2.2	Lazo de control regulado de velocidad de aire	62
5	SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	64
5.1	MÓDULO PRINCIPAL DEL OBJETO DE APRENDIZAJE.....	64
5.1.1	Motor eléctrico sin escobillas DC (brushless)	64
5.1.2	Hélice.....	66
5.1.3	Variador de velocidad (speed control)	66
5.1.4	Fuente de alimentación 12 VDC	68
5.2	SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR	69
5.2.1	Potenciómetro lineal.	69
5.2.2	Compuerta ensamblada.....	71
5.2.3	Soporte de la compuerta.....	71
5.2.4	Tren de engranajes.....	72
5.2.5	Acople flexible.....	72
5.3	SISTEMA DE CONTROL REGULADO MULTIVARIABLE.....	73
5.3.1	Sensor de temperatura PT100.....	73
5.3.2	Variador de potencia de estado sólido, por control de fase microcontrolado.	74
5.3.3	Resistencias eléctricas	76

5.3.4	Tubo de Pitot	77
5.3.5	Transmisor de presión diferencial.....	78
6	CARACTERÍSTICAS DEL AUTÓMATA PROGRAMABLE S7 314C-2DP	80
6.1	SEÑALES ANALÓGICAS EN EL AUTÓMATA S7 314C-2DP.....	81
6.2	REPRESENTACIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS EN AUTÓMATA S7-300.	83
7	CONFIGURACIÓN HARDWARE Y TRATAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS PARA LOS SISTEMAS DE CONTROL, EN EL SOFTWARE STEP 7	85
	Introducción	85
7.1	CONFIGURACIÓN HARDWARE EN EL ENTORNO STEP 7	85
7.1.1	Configuración hardware de la entrada analógica del sistema de control de posición angular.....	89
7.1.2	Configuración hardware de las entradas analógicas del sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO.....	90
7.1.3	Configuración hardware de la salida analógica del sistema de control de posición angular.....	92
7.1.4	Configuración hardware de las salidas analógicas del sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO.....	93
7.2	TRATAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN EL ENTORNO STEP7.....	94
	Introducción	94
7.2.1	Tratamiento de la entrada analógica del sistema de control de posición angular	95

7.2.2	Sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO	98
8	SINTONIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS PID, EN LOS SISTEMAS IMPLEMENTADOS.....	103
8.1	SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR	103
8.2	SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA MIMO CON ARREGLO DESCENTRALIZADO.....	109
8.2.1	Lazo de control de velocidad	111
8.2.2	Lazo de control de temperatura	117
8.2.2.1	Método de Ziegler-Nichols con identificación en lazo abierto.....	117
8.2.2.2	Sintonización de parámetros PID, mediante la herramienta Autotuning....	122
8.2.3	Resultado de la sintonización del sistema MIMO con arreglo descentralizado.....	131
8.3	VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS....	134
8.3.1	Validación sistema de control de posición	134
8.3.2	Validación sistema de control de velocidad	136
8.3.3	Validación sistema de control de temperatura	138
9	CONCLUSIONES.....	141
10	RECOMENDACIONES	143
	ANEXOS.....	145

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de control de posición angular (configuración ítem "a" y "b")....	29
Figura 2. Sistema regulado tipo MIMO con dos entradas y dos salidas (Configuración ítem "a" y "c").....	29
Figura 3. Esquema general del objeto de aprendizaje.....	32
Figura 4. Estructura principal del objeto de aprendizaje	33
Figura 5. Sistema de control de posición angular.....	34
Figura 6. Esquema grafico de los componentes del sistema de control de posición angular.....	35
Figura 7. Sistema de control regulado de velocidad y temperatura de aire (MIMO).	36
Figura 8. Esquema grafico de los componentes del sistema MIMO	37
Figura 9. Cilindrado de módulos	38
Figura 10. Proceso de unión de brida y ducto mediante soldeo	39
Figura 11. Ensamblaje de módulos.....	39
Figura 12. Módulo para el sistema de control de posición	40
Figura 13. Acabado final del proceso de pintura electrostática.....	40
Figura 14. Material en bruto para soporte.....	41
Figura 15. Proceso de mecanizado de los soportes	41
Figura 16. Montaje y acabado final de soportes	42
Figura 17. Fresado del soporte de la compuerta.	42
Figura 18. Montaje y acabado final del soporte de la compuerta.....	43
Figura 19. Proceso de construcción de soporte del motor	43
Figura 20. Soporte del tubo pitot.....	44
Figura 21. Montaje y soporte del tubo pitot.....	44
Figura 22. Soportes cónicos antivibratorios	45
Figura 23. Estructura del objeto de aprendizaje.....	46

Figura 24. Perfil base y soporte en ángulo	46
Figura 25. Elementos verticales de estructura	47
Figura 26. Elementos horizontales de la estructura	47
Figura 27. Unión en los nodos de elementos verticales y horizontales mediante soportes en ángulo.	48
Figura 28. Tren de engranajes para amplificación del movimiento de rotación del eje del potenciómetro.....	49
Figura 29. Transmisión de engranajes.....	50
Figura 30. Tubo de pitot.....	51
Figura 31. Volumen de control dentro del ducto de aire.	53
Figura 32. Caja de dispositivos eléctricos.....	55
Figura 33. Sistema para control de posición angular.	57
Figura 34. Módulo para control de posición.	58
Figura 35. Lazo de control de posición angular	59
Figura 36. Configuración sistema multivariable regulado	60
Figura 37. Lazo de control regulado de temperatura.	62
Figura 38. Lazo de control regulado de velocidad de aire.	63
Figura 39. Motor eléctrico sin escobillas	65
Figura 40. Imagen dimensional motor eléctrico Turnigy SK3542-1250.....	65
Figura 41. Hélice.....	66
Figura 42. Variador de velocidad Hobby-King	67
Figura 43. Fuente de alimentación de conmutación.	68
Figura 44. Especificaciones técnicas fuente conmutada.	69
Figura 45. Potenciómetro lineal	70
Figura 46. Potenciómetro lineal seleccionado.....	70
Figura 47. Compuerta ensamblada.....	71
Figura 48. Soporte de la compuerta.....	72
Figura 49. Acople flexible.....	72
Figura 50. Termoresistencia elemento PT100 estándar.	74
Figura 51. Variador de potencia con disipador de calor. Fuente Optec.	75

Figura 52. Esquema de conexión variador de potencia.	76
Figura 53. Resistencias eléctricas	77
Figura 54. Tubo Pitot.	77
Figura 55. Sensor de presión diferencial. Fuente Automation direct.....	79
Figura 56. CPU compacta 314C-2DP del S7-300.....	80
Figura 57. Acceso al Hardware en el software Step 7	86
Figura 58. Acceso a las propiedades de la CPU insertada.....	88
Figura 59. Modificación del parámetro CYCLE	88
Figura 60. Configuración hardware del potenciómetro lineal	90
Figura 61. Configuración hardware del sensor de temperatura.	91
Figura 62. Configuración hardware del transmisor de presión diferencial.	92
Figura 63. Configuración hardware de la tarjeta electrónica (motor eléctrico)	93
Figura 64. Configuración hardware del relé de estado sólido	94
Figura 65. Normalizado de la señal entregada por el potenciómetro.....	96
Figura 66. Normalizado de la señal del potenciómetro en el Step 7.....	97
Figura 67. Normalizado de la señal de temperatura.	99
Figura 68. Tratamiento señal del transmisor.....	100
Figura 69. Cálculo programado de la densidad del aire.....	101
Figura 70. Cálculo programado de la velocidad del aire	102
Figura 71. Parametrizador de regulación PID, control de posición.	104
Figura 72. Tabla de variables del sistema de control de posición.....	105
Figura 73. Respuesta de la posición angular de la compuerta con $k_p=1$	106
Figura 74. Respuesta de la posición angular de la compuerta con $k_p=2$	106
Figura 75. Periodo de oscilación del sistema de control de posición angular.	107
Figura 76. Regulador PI del sistema de control de posición	108
Figura 77. Respuesta de la posición angular ante múltiples cambios de consigna.	109
Figura 78. Diagrama de bloques del sistema MIMO del objeto de aprendizaje ...	110
Figura 79. Pareamiento de las variables de control	110
Figura 80. Parametrizador de regulación PID, control de velocidad de aire.	111

Figura 81. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=3$	112
Figura 82. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=5$	112
Figura 83. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=8$	113
Figura 84. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=18$	113
Figura 85. Sistema entra en oscilación $K_p=18$	114
Figura 86. Regulador PI del sistema de control de posición	115
Figura 87. Respuesta de la velocidad del aire ante aumentos en el valor de consigna.	116
Figura 88. Respuesta de la velocidad del aire ante disminución en el valor de consigna.	116
Figura 89. Tabla de variables para el forzado de los parámetros del sistema MIMO	118
Figura 90. Entorno de parametrización del bloque de función FB 58	119
Figura 91. Curva de reacción del proceso de temperatura.	120
Figura 92. Respuesta de la temperatura del aire con los parámetros hallados mediante el método de Ziegler-Nichols con identificación en lazo abierto.....	122
Figura 93. Elección del tipo de regulador para el asistente de regulación de temperatura.....	123
Figura 94. Selección del tipo de excitación del proceso para el asistente de regulación: Optimización en el punto de operación.	124
Figura 95. Excitación del proceso del 50% y un punto de operación de 26°C.	124
Figura 96. Asistente de regulación en proceso de búsqueda de parámetros	125
Figura 97. Optimización finalizada para un punto de operación.	125
Figura 98. Bloque de datos DB11 con los nuevos parámetros después de optimizarlos para un punto de consigna.	126
Figura 99. Lazo de temperatura de aire ante cambios de consigna.	127
Figura 100. Selección del tipo de excitación del proceso para el asistente de regulación: Optimización en un rango de consigna.	128
Figura 101. Excitación del proceso del 50% y un rango final de 37°C.....	128
Figura 102. Optimización finalizada para un rango de consigna.....	129

Figura 103. Bloque de datos DB11 con los nuevos parámetros después de optimizarlos para un rango de operación-.....	130
Figura 104. Lazo de temperatura con los parámetros encontrados para un rango de consigna.....	131
Figura 105. Regulación sistema MIMO-prueba 1.....	132
Figura 106. Regulación sistema MIMO prueba 2.....	133
Figura 107. Regulación sistema MIMO prueba 3.....	134
Figura 108. Validador del sistema de posición angular.....	135
Figura 109. Valores del sistema de posición angular.....	136
Figura 110. Medición anemómetro digital	137
Figura 111. Valores de velocidad de aire del sistema de medición implementado	137
Figura 112. Termómetro de mercurio utilizado para comparación de la temperatura	138
Figura 113. Valores de temperatura medidos por el sensor PT100 implementado en el sistema de control.	139
Figura 114. Termómetro de mercurio como instrumento comparador $T=98.7^{\circ}\text{F}$.	140

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los engranajes del tren	49
Tabla 2. Características técnicas del motor eléctrico brushless.....	65
Tabla 3. Características técnicas del sensor PT100	74
Tabla 4. Características del tubo pitot.....	78
Tabla 5. Rangos máximos de velocidad, a máxima revoluciones del motor.....	78
Tabla 6. Características técnicas del transmisor de presión diferencial.....	79
Tabla 7. Entradas y salidas analógicas integradas en S7-314C-2DP.....	81
Tabla 8. Direcciones asignadas a entradas y salidas analógicas integradas.	82
Tabla 9. Direccionamiento por default de la CPU314C-2DP	83
Tabla 10. Resolución de la CPU 314C-2DP	84
Tabla 11. Tabla de ajuste en bucle cerrado de los parámetros de PID propuesta por Ziegler-Nichols.....	108
Tabla 12. Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.....	120
Tabla 13. Ajuste en bucle abierto de los parámetros de PID propuesta por Ziegler-Nichols.....	121
Tabla 14. Valores de posición angular obtenidos para el sistema de medición de posición implementado y el instrumento comparador.....	136
Tabla 15. Valores de velocidad obtenidos para el sistema de medición de velocidad implementado y el instrumento comparador.....	138
Tabla 16. Valores de temperatura medida por el PT100 y el instrumento comparador.....	139

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. COSTOS PROYECTO DE GRADO	146
ANEXO B. MARCO TEÓRICO	147
ANEXO C. PLANOS CONEXIONES ELÉCTRICAS	160
ANEXO D. PLANOS.....	162
ANEXO E. FICHAS TÉCNICAS DE COMPONENTES.....	170

TABLA DE SÍMBOLOS

PV: Variable de proceso.

CV: Variable de control

SP: variable de referencia o consigna (set point).

E: error.

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC)*

AUTORES: TARAZONA VILLAMIZAR Oscar Andres.
QUINTERO CARVALLIDO Jeisson Mauricio**

PALABRAS CLAVES: Sistema de control muestreado, reguladores PID, control regulado, Autómata programable (PLC).

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es construir un objeto de aprendizaje, que permita poner en práctica los fundamentos teóricos adquiridos por los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, en el área del control de procesos cuasicontinuos o muestreados y de esta manera permitir el desarrollo de competencias en el egresado, que puedan ser aportadas para el desarrollo productivo y competitivo de la industria nacional.

El diseño de este objeto de aprendizaje es de tipo modular cuenta con tres módulos de geometría circular que se acoplan entre sí; esto permite la realización de dos prácticas de sistemas de control cuasicontinuo o muestreado en lazo cerrado, una de las prácticas involucra el control de posición de una compuerta situada en un extremo de uno de los módulos, esto mediante la variación del flujo de aire inducido por un motor eléctrico y una hélice, para la práctica del segundo sistema de control, se retira el módulo que posee la compuerta y se instala un tercero que posee una resistencia eléctrica, un sensor de temperatura y un medidor de velocidad de aire como el tubo pitot y un transmisor de presión diferencial, el objetivo aquí es el control simultaneo de las variables de velocidad y temperatura del aire, estos sistemas son llamados sistemas multivariables MIMO. Finalmente los dos sistemas de control serán sintonizados mediante métodos empíricos y controlados mediante un PLC fabricado por la empresa SIEMENS

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. M.sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN OBJECT LEARNING FOR SAMPLED SYSTEMS CONTROL PRACTICES, BASED INDUSTRIAL CONTROLLER (PLC)*

AUTHORS: TARAZONA VILLAMIZAR Oscar Andres.
QUINTERO CARVALLIDO Jeisson Mauricio**

KEYS WORDS: Sampled system control practices, regulators PID, regulated control, programmable controller (PLC).

DESCRIPTION:

The objective of this project is to build a learning object that allows to implement the theoretical foundations acquired by students of the mechanical engineering school from the Universidad Industrial de Santander, in the area of cuasicontínuos or sampled process control and thus allowing the development of skills in graduates, they can be provided for the development of productive and competitive industry.

The design of the object learning is modular has three circular geometry modules are coupled together, this settings allows the realization of two cuasicontínuos or sampled systems control practices in closed loop, one of this practices involves position control of a gate located in the one end of the small module, that by varying the air flow induced by an electric motor and a propeller, the second practice of the next control system, is removed the gate and installing a third which has an electrical resistance, temperature sensor, and an air velocity meter like pitot tube and differential pressure transmitter, the goal in this practice is the simultaneous control of the variables of velocity and air temperature, these system are known like MIMO system. Finally the two systems will be tuned by empirical methods and controlled by a PLC manufactured by SIEMENS

* Graduation Project.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering school. Director M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años nuestro país ha implementado políticas de comercio, que han permitido la apertura económica con mayor fuerza hacia los mercados internacionales, esto causa que las empresas deban implementar estrategias que permitan ser más productivas y competitivas, para no quedarse atrás en este auge de intercambio comercial. El control automático de procesos es una de estas estrategias, porque permite la fabricación de productos de mejor calidad, menor consumo de energía, minimización de desechos, mayores niveles de seguridad para el personal y reducción de la polución, Es evidente que el especialista en control automático puede contribuir significativamente en diversas áreas de la tecnología moderna. El área de mayor impacto en la actualidad es la de automatización de procesos de manufactura. Esto por supuesto genera demanda de profesionales con altas destrezas en el área del control automático de procesos.

.Con la implementación de este objeto de aprendizaje para prácticas de sistemas de control continuo, se pretende que los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad industrial de Santander, pongan en práctica los conocimientos teóricos adquiridos sobre la ingeniería de control de procesos y así desarrollen competencias que permitan un desempeño óptimo del egresado en esta área de la ingeniería.

El primer capítulo del presente trabajo, describe los lineamientos trazados para el desarrollo de este proyecto, aquí se expone la necesidad que origino este proyecto, los alcances que posee y los objetivos que se plantearon para su desarrollo, en el capítulo dos se da una descripción general de los sistemas de control implementados en el objeto de aprendizaje, posteriormente en el capítulo tres se exponen los procedimientos de diseño y construcción que se emplearon para la fabricación de los componentes y sistemas del objeto de aprendizaje los

cuales se describen con más detalle en el capítulo cuatro y cinco. En el capítulo seis y siete se expone la configuración de hardware y tratamiento de las señales analógicas en el controlador PLC, en el capítulo ocho se exponen los métodos experimentales utilizados para la sintonía de los controladores PID de los lazos de control implementados, también se da una comparación con instrumentos estándar de los sistemas de medición de cada lazo de control, finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones originadas por el desarrollo de este proyecto.

1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Desde hace unos años el perfil del ingeniero mecánico de la Universidad Industrial de Santander ha venido experimentando cambios en áreas como la ingeniería de control y la automatización industrial ya que básicamente el pensum académico en el área de control se orientaba al diseño y análisis de automatismos lógicos secuenciales, limitando el desempeño laboral del profesional en la automatización de procesos.

La evolución de la electrónica y los dispositivos captadores(sensores) así como también la relativa facilidad para aplicar tecnologías flexibles como los autómatas programables (PLC) en el control de procesos, han hecho que los sistemas de control muestreados¹ sean empleados con mayor frecuencia en la industria; conscientes de que el profesional debe adaptarse a los cambios que produce el dinamismo industrial, la escuela de ingeniería mecánica ha incorporado nuevas disciplinas en su programa académico como electricidad, electrónica básica, mecatrónica e ingeniería de control, con el objetivo de abarcar el diseño, análisis y ejecución no solo de automatismos lógicos secuenciales sino que también de sistemas de control muestreados.

Para promover el desarrollo de competencias y habilidades de diseño e implementación de este nuevo enfoque dado al perfil del ingeniero mecánico hacia estos sistemas de tipo muestreado, es necesario disponer de objetos de aprendizaje como bancos de pruebas, plataformas de simulación y módulos didácticos; sin embargo en asignaturas electivas como automatización industrial y autómatas programables, no se cuenta con objetos de aprendizaje como los anteriormente mencionados, esto dificulta la captación de conocimientos y la formación de competencias a nivel del control automático de sistemas muestreados, así como también el desarrollo de destrezas en la implementación

¹ Ver anexo A

de tecnologías como autómatas programables en la ejecución y manejo de este tipo de sistemas.

1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Por medio de este proyecto se aporta al desarrollo de competencias y habilidades en la interpretación, análisis y diseño de sistemas de control muestreado, específicamente en las asignaturas electivas de automatización industrial y autómatas programables; esto permitirá además que el estudiante de ingeniería mecánica afiance los conocimientos adquiridos en las nuevas asignaturas introducidas en el pensum académico y conozca las técnicas y dispositivos empleados en este tipo de sistemas de control y así se vea reflejado en un mejor desempeño laboral por parte del egresado en esta área de la ingeniería.

El diseño y construcción de este equipo se prefiere ante la compra del mismo en el mercado por tres razones principales: el alto costo en su adquisición, la dependencia de la universidad para con el proveedor en el momento de la realización de mantenimientos u/o cambios de componentes y la no existencia de un equipo en el mercado que cumpla satisfactoriamente las necesidades y requerimientos del estudiante de ingeniería mecánica en el área de control y sistemas de control muestreado. Además, los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, tienen las aptitudes y habilidades necesarias para la creación y construcción de esta clase de sistemas, caracterizando el espíritu investigativo y creativo del profesional UIS.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo general

- ✓ Contribuir a la misión de la universidad industrial de Santander de formar personas con gran capacidad profesional, mediante el diseño y construcción de un objeto de aprendizaje en las áreas de automatización industrial y autómatas programables que permita el desarrollo de competencias y habilidades del

estudiante de ingeniería mecánica, en el área del control automático de procesos muestreados o cuasicontinuos.

1.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar y construir un ducto de viento de tipo modular de sección circular compuesto por un módulo principal y dos módulos intercambiables, como plataforma para recrear eventos de automatismos, para el control de procesos cuasicontinuos o muestreados, este prototipo consistirá en:
 - a. Un módulo principal de sección circular de 60 cm de longitud y 25 cm de diámetro aproximadamente, donde en su extremo se instalará un motor eléctrico de corriente continua que induzca un flujo de aire y en el extremo opuesto la disposición para acoplar módulos complementarios que de manera conjunta permita el desarrollo de prácticas de laboratorio para el control de sistemas muestreados.
 - b. Un primer módulo complementario de sección circular de 40 cm de longitud y 25 cm de diámetro aproximadamente, este módulo tendrá una brida en un extremo para acoplarse al módulo principal y en su extremo opuesto se instala una compuerta con el área suficiente que obstruya la salida del flujo de aire en su posición inicial² (ver figura 1). Así mismo se dispone de un sensor de posición angular acoplado en el eje de rotación de la compuerta para captar la señal de realimentación de la misma.
 - c. Un segundo módulo complementario de sección circular de 100 cm de longitud y 25 cm de diámetro aproximadamente, el cual se acondicionara con un banco de resistencias para el calentamiento del aire a través del ducto. También se dispone de dispositivos captadores de señal como un tubo pitot y una termocupla para la medición de variables de velocidad y temperatura de aire respectivamente (ver figura 2).

² Compuerta en posición perpendicular al flujo de aire.

- ✓ Implementar un sistema de control de posición tipo SISO³ mediante el acople del módulo principal y el módulo complementario que se describió en el ítem “b” (Ver figura 1), de tal manera que la variable controlada sea el ángulo⁴ de la compuerta y su rango de variación se encuentre comprendido entre 0-60° aproximadamente, el movimiento de rotación de la compuerta está dado por la acción del flujo de aire.

- ✓ Implementar un sistema de control regulado aplicado a un sistema MIMO⁵ con dos entradas y dos salidas, esta configuración está dada por el acople del módulo principal y el módulo complementario que se describió en el ítem “c” (Ver figura 2), teniendo como variables controladas la velocidad y la temperatura del aire y variables manipuladas la potencia eléctrica en la resistencia y velocidad el flujo de aire.

- ✓ Seleccionar y configurar el tipo de regulador adecuado (P, PI Y PID) que proporcione un control adecuado de los sistemas anteriormente planteados y así mismo implementarlo en el PLC Siemens S7-300.

- ✓ Seleccionar y configurar los sensores necesarios para captar las señales de realimentación de las diferentes variables a controlar en nuestro objeto de aprendizaje.

- ✓ Elaborar un manual de operación del banco de prácticas para su mantenimiento y correcta utilización por parte de estudiantes o personas que lo manipulen.

³ SISO- De la sigla en inglés Single Input Single Output- Una entrada y una salida

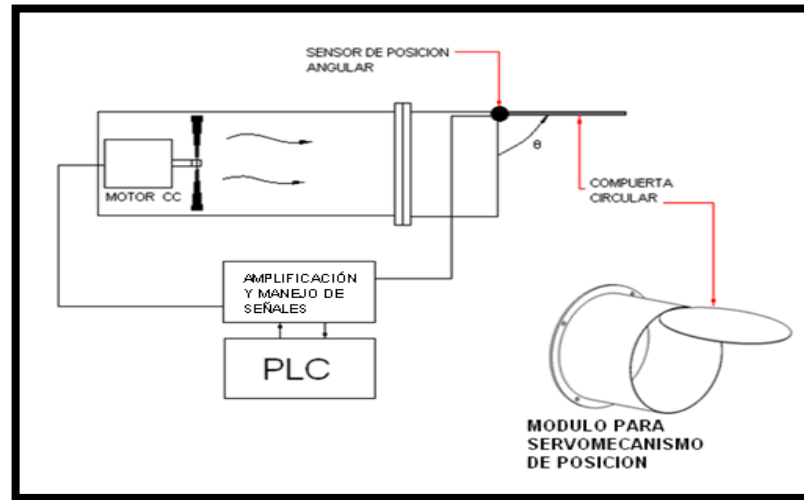
⁴ Ángulo formado entre la compuerta y el asiento de la compuerta.

⁵ MIMO. De la sigla en inglés Multiple Input Multiple Output- Múltiple entrada y múltiple salida

CONFIGURACIONES POSIBLES PARA EL BANCO DE PRUEBAS.

- Sistema de control de posición angular

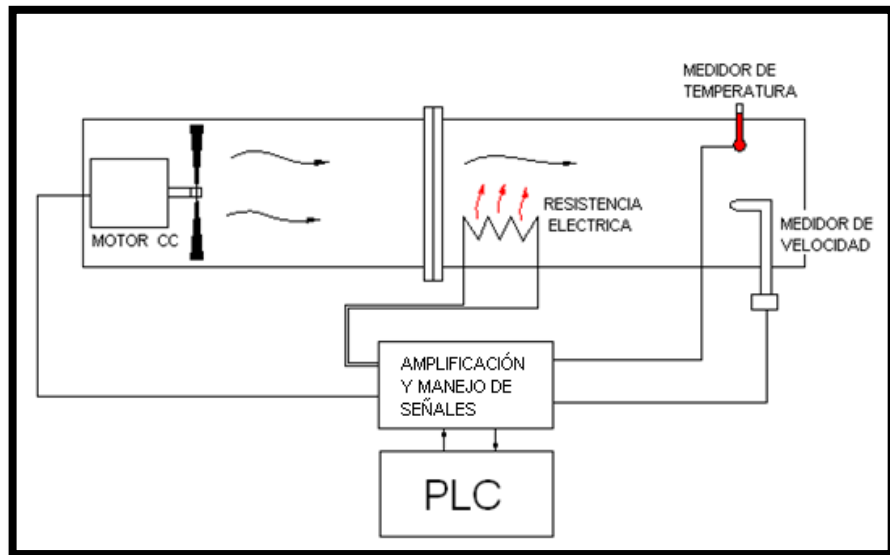
Figura 1. Sistema de control de posición angular (configuración ítem "a" y "b")



Fuente: autores

- Sistema de control de tipo regulado y muestreado.

Figura 2. Sistema regulado tipo MIMO con dos entradas y dos salidas (Configuración ítem "a" y "c")



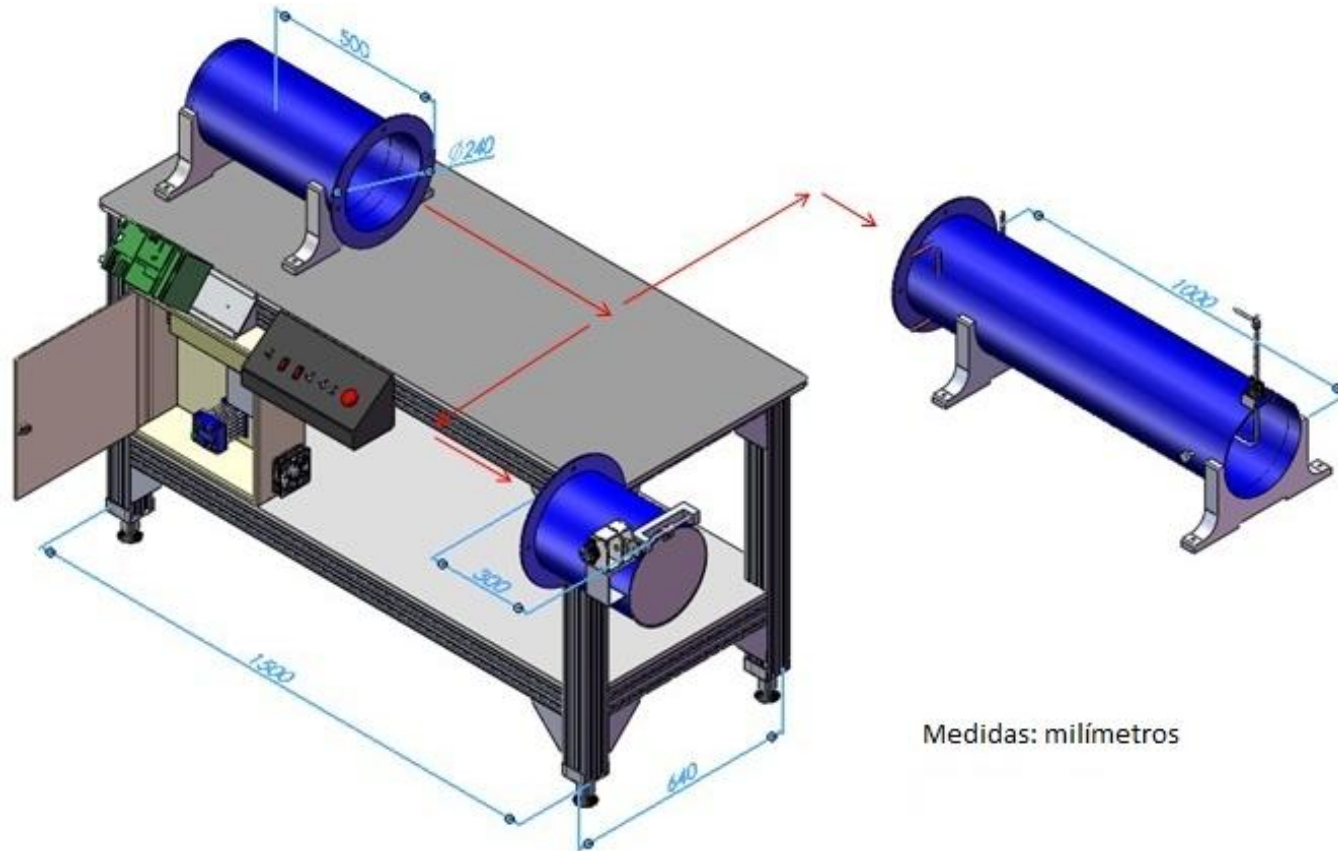
2 SINTESIS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS

El objeto de aprendizaje se estructuró de tal forma que mostrará al estudiante de ingeniería mecánica la importancia del control de procesos y de la implementación de los sistemas electrónicos de control o llamados simplemente “controladores”. El usuario adquirirá competencias en el área de la automatización industrial y dará soporte práctico a conocimientos obtenidos en las áreas de electricidad, electrónica básica, ingeniería de control y sistemas mecatrónicos.

La finalidad del objeto de aprendizaje es transportar al estudiante a un sitio de trabajo con un problema real de control de procesos, que despiece y profundice cada uno de los elementos constitutivos de los sistemas desarrollados, diferencie conceptos en la forma de controlar el proceso (Lazo abierto o lazo cerrado) y conozca los tipos de variables de entrada presentes en un controlador (señal Digital y señal analógica). Finalmente, el usuario mediante un Autómata Programable podrá instaurar Reguladores PID en cada uno de los procesos, eligiendo el algoritmo apropiado P, PI, PD ó PID, y sintonizando estos parámetros mediante métodos empíricos.

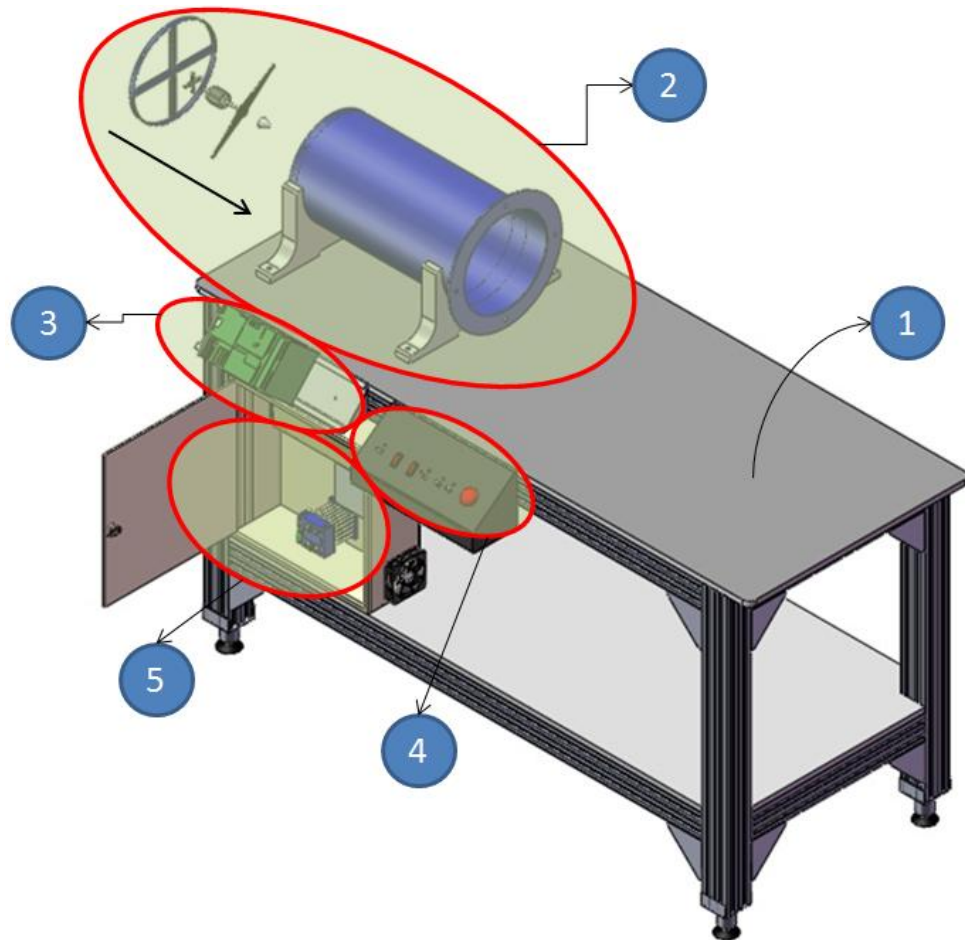
Según lo descrito en los párrafos anteriores, el objeto de aprendizaje se diseñó y construyó de tipo modular, constituido por tres ductos de geometría circular y de igual diámetro. Como se observa en la figura 3, uno de los ductos se encuentra fijo y actúa como base para el acople de otros dos ductos, lo cual permite la implementación de dos tipos de sistemas de control en lazo cerrado. El ducto principal o parte fija posee un conjunto motor eléctrico-hélice, y tienen como función, forzar el paso de aire a través de los ductos acoplados.

Figura 3. Esquema general del objeto de aprendizaje.



Fuente Autores.

Figura 4. Estructura principal del objeto de aprendizaje



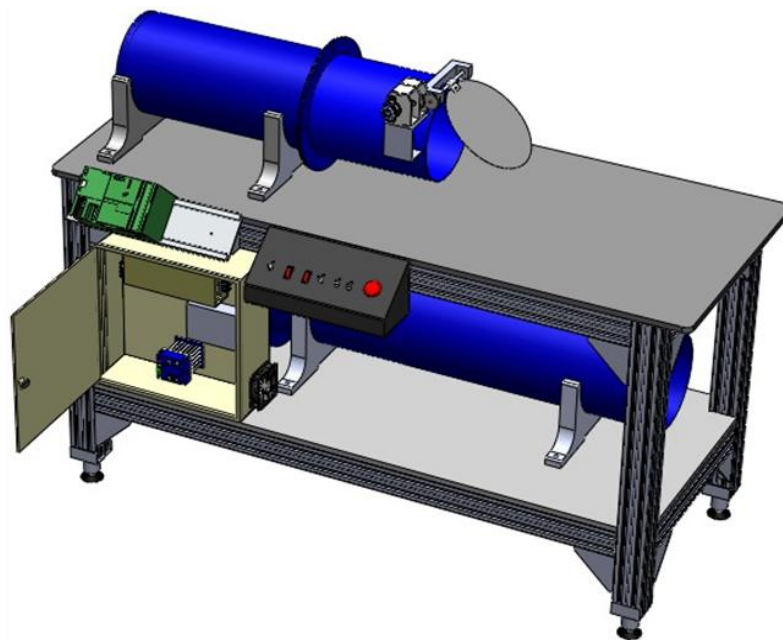
Fuente: Autores

El objeto de aprendizaje debería ser flexible para contener dos prácticas de control de procesos y a la vez no ser robusto debido a las limitaciones de espacio que cuenta el laboratorio de automatización industrial, por esta razón, se estructuró un objeto de aprendizaje, en donde, una parte de éste fuera fija y común para los dos sistemas, sin la necesidad de realizar modificaciones considerables en el banco, ni mucho menos duplicar el espacio de trabajo.

El resultado final se puede observar en la figura 4, donde se aprecia la estructura principal o estructura base del objeto de aprendizaje, el cual consta de los siguientes elementos:

- ✓ Estructura metálica (1), encargada de dar soporte a todos los demás elementos del objeto de aprendizaje, cuenta con dos niveles de trabajo y se construyó mediante perfiles de aluminio y soportes en ángulo (Ver capítulo 3).
- ✓ Ducto principal (2), se encuentra anclado por tornillos a la estructura metálica y posee en uno de sus extremos un conjunto motor eléctrico-hélice para el forzado del aire a través de él. En su otro extremo lleva una brida para la conexión mediante tornillos con sus otros módulos complementarios.
- ✓ Controlador (3), se utilizó un autómata programable de referencia Siemens S7300 (Ver capítulo 6)
- ✓ Panel de control (4), se encarga de energizar los elementos (sensores, preactuadores, etc.) del sistema de control que se requiera utilizar en el momento. Ver manual de operación
- ✓ Caja eléctrica (5), su función es alojar los dispositivos eléctricos y electrónicos utilizados (ver capítulo 3).

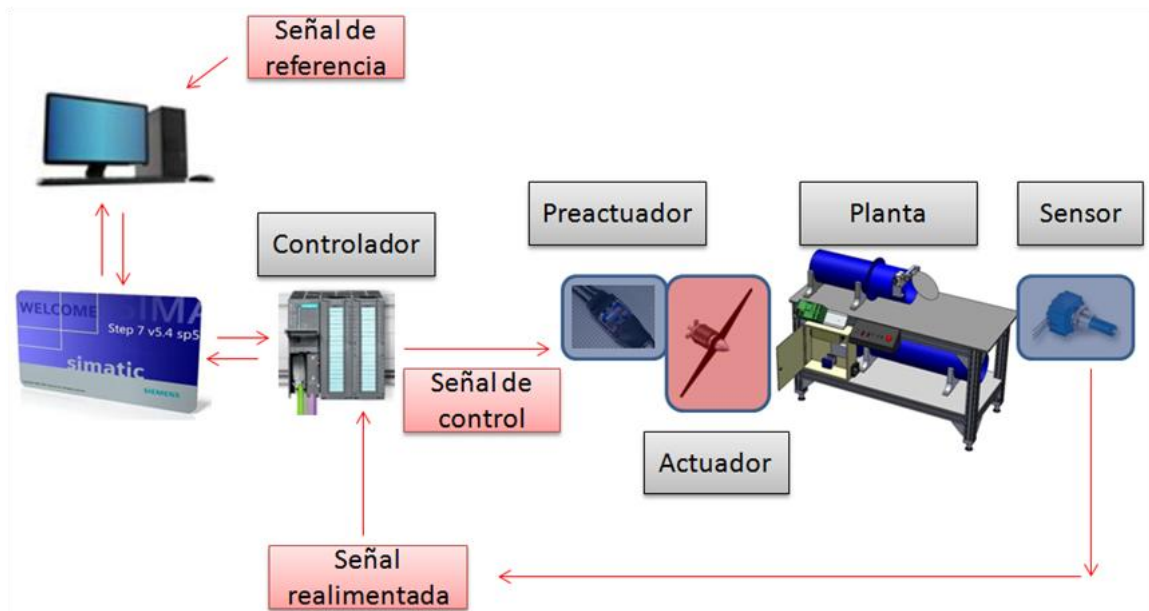
Figura 5. Sistema de control de posición angular.



Fuente: Autores

La implementación del primer sistema de control, se obtiene al acoplar mediante brida y tornillos el ducto base, junto con otro más corto y de longitud de 30cm, ver figura 5. Este ducto posee una compuerta en un extremo y puede rotar libremente. El objetivo del sistema de control de posición angular es mantener la compuerta en una posición de referencia establecida a pesar de las perturbaciones existentes en la planta, el estudiante deberá ajustar los parámetros del algoritmo PID más adecuado mediante métodos empíricos.

Figura 6. Esquema grafico de los componentes del sistema de control de posición angular.

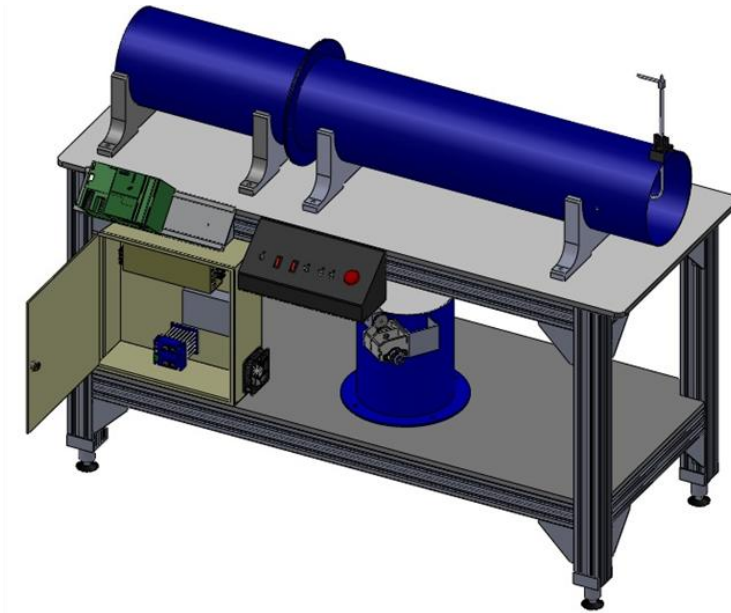


Fuente: Autores

En la figura 6, se observa el diagrama de bloques del sistema de control de posición angular, en este sistema la variable controlada PV corresponde a la señal captada por el potenciómetro, esta señal es realimentada hacia el controlador y comparada con la señal de referencia que se estableció a través del PC y transmitida mediante el software Step 7 al autómata programable, finalmente el controlador Siemens con CPU 314C-2DP se encarga de la ejecución del algoritmo

de control asignado en el programa de usuario para generar la señal de control, que a través del conjunto motor eléctrico-hélice proporciona la variable manipulada **CV** y hace que la variable de proceso **PV** tenga el valor de la variable de consigna **SP**.

Figura 7. Sistema de control regulado de velocidad y temperatura de aire (MIMO).

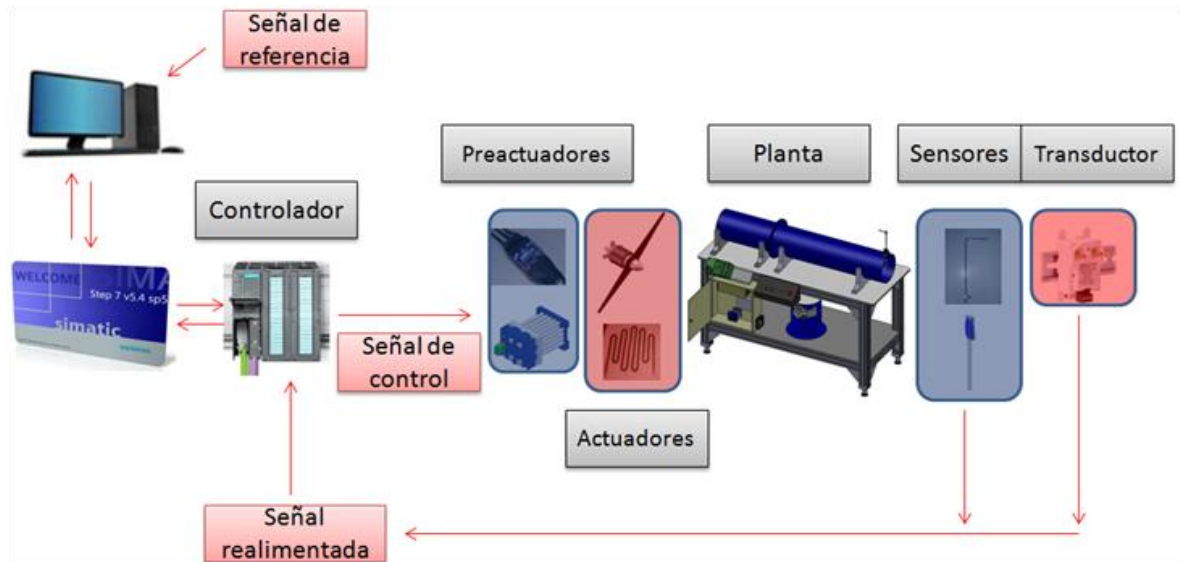


Fuente: Autores

Para implementar el segundo sistema de control se retira el ducto que posee la compuerta y en su lugar se instala otro de longitud igual a 100cm. Este ducto está provisto de dispositivos que permiten el control simultáneo de la velocidad y la temperatura del aire, ver figura 7. El estudio de este sistema en comparación con el sistema de control de posición angular, es más complejo, debido a que las variables que se controlan dependen directamente entre ellas, es decir, si modificamos la temperatura del aire dentro del ducto, la velocidad del aire se verá seriamente afectada porque las moléculas del fluido se encuentran más excitadas, de igual manera, al realizar modificaciones en el flujo de aire que circula dentro del

ducto, la temperatura del aire tendrá alteraciones. Esto se describirá con más detalle en capítulos posteriores.

Figura 8. Esquema grafico de los componentes del sistema MIMO



Fuente. Autores

En la figura 8, se observa el sistema de control regulado de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO, en este sistema las variables controladas PV corresponden a las señales captadas por el sensor de temperatura y el transmisor de presión diferencial, estas señales son realimentadas al controlador y comparadas con la señal de referencia que se estableció en el PC y suministrada al controlador mediante el software Step 7, finalmente el controlador ejecuta un algoritmo determinado, generando una señal de control que a través de los actuadores, motor eléctrico-hélice y la resistencia eléctrica proporcionan las variables manipuladas para que las variables de proceso PV tengan el valor de las consignas SP.

3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE APRENDIZAJE

3.1 Módulos

El objeto de aprendizaje está compuesto por tres módulos de geometría circular y de igual diámetro, estos se construyeron con lámina de acero rolada en frío calibre 14. Para dar geometría cilíndrica, se empleó una máquina plegadora de rodillos, ver figura 9, posteriormente se aplicó un cordón de soldadura a lo largo de su longitud, para mantener la geometría. Estos componentes fueron fabricados en el taller de la escuela de ingeniería mecánica.

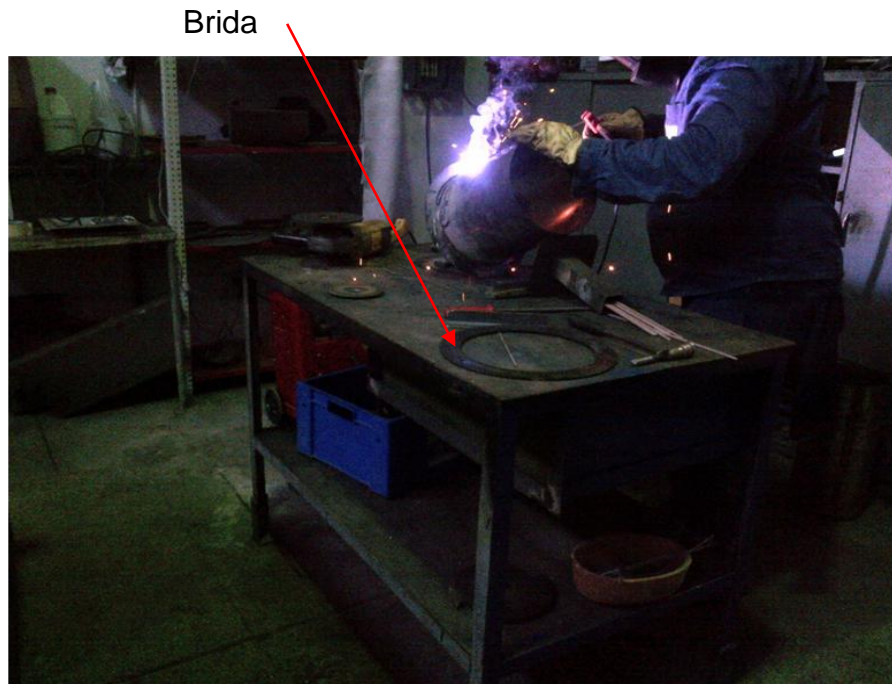
Figura 9. Cilindrado de módulos



Fuente. Autores

Para interconectar los módulos entre sí, se utilizó el sistema de brida y tornillo, la brida fue fabricada con platina de acero laminado en caliente y el corte de esta, se realizó mediante un máquina de plasma cnc. El proceso de unión de la brida y los ductos, se realizó mediante soldeo con electrodo revestido E6013.

Figura 10. Proceso de unión de brida y ducto mediante soldeo



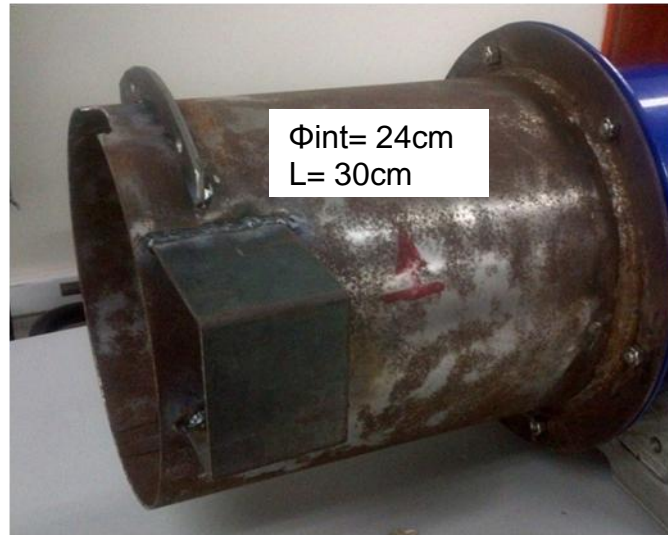
Fuente. Autores

Figura 11. Ensamblaje de módulos.



Fuente. Autores.

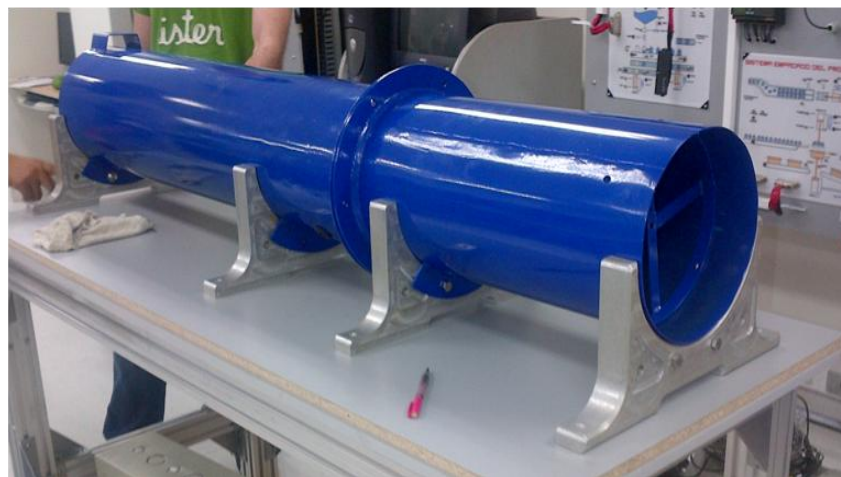
Figura 12. Módulo para el sistema de control de posición



Fuente Autores.

Como recubrimiento para las superficies internas y externas se llevó a cabo un proceso de pintura electrostática como se observa en la figura 13.

Figura 13. Acabado final del proceso de pintura electrostática.



Fuente. Autores

3.2 Soportes

- **Soportes de módulos**

Como apoyo estructural para dos de los ductos, se construyeron cuatro soportes en aluminio de 4cm de espesor. Primero se llevó a cabo la fundición del material en bruto, con dimensiones superiores en 1cm a las dimensiones finales para el soporte, ver figura 14.

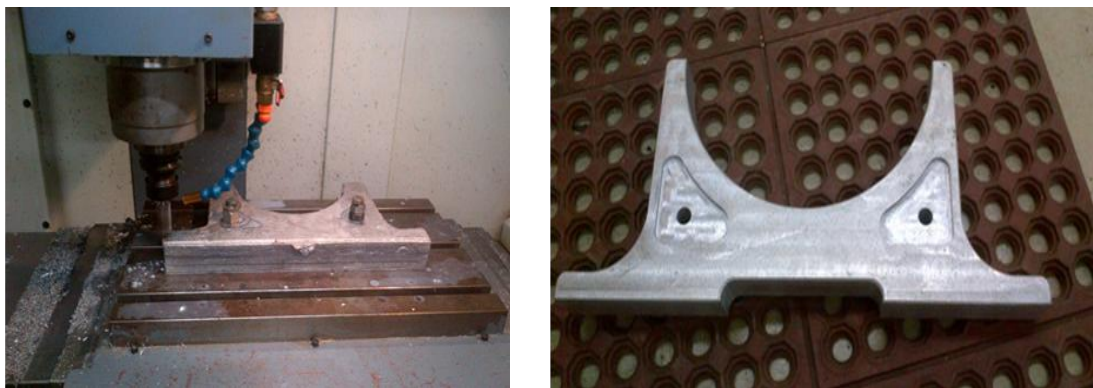
Figura 14. Material en bruto para soporte



Fuente. Autores

Posteriormente se llevó a cabo un proceso de fresado mediante un centro de mecanizado cnc.

Figura 15. Proceso de mecanizado de los soportes



Fuente: autores.

En la figura16, se observa la forma de anclaje de los soportes de aluminio al ducto, estos se fijaron a una sección de anillo soldada al ducto mediante tuerca y tornillo.

Figura 16. Montaje y acabado final de soportes



Fuente. Autores

- **Soporte de la compuerta**

Fue necesaria de la construcción de un elemento adicional en el módulo de control de posición angular que me permitiría la rotación de la compuerta y fuera solidaria al ducto. Al igual que los soportes de los módulos, este elemento está fabricado en aluminio fundido y llevado a un proceso de fresado CNC ver figura 17.

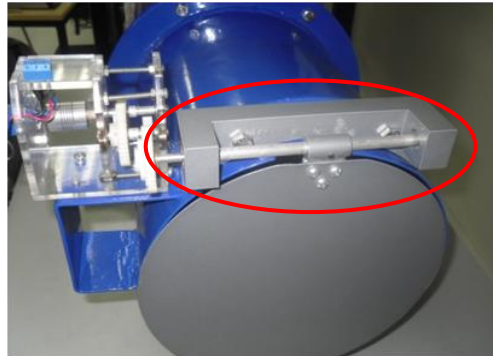
Figura 17. Fresado del soporte de la compuerta.



Fuente Autores

En la siguiente figura podemos observar el montaje del soporte de la compuerta en el ducto.

Figura 18. Montaje y acabado final del soporte de la compuerta



Fuente: Autores

- **Soporte motor**

Para fijar el motor eléctrico al ducto principal, se construyó un anillo circular con platina de acero de 1"x 1/8", este posee dos platinas soldadas al anillo para sujetar el motor mediante tuerca y tornillo, como lo muestra la figura 19.

Figura 19. Proceso de construcción de soporte del motor



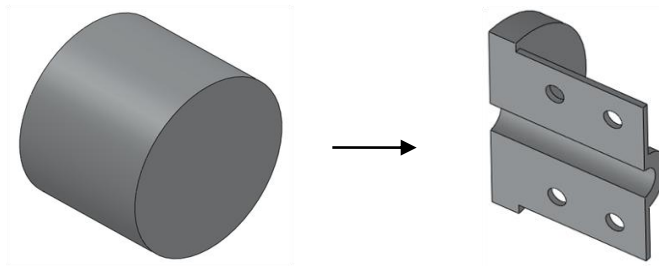
Fuente. Autores

- **Soporte tubo pitot**

Una buena ubicación del tubo pitot dentro del flujo de aire garantiza una lectura precisa y genera confiabilidad en el control. Debido a esto, se diseña y construye un elemento soporte que permita múltiples ubicaciones a nivel radial dentro de la corriente de aire.

Se utilizó una barra de 2 pulgadas de diámetro y 4 cm de longitud en acero inoxidable para la construcción del soporte, el proceso de manufactura del material se llevó a cabo en 3 subprocesos, mecanizado en torno convencional, corte mediante una sierra de banda y soldeo. En la figura 20 se observa el producto terminado.

Figura 20. Soporte del tubo pitot



Fuente: autores

En la figura 21, se muestra el montaje adecuado del tubo pitot en el módulo de control de velocidad y temperatura de aire.

Figura 21. Montaje y soporte del tubo pitot

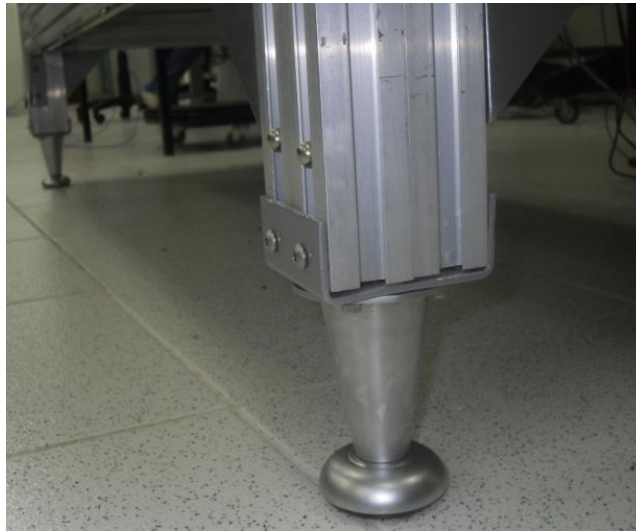


Fuente: autores

- **Soportes anti vibratorios**

Para soportar la estructura sobre el piso, se emplearon cuatro soportes anti vibratorios de geometría cónica ver figura 22. Para tal fin, fue necesaria la utilización de una lámina en forma de C para ubicar los soportes.

Figura 22. Soportes cónicos antivibratorios



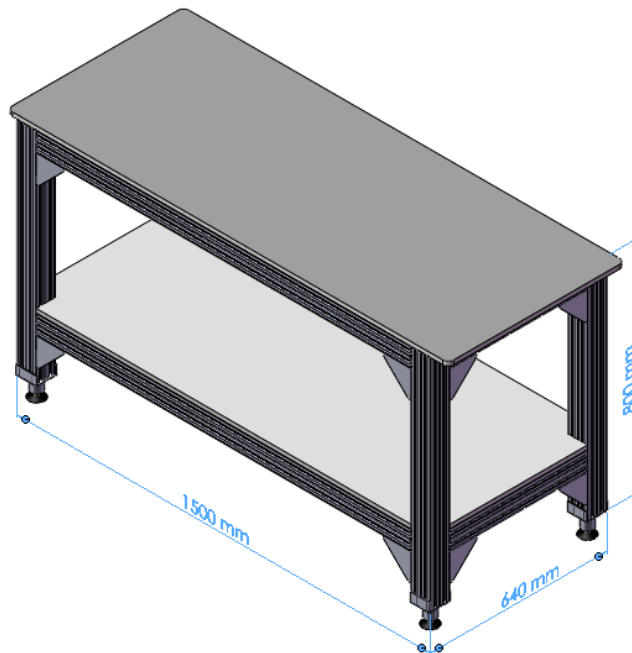
Fuente. Autores

3.3 Estructura

La estructura que soporta el objeto de aprendizaje posee dos niveles, estos están contruidos con perfiles de aluminio cuadrado y con tabla de madera o madecor, con un espesor de 15mm.

Como se mencionó anteriormente el objeto de aprendizaje dispone de tres módulos, uno de ellos fijo y los dos restantes móviles, dependiendo del tipo de sistema de control a practicar, es necesario retirar y guardar uno de los módulos móviles, mientras se lleva a cabo una de las prácticas, para hacer esto la estructura dispone de un segundo nivel, que recibe y da soporte a este módulo. El cual será utilizado una vez finalice la primera práctica, ver figura 23.

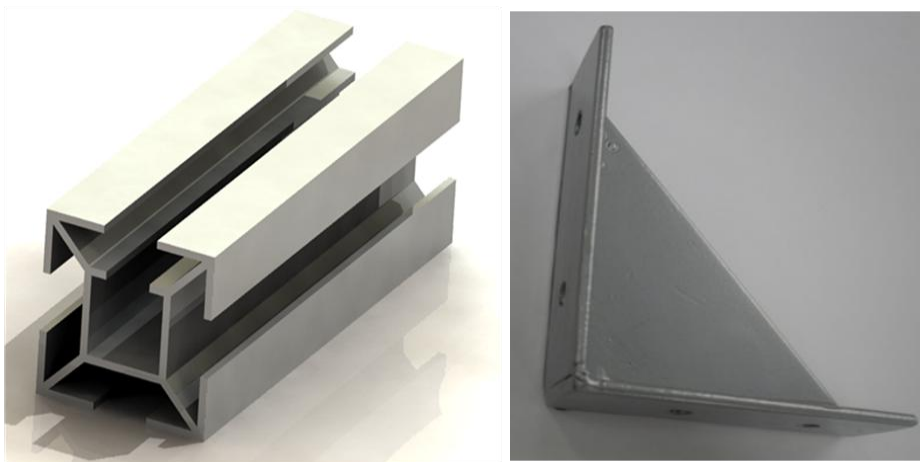
Figura 23. Estructura del objeto de aprendizaje.



Fuente. Autores.

La construcción de la estructura se llevó a cabo mediante la unión de un perfil base de aluminio de 35mmx35mm y soportes en ángulo, con tornillos y tuercas, ver figura 24.

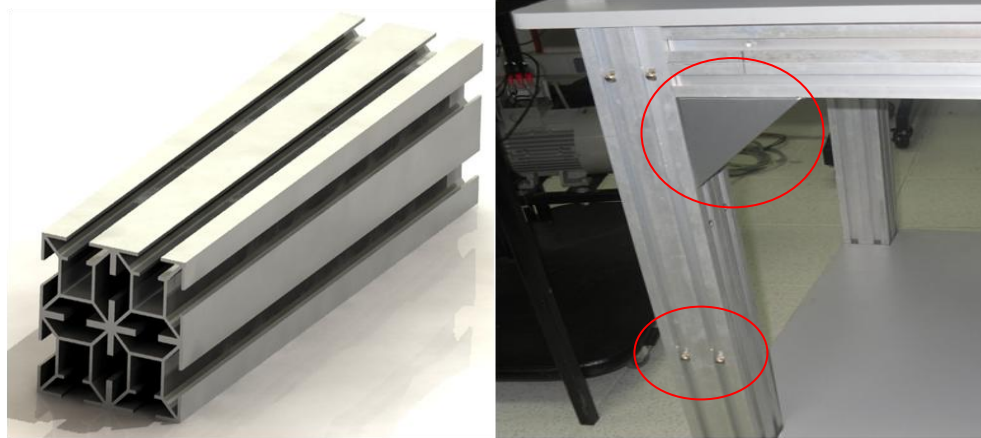
Figura 24. Perfil base y soporte en ángulo



Fuente. Autores.

Los cuatro elementos verticales de la estructura se componen de cuatro perfiles base, fijados entre sí por medio de tornillos y fijados en los nodos por medio de soportes en ángulo, como se observa en la figura 25.

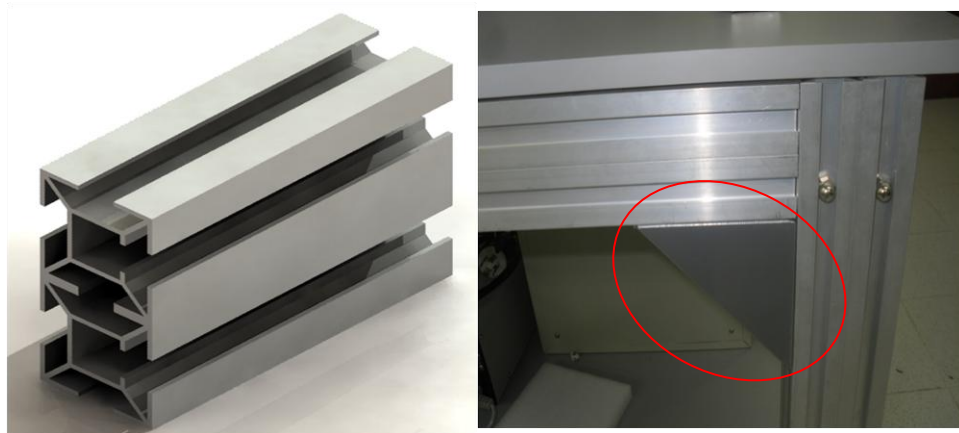
Figura 25. Elementos verticales de estructura



Fuente. Autores

De igual manera, los elementos horizontales están compuestos de dos perfiles base, unidos por tornillo como se observa en la figura 26. Estos elementos se unen en los nodos mediante soportes en ángulo.

Figura 26. Elementos horizontales de la estructura



Fuente. Autores

Figura 27. Unión en los nodos de elementos verticales y horizontales mediante soportes en ángulo.



Fuente. Autores

3.4 Tren de engranajes

El objetivo del lazo de control de posición angular que se pretende desarrollar, es mantener en determinado ángulo la compuerta y dentro de un rango comprendido de 0 a 75° a pesar de las perturbaciones de carga que existan en el sistema. Como se mencionó en el capítulo 1, La posición angular de la compuerta es medida por un potenciómetro lineal de 10K Ω , donde su resistencia es variable en relación con el giro de 0 a 300 ° de su eje. Si acoplamos directamente el eje de la compuerta y el eje del potenciómetro, no se aprovecharía completamente el cambio en la resistencia del potenciómetro, esto implica que no se aproveche la precisión o resolución de lectura de la entrada analógica del PLC.

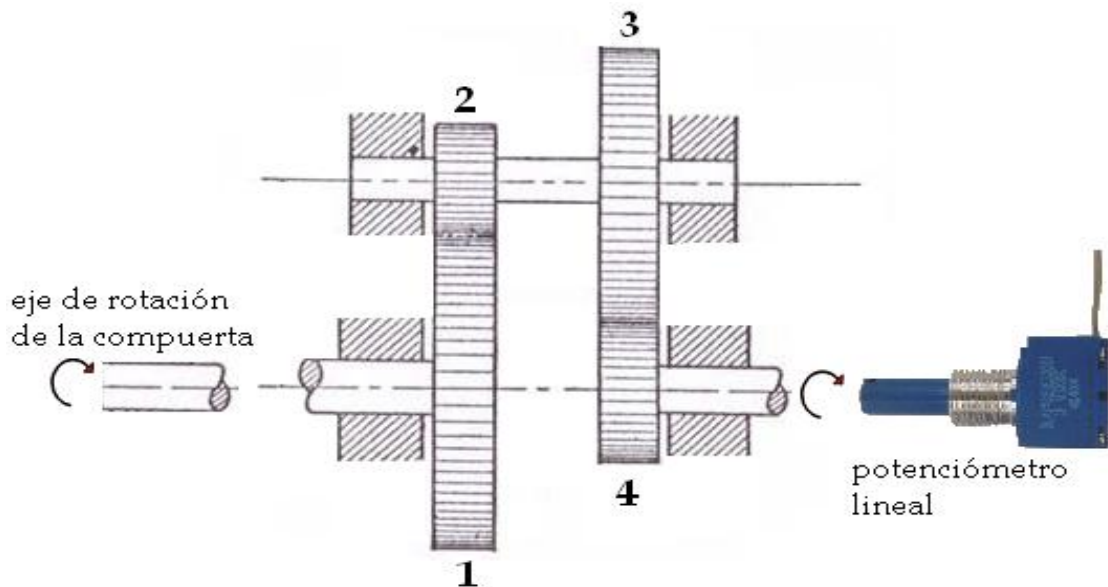
Para solucionar este problema se planteó una transmisión de engranajes de dos etapas, cada una con relación de transmisión de 2, siendo la relación total del tren de 4, de manera que cuando la compuerta gire 75° el eje del potenciómetro girará 300° aproximadamente, ver figura 28.

Tabla 1. Características de los engranajes del tren

Número de engranaje	Módulo	Número de dientes
1	1	40
2	1	20
3	1	40
4	1	20

Fuente: autores

Figura 28. Tren de engranajes para amplificación del movimiento de rotación del eje del potenciómetro.

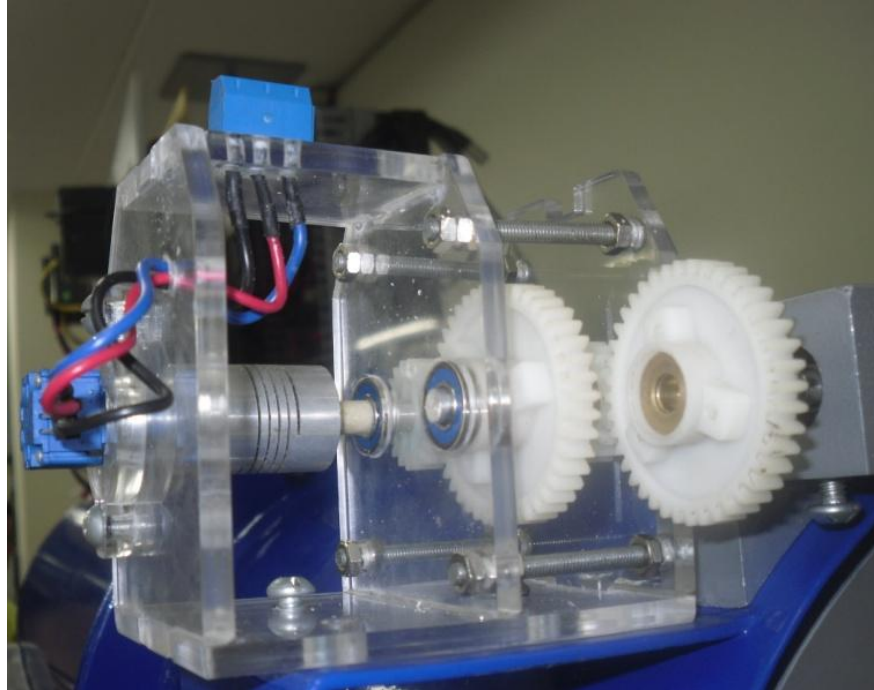


Fuente: autores.

Los ejes paralelos que alojan los engranajes, están soportados por rodamientos y estos están apoyados en paredes de acrílico de 5mm de espesor, estas paredes o secciones fueron cortadas con máquina laser cnc y unidas mediante pegante instantáneo. El acople entre el eje del potenciómetro y uno de los ejes del tren de

engranajes es hecho por medio de un acople flexible de aluminio de $\frac{1}{4}$ " x $\frac{1}{4}$ " ver figura 29.

Figura 29. Transmisión de engranajes



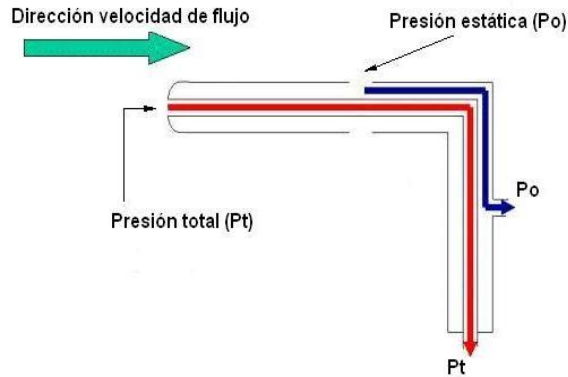
Fuente. Autores

3.5 Tubo de pitot

Un tubo de pitot es un elemento utilizado para la medición de flujo, este está constituido por dos conductos que detectan la presión de una corriente de fluido en dos puntos diferentes, estos conductos pueden estar unidos formando una unidad, como lo muestra la figura o separados. Uno de los tubos canaliza la presión de impacto o total (presión dinámica más presión estática), en un punto de la corriente y el otro la presión estática mediante un orificio, en la pared de conducción como lo muestra la figura 30.

Según la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible, la diferencia de presión dada entre la presión total y la estática, resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido:

Figura 30. Tubo de pitot.



Fuente: <http://fisicomaluco.com>

$$P_t - P_o = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \rightarrow V = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_t - P_o)}{\rho}}$$

$$V = 1.4142 \sqrt{\frac{(P_t - P_o)}{\rho}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$P_t - P_o =$ Presión dinámica (Pa)

$V =$ velocidad del fluido (m/s)

$P_t =$ presión total (Pa)

$P_o =$ presión estática (Pa)

$\rho =$ densidad del fluido Kg/m^3

Como se observa en la ecuación 1, la velocidad de la corriente de aire puede ser hallada midiendo la presión dinámica, la cual se determina mediante un transductor de presión diferencial como se describirá más adelante.

Debido a que la densidad del aire depende de la temperatura, esta debe ser tomada en cuenta para el cálculo de la velocidad; entonces suponiendo aire seco, la densidad del aire se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P \cdot M_a}{R \cdot T_a}$$

$\rho =$ densidad del aire Kg/m^3

$P =$ presión barométrica local (pa) 90657 [Pa]

$M_a =$ masa molar del aire seco = 28,97 $Kg/Kmol$

$R =$ constante universal de los gases = 8.314 $KJ/Kmol.K$

$T =$ temperatura absoluta (K)

Despejando la masa molar y la constante universal de los gases en la ecuación de la densidad, se obtiene una ecuación preparada para el tratamiento de la señal del transmisor que se empleará en la sección 7.2.2.

$$\rho = 3.467 * 10^{-3} * \frac{P_a}{T_a} \dots \dots \dots Ecuación 2$$

$\rho =$ densidad del aire Kg/m^3

$P =$ presión barométrica local (pa)

3.6 Diseño térmico

El diseño térmico tiene por objetivo seleccionar la potencia de las resistencias eléctricas para el calentamiento del flujo de aire que se induce dentro del ducto circular.

En la figura 31 se muestra el sistema de control regulado tipo MIMO, pero nos enfocamos exclusivamente en la regulación de temperatura.

El flujo másico de aire que se induce y se hace pasar dentro del ducto se halla mediante la siguiente ecuación:

$$m_a = V_a * \rho * A_{DUCTO}$$

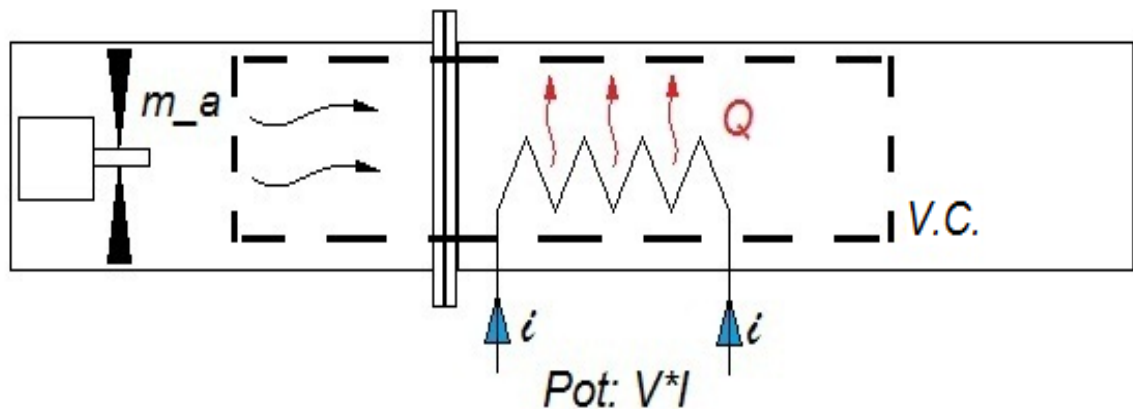
$\dot{m}_a = \text{flujo másico de aire (Kg/s)}$

$V_a = \text{velocidad del aire (m/s)}$

$\rho = \text{densidad del aire húmedo (1.2 Kg/m}^3\text{)}$

$A_{DUCTO} = \text{área interior del ducto (m}^2\text{)}$

Figura 31. Volumen de control dentro del ducto de aire.



Fuente autores.

El diámetro interno del ducto es de 24 cm, por lo tanto el área del círculo es:

$$A_{DUCTO} = \pi * \frac{\varphi^2}{4}$$

$$A_{DUCTO} = \pi * \frac{0.24^2}{4}$$

$$A_{DUCTO} = 0.04524m^2$$

Las velocidades de aire inducidas por el conjunto motor eléctrico-hélice son elevadas⁶, por el orden de los 80 a 100 kilómetros por hora, debido a esto, es razonable pensar que a mayores velocidades de aire que atraviesan el ducto, es también mayor la cantidad de masa de aire y menor el tiempo de residencia del

⁶ Con un mismo motor eléctrico se pueden llegar a valores elevados de fuerzas de empuje y velocidad de aire con la selección apropiada de la hélice. La hélice de 9x4.7 utilizada, permitió velocidades de aire de hasta 38 Km/hr aproximadamente

aire dentro del ducto, todo esto implica, insuficiencia en el calentamiento del aire por parte de las resistencias eléctricas.

El flujo que atraviesa el volumen de control de la figura 31 no es constante, es decir, varía debido a la velocidad de aire y se desplaza dentro de un rango de operación. El valor de la velocidad de aire dependerá del punto de consigna que se establezca en el sistema regulado tipo MIMO.

El cálculo de la potencia eléctrica, consistió en determinar de manera experimental el menor valor de velocidad de aire para la cual corresponde al máximo valor de temperatura. Esta velocidad de aire mínima debe ser suficiente para garantizar el no sobrecalentamiento de las resistencias eléctricas.

$$Velocidad_{mínima} = 1.5 \text{ m/s} = 5.4 \text{ km/hr}$$

Reemplazando los valores en la ecuación:

$$m_a = 1.5 * 1.2 * 0.045$$

$$m_a = 1.5 * 1.2 * 0.045$$

$$m_a = 0.10125 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

De acuerdo a la primera ley de la termodinámica obtenemos:

$$Q = m_a * C_p * \Delta T$$

$$\dot{Q} = \text{Flujo de calor transferido al aire (Kj/s)}$$

$$\dot{m}_a = \text{flujo másico de aire (Kg/s)}$$

$$C_p = \text{calor específico del aire (1.0120 Kj * Kg / C°)}$$

$$\Delta T = \text{cambio de temperatura del aire (40 °C)}$$

Sustituyendo los datos:

$$Q = 0.10125 * 1.0120 * 40$$

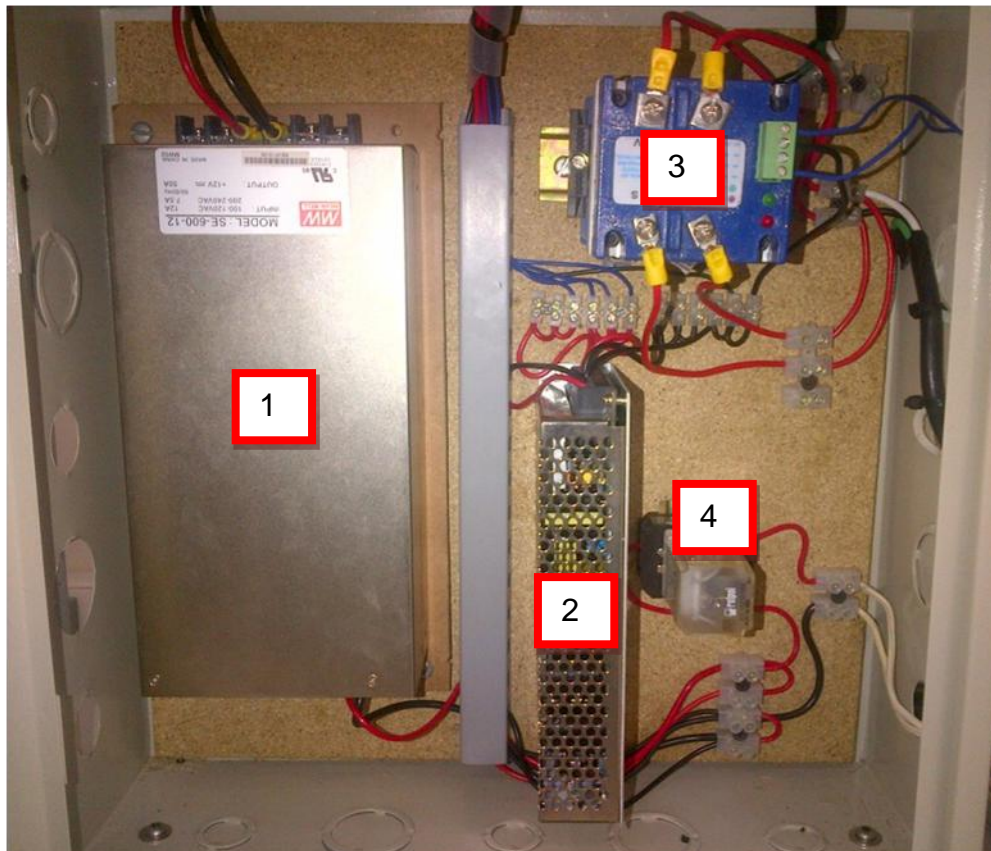
$$Q = 4.1 \text{ Watt}$$

Se emplearon 2 resistencias eléctricas cada una de 2000W de potencia y conectadas a un potencial de 220V. El consumo de corriente es de 18.18A. Este valor de potencia está limitada debido a que la acometida eléctrica del laboratorio de automatización industrial maneja 25 A.

3.7 Caja de dispositivos eléctricos

Los dispositivos eléctricos fueron alojados en una caja metálica como se observa en la figura 32.

Figura 32. Caja de dispositivos eléctricos



Fuente. Autores

- 1) **Fuente de poder tipo switching 12V:** Este dispositivo se encarga de suministrar energía al motor eléctrico, posee un voltaje de 12v y una capacidad de corriente de 50ADC, se conecta a la red a 120VAC.
- 2) **Fuente de poder tipo switching 24V:** este dispositivo se encarga de la alimentación eléctrica de los dispositivos como, transmisor de presión, relé, potenciómetro y tarjeta electrónica.
- 3) **Relay de estado sólido:** preactuador que se encarga de variar la potencia de las resistencias eléctricas proporcionalmente a la señal de control.
- 4) **Relay electromecánico:** este dispositivo está asociado al botón de parada de emergencia y se encarga de deshabilitar los circuitos de alimentación de las fuentes.

4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS

4.1 SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR

En relación con lo dicho en el capítulo 2, el objeto de aprendizaje permite la implementación de dos sistemas de control, uno de estos, es un sistema de control tipo SISO (una variable de entrada y una variable de salida). Para la implementación de este sistema de control, se acopla mediante brida y tornillo al ducto base o principal, un módulo o ducto de una longitud aproximada de 30cm, el cual posee una compuerta circular en un extremo; la incorporación de un soporte y una bisagra a la compuerta, permite el giro libre de ésta, en un rango aproximado de $0^{\circ} - 75^{\circ}$ (ver figura 33). El aire forzado por el conjunto motor-hélice, situado en el ducto base o principal, impacta la superficie de la compuerta produciendo en esta, un movimiento rotacional.

Figura 33. Sistema para control de posición angular.

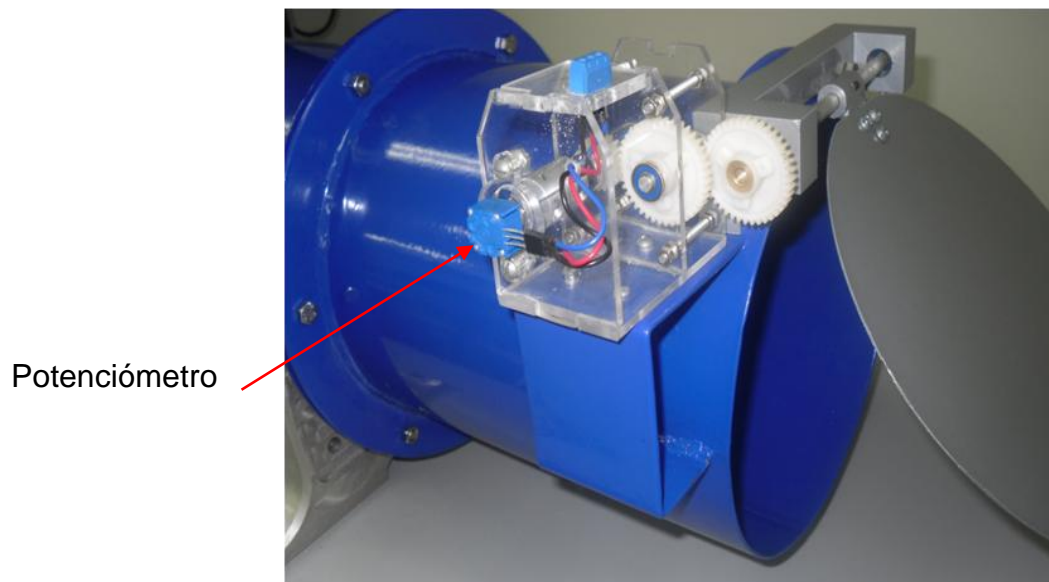


Fuente: autores

La posición angular de la compuerta es medida a través de un potenciómetro lineal, unido mecánicamente al eje de rotación de la compuerta a través de un tren

de engranajes de dos etapas y de relación de transmisión igual a 4. Este tren de engranajes permite ampliar el movimiento de rotación del eje potenciómetro, de tal manera que cuando la compuerta gire 75° el eje del potenciómetro girará 300° y así poder utilizar todo el rango de funcionamiento del potenciómetro junto con la resolución (completa) de la entrada analógica del PLC.

Figura 34. Módulo para control de posición.



Fuente: autores.

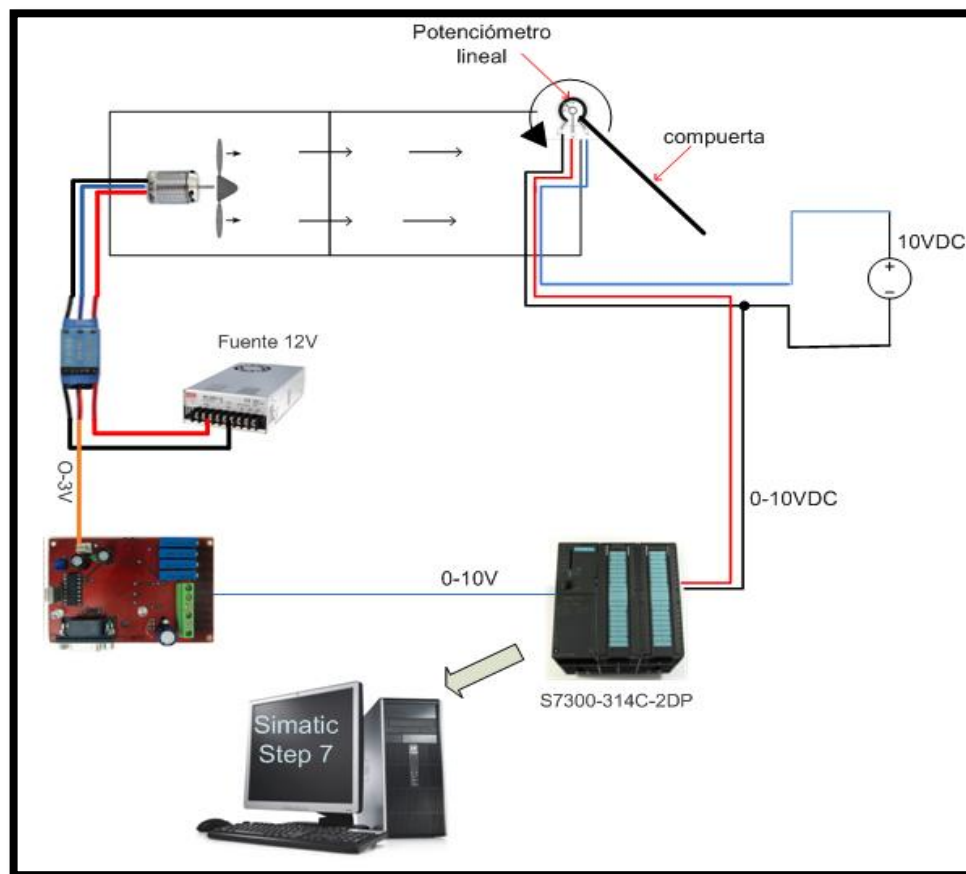
4.1.1 Lazo de control de posición angular

Este sistema se encarga de mantener la variable controlada (ángulo de rotación de la compuerta) lo más cerca posible al valor de referencia. Como el eje del potenciómetro se encuentra unido mecánicamente al de la compuerta, un giro de esta, hace que el potenciómetro experimente un cambio en su resistencia, lo cual es traducido en un cambio de voltaje de 0-10VDC (voltaje de alimentación del potenciómetro), de esta forma se relaciona el giro de la compuerta con una señal eléctrica.

Esta señal eléctrica es realimentada al controlador (PLC) ver figura 35, quien la compara con el valor de referencia introducido en el programa de usuario y

cargado a la CPU del PLC, la diferencia (señal de error) se le aplica un algoritmo de control de tipo P, PI, PID, seleccionado de acuerdo a la dinámica del proceso; este algoritmo de control es cargado a la memoria del PLC, y el usuario debe programarlo y sintonizarlo a través del software SIMATIC STEP7 disponible para la referencia de PLC S7300 de Siemens. La señal tratada corresponde a la señal de control, y esta es enviada por el controlador al variador de velocidad (speed control) para modificar de forma proporcional a esta señal, la velocidad de giro del motor. La variación de la velocidad de giro, permite finalmente aumentar o disminuir el flujo de aire que impacta la superficie de la compuerta y de esta forma llevar el ángulo de rotación de la compuerta lo más cerca posible del valor de referencia.

Figura 35. Lazo de control de posición angular

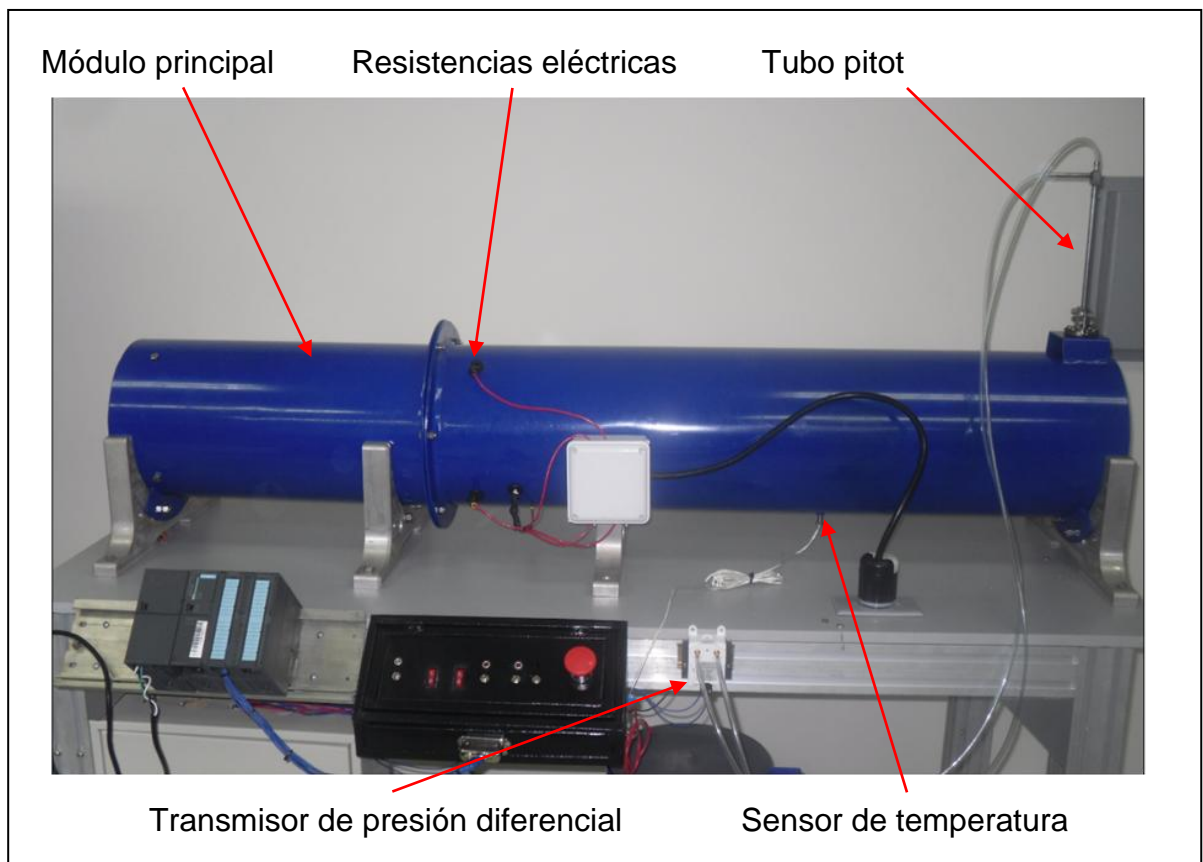


Fuente: autores

4.2 SISTEMA DE CONTROL REGULADO DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA DE AIRE TIPO MIMO

Para recrear este sistema de control, se debe retirar el módulo que posee la compuerta y en su lugar se instala mediante brida y tornillos, otro ducto con una longitud aproximada de 100cm, el cual posee una resistencia eléctrica, un sensor de temperatura, un tubo de pitot y un transmisor de presión diferencial. El aire forzado por el conjunto motor-hélice situado en el ducto base o principal, atraviesa al ducto acoplado donde es calentado por dos resistencias en paralelo de 2000w cada una, ver figura 36.

Figura 36. Configuración sistema multivariable regulado



Fuente: autores

Las variables a controlar de forma simultánea, corresponden a la temperatura y velocidad del aire, mientras que las variables manipuladas corresponden a la velocidad de giro del motor y la potencia disipada por las resistencias eléctricas. La medición de la temperatura del aire, se realiza por medio de una termoresistencia PT100, mientras que la velocidad es medida sensando la presión dinámica (presión total menos presión estática) en el ducto, por medio de un tubo de pitot y un transmisor de presión diferencial. Este valor de presión y junto con la ecuación de Bernoulli determinan la velocidad de la corriente de aire (ver sección 3.5)

Las variables de temperatura y velocidad son realimentadas al controlador para ser comparadas con las de referencia, para luego ser tratadas por medio de un algoritmo de control tipo P, PI, PID, que deben ser seleccionados de acuerdo a la dinámica del proceso, finalmente las señales de control son enviadas a los actuadores quienes se encargan de modificar las condiciones de la planta, hasta un valor cercano al de referencia. Los valores de las constantes del controlador PID son hallados por medio de métodos empíricos sugeridos por investigadores como ZIEGLER Y NICHOLS, como se explicara en capítulos posteriores.

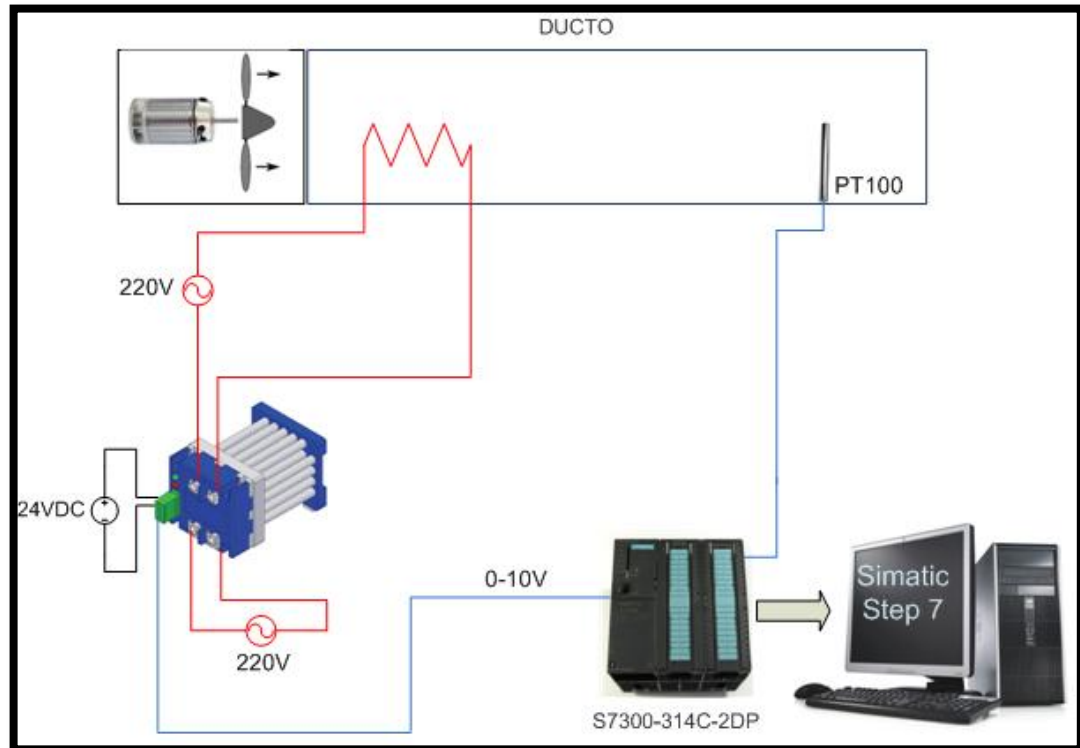
Los lazos de control que componen este sistema de dos variables de entrada y dos de salida, se explican de forma individual y con más detalle a continuación.

4.2.1 Lazo de control regulado de temperatura

Este sistema es el encargado de mantener la temperatura lo más cerca posible, al valor de referencia. La señal de temperatura percibida por el PT100, es transmitida al controlador, el cual la compara con la referencia y a la diferencia (error), le aplica un mecanismo de control, necesario para ajustar el proceso al valor deseado. El mecanismo más utilizado en los sistemas automatizados es de tipo P, PI, PID y debe ser seleccionado por el usuario de acuerdo a la dinámica del proceso, este mecanismo de control se encuentra incorporado en el software

STEP 7 a través de los bloques de función FB41 y FB58, estos bloques deben ser programados y cargados a la CPU del PLC.

Figura 37. Lazo de control regulado de temperatura.



Fuentes: autores

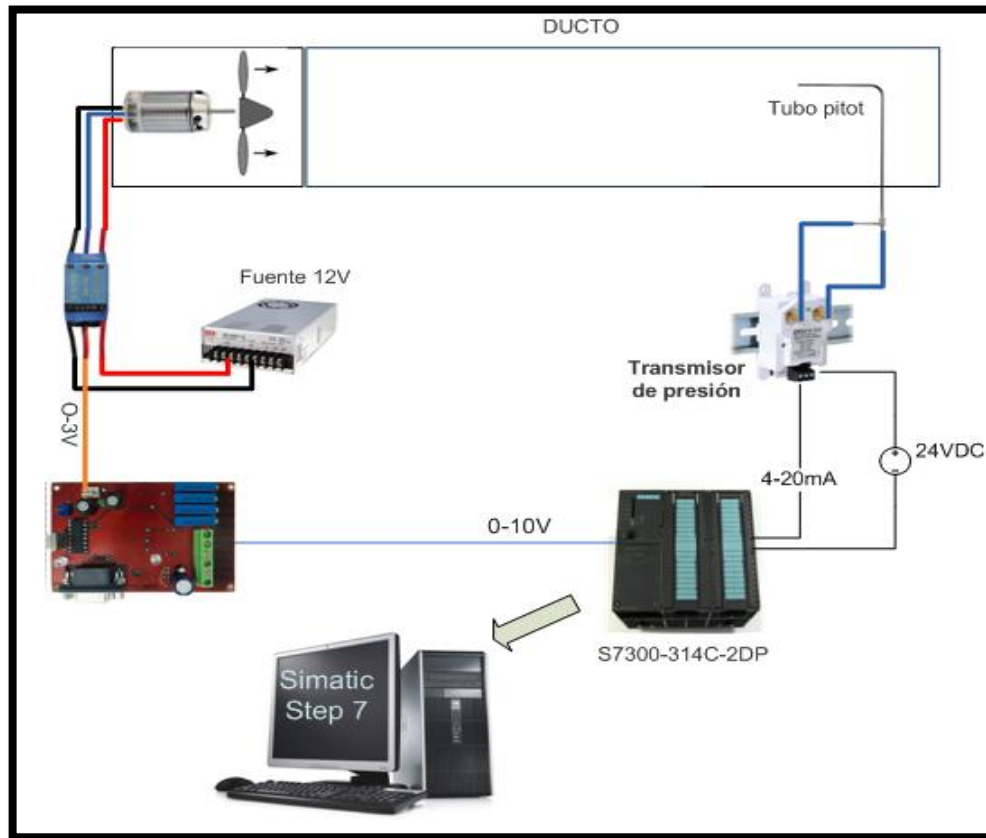
La señal tratada corresponde a la señal de control y está representada en un voltaje variable de 0-10VDC, el cual es percibido por el variador de potencia, que de forma proporcional a este voltaje ajusta la potencia disipada por las resistencias eléctricas, modificando así la temperatura de la corriente de aire hasta un valor cercano al de referencia.

4.2.2 Lazo de control regulado de velocidad de aire

Como se observa en la figura 38, las presiones total y estática detectadas en el ducto por el tubo de pitot, son canalizadas a través de dos mangueras de plástico

hacia un transmisor de presión diferencial, donde la diferencia (presión dinámica) entre estas, es relacionada de forma proporcional con una señal de corriente de 4 – 20mA, esta señal de presión es realimentada al controlador, donde se relaciona con la velocidad del aire, mediante la ecuación de Bernoulli insertada por el usuario a través del software STEP 7 en el programa de usuario. El valor de velocidad obtenido, es comparado con el valor de referencia y a esta diferencia o error se aplica un algoritmo de control de tipo P, PI, PID, seleccionado de acuerdo a la dinámica del proceso y que se carga en el PLC S7300 mediante el software STEP7. La señal resultante representada en un voltaje de 0-10VDC, es enviada al variador de velocidad (speed control), para que éste de forma proporcional varíe la velocidad de giro del motor y este a su vez influya en la velocidad de la corriente de aire, llevándola lo más cerca posible del valor de referencia.

Figura 38. Lazo de control regulado de velocidad de aire.



Fuente: autores.

5 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema, es un conjunto de atributos y propiedades que caracterizan al objeto de estudio, ahora bien, los sistemas de control poseen ciertos elementos principales y similares a los implementados en este libro que son: los elementos sensores, la unidad controladora y los elementos de salida. Los dos sistemas de control aplicados en nuestro trabajo de grado contienen elementos que los convierten en únicos, sin embargo, como se mencionó en el capítulo 2, estos sistemas, comparten una estructura base o módulo principal y se describirá a continuación.

5.1 MÓDULO PRINCIPAL DEL OBJETO DE APRENDIZAJE

5.1.1 Motor eléctrico sin escobillas DC (brushless)

Elemento encargado de la recepción de la señal de control acondicionada⁷, tiene por objetivo el suministro adecuado de flujo de aire dentro del ducto a las condiciones de entrada establecidas.

La selección de este tipo de motor eléctrico se priorizo por 2 razones fundamentales:

- 1) Motor que no emplea escobillas para la realización del cambio de polaridad en el rotor, lo que implica mayor duración del elemento al no existir componentes en contacto.
- 2) Aumento del rendimiento del equipo y mayor aprovechamiento energético, debido a que son sistemas sin rozamiento.

A continuación se muestra una imagen del motor adquirido.

⁷ Señal previamente tratada con el fin de acoplarse al nivel de lectura del motor eléctrico.

Figura 39. Motor eléctrico sin escobillas



Fuente: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__17920__TURNIGY_AerodriveExp_SK_3542_1250kv_700W.html

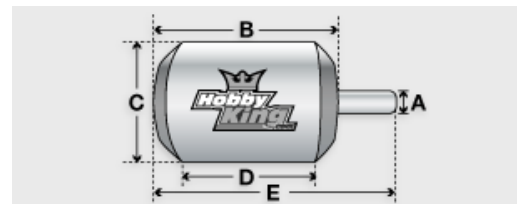
El motor eléctrico adquirido es de marca TURNIGY de referencia SK3542-1250, manufacturada de la casa Hobby King.

Las características técnicas de este dispositivo son las siguientes:

Tabla 2. Características técnicas del motor eléctrico brushless.

Características técnicas	
Kv (rpm/v)	1230
Peso (g)	24
Máxima corriente (A)	40
Resistencia (mh)	30
Máximo voltaje (V)	15
Potencia (w)	700
Eje A (mm)	4
Longitud B (mm)	43
Diámetro C (mm)	35
Longitud de cilindro C (mm)	30
Longitud total E (mm)	63

Figura 40. Imagen dimensional motor eléctrico Turnigy SK3542-1250

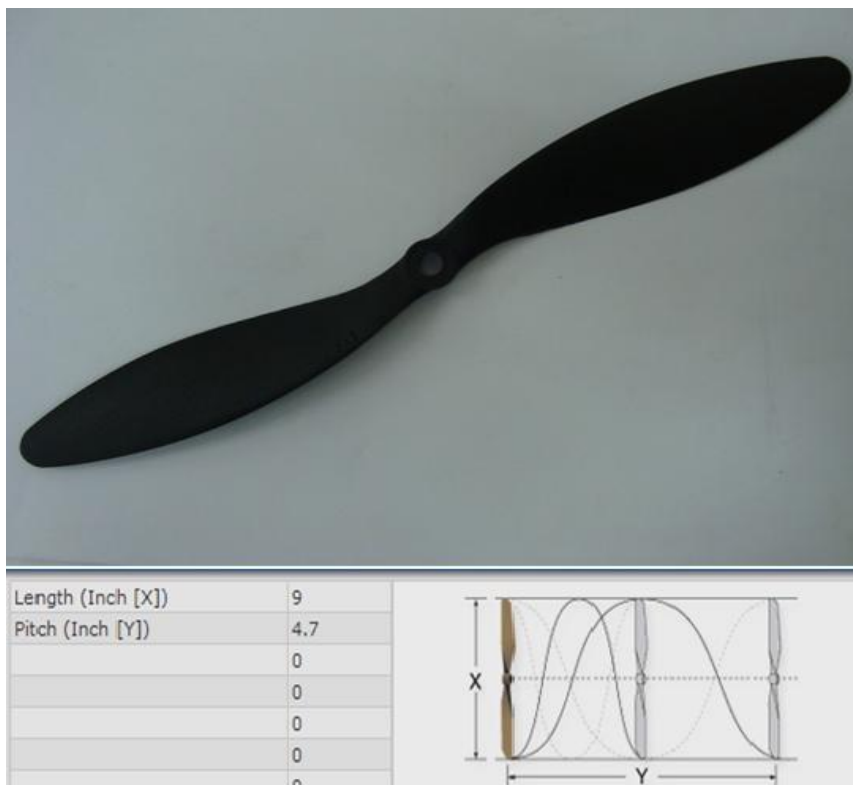


Fuente: <http://www.hobbyking.com>

5.1.2 Hélice

La hélice empleada para inducir flujo de aire a través del ducto corresponde a la mostrada en la figura 41 y está fabricada con resina de polímero. Las especificaciones de esta son: 9x4.7 donde el primer valor corresponde a la longitud o diámetro en pulgadas de la hélice y el segundo al paso o distancia la cual avanza por cada vuelta.

Figura 41. Hélice



Fuente: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__9845__SF_E_Prop_9x4_7_229x119_5mm_w_Adapters_Black_5pcs_bag_.html.

5.1.3 Variador de velocidad (speed control)

Elemento preactuador en nuestro lazo de control, adecua la señal suministrada por el plc y entrega finalmente al motor eléctrico una señal proporcional en PWM (pulse width modulation).

Figura 42. Variador de velocidad Hobby-King



Fuente:http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__10015__Hobbyking_SS_Heli_Series_70_80A_ESC_w_UBEC.html

El variador adquirido es de marca Hobby King de la serie SS Heli, y se seleccionó tomando como referencia el factor de máxima corriente de operación en el motor (ver sección 5.1.1), eligiendo en el variador de velocidad un valor mayor. El elemento cuenta con las siguientes especificaciones:

- ❖ Corriente de operación constante de 70A y máxima de 80A.
- ❖ Peso: 63 g
- ❖ Tamaño: 90x39x17 mm
- ❖ celdas: 6-20Ni MH ~ 2-7S Li Po
- ❖ señal de entrada de 0-3V

Como se mencionó anteriormente se deduce que este dispositivo modula la potencia entregada por la fuente que alimenta simultáneamente a este y al motor eléctrico; El variador de velocidad (speed control) efectúa su acción en relación a su señal de entrada de 0 a 3V, señal proporcionada teóricamente por el controlador. El autómata utilizado incorpora salidas analógicas integradas de voltaje de 0 a 10V (ver capítulo 5), razón por la cual se recurre al diseño e

incorporación de una tarjeta⁸ electrónica para la normalización y adecuación de las señales (Ver anexo E).

5.1.4 Fuente de alimentación 12 VDC

Se seleccionó una fuente de conmutación de 12VDC, con conexión 120 AC como la mostrada en la figura 43, esta fuente está destinada para la alimentación exclusiva del motor eléctrico, la selección de la fuente consistió en satisfacer las condiciones de operación máxima del motor eléctrico donde los parámetros que se tuvieron en cuenta para tal fin son:

- ✓ Corriente de operación máxima en el motor 40 A / Corriente de entrega máxima de la fuente de 50 A.
- ✓ Voltaje máximo de operación en el motor 15 V/ Voltaje a la salida de la fuente 12VDC.

Figura 43. Fuente de alimentación de conmutación.



Fuente: catálogo de mean well, power supply SE-600 series.

La fuente es de marca mean well, modelo SE-600, donde sus características técnicas se encuentran en la siguiente figura.

⁸ Debido al complejo sistema electrónico que implica la elaboración de esta tarjeta, se solicita el apoyo, asesoría y colaboración de estudiantes de ingeniería electrónica para tal fin.

Figura 44. Especificaciones técnicas fuente conmutada.

MODEL		SE-600-5	SE-600-12	SE-600-15	SE-600-24	SE-600-27
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	27V
	RATED CURRENT	100A	50A	40A	25A	22.2A
	CURRENT RANGE	0 ~ 100A	0 ~ 50A	0 ~ 40A	0 ~ 25A	0 ~ 22.2A
	RATED POWER	500W	600W	600W	600W	599.4W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.75 ~ 5.5V	10 ~ 13.5V	13.5 ~ 16.5V	22 ~ 26.4V	24 ~ 30V
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION	±2.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	1000ms, 50ms/230VAC 1000ms, 50ms/115VAC at full load				
HOLD UP TIME (Typ.)	20ms/230VAC 16ms/115VAC at full load					
INPUT	VOLTAGE RANGE	90 ~ 132VAC / 180 ~ 264VAC selected by switch				254 ~ 370VDC
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz				
	EFFICIENCY (Typ.)	78%	83%	84%	87%	87%
	AC CURRENT (Typ.)	12A/115VAC	7.5A/230VAC			
	INRUSH CURRENT (Typ.)	30A/115VAC	60A/230VAC			
	LEAKAGE CURRENT	<2.0mA / 240VAC				
PROTECTION	OVERLOAD	105 ~ 125% rated output power Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover				
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 6.3V	13.8 ~ 16.2V	18 ~ 21V	27.6 ~ 32.4V	31 ~ 36.5V
	OVER TEMPERATURE	85°C ±5°C (TSW1) detect on heatsink of power transistor Protection type : Shut down o/p voltage, recovers automatically after temperature goes down				

Fuente: catálogo de mean well, power supply SE-600 series.

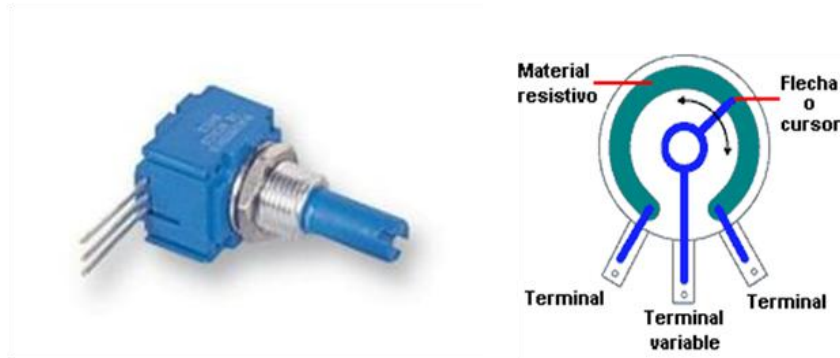
5.2 SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR

5.2.1 Potenciómetro lineal.

Es un componente electrónico similar a los resistores pero cuya resistencia eléctrica es variable. Estos elementos son aplicados como transductores de posición debido a que el giro de sus escobillas sobre una pista plástica resistiva y en función del punto donde se encuentre, entregara un valor de resistencia determinado.

Al ser alimentado por dos de sus terminales se podrá medir el voltaje variable por un tercer terminal.

Figura 45. Potenciómetro lineal



Fuente: Wikipedia, la enciclopedia libre.

Las características técnicas del potenciómetro seleccionado son:

- ❖ Resistencia variable de 0 a 10k ohm.
- ❖ Rotación del eje 0 a 300 grados.
- ❖ Temperatura de operación de -40°C a 125°C.
- ❖ Diámetro de rosca de 9mm aprox.
- ❖ Fabricante BOURNS.

Figura 46. Potenciómetro lineal seleccionado.

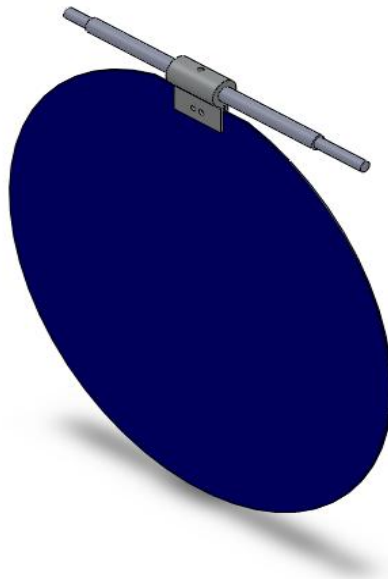


Fuente: Datasheet industrial panel control (potentiometers), Bourns [en línea]
http://www.bourns.com/data/global/pdfs/91_95.pdf.

5.2.2 Compuerta ensamblada

La tapa tiene un diámetro de 24 cm aproximadamente, diámetro similar a los ductos indicados en apartados anteriores, con un pequeño corte en la parte superior para la sujeción con bisagra. El material de la compuerta, bisagra y eje son de aluminio con el fin de disminuir el consumo energético del motor y garantizar el levantamiento de la compuerta. En la figura 47 se observa el modo de ensamble de la compuerta, el conjunto bisagra-tapa se sujeta mediante 3 tornillos pasantes, permitiendo con facilidad el montaje y desmontaje de futuras pruebas con diversas geometrías. La bisagra esta solidaria al eje mediante un tornillo prisionero.

Figura 47. Compuerta ensamblada

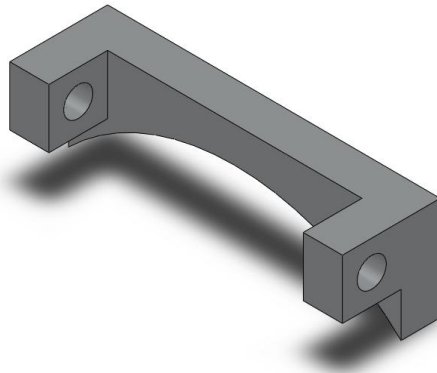


Fuente: autores.

5.2.3 Soporte de la compuerta

Se requiere de un elemento fijo y solidario al ducto (módulo compuerta) que sustente la compuerta y permita el giro de esta. El soporte diseñado para tal función se puede observar en la figura 48. Cuyo material es de aluminio fundido y llevado posteriormente a un proceso de fresado cnc.

Figura 48. Soporte de la compuerta



Fuente: Autores

5.2.4 Tren de engranajes

Tal como se describió en la sección 55, el objetivo del tren es amplificar por 4 veces, el giro de la compuerta. Una vez realizada esta amplificación, aprovechamos la capacidad de resolución de lectura de la CPU 314C-2DP, este proceso se encuentra descrito en el capítulo 4.

5.2.5 Acople flexible

Elemento utilizado para la transmisión de potencia desde el eje del potenciómetro al eje final del tren de engranajes, se selecciona un acople de tipo flexible básicamente porque estos elementos compensan la inevitable desalineación y amortiguan las vibraciones. La siguiente figura muestra el acople adquirido.

Figura 49. Acople flexible



Fuente: autores.

Características técnicas:

- ❖ Diámetros internos de 6.35x6.35 mm
- ❖ Aluminio
- ❖ Acople manufacturados en máquinas CNC.

5.3 SISTEMA DE CONTROL REGULADO MULTIVARIABLE

5.3.1 Sensor de temperatura PT100

Para la medición de temperatura se seleccionó una termoresistencia (RTD) pt100 estándar a dos hilos, la cual consiste en un alambre de platino, que a 0 °C tiene 100 ohm de resistencia y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica.

La selección de la RTD (resistance temperature detector) se fundamentó en los siguientes factores:

- ✓ El autómata programable Siemens S7 314C-2DP utilizado, para la ejecución del lazo de control de temperatura, posee una entrada integrada especial de tipo analógica, para la conexión directa de sensores resistivos (termistores, termocuplas y pt100 a dos hilos).
- ✓ Alta resistividad, lo que permite una mayor variación de resistencia por °C.
- ✓ Alto coeficiente de temperatura y relación lineal resistencia-temperatura, para ciertos rangos de temperatura.
- ✓ Estabilidad de sus características durante su vida útil.

Figura 50. Termoresistencia elemento PT100 estándar.



Fuente: <http://www.electricasbogota.com/detalles/temperatura/317-56601>

Las características importantes del sensor PT100, se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 3. Características técnicas del sensor PT100

Características	Valor
Rango de temperatura	-100 °C a 400 °C.
Exactitud:	0.01 °C.
Resistividad:	9.83 $\mu\Omega/cm$.
Número de hilos	2
Material del bulbo	Acero inoxidable 316.
Fabricante	Autonics

Fuente: Autores

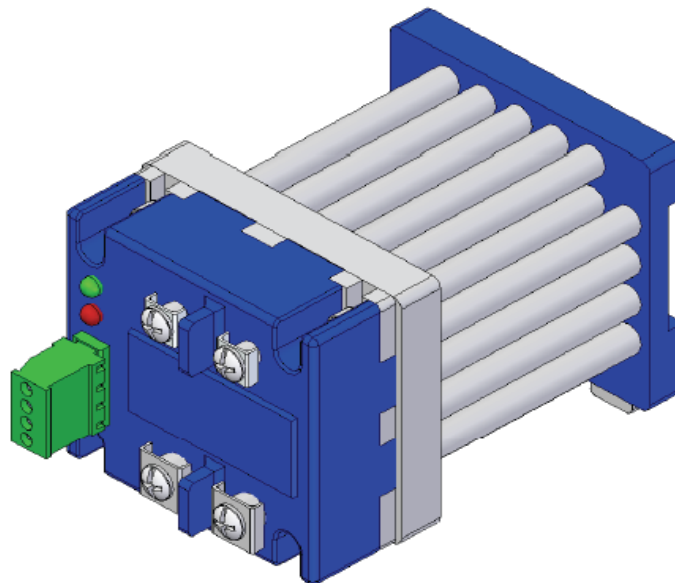
5.3.2 Variador de potencia de estado sólido, por control de fase microcontrolado.

La señal de control que varía la potencia de las resistencias eléctricas, es percibida por un dispositivo preactuador, el cual ajusta el voltaje aplicado a las resistencias de forma proporcional a esta señal.

El dispositivo preactuador empleado en el objeto de aprendizaje, es un variador de potencia con control por ángulo de fase, del fabricante optec y de referencia

OPS48P40G, el cual está basado en la regulación del ángulo de disparo de tiristores incorporados. Usualmente se habla de ángulo de disparo, o ángulo de fase α , como el instante de tiempo (expresado en grados) a partir del paso por cero de la tensión de entrada, en el que se dispara un tiristor. Para el caso de una carga resistiva, el ángulo de disparo puede valer entre 0° y 180° . Los valores de tensión, corriente y potencia en la carga dependerán, no solo del ángulo de disparo, sino que también del tipo de carga alimentada.

Figura 51. Variador de potencia con disipador de calor. Fuente Optec.



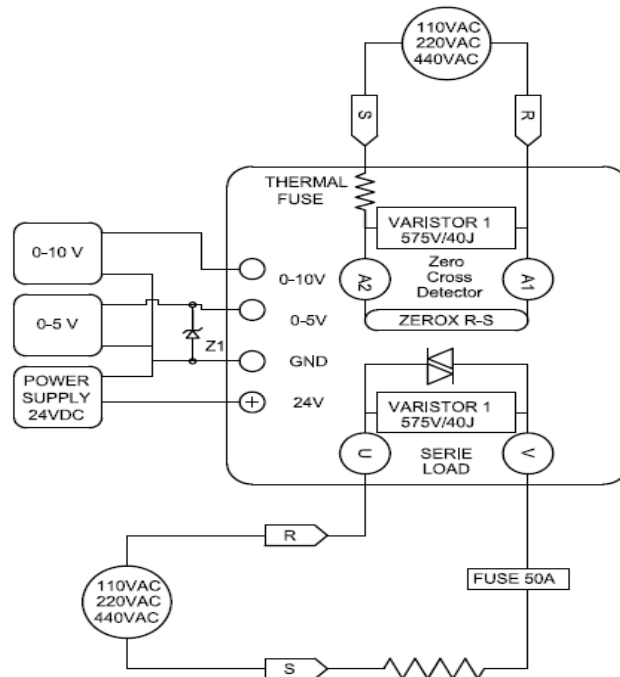
Fuente: www.optecpower.com

Estos variadores son destinados a procesos donde se requiere gran precisión, la salida en estado sólido permite ajustar la potencia en un rango lineal de 0-100% del voltaje aplicado, Estos dispositivos proporcionan un aumento de la vida útil de los elementos de calentamiento al funcionar en voltaje reducido constante, sin conmutaciones.

Algunas características de este variador de potencia son:

- ❖ Manejo de cargas con consumo de corriente de hasta 40 Arms
- ❖ Cargas con voltajes de línea de 90-575 VACrms
- ❖ Voltajes de control de 0-5Vdc ó de 0-10Vdc
- ❖ Salida proporcional
- ❖ Ideal para cargas resistivas

Figura 52. Esquema de conexión variador de potencia.



Fuente: www.optecpower.com

5.3.3 Resistencias eléctricas

Para el calentamiento de la corriente de aire, se seleccionaron dos resistencias eléctricas, con una potencia individual de 2000W y voltaje de trabajo de 220V, conexas en paralelo, estas resistencias se adecuaron a la geometría circular del ducto para su montaje, ver figura 53. Estos elementos están compuestos por alambres, cuyo material posee alta resistencia eléctrica, estos son colocados dentro de una vaina de metal, los cuales se aíslan eléctricamente, de tal manera

que el conjunto se encuentra compactado, lo cual hace una resistencia de construcción sólida.

Figura 53. Resistencias eléctricas



Fuente Autores

5.3.4 Tubo de Pitot

El tubo de pitot seleccionado, para llevar a cabo la medición de la presión dinámica es como el mostrado en la figura 54, del fabricante DWYER INSTRUMENTS.

Figura 54. Tubo Pitot.



Fuente: DWYER INSTRUMENTS

Algunas características del tubo pitot, se encuentran en la tabla 4. Para mayor información ver ANEXO E5.

Tabla 4. Características del tubo pitot

CARACTERISTICA	VALOR
Temperatura de operación	Hasta 815 C°
Constante del tubo	1
Longitud	12 pulg.
Diámetro externo	5/16 pulg.
Diámetro interno	1/8 pulg.
Ambiente de operación	Gases libres de partículas.

Fuente: Autores

5.3.5 Transmisor de presión diferencial

Es un dispositivo que percibe por medio de dos conductos, dos valores de presión uno alto y otro bajo, la diferencia entre estas dos presiones es relacionada de forma proporcional, con un valor de corriente estándar de 4-20mA.

Para la selección del transmisor de presión, se empleó un anemómetro, con el fin de medir el rango máximo de velocidad del aire, cuando el motor gira a sus máximas revoluciones, teniendo en cuenta un calentamiento máximo de aire de 34° C para este valor de velocidad; esto con el fin de determinar el rango de presión diferencial máximo que se presenta.

Tabla 5. Rangos máximos de velocidad, a máxima revoluciones del motor.

Prueba	Velocidad (m/s)	Presión dinámica (Pa)	In de H ₂ O
1	10.15	61.50	0,25
2	10.17	61.74	0,25
3	10.14	61.38	0,25

Fuente: autores.

Como se observa en la tabla, la velocidad máxima del aire, produce una presión dinámica máxima de 0.25 in de H₂O. De acuerdo a esto se seleccionó un sensor de presión diferencial de rango 0 - 0.25in H₂O, como el mostrado en la figura 55.

Figura 55. Sensor de presión diferencial. Fuente Automation direct



Fuente: Catálogo Automation direct

Algunas características técnicas de este sensor son:

Tabla 6. Características técnicas del transmisor de presión diferencial

Características	valor
Rango de presión	0-0.25in de H ₂ O
Rango de salida	4-20mA
Voltaje de alimentación	12-36 VDC
Sobre presión	15psid

Fuente: autores

Para mayor información ver ANEXO E6.

6 CARACTERÍSTICAS DEL AUTÓMATA PROGRAMABLE S7 314C-2DP

El autómata programable utilizado es de la familia Siemens, del tipo SIMATIC S7-300 gama media. Posee una CPU 314C-2DP muy sofisticada y moderna el cual cuenta con características importantes de hardware como entradas y salidas digitales integradas, entradas analógicas de intensidad, tensión y resistencia, salidas analógicas de tensión e intensidad y un bus DP (periferia distribuida), además de otras prestaciones que se pueden incluir en posibles ampliaciones de hardware.

Figura 56. CPU compacta 314C-2DP del S7-300



Fuente: <http://support.automation.siemens.com>

El autómata programable está constituido por diversos componentes que permiten la operatividad y el buen funcionamiento, a continuación se enuncian los más importantes:

- CPU: es la parte inteligente del sistema, y es la encargada de la ejecución del programa de usuario. En este proyecto se utiliza la CPU 314C-2DP.

- Fuente de alimentación PS: convierte la tensión de red (110VAC/220VAC) en una tensión DC de 24V.
- Módulos de señales SM: se encargan de adaptar los diferentes niveles de señal del proceso al nivel interno del S7-300. La CPU 314C-2DP, trae integrada módulos para tratamiento de E/S digitales y E/S analógicas.

6.1 SEÑALES ANÁLOGAS EN EL AUTÓMATA S7 314C-2DP

El proyecto de grado desarrollado tiene como propósito el manejo de señales analógicas, por tal razón se estudia en este capítulo el tratamiento que un autómata S7-300 debe realizar para la interpretación de dichas señales.

Una señal análoga es aquella señal que representa una variación continua a lo largo del tiempo, pueden tomar teóricamente infinitos valores comprendidos entre un máximo y un mínimo. Las señales analógicas suelen representar magnitudes físicas tales como presión, posición, temperatura, velocidad etc. Mediante una tensión o corrientes proporcionales a su valor.

Tabla 7. Entradas y salidas analógicas integradas en S7-314C-2DP.

	Cantidad de entradas/salidas	Separación galvánica	Margen de entrada	Resolución	Valor máximo de entrada (límites de destrucción)
ENTRADAS ANALÓGICAS	5	Sí	-10....10V	11 bits+signo	30V, 0.5mA
			-20....20mA		5V, 50mA.
			Pt100		-
			0 a 600 ohmios		-
SALIDAS ANALÓGICAS	2	Sí	-10....10V	11 bits+signo	55mA
			-20....20mA		14V

Fuente: autores.

Con el fin de trabajar señales analógicas, el autómata S7 314C-2DP dispone de 5 entradas analógicas integradas (4 entradas por voltaje/intensidad y 1 entrada por resistencia) y dos salidas analógicas integradas, aunque esta limitante se puede llegar a aumentar considerablemente con el uso de módulos de expansión. En la tabla 7 se consignan las características de las entradas y salidas analógicas integradas del autómata.

La CPU 314C-2DP acepta y emite medidas de tensión e intensidad como se puede observar en la tabla 7, basta con realizar la configuración hardware adecuada desde el software STEP 7 y el tipo de cableado apropiado. Un aspecto destacable de esta CPU, es que en el último canal de AI (entradas analógicas) integradas, permite la conexión directa de sensores resistivos del tipo pt100, termopares o termistores.

La asignación de direcciones de las entradas y salidas analógicas integradas es libre y toman como referencia el primer canal o canal 0 de la periferia; Este canal se le puede atribuir el número de dirección deseado, mientras que a los canales restantes se le suma un coeficiente que se indica en la siguiente tabla 8.

Tabla 8. Direcciones asignadas a entradas y salidas analógicas integradas.

Norma	Posicionamiento	1)	
		1	
AI (Ch0)	V	2 Ø	PEWx+0
	I	3 Ø	
	C	4 Ø	
AI (Ch1)	V	5 Ø	PEWx+2
	I	6 Ø	
	C	7 Ø	
AI (Ch2)	V	8 Ø	PEWx+4
	I	9 Ø	
	C	10 Ø	
AI (Ch3)	V	11 Ø	PEWx+6
	I	12 Ø	
	C	13 Ø	
PT 100 (Ch4)		14 Ø	PEWx+8
		15 Ø	
AO (Ch0)	V	16 Ø	PAWx+0
	A	17 Ø	
AO (Ch1)	V	18 Ø	PAWx+2
	A	19 Ø	
		20 Ø	M _{ANA}

1) sólo CPU 314C-2

Fuente: <http://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/controladores/Documents/S7300ManualProducto.pdf>_PAG 285

De la tabla anterior se puede notar la peculiaridad de la asignación de direcciones que Siemens acostumbra tanto en entradas como en salidas analógicas y que no sobra nombrar:

- ✓ PEW: siglas que se refieren a las entradas analógicas integradas y que al momento de digitalizarse se almacenan en formato de palabra.
- ✓ PAW: siglas que se refieren a la salidas analógicas integradas y que al momento de digitalizarse se almacenan en formato palabra.

En la siguiente tabla 9 se muestra la asignación de direcciones de entradas y salidas analógicas por default de la CPU 314C-2DP. Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó esta forma de asignación.

Tabla 9. Direccionamiento por default de la CPU314C-2DP

ENTRADAS		SALIDAS	
CANAL	DIRECCIÓN	CANAL	DIRECCIÓN
0	PEW 752	0	PAW 752
1	PEW 754	1	PAW 754
2	PEW756		
3	PEW 758		
4	PEW 760		

Fuente: Autores.

6.2 REPRESENTACIÓN DE SEÑALES ANALÓGICAS EN AUTÓMATA S7-300.

Cuando la CPU procesa variables analógicas, tan solo lo puede hacer en modo digital, con ello para poder procesar los valores de entrada y salida, se deben realizar las conversiones A/D y D/A respectivamente. El proceso de conversión de señales analógicas de entrada A/D y la conversión de señales digitales de salida D/A es similar, por esta razón, se describe únicamente el proceso de representación A/D.

Las variables analógicas de entrada en la CPU, son digitalizadas en un número binario que se deposita en dos bytes (estructura palabra) y cuenta con las siguientes características:

- ✓ Es interpretado por la CPU como un entero con signo (INT).
- ✓ Como todos los datos INT cuenta con un bit de signo (bit no. 15).
- ✓ Posee algunos bits irrelevantes, según sea la resolución. En la tabla 10 se indica un resolución de “11 bits + signo” para entradas y salidas integradas de S7-314C-2DP, lo cual muestra la inexistencia de 4 bits irrelevantes.

Tabla 10. Resolución de la CPU 314C-2DP

	Byte alto								Byte bajo							
Número del bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Peso del bit	2^{15}	2^{14}	2^{13}	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
Resolución de 11bits+signo	S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X

Fuente: autores.

En la tabla 10 se observa con una x los bits irrelevantes, el último bit representa el bit de signo, el cual se codifica como 0 cuando es un número positivo, y se codifica 1 cuando es un número entero negativo.

7 CONFIGURACIÓN HARDWARE Y TRATAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS PARA LOS SISTEMAS DE CONTROL, EN EL SOFTWARE STEP 7

Introducción

STEP 7 es el software utilizado para configurar y programar los autómatas SIMATIC S7-300. Es un software básico, concebido para tareas de automatización y cuenta con lenguajes de programación AWL (lista de instrucciones), KOP (esquema de contactos) y FUP (diagrama de funciones). Además dispone de una interfaz de usuario, Administrador Simatic, el cual se visualiza en un entorno agradable, confortable e idóneo para el trabajo ordenado de proyectos que se creen y se trabajen en él.

Los sistemas de control que se trabajan en este libro, están configurados con los reguladores PID de la estructura siemens. Step 7 lleva integrada funciones PID, que facilitan la utilización de estos algoritmos y primordialmente no requieren de extensos conocimientos de programación. En este capítulo se muestra una explicación puntual del proceso de configuración y tratamiento de señal de los sistemas implementados, sin embargo, en el manual de operación esta información se encuentra más detallada.

7.1 CONFIGURACIÓN HARDWARE EN EL ENTORNO STEP 7

Para el correcto funcionamiento de los procesos continuos que se pretenden regular, es necesaria, la configuración hardware en el Administrador Simatic, esto con el fin de establecer la comunicación del PC-Autómata y de sintonizar los sensores y preactuadores del proceso controlado dentro de sus márgenes nominales de operación.

Para entrar en la interfaz de usuario del software step 7, basta con seguir los siguientes pasos:

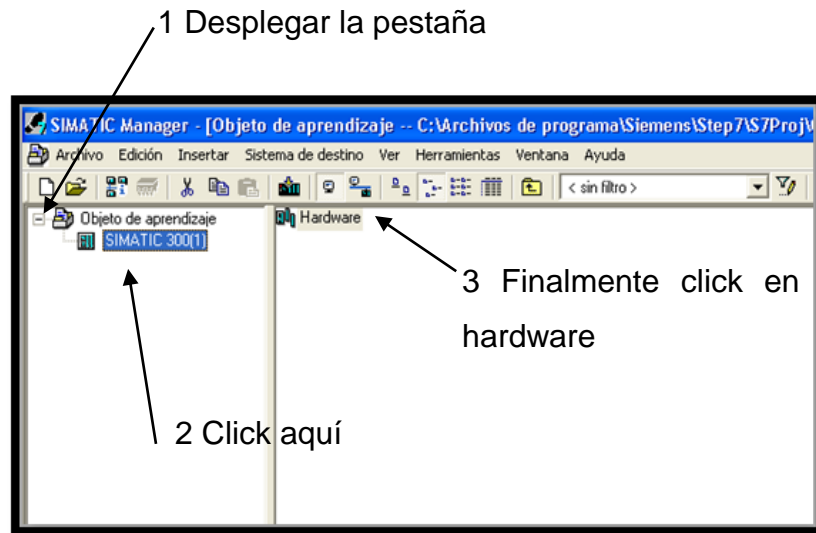
Inicio → Todos los programas → SIMATIC → Administrador SIMATIC.

De lo descrito en el capítulo 6, el sistema electrónico de control de procesos o simplemente llamado regulador o controlador utilizado es un equipo de la gama Simatic S7-300, los pasos a seguir se enuncian a continuación:

Insertar → Equipo → *SIMATIC* 300.

Para acceder al hardware, desplegamos la pestaña que se encuentra al lado del nombre de nuestro proyecto (Objeto de aprendizaje), posteriormente se da click en el equipo Simatic 300(1) y finalmente damos click en hardware ver figura 57:

Figura 57. Acceso al Hardware en el software Step 7



Fuente: Administrador Simatic, Step 7.

Inmersos en el hardware insertamos los componentes que se utilizarán, fuente de alimentación PS 307 5 y CPU 314C-2DP. En nuestro manual de prácticas se obtiene mayor información frente a este proceso.

Como bien sabemos, se ha referido constantemente a lo largo del libro de la utilización de paquetes estándar de reguladores PID para la solución de nuestro

problema. Siemens incorpora bloques de funciones encargadas para tal fin, la función FB 41 “CONT_C”⁹ es una de ellas, esta función se puede utilizar en procesos de regulación de consigna fija o procesos que formen parte de una estructura de lazos complejos (cascada, mezcla, relación, etc.).

Para el correcto funcionamiento de los bloques de funciones que lleven algoritmos matemáticos PID (FB41 Y FB58¹⁰), es necesario, que se ejecuten de forma de alarma cíclica o condicional, mediante tiempos de muestreo. CYCLE es el parámetro en el que se establece el tiempo de muestreo o llamado de los bloques de funciones y se programan en los bloques de organización OB3X (generalmente OB35). El tiempo de muestreo (CYCLE) es un parámetro a considerar en todo momento, ya que, afecta la capacidad de ejecución de la CPU y la calidad de la regulación, Además para la determinación de este tiempo, hay que tener en cuenta el tipo de proceso a controlar. Para procesos de rápida respuesta como el de regulación de posición angular y el proceso diseccionado de regulación de velocidad de aire del sistema MIMO, necesitan de tiempos de muestreo normalmente de (1-100 ms), por el contrario para procesos lentos como por ejemplo el proceso diseccionado de regulación de temperatura del sistema MIMO, necesitan tiempos de muestreo normalmente de (50-1000ms).

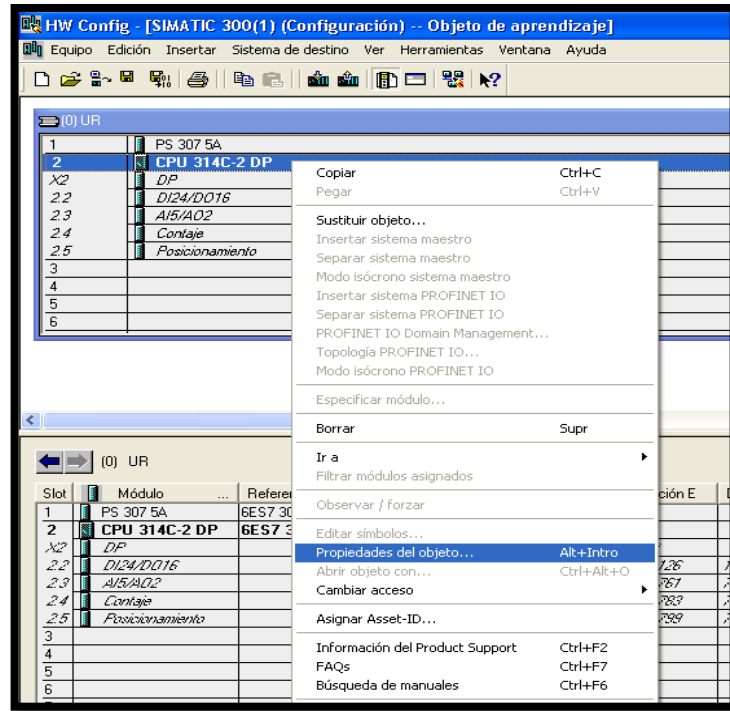
Para configurar el tiempo de muestreo, se da click derecho encima de la CPU seleccionada y elegimos *propiedades del objeto*, como se muestra figura 58:

Una vez en propiedades de la CPU, entramos en la pestaña de *alarmas cíclicas* y modificamos CYCLE considerando el lazo a regular, en la figura 59 se muestra lo anteriormente dicho.

⁹ Ver manual SIEMENS “Software estándar para S7-300/400 PID control (Regulación PID)”

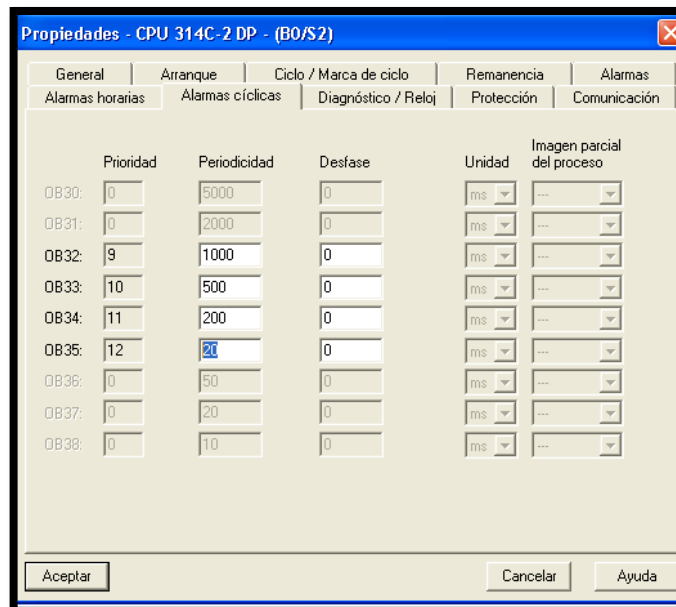
¹⁰ Ver manual SIEMENS “ PID control de temperatura”

Figura 58. Acceso a las propiedades de la CPU insertada.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Figura 59. Modificación del parámetro CYCLE



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Los tiempos de muestreo para los sistemas implementados fueron:

- ✓ 20 milisegundos: Proceso de regulación de posición angular tipo SISO.
- ✓ 20 milisegundos: Proceso de regulación de velocidad de aire del sistema MIMO
- ✓ 50 milisegundos: Proceso de regulación de temperatura de aire del sistema MIMO.

Para el sistema de regulación de posición angular, se utilizó el bloque de funciones FB 41 "CONT_C" y se encuentra programado en el bloque de alarmas cíclicas OB35.

El sistema MIMO, por tener más de 1 lazo de control, se utilizaron dos bloques de alarmas cíclicas, el lazo diseccionado de control de velocidad fue ejecutado por la función FB 41 "CONT_C" y programado en el bloque de alarmas cíclicas OB 34 y para el lazo diseccionado de control de temperatura se utilizó un bloque FB 58 "TCONT_CP" y programado en el bloque de alarmas cíclicas OB35.

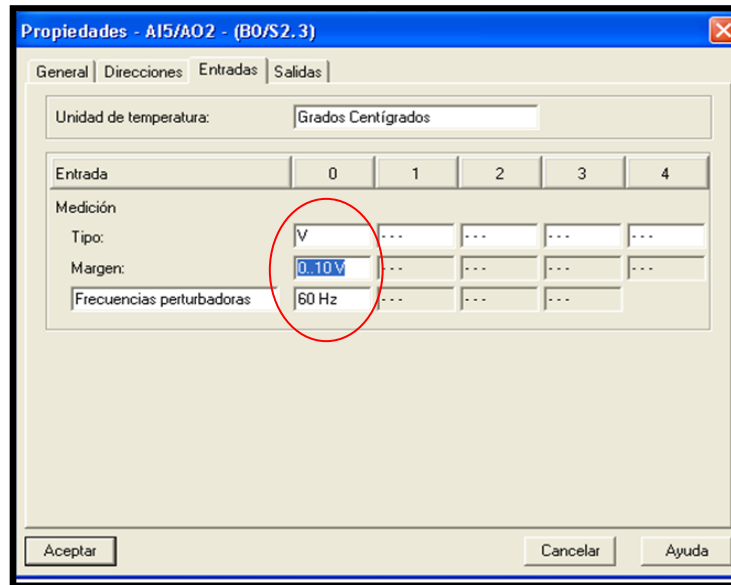
7.1.1 Configuración hardware de la entrada analógica del sistema de control de posición angular

Para la interpretación de las variables de proceso PV (variables a controlar) suministrada por los sensores, se hace indispensable la sincronización de los márgenes de lectura del módulo de entradas integrado de la CPU con las señales de entrada de los sensores. A continuación se muestra el proceso puntual de configuración de entrada analógica del sistema de control de posición, sin embargo, en el manual de operación del objeto de aprendizaje, esta información se encuentra de forma más detallada.

El único sensor requerido para este sistema de regulación es un potenciómetro lineal, y es el encargado de captar el ángulo en tiempo real de la compuerta, su señal de salida varía de 0-10V DC, debido a esto, el potenciómetro se asocia a la primera entrada analógica PEW 752 (canal 0), configurándola para la medición de

tipo tensión y en el margen de 0-10V para una correcta interpretación del autómeta. Las entradas analógicas restantes se deshabilitan, deslastrando procesos inútiles de lectura en la CPU. En la figura 60 se indica la configuración anteriormente descrita.

Figura 60. Configuración hardware del potenciómetro lineal



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

En la medición de sensores podemos eliminar el ruido que puedan generar las frecuencias perturbadoras.

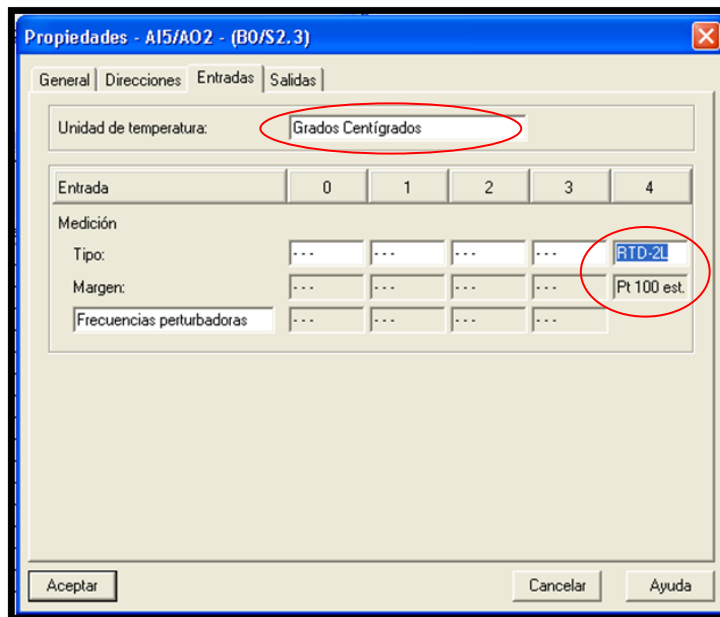
7.1.2 Configuración hardware de las entradas analógicas del sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO

Los elementos captadores que se utilizaron en el proceso de regulación continuo tipo MIMO son:

- Sensor de temperatura: termoresistencia PT100, en la sección 5.3.1 se indicaron las características técnicas de este dispositivo, el rango de operación de temperatura es de -100°C/400°C. Este elemento está asociado a la entrada

PEW 760 (canal 4), entrada especial de la CPU 314C-2DP, que permite la conexión directa de sensores de tipo resistivo. En relación con lo anterior Es importante configurar las unidades de temperatura en el que el usuario desee la visualización (grados Centígrados, Fahrenheit o Kelvin), en nuestra aplicación se eligió grados centígrados. Finalmente se selecciona el tipo de medición de este canal, una RTD de 2 hilos y automáticamente el PLC asigna que es una pt100 estándar.

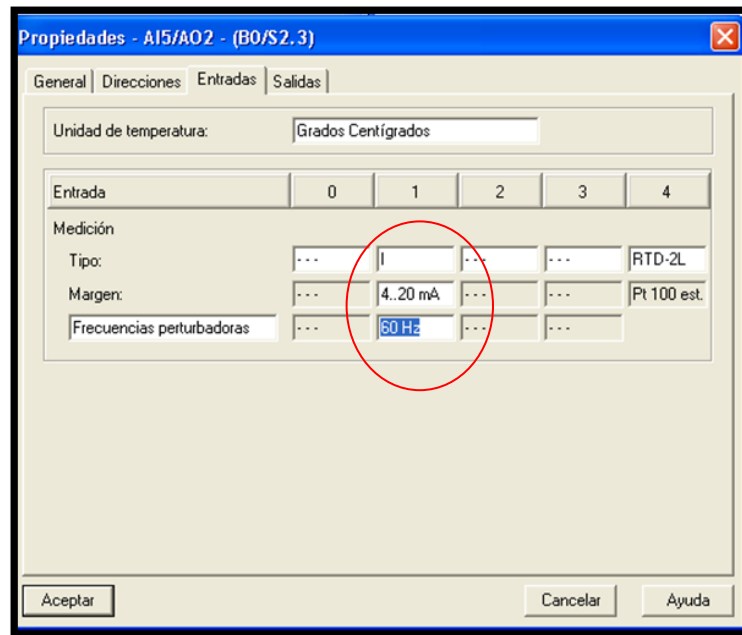
Figura 61. Configuración hardware del sensor de temperatura.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

- b. Transmisor de presión diferencial: elemento destinado para la medición de la presión total y estática dentro del ducto de aire, en la sección 5.3.5 se describieron las características técnicas del transmisor. La señal de salida de este dispositivo varía de 4-20 mA. Este elemento está asociado a la entrada analógica integrada PEW 754 (canal 1), configurando en esta el tipo de medición por intensidad y con un margen de 4-20 mA.

Figura 62. Configuración hardware del transmisor de presión diferencial.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

7.1.3 Configuración hardware de la salida analógica del sistema de control de posición angular

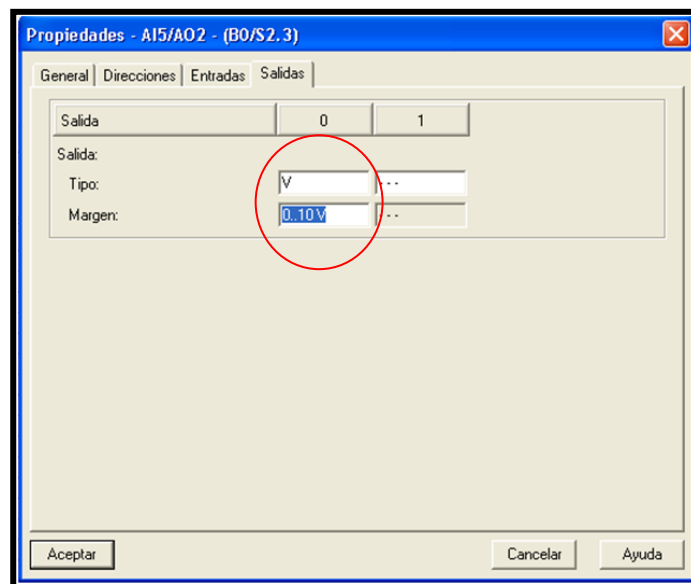
Al igual que las entradas, las salidas analógicas generadas por el autómata programable deben estar sincronizadas con los márgenes de operatividad de los preactuadores. En la configuración hardware del autómata, se puede establecer dicha configuración.

La salida analógica se encuentra asociada a un elemento preactuador, quien permite el enlace entre el autómata programable y el actuador. El elemento preactuador en este proceso de regulación, es el conjunto tarjeta electrónica-variador de velocidad, que se describieron en la sección 5.1.3 El rango de funcionamiento de la señal de control del variador de velocidad se encuentra en un valor de 0-3VDC y la señal de control proveniente del regulador o PLC es un voltaje normalizado de 0-10VDC, se hizo necesario la construcción de una etapa

electrónica que me permitiera escalar este voltaje normalizado al valor de 0-3V aceptado por el variador de velocidad. La tarjeta electrónica se encuentra asociada a la salida analógica integrada del PLC PAW 752 (canal 0), se configura en esta entrada, la medición de tensión, con un margen de 0-10VDC.

Configuración hardware del conjunto tarjeta electrónica-variador de velocidad

Figura 63. Configuración hardware de la tarjeta electrónica (motor eléctrico)



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

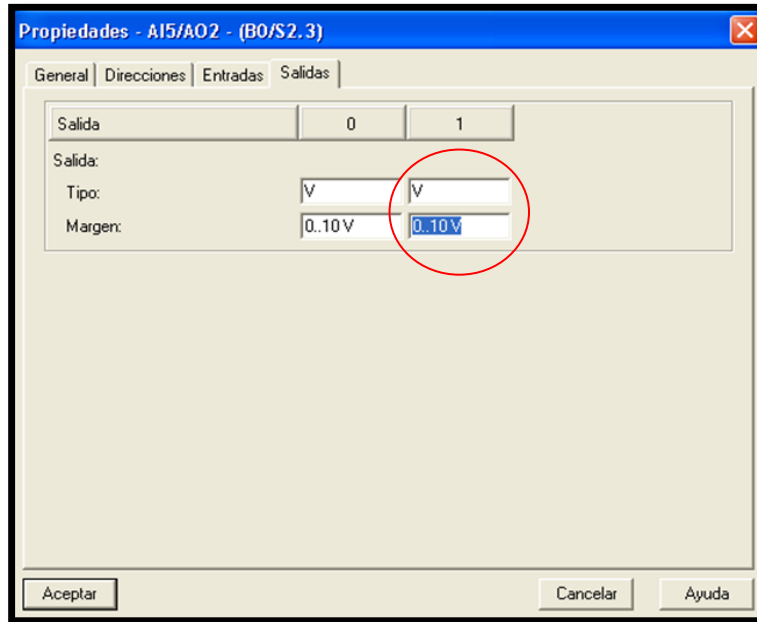
7.1.4 Configuración hardware de las salidas analógicas del sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO

En este proceso de regulación multivariable, existen 2 elementos preactuadores, cuya configuración se describe a continuación:

- Conjunto de tarjeta electrónica-variador de velocidad: la configuración se encuentra descrita en la sección 7.1.3.
- Relé de estado sólido por control de fase microcontrolado: dispositivo utilizado para la sincronización de la señal de control proveniente del PLC con la señal de potencia de la red eléctrica a 220V. este elemento permite señales

analógicas de control de 0-10V. el relé se asocia a la salida analógica integrada del PLC PAW 754 (canal 1), se configura el tipo de medición por tensión y margen de 0 a 10V. en la figura a continuación se observa la modificación de la salida mencionada.

Figura 64. Configuración hardware del relé de estado sólido



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

7.2 TRATAMIENTO DE SEÑALES ANALÓGICAS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL EN EL ENTORNO STEP7

Introducción

Después de realizar la configuración hardware de los diversos sensores y preactuadores descritos en la sección 7.1, el PLC queda dispuesto para el procesamiento y ejecución de algoritmos previamente programados, generando mediante él, la variable de control.

Como se indica en el capítulo 6, el autómatas digitaliza las señales analógicas de entrada para su interpretación y posterior proceso, sin embargo para un usuario,

no es suficiente la visualización de estas señales en voltaje o corriente y peor aún en formato digital. El usuario está interesado en observar esas señales en variables físicas, para ello es necesario la utilización de bloques de escalado o normalización de señales de entrada y bloques de desescalado o desnormalización de señales de salida. A este proceso que se le realiza a las señales, se conoce como tratamiento de señales analógicas.

7.2.1 Tratamiento de la entrada analógica del sistema de control de posición angular

El proceso de tratamiento de señales en el Administrador Simatic, consistía antiguamente en la utilización de operaciones aritméticas de números reales, hoy día, el software cuenta con funciones de normalización sencillas para el tratamiento de señales lineales, incluso la señal se puede escalar internamente en los bloques de funciones PID que se utilizan en este proyecto.

Para el sistema de control de posición angular, el valor físico de la entrada analógica del sistema, se representará en grados sexagesimales.

Lo primero que hay que tener en cuenta al momento de realizar el normalizado de la señal del potenciómetro, se basa en conocer el comportamiento de ésta, frente al movimiento angular de la compuerta. Tal como se indicó en la sección 5.2.1, el potenciómetro es de tipo lineal, por lo tanto en el escalado de la señal, se utilizó el bloque PID FB41¹¹ “CONT_C”. A continuación se observa el proceso que se llevó a cabo:

1) El potenciómetro es lineal, y al alimentar esté con 10VDC tendremos:

$$300^{\circ} \rightarrow 10V \text{ \& } 0^{\circ} \rightarrow 0V$$

¹¹ Ver manual SIEMENS “Software estándar para S7-300/400 PID control (Regulación PID)”.

- 2) Tal como se describió en la sección 3.4, se añade una etapa de amplificación mediante engranajes, relación 4:1, es decir, que si la compuerta gira de 0 a 75 grados, el potenciómetro lineal gira de 0 a 300 grados. Podremos afirmar con seguridad que el máximo ángulo de apertura de la compuerta esta en 75 grados sexagesimales. De lo anterior se tiene:

$$75^\circ \text{ Compuerta} = 300^\circ \text{ potenciómetro} = 10V \text{ en la entrada del PLC}$$

$$0^\circ \text{ Compuerta} = 0^\circ \text{ potenciómetro} = 0V \text{ en la entrada del PLC}$$

- 3) Identificado el comportamiento del potenciómetro, se recurre a los parámetros de entrada del bloque FB 41 para el normalizado de la señal, PV_NORM, CPR_IN, PV_FAC, PV_OFF (Ver manual SIEMENS “Software estándar para S7-300/400 PID control (Regulación PID)”). Los parámetros quedaron configurados de la siguiente manera:

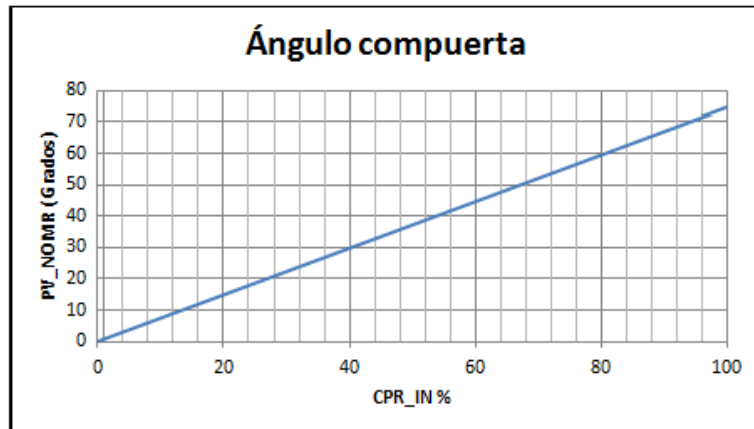
$$PV_{NORM} = CPR_{IN} * PV_{FAC} + PV_{OFF}$$

$$PV_{FAC} = 0.75$$

$$PV_{OFF} = 0$$

Al final mediante la ecuación del cálculo del ángulo de la compuerta (PV_NORM), se puede construir la gráfica correspondiente y se representa en la figura 65.

Figura 65. Normalizado de la señal entregada por el potenciómetro



Fuente: autores.

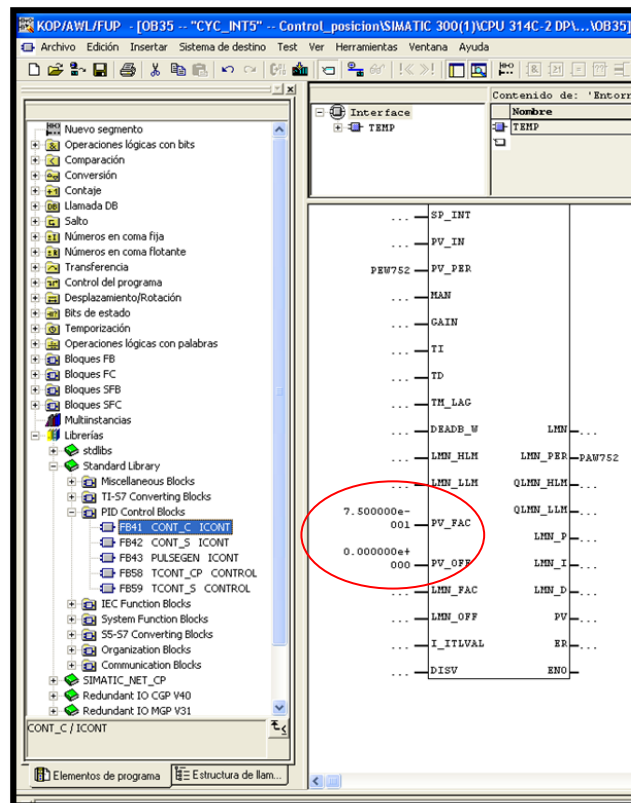
Para insertar estos valores en la programación, se puede realizar mediante 2 formas, una de ellas es directamente en la función FB 41 que se encuentra insertado en el bloque de alarmas cíclicas OB35 y es la que a continuación se presenta, el otro método es por medio del parametrizador de regulación PID, que se ejecuta ONLINE, pero este se hablará en el manual de operación del objeto de aprendizaje.

La función FB41 se encuentra y se inserta mediante la siguiente ruta:

Librerías → Standard Library → PID Control blocks → FB41 CONT_C

Ya insertada la función, se configuran los parámetros PV_FAC y PV_OFF, la figura 66 representa el procedimiento:

Figura 66. Normalizado de la señal del potenciómetro en el Step 7.



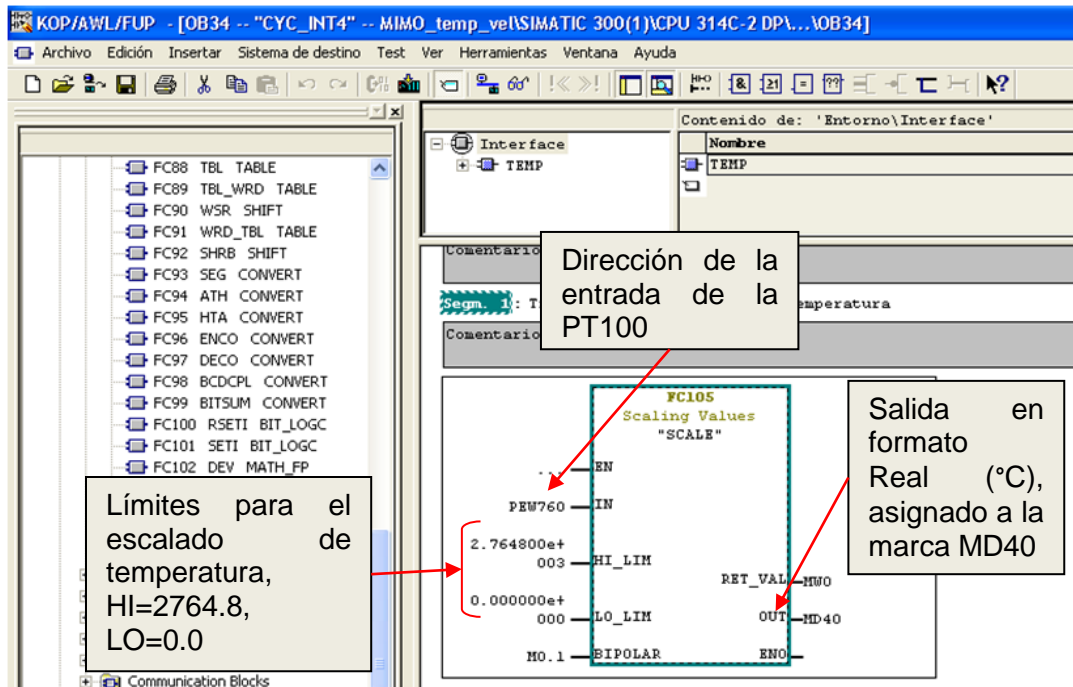
Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

7.2.2 Sistema de regulación de velocidad y temperatura de aire tipo MIMO

a. Sensor de temperatura (PT100 estándar): el tratamiento de este dispositivo es más sencilla, ya que el bloque de función FB58 permite hacerlo en él directamente (esta manera se documentará en el manual de operación). Hay que tener en cuenta que para el tratamiento de la señal de velocidad del aire es necesario también de la entrada de temperatura debido a que la velocidad es función de la densidad y esta a su vez de la temperatura, esta última es la que se mostrará a continuación. Para esto, es necesario de la utilización de un bloque de funciones FC105¹² “Scale Convert”, ideal para el escalado de valores. Esta función FC105 es llamado desde el bloque de organización OB34, y su configuración se representa en la siguiente figura 67, la ruta de llamado del FC 105 es:

¹² Ver manual “Software estándar para S7-300/S7-400 Funciones estándar Parte 2” Sección 6.8

Figura 67. Normalizado de la señal de temperatura.



Fuente: Administrador Simatic, Step 7.

*Librerías → Standard Library → TI – S7 Converting Blocs
→ FC105 SCALE CONVERT*

b. Transmisor de presión diferencial: el tratamiento de la señal de este elemento es más compleja en comparación con las anteriores, debido a que la variable controlada (velocidad del aire) está en función de otras variables físicas (presión dinámica y densidad del aire).

Para el normalizado de esta señal es necesario de los siguientes pasos:

- I. Escalado de la señal del transmisor de presión diferencial, para esto, se requiere del llamado de la función FC105 "Scale Convert", Los valores necesarios para configurar esta función se extraen de la hoja técnica del transmisor (ver ANEXO E6). En el mismo segmento se programa la conversión

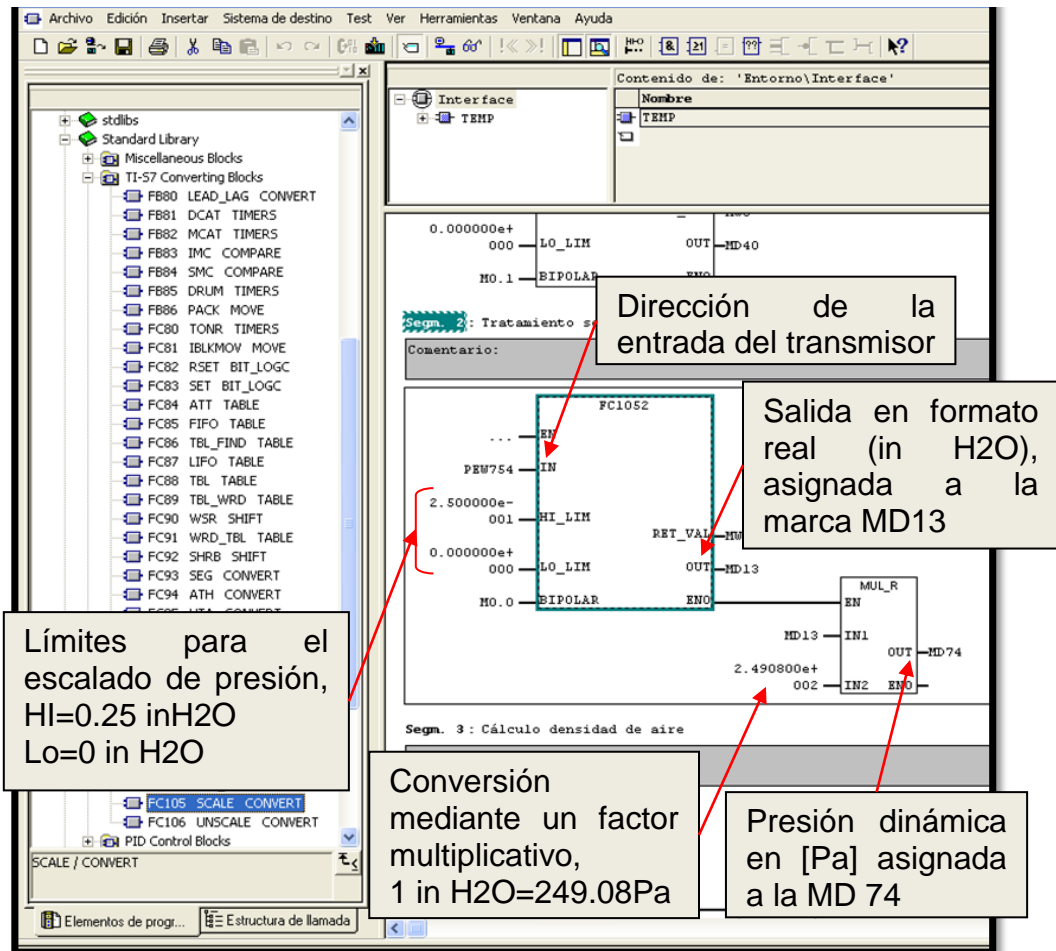
de unidad de la presión dinámica que se obtiene en [in H₂O] a [Pa], la figura 68 describe este proceso.

$$4mA \rightarrow 0 \text{ in } H_2O \dots \dots \dots 20mA \rightarrow 0.25 \text{ in } H_2O$$

- II. Cálculo de la densidad del aire. Posteriormente al escalado de la señal suministrada por el transmisor, se procede al cálculo de la densidad real del aire, parámetro muy importante, ya que se encuentra en función de la temperatura, y la temperatura cambiara constantemente por el efecto regulatorio, ya que como se ha mencionado, el sistema es de tipo MIMO.

En la sección 3.5, se describió la manera de obtención de la densidad mediante una ecuación, esta ecuación se inserta en el programa, ver figura 69.

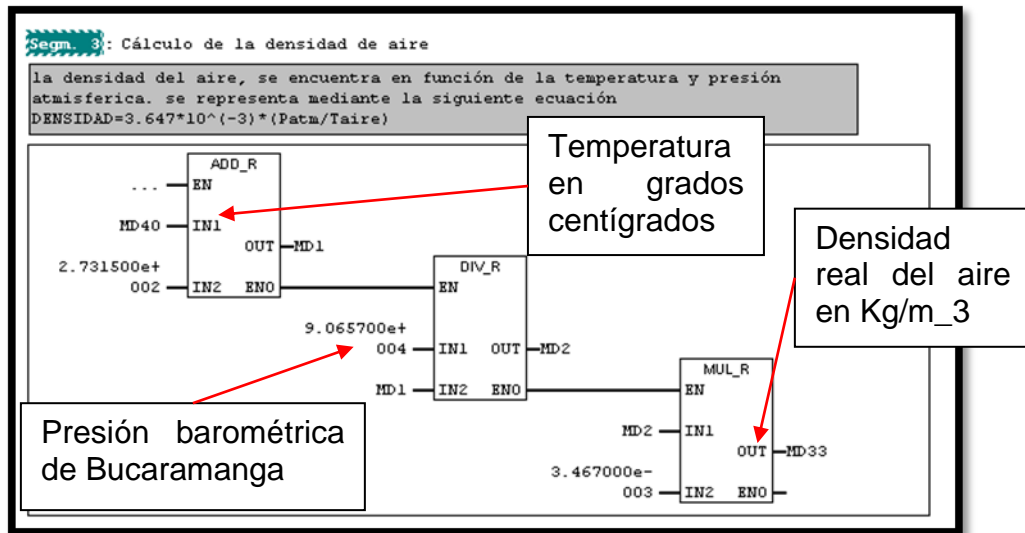
Figura 68. Tratamiento señal del transmisor



Fuente: Administrador Simatic, Step 7.

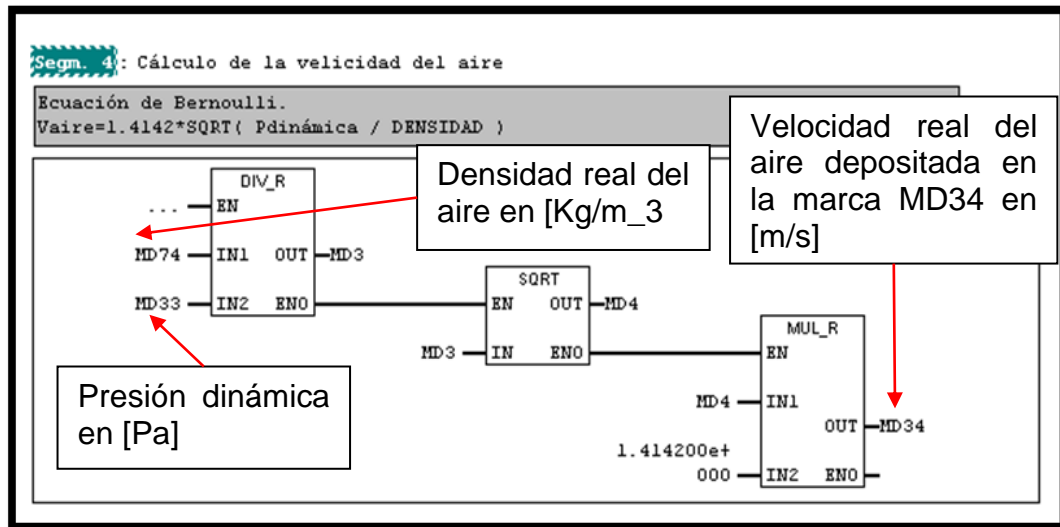
- III. Cálculo de la velocidad del aire. Finalmente para el cálculo de la variable a controlar, se digita la ecuación en la programación en lenguaje FUP, para posteriormente llevar este valor al bloque PID. En la figura 70 se observa el proceso anteriormente mencionado.

Figura 69. Cálculo programado de la densidad del aire



Fuente: Administrador Simatic, Step 7.

Figura 70. Cálculo programado de la velocidad del aire



Fuente: Administrador Simatic, Step 7.

8 SINTONIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS PID, EN LOS SISTEMAS IMPLEMENTADOS

El ajuste o sintonía de los parámetros proporcional, integral y derivativo, se logra conociendo las características del sistema a controlar así como el comportamiento del sistema ante cambios de consigna (set point) o ante perturbaciones. El diseñador de reguladores PID, también debe conocer la respuesta del sistema en función de la carga de la máquina y sin ella (trabajo en vacío).

Utilizando la teoría de control se puede predecir con precisión el comportamiento del sistema ante los cambios mencionados en el párrafo anterior. Estos parámetros PID se pueden calcular matemáticamente mediante la función de transferencia, el cual relaciona la salida y la entrada del proceso a controlar. Para modelar la función de transferencia, se necesita de parámetros que caracterizan el sistema tales como (mecánicos, térmicos, eléctricos, químicos, electromagnéticos etc.). La determinación de estos parámetros son difíciles de conseguir, por ello, muchos diseñadores suprimen esta fase y simplemente hallan las acciones PID, mediante métodos empíricos desarrollados por diversos investigadores.

De acuerdo con la anterior, nuestro esfuerzo se concentra, en primera medida, en la elección del algoritmo de control más adecuado para implantar un regulador PID en los sistemas estudiados, y posteriormente en la determinación de los parámetros P, I y D, mediante la utilización de métodos empíricos y la herramienta AutoTuning integrada en el bloque FB58 del software step 7.

8.1 SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN ANGULAR

Método Ziegler-Nichols con identificación en bucle cerrado.

La aplicación de este método es adecuada para procesos rápidos, es decir, que la acción correctiva del controlador CV, afecte y modifique de forma rápida la variable controlada PV.

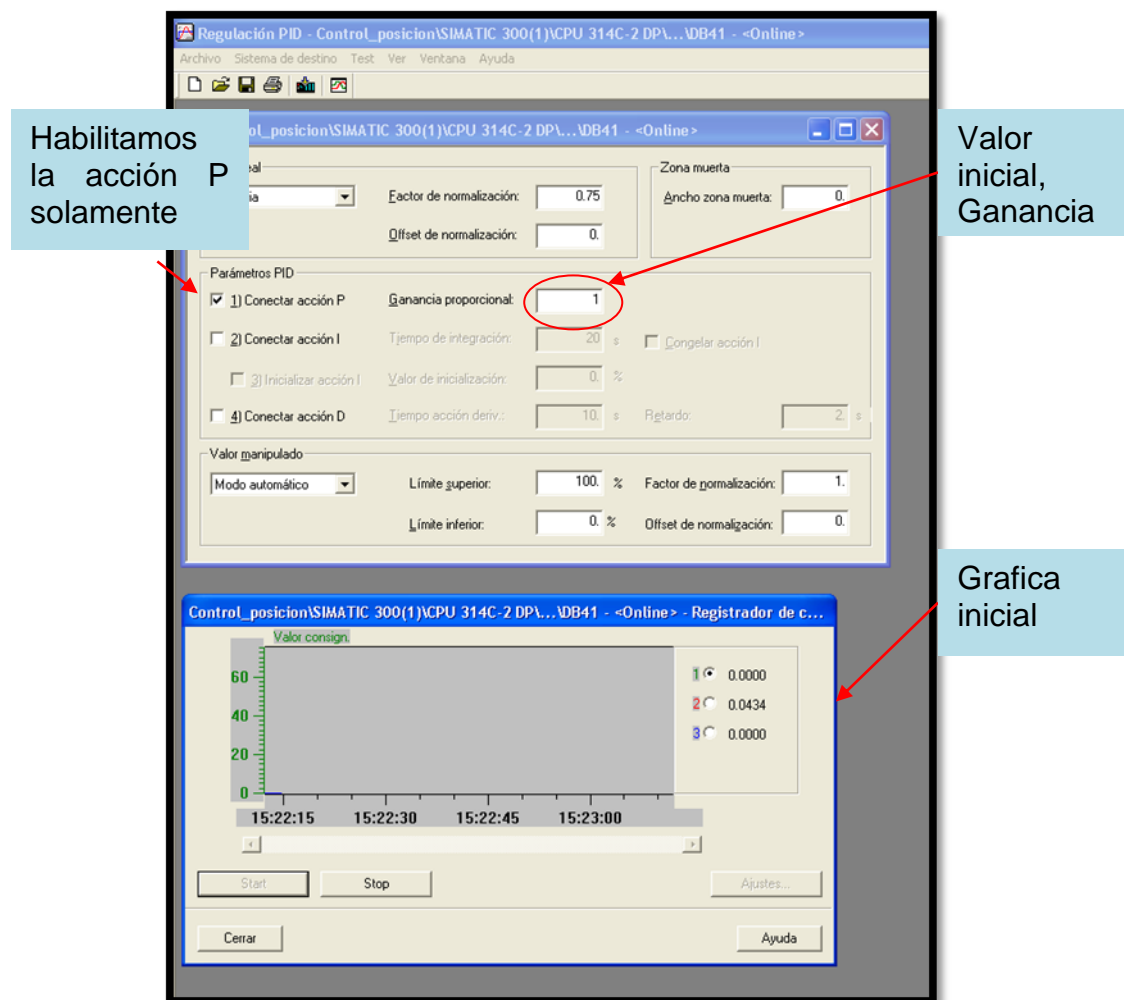
La configuración del Parametrizador de regulación PID y demás, se profundizan en el manual de prácticas del objeto de aprendizaje.

1. Ajustar en el bucle cerrado, la ganancia proporcional K_p a un valor inicial pequeño y anular las ganancias integral ($t_i = \infty$) y derivativa ($t_d = 0$).

Sin embargo, los bloques de función PID que lleva integrado Step 7, permite la cancelación de las acciones integral y derivativa mediante la desactivación de dichas acciones (ver figura 71).

Como primer valor tomamos un valor de $K_p = 1$, y aumentamos paulatinamente este valor hasta obtener una respuesta oscilatoria permanente.

Figura 71. Parametrizador de regulación PID, control de posición.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Debido a que algunos parámetros relevantes en el momento de interactuar con el regulador PID (MAN y SP_INT), no aparecen en el entorno de visualización del parametrizador PID (ver figura xx), se recurre de la creación de una tabla de variables que me permite el forzado de dichos parámetros. Para el llenado de la tabla de variables, se debe respetar la dirección que posee en su DB correspondiente y su tipo de dato, ver figura 72.

Figura 72. Tabla de variables del sistema de control de posición

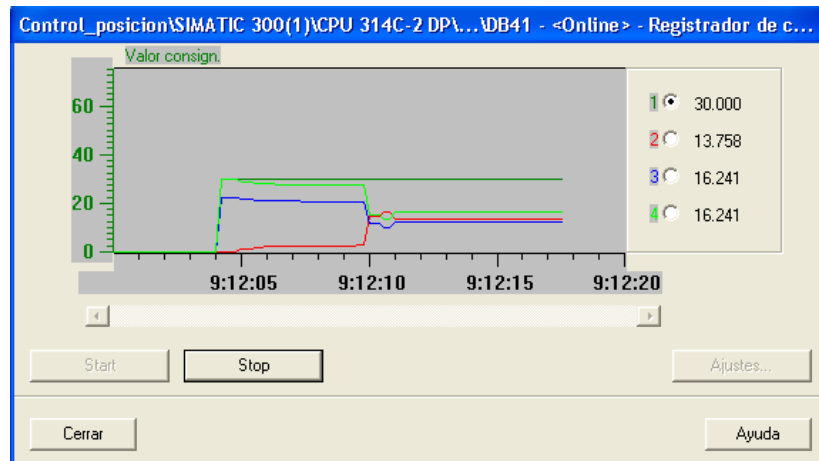
	Operando	Símbolo	Formato de visualización	Valor de estado	Valor de forzado
1	DB41.DBX 0.0	"DB41_ControlPosicion".COM_RST	BOOL		true
2	DB41.DBX 0.1	"DB41_ControlPosicion".MAN_ON	BOOL		
3	DB41.DBX 0.2	"DB41_ControlPosicion".PVPER_ON	BOOL		
4	DB41.DBX 0.3	"DB41_ControlPosicion".P_SEL	BOOL		
5	DB41.DBX 0.4	"DB41_ControlPosicion".I_SEL	BOOL		
6	DB41.DBX 0.7	"DB41_ControlPosicion".D_SEL	BOOL		
7	DB41.DBD 2	"DB41_ControlPosicion".CYCLE	TIEMPO		T#20ms
8					
9	//Referencia_valor de salida				
10	DB41.DBD 6	"DB41_ControlPosicion".SP_INT	REAL		30.0
11	DB41.DBD 16	"DB41_ControlPosicion".MAN	REAL		
12					
13	// Variables de proceso				
14	DB41.DBD 92	"DB41_ControlPosicion".PV	REAL		
15	DB41.DBW 14	"DB41_ControlPosicion".PV_PER	HEX		
16					
17	//Error				
18	DB41.DBD 96	"DB41_ControlPosicion".ER	REAL		
19					
20	//Parametros PID				
21	DB41.DBD 20	"DB41_ControlPosicion".GAIN	REAL		
22	DB41.DBD 24	"DB41_ControlPosicion".TI	TIEMPO		
23	DB41.DBD 28	"DB41_ControlPosicion".TD	TIEMPO		
24					
25	//Iteracion PID parametros				
26	DB41.DBD 80	"DB41_ControlPosicion".LMN_P	REAL		
27	DB41.DBD 84	"DB41_ControlPosicion".LMN_J	REAL		
28	DB41.DBD 88	"DB41_ControlPosicion".LMN_D	REAL		
29					
30	//Variables de salida				
31	DB41.DBD 72	"DB41_ControlPosicion".LMN	REAL		
32	DB41.DBW 76	"DB41_ControlPosicion".LMN_PER	HEX		

Fuente: Administrador Simatic, Step 7-Siemens.

En la figura 73 se observa la respuesta del sistema frente a su acción proporcional $k_p=1$. La curva roja o curva PV, una vez en régimen permanente mantiene un error significativo (OFFSET) frente a su valor de referencia. Se sigue aumentando el calor de k_p hasta obtener oscilaciones permanentes.

Curva verde oscuro: representa el set point **SP** 30, curva roja: representa la **PV** o ángulo real 13.758, la curva azul: simboliza la acción de control en porcentaje **CV** 16.241% y la curva verde clara: representa el error (**e**) 16.241.

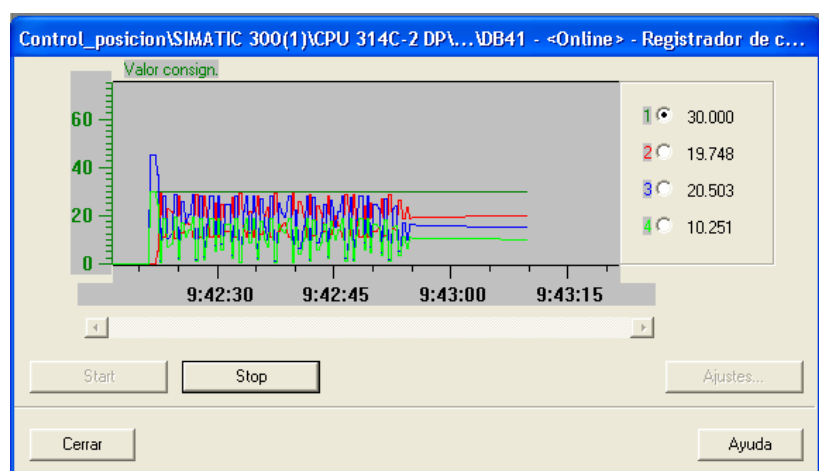
Figura 73. Respuesta de la posición angular de la compuerta con $kp=1$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Con un $kp=2$, representado en la figura 74, la respuesta del sistema presenta oscilaciones sostenidas durante un instante de tiempo o también llamado tiempo de transición, transcurrido este momento el sistema se estabiliza, presentando una reducción del error frente a la ganancia del punto anterior pero aun es superior al 34.17% (curva verde clara/curva del error).

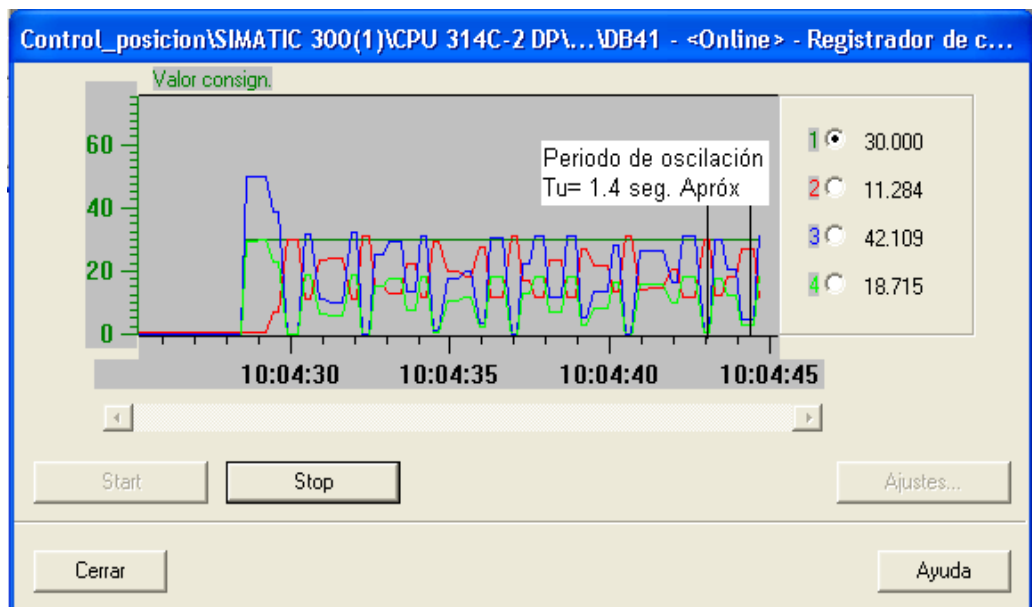
Figura 74. Respuesta de la posición angular de la compuerta con $kp=2$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Después de múltiples cambios en la constante proporcional, se obtiene un valor en la que la curva de proceso PV (curva roja) presenta oscilaciones permanentes con aproximadamente una amplitud constante. Este valor de $K_p=2.25$ es llamado $k_{p_crítico}$ o $K_{p_último}$ y el tiempo de repetición de la oscilación es conocido como periodo crítico $T_{crítico}$. Posteriormente estos dos valores se llevan a la tabla propuesta por Ziegler & Nichols para el ajuste de los parámetros del regulador. En la figura 75 se muestra la extracción del periodo de oscilación crítico del sistema.

Figura 75. Periodo de oscilación del sistema de control de posición angular.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Se eligió un algoritmo PI para el sistema de control de posición angular, esta elección se fundamentó en la respuesta rápida del sistema y la existencia de retardos despreciables.

Entonces con valores críticos de $K_c=2.25$ y $T_c=1.4$ seg, los parámetros PID según Ziegler & Nichols se muestran en la tabla 11.

Los valores adecuados para un controlador PI son:

$K_p= 0.9$

$T_i=1.12$ seg

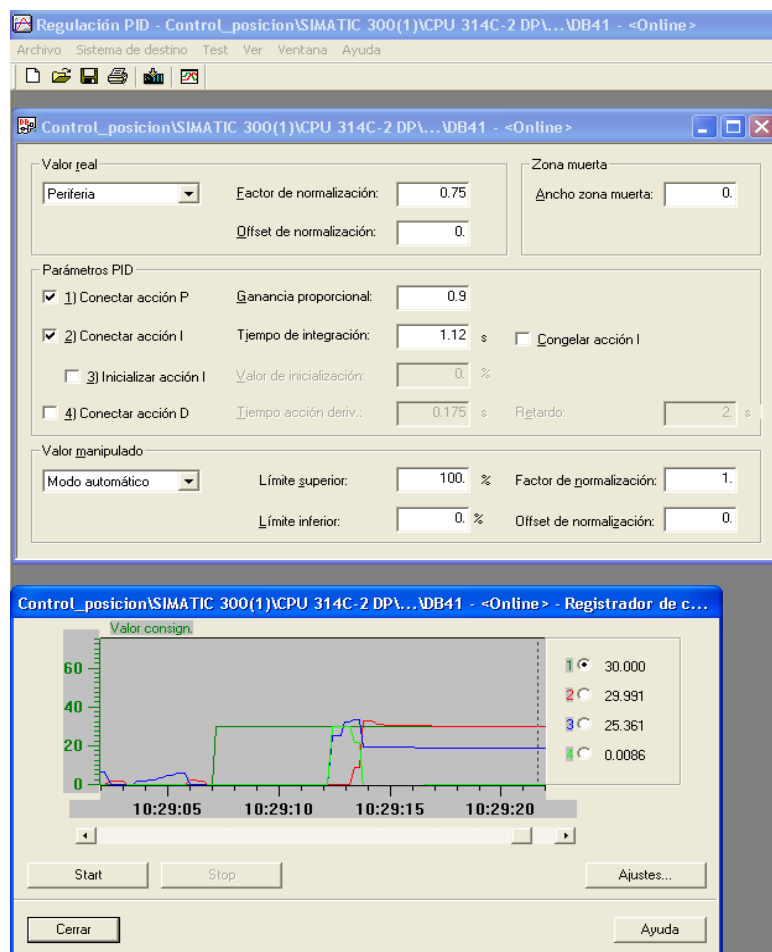
Tabla 11. Tabla de ajuste en bucle cerrado de los parámetros de PID propuesta por Ziegler-Nichols.

Regulador	Kp	Tl	Td
P	0.5Kc	-	-
PI	0.4Kc	0.8Tc	-
PID	0.6Kc	0.5Tc	0.125Tc

Fuente: autores.

En la figura 76, se muestra la respuesta del sistema de posición angular de la compuerta frente al regulador PI con un valor de referencia de 30 grados sexagesimales, el porcentaje de error es del 0.03%(curva verde clara).

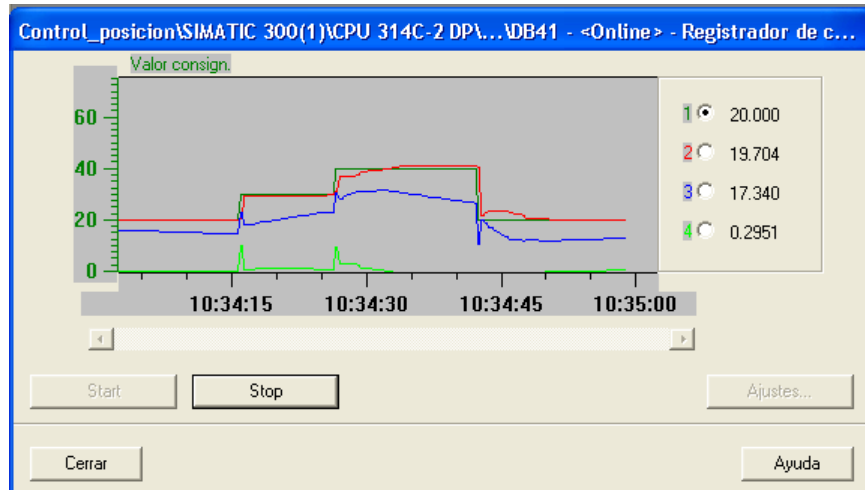
Figura 76. Regulador PI del sistema de control de posición



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

En la siguiente figura, se indica un control automático apropiado frente a cambios de consigna del sistema de posición angular.

Figura 77. Respuesta de la posición angular ante múltiples cambios de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

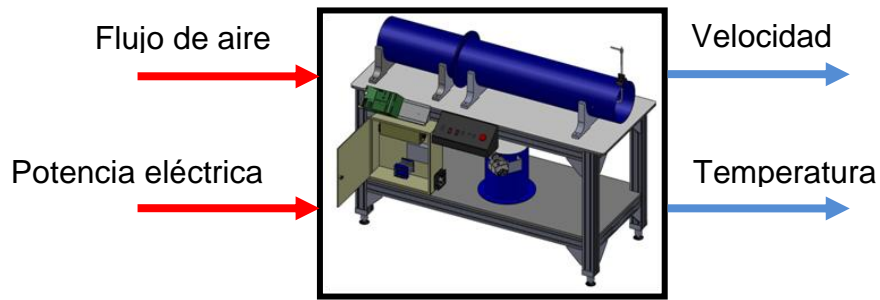
El estudiante que esté realizando la sintonía de parámetros PID, puede realizar pequeñas variaciones a estos valores encontrados, con el fin de refinar y dar precisión en el control automático.

8.2 SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA MIMO CON ARREGLO DESCENTRALIZADO.

El controlador SISO se aplica a sistemas o subsistemas caracterizados por tener una entrada y una salida de control, como es el caso del control de posición angular que se describió en la sección 8.1. Dos o más controladores PID SISO también forman parte de los sistemas multilazo, por ejemplo en los controles tipo cascada o control de la relación de dos variables.

En la figura 78 se muestra el diagrama de bloques del sistema MIMO del objeto de aprendizaje.

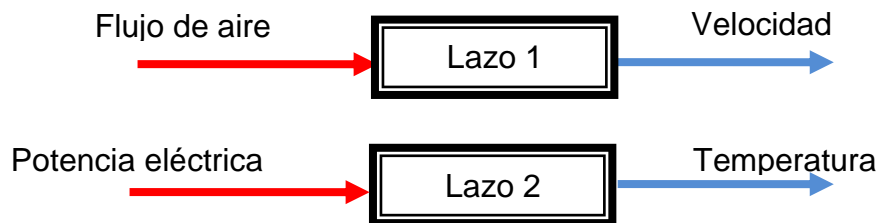
Figura 78. Diagrama de bloques del sistema MIMO del objeto de aprendizaje



Fuente: autores.

En este caso es relativamente simple proponer el “pareamiento” de lazos de control (por “pareamiento” entiéndase la decisión de qué variable manipulada controlará a qué variable controlada) mostrado en la Figura 79.

Figura 79. Pareamiento de las variables de control



Fuente: autores

A dicho esquema de control de sistemas multivariables se le llama esquema de control descentralizado. Obsérvese que esta forma de resolver el problema de control de sistemas multivariables se reduce a diseñar cada lazo de control de manera independiente del resto de los lazos (es decir, sin tomar en cuenta la presencia del resto de los lazos de control). Cada lazo se diseña usando los métodos conocidos para el control de sistemas univariables. Sin embargo, la presencia de las interacciones entre lazos o dinámicas hará que el desempeño de un lazo afecte a los otros y viceversa. En otras palabras, la interacción complica la sintonía de los lazos de manera independiente.

Para la sintonía del sistema de control de temperatura, se procedió dejando el sistema de control de velocidad en lazo abierto y con un valor de velocidad fijo del 30%, continuando entonces con el ajuste del lazo de control de temperatura mediante el método descrito en la sección 8.2.2

De igual manera para la sintonía del sistema de control de velocidad se procedió poniendo en lazo abierto, el sistema de control de temperatura con un valor de potencia eléctrica del 50% y posteriormente se realizó la sintonía del lazo de velocidad mediante el método descrito en la sección 8.2.1.

8.2.1 Lazo de control de velocidad

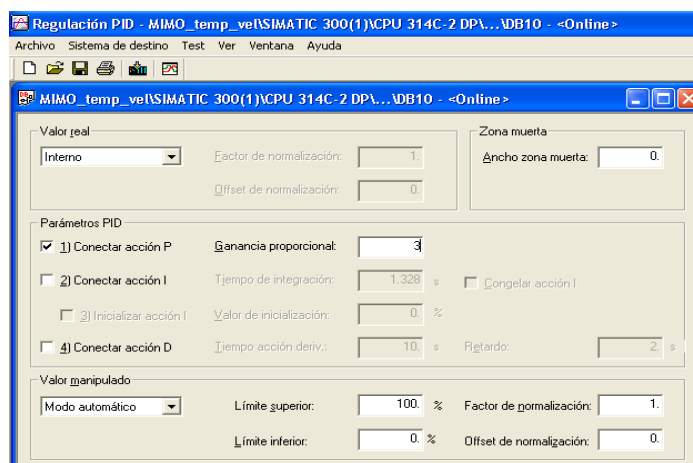
Se utilizó el método de Ziegler-Nichols con identificación en bucle cerrado.

El método consiste en ajustar en bucle cerrado, la ganancia proporcional K_p a un valor inicial pequeño y anular las ganancias integral ($t_i = \infty$) y derivativa ($t_d=0$).

Con un valor de $k_p=2$ la señal de control resultante es demasiado baja y por tanto el sistema no es capaz de iniciar.

Aumentando el valor de $k_p=3$ el proceso (curva roja) alcanza el régimen permanente, manteniendo un offset con respecto al valor de referencia, se observa que el sistema no presenta oscilaciones sostenidas, por lo que se debe aumentar el k_p

Figura 80. Parametrizador de regulación PID, control de velocidad de aire.

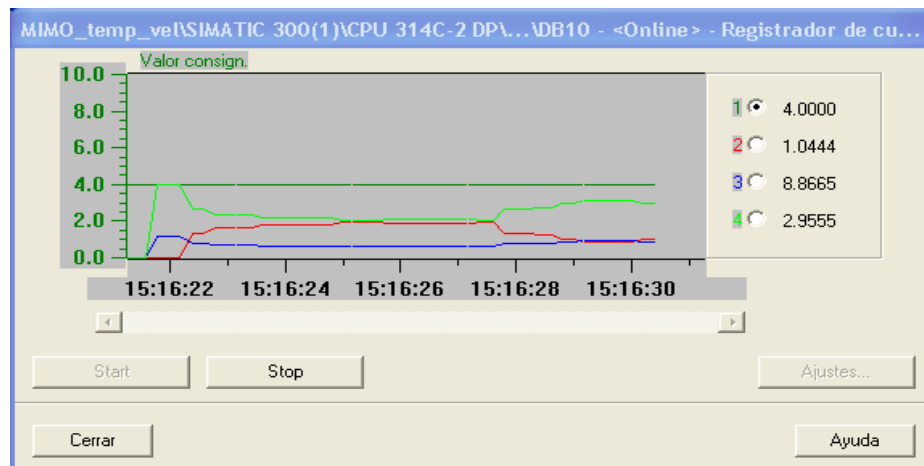


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

✓ Representación de las curvas suministradas por Step 7.

Curva verde oscuro: representa el set point **SP** 4 m/s, curva roja: representa la **PV** o velocidad real del aire 1.044 m/s, la curva azul: simboliza la acción de control en porcentaje **CV** 8.8665% y la curva verde clara: representa el error (**e**) 2.9555. Ver figura 81.

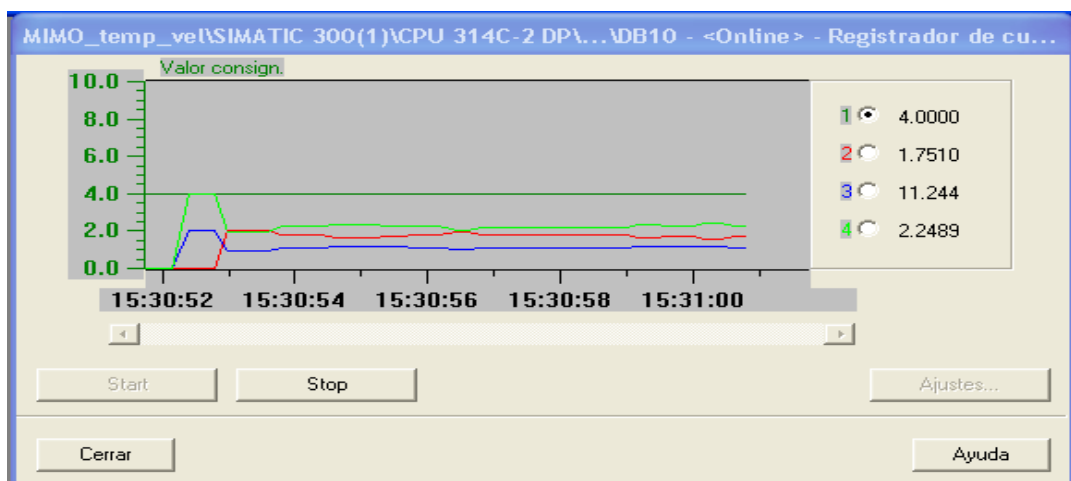
Figura 81. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=3$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Aumentando el valor de $k_p=5$, en la figura 82 se observa que la curva de proceso (curva roja), ha disminuido el error en régimen permanente, pero aún el sistema no presenta oscilaciones sostenidas.

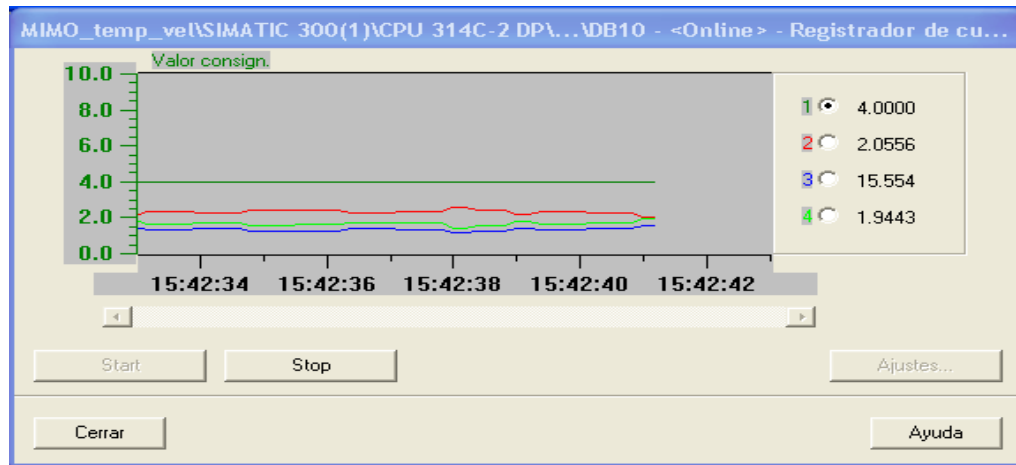
Figura 82. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=5$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Aumentando un valor de $k_p=8$, en la figura 83 se observa que el sistema alcanza el régimen permanente, aun sin presentar oscilaciones sostenidas, por lo que se debe seguir aumentando el k_p .

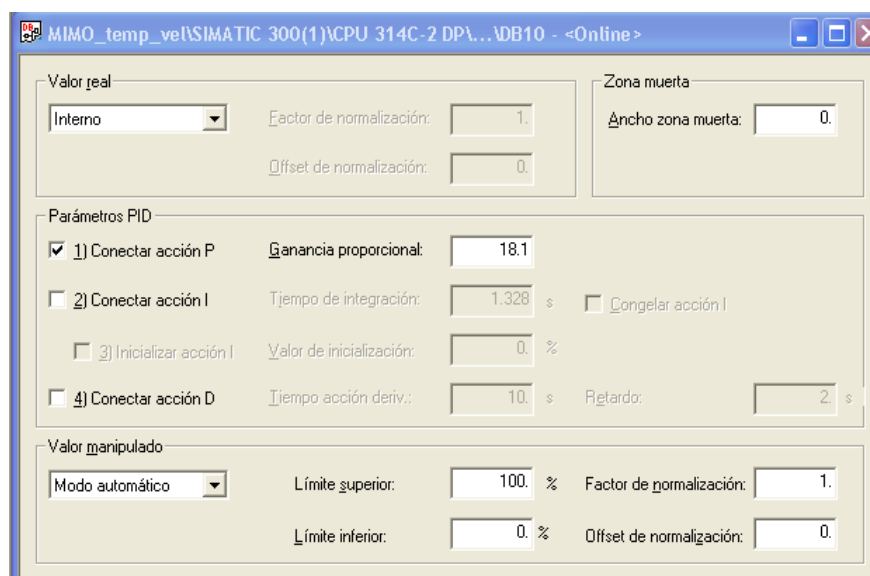
Figura 83. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=8$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Como se observa en la figura 84 con un valor aproximado de $k_p=18$ el sistema presenta oscilaciones. Este valor de k_p para el cual el sistema presenta oscilaciones, se conoce como constante proporcional crítica $k_c=18$.

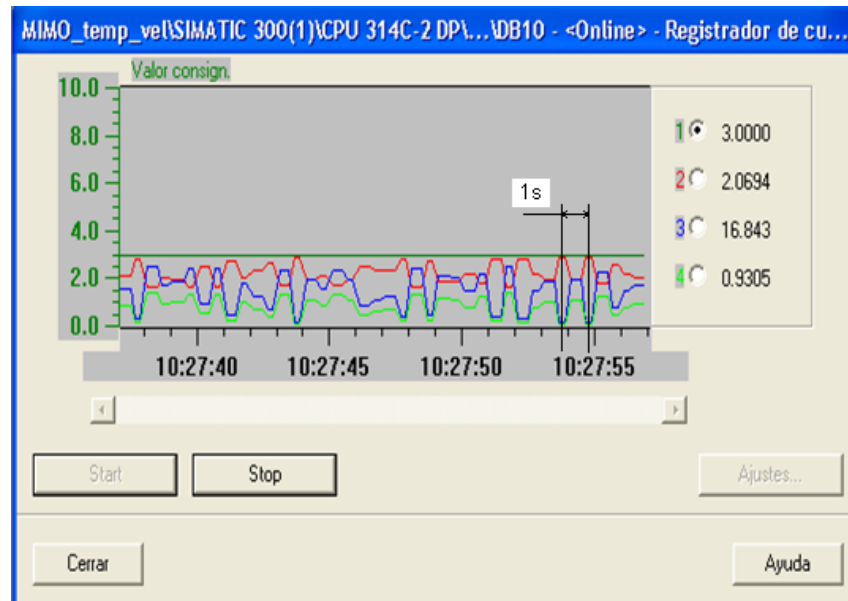
Figura 84. Respuesta de la velocidad del aire con $k_p=18$



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Se determina el periodo crítico, que según la figura 85 es de aproximadamente 1s, para posteriormente referirse a la tabla de parámetros de Ziegler-Nichols y determinar los valores adecuados de k_p y T_i para un controlador proporcional integral (PI) y responda el sistema con una razón de amortiguamiento de $\frac{1}{4}$.

Figura 85. Sistema entra en oscilación $K_p=18$.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Para el sistema diseccionado del MIMO o lazo de control de velocidad del aire que hemos venido hablando, se eligió un algoritmo PI, esta elección se fundamentó en la respuesta rápida del sistema, la existencia de retardos despreciables y la existencia de perturbaciones de baja frecuencia. Autores recomiendan que para este tipo de variable controlada un regulador PI es adecuado.

Entonces con valores críticos de $K_c=18$ y $T_c=1$ seg, los parámetros PID según Ziegler & Nichols se muestran en la tabla 11 de la sección 8.1

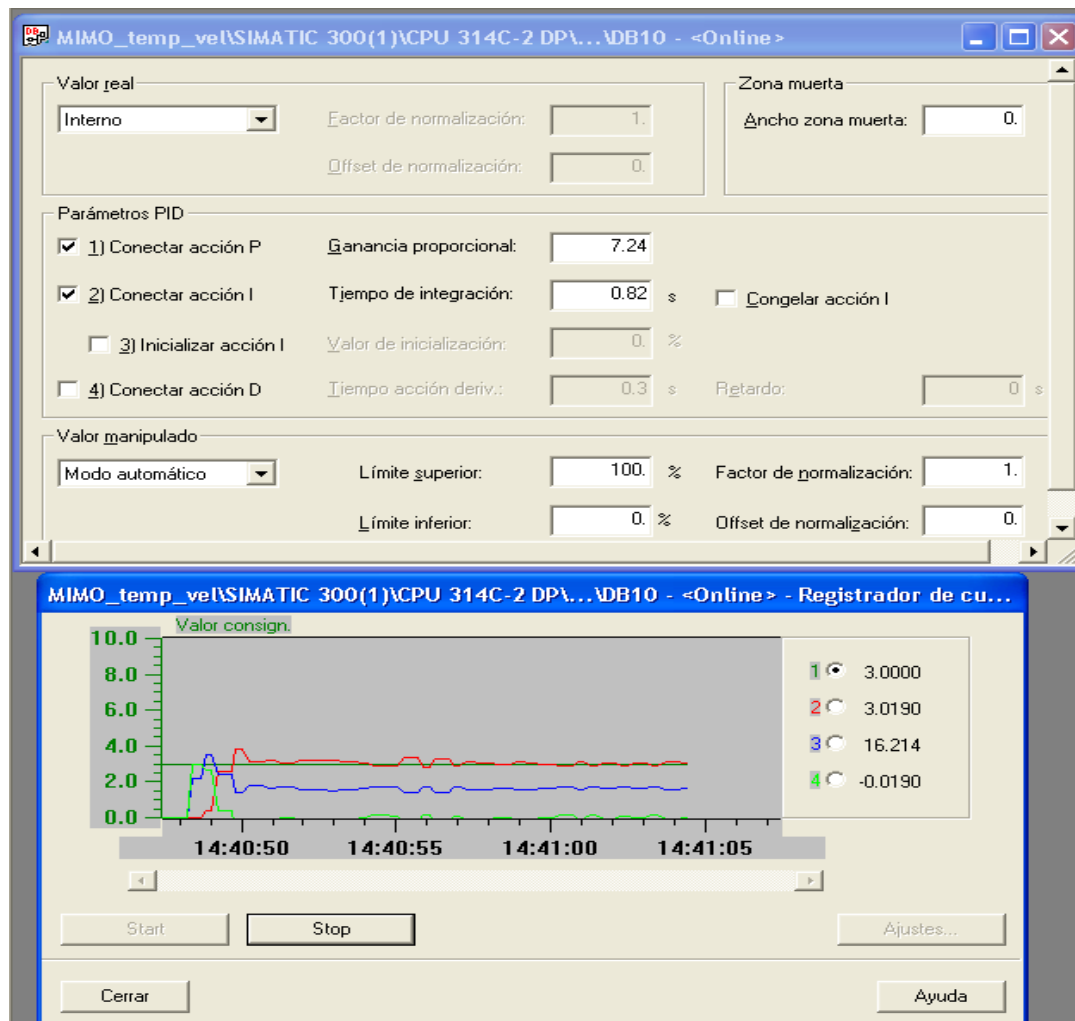
Los valores adecuados para un controlador PI son:

$K_p= 7.24$

$T_i=0.8$ seg

Como se observa en la figura 86 al insertar los parámetros encontrados la curva de proceso (curva roja), se aproxima al valor de referencia (curva verde oscuro) con un error ya reducido. También se puede observar la curva verde claro, correspondiente a la señal de error, con el cual, los parámetros PI que se determinaron generaron errores hasta del 6.67% en su valor de consigna.

Figura 86. Regulador PI del sistema de control de posición

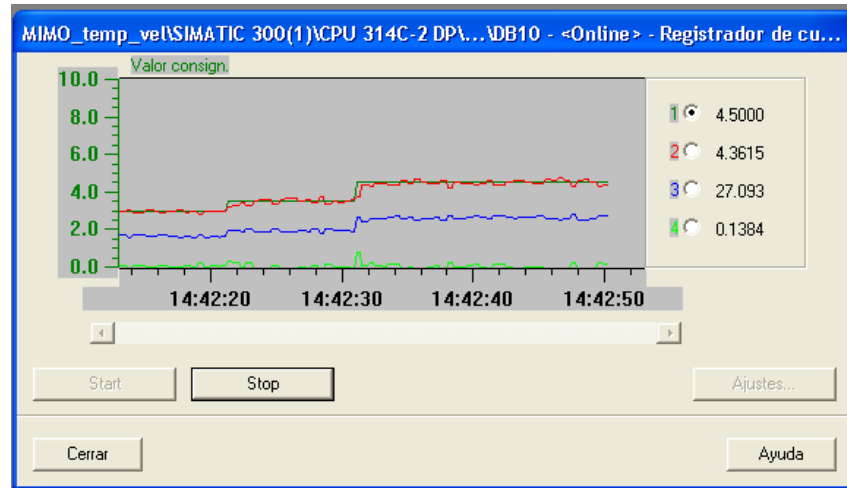


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

El usuario puede realizar pequeñas variaciones de estos parámetros encontrados, con el fin de refinar un poco más la sintonía del sistema de control.

En la figura 87 se puede apreciar la respuesta del sistema ante un aumento en el valor de consigna de 3m/s a 4.5m/s.

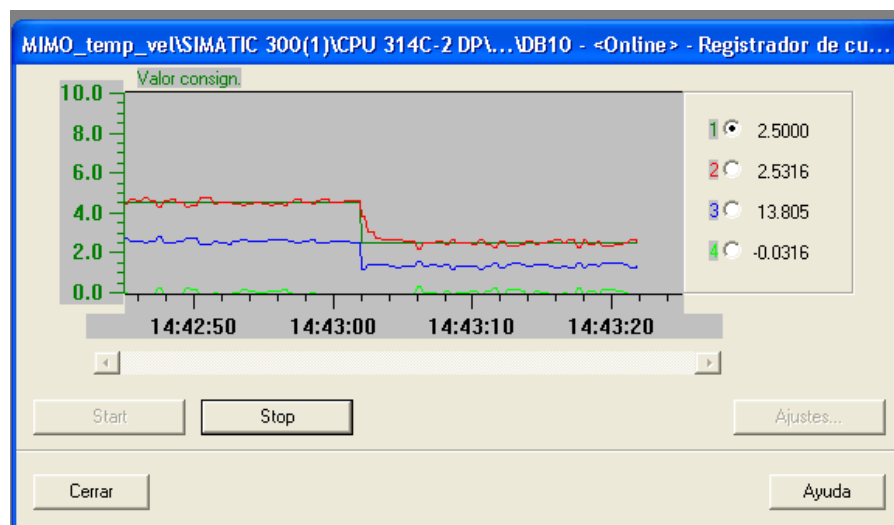
Figura 87. Respuesta de la velocidad del aire ante aumentos en el valor de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

En la figura 88 se puede apreciar el comportamiento del sistema (curva roja) ante una disminución en el valor de referencia.

Figura 88. Respuesta de la velocidad del aire ante disminución en el valor de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

8.2.2 Lazo de control de temperatura

Para el control de procesos que implican temperatura, el software Step 7 lleva integrada un bloque de funciones PID especial y específicamente para este fin. Este bloque, es el FB 58 "TCONT_CP" (Ver manual SIEMENS "PID control de temperatura") y es el utilizado en nuestro proceso de regulación de temperatura.

La función FB 58 posee características importantes como, la posibilidad de medir temperatura mediante dos formas, obtener una salida en el regulador en señal analógica o en PWM y brindar una herramienta de "Autotuning" o búsqueda de parámetros adecuados.

El "Autotuning" se trata de una rutina de optimización de parámetros, que finalmente es el método elegido para la determinación de los parámetros PID del sistema de control de temperatura aplicado, debido a que, el método empírico que se utilizó presenta dificultades al momento de efectuar el control.

8.2.2.1 Método de Ziegler-Nichols con identificación en lazo abierto.

Para la sintonización del sistema de control de temperatura se utilizó el método de Ziegler-Nichols con identificación en lazo abierto (curva de reacción) y el método de los dos puntos de C. L. SMITH junto con el criterio de HO.

Para la realización de este método, es necesaria la configuración de algunos parámetros a nivel del software Step 7.

- ✓ Una de ellas es la inserción de una tabla de variables en el programa de Step 7 que permita la modificación de algunos parámetros que no aparecen en el entorno de visualización de la función FB 58. Al igual que en el sistema de control de posición angular, la tabla de variables del sistema MIMO se introduce y se llena cada línea de forma más minuciosa, debido a que este sistema posee dos bloques de funciones PID, el FB41 que corresponde al lazo de control de velocidad del aire y el FB 58 al lazo de temperatura del aire, ver figura 89. Este proceso se profundiza en el manual de operación del objeto de aprendizaje.

Figura 89. Tabla de variables para el forzado de los parámetros del sistema MIMO

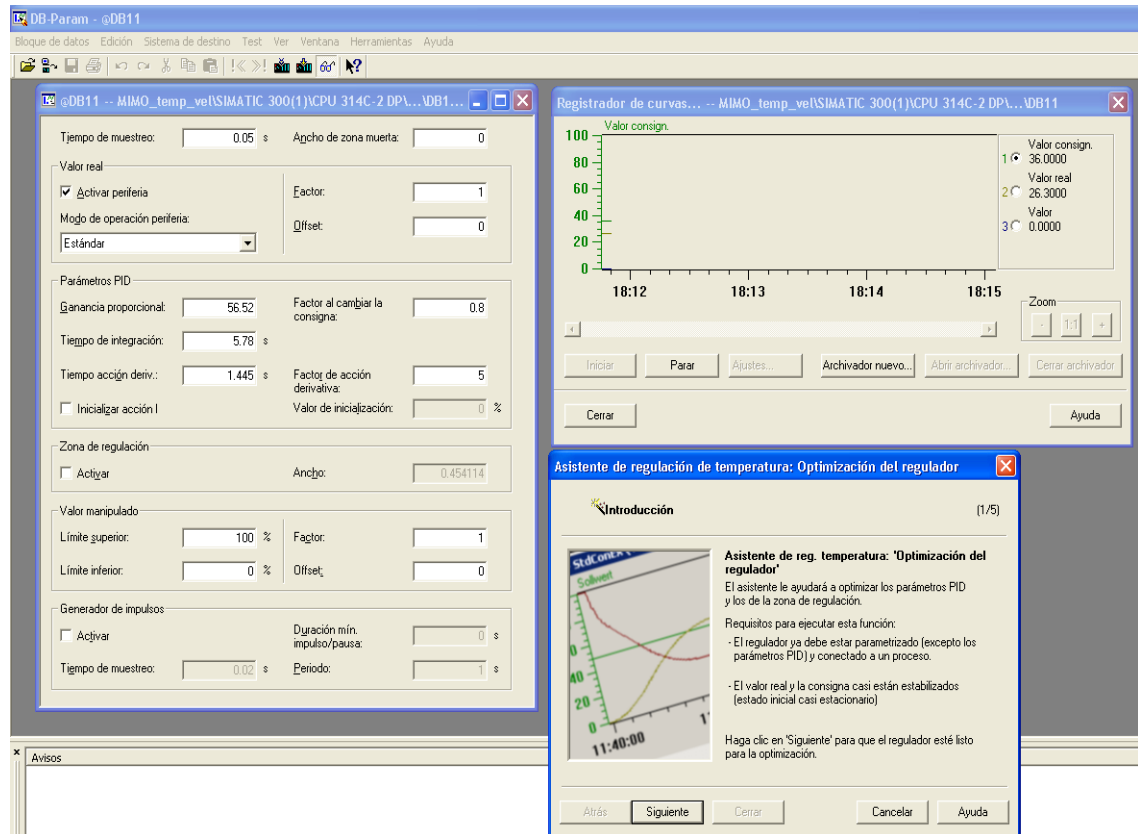
	Operando	Símbolo	Formato de visualización	Valor de estado	Valor de forzado
1		//Estado de regulación, Velocidad			
2	DB10.DBX 0.0	*ParametrosVel_PID*.COM_RST	BOOL	true	false
3	DB10.DBX 0.1	*ParametrosVel_PID*.MAN_ON	BOOL	false	true
4	DB10.DBX 0.3	*ParametrosVel_PID*.P_SEL	BOOL	true	
5	DB10.DBX 0.4	*ParametrosVel_PID*.I_SEL	BOOL	true	
6	DB10.DBX 0.7	*ParametrosVel_PID*.D_SEL	BOOL	false	
7	DB10.DBD 2	*ParametrosVel_PID*.CYCLE	TIEMPO	T#20ms	
8		//Estado de regulación, Temperatura			
9	DB11.DBX 42.0	*ParametrosTemp_PID*.COM_RST	BOOL	false	
10	DB11.DBX 42.1	*ParametrosTemp_PID*.MAN_ON	BOOL	true	
11	DB11.DBD 38	*ParametrosTemp_PID*.MAN	REAL	0.0	
12	DB11.DBX 186.6	*ParametrosTemp_PID*.PID_ON	BOOL	true	
13	DB11.DBX 186.5	*ParametrosTemp_PID*.LOAD_PID	BOOL	false	
14		//Variables de entrada, Velocidad			
15	DB10.DBD 6	*ParametrosVel_PID*.SP_INT	REAL	3.0	
16	DB10.DBD 92	*ParametrosVel_PID*.PV	REAL	0.0	
17	DB10.DBW 14	*ParametrosVel_PID*.PV_PER	DEC	0	
18	DB10.DBD 16	*ParametrosVel_PID*.MAN	REAL	30.0	30.0
19		//Variables de entrada, temperatura			
20	DB11.DBD 34	*ParametrosTemp_PID*.SP_INT	REAL	36.0	
21	DB11.DBD 14	*ParametrosTemp_PID*.PV	REAL	26.3	
22	DB11.DBW 4	*ParametrosTemp_PID*.PV_PER	DEC	263	
23	DB11.DBD 38	*ParametrosTemp_PID*.MAN	REAL	0.0	

Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

- ✓ Es necesario dejar el regulador de velocidad de aire en lazo abierto o modo manual (bloque FB 41), a una velocidad moderada, por ejemplo 30 %, esto con el fin de inducir una cantidad de flujo de aire que será calentada y posteriormente sensada. En la figura 89 se muestra el proceso antes descrito
- ✓ Una vez realizado el proceso anterior, debemos comprobar de que el motor eléctrico este en movimiento. Posteriormente, entramos al entorno de parametrización del bloque FB 58 haciendo doble click en el bloque de datos de instancia (DB) en la ventana del proyecto del administrador SIMATIC. Una vez en este entorno, buscamos en la opción *archivo*, el nombre de proyecto y damos doble click a la DB correspondiente (DB 11 para nuestro proyecto de trabajo) sin olvidar abrir este proyecto en *Abrir online*, ya que sin esta opción el asistente del optimizador no podría

funcionar. En el manual de operación objeto de aprendizaje se detalla más este proceso.

Figura 90. Entorno de parametrización del bloque de función FB 58

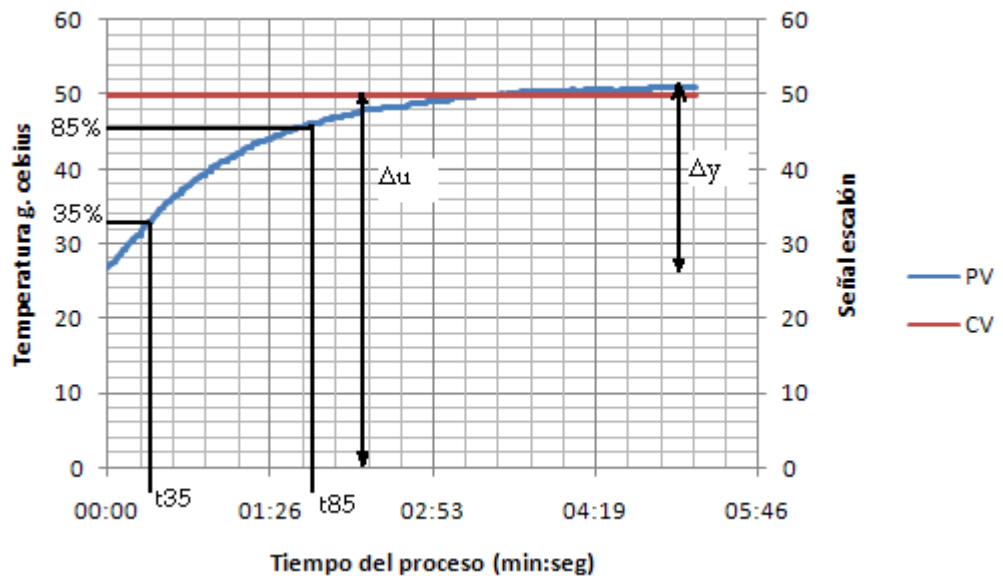


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Procedimiento del método de la curva de reacción:

- 1) se procedió en forma manual, es decir poniendo el sistema en lazo abierto, posteriormente se aplicó un escalón del 50% en la variable de control y se registró el valor de salida de la temperatura hasta que se estabilizara en un punto de operación. El bloque de función FB58 empleado para la regulación, permite visualizar el proceso en tiempo real por medio del registrador de curvas y el registro de datos mediante un archivo de Excel, para ser graficado. La curva obtenida es como la mostrada en la figura 91.

Figura 91. Curva de reacción del proceso de temperatura.



Fuente: autores.

2) Aplicando los criterios de HO, en el que se buscan los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 35% y el 85% del valor final, donde según la figura corresponden a 31s y 129s respectivamente. los valores de ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto, se calculan por medio de las ecuaciones generales para el método de los dos puntos.

Tabla 12. Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.

<i>Tabla N° 1 - Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto</i>						
<i>Método</i>	$\%p_1 (t_1)$	$\%p_2 (t_2)$	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Alfaro	250	75.0	-0.910	0.910	1.262	-0.262
Bröida	28,0	40.0	-5.500	5.500	2.800	-1.800
Chen y Yang	33,0	67.0	-1.400	1.400	1.540	-0.540
Ho et al.	35.0	85.0	-0.670	0.670	1.300	-0.290
Smith	28.3	63.2	-1.500	1.500	1.500	-0.500
Vitecková et al.	33.0	70.0	-1.245	1.245	1.498	-0.498

Fuente: PDF- identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto/ Víctor M. Alfaro.

$$k = \Delta y / \Delta u = \frac{24.1}{50} = 0,482 \text{ } ^\circ\text{C } \%$$

$$\tau = a \cdot t_1 + b \cdot t_2 = 0,670 \cdot 129 - 31 = 65,66 \text{ s}$$

$$t_m = c \cdot t_1 + d \cdot t_2 = 1.300 \cdot 31 - 0,290 \cdot 129 = 2,89 \text{ s}$$

3) Con los valores calculados de τ , k , t_m y los parámetros de ziegler-nichols mostrados en la tabla, calculamos los valores óptimos para un controlador PID.

$$a = \frac{k \cdot t_m}{\tau}$$

Tabla 13. Ajuste en bucle abierto de los parámetros de PID propuesta por Ziegler-Nichols.

Regulador	Kp	Ti	Td
P	1 <i>a</i>	-	-
PI	0.9 <i>a</i>	3. t_m	-
PID	1.2 <i>a</i>	2. t_m	0.5 t_m

Fuente: Atores

Siendo los valores óptimos para un controlador PID:

Kp=56.62

Ti=5.78

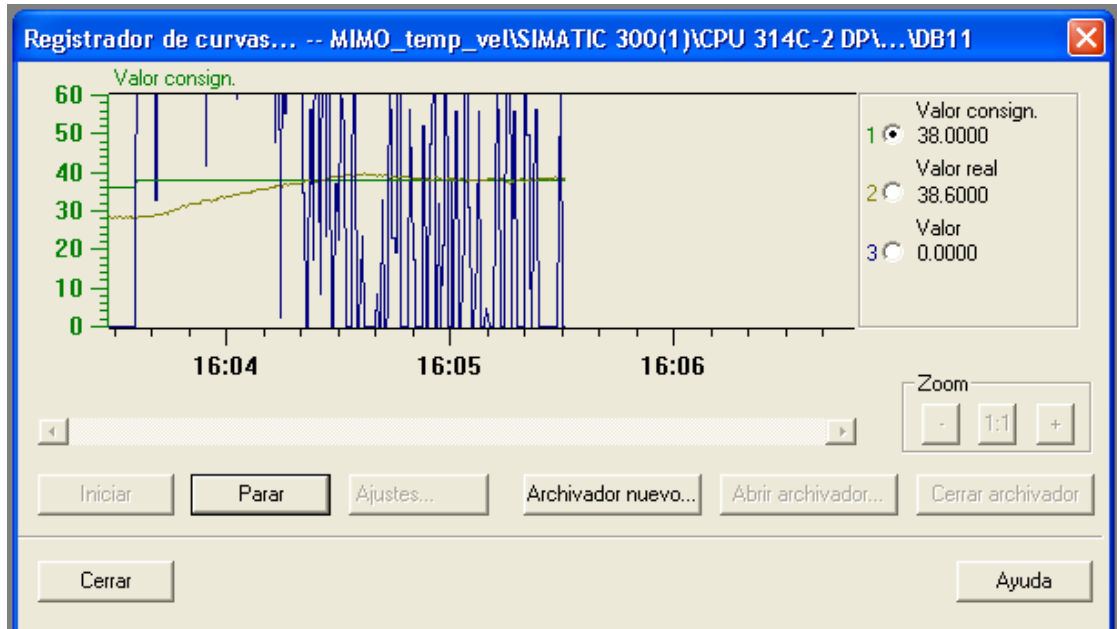
Td=1.445

El proceso de regulación del lazo de control de temperatura con los parámetros encontrados es como el mostrado en la figura 92.

✓ *Representación de las curvas suministradas por Step 7 del bloque FB 58.*

Curva verde: representa el set point **SP** 36°C, curva marrón: representa la **PV** o temperatura real del aire 36.3°C, la curva azul: simboliza la acción de control en porcentaje **CV** 16.1227%, ver figura 92.

Figura 92. Respuesta de la temperatura del aire con los parámetros hallados mediante el método de Ziegler-Nichols con identificación en lazo abierto.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

8.2.2.2 Sintonización de parámetros PID, mediante la herramienta Autotuning

Consiste en hacer uso de la rutina de autotuning integrada en la función FB 58 "TCONT_CP", este procedimiento se muestra a continuación:

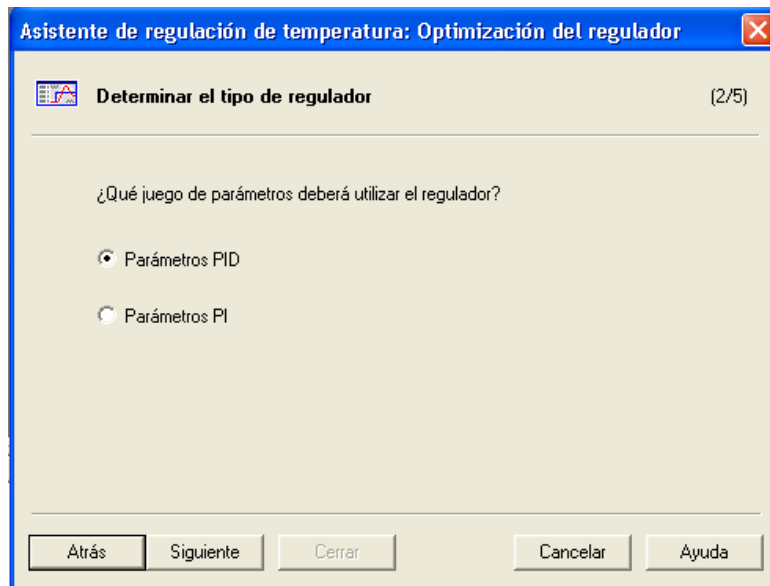
Para comenzar con la rutina de optimización del regulador en el FB 58, es necesario dejar el regulador de velocidad de aire en lazo abierto o modo manual (bloque FB 41), a una velocidad moderada, por ejemplo 30 %, esto con el fin de inducir una cantidad de flujo de aire que será calentada y posteriormente sensada. En la figura 89 de la sección 8.2.2.1 se muestra el proceso antes descrito.

Después de realizado el proceso anterior, abrimos la DB de instancia asociada al FB 58 "TCONT_CP" (DB11 para nuestro estudio realizado) y posteriormente abrimos esta DB a modo ONLINE, ya que son esta opción el asistente del optimizador no podría funcionar. En el manual de operación del objeto de aprendizaje se detalla más este proceso.

El asistente de regulación de temperatura, se llama mediante la opción *herramientas* → *optimización del regulador* e inmediatamente aparece la ventana de configuración del asistente.

Pulsamos en siguiente y nos da la opción de elegir el tipo de algoritmo a utilizar ver figura 93, Para nuestra aplicación, elegimos un algoritmo PID.

Figura 93. Elección del tipo de regulador para el asistente de regulación de temperatura.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

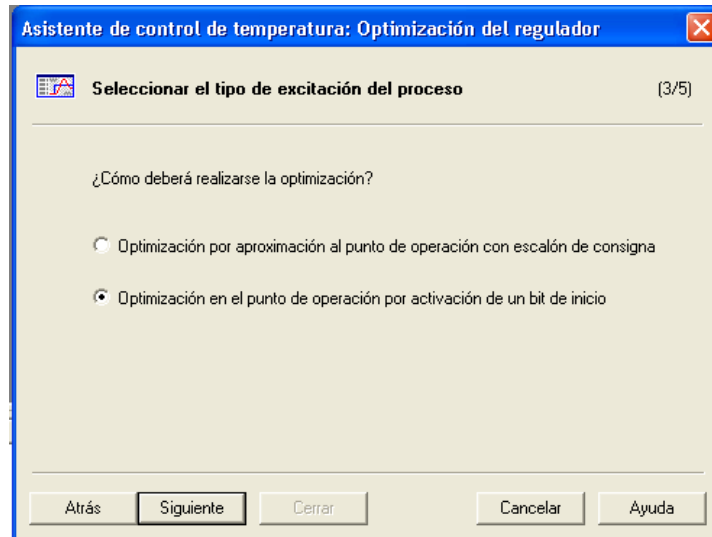
Existen dos posibilidades de optimización:

- a. Optimización por aproximación al punto de trabajo con escalón de consigna
- b. Optimización en el punto de trabajo por activación de un bit de inicio.

En ambos casos, el proceso se activa mediante un escalón predeterminable del valor manipulado. Tras detectarse un punto de inversión, los parámetros PI/PID del regulador quedan disponibles y el regulador pasa al modo Automático y continúa la regulación con dichos parámetros.

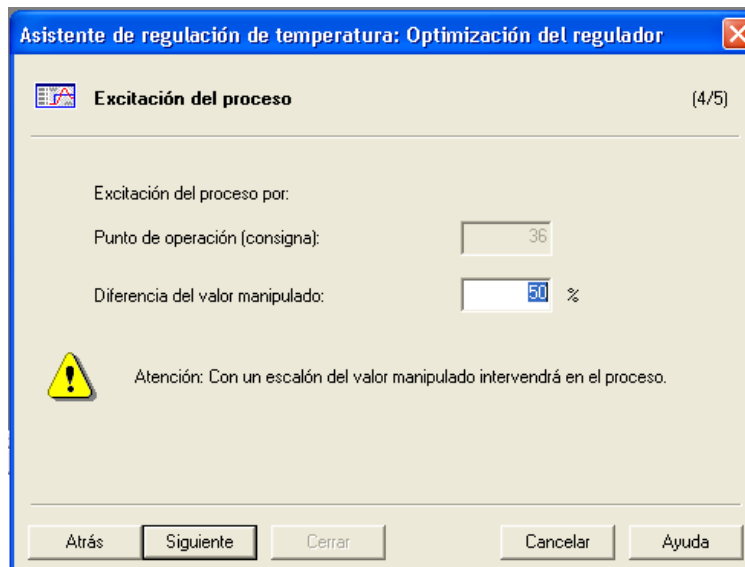
✓ **Optimización en el punto de trabajo por activación de un bit de inicio.**

Figura 94. Selección del tipo de excitación del proceso para el asistente de regulación: Optimización en el punto de operación.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Figura 95. Excitación del proceso del 50% y un punto de operación de 26°C.

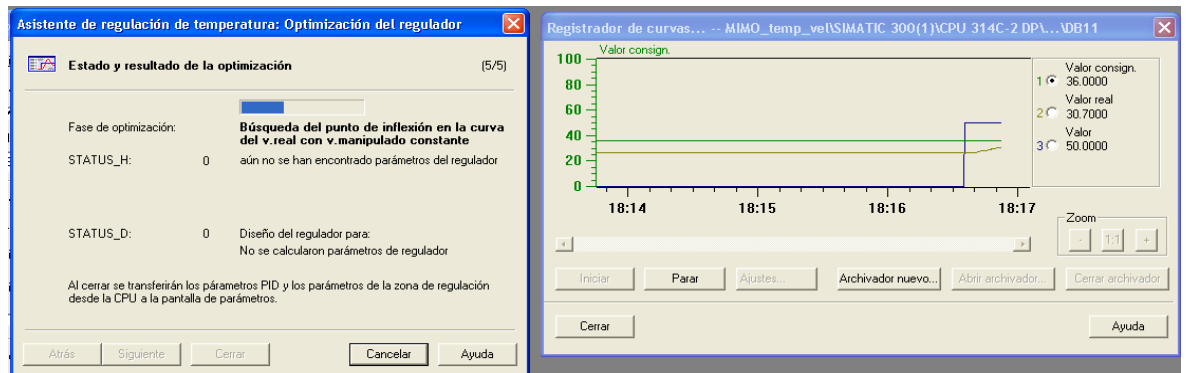


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

En la figura 95, se le asigna un escalón del 50% al lazo de temperatura, es decir el autómatas envía una señal de 5V al relé y las resistencias eléctricas consumen una potencia eléctrica de 2000W.

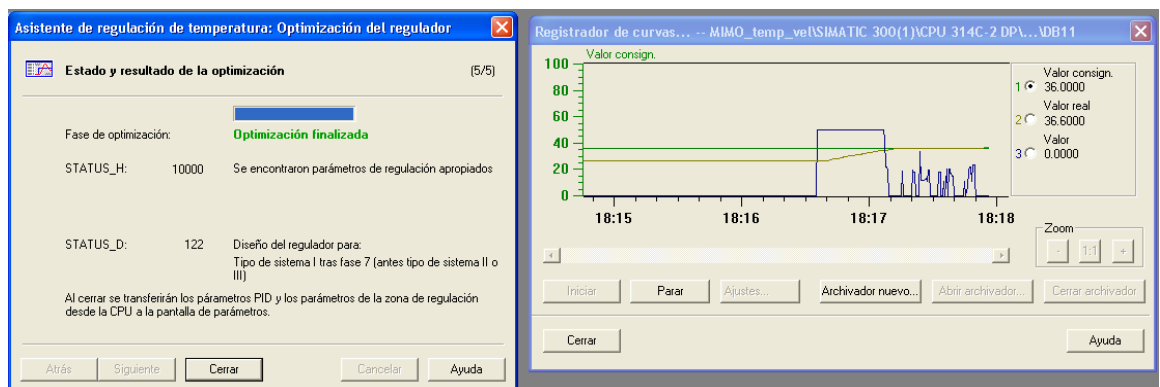
En la figura 96 se muestra el proceso de búsqueda de parámetros, en este punto, el optimizador del regulador comprueba una serie de configuraciones hasta finalizar con un mensaje en verde que muestra la optimización finalizada, ver figura 97.

Figura 96. Asistente de regulación en proceso de búsqueda de parámetros



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Figura 97. Optimización finalizada para un punto de operación.



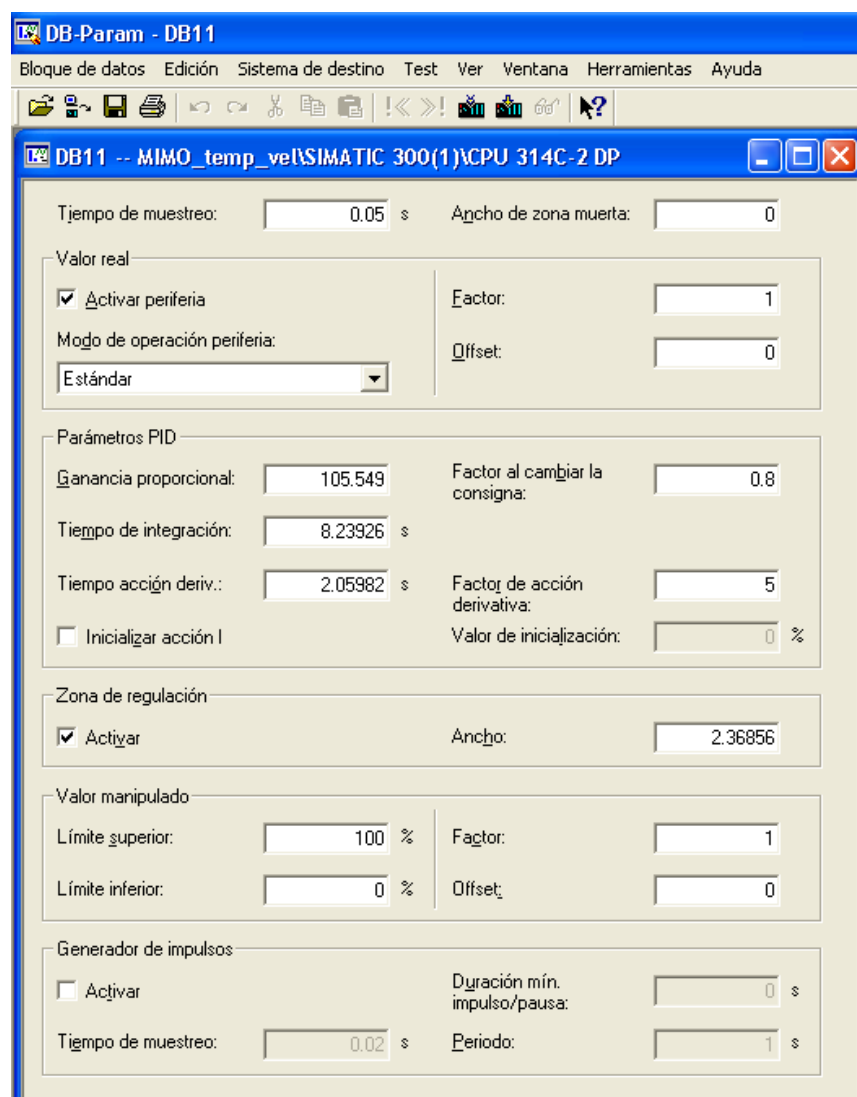
Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Al cerrarse la aplicación, los parámetros PID encontrados se cargan en la DB, y se muestran en la ventana de parametrización de la DB58 como en la tabla de variables que hemos construido para visualizar los demás datos de la DB. Los valores de los parámetros son los siguientes y se observan en la figura 98.

- ❖ Gain: 105.549// Ti: 8.23926 // Td: 2.05982
- ❖ Factor cambio consigna: 0.8// zona de regulación: 2.36856

Hallados estos parámetros, procedemos a la comprobación, mediante la ejecución del bloque FB58 trabajando en modo automático, y realizando cambios de consigna en la temperatura. Después de esto, se comprueba acoplando los dos lazos ya sintonizados (lazo de velocidad y de temperatura) que corresponde al sistema MIMO descentralizado, esto se muestra en la siguiente sección.

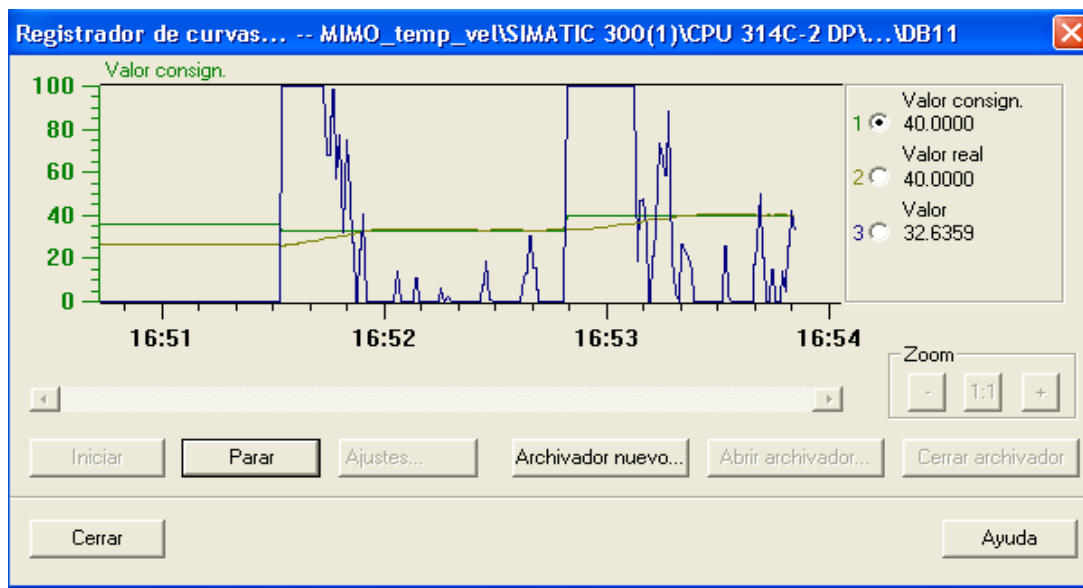
Figura 98. Bloque de datos DB11 con los nuevos parámetros después de optimizarlos para un punto de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

✓ *Representación de las curvas suministradas por Step 7 del bloque FB 58.*
Curva verde: representa el set point **SP** 40°C, curva marrón: representa la **PV** o temperatura real del aire 40°C, la curva azul: simboliza la acción de control en porcentaje **CV** 32.6359%, ver figura 99.

Figura 99. Lazo de temperatura de aire ante cambios de consigna.



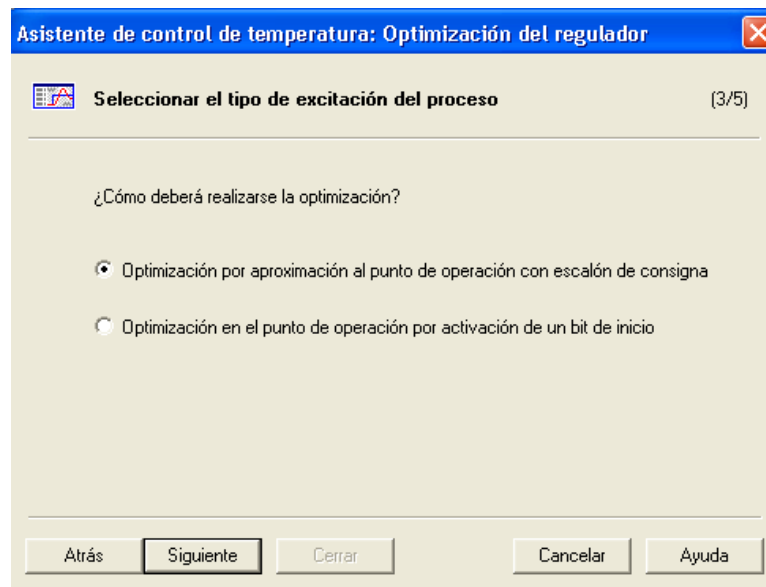
Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

✓ **Optimización en un rango de consigna**

En el 3.er paso del asistente escogemos el tipo de optimización que queremos hacer. En este caso, cambiando la consigna, encontraremos los parámetros para un determinado rango de consigna.

Inicialmente es necesario asignar un valor en el parámetro de referencia ya sea en la tabla de variables o en el entorno de parametrización del DB58. Este valor de SP_INT es considerado el límite inferior del rango de temperatura que se quiere optimizar, por ejemplo 25°C.

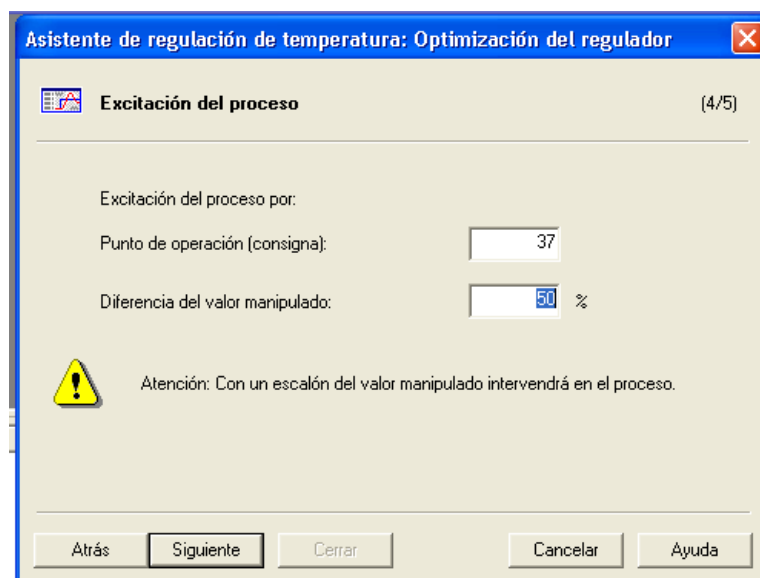
Figura 100. Selección del tipo de excitación del proceso para el asistente de regulación: Optimización en un rango de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

A continuación especificaremos el rango final de la consigna por ejemplo (37°C) el cambio de valor de TUN_DLMN que será el incremento de la señal de salida que se le aplicara al proceso (50%).

Figura 101. Excitación del proceso del 50% y un rango final de 37°C.

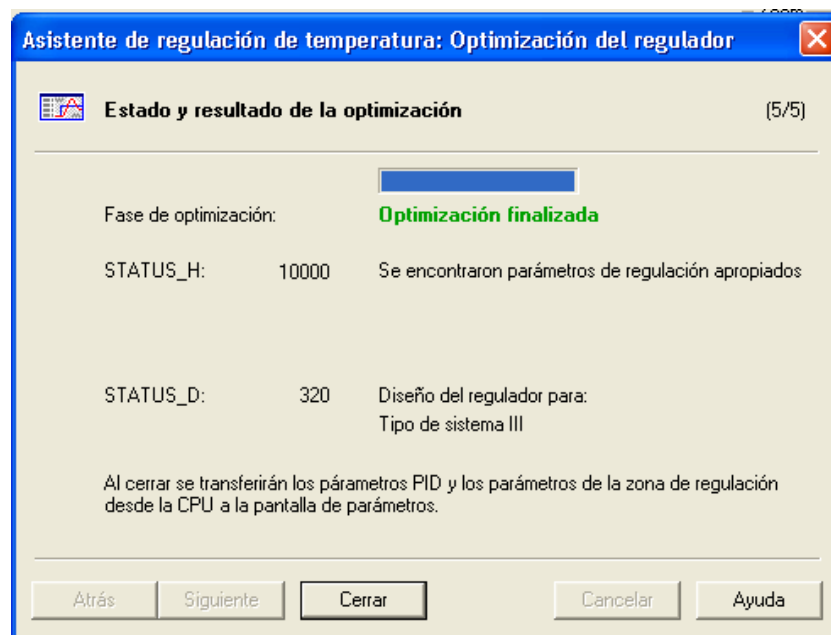


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

En la figura 101, se le asigna un escalón del 50% al lazo de temperatura, es decir el autómatas envía una señal de 5V al relé y las resistencias eléctricas consumen una potencia eléctrica de 2000W. La optimización del regulador en esta opción

En la figura 102 se observa la optimización finalizada, damos click en cerrar y los parámetros obtenidos se guardan en la DB11.

Figura 102. Optimización finalizada para un rango de consigna.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Los valores de los parámetros son los siguientes y se observan en la figura 80.

❖ Gain: 9.58859// Ti: 13.1499 // Td: 3.56225

Hallados estos parámetros, procedemos a la comprobación, mediante la ejecución del bloque FB58 trabajando en modo automático, y realizando cambios de consigna en la temperatura. Después de esto, se comprueba acoplando los dos lazos ya sintonizados (lazo de velocidad y de temperatura) que corresponde al sistema MIMO descentralizado, esto se muestra en la siguiente sección.

✓ *Representación de las curvas suministradas por Step 7 del bloque FB 58.*

Curva verde: representa el set point **SP** 37°C, curva marrón: representa la **PV** o temperatura real del aire 37.4°C, la curva azul: simboliza la acción de control en porcentaje **CV** 1.4814%, ver figura 104.

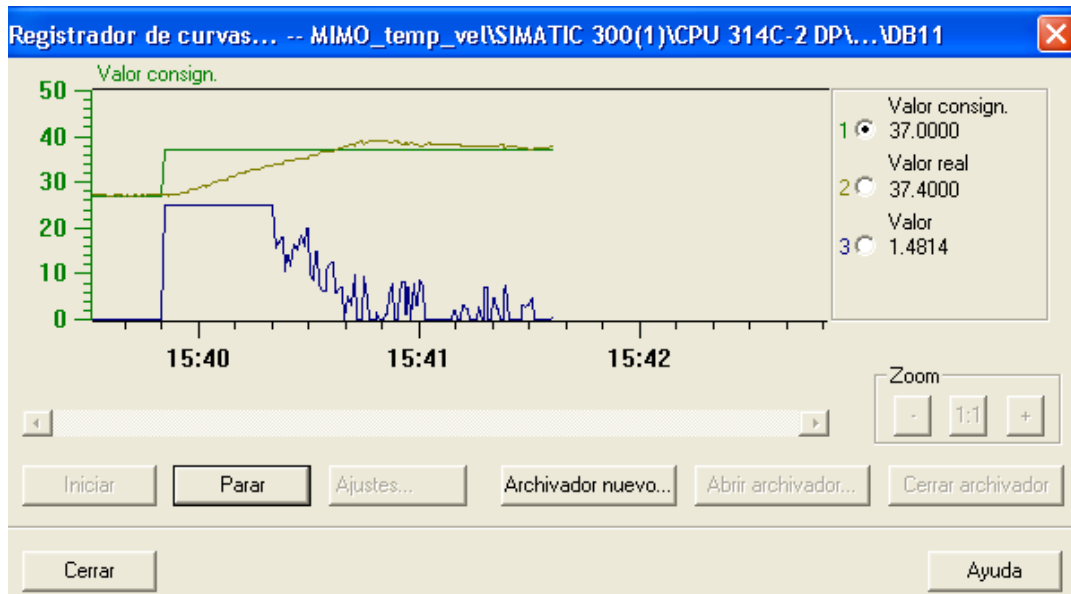
Figura 103. Bloque de datos DB11 con los nuevos parámetros después de optimizarlos para un rango de operación-

The screenshot shows the parameter configuration window for block DB11. The window title is "@DB11 -- MIMO_temp_vel\SIMATIC 300(1)\CPU 314C-2 DP ONLINE". The parameters are organized into several sections:

- Tiempo de muestreo:** 0.05 s
- Ancho de zona muerta:** 0
- Valor real:**
 - Activar periferia
 - Modo de operación periferia: Estándar
 - Factor: 1
 - Offset: 0
- Parámetros PID:**
 - Ganancia proporcional: 9.58859
 - Tiempo de integración: 13.1499 s
 - Tiempo acción deriv.: 3.56225 s
 - Factor al cambiar la consigna: 0.8
 - Factor de acción derivativa: 5
 - Valor de inicialización: 0 %
 - Inicializar acción I
- Zona de regulación:**
 - Activar
 - Ancho: 26.0727
- Valor manipulado:**
 - Límite superior: 100 %
 - Límite inferior: 0 %
 - Factor: 1
 - Offset: 0
- Generador de impulsos:**
 - Activar
 - Duración mín. impulso/pausa: 0 s
 - Tiempo de muestreo: 0.02 s
 - Periodo: 1 s

Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Figura 104. Lazo de temperatura con los parámetros encontrados para un rango de consigna.



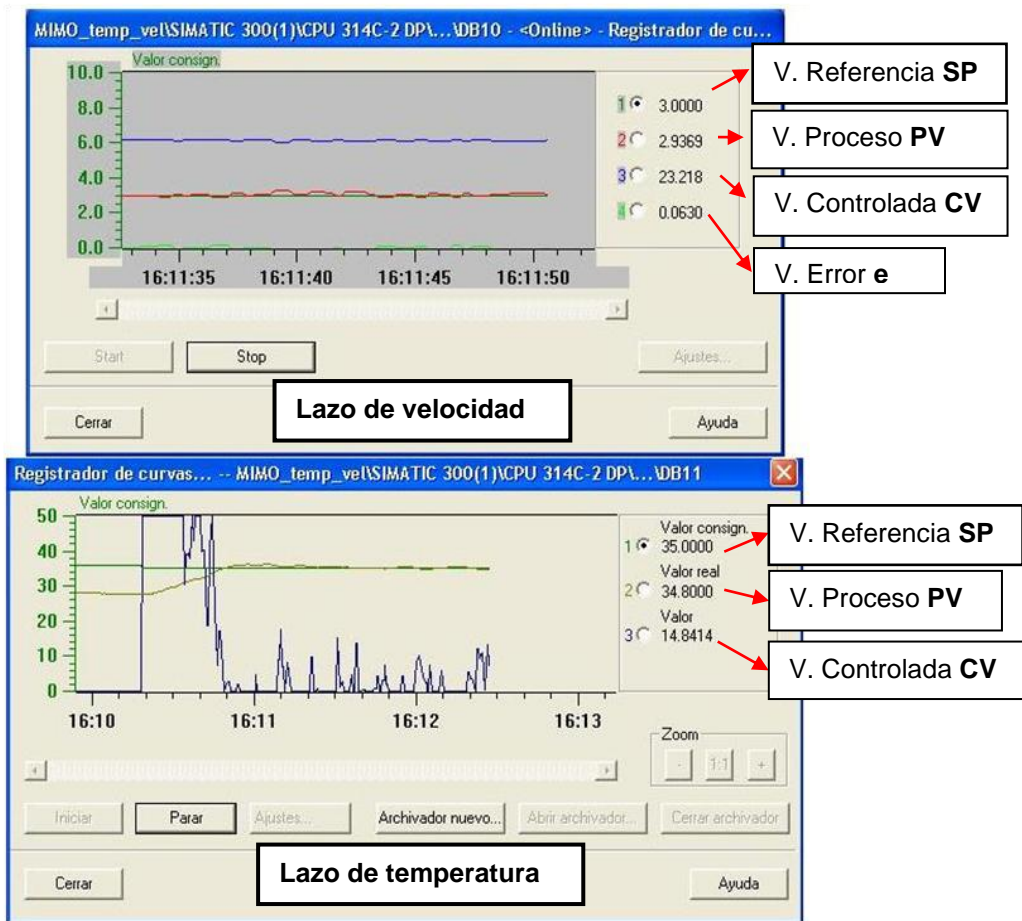
Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

8.2.3 Resultado de la sintonización del sistema MIMO con arreglo descentralizado.

Después de haber realizado los ajustes de parámetros PID de forma independiente para los dos sistemas: lazo de control de velocidad y temperatura de aire, procedemos a acoplarlos y ejecutarlos en conjunto. La característica más importante del sistema multivariable implementado es el efecto de la interacción dinámica entre variables, por ejemplo, el valor de la entrada de la temperatura no solo afecta la acción correctiva en la potencia eléctrica de las resistencias, sino también la acción de salida del flujo de aire. A continuación se muestran una serie de cambios de consigna para cada uno de los sistemas y sus respuestas frente a estas.

En la figura 105 se observa la regulación del sistema MIMO, en donde el lazo de control de velocidad y temperatura de aire tienen en sus set point **SP** 3 m/s y 35 grados centígrados respectivamente.

Figura 105. Regulación sistema MIMO-prueba 1.

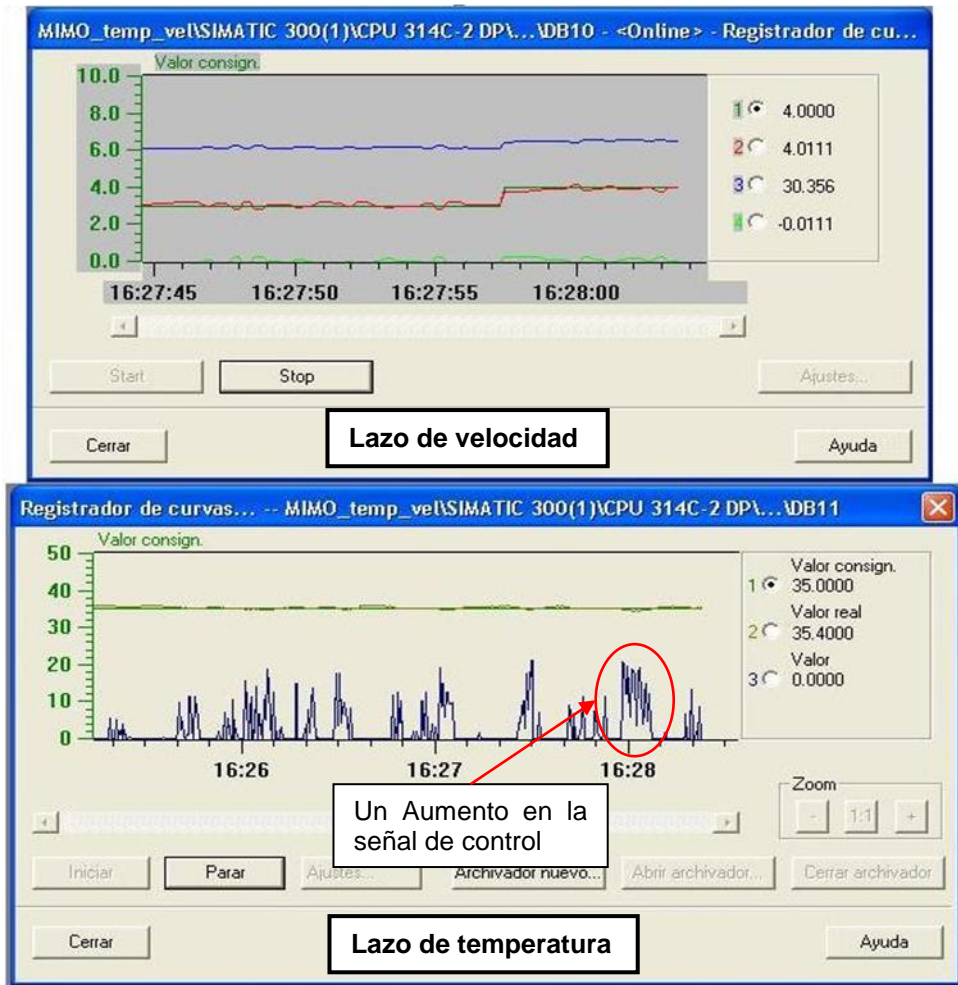


Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Al iniciar el control MIMO, podremos verificar rápidamente la rápida respuesta en el lazo de control de velocidad frente al lazo de temperatura en alcanzar su valor referencia SP.

La figura 106 muestra la respuesta de la velocidad frente al cambio de su consigna de 3m/s a 4 m/s, también se aprecia el efecto que incurre ese aumento de velocidad de aire en el control de la temperatura, ya que induce una mayor cantidad de aire y hace que el sistema presente una disminución en su temperatura, debido a esto, la acción correctiva del controlador de temperatura presenta aumentos considerables con el fin de mantener la temperatura del aire PV en su valor de referencia SP.

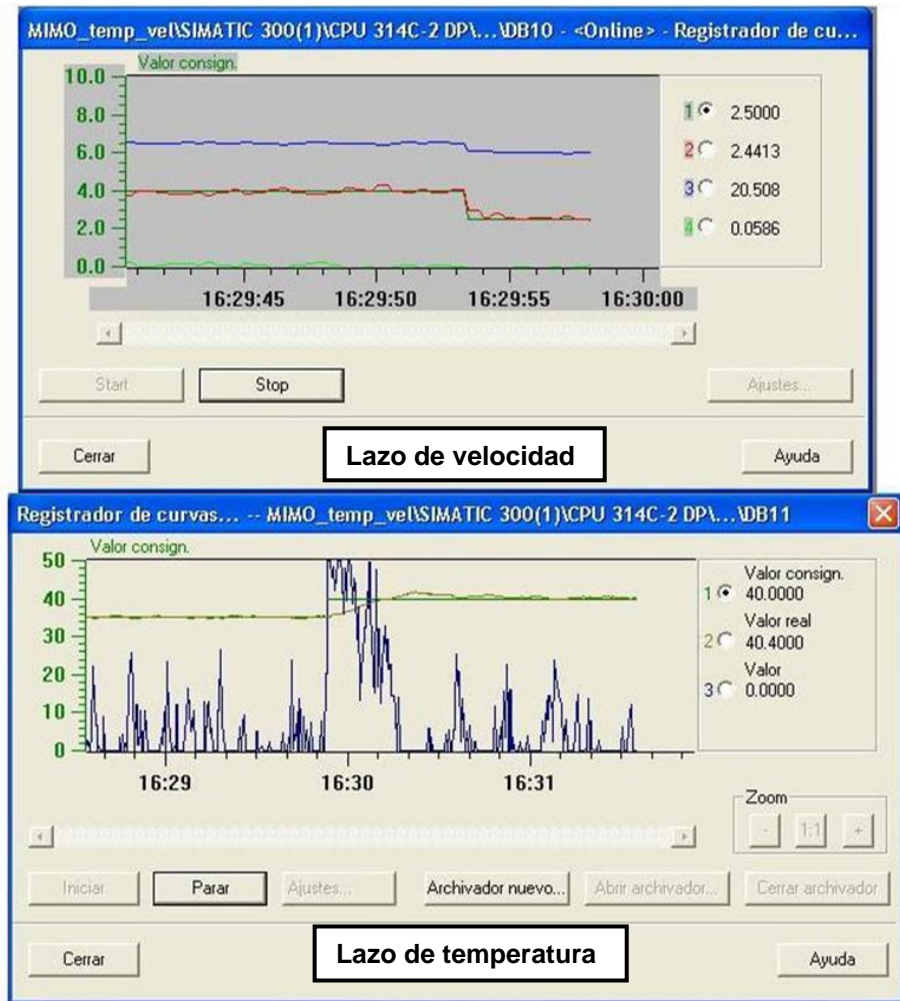
Figura 106. Regulación sistema MIMO prueba 2.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Por último se realizaron cambios de consigna en los dos sistemas univariables, para el lazo de control de velocidad su variación fue de 4 a 2.5 m/s y el lazo de control de temperatura fue de 35 a 40 grados centígrados. En la figura 107 se observan tales cambios.

Figura 107. Regulación sistema MIMO prueba 3.



Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

8.3 VALIDACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS

Para verificar el grado de desviación con respecto a valores reales, en las lecturas realizadas por los sensores implementados en los diferentes sistemas de control mencionados, se emplearon instrumentos estándar cuyos valores de medida son acordes a la normatividad.

8.3.1 Validación sistema de control de posición

Como sistema de comparación para la variable de posición de la compuerta, se utilizó una escala angular, con divisiones de 1° y en un rango de 0° - 180° , la cual está situada concéntricamente con el eje de rotación de la compuerta.

Para indicar el ángulo, se fijó al eje de la compuerta una manecilla como se observa en la figura 108.

Figura 108. Validador del sistema de posición angular.



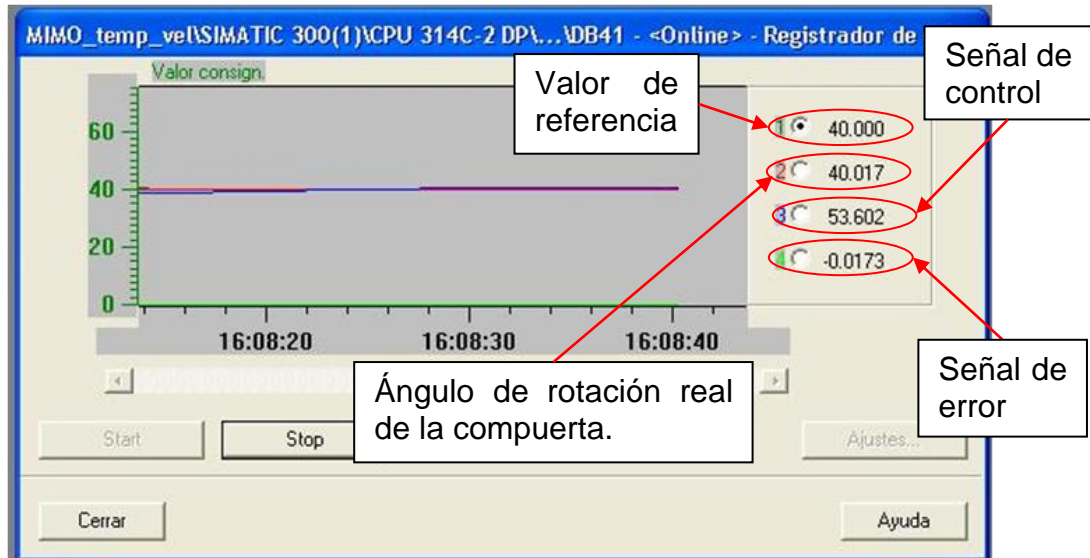
Fuente: autores.

El porcentaje de error en el ángulo medido por el potenciómetro con respecto a la escala angular corresponde a:

$$\%ERROR = \frac{T_{REF} - T_{MEDIDA}}{T_{REF}}$$
$$\%ERROR = \frac{38 - 40.017}{38} = -5.31\%$$

En la tabla 14 se tabulan los resultados obtenidos y en la figura 109 se muestra la curva suministrada por Step 7 al ejecutar el sistema de posición angular con los parámetros PI que se obtuvieron en la sección 8.1.

Figura 109. Valores del sistema de posición angular



Fuente: autores.

Tabla 14. Valores de posición angular obtenidos para el sistema de medición de posición implementado y el instrumento comparador.

POSICIÓN ANGULAR	POTENCIÓMETRO	VALIDADOR DE POSICIÓN	%ERROR
Ángulo °	40.017°	38°	5.31%

Fuente: Autores

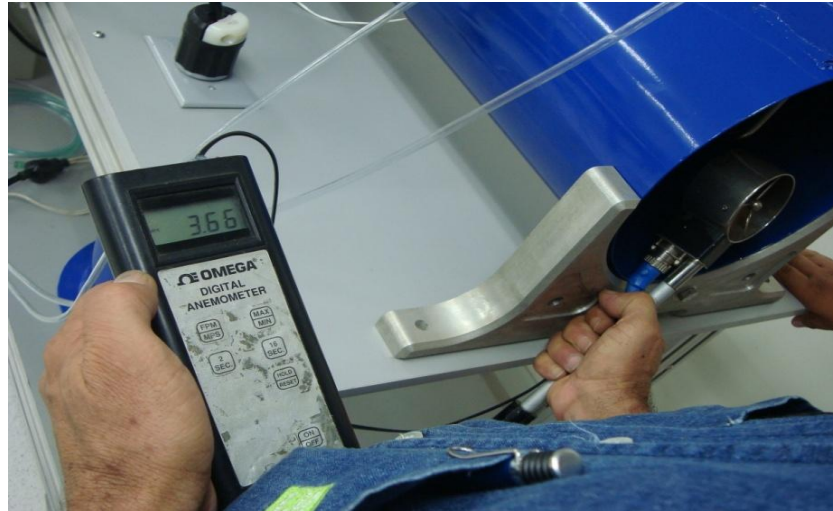
8.3.2 Validación sistema de control de velocidad

Como se mencionó anteriormente la variable de velocidad del aire en el ducto, fue determinada a través de la ecuación de Bernoulli, midiendo la presión dinámica en el ducto por medio de un tubo de pitot y un transmisor de presión diferencial. La comparación de este sistema de sensado, para observar el grado de desviación con respecto a los sistemas estándar, se llevó a cabo por medio de un anemómetro digital de turbina, como se observa en la figura 110.

La primera medición de comparación, se tomó con un valor en la variable de consigna de 3m/s, siendo los valores del sistema de medición de velocidad implementado y del anemómetro los que se muestran en las figuras 110 y 111.

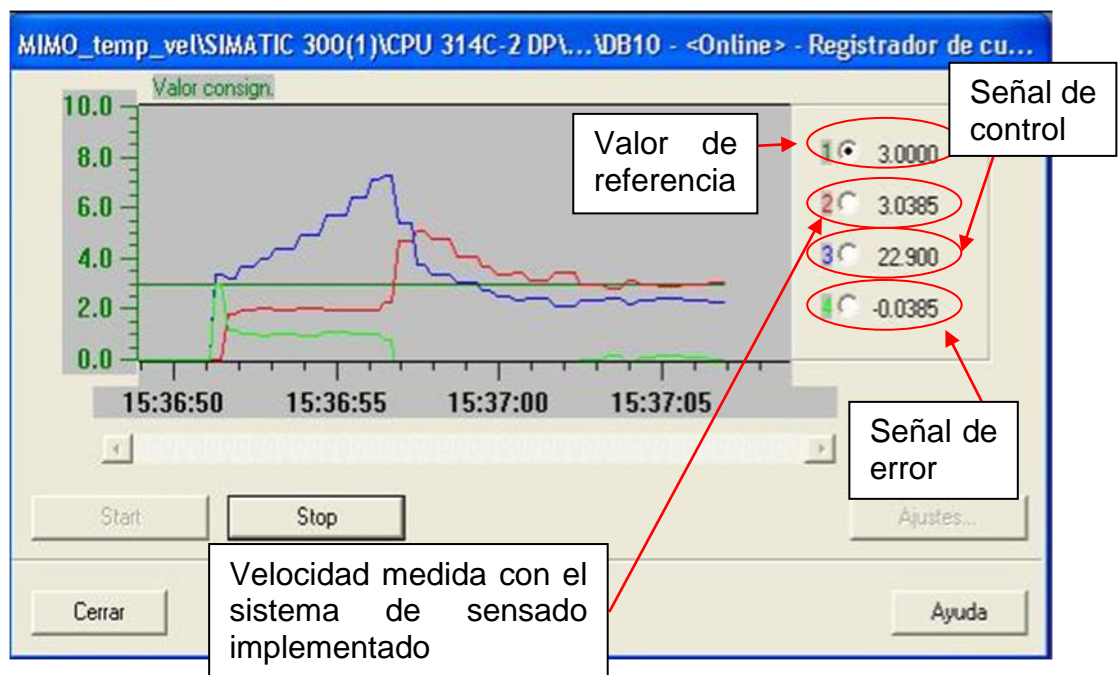
El lazo de control de velocidad se ejecutó con los parámetros PI encontrados en la sección 8.2.1

Figura 110. Medición anemómetro digital



Fuente. Autores

Figura 111. Valores de velocidad de aire del sistema de medición implementado



Fuente: Fuente: Siemens, Step 7-Administrador Simatic.

Como se observa en la figura 111, el valor medido por el sistema de sensado implementado en el objeto de aprendizaje arroja un error dado por:

$$\%ERROR = \frac{T_{REF} - T_{MEDIDA}}{T_{REF}}$$

$$\%ERROR 1 = \frac{3.66 - 3.038}{3.66} = 16.99\%$$

La segunda medición se llevó a cabo con un valor en la consigna del sistema de control de 4m/s, los dos valores de velocidad medidos por el sistema de sensado implementado y el anemómetro digital corresponden a los mostrados en la tabla 15.

Tabla 15. Valores de velocidad obtenidos para el sistema de medición de velocidad implementado y el instrumento comparador.

VELOCIDAD	SISTEMA DE SENSADO IMPLEMENTADO	ANEMÓMETRO	%ERROR
V1(m/s)	3.038	3.66	16.99%
V2(m/s)	4.073	4.82	15.49%

Fuente. Autores.

8.3.3 Validación sistema de control de temperatura

Como instrumento de comparación para la validación de la medida realizada por el sensor de temperatura PT100, se utilizó un termómetro de mercurio con escala de temperatura en °F como el mostrado en la figura 112.

Figura 112. Termómetro de mercurio utilizado para comparación de la temperatura



Fuente. Autores

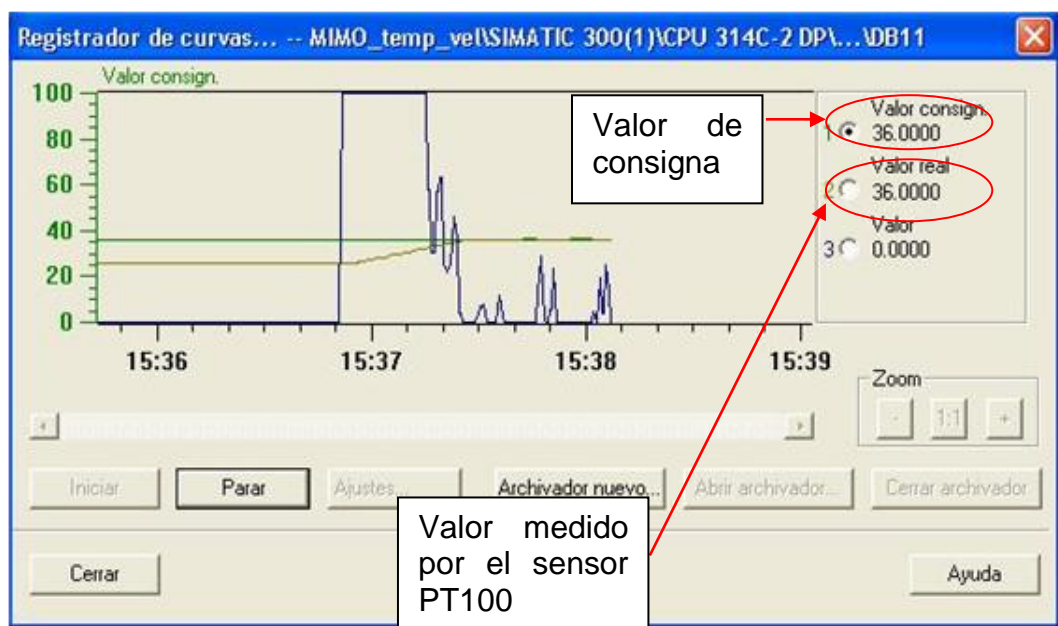
Para un valor de temperatura de consigna de 36° en el sistema de control, los valores medidos por el PT100 y el termómetro de mercurio corresponden a los mostrados en la tabla.

Tabla 16. Valores de temperatura medida por el PT100 y el instrumento comparador

TEMPERATURA	PT100	TERMÓMETRO DE MERCURIO	%ERROR
T1°C	36°C	36.2°C	0.55%

Fuente autores.

Figura 113. Valores de temperatura medidos por el sensor PT100 implementado en el sistema de control.



Fuente. Autores

Figura 114. Termómetro de mercurio como instrumento comparador $T=98.7^{\circ}\text{F}$



Fuente. Autores

9 CONCLUSIONES

Por medio del desarrollo e implementación de este objeto de aprendizaje se dotó al laboratorio de automatización industrial con una herramienta importante en el manejo de control de procesos cuasicontínuos o muestrados basados en controlador industrial PLC, permitiendo el desarrollo de competencias en los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander en este tipo de procesos.

Se mostró la importancia y simplicidad de aplicar reguladores PID en el control de procesos mediante la aplicación de estos en nuestro objeto de aprendizaje, también se pudo comprobar la efectividad de este tipo de controladores en sistemas univariables como en sistemas multivariables.

En ausencia de modelos matemáticos para los sistemas de control implementados en nuestro objeto de aprendizaje, el método experimental de Ziegler-Nichols es una buena alternativa para la sintonía de controladores PID obteniendo resultados satisfactorios en la regulación de los procesos.

El error apreciable obtenido en la medición de la velocidad del aire, se presenta debido a dos factores, el primero se debe a que existen elementos que se interponen al paso de aire como las resistencias eléctricas, generando fluctuaciones de presión en el transmisor de presión diferencial, el segundo factor está relacionado con la geometría definida para los ductos, la cual ocasiona que las condiciones de flujo desarrollado no estén presentes en el sistema.

Los sistemas de control que involucran más de una variable de entrada y de salida, y que presentan un comportamiento dinámico relativamente simple pueden ser tratados como sistemas de control descentralizados, donde las variables de entrada y salida son pareadas en lazos independientes, para ser controlados por algoritmos PID como en los sistemas univariables.

El tratamiento de sistemas multivariables con arreglo descentralizado es una alternativa sencilla para sistemas donde no se requiere de gran precisión y donde las interacciones dinámicas entre los lazos no son tan fuertes, sin embargo la precisión en la regulación de los lazos de control aquí implementados, puede ser mejorada con otras técnicas como por ejemplo los sistemas de control centralizados.

10 RECOMENDACIONES

Antes de iniciar cualquier interacción con la herramienta de aprendizaje, es necesaria una lectura detallada del **manual de operación** y así evitar posibles daños permanentes en el banco de prácticas o usos inadecuados en los sistemas de control implementados.

Incorporar diversas geometrías de compuerta para el sistema de control de posición angular, con el fin de brindar al estudiante conceptos más profundos en el área de control de procesos.

Para mejorar los resultados de regulación en el lazo de temperatura, se recomienda emplear un conversor-resistencia voltaje en conjunto con un pt100 de menor rango de medida o en su defecto un termistor debido a que este último tiene un desempeño aceptable para rangos de medida de temperatura bajo pudiendo ser compensado en el conversor.

BIBLIOGRAFÍA

MANDADO PEREZ, Enrique, ACEVEDO, Jorge Marcos, Autómatas programables y sistemas de automatización, Marcombo, segunda edición, Barcelona, septiembre 2009.

BACELL, Josep y ROMERAL, José Luis. Autómatas Programables. 1998, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. México D.F.

KATSUHIKO, Ogata. Ingeniería de control moderna. Pearson Prentice Hall. Tercera edición. 1998.

KUO, benjamín C, sistemas de control automático, Pearson Prentice Hall, séptima edición, 1996, México.

INFOPLC, <http://www.infoplcn.net/>

SIEMENS, <http://www.siemens.com/entry/co/es/>

TKNIKA, <http://www.tknika.net/liferay/web/guest/tnika>

ANEXOS

ANEXO A. COSTOS PROYECTO DE GRADO

Descripción	Costo
Fuente motor 12VDC	\$ 500.000
Fuente auxiliar 24VDC	\$ 70.000
Motor-Hélice-Speed	\$ 220.000
Lámina Ductos 1.85 mm Calibre 14	\$ 80.000
Potenciómetro	\$ 22.000
Lamina Brida 4 mm- y corte	\$ 65.000
Acople Flexible CNC	\$ 60.000
Soportes Ducto En Aluminio	\$ 220.000
Soporte Compuerta Aluminio	\$ 20.000
Material Acrílico (Engranajes-Caja de Engranajes)	\$ 30.000
Tubo Pitot	\$ 180.000
Transmisor de presión diferencial	\$ 250.000
Relé de estado sólido	\$ 247.000
Disipador para relé	\$ 100.000
Construcción, Bridas	\$ 60.000
Caja Eléctrica	\$ 50.000
Material_Construcción_Ángulos	\$ 70.000
Resistencias eléctricas	\$ 130.000
Pintura electrostática módulos	\$ 100.000
Cables para conexión	\$ 20.000
Soportes mecanizado ducto	\$ 100.000
Escariador para mecanizado de soportes	\$ 50.000
Tornillería estructura	\$ 130.000
Diseño componentes electrónicos	\$ 200.000
Imprevistos	\$ 100.000
Impresiones	\$ 80.000
TOTAL	\$ 3.154.000

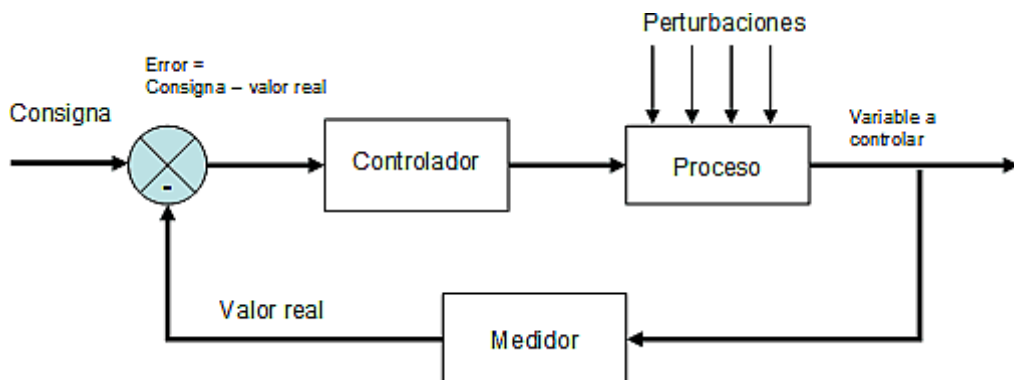
ANEXO B. MARCO TEÓRICO

B1. SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control está definido como un conjunto de componentes que pueden regular su propia conducta o la de otro sistema (máquina o proceso), con el fin de lograr un funcionamiento predeterminado, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados.

Un sistema de control puede ser representado por medio de un diagrama de bloques como se muestra en la figura. El valor realimentado de la variable de proceso es comparado con el valor de referencia, la diferencia resultante o error es realimentado al controlador, quien actúa para modificar las condiciones del proceso y así llevar la variable de proceso lo más cerca posible del valor de referencia establecido. En la figura 1 se observa un diagrama de bloques clásico de un sistema de control en lazo o bucle cerrado.

Figura 1. Diagrama de bloques básico de un sistema de control en lazo cerrado



Fuente. Wikipedia enciclopedia libre

- **Controlador:** son sistemas eléctricos o electrónicos que están permanentemente recibiendo señales de estado del sistema bajo su control y que al detectar una desviación de los parámetros pre-establecidos del funcionamiento normal del sistema, actúan mediante preactuadores y actuadores, para llevar al sistema de vuelta a sus condiciones operacionales normales de funcionamiento.

- **Consigna:** una variable de entrada que establece el valor deseado de la variable controlada, esto se puede hacer a través de un elemento de entrada de referencia y puede lograrse manualmente, automáticamente o de forma programada.
- **Error:** diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y la variable de consigna o referencia.
- **Perturbación:** un cambio inesperado que toma lugar en un proceso y que tiende a afectar adversamente el valor de la variable controlada.
- **Variable controlada:** La variable controlada es la cantidad o condición que es medida y controlada con el fin de mantenerla en un valor deseado.
- **Variable Realimentada:** es la señal medida por un instrumento o sensor de la variable a controlar.
- **Señal de control:** es la señal que emite el controlador con el fin de modificar las condiciones de la planta, para llevar las variables cercanas a los valores establecidos.
- **Planta o proceso:** es un equipo o simplemente un juego de piezas de una máquina, funcionando conjuntamente, cuyo objetivo es realizar una función determinada. Una planta también es un objeto físico que deba controlarse, ejemplo: horno de calentamiento, reactor químico, aeronaves etc.

B2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL SEGÚN LA FORMA DE CONTROLAR EL PROCESO

- **Sistemas de control en lazo abierto:** es aquel sistema en el que solo actúa el proceso en la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente es decir la salida no tiene efecto sobre la señal de control. En presencia de perturbaciones un sistema de control no cumple con su función asignada.
- **Sistemas de control en lazo cerrado:** la variable de salida es realimentada para ser comparada con el valor de referencia, esta diferencia (error) es enviada al controlador con el fin de reducir el error y así llevar la

salida lo más cercana del valor de referencia. El termino lazo cerrado implica el uso de la realimentación para reducir el error del sistema. Ver figura 1

B3. SISTEMAS DE CONTROL MIMO Y SISO

Cuando en un sistema de control una señal de entrada genera una señal de salida (single input-single output) se dice que el sistema es de tipo **SISO**.

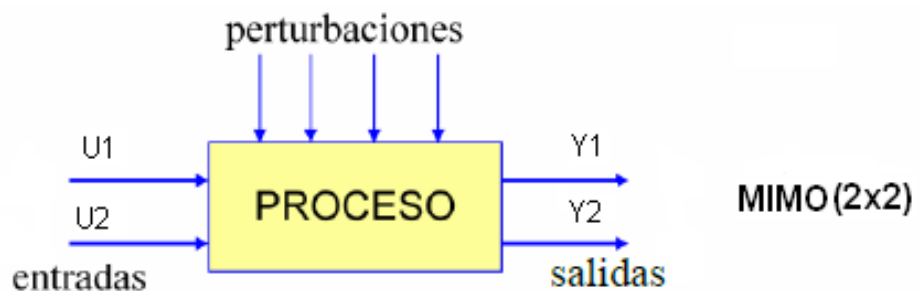
Figura 2. Sistema SISO



Fuente: Autores

En la practica en general se presentan muchas variables a controlar a la vez, que responden a los estímulos de distintas señales de entrada a la vez (multiple input- multiple output **MIMO**).

Figura 3. Sistema MIMO



Fuente: Autores

➤ **control de sistemas multivariables**

En muchos procesos industriales el objetivo consiste en mantener más de una variable en su punto de ajuste o valor deseado como lo muestra la Figura 4.

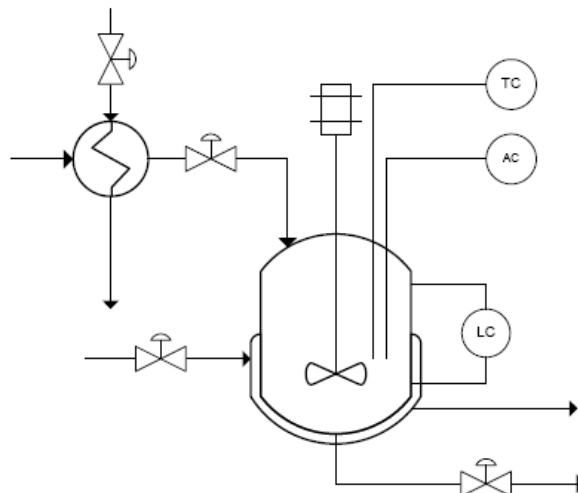
Figura 4 Diagrama de bloques de un proceso de múltiple entrada y múltiple salida.



Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

En este tipo de casos se dice que el problema de control es multivariable (lo cual implica que el número de variables a controlar puede ser 2 o mayor que 2). Para ejemplificar el control de sistemas multivariables considere el reactor de tanque agitado mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Reactor de tanque agitado.

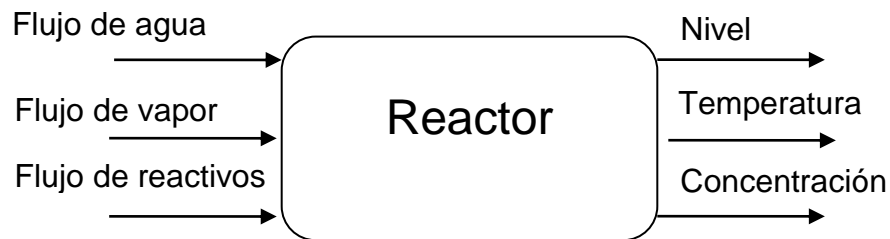


Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

Suponga que se desea controlar el nivel, la temperatura y la composición del efluente del reactor. Como potenciales variables manipuladas podemos

emplear el flujo de la corriente de producto, la carga térmica del medio de calentamiento y el flujo de los reactivos. Se obtiene entonces un diagrama de bloques como el mostrado en la Figura 6.

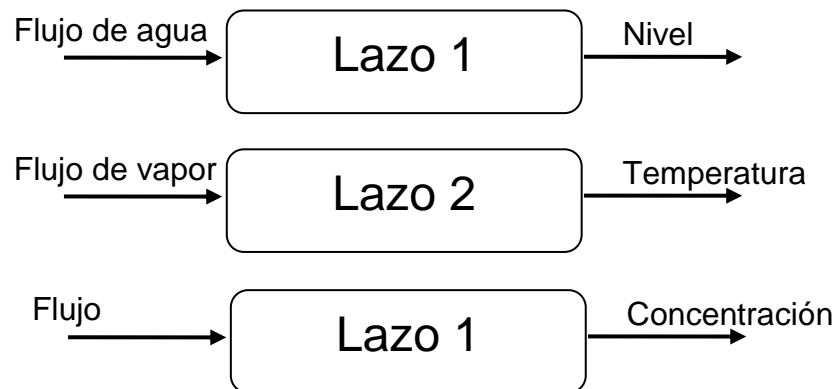
Figura 6. Diagrama de bloques de un reactor de tanque agitado



Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

En este caso es relativamente simple proponer el “pareamiento” de lazos de control (por “pareamiento” entiéndase la decisión de qué variable manipulada controlará a qué variable controlada) mostrado en la Figura 7.

Figura 7. Pareamiento de las variables de control

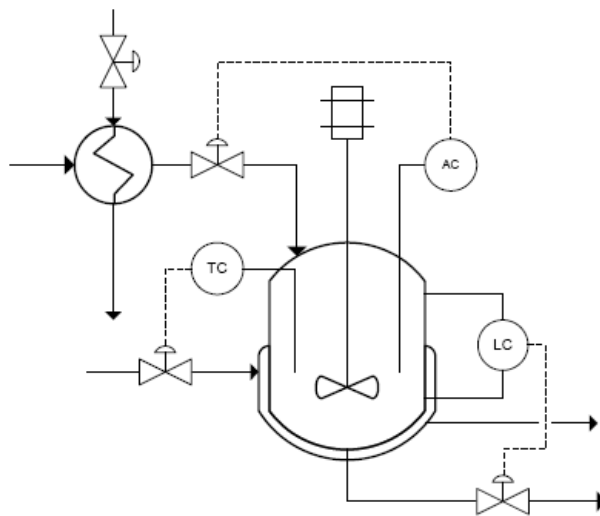


Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

A dicho esquema de control de sistemas multivariables se le llama esquema de control descentralizado. Obsérvese que esta forma de resolver el problema de control de sistemas multivariables se reduce a diseñar cada lazo de control de manera independiente del resto de los lazos (es decir, sin tomar en cuenta la

presencia del resto de los lazos de control). Cada lazo se diseña usando los métodos conocidos para el control de sistemas univariados. La Figura 8 muestra cómo se vería el diagrama de instrumentación y tubería (PID) para el reactor de tanque agitado.

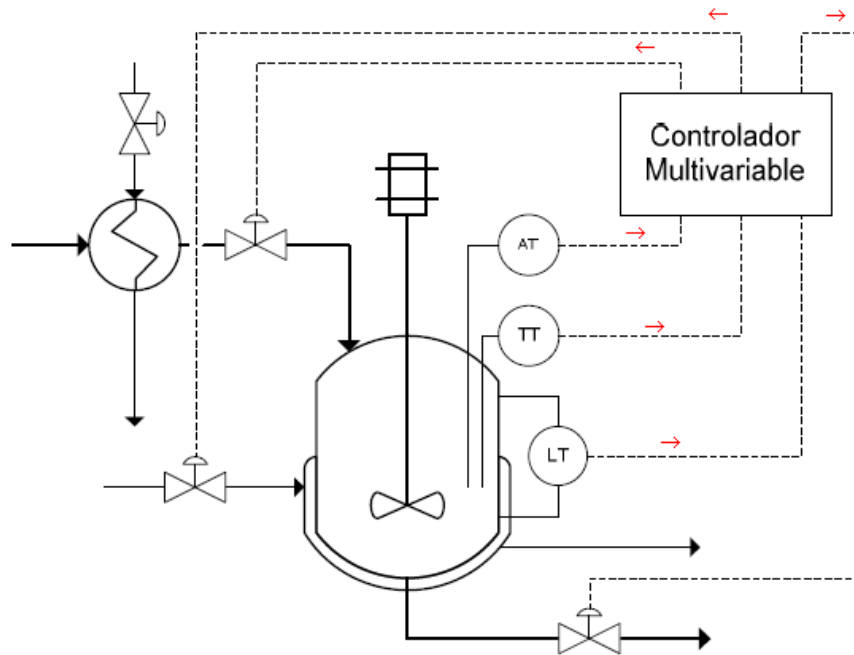
Figura 8. Reactor de tanque agitado con un esquema de control descentralizado



Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

Sin embargo, la presencia de las interacciones entre lazos o dinámicas hará que el desempeño de un lazo afecte a los otros y viceversa. En otras palabras, la interacción complica la sintonía de los lazos de manera independiente. Existe otro esquema para resolver el problema del control de sistemas multivariados, este se basa en el uso de un sólo controlador que acciona simultáneamente todas las variables manipuladas cuando alguna o algunas variables controladas se alejan de su punto de ajuste. Este tipo de control se conoce como control centralizado. De esta forma se consigue compensar el efecto de las interacciones. El grado de compensación depende del diseño del controlador. La Figura 9 muestra el PID del reactor de tanque agitado con un controlador centralizado.

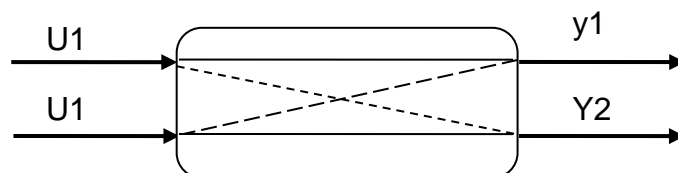
Figura 9. Reactor de tanque agitado con un esquema de control centralizado.



Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

En los sistemas multivariables la interacción entre variables es el efecto más importante en el diseño y sintonía de los lazos de control. Se dice que un proceso presenta interacciones dinámicas cuando una variable de entrada afecta a más de una variable de salida. Es decir, que para un par definido variable de entrada y variable controlada, no sólo la variable controlada se aleja o se acerca a su punto de ajuste en virtud de cambios en la variable de entrada. La Figura 10 muestra un diagrama de cómo es la interacción dinámica.

Figura 10. Interacciones dinámicas.



Fuente <http://www.bdigital.unal.edu.co/2183/1/71364800.2009.pdf>

B4. SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADOS O CUASICONTINUOS

Para un sistema de control cuasicontinuo, las señales provenientes de los sensores son de tipo analógico (continuo en todo instante de tiempo), pero las señales eléctricas continuas son transformadas (convertidas) a señales eléctricas digitales mediante un conversor análogo/digital, para posteriormente las señales eléctricas digitales de entrada son “virtualizadas” en el controlador, al ser convertidas a una representación de ceros (0) y unos (1) en la memoria del controlador.

La inteligencia del controlador se obtiene a partir de procesar, a través de un programa, esas “señales virtuales” de entrada. El controlador generara señales virtuales” de salida (ceros y unos), las cuales deben ser convertidas a señales eléctricas continuas, mediante el uso de un conversor D/A (digital/análogo), finalmente estas señales eléctricas continuas son las encargadas de interactuar con los preactuadores del automatismo.

B5. ESTRATEGIAS DE CONTROL PID

Un PID (Proporcional Integral Derivativo) es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo.

El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero.

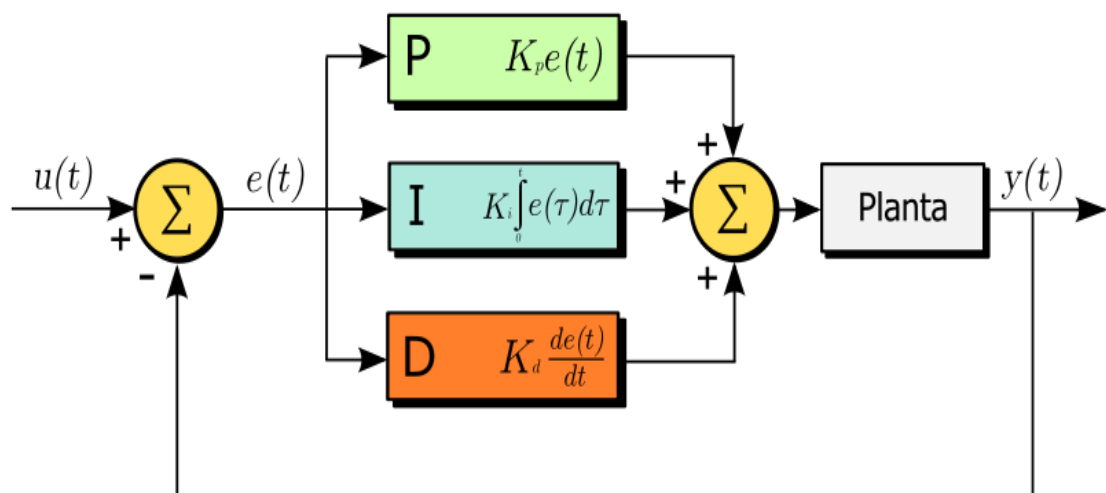
El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de

control del PID, el controlador puede proveer un control diseñado para lo que requiera el proceso a realizar.

La respuesta del controlador puede ser descrita en términos de respuesta del control ante un error, el grado el cual el controlador llega al "set point", y el grado de oscilación del sistema. Nótese que el uso del PID para control no garantiza control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo. Algunas aplicaciones pueden solo requerir de uno o dos modos de los que provee este sistema de control.

Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

Figura 11. Diagrama de bloques de un control PID



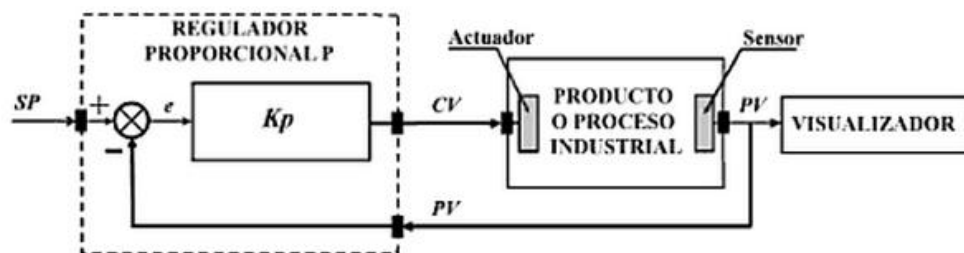
Fuente. Wikipedia enciclopedia libre

➤ Acción proporcional

Se denomina regulador o controlador proporcional a un sistema de control en el que el error se multiplica por un factor de ganancia proporcional K_p para obtenerla variable de control **CV** que actúa sobre el proceso y modifica su punto de operación hasta que la variable de proceso **PV** y la consigna **SP** sean prácticamente iguales.

$$VC\ t = K_c \cdot e\ t$$

Figura 12. Diagrama de bloques de un regulador proporcional



Fuente: MANDADO PÉREZ Enrique, MARCOS ACEVEDO Jorge, Autómatas programables y sistemas de automatización.2009

Para describir la actuación de un regulador proporcional se deben establecer los límites máximos CV_{max} y CV_{min} de la variable de control (ver figura 13) que vienen fijados por el actuador. Se obtiene así una zona en la que la variable CV es una línea recta que se puede especificar de dos formas diferentes:

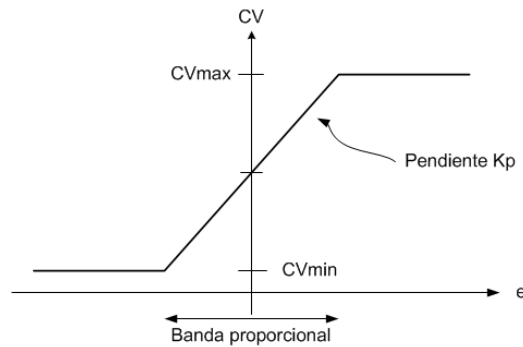
- Mediante su pendiente, que constituye la ganancia K_p del regulador.
- Mediante la zona en la que la curva característica es lineal, conocida como banda proporcional BP. Esta zona está normalmente centrada con relación a la referencia ($e=0$).

La banda proporcional y la ganancia del regulador están relacionadas mediante la ecuación:

$$CV_{max} - CV_{min} = k_p * BP$$

Normalmente se asume que $CV_{max}-CV_{min}$ es el 100%, con lo cual $K_p=100/BP$

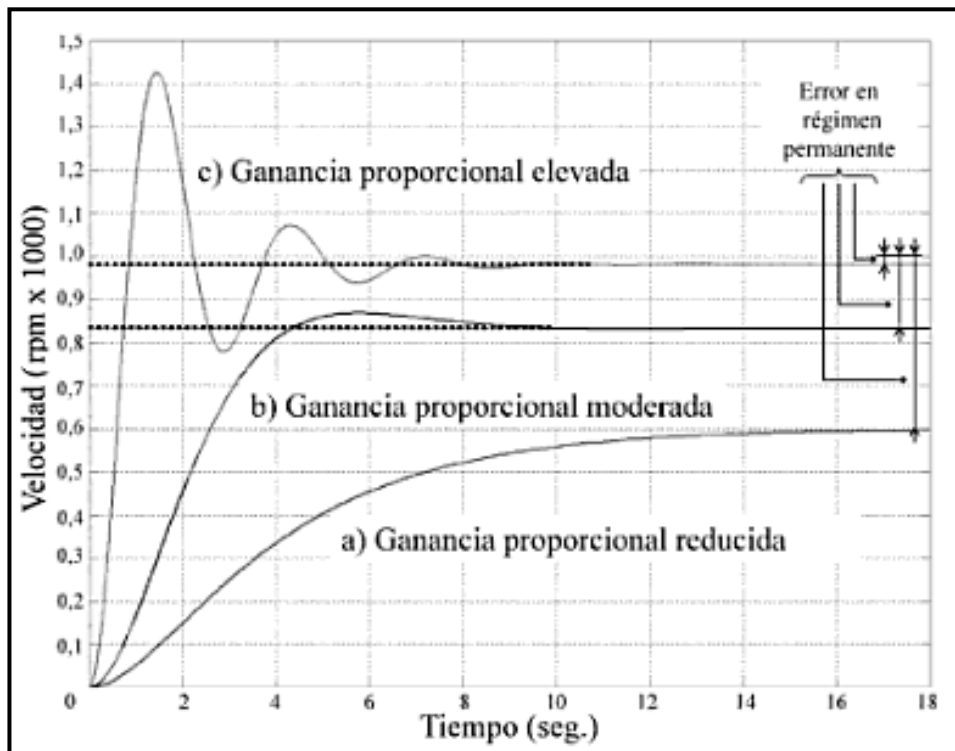
Figura 13. Actuación de un regulador proporcional



Fuente: MANDADO PÉREZ Enrique, MARCOS ACEVEDO Jorge, Autómatas programables y sistemas de automatización.2009

Como objeto de mostrar el efecto de la acción proporcional se representa el sistema de control realimentado de un motor de corriente continua, constituye un servomecanismo, que debe girar a 1000rpm.

Figura 14. Respuesta de la velocidad de un motor de cc a diferentes valores de ganancia. Con señal de referencia=1000 rpm.



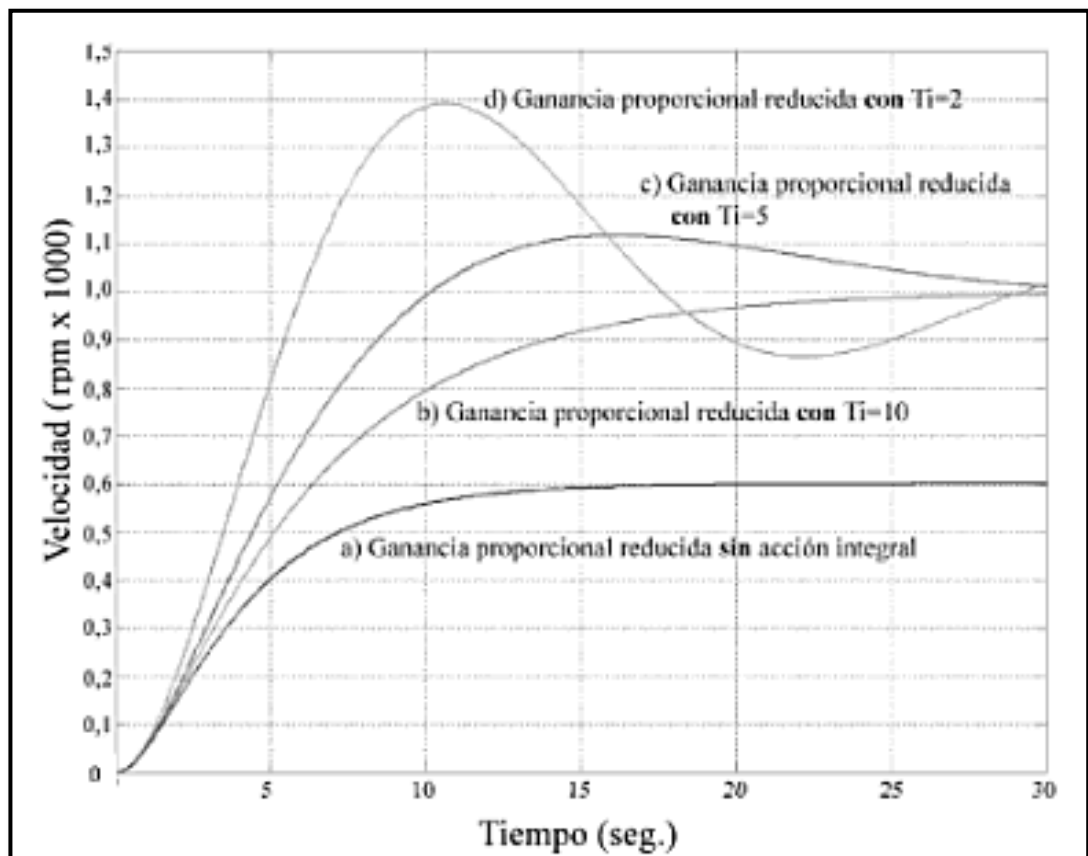
Fuente: MANDADO PÉREZ Enrique, MARCOS ACEVEDO Jorge, Autómatas programables y sistemas de automatización.2009

➤ Acción integral

El modo de control Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; Luego es multiplicado por una constante.

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(t) dt$$

Figura 15. Respuesta de la velocidad de un motor de cc a diferentes valores de ganancia. Con acción integral y con señal de referencia=1000 rpm.



Fuente: MANDADO PÉREZ Enrique, MARCOS ACEVEDO Jorge, Autómatas programables y sistemas de automatización.2009

➤ Acción derivativa

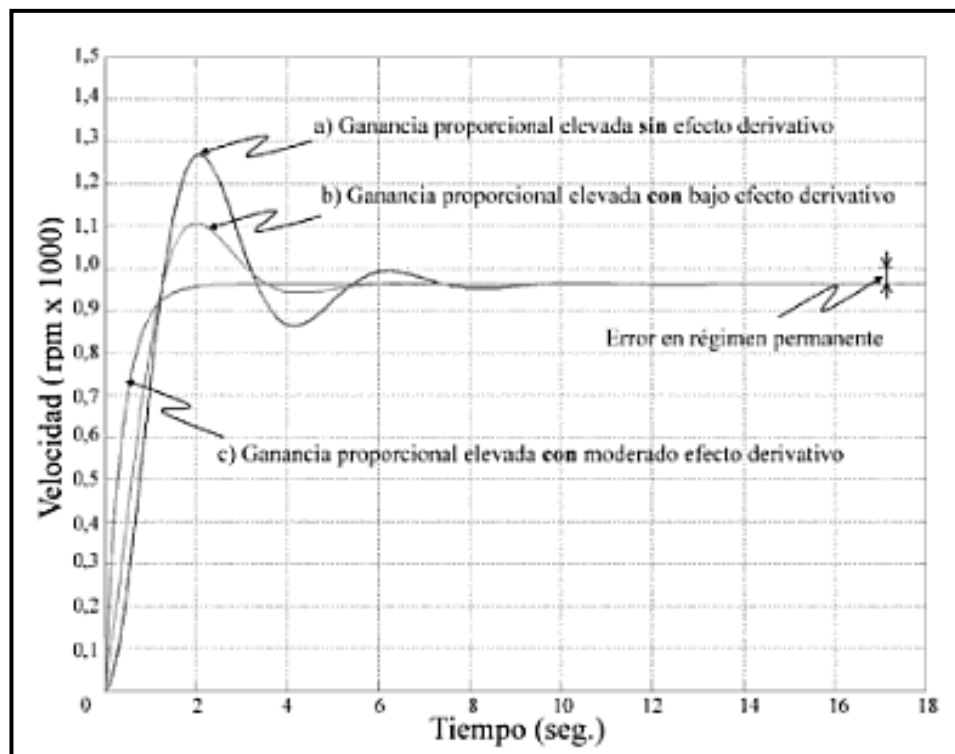
Cuando el tiempo de acción derivada es grande, hay inestabilidad en el proceso. Cuando el tiempo de acción derivada es pequeño la variable oscila demasiado con relación al punto de consigna. Suele ser poco utilizada debido a la sensibilidad al ruido que manifiesta y a las complicaciones que ello conlleva.

El tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones. La acción derivada puede ayudar a disminuir el rebasamiento de la variable durante el arranque del proceso; Puede emplearse en sistemas con tiempo de retardo considerables, porque permite una repercusión rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

La representación matemática de la parte derivativa está dada por:

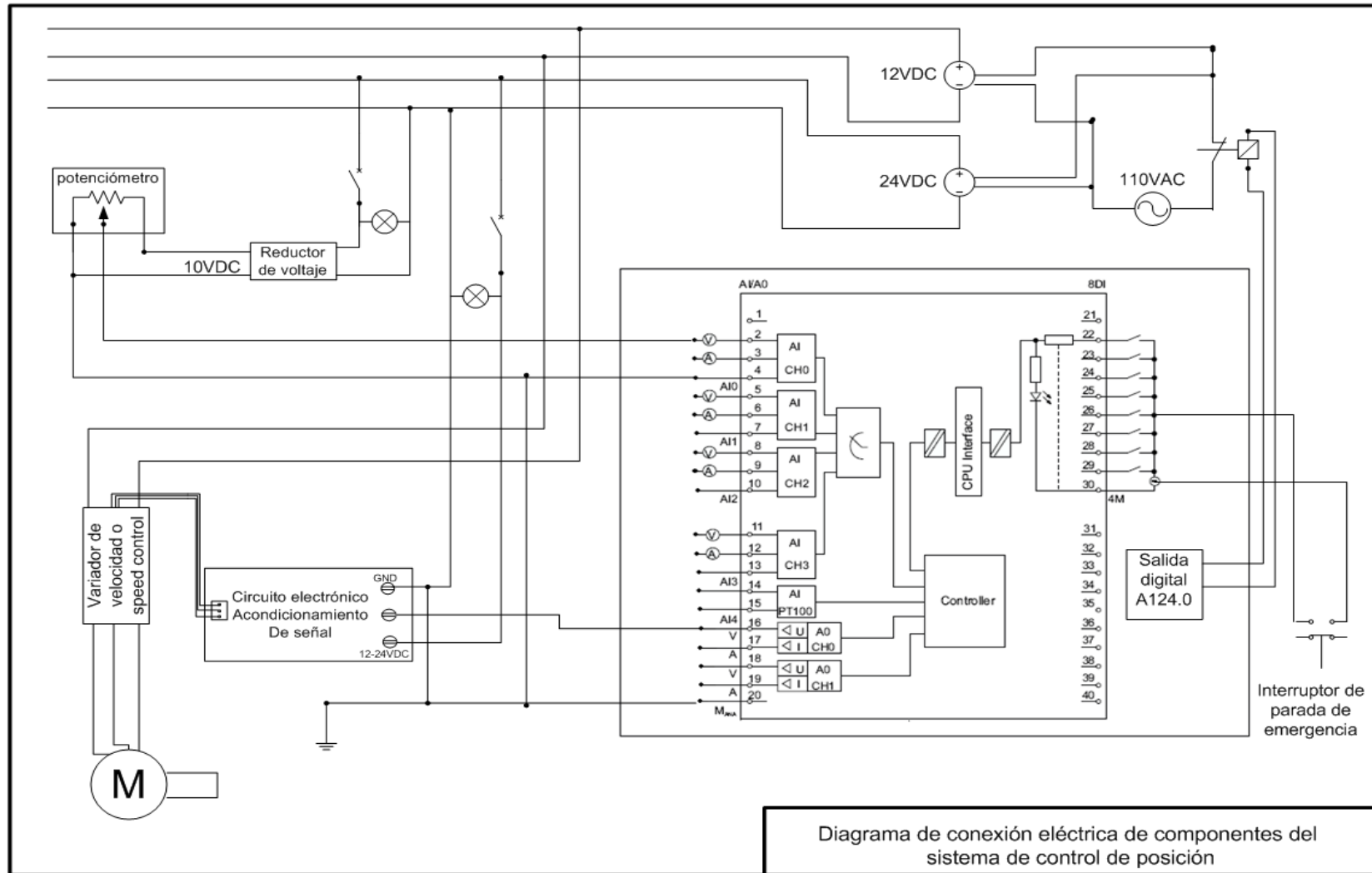
$$D_{sat} = K_d \cdot \frac{de}{dt}$$

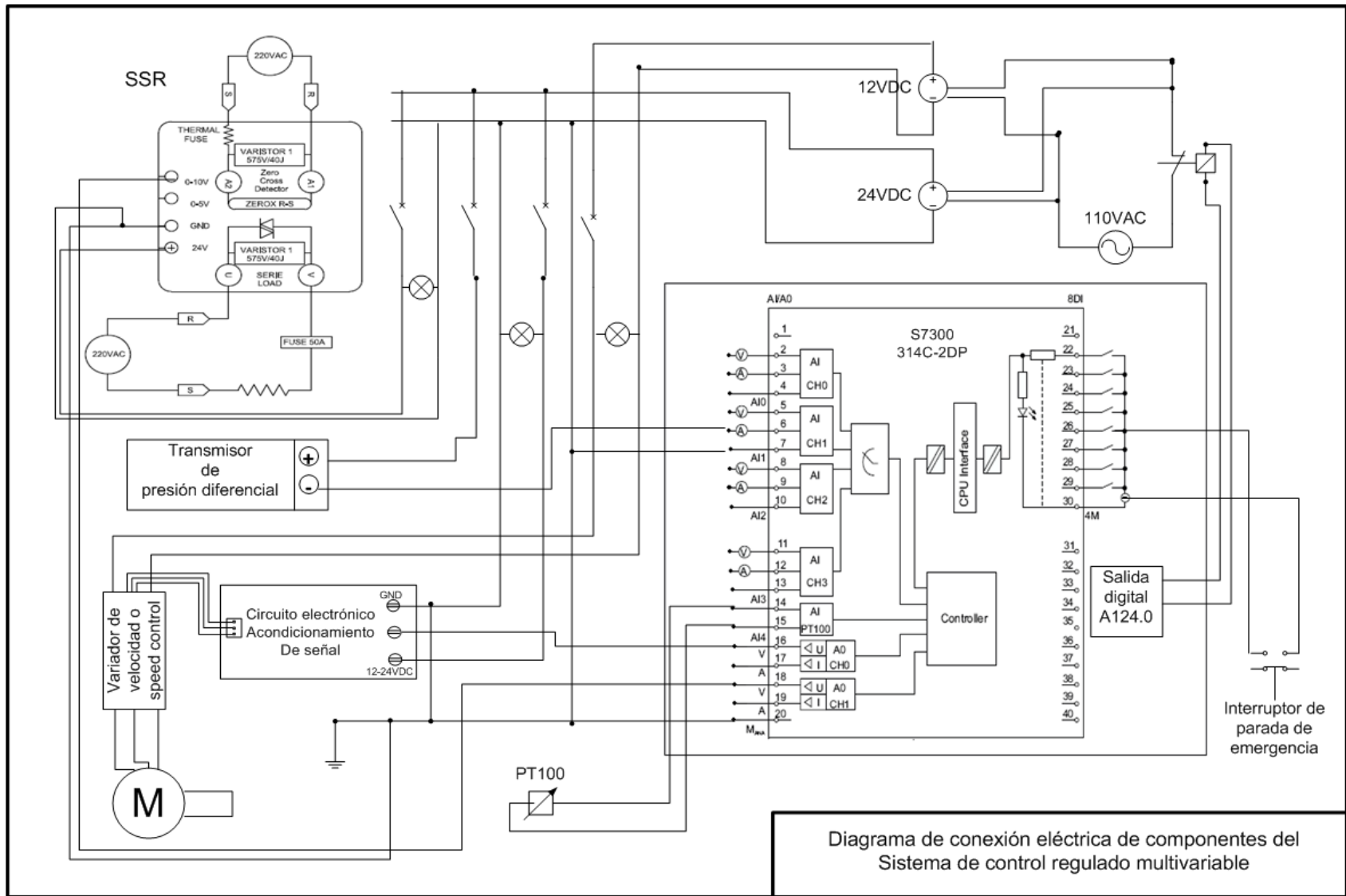
Figura 16. Respuesta de la velocidad de un motor de cc con diferente ganancia proporcional y con acción de control derivativa.



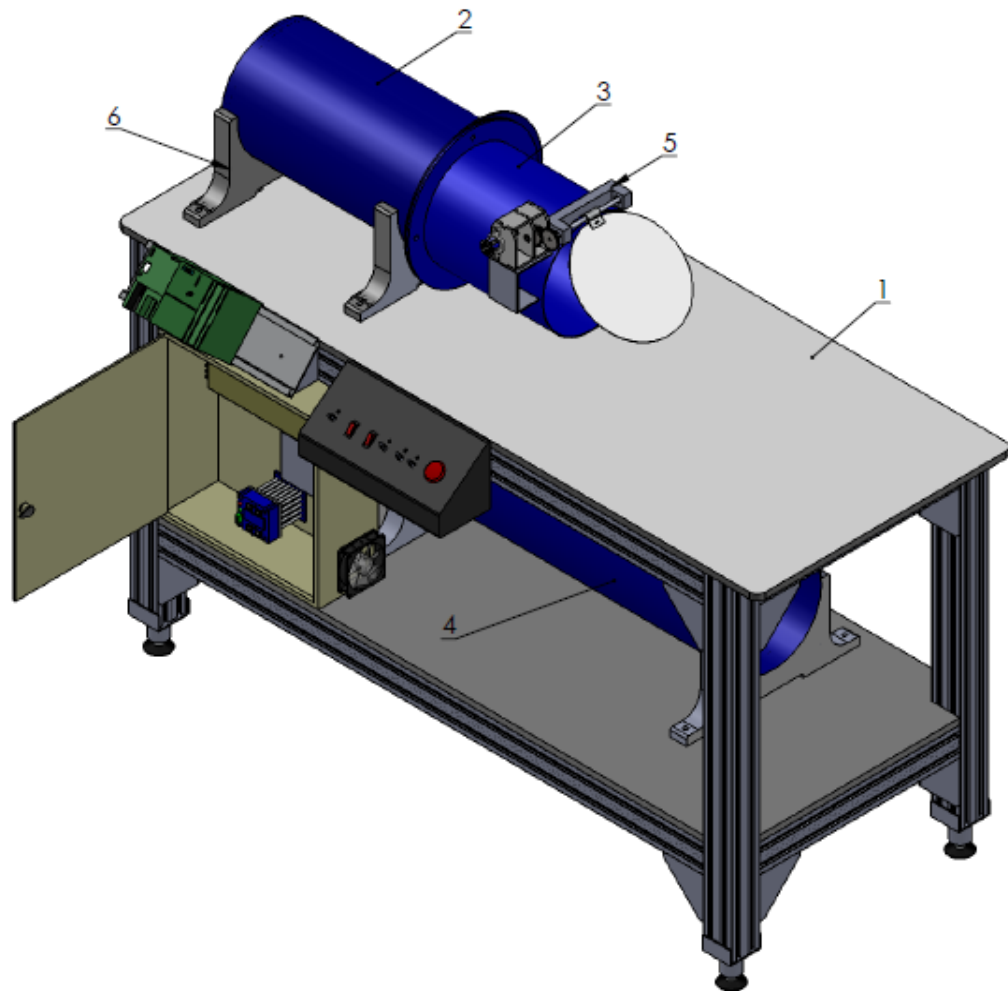
Fuente: MANDADO PÉREZ Enrique, MARCOS ACEVEDO Jorge, Autómatas programables y sistemas de automatización.2009

ANEXO C. PLANOS CONEXIONES ELÉCTRICAS





ANEXO D. PLANOS



#	Nombre del elemento	Material
1	Estructura	Perfil Aluminio
2	Módulo principal	Lámica acero cold roll
3	Módulo de control posición	
4	Módulo del sistema MIMO	
5	Soporte Compuerta	Aluminio
6	Soporte de módulos	Aluminio

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA FECHA: OCTUBRE DE 2012

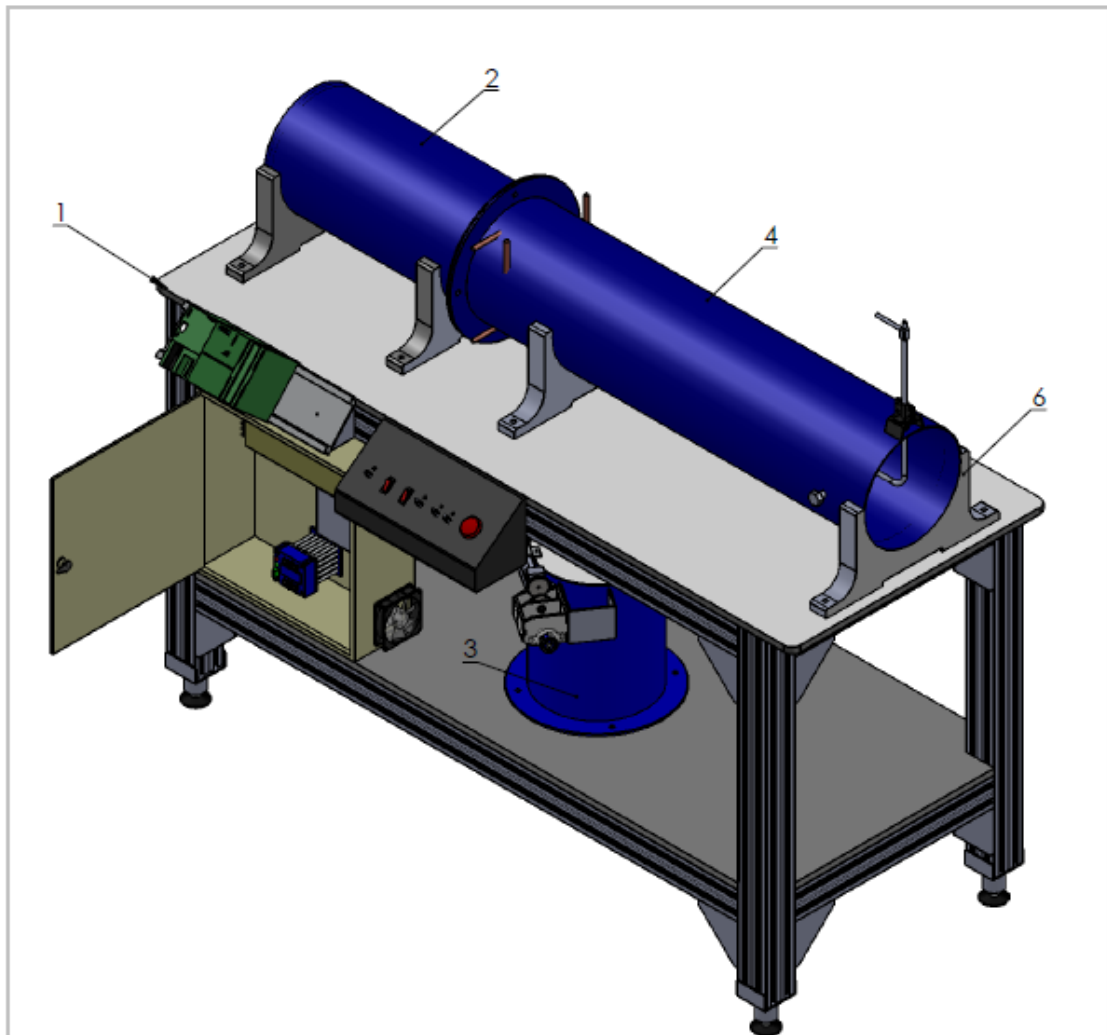
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).

NOMBRE	ENSAMBLE SISTEMA CONTROL DE POSICIÓN
REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA

ESCALA: 1:10

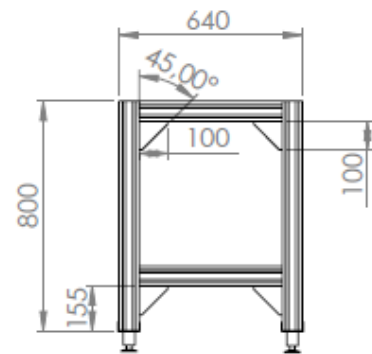
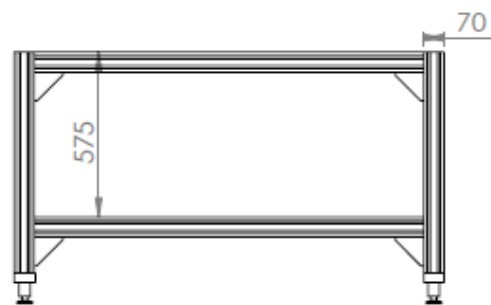
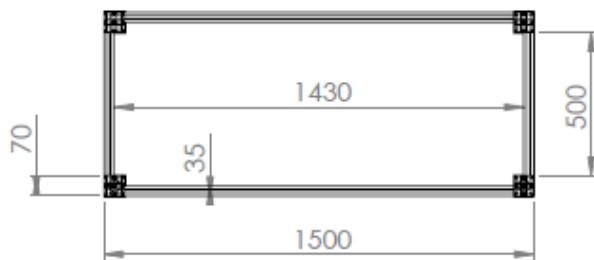
MEDIDAS: MILIMETROS

HOJA 1 DE 8

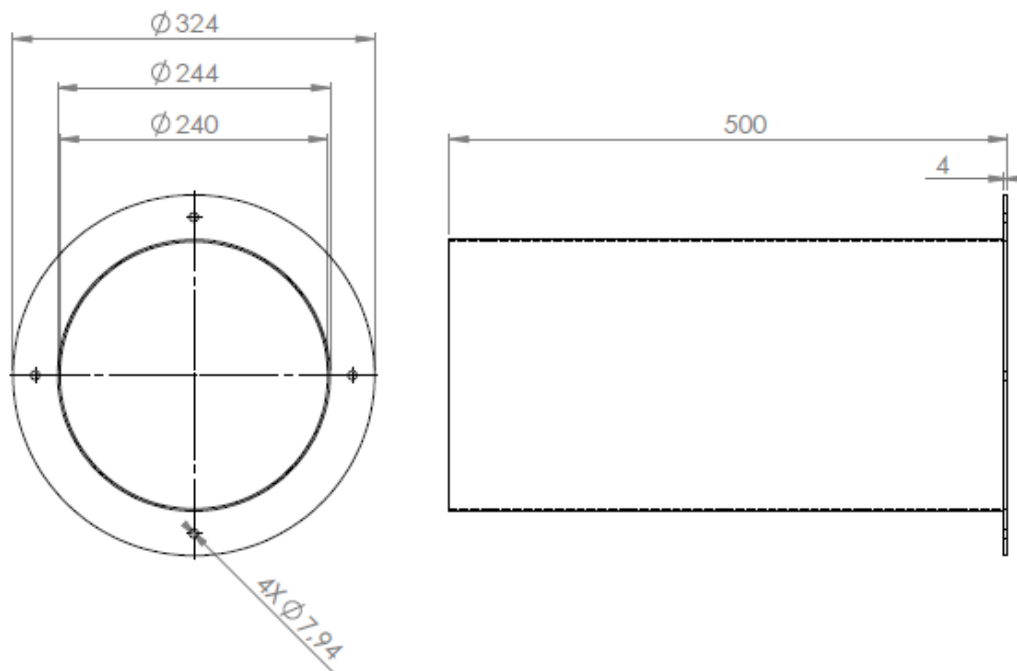
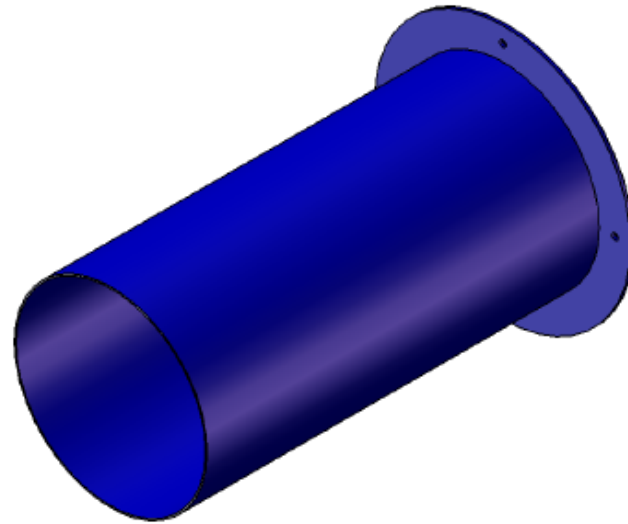


#	Nombre del elemento	Material
1	Estructura	Perfil Aluminio
2	Módulo principal	Lámica acero cold roll
3	Módulo de control posición	
4	Módulo del sistema MIMO	
5	Soporte Compuerta	Aluminio
6	Soporte de módulos	Aluminio

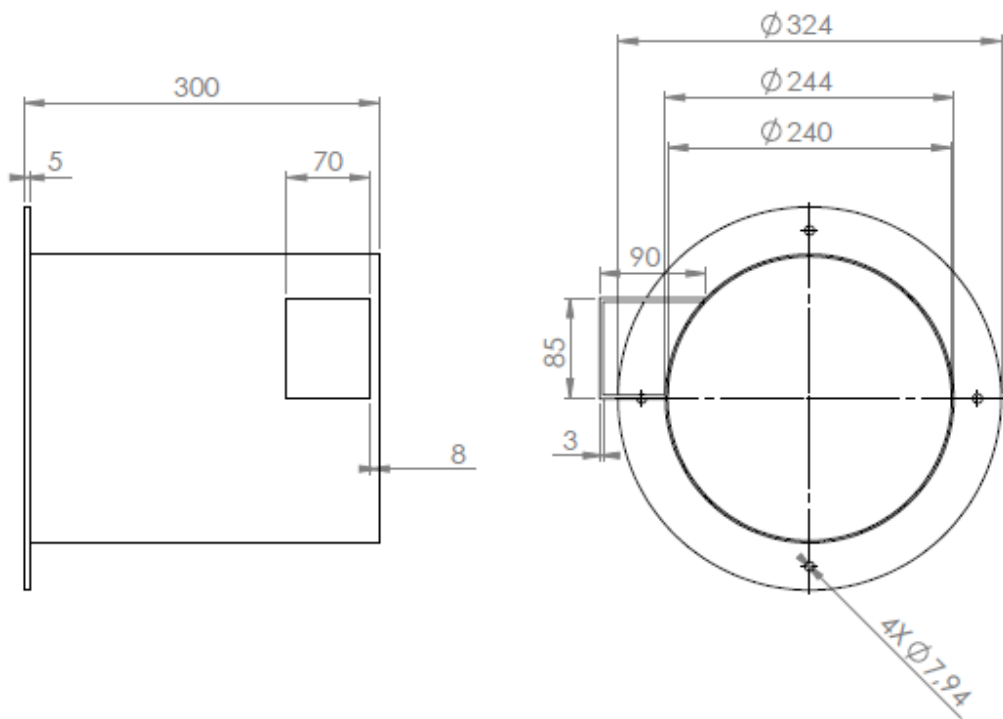
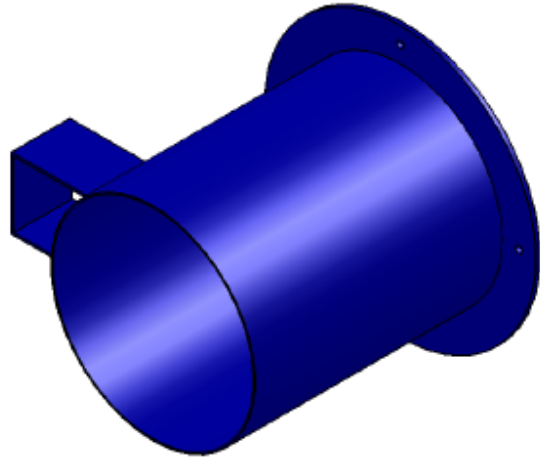
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	ENSAMBLE SISTEMA CONTROL MIMO
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
	ESCALA: 1:10	MEDIDAS: MILIMETROS



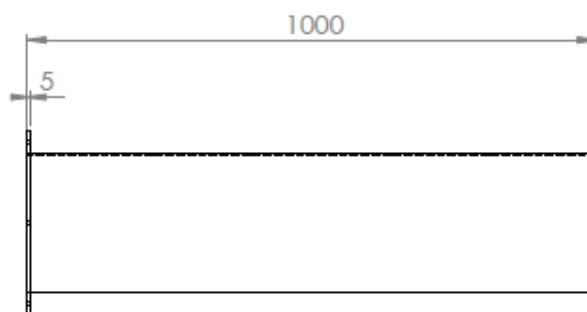
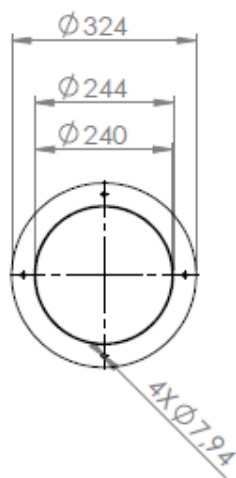
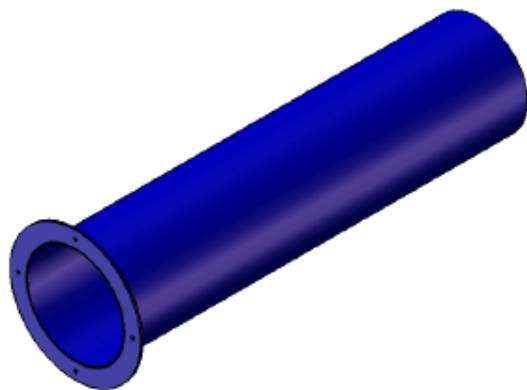
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRACTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	ESTRUCTURA DEL OBJETO DE APRENDIZAJE
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
	ESCALA: 1:5	MEDIDAS: MILIMETROS



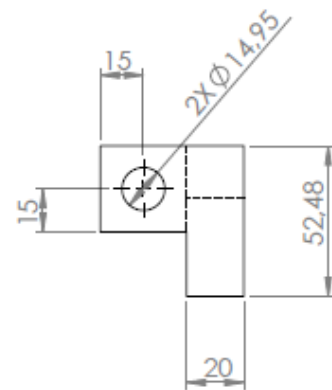
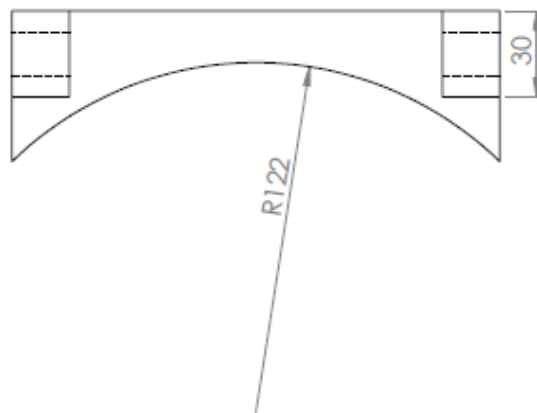
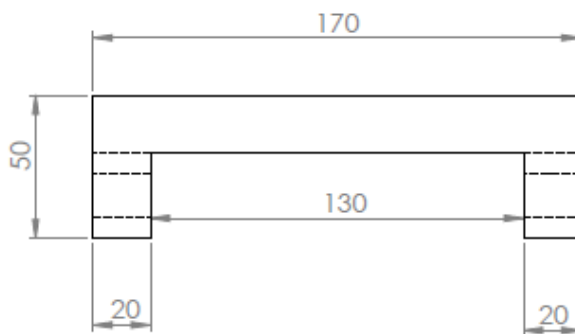
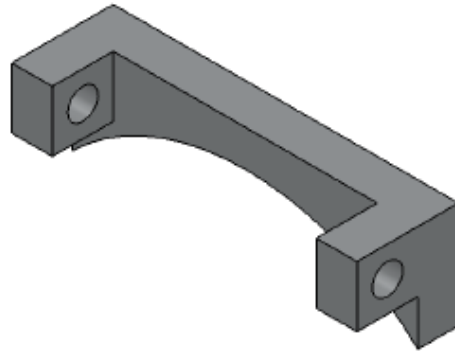
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRACTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	MÓDULO PRINCIPAL
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
	ESCALA: 1:5	MEDIDAS: MILIMETROS



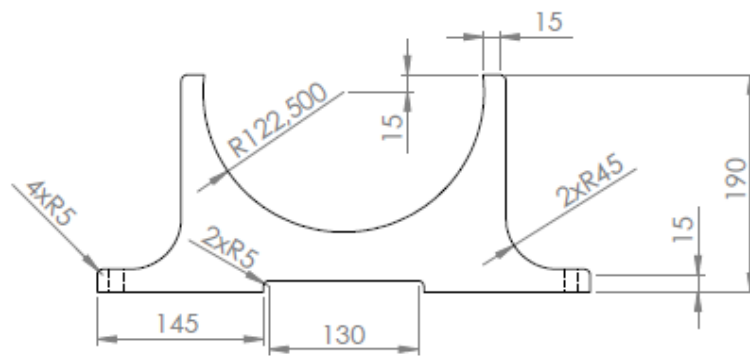
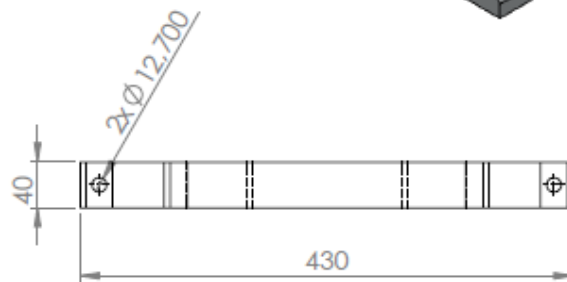
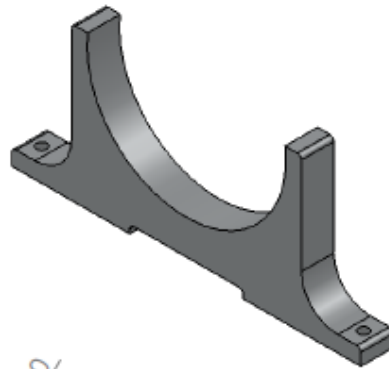
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	MÓDULO DEL CONTROL DE POSICIÓN
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
	ESCALA: 1:5	MEDIDAS: MILIMETROS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRACTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	MÓDULO DEL SISTEMA MIMO
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
	ESCALA: 1:10	MEDIDAS: MILIMETROS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRACTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	SOPORTE COMPUERTA
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
ESCALA: 1:2	MEDIDAS: MILIMETROS	HOJA 7 DE 8



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	FECHA: OCTUBRE DE 2012
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE PARA PRÁCTICAS DE SISTEMAS DE CONTROL MUESTREADO, BASADO EN CONTROLADOR INDUSTRIAL (PLC).	NOMBRE	SOPORTE DE MÓDULOS
	REVISÓ	JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ
	REALIZÓ	JEISSON M. QUINTERO/ OSCAR A. TARAZONA
ESCALA: 1:5		HOJA 8 DE 8

ANEXO E. FICHAS TÉCNICAS DE COMPONENTES

E1. Fuente de alimentación del motor eléctrico



600W Single Output Power Supply

SE-600 series



Features :

- AC input active surge current limiting
- AC input range selected by switch
- Protections: Short circuit / Overload / Over voltage / Over temperature
- Forced air cooling by built-in DC fan
- High power density 4.9w/inch³
- Built-in remote sense function
- UL approved
- Low cost
- 2 years warranty

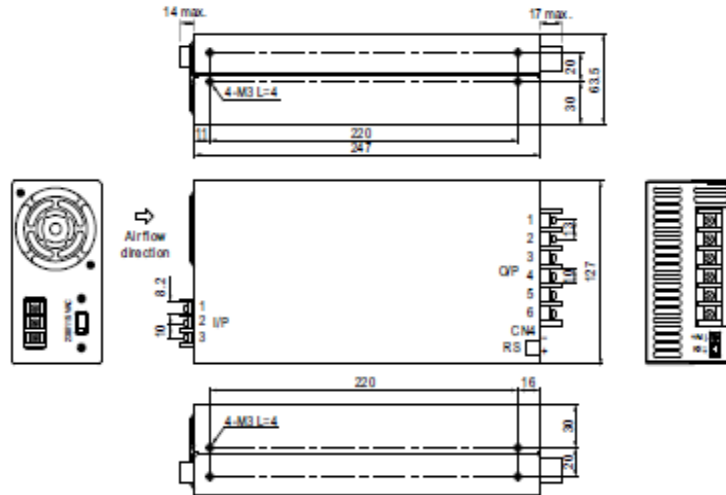


SPECIFICATION

MODEL	SE-600-5	SE-600-12	SE-600-15	SE-600-24	SE-600-27	SE-600-36	SE-600-48	
OUTPUT	DC VOLTAGE	5V	12V	15V	24V	27V	36V	48V
	RATED CURRENT	100A	50A	40A	25A	22.2A	16.6A	12.5A
	CURRENT RANGE	0 ~ 100A	0 ~ 50A	0 ~ 40A	0 ~ 25A	0 ~ 22.2A	0 ~ 16.6A	0 ~ 12.5A
	RATED POWER	500W	600W	600W	600W	599.4W	597.6W	600W
	RIPPLE & NOISE (max.) Note.2	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	150mVp-p	200mVp-p	200mVp-p
	VOLTAGE ADJ. RANGE	4.75 ~ 5.5V	10 ~ 13.5V	13.5 ~ 16.5V	22 ~ 26.4V	24 ~ 30V	32 ~ 40V	43 ~ 56V
	VOLTAGE TOLERANCE Note.3	±2.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%	±1.0%
	LINE REGULATION	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	LOAD REGULATION	±2.0%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%	±0.5%
	SETUP, RISE TIME	1000ms, 50ms/230VAC 1000ms, 50ms/115VAC at full load						
HOLD UP TIME (Typ.)	20ms/230VAC 16ms/115VAC at full load							
INPUT	VOLTAGE RANGE	90 ~ 132VAC / 180 ~ 264VAC selected by switch			254 ~ 370VDC			
	FREQUENCY RANGE	47 ~ 63Hz						
	EFFICIENCY (Typ.)	78%	83%	84%	87%	87%	87%	88%
	AC CURRENT (Typ.)	12A/115VAC 7.5A/230VAC						
	INRUSH CURRENT (Typ.)	30A/115VAC 60A/230VAC						
	LEAKAGE CURRENT	<2.0mA/240VAC						
PROTECTION	OVERLOAD	105 ~ 125% rated output power Protection type: Shut down o/p voltage, re-power on to recover						
	OVER VOLTAGE	5.75 ~ 6.3V	13.8 ~ 16.2V	18 ~ 21V	27.6 ~ 32.4V	31 ~ 36.5V	42 ~ 50V	57.6 ~ 67.2V
	OVER TEMPERATURE	85°C/15°C (TSW1) detect on heatsink of power transistor Protection type: Shut down o/p voltage, recovers automatically after temperature goes down						
ENVIRONMENT	WORKING TEMP.	-20 ~ +60°C (Refer to "Derating Curve")						
	WORKING HUMIDITY	20 ~ 90% RH non-condensing						
	STORAGE TEMP., HUMIDITY	-40 ~ +85°C, 10 ~ 95% RH						
	TEMP. COEFFICIENT	±0.05%/°C (0 ~ 50°C)						
SAFETY	VIBRATION	10 ~ 500Hz, 2G 10min/1cycle, 60min. each along X, Y, Z axes						
	SAFETY STANDARDS	UL60950-1 approved						
	WITHSTAND VOLTAGE	IP-O/P: 3KVAC IP-FG: 1.5KVAC O/P-FG: 0.5KVAC						
OTHERS	ISOLATION RESISTANCE	IP-O/P, IP-FG, O/P-FG: 100M Ohms / 500VDC / 25°C / 70% RH						
	MTBF	197K hrs min. MIL-HDBK-217F (25°C)						
NOTE	DIMENSION	247*127*63.5mm (L*W*H)						
	PACKING	2.1Kg 6pcs/13.4Kg/1.03CUFT						
<p>1. All parameters NOT specially mentioned are measured at 230VAC input, rated load and 25°C of ambient temperature. 2. Ripple & noise are measured at 20MHz of bandwidth by using a 12" twisted pair-wire terminated with a 0.1uf & 47uf parallel capacitor. 3. Tolerance : includes set up tolerance, line regulation and load regulation.</p>								

■ Mechanical Specification

Case No. 925A Unit:mm



AC Input terminal :

Pin No.	Assignment
1	AC/L
2	AC/N
3	FG

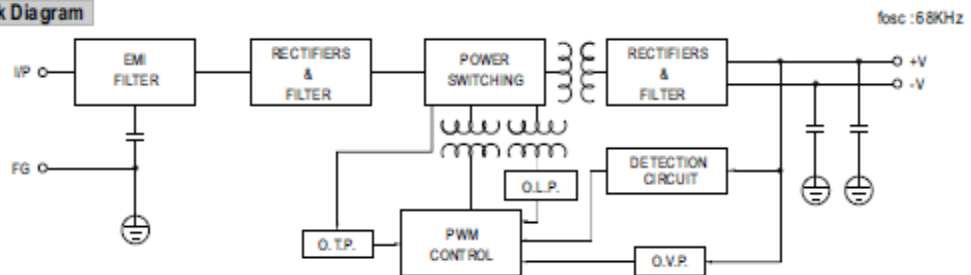
DC Output terminal :

Pin No.	Assignment
1-3	+V
4-6	-V

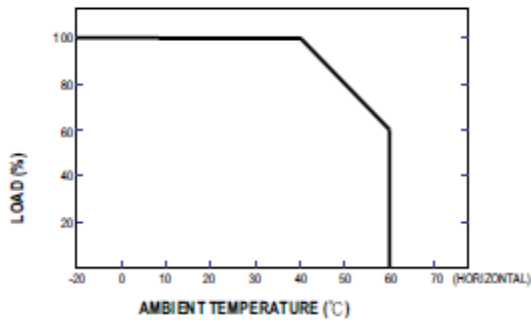
RS Connector (CN4) : JST B-XH or equivalent

Pin No.	Assignment	Mating Housing	Terminal
1	+S	JSTXHP	JST SXH-001T
2	-S	or equivalent	or equivalent

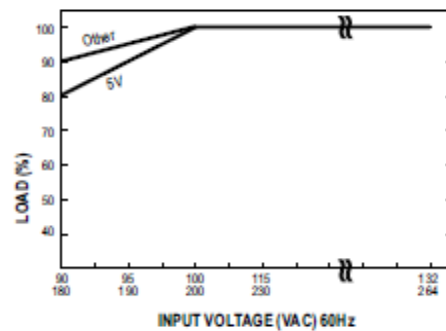
■ Block Diagram



■ Derating Curve



■ Static Characteristics



E2. POTENCIÓMETRO LINEAL



Features

- Available in a variety of pin-out configurations
- Virtually infinite electrical circuit isolation
- Metal or plastic shaft options
- RoHS compliant*

Model 91, 92, 93, 94 & 95 - 5/8" Square Single-Turn Panel Control

Initial Electrical Characteristics ¹	Conductive Plastic Element	Cermet Element
Standard Resistance Range		
Linear Tapers (A, B, E, & H).....	(B & E) 1 K ohms to 1 megohm.....	(A & H) 100 ohms to 1 megohm
Audio Tapers (C, D, F, G, S, & T).....	(D, G, S, & T) 1 K ohms to 1 megohm.....	(C & F) 1 K ohms to 1 megohm
Total Resistance Tolerance.....	10 % or 20 %.....	5 % or 10%
Independent Linearity.....	±5 %.....	±5 %
Absolute Minimum Resistance.....	2 ohms maximum.....	2 ohms maximum
Effective Electrical Angle.....	(Linear tapers) 240 ° ± 5 °.....	(Linear tapers) 240 ° ± 6 °
	(Audio tapers) 225 ° ± 5 °.....	(Audio tapers) 225 ° ± 6 °
Contact Resistance Variation.....	±1 %.....	±1 % or 3 ohms (whichever is greater)
Dielectric Withstanding Voltage (MIL-STD-202, Method 301)		
Sea Level.....	1,500 VAC minimum.....	1,500 VAC minimum
70,000 Feet.....	500 VAC minimum.....	500 VAC minimum
Insulation Resistance (500 VDC).....	1,000 megohms minimum.....	1,000 megohms minimum
Power Rating (Voltage Limited By Power Dissipation or 350 VAC, Whichever Is Less)		
+70 °C Single Section Assembly.....	(Linear tapers) 0.5 watt.....	(Linear tapers) 2 watts
	(Audio tapers) 0.25 watt.....	(Audio tapers) 1 watt
+70 °C Multiple Section Assembly.....	(Linear tapers) 0.5 watt/section.....	(Linear tapers) 1 watt/section
	(Audio tapers) 0.25 watt/section.....	(Audio tapers) 0.5 watt/section
+125 °C.....	0 watt.....	0 watt
Theoretical Resolution.....	Essentially infinite.....	Essentially infinite
Environmental Characteristics¹		
Operating Temperature Range.....	-40 °C to +125 °C.....	-40 °C to +125 °C
Storage Temperature Range.....	-55 °C to +125 °C.....	-55 °C to +125 °C
Temperature Coefficient Over Storage		
Temperature Range.....	±1,000 ppm/°C.....	±150 ppm/°C
Vibration (Single Section).....	15 G.....	15 G
Total Resistance Shift.....	±2 % maximum.....	±2 % maximum
Voltage Ratio Shift.....	±5 % maximum.....	±5 % maximum
Shock (Single Section).....	30 G.....	30 G
Total Resistance Shift.....	±2 % maximum.....	±2 % maximum
Voltage Ratio Shift.....	±5 % maximum.....	±5 % maximum
Load Life.....	1,000 hours.....	1,000 hours
Total Resistance Shift.....	±10 % maximum.....	±5 % maximum
Rotational Life (No Load).....	100,000 cycles.....	100,000 cycles
Total Resistance Shift.....	(Linear tapers) 10 ohms or ±15 % TRS max.....	(All tapers) ±5 % TRS max.
	(whichever is greater)	
	(Audio tapers) ±20 % maximum	
Contact Resistance Variation		
@ 50,000 cycles.....	(Linear tapers) ±2 %.....	±2 %
	(Audio tapers) ±3 %.....	±3 %
Moisture Resistance (MIL-STD-202, Method 103, Condition B)		
Total Resistance Shift.....	(Linear tapers) ±10 % TRS maximum.....	(All tapers) ±5 % TRS maximum
	(Audio tapers) ±20 % TRS maximum	
Insulation Resistance (500 VDC).....	100 megohms minimum.....	100 megohms minimum
IP Rating.....	IP 40.....	IP 40

*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 Including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011.
Specifications are subject to change without notice.
Customers should verify actual device performance in their specific applications.

E3. ELEMENTO PT100

Platinum Resistance Temperature Detector

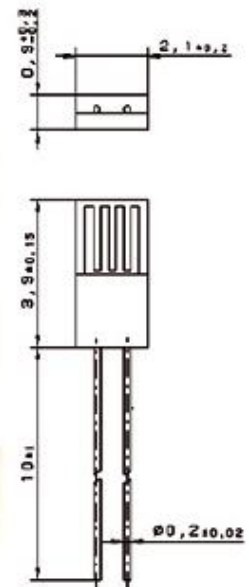
M 422

M series PRTDs are especially robust and are designed for large volume applications where long term stability, interchangeability and accuracy over a large temperature range are vital. Typical applications are Automotive, White Goods, HVAC, Energy Management, Medical and Industrial Equipment.

Nominal Resistance R_0	Tolerance	Order No. Plastic bag	Order No. Blister reel
100 Ohm at 0°C	DIN EN 60751, class B	32 208 392	32 208 520
	DIN EN 60751, class A	32 208 498	32 208 521
	DIN EN 60751, class 1/3 DIN	32 208 500	32 208 522
500 Ohm at 0°C	DIN EN 60751, class B	32 208 414	32 208 523
	DIN EN 60751, class A	32 208 501	32 208 524
	DIN EN 60751, class 1/3 DIN	32 208 502	32 208 525
1000 Ohm at 0°C	DIN EN 60751, class B	32 208 499	32 208 526
	DIN EN 60751, class A	32 208 503	32 208 527
	DIN EN 60751, class 1/3 DIN	32 208 537	

The measuring point for the nominal resistance is defined at 8 mm from the end of the sensor body.

Specification	DIN EN 60751 (according to IEC 751)
Temperature range	-70°C to +500°C (continuous operation) (temporary use to 550 °C possible) Tolerance class B: - 70 °C to + 500 °C Tolerance class A: - 50 °C to + 300 °C Tolerance class 1/3 DIN: 0 °C to + 150 °C
Temperature coefficient	TC = 3850 ppm/K ; 3750 ppm/K available on request
Terminal leads	Pt clad Ni wire
Longterm stability	max. R_0 -drift 0.04% after 1000 h at 500 °C
Vibration resistance	at least 40 g acceleration at 10 to 2000 Hz, depends on installation
Shock resistance	at least 100 g acceleration with 8ms half sine wave, depends on installation
Environmental conditions	unhoused for dry environments only
Insulation resistance	> 100 M Ω at 20 °C; > 2 M Ω at 500 °C
Self heating	0.3 K/mW at 0 °C
Response time	water current (v = 0.4 m/s): $t_{0.5}$ = 0.07 s; $t_{0.9}$ = 0.20 s air stream (v = 2 m/s): $t_{0.5}$ = 3.2 s; $t_{0.9}$ = 11 s
Measuring current	100 Ω : 0.3 to 1.0 mA 500 Ω : 0.1 to 0.7 mA 1000 Ω : 0.1 to 0.3 mA (self heating has to be considered)



E4. RELÉ DE ESTADO SÓLIDO



1.3.2. CONTROLES DE FASE DIGITALES PARA CARGA RESISTIVA

1.3.2.1. CONTROLES POR ANGULO DE FASE INTEGRADO

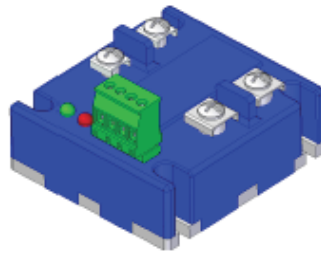
1 FASE DIGITALES

CONTROL POR ANGULO DE FASE MICROCONTROLADO

Desde 25 Hasta 110 Arms . Hasta **575 VAC**

CONTROL:

- A- Potenciómetro
- B- 4-20mA.
- C-. 5V-10V
- D-. 1-2 KHz.



CARACTERÍSTICAS:

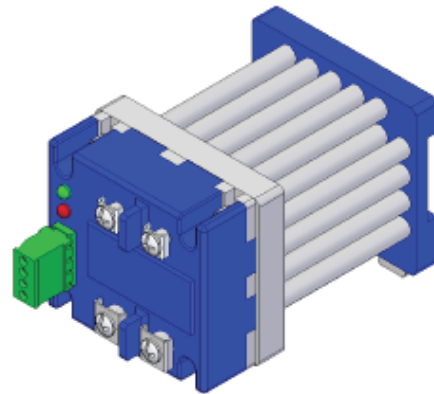
- Dimmer con precisión de 1024 posiciones para modelos OPS y OPV. 818 Posiciones para modelos 4-20mA y 500 posiciones para modelos 1-2KHz.
- Sistema de detección de cruce por cero multivoltaje.
- Corrimiento de fase Totalmente lineal.
- Platina de sujeción en Aluminio fabricada en CNC.
- Conector RÁPIDO Phoenix Contact.
- Fabricado con opto-acoplador con $dv/dt = 10000v/us$.
- Se recomiendan los disipadores HS-OPT-02 y HS-OPT-03.

DESCRIPCION:

Los variadores de potencia de estado SÓLIDO por control de fase microcontrolados son destinados a procesos industriales en donde se requiere alta precisión. La salida en estado SÓLIDO, permite ajustar la potencia en un rango lineal de 0 a 100% del voltaje aplicado, posibilitando un ajuste perfecto de la temperatura deseada.

Estos dispositivos proporcionan un aumento de la vida útil de los elementos de calentamiento al funcionar en voltaje reducido constante, sin conmutaciones.

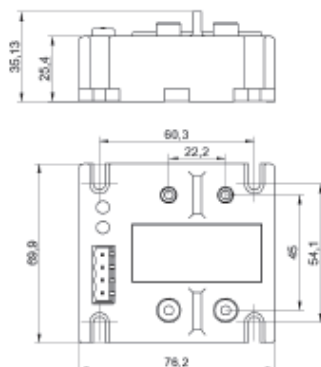
**MONTAJE SUGERIDO CON
DISIPADOR HS-OPT-02**



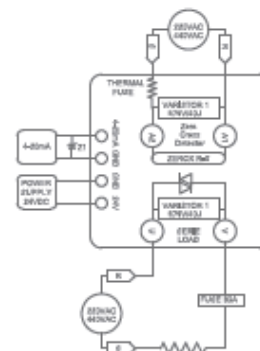
MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 4-20mA, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC

MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control	Voltaje de Línea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2.seg)
OP148P25G	25	4-20mA	90-500	340
OP148P40G	40	4-20mA	90-500	880
OP148P50G	50	4-20mA	90-500	1680
OP148P65G	65	4-20mA	90-500	3750
OP148P75G	75	4-20mA	90-500	5400
OP148P90G	90	4-20mA	90-500	6000
OP148P110G	110	4-20mA	90-500	6600

Dimensiones en mm

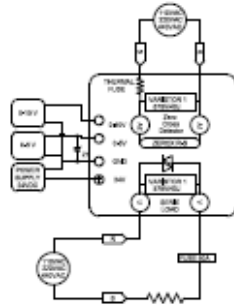


ESQUEMA DE CONTROL POR CORRIENTE 4-20mA



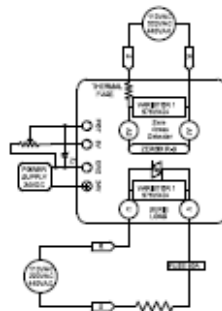
MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 0-10VDC, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC				
MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control Vdc	Voltaje de Línea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2.seg)
OPS48P25G	25	0-10	90-575	340
OPS48P40G	40	0-10	90-575	880
OPS48P50G	50	0-10	90-575	1680
OPS48P65G	65	0-10	90-575	3750
OPS48P75G	75	0-10	90-575	5400
OPS48P90G	90	0-10	90-575	6000
OPS48P110G	110	0-10	90-575	6600

ESQUEMA DE CONTROL VOLTAJE 0-5 y 0-10Vdc



MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA POTENCIOMETRO, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC				
MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Potenciometro (Kohm)	Voltaje de Línea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2.seg)
OPV48P25G	25	50 o 100	90-575	340
OPV48P40G	40	50 o 100	90-575	880
OPV48P50G	50	50 o 100	90-575	1680
OPV48P65G	65	50 o 100	90-575	3750
OPV48P75G	75	50 o 100	90-575	5400
OPV48P90G	90	50 o 100	90-575	6000
OPV48P110G	110	50 o 100	90-575	6600

ESQUEMA DE CONTROL POR POTENCIOMETRO



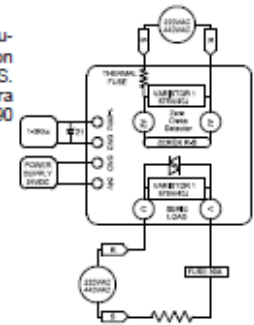
42

ESQUEMA DE CONTROL POR FRECUENCIA 1-2 KHZ

MODELOS DE CONTROL DE FASE MICROCONTROLADO, ENTRADA 2Khz, SALIDA PROPORCIONAL 110/220/440VAC				
MODELO	Corriente De Carga (Arms)	Control por frecuencia	Voltaje de Línea (VACrms)	I2t Para Fusibles (Amp2.seg)
OPF48P25G	25	1-2Khz	90-575	340
OPF48P40G	40	1-2Khz	90-575	880
OPF48P50G	50	1-2Khz	90-575	1680
OPF48P65G	65	1-2Khz	90-575	3750
OPF48P75G	75	1-2Khz	90-575	5400
OPF48P90G	90	1-2Khz	90-575	6000
OPF48P110G	110	1-2Khz	90-575	6600

EQUIPOS CON ENTRADA 1-2Khz

Estos equipos son ideales para atenuación de voltaje (110,220 ó 440vac) con señales de salida de PLC DIGITALES. Ejemplo: una salida de 1500hz dara como resultado un control de fase a 90 grados y una potencia de 50%.



FUNCIONAMIENTO:

La instalación de equipos tiene importantes detalles como se indica a continuación

Haga la conexión con las fuentes desenergizadas.

Efectúe los siguientes pasos:

- 1.- Energice la fuente de 24 V. El led de POWER ON se encenderá.
- 2.- Conecte R y S en A1 y A2 respectivamente. Esta señal será necesaria para la detección de cruce por cero. Observe que internamente se encuentran un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules y un fusible térmico para la PROTECCIÓN de transientes de voltaje entre A1 y A2.
- 3.- Conecte la carga en serie con un fusible RÁPIDO para proteger el semiconductor (triac o SCR) en las terminales U y V. Observe que internamente se encuentra un varistor (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules para la PROTECCIÓN de transientes de voltaje por el lado de potencia.
- 4.- Conecte la señal de entrada 4-20 mA,0-10Vdc, Pot, 1-2Khz.
- 5.- Conecte una bombilla de Prueba como carga (LOAD). Varíe la señal de entrada 4-20 mA,0-10Vdc ó Pot. y la bombilla deberá cambiar de intensidad.
- 6.- Conecte la carga definitiva y varíe la señal de entrada 4-20 mA,0-10Vdc ó Pot. Deberá variar la corriente y el voltaje en la carga LOAD.
- 7.- Los dos varistores (Metal Oxide Varistors MOV's) de 575 Voltios 40 Joules, el 575L40 de HARRIS estan insertados internamente para proteger el equipo de transientes de voltaje.

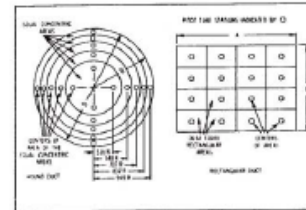
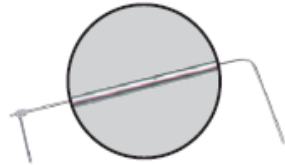
E5. TUBO PITOT



Bulletin H-11

Series 160 Stainless Steel Pitot Tubes

Specifications - Installation and Operating Instructions



The total pressure of an air stream flowing in a duct is the sum of the static or bursting pressure exerted upon the sidewalls of the duct and the impact or velocity pressure of the moving air. Through the use of a pitot tube connected differentially to a manometer, the velocity pressure alone is indicated and the corresponding air velocity determined.

For accuracy of plus or minus 2%, as in laboratory applications, extreme care is required and the following precautions should be observed:

1. Duct diameter to be 30 times pitot tube diameter, or greater.
2. Make an accurate traverse per sketch at right, calculate the velocities and average the readings.
3. Provide smooth, straight duct sections a minimum of 8 1/2 diameters in length upstream and 1 1/2 diameters downstream from the pitot tube.
4. Provide an egg crate type straightener upstream from the pitot tube.

In making an air velocity check select a location as suggested above, connect tubing leads from both pitot tube connections to the manometer and insert in the duct with the tip directed into the air stream. If the manometer shows a minus indication reverse the tubes. With a direct reading manometer, air velocities will now be shown in feet per minute. In other types, the manometer will read velocity pressure in inches of water and the corresponding velocity will be found from the curves in this bulletin. If circumstances do not permit an accurate traverse, center the pitot tube in the duct, determine the center velocity and multiply by a factor of .9 for the approximate average velocity. Field tests run in this manner should be accurate within plus or minus 5%.

The velocity indicated is for dry air at 70°F, 29.9" Barometric Pressure and a resulting density of .075#/cu. ft. For air at a temperature other than 70°F, refer to the curves in this bulletin. For other variations from these conditions, corrections may be based upon the following data:

$$\text{Air Velocity} = 1096.2 \sqrt{\frac{P_v}{D}}$$

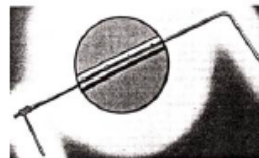
where P_v = velocity pressure in inches of water
 D = Air density in #/cu. ft.

$$\text{Air Density} = 1.325 \times \frac{P_b}{T}$$

where P_b = Barometric Pressure in inches of mercury
 T = Absolute Temperature (indicated temperature °F plus 460)
 Flow in cu. ft. per min. = Duct area in square feet x air velocity in ft. per min.



AIR VELOCITY CALCULATOR
 Computes velocity based on air density corrected for conditions of temperature and pressure. Eliminates tedious calculations. Ranges from .01 to 10" water corresponding to 400 to 20,000 FPM. Furnished with each pitot tube.

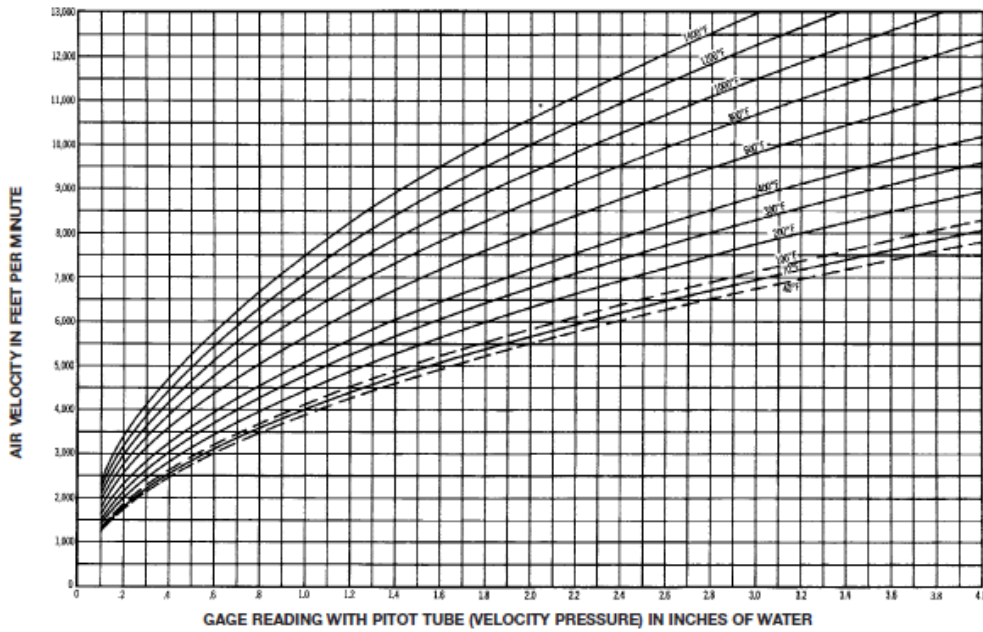
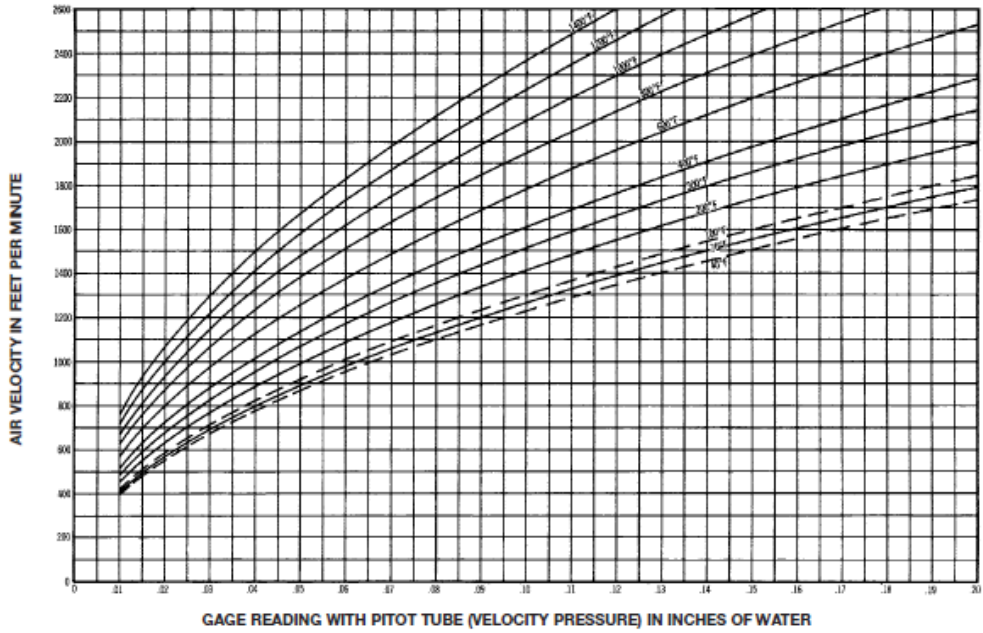


STAINLESS STEEL PITOT TUBES
 Test confirmed unity coefficient and lifetime construction of No. 304 stainless steel. Inch graduations show depth of insertion for traversing. Model 160 is designed to meet ASME "Fluid Meters" 6th Ed, ANSI/AMCA 210-99, ANSI/ASHRAE 51-1999, and British Standard 1042. Sizes 12" to 60" long. Hand or fixed mounting types.

DWYER INSTRUMENTS, INC.
 P.O. BOX 373 • MICHIGAN CITY, INDIANA 46361, U.S.A.

Phone: 219/879-8000
 Fax: 219/872-9057

www.dwyer-inst.com
 e-mail: info@dwyer-inst.com



©Copyright 2005 Dwyer Instruments, Inc.

Printed in U.S.A. 8/05

FR# 440226-00 Rev. 8

DWYER INSTRUMENTS, INC.
 P.O. BOX 373 • MICHIGAN CITY, INDIANA 46361, U.S.A.

Phone: 219/879-8000
 Fax: 219/872-9057

www.dwyer-inst.com
 e-mail: info@dwyer-inst.com

E6. TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL

proSense DPTA Series Differential Air Pressure Transmitters



The ProSense DPTA differential pressure transmitter series is precision engineered for accurate low differential pressure measurement of air and non-condensing, non-corrosive gases in industrial, commercial, and OEM applications. Its highly reliable, ultra-thin single silicon crystal diaphragm capacitive sensor provides inherent repeatability and stability with no glues or other organics to contribute to drift or mechanical degradation over time. The DPTA series is available in ranges from 0.1 inches w.c. to 25 inches w.c. to measure positive, negative, and bi-directional pressures with the ability to withstand 15 psi overpressure without damage or calibration shift. The easily accessible brass barbed pressure ports, removable terminal blocks, and rugged ABS housing capable of 35 mm DIN rail or panel mounting make installation quick and easy.

Applications

- HVAC duct static pressure
- Air filter monitoring
- Building pressurization
- Isolation and clean rooms
- Fume hoods
- Furnace, oven, dryer draft pressure
- Air flow measurement

Features

- Highly stable capacitive sensing element
- Positive, negative, and bi-directional pressure measurement
- Pressure ranges from 0.1" w.c. to 25" w.c.
- Accuracy is +/-1% of full range maximum
- High overpressure rating of 15 psi without damage or calibration shift
- Rugged ABS housing capable of DIN rail or panel mounting
- LED loop power status indicator
- Made In the USA
- CE marked
- 3-year warranty



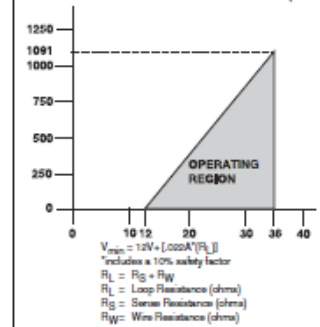
ProSense DPTA Series Differential Air Pressure Transmitters					
Part Number	Description	Electrical Connection	Input Voltage	Wt(lb)	Price
DPTA-20-P1	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 0.1 in. water column range, 1/4" brass barbed connections	Screw Terminals	12 - 36 VDC	0.16	↔
DPTA-20-P1B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -0.1 to +0.1 water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-P25	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 0.25 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-P25B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -0.25 to +0.25 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-P5	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 0.5 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-P5B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -0.5 to +0.5 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-01	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 1.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-01B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -1.0 to +1.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-02	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 2.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-02B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -2.0 to +2.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-03	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 3.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-03B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -3.0 to +3.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-05	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 5.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-05B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -5.0 to +5.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-10	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 10.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-10B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -10.0 to +10.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-15	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 15.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-15B	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, -15.0 to +15.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔
DPTA-20-25	Differential Pressure transmitter, 4 to 20 mA output, 0 to 25.0 in. water column range, 1/4" brass barbed connections				↔

proSense® DPTA Series Differential Air Pressure Transmitters

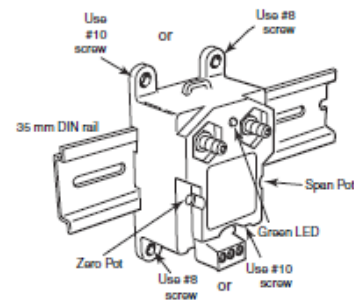
ProSense DPTA Series Specifications	
Operating Voltage	12 – 36 VDC
Output Range*	4 – 20 mA (2-wire)
Supply Current*	21.5 mA Max.
Maximum Load	$V_L - 12 \text{ VDC}$ $0.022 \text{ amps} - R_L$ For example $[(24 \text{ VDC} - 12 \text{ VDC}) / 0.022 \text{ amps}] = 545\Omega$
Enclosure	NEMA Type 1 Fire-retardant ABS (meets UL 95-5WA)
Pressure Connections	1/4" brass barbed fittings
Weight	0.16 lb
Media	Clean, dry and non-corrosive gas
Mounting	Threaded fastener and 35mm DIN rail mount
Reference Temperature	70°F ± 2°F (21°C ± 1°C)
Temperature Coefficients - Zero & Span	±0.03% full range / °F
Compensated Range	35 to 130°F (2 to 54°C)
Operating Temperature	0 to 160°F (-18 to 71°C)
Storage Temperature	-40 to 180°F (-40 to 82°C)
Humidity	10 to 95% R.H., non-condensing
Stability	Less than ±0.25% full range / year
Accuracy	±1% maximum. Includes non-linearity, hysteresis, nonrepeatability, zero offset and span setting errors.
Response Time	250 msec
Proof Pressure	15 psid
Burst Pressure	25 psid
Max. Static Line Pressure	15 psi
Electrical Connection	Euro style pluggable terminal block accepts 12-26 gauge wire
Terminal Screw Torque	4 lbs in (0.5 Nm)
Reverse Wiring Protected	Yes
External Zero Adjustment	±5% full range
External Span Adjustment	±5% full range
Agency Approvals	CE, RoHS

* Output signal is independent of power supply changes.

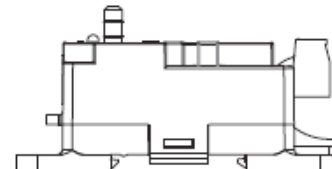
Load Limitations 4–20mA Output



Mounting Options

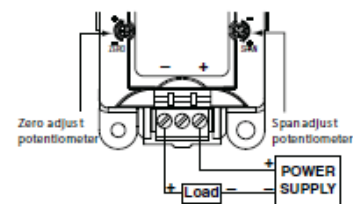


NOTE: PROSENSE DPTA SERIES TRANSMITTER SHOULD BE MOUNTED IN A VERTICAL AND UPRIGHT POSITION AS SHOWN ABOVE.

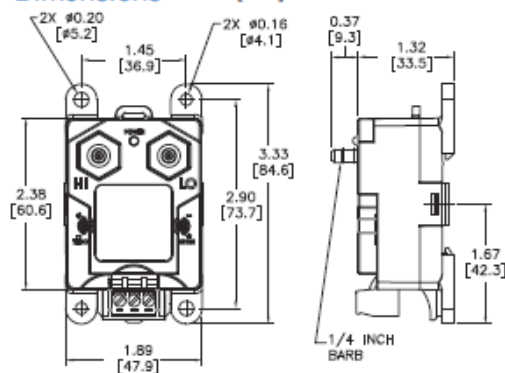


WARNING: MOUNTING HORIZONTALLY MAY AFFECT ACCURACY BY AN ADDITIONAL 1%.

Wiring Diagram



Dimensions inches [mm]

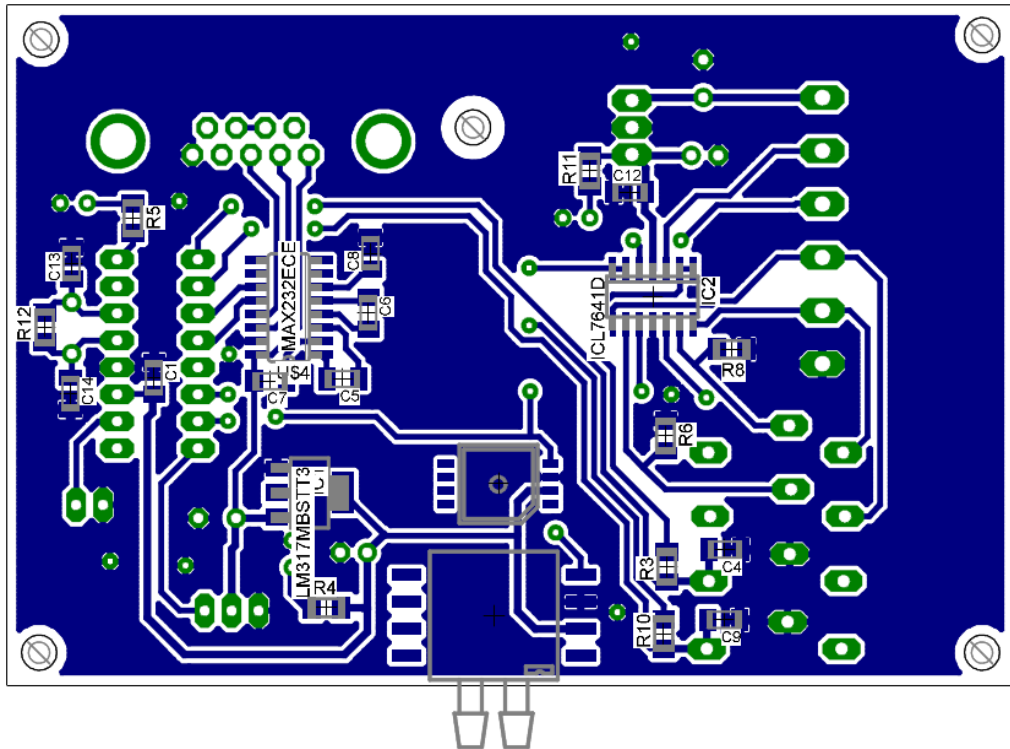


Volume 14
e23-12 Sensors

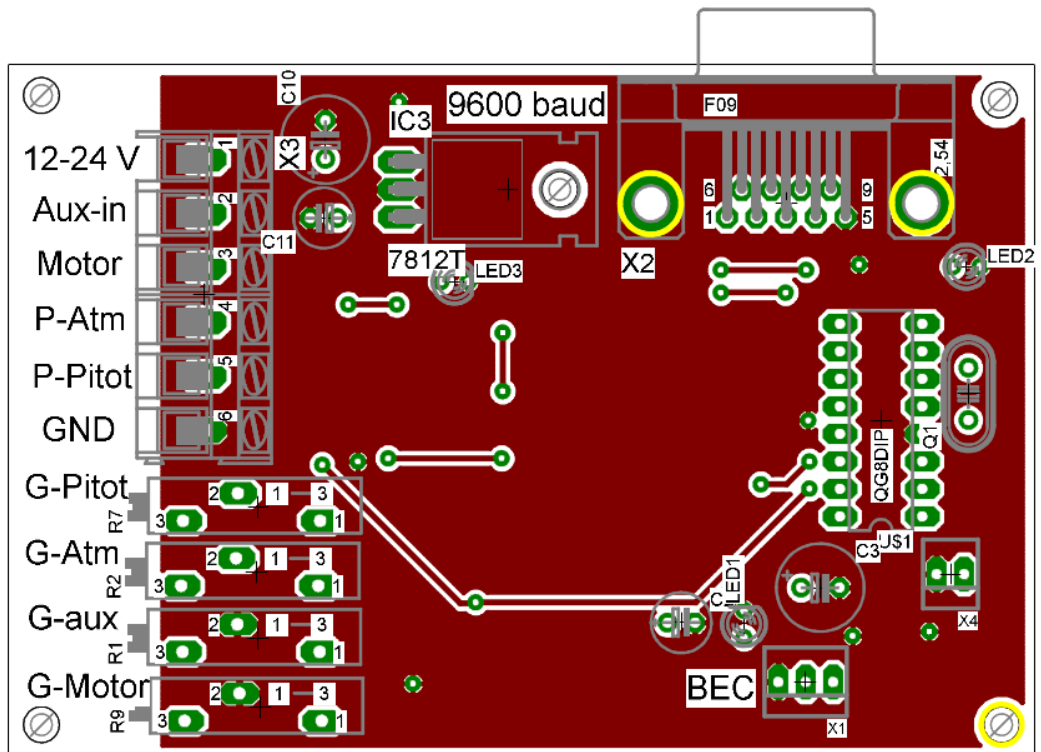
1-800-633-0405

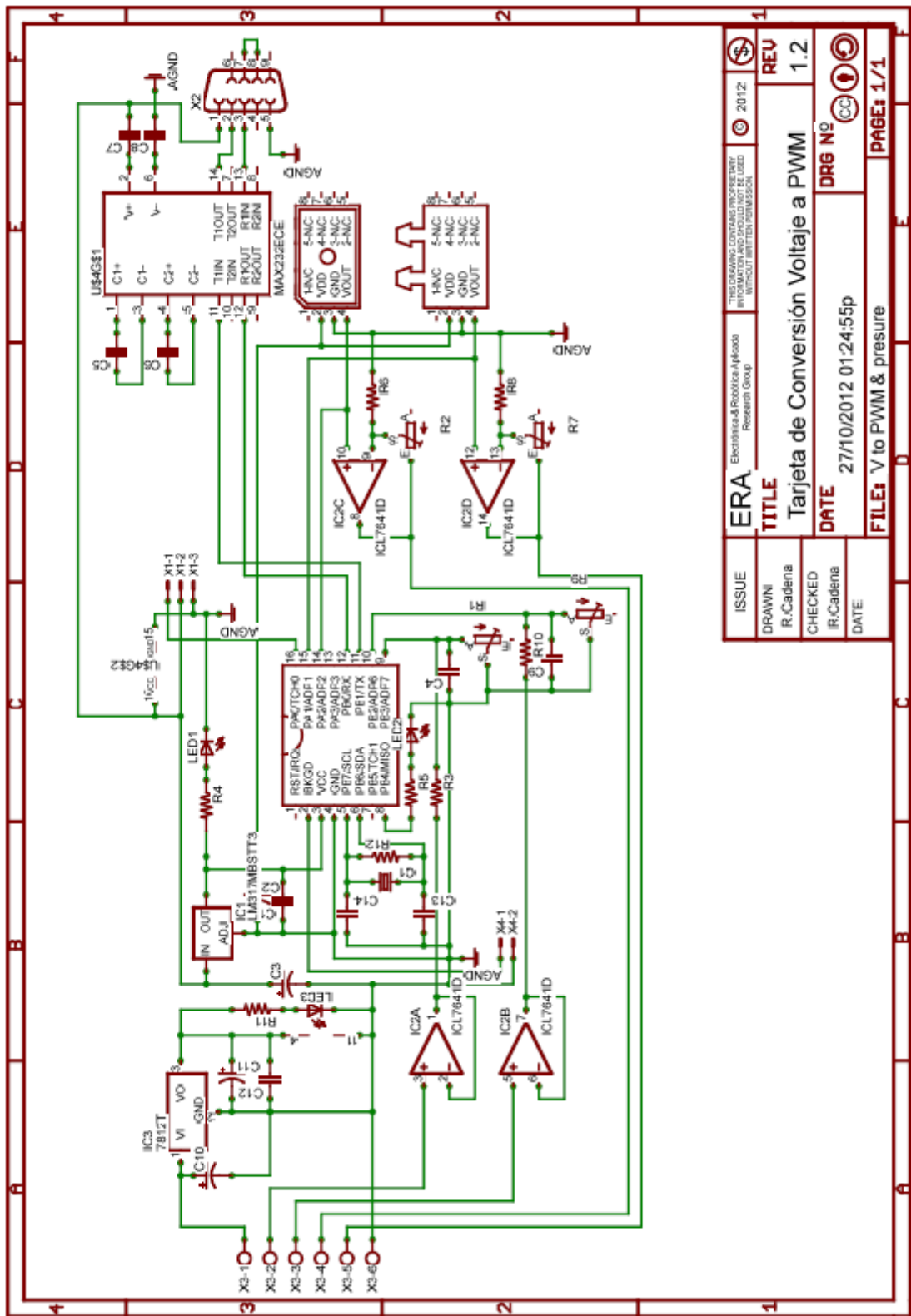
E7. TARJETA ELECTRÓNICA

Vista inferior



Vista superior.





ISSUE	ERA	2012	REV	1.2
DRAWN	R-Cadena		DRG N°	
CHECKED	R-Cadena		DATE	27/10/2012 01:24:55p
DATE			FILE:	V to PWM & presure
			PAGE:	1/1