



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

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA**

**ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE  
PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
- ESPE**

**AUTORES: CÓRDOVA MOLINA, DAVID ALEJANDRO**

**NICOLALDE LÓPEZ, JOSÉ ÁNDRES**

**DIRECTOR: ING ORTIZ TULCAN, HUGO**

**SANGOLQUÍ**

**2016**



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**”, realizado por los señores, **DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA, JOSE ANDRES NICOLALDE LOPEZ**, ha sido dirigida y revisada periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS, en el reglamento de estudiantes de la ESPE.

Debido a que este trabajo cumple con todos los procedimientos institucionales e investigativos, recomendamos su publicación.

Una firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal.

ING. HUGO ORTIZ

**DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA, con C.I. 180409941-2 y JOSÉ ANDRES NICOLALDE LÓPEZ con C.I. 171813732-4 declaramos que este trabajo de titulación " **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**" han sido desarrollados en base a una investigación exhaustiva, respetando todos los derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de esta tesis de grado.

Sangolquí, Enero 2016

DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA

C.I. 180409941-2

JOSÉ ÁNDRES NICOLALDE LÓPEZ

C.I. 171813732-4



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA** y **JOSÉ ÁNDRES NICOLALDE LÓPEZ**, autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución el trabajo titulado: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Enero 2016

Una firma manuscrita en tinta azul que parece leer 'David Alejandro Córdova Molina', sobre una línea horizontal.

**DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA**

C.I. 180409941-2

Una firma manuscrita en tinta azul que parece leer 'José Andrés Nicolalde López', sobre una línea horizontal.

**JOSÉ ÁNDRES NICOLALDE LÓPEZ**

C.I. 171813732-4

## **DEDICATORIA**

Esta tesis la dedico a mi madre, que desde el principio de mi vida y mi carrera me ha apoyado con sus grandes consejos, espíritu de lucha y palabras de consuelo, ha constituido la inspiración más grande para escalar este peldaño en mi vida.

A mi padre que con sus oportunas enseñanzas y consejos me ha guiado siempre por el camino de la responsabilidad y honestidad.

Al resto de mi familia por sus palabras de aliento y apoyo que de una u otra forma han constituido el espíritu de lucha y determinación que me llevo a culminar este proyecto.

*DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA*

## **DEDICATORIA**

El desarrollo de este proyecto para la obtención del título de ingeniero en Mecatrónica lo dedico al ser que siempre me dio fuerza, sabiduría y apoyo incondicional, muchas gracias mi Dios por haber permitido que de este gran pasó en mi vida.

Dedico también la realización de la tesis a mis padres quienes supieron brindar todo el apoyo y a mi hermano por ser mi ejemplo de esfuerzo, rectitud y perseverancia en el transcurso de la vida.

Dedico la tesis a Estephany Valencia mi futura esposa, pilar fundamental en la toma de decisiones y musa para mi realización como profesional y mejor ser humano.

A toda mi familia y seres que supieron darme animo en momentos difíciles y que de una u otra forma colaboraron con su granito de arena.

*JOSE ANDRES NICOLALDE LOPEZ*

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar agradezco a mis padres que por medio de su apoyo sentimental y económico, me han incentivado en seguir adelante con mi carrera universitaria, siempre estuvieron presentes cuando los necesite y fueron pacientes en el largo camino a culminar esta parte de mi vida.

A mi familia que estuvo brindándome su apoyo de forma incondicional, y de forma especial a mi abuelito que por su preocupación me ha demostrado el interés y cariño que tiene hacia mí y mi futuro.

A mis amigos que a lo largo de mi vida universitaria han ido constituyendo una parte importante de todos los logros, algunos conjuntos otros individuales pero a la final todos importantes. En especial agradezco al grupo de los Power Rangers que son como mis hermanos y no solo han sido compañeros de universidad sino amigos de verdad.

Y un agradecimiento muy especial a mi Director de tesis, Ing. Hugo Ortiz que con su paciencia y conocimiento nos ha guiado a lo largo de este proyecto.

*DAVID ALEJANDRO CÓRDOVA MOLINA*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre por su apoyo incondicional durante todo mi formación estudiantil desde mis primeras palabras hasta la universidad, gracias Madre por siempre brindarme palabras de ánimo y fuerza, por permitir que crezca como mejor ser humano y brindarme el apoyo económico en mi formación cognitiva y personal, por haberme ayudado a levantarme en mis tropiezos y desaciertos durante toda mi vida.

Agradezco a mi padre por haberme brindado todo su conocimiento y experiencias para poder solventar los diferentes problemas de la vida, por acompañarme durante toda mi formación de la carrera, gracias padre por hacer de mi hombre hecho y derecho y por permitir que sea un hombre valiente y dispuesto asumir y superar cualquier reto.

Agradezco a Etephany Valencia mi futura esposa por acompañarme y cuidarme durante todo el trayecto de la carrera, gracias mi amor por esas palabras de aliento, por ser mi inspiración.

Agradezco mi hermano quien a pesar de ser menor me ha enseñado lo que representa el esfuerzo y que frutos proporciona a largo plazo.

Agradezco al grupo de Power Rangers mis grandes compañeros y amigos por entregarme su amistad y colaboración en la resolución de problemas y por ser mi compañía en las largas jornadas de estudio.

*JOSE ANDRES NICOLALDE LOPEZ*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	ii
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	iv
<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>DEDICATORIA</b> .....	vi
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xix
<b>CAPÍTULO I</b> .....	3
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO</b> .....	3
<b>1.1.1 Proceso para control de temperatura</b> .....	3
<b>1.1.2 Proceso para control de velocidad de un servomotor</b> .....	4
<b>1.2 ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA</b> .....	9
<b>1.4 ÁREAS DE INFLUENCIA</b> .....	10
<b>1.5 OBJETIVOS</b> .....	10

1.5.1	Objetivo General.....	10
1.5.2	Objetivos Específicos .....	11
1.6	ALCANCE.....	11
<b>CAPÍTULO II.....</b>		<b>13</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>		<b>13</b>
2.1	CONTROL DE PROCESOS .....	13
2.2	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO.....	15
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>58</b>
<b>DISEÑO MECATRÓNICO.....</b>		<b>58</b>
3.2.1	Estructura general del sistema electrónico .....	76
3.2.2	Control de Temperatura .....	78
3.2.3	Control de Velocidad .....	78
3.2.4	Sistema de alimentación .....	80
3.2.5	Instrumentación .....	81
3.2.6	Controladores	83
3.2.7	Actuadores	86
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>98</b>
<b>CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN.....</b>		<b>98</b>
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>135</b>
<b>GUÍA DE PRÁCTICAS .....</b>		<b>135</b>

<b>5.1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	135
<b>5.1.2</b>	<b>Materiales y Equipos</b> .....	135
<b>5.1.3</b>	<b>Marco Teórico</b> .....	136
<b>5.1.4</b>	<b>Planteamiento</b> .....	137
<b>5.1.5</b>	<b>Procedimiento</b> .....	138
<b>5.2.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	138
<b>5.2.2</b>	<b>6.2.2 Materiales y equipos</b> .....	138
<b>5.2.3</b>	<b>6.2.3 Marco teórico</b> .....	139
<b>5.2.4</b>	<b>6.2.4 Planteamiento</b> .....	141
<b>5.2.5</b>	<b>6.2.5. Procedimiento</b> .....	143
<b>5.3.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	143
<b>5.3.2</b>	<b>Materiales y equipos</b> .....	144
<b>5.3.3</b>	<b>Marco teórico</b> .....	144
<b>5.3.4</b>	<b>Planteamiento</b> .....	145
<b>5.3.5</b>	<b>Procedimiento</b> .....	146
<b>5.4.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	147
<b>5.4.2</b>	<b>Materiales y equipos</b> .....	147
<b>5.4.3</b>	<b>Marco teórico</b> .....	147
<b>5.4.4</b>	<b>Planteamiento</b> .....	149
<b>5.4.5</b>	<b>Procedimiento</b> .....	150

<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>154</b>
<b>ANÁLISIS ECONÓMICO - FINANCIERO.....</b>	<b>154</b>
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>165</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>165</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>167</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Temperatura Existente en el Laboratorio de Automatización de Procesos .....	3
Figura 2. Esquema general para el proceso de control de temperatura.....	4
Figura 3 Módulo 1 para control de velocidad de motor DC .....	6
Figura 4 Módulo 2 para el control de velocidad de motor DC .....	7
Figura 5 Sección de un módulo para control de temperatura. ....	8
Figura 6 <i>Planta de Temperatura</i> .....	8
Figura 7. Términos utilizados al trabajar con control de procesos .....	14
Figura 8. Representación de un sistema de control.....	16
Figura 9. Sistema de control en lazo abierto.....	17
Figura 10. Sistema de control en lazo cerrado.....	17
Figura 11. Sistema de control automático .....	20
Figura 12. Control Encendido-Apagado.....	21
Figura 13. Control de razón en Lazo Abierto .....	25
Figura 14. Control de razón en Lazo Cerrado.....	25
Figura 15. Control de Cascada.....	27
Figura 16. Control selectivo.....	27
Figura 17. Control por superposición para un sistema de distribución de vapor.....	29
Figura 18. Control de Rango partido .....	30
Figura 19. Control inferencial.....	30
Figura 20. Control adaptativo .....	31
Figura 21. Estructura básica de un control predictivo .....	32
Figura 22. Equipo de laboratorio de control de procesos .....	33

Figura 23. Estructura metálica .....	35
Figura 24. Ejemplos de armaduras usadas para cálculo estructural.....	37
Figura 25. Análisis Estructural mediante elementos finitos .....	38
Figura 26. Materiales de Ingeniería .....	40
Figura 27. Clasificación de aleaciones metálicas .....	42
Figura 28. Diagrama Hierro-Carbono.....	44
Figura 29. Temperatura de colapso del acero estructural .....	45
Figura 30. Esquema básico de un sistema de instrumentación.....	46
Figura 31. Motor eléctrico D.C.....	51
Figura 32. Servomotor .....	52
Figura 33. PLC's de la familia Allen-Bradley .....	53
Figura 34. Tipos de HMI .....	56
Figura 35. Proceso de Diseño Mecatrónico .....	58
Figura 36. Alternativa 1 .....	61
Figura 37. Alternativa 2.....	61
Figura 38. Software CES, Visualización del material escogido .....	65
Figura 39. Forma y dimensiones de perfil prefabricado .....	66
Figura 40. Tabla del catálogo de Correas estructurales .....	66
Figura 41. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 .....	67
Figura 42. Estructura en SolidWorks.....	69
Figura 43. Diseño 3D estructura metálica .....	70
Figura 44. Análisis estructural .....	70
Figura 45. Asignación de material para la simulación.....	71
Figura 46. Mallado de la estructura .....	72

Figura 47. Aplicación de apoyos y cargas .....	72
Figura 48. Deformación Total .....	73
Figura 49. Esfuerzo equivalente de Von Mises .....	73
Figura 50. Factor de seguridad .....	74
Figura 51. Proceso de diseño electrónico .....	77
Figura 52. Diagrama de bloques del Sistema Electrónico .....	79
Figura 53. Regulador de voltaje LM2596.....	80
Figura 54. Conexión del LM2596.....	81
Figura 55. Sensor de Temperatura .....	82
Figura 56. Encoder incremental acoplado al motor .....	83
Figura 57. MicroLogix 1100.....	84
Figura 58. Arduino UNO .....	85
Figura 59. Niquelina eléctrica.....	87
Figura 60. Ventilador.....	88
Figura 61. Motor DC .....	89
Figura 62. Servomotor .....	90
Figura 63. Circuito de Control de Temperatura.....	91
Figura 64. Ruteado de pistas para el Control de Temperatura.....	92
Figura 65. Visualización 3D del Control de Temperatura .....	93
Figura 66. Esquema de control de planta del motor .....	94
Figura 67. Circuito de Control de Velocidad.....	95
Figura 68. Ruteado de pistas para el Control de Velocidad.....	96
Figura 69. Visualización 3D del Control de Temperatura .....	97
Figura 70. Procesos tecnológicos primarios y secundarios .....	98

Figura 71. Perfil estructural en C.....	99
Figura 72. Medición perfil estructural .....	100
Figura 73. Soldadura con electrodo .....	101
Figura 74. Estructura soporte y módulos acoplados .....	102
Figura 75. Estructura final .....	103
Figura 76. Mangos de goma .....	104
Figura 77. Partes del Módulo de Temperatura.....	104
Figura 78. Tubo exterior .....	105
Figura 79. Tubo interior.....	106
Figura 80. Soportes para tubos .....	106
Figura 81. Ensamble de tubos.....	107
Figura 82. Ensamblaje soporte-tubos.....	107
Figura 83. Tapa soporte de tubos.....	110
Figura 84. Módulo de temperatura .....	111
Figura 85. Partes del Módulo de Velocidad.....	111
Figura 86. Motor de corriente directa .....	112
Figura 87. Soportes de motor.....	113
Figura 88. Disco de frenado.....	113
Figura 89. Freno mecánico .....	114
Figura 90. Módulo de velocidad.....	114
Figura 91. Sensores de temperatura.....	115
Figura 92. Ensamble Soporte – Ventilador.....	115
Figura 93. Placa de circuito impreso para el control de velocidad .....	116
Figura 94. Circuito para filtrar ruido en los sensores de temperatura.....	117

Figura 95. Controlador lógico programable.....	117
Figura 96. Esquema de conexión general .....	118
Figura 97. Programación para obtención de datos.....	120
Figura 98. Datos adquiridos en Excel.....	121
Figura 99. Ident – Herramienta de identificación de sistemas.....	122
Figura 100. Entorno Ident.....	122
Figura 101. Señales de entrada y salida.....	123
Figura 102. Modelo de proceso – Ident .....	123
Figura 103. Identificación del sistema.....	124
Figura 104. Aproximación del sistema de temperatura .....	124
Figura 105. Función de transferencia .....	125
Figura 106. Constantes para el PLC .....	125
Figura 107. Datos adquiridos en Excel.....	126
Figura 108. Variables.....	127
Figura 109. Ident – Herramienta de identificación de sistemas.....	127
Figura 110. Entorno Ident.....	128
Figura 111. Señales de entrada y salida.....	128
Figura 112. Modelo de proceso – Ident .....	129
Figura 113. Identificación del sistema.....	129
Figura 114. Aproximación del sistema de temperatura .....	130
Figura 115. Función de transferencia .....	130
Figura 116. Constantes para el PLC .....	131
Figura 117. Diagramas de flujo programación del PIC - Interrupciones.....	132
Figura 118. Diagramas de flujo programación del PIC .....	133

Figura 119. Diagramas de flujo programación del Arduino .....	134
Figura 120. Control Encendido-Apagado.....	136
Figura 121. Lazo de histéresis en el control ON-OFF.....	137
Figura 122. HMI – horno de laboratorio.....	142
Figura 123. Control de razón en Lazo Abierto .....	144
Figura 124. Control de razón en Lazo Cerrado.....	145
Figura 125. Calefacción de un automóvil .....	146
Figura 126. Control por superposición para un sistema de distribución de vapor.....	149
Figura 127. Plantas para control de superposición .....	150
Figura 128. Control de Cascada.....	152
Figura 129. Control cascada de termo cuna.....	153
Figura 130. ETRON 31.....	157
Figura 131. Flujo de caja .....	158
Figura 132. Representación TIR.....	161
Figura 133. Relación Beneficio/ Costo.....	162
Figura 134. Software - Decisiones de Inversión.....	164

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de Características de Acciones de Control.....	24
Tabla 2. Matriz de selección de soluciones.....	62
Tabla 3. Estatura promedio Ecuador.....	63
Tabla 4. Piezas para estructura y simulación en SolidWorks .....	68
Tabla 5. Resultados de la simulación.....	74
Tabla 6. Módulos de control de procesos .....	75
Tabla 7. Tamaño de piezas para estructura .....	99
Tabla 8. Piezas a fabricar .....	105
Tabla 9. Banco de resistencias.....	108
Tabla 10. Soporte ventilador.....	109
Tabla 11. Piezas de módulo de velocidad.....	112
Tabla 12. Cableado circuitos de control al PLC .....	119
Tabla 13. Costos de materiales .....	155
Tabla 14. Costos de servicios básicos.....	156
Tabla 15. Costos totales.....	156
Tabla 16. Flujo de Caja.....	159
Tabla 17. Indicadores.....	164

## **RESUMEN**

El proyecto que se presenta a continuación denominado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE” comprende el diseño e implementación de una estructura que se compone de un soporte y 3 módulos de aprendizaje, que permitirá a los estudiantes de la universidad realizar prácticas que abarcan los temas de control en plantas de temperatura y en plantas de velocidad. El módulo de aprendizaje comprende un PLC con sus respectivas unidades de expansión que permitirá la conexión y programación de los diferentes controles, el siguiente componente es la planta de velocidad, que como principal parte tiene un motor DC que puede ser perturbado con una pinza a modo de freno, por último la planta de temperatura, es un sistema compuesto por una niquelina y un ventilador que por medio de una señal analógica permite controlar el calor que se disipa a través del tubo, el mismo que contiene dos sensores que dan a conocer la temperatura en dos puntos diferentes. El modulo permite realizar técnicas de control implementadas en procesos de hasta 3 variables independientes o dependientes del mismo proceso.

### **Palabras Clave:**

- **PLC**
- **CONTROL**
- **TEMPERATURA**
- **VELOCIDAD**

**ABSTRACT**

The project presented below called " DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EL LABORATORIO DE CONTROL DE PROCESOS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE " includes the design and implementation of a structure consisting of a support and 3 learning modules, which allow college students internships covering topics plants temperature control speed and plants. The learning module comprises a PLC with their respective expansion units to allow connection and programming of the various checks, the next component is the velocity plant, which main part has a DC motor that can be disturbed with a clamp by way Brake finally plant temperature, is a system composed of a temperature resistance and a fan through an analog signal allows controlling the heat dissipated through the tube, it comprising two sensors which disclose the temperature at two different points. The module allows control techniques implemented in processes up to 3 independent or dependent variables of the same process.

**Keywords:**

- **PLC**
- **CONTROL**
- **TEMPERATURE**
- **SPEED**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en el diseño, construcción e implementación de un sistema de entrenamiento prototipo para la experimentación de las principales técnicas y estrategias de control automático de procesos.

Este sistema sustituirá las dos plantas de entrenamiento que hasta el momento se han venido utilizando en el Laboratorio de Control de Procesos (control de temperatura del aire al fluir por un túnel y control de velocidad digital de un servomotor DC), mejorando y actualizando el hardware, y la metodología de enseñanza de la teoría de control automático de procesos, incluyendo a la vez nuevas prácticas para determinadas estrategias de control.

#### 1.1.1 Proceso para control de temperatura

Para la implementación de la planta de temperatura, se utilizará como base el modelo ya existente en el laboratorio que se puede visualizar en la Figura 1 , es decir un sistema que incluye un túnel, ventilador, resistencias térmicas, y sensores de temperatura. (Figura 1).



Figura 1. **Planta de Temperatura Existente en el Laboratorio de Automatización de Procesos**

Fuente: Autores

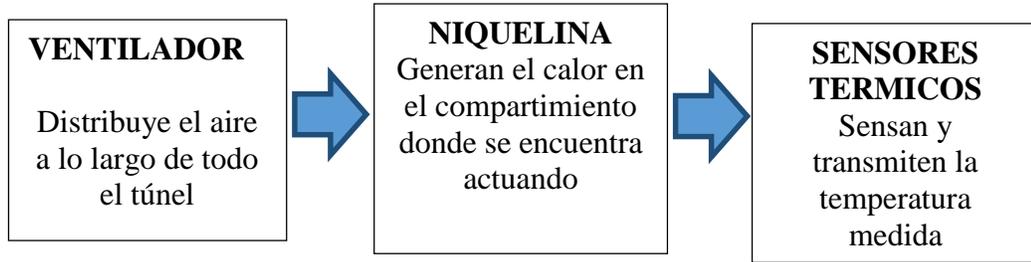


Figura 2. **Esquema general para el proceso de control de temperatura**

Fuente: Autores

Para realizar el control se empleará un PLC junto con los acondicionamientos electrónicos necesarios para la utilización de un sistema de flujo de aire (ventilador) y de un actuador, en este caso una niquelina controlada por mediante voltaje DC podrá realizar el control a través de un sistema PWM. El ventilador es el encargado de repartir el calor de la cámara de calefacción hacia el túnel donde se encuentran los sensores que son los encargados de proporcionar la información necesaria del evento en proceso.

Las lecturas de los sensores se ingresarán a través de entradas analógicas del PLC, cuyo número y especificaciones serán dimensionados en la etapa de diseño respectiva.

### 1.1.2 Proceso para control de velocidad de un servomotor.

El diseño de la planta de velocidad, al igual que en el caso anterior, toma en consideración el diseño del módulo obsoleto, mostrado en la figura XX, y guardará cierta similitud con éste. Adicionalmente al eje se incorporará un encoder óptico incremental metálico que cumplirá un doble propósito: medir la velocidad digitalmente y permitir la carga del motor a través de un freno mecánico aplicado sobre el disco del encoder.

En la Figura 3 se muestra un esquema de los sensores, actuadores y control de la planta.



Figura 3. **Esquema general para el control del proceso de velocidad**

Fuente: Autores

Para el control se utilizará un PLC junto con los acondicionamientos electrónicos necesarios; el motor debe ser controlado por una salida analógica con pwm, la lectura de los sensores será ingresada por medio de entradas analógicas, el freno mecánico será controlado mediante una pinza o gripper cuya abertura será proporcionada por el usuario mediante un potenciómetro, la carga electrónica o perturbación será proporcionada por una resistencia variable de potencia controlada manualmente por el usuario-

## 1.2 ANTECEDENTES

Un aspecto importante de la misión de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE es la formación de profesionales de alta calidad, particularmente en lo que concierne a las ingenierías técnicas. Es así que actualmente la Ingeniería Mecatrónica es una carrera líder de la institución, por lo que es muy importante garantizar la infraestructura técnica de soporte para esta y otras carreras afines.

Existen varios laboratorios para la práctica e implementación de los conocimientos teóricos impartidos en clase, entre ellos los Laboratorios de PLCs, Control de Procesos y, Redes Industriales, en los cuales comparten las cátedras los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica. Es indudable que con el pasar del tiempo y el vertiginoso

avance tecnológico han ido quedando obsoletos algunos equipos del laboratorio siendo por tanto necesaria la sustitución y/o modernización de los mismos.

Específicamente en los mencionados Laboratorios de PLCs Y Control de Procesos existen pequeños sistemas de entrenamiento didácticos en los cuales se realizan prácticas relacionadas con la aplicación de técnicas y estrategias de control automático de procesos industriales. Estos sistemas de entrenamiento fueron adquiridos por la ESPE en el año 1995, es decir hace casi 20 años.

Habiendo éstos equipos cumplido en exceso su ciclo de vida son evidentes los problemas que presentan, algunos de los cuales se mencionan y grafican a continuación:

En la *Figura 3* y *Figura 4* se muestran secciones de los módulos de entrenamiento para el control de velocidad de servomotores DC.



**Figura 3 Módulo 1 para control de velocidad de motor DC**

Fuente: Autores



Figura 4 **Módulo 2 para el control de velocidad de motor DC**

Fuente: Autores

Del análisis de los mismos es evidente que:

- La tecnología inmersa en los módulos es obsoleta.
- La mayoría de subsistemas electrónicos y mecánicos que incluyen se encuentran deteriorados y fuera de uso.
- Algunos subsistemas presentan condiciones irreparables.
- No existe disponibilidad en el mercado de repuestos para una posible reparación.
- El acoplamiento mecánico de los motores es desactualizado.
- Se encuentran deteriorados algunos elementos claves de sensado.
- Dada la tecnología con la cual fueron construidos, la disipación de calor es excesiva.
- Su tamaño y disposición los convierte en poco funcionales dadas las características del laboratorio.
- Los dispositivos de freno electromagnético no funcionan.
- Su estructura impide la experimentación de estrategias de control. específicas de acuerdo a la necesidad de las asignaturas.

En la *Figura 5* y *Figura 6* se muestran secciones de los módulos de entrenamiento para el control de temperatura del flujo de aire que circula por un túnel:

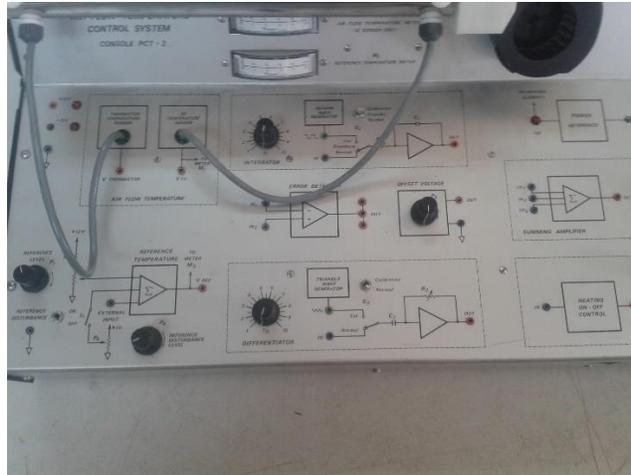


Figura 5 Sección de un módulo para control de temperatura.

Fuente: Autores



Figura 6 *Planta de Temperatura*

Fuente: Autores

El diagnóstico de los mismos permite evidenciar lo siguiente:

- La tecnología de control electrónica inmersa en los módulos es obsoleta.
- El desgaste mecánico de los actuadores (ej. ventiladores) es excesivo.

- No existe disponibilidad en el mercado de repuestos para una posible reparación.
- Los sensores y transmisores, aparte de obsoletos, no funcionan.
- Los elementos de calentamiento se encuentran colapsados.
- Su tamaño y disposición los convierte en poco funcionales dadas las características del laboratorio.
- Su estructura impide la experimentación de estrategias de control específicas de acuerdo a la necesidad de las asignaturas.

### **1.3 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

En los procesos industriales actuales una parte vital es la automatización de procesos, los conocimientos y habilidades en este campo son fundamentales para cualquier ingeniero que se desempeñe en las áreas de automatización, control, Mecatrónica y afines.

En ese contexto, el control automático de procesos es un campo del conocimiento en constante desarrollo y crecimiento, siendo por ello necesario estudiar las teorías existentes e investigar nuevas soluciones a problemas tradicionales y nuevos. Por otra parte, el desarrollo vertiginoso de la tecnología, obliga a la universidad realizar la actualización periódica de los equipos de laboratorio para así desarrollar las actividades de docencia e investigación con tecnología moderna. A su vez es necesario garantizar que los alumnos de las carreras de Ingeniería Mecatrónica y afines reciban una formación que esté a la vanguardia tecnológica, siendo para ello necesario contar con una infraestructura tecnológica idónea.

La ejecución del presente proyecto permitirá reemplazar equipos obsoletos que se encuentran en los laboratorios de la universidad, equipos que como se indicó anteriormente fueron adquiridos hace dos décadas (año 1995), por lo que ya no son funcionales ni tampoco se encuentran a la par de la tecnología moderna. Por otra parte, hoy en día, un requisito para acreditación de las carreras es una buena infraestructura de laboratorios, siendo además un compromiso de la universidad el formar profesionales de primera línea.

Cabe señalar que el reemplazo y la innovación de equipos planteada en este proyecto permitirán:

- Innovar prácticas nuevas y técnicas modernas para el análisis de las teorías de control
- Conseguir versatilidad y flexibilidad en la estructuración de las prácticas de laboratorio
- Utilizar herramientas actuales para la visualización de los resultados con las consiguientes ventajas para el análisis del control de las variables involucradas ( velocidad y temperatura)
- Otorgar al sistema de entrenamiento características de escalabilidad para abordar el control de otras variables en futuros proyectos
- Actualizar el uso de componentes electrónicos análogos y digitales, tales como filtros y circuitos de acondicionamiento, a fin de obtener una mejor respuesta y por lo tanto un mejor tiempo para las mismas.

#### **1.4 ÁREAS DE INFLUENCIA**

La influencia de este proyecto es de tipo local y regional. Local en el ámbito de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE al mejorar los estándares de formación de sus alumnos y regional a través de la impartición de futuros programas de capacitación a la comunidad industrial de la región utilizando para el efecto el nuevo equipamiento desarrollado.

#### **1.5 OBJETIVOS**

##### **1.5.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un sistema de entrenamiento, para el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Optimizar el tiempo de desarrollo de las practicas realizadas en el laboratorio de control de procesos
- Optimizar el uso del espacio físico en las instalaciones en el laboratorio de control de procesos
- Proporcionar a los estudiantes nuevas posibilidades y experiencia en cuanto al uso de estrategias de las diferentes técnicas de control para procesos.
- Ampliar la capacidad del laboratorio en cuanto al número de posibles usuarios que se puede atender por sesión en cada clase.
- Poner al alcance de los usuarios del laboratorio modernas herramientas y tecnologías para el laboratorio de Control de Procesos.
- Mejorar las condiciones del Laboratorio de control procesos a fin de que el mismo cumpla con los estándares de acreditación.

### 1.6 ALCANCE

En el proyecto en curso se busca renovar módulos existentes en el laboratorio de Control de Procesos, a fin de innovar nueva tecnología y que esta sea flexible, es decir, que pueda ser adaptada y mejorada en un futuro. Se Buscará implementar un prototipo de sistema de entrenamiento versátil en el cual se permitan añadir diferentes plantas para realizar el análisis y control de las mismas.

Se tomará como base dos plantas de simulación industrial, una de temperatura y otra de velocidad de motor DC las cuales serán diseñadas, construidas e instaladas en una estructura modular también propuesta en este proyecto.

Los requisitos que deberá cumplir este prototipo son los siguientes:

- El sistema deberá ser modular, permitiendo así, el fácil montaje y desmontaje de las plantas y equipos.
- Flexibilidad del sistema para posibles mejoras y ampliaciones en un futuro.

- La conexión y control de los procesos podrá ser realizado a través de PLCs y computadoras.
- El prototipo permitirá el control, simulación y monitoreo de los procesos aplicando cada una de las siguientes técnicas: ‘
  - Control On-Off con histéresis
  - Control Proporcional
  - Control PI
  - Control PID.
- El prototipo permitirá el control, simulación y monitoreo de los procesos aplicando cada una de las siguientes estrategias:
  - Control de Razón
  - Control de Cascada
  - Control Selectivo
  - Control de superposición

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEORICOS**

Debido a que el presente trabajo trata acerca del diseño e implementación de un sistema de entrenamiento para el Laboratorio de Control de Procesos se iniciará definiendo lo que representa el control de procesos, para posteriormente abordar los diferentes elementos necesarios para poder implementar el sistema de entrenamiento, así como investigar los equipos que existen actualmente en el mercado para laboratorios y centros de investigación.

#### **2.1 CONTROL DE PROCESOS**

Proceso es el término utilizado en “control de procesos” o “procesos industriales”, se refiere a cambiar o refinar materias primas para lograr un producto final.

La materia prima, que puede o no cambiar de estado físico durante el proceso, es transferida, medida, mezclada, calentada, enfriada, filtrada, almacenada o manipulada de alguna manera para producir el producto final

La instrumentación y control de procesos es una especialidad de la ingeniería que combina, a su vez, distintas ramas, entre las que destacan: sistemas de control, automatización, electrónica e informática. Su principal aplicación y propósito es el análisis, diseño y automatización de procesos de manufactura de la mayor parte de las áreas industriales: petróleo y gas, generación de energía eléctrica, textil, alimentaria, automovilística, etc. Figura 7.

El sistema de control permitirá una operación del proceso más fiable y sencilla, al encargarse de obtener unas condiciones de operación estables, y corregir toda desviación que se pudiera producir en ellas respecto a los valores de ajuste.



- Optimización de la operación del proceso/ utilización del equipo
- Fácil acceso a los datos del proceso

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO

El control del proceso consistirá en la recepción de unas entradas, variables del proceso, su procesamiento y comparación con unos valores predeterminados por el usuario, y posterior corrección en caso de que se haya producido alguna desviación respecto al valor preestablecido de algún parámetro de proceso.

El bucle de control típico mostrado en la Figura 8 está formado por los siguientes elementos, a los que habrá que añadir el propio proceso.

***Elementos de medida*** (Sensores): Generan una señal indicativa de las condiciones de proceso.

***Elementos de control lógico*** (Controladores): Leen la señal de medida, comparan la variable medida con la deseada (punto de consigna) para determinar el error, y estabilizan el sistema realizando el ajuste necesario para reducir o eliminar el error.

***Elementos de actuación*** (Válvulas y otros elementos finales de control): Reciben la señal del controlador y actúan sobre el elemento final de control, de acuerdo a la señal recibida.

Esta serie de operaciones de medida, comparación, calculo y corrección, constituyen una cadena cerrada constituyen ciclo cerrado. El conjunto de elementos que hacen posible este control reciben el nombre de bucle de control.

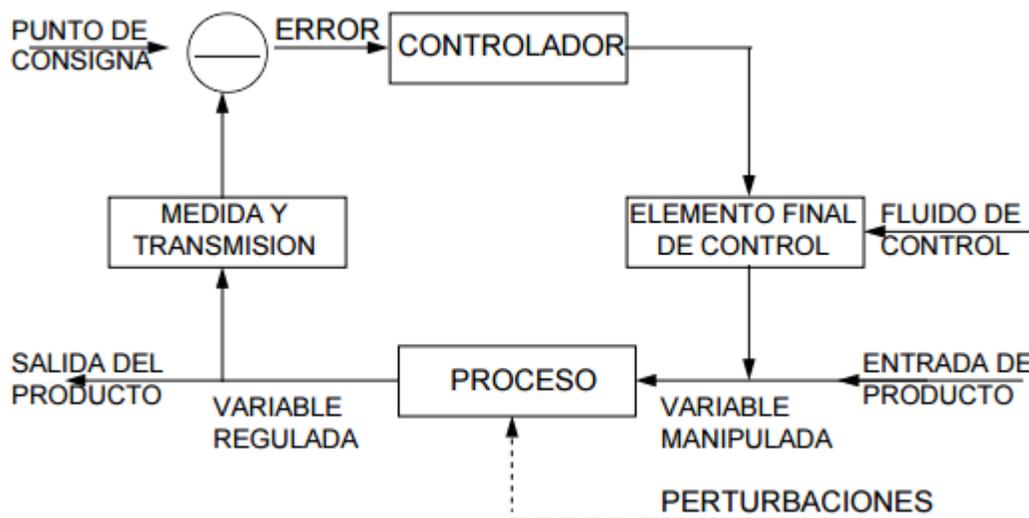


Figura 8. **Representación de un sistema de control**

Fuente: (Arántegui, 2011)

### 2.2.1 Definiciones

**El lazo de control:** El lazo de control requiere la ocurrencia de tres tareas:

- Medida
- Comparación
- Ajuste

**Planta:** proceso o sistema: es el sistema físico o la magnitud física que se desea controlar.

**Perturbaciones:** señales o magnitudes físicas desconocidas que tienden a afectar adversamente la salida del sistema

**Variable de proceso:** Son aquellas que pueden cambiar las condiciones de un proceso.

**Referencia (Setpoint):** Valor al que se desea mantener una variable de proceso.

**Variable medida:** Es aquella que se desea mantener estable.

**Variable manipulada:** Es aquella que varía para mantener constante la variable medida.

**Error:** Es la diferencia entre la variable medida y el setpoint. Puede ser positiva ó negativa. Está compuesto por:

- Magnitud
- Duración
- Velocidad de variación

**Offset:** Es una variación constante de la variable de proceso, respecto del setpoint.

**Variación de carga:** Es un cambio no deseado en algún factor que pueda afectar la variable de proceso.

**Algoritmo de control:** Es la expresión matemática de una función de control.

**Lazo abierto:** A lazo abierto, la variable de proceso no es comparada y se genera una acción independientemente de las condiciones de la misma. Figura 9

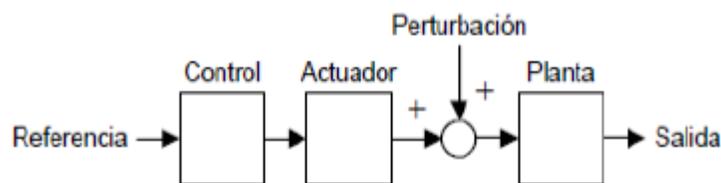


Figura 9. **Sistema de control en lazo abierto**

Fuente: (Vignoni, 2002)

**Lazo cerrado:** Lazo cerrado existe cuando la variable de proceso es medida, comparada con el setpoint y se genera una acción tendiente a corregir cualquier desviación respecto del mismo. Figura 10

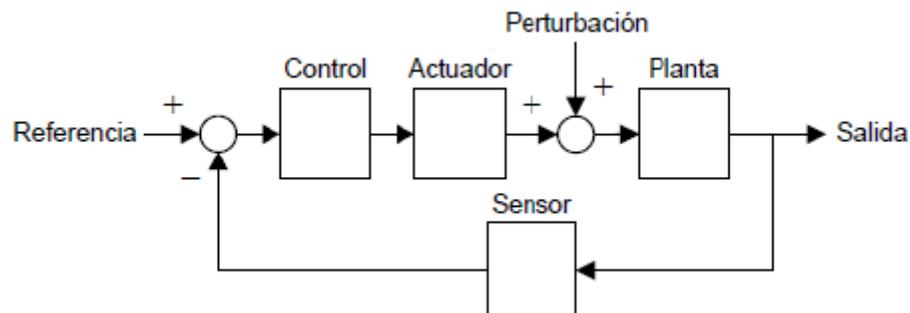


Figura 10. **Sistema de control en lazo cerrado**

Fuente: (MAVAINSA, 2011)

### 2.2.2 Componentes del lazo de control:

**Elemento primario o sensor:** Es el primer elemento en un lazo de control el cual mide la variable de proceso.

**Transductor:** Convierte una señal física en una eléctrica

**Convertidor:** Convierte una señal de un dominio en otro

**Transmisor:** Convierte la lectura de un sensor en una señal estándar que pueda ser transmitida

#### *Señales:*

En procesos industriales existen tres tipos de señales para transmitir información

**Neumáticas (3 – 15 psi):** Cambios en la presión de aire de una cañería, proporcionales a las variaciones de magnitud medida.

Se siguen utilizando en aplicaciones particulares

**Analógicas (4 – 20 mA), (1 – 5 V):** La forma de transmisión más común desde los años 1960.

A partir de los 90 se comenzaron a reemplazar por señales digitales.

**Digitales:** Señales de niveles discretos que combinados de forma particular representan la magnitud de las variables del proceso.

La metodología utilizada para combinar las señales digitales, se denomina protocolo.

Los protocolos pueden ser estándar o propietarios (abiertos o cerrados). Ejemplos Ethernet, Profibus, CAN, Hart, etc.

#### **Indicadores:**

Son dispositivos leíbles por los humanos que muestran información del proceso.

Pueden ser analógicos o digitales, simples o complejos.

### 2.2.3 Controladores:

Es un dispositivo que recibe los datos del instrumento de medida, lo compara con el dato de setpoint programado, y si es necesario ordena al elemento de control que genere una acción correctiva.

- PLC (Programmable Logic Controller)

Básicamente una computadora conectada a dispositivos de entradas y salidas, analógicas y digitales. Responden a señales de entrada con señales de salida que intentan mantener el/los valores de setpoint.

- DCS (Distributed Control System)  
Además de realizar las funciones de control, proveen lecturas del estado del proceso, mantienen bases de datos, manejan HMIs.
- IED (Intelligent Electronic Device)  
PLCs utilizados en las denominadas “Power Utilities”
- Dispositivo Corrector o Elemento final de control.  
Es quien actúa físicamente para cambiar la variable manipulada. Ej. Válvula
- Actuador  
Es la parte final del dispositivo de control que produce un cambio físico en el elemento final de control. Ejemplo; Actuador eléctrico o neumático de una válvula.

## **2.3 TIPOS DE CONTROL**

Se puede hacer una clasificación de los sistemas de control atendiendo al procedimiento lógico usado por el controlador del sistema para regular la evolución del proceso. Los principales tipos de control utilizados en los procesos industriales son:

### **2.3.1 Convencionales:**

- Sistemas de realimentación:
  - Proporcional
  - Integral
  - Derivativo
- Sistema anticipativo
- Sistema en cascada
- Sistema selectivo

### 2.3.2 Avanzados

- Control de restricciones
- Control del modelo de referencia
- Optimización de unidades

## 2.4 TÉCNICAS DE CONTROL

Los controladores automáticos comparan el valor real de la salida de la planta con la entrada de referencia, lo cual determina la desviación con la que el controlador debe producir una señal de control que reduzca la desviación. Figura 11

El diagrama a bloques mostrado a continuación representa un sistema de control automático, donde el controlador detecta la señal de error, el controlador amplifica la señal y la envía al actuador que produce la entrada a la planta; la salida de la planta es medida por un sensor que transforma la señal y la envía al controlador para que pueda ser comparada con la señal de referencia.

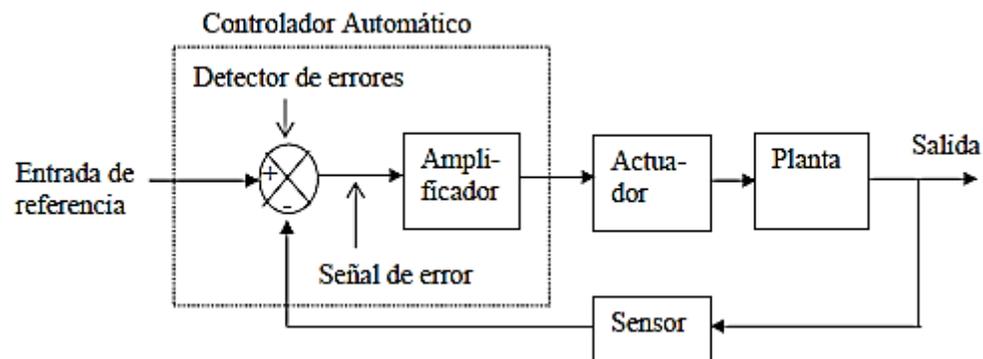


Figura 11. **Sistema de control automático**

Fuente: (Nuñez, 2007)

### 2.4.1 Control Encendido-Apagado

La acción de control Encendido-Apagado es también muy conocida por su nombre en inglés On-Off. Para esta acción de control el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que en la mayoría de los casos son apagados y encendidos. Este control es relativamente simple y barato, por lo cual su uso es muy extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Si se tiene una señal de salida del controlador  $u(t)$  y una señal de error  $e(t)$ , en el control de dos posiciones, la señal  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa. De este modo:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) < 0$$

Donde  $U_1$  y  $U_2$  son constantes. Por lo general, el valor mínimo de  $U_2$  es cero o menos  $U_1$ .

La Figura 12 muestra el diagrama a bloques de un controlador Encendido-Apagado.

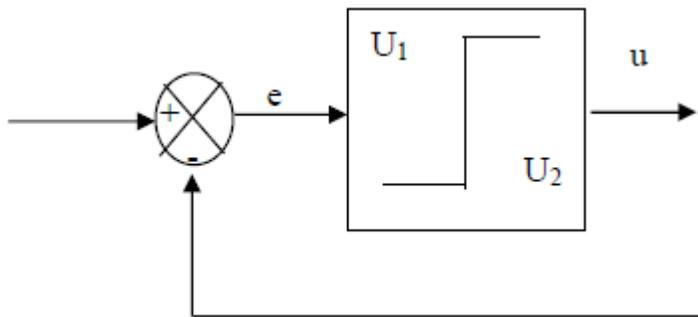


Figura 12. **Control Encendido-Apagado.**

Fuente: (Nuñez, 2007)

### 2.4.2 Control Proporcional

El controlador Proporcional es en realidad un amplificador con ganancia ajustable. Este control reduce el tiempo de subida, incrementa el sobretiro y reduce el error de estado estable.

Para una acción de control Proporcional la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional.

### 2.4.3 Control Integral

La acción de control Integral se denomina control de reajuste (reset). En un controlador integral la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

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

$$u(t) = Ki \int_0^t e(t)$$

donde  $Ki$  es una constante ajustable.

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $u(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de  $u(t)$  permanece estacionario.

### 2.4.4 Control Proporcional Integral

El control Proporcional Integral decrementa el tiempo de subida, incrementa el sobre impulso y el tiempo de estabilización, y tiene el efecto de eliminar el error de estado estable pero empeorará la respuesta transiente.

La acción de control Proporcional Integral se define mediante:

$$u(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t)$$

en donde  $Kp$  es la ganancia proporcional y  $Ti$  se denomina tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción del control, mientras que un cambio en el valor de  $Kp$  afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral  $Ti$  se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

### 2.4.5 Control Proporcional Derivativo

El control Proporcional Derivativo reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo cual tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando la respuesta del sistema. La relación de un controlador Proporcional Derivativo entre la salida  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  está dada por:

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

en donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es una constante denominada tiempo Derivativo.

La acción de control Derivativo, en ocasiones llamada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo Derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. La acción de control Derivativo tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control Derivativo nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido.

Aunque la acción de control Derivativo tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

### 2.4.6 Control Proporcional Integral Derivativo

La combinación de una acción de control Proporcional, una acción de control Integral y una acción de control Derivativo se denomina acción de control Proporcional Integral Derivativo. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

La relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  de la acción de control Proporcional Integral Derivativo está dada por:

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

en donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo Derivativo.

La Tabla 1 resume las características de los controles mencionados:

**Tabla 1.**

**Resumen de Características de Acciones de Control.**

<b>Tipo de Control</b>	<b>Tiempo de subida</b>	<b>Sobre impulso</b>	<b>Tiempo de estabilización</b>	<b>Error en estado estable</b>
<i>Proporcional (P)</i>	Decrece	Crece	Cambio menor	Decrece
<i>P. Integral (PI)</i>	Decrece	Decrece	Crece	Se elimina
<i>P. Derivativo (PD)</i>	Cambio menor	Decrece	Decrece	Cambio menor
<i>P. Integral Derivativo (PID)</i>	Decrece	Decrece	Decrece	Se elimina

Fuente: (Cosco, 2011)

## 2.5 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Determina la estructura que sigue la información o señales en el lazo. Dependiendo de la aplicación a gobernar se debe definir el actuar de las variables de proceso (presión, flujo, temperatura, etc.). En función de esta información se incorporaran determinados instrumentos y/o equipos con los cuales se debe lograr la estabilidad en la aplicación o sistema. Estos instrumentos y/o equipos podrán estar en cantidades (varios sensores,

varios controladores, etc.) y dispuestos en una jerarquía o circuito específico determinado por el Ingeniero de proceso

### 2.5.1 Control de Razón

Se utiliza en los casos en que se requiera que dos o más reactivos, u otros elementos, se tengan que mezclar en una cierta proporción instante a instante (no es posible pesar uno y luego el otro para juntarlos de una vez). Figura 13 y Figura 14.

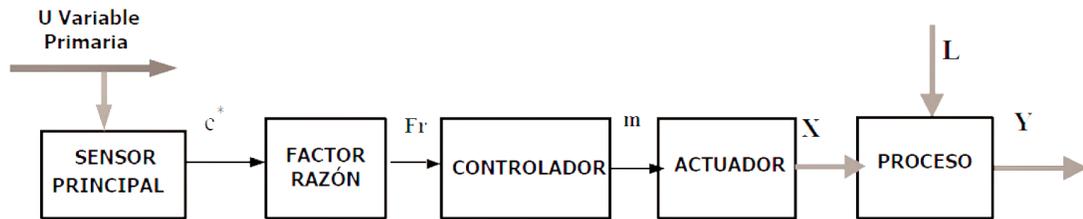


Figura 13. Control de razón en Lazo Abierto

Fuente: (Camacho, 2007)

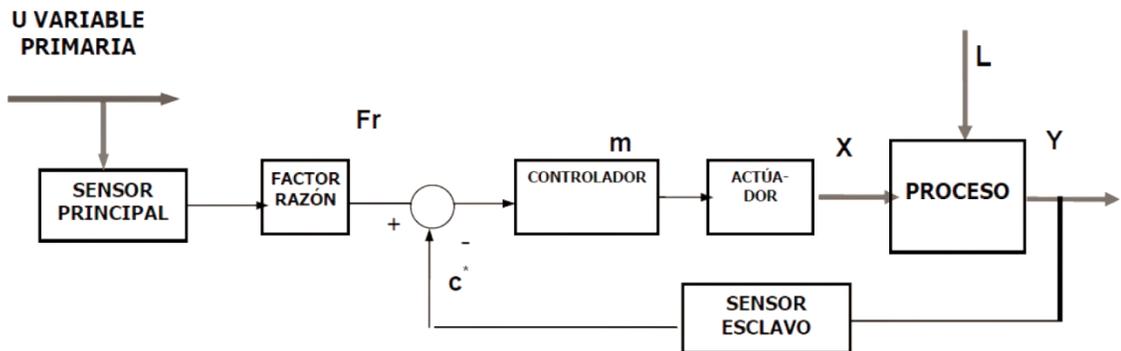


Figura 14. Control de razón en Lazo Cerrado

Fuente: (Camacho, 2007)

#### Aplicaciones:

- Mezclado de dos o más ingredientes. Un ingrediente es seteado como la referencia principal y los demás ingredientes son relacionados al anterior
- Control aire-combustible para un proceso de combustión. El flujo de combustible es controlado por un controlador de temperatura o presión.

La medida del flujo de combustible es luego usada para determinar el set point de un controlador de flujo de aire.

- Control de flujo de un producto en función a la velocidad de alimentación, como una forma de control de posición.
- Fabricación de la cerveza (mezcla proporcional de cerveza concentrada y agua)
- Fabricación de yogurt saborizado.

### **2.5.2 Control de Cascada**

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de retroalimentación es el punto de ajuste para otro controlador de retroalimentación, por lo menos. El control de cascada involucra sistemas de control de retroalimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro. Por lo que se utiliza cuando:

- Cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado.
- Cuando se tiene una variable manipulable y más de una variable medida.
- Cuando las perturbaciones afectan directamente a la variable de proceso manipulada.

El control en cascada tiene dos lazos (Figura 15) un lazo primario con un controlador primario también llamado "maestro" y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado "esclavo", siendo la salida del primario el punto de consigna del secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso.

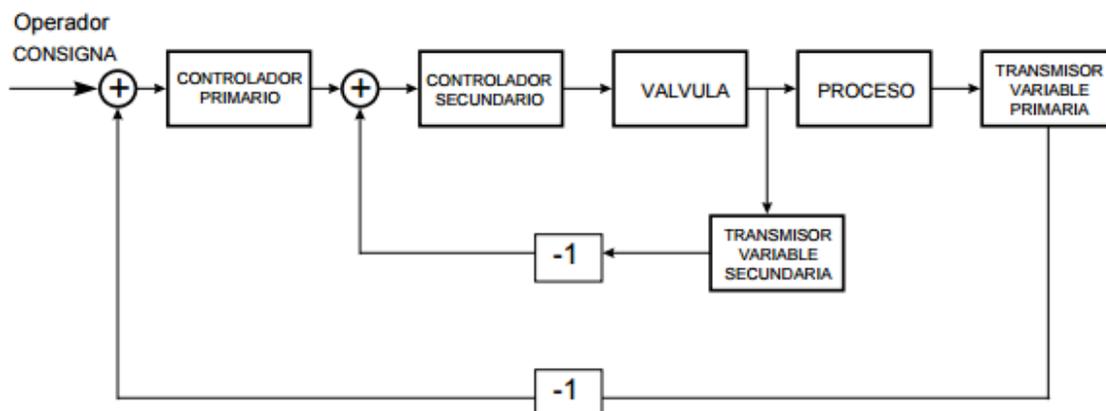


Figura 15. **Control de Cascada**

Fuente: (Montero, 2012)

Desde el punto de vista de rapidez en el control del proceso se puede ver que las perturbaciones instantáneas en la variable secundaria se corrigen autónomamente, mientras que las variaciones más lentas en la variable primaria, que pueden producirse por múltiples causas, se corrigen por el núcleo del sistema de control para mantener el punto de consigna.

### 2.5.3 Control Selectivo

Existen selectores que permiten transferir el control de un bucle a otro (Figura 16), cuando se supera cierto límite, accionando sobre el mismo actuador. Se aplica mucho cuando están en juego razones de seguridad.

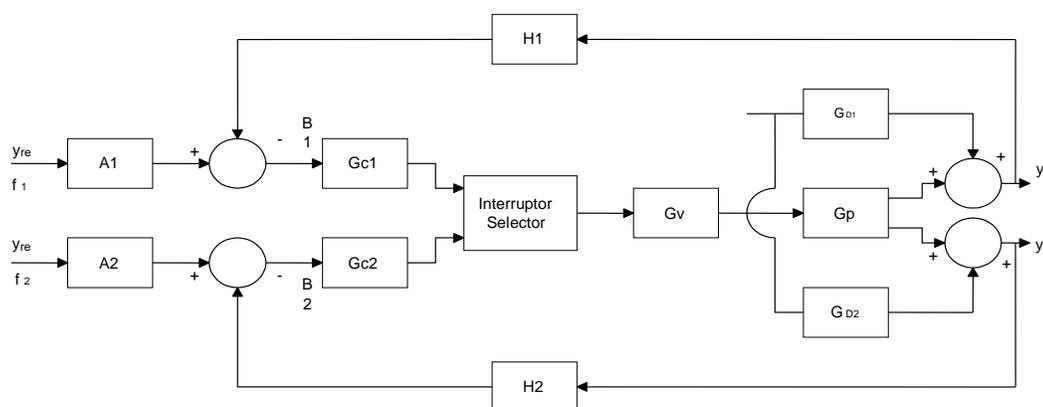


Figura 16. **Control selectivo**

Fuente: (MAVAINSA, 2011)

Es un sistema que opera para satisfacer restricciones de operación impuestas a un proceso con fines de protección del personal y/o del equipo.

Para su aplicación se requiere ejercer control sobre dos variables de un proceso, relacionados entre sí de tal manera que una u otra pueda ser controlada por la misma variable manipulada. Como una variable manipulada solo puede controlarse por una sola acción, debe existir la posibilidad de transferir el mando de uno de los lazos de control al otro cuando las complicaciones de funcionamiento así lo exijan.

#### **2.5.4 Control por Sobre posición**

El control por sobreposición es una técnica mediante la cual las variables de proceso son mantenidas dentro de ciertos límites, usualmente con propósitos de protección. Existen otros esquemas de control más extremos orientados a la parada de la planta para enfrentar estados de disfunción grave de los equipos. El control por sobreposición no es tan drástico y mantiene el proceso en operación pero dentro y bajo condiciones seguras.

Una consideración importante al diseñar un sistema de control por sobreposición es que si en cualquiera de los controladores existe modo integral de control, también debe existir protección contra reajuste excesivo.

##### **Aplicaciones**

- Control de nivel
- Protección de un sistema de recalentador
- Protección de un compresor
- Protección de un sistema de distribución de vapor

##### **Ejemplo: Protección de un sistema de distribución de vapor**

En cualquier proceso químico existen redes de distribución de vapor ver, Figura 17, a varios niveles de presión, hacia las diferentes unidades de proceso. La cantidad de vapor que se deja descender a la línea de baja presión es controlada por la demanda de presión en esta línea. Para proteger de presiones excesivas la línea de alta presión, se puede

instalar un sistema de control por superposición, el cual transfiere la acción de control del lazo 1 al lazo 2 cuando la presión en la línea de alta presión excede el límite superior.

El control por sobreposición se utiliza como un esquema de protección, tan pronto como el sistema a sus condiciones normales de operación, el esquema de sobreposición regresa automáticamente a su estado de operación normal.

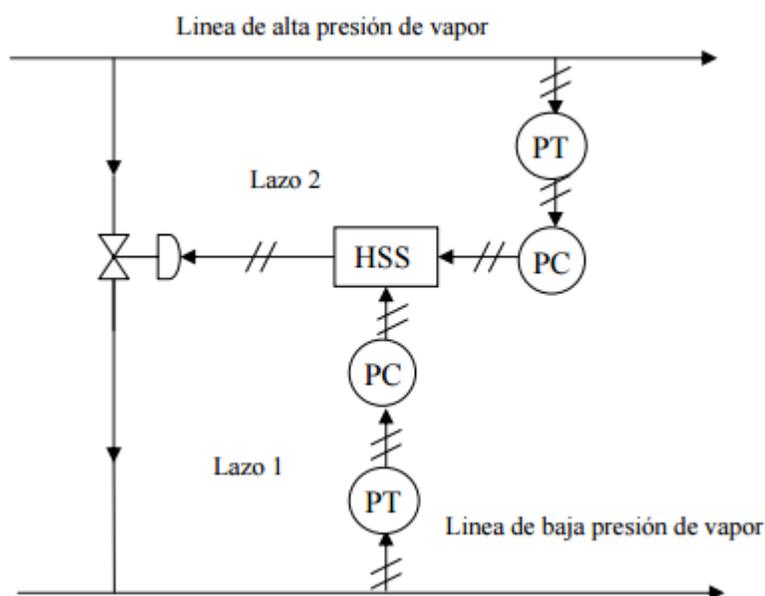


Figura 17. **Control por superposición para un sistema de distribución de vapor.**

Fuente: (Cosco, 2011)

### 2.5.5 Control de Rango Partido

Es un sistema de control en el cual existe una sola variable controlada y dos o más variables manipuladas, que deben tener el mismo efecto sobre la variable controlada. Para realizar éste sistema se requiere compartir la señal de salida del controlador con los varios elementos finales de control. Ver Figura 18.

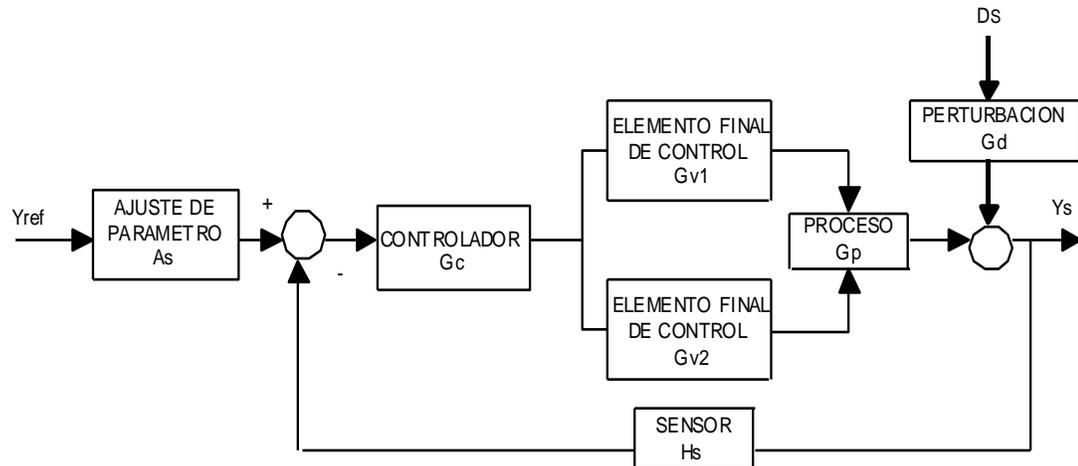


Figura 18. **Control de Rango partido**

Fuente: (Generadores de conocimientos, 2001)

### 2.5.6 Control inferencial

Hay ciertos casos en que la variable a controlar no puede medirse en línea. Sin embargo puede recurrirse a una estimación en base a cierta relación físicoquímica o a cierto modelo. Por ejemplo en la Figura 19, en una destilación la composición del producto no puede medirse en línea pero se recurre a medir la temperatura y en función de ello inferir la composición. Cuando es en base a un algoritmo suele hablarse de “observadores” o “software sensors”.

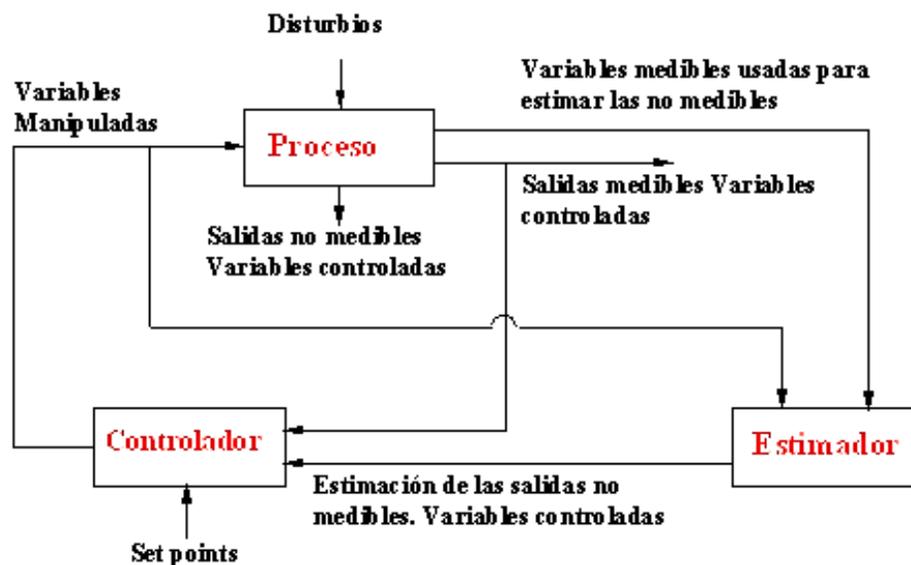


Figura 19. **Control inferencial**

Fuente: (Cosco, 2011)

### 2.5.7 Control adaptativo

En este tipo de control los parámetros del controlador se ajustan automáticamente frente a cambios en las condiciones operativas del proceso. Puede usarse por ejemplo frente a: fouling de intercambiadores, condiciones inusuales de operación (paradas, arranques, sistemas en batch), perturbaciones grandes y frecuentes, grandes variaciones ambientales, cambios en las especificaciones de los productos, fuerte comportamiento no lineal. Ver Figura 20

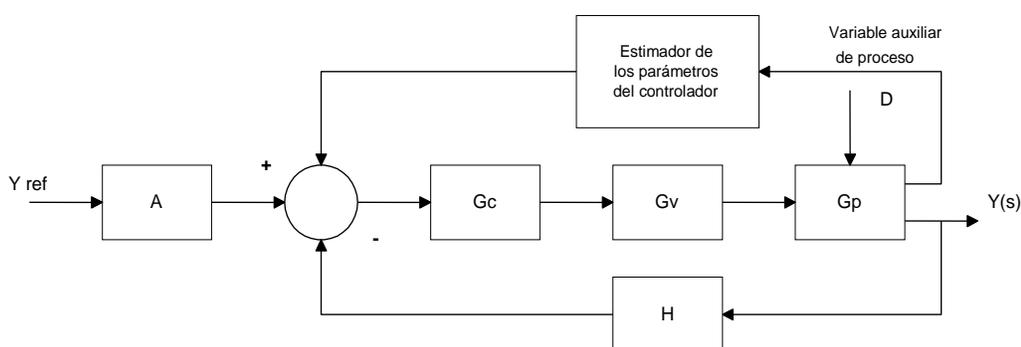


Figura 20. **Control adaptativo**

Fuente: (Villalobos, 2010)

Un controlador adaptativo contiene un sistema computarizado que es programada para cambiar la respuesta del controlador cuando un error no es el correcto. El control adaptativo obtiene su nombre de la habilidad del controlador para adaptar su respuesta a las condiciones de cambios. El control adaptativo es típicamente usado en situaciones donde la ganancia de los procesos no es lineal, como en el control de un pH.

Un lazo realimentado con un control adaptativo ha sido añadido para monitorear y controlar el pH, para compensar por cualquier variación no corregida por el control adaptativo

### 2.5.8 Control Predictivo

El Control Predictivo Basado en Modelo, Model (Based) Predictive Control (MBPC ó MPC) constituye un campo muy amplio de métodos de control desarrollados en torno a ciertas ideas comunes e integra diversas disciplinas como control óptimo,

control estocástico, control de procesos con tiempos muertos, control multivariable o control con restricciones. Ver Figura 21.

Las ideas básicas en toda la familia de controladores predictivos son:

- Uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo (horizonte).
- Cálculo de las señales de control minimizando una cierta función objetivo.
- Estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada instante de muestreo.

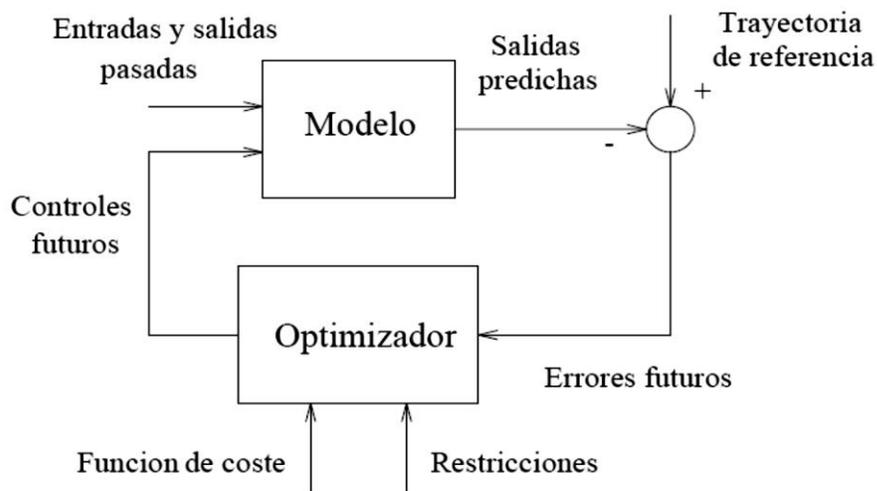


Figura 21. Estructura básica de un control predictivo

Fuente: (Generadores de conocimientos, 2001)

## 2.6 EQUIPOS DE LABORATORIO PARA CONTROL DE PROCESOS

Dentro del mercado existe una gran variedad de equipos de laboratorio para universidades y centros de investigación por lo cual, lo que se realizará durante el presente proyecto es investigar a cerca de las diferentes alternativas para generar la mejor solución para que los estudiantes dispongan de equipos con estándares internacionales y con tecnología de punta.

El objetivo del laboratorio de control de procesos y en general todo laboratorio es simular un proceso industrial real, razón por la que esta es una de las principales metas del trabajo a desarrollarse, obtener un sistema de entrenamiento que sea lo más cercano a la realidad.

A continuación se presenta en la Figura 22 un típico equipo de laboratorio de control de procesos:



Figura 22. Equipo de laboratorio de control de procesos

Fuente: (EDIBON, 2014)

Donde se distingue las siguientes partes principales:

- Estructura mecánica
- Instrumentación electrónica
- Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

## **2.7 DISEÑO DE ESTRUCTURAS MECÁNICAS**

### **2.7.1 Estructuras**

Conjunto de elementos resistentes, capaz de mantener sus formas y cualidades a lo largo del tiempo, bajo la acción de las cargas y agentes exteriores a los que se encuentre sometido. La estructura (Figura 23) soporta las cargas exteriores (acciones y reacciones), las cuales reparten su efecto por los diferentes elementos estructurales que resultan sometidos a diferentes esfuerzos, los cuales inducen un estado tensional, que es absorbido por el material que la constituye. Las estructuras son de diferentes tipos:

- Elementos lineales sencillos (vigas y pilares)
- Estructuras de barras
- Estructuras laminares
- Continuos tridimensionales

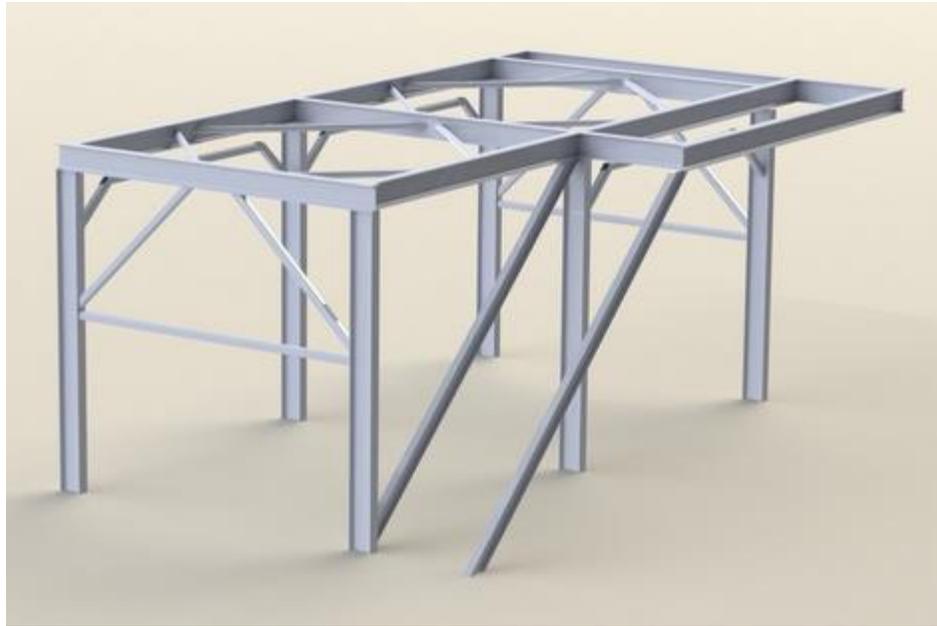


Figura 23. **Estructura metálica**

Fuente: (Navarro & Pérez, 2008)

Los objetos que deben resistir cargas son entre otras construcciones, maquinas, recipientes, camiones, aviones, barcos y cosas parecidas. Por simplicidad a estos objetos se los llamara estructuras; así, una estructura es cualquier objeto que debe soportar o transmitir cargas

Soportar la carga no es suficiente, la estructura debe ser estable frente a la acción de su propio peso y de las cargas externas. Para que esto sea posible se debe estudiar el proceso de transmisión de las fuerzas en la estructura.

Por lo tanto, una estructura trabaja a tres niveles consecutivos:

- Recepción de cargas.
- Flujo de cargas.
- Transmisión de cargas.

El objetivo final de un diseño mecánico es obtener un producto útil que satisfaga las necesidades de un cliente y además sea seguro, eficiente, confiable, económico y de manufactura práctica.

El diseño mecánico es el proceso de diseño o selección de componentes mecánicos para conjuntarlos y lograr una función deseada. Naturalmente, los elementos de máquinas deben ser compatibles, acoplarse bien entre sí y funcionar en forma segura y eficiente. El diseñador no solo debe considerar el desempeño del elemento diseñado, sino también los elementos con que debe interactuar.

### **2.7.2 Diseño Estructural**

La tendencia actual es la reducción del tiempo y costo de desarrollo de productos, con mayor calidad y durabilidad de productos en el diseño mecánico, el uso de software computacional para simular desempeño y así poder hacer mejoras a los diseños de productos o bien apoyar a la resolución de problemas de ingeniería para una amplia gama de industrias. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de manufactura.

La base estructural del módulo será el soporte de las dos plantas así como de toda la circuitería por lo que para determinar las fuerzas críticas es necesario analizarla como una armadura simple esto también se debe a su forma geométrica.

### **2.7.3 Armaduras**

Una armadura es una construcción reticulada conformada generalmente por triángulos formados por elementos rectos y que se utiliza para soportar cargas. Las armaduras pueden ser planas o espaciales. Ver Figura 24.

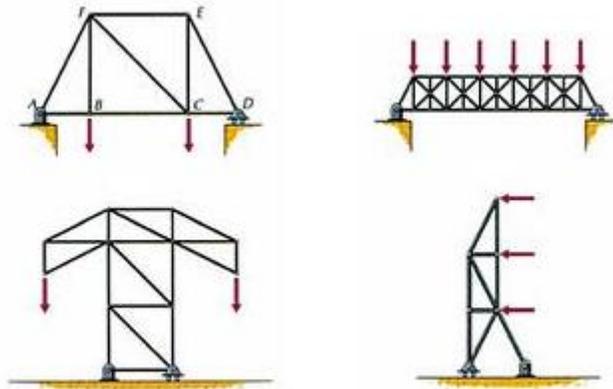


Figura 24. **Ejemplos de armaduras usadas para cálculo estructural**

Fuente: (Vega, 2012)

Para el diseño de elementos y las conexiones de una armadura se debe primero determinar la fuerza desarrollada en cada elemento cuando la armadura está sometida a una carga dada, se deben asumir ciertos parámetros, frecuentemente son los siguientes:

- Todas las cargas se aplican en los nodos
- Los elementos están unidos entre sí mediante pasadores fijos:

#### 2.7.4 Método de Elementos Finitos

El método de Análisis por Elementos Finitos (FEA), introducido por Jon Turner (1956) para Boeing.

Es un método numérico que sirve para generar soluciones aproximadas a una variedad de problemas de la ingeniería reales gobernados por ecuaciones diferenciales que tienen dominios complejos y sujetos a condiciones de contorno.

FEA ha llegado a ser un paso esencial en el diseño y modelamiento en varias disciplinas de Ingeniería. Figura 25.

La base del FEA se establece en la descomposición del dominio en un número finito de subdominios (elementos) para los cuales se crea un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas por medio de aplicar las siguientes aproximaciones principales para construir una solución basada en el concepto de FEA:

- Aproximación directa: Esta estrategia se utiliza para los problemas relativamente simples, y sirve generalmente como medio para explicar el concepto de FEA y sus pasos importantes
- Residuos ponderados: Este es un método versátil, permitiendo el uso de FEA a los problemas cuyo funcional (energía potencial) no puede ser construido. Esta aproximación utiliza directamente las ecuaciones diferenciales de gobierno, tales como las de transferencia de calor, de mecánica de fluidos y torsión
- Aproximación variacional: Este acercamiento confía en el cálculo de variaciones, que implica el extremizar un funcional. Este funcional corresponde a la energía potencial en la mecánica estructural

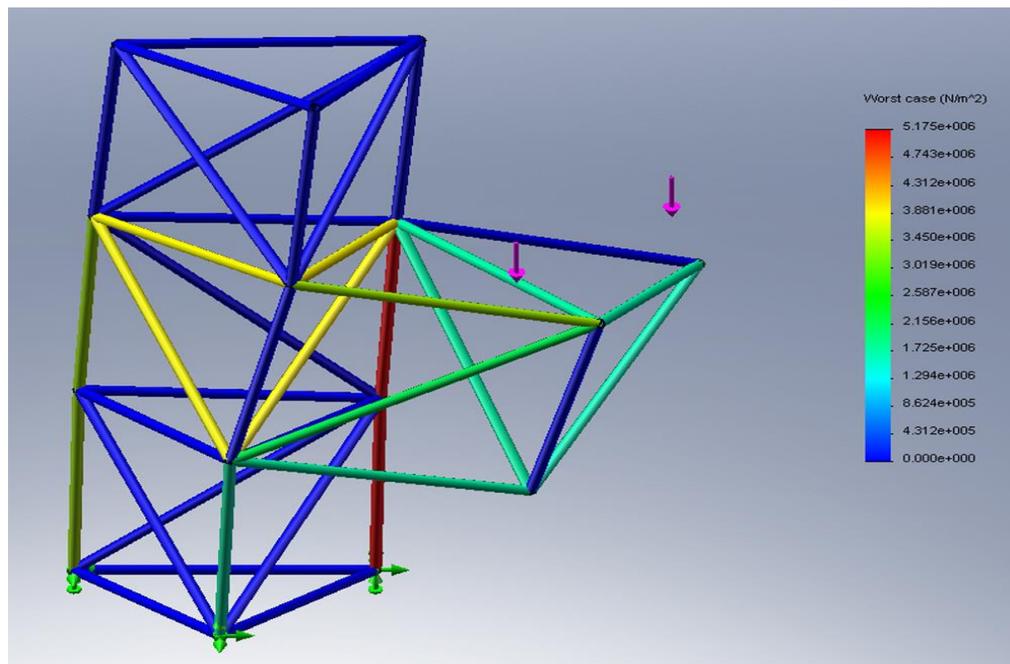


Figura 25. **Análisis Estructural mediante elementos finitos**

Fuente: (SIEMENS, 2015)

Uno de los problemas típicos solucionados mediante el uso del método de elementos finitos es el diseño de estructuras, por lo que se usará un software especializado para el diseño y comprobación de la estructura requerida para el correcto dimensionamiento y selección de materiales para la construcción del módulo en análisis,

de la simulación realizada se podrá conocer los puntos críticos en la estructura y los esfuerzos a las que se encuentra sometida.

### **Beneficios del uso de paquetes computacionales para el diseño de estructuras (Ingeniería asistida por computador - CAE)**

- Las decisiones sobre el diseño se toman con base en el impacto del desempeño de la estructura.
- Los diseños pueden evaluarse y refinarse utilizando simulaciones computarizadas en lugar de hacer pruebas a prototipos físicos, ahorrando tiempo y dinero.
- Aplicaciones CAE brindan conocimientos sobre el desempeño más temprano en el proceso de desarrollo, cuando los cambios al diseño son menos costosos de hacer.
- Aplicaciones CAE apoyan a los equipos de ingeniería a administrar riesgos y comprender las implicaciones en el desempeño de sus diseños.
- Los datos integrados y la gestión del proceso del CAE amplían la capacidad de balancear con eficacia los conocimientos del funcionamiento mientras se mejoran los diseños para una comunidad más amplia.
- La exposición de garantía es reducida al identificar y eliminar problemas potenciales. Cuando integrado al producto y desarrollo de la manufactura, CAE puede facilitar desde etapas tempranas la resolución de problemas, lo que puede reducir dramáticamente los costos asociados al ciclo de vida de la estructura.

Para obtener un producto confiable se realizará un análisis de las diferentes fuerzas que va a soportar la estructura, así como los esfuerzos y deformaciones máximos que puede soportar la estructura en un diseño estático. Gracias al uso de un software de diseño paramétrico y computacional se puede predecir el comportamiento del prototipo sin la necesidad de incurrir en gastos innecesarios de fabricación, anticipando el comportamiento según el diseño y material utilizado.

### 2.7.5 Análisis de Material

El tipo de material usado en la estructura define la resistencia, la flexibilidad, la durabilidad y muchas otras características de la estructura. Entre los materiales más comunes están el hormigón, acero, madera, piedra, unidades de arcilla cocida, plástico, etc. Como se mencionaba al principio en la definición de estructura, el avance en el conocimiento de las propiedades de los materiales nos permite que nuestro análisis se acerque más a la realidad (Duque, 2006).

Es el deber de todo ingeniero seleccionar adecuadamente los materiales para lograr que la estructura sea segura, económica y factible. Hay que tener en cuenta que el seleccionar presupone un buen conocimiento de las propiedades mecánicas del material elegido.

Se debe conocer el comportamiento mecánico de los materiales que componen los elementos de una estructura. Entre sus características mecánicas interesan, para el cálculo estructural, su comportamiento tensional, es decir sus relaciones Tensión-Deformación, y sus límites elástico y de rotura. Estos parámetros se determinan mediante ensayos y por las especificaciones de las diferentes Normas.

Se puede establecer una clasificación de los principales materiales utilizados en ingeniería, los cuales se muestra en la Figura 26:

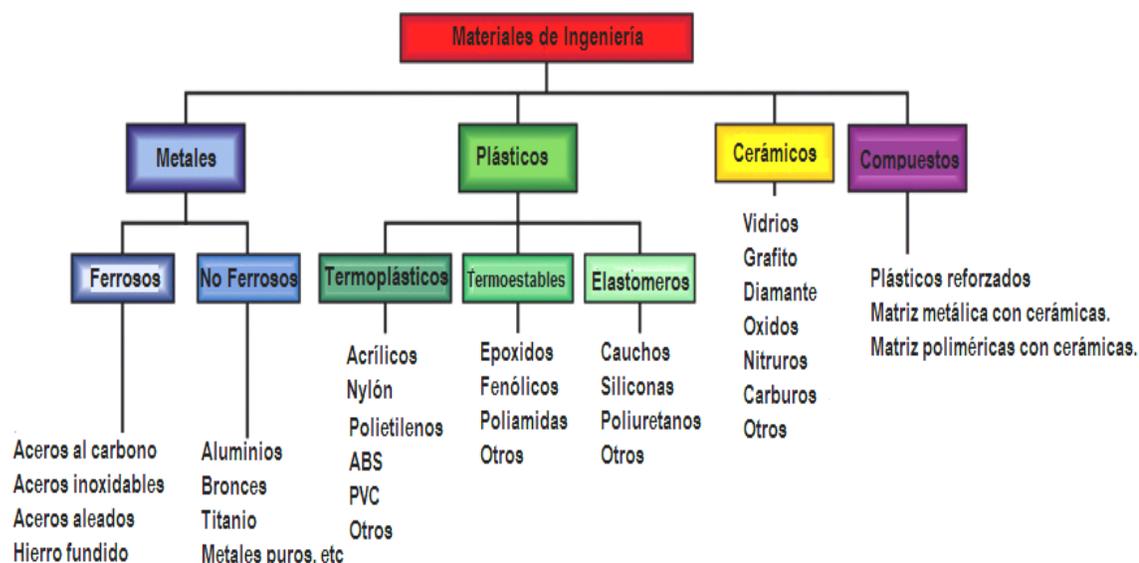


Figura 26. **Materiales de Ingeniería**

Fuente: (Smith, 2010)

Muchos materiales, cuando prestan servicio, están sometidos a fuerzas o cargas, ejemplos de ello son los revestimientos refractarios de los hornos, las aleaciones de aluminio con las cuales se construyen las alas de los aviones, el acero de los ejes de los automóviles o las vigas y pilares de los edificios. En tales situaciones es necesario conocer las características del material y diseñar la pieza de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material reflejan la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (o sea, su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

La respuesta de los materiales a las fuerzas aplicadas depende de

- Tipo de enlace.
- Disposición estructural de los átomos o moléculas.
- Tipo y número de imperfecciones, (que están siempre presentes en los sólidos, excepto en raras circunstancias).

Así, fijada la sollicitación exterior es evidente que la deformación que se origina y, en consecuencia, la tensión creada en el sólido elástico dependen de las fuerzas de atracción molecular, es decir, de la estructura cristalina del material. A pesar de la considerable complejidad de los materiales ingenieriles todos los materiales sometidos a cargas se pueden clasificar en tres grupos principales de acuerdo con el mecanismo que ocurre durante su deformación bajo las fuerzas aplicadas

- Materiales Elásticos (cristales iónicos y covalentes).
- Materiales Elastoplásticos (metales estructurales).
- Materiales Viscoelásticos (plásticos, los vidrios).

### **2.7.6 Materiales metálicos**

Dentro de los materiales más utilizados para la construcción de estructuras están los metales (Figura 27), los cuáles poseen una gran respuesta en cuanto a fuerza y rigidez de enlace, sus propiedades principales se detallan a continuación:

- Son sustancias inorgánicas que están compuestas de uno o más elementos metálicos, pudiendo contener también algunos elementos no metálicos.

- Enlace metálico.
- Se dividen normalmente en dos clases metales férricos (aceros y fundiciones) y metales no férricos ( Al, Cu, Zn, Ti y Ni ).
- Estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada.
- Son buenos conductores eléctricos y térmicos. Muchos son relativamente resistentes y dúctiles a temperatura ambiente y otros mantienen alta resistencia, incluso, a elevadas temperaturas.
- Aplicaciones en Construcciones, Minería, transporte, equipos pesados, recipientes a presión, etc.

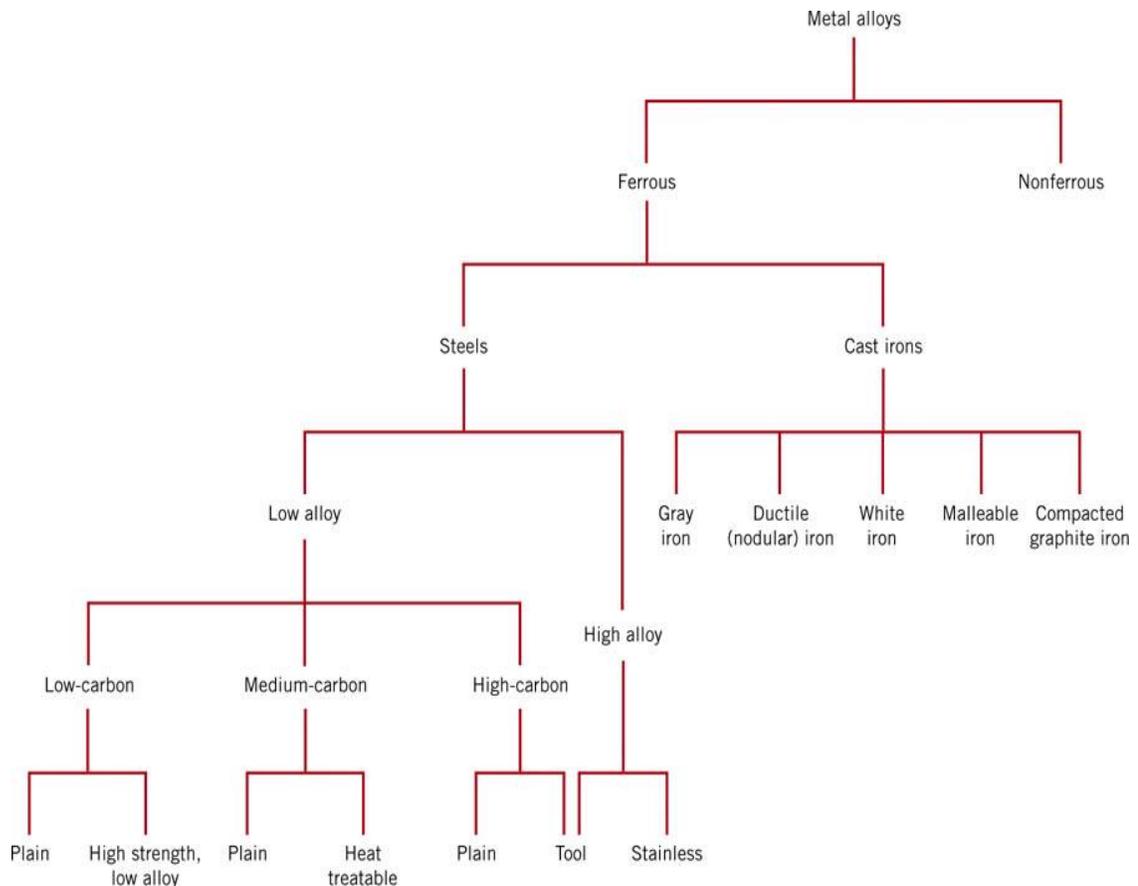


Figura 27. Clasificación de aleaciones metálicas

Fuente: (Smith, 2010)

## 2.8 ANÁLISIS TÉRMICO

Bajo la denominación de Análisis Térmico se engloban un conjunto de técnicas analíticas que estudian el comportamiento térmico de los materiales. Estudios del efecto tensional y deformacional que los fenómenos de transferencia de calor, radiación, tienen en las estructuras. Cuando un material se calienta o se enfría, su estructura cristalina y su composición química pueden sufrir cambios más o menos importantes:

- Fusión: paso del estado sólido al estado líquido
- Sublimación: paso del estado sólido al estado gaseoso
- Solidificación: paso del estado líquido al estado sólido
- Cristalización: paso al estado sólido ordenado
- Amorfización: paso al estado sólido desordenado
- Transición: cambio en su estructura cristalina
- Reacciones: de oxidación, alteración, descomposición, etc.
- Expansión y compresiones en su volumen
- Cambios texturales: sinterización, recristalización, etc.

La mayor parte de estos cambios se pueden estudiar midiendo la variación de distintas propiedades de la materia en función de la temperatura.

Así, bajo la denominación de Análisis Térmico se agrupan una serie de técnicas en las cuales se sigue una propiedad de la muestra, en una determinada atmósfera, en función del tiempo o de la temperatura cuando dicha muestra se somete a un programa de temperatura controlado. Éste puede consistir en calentar o enfriar a una determinada velocidad, o mantener la temperatura constante, o una combinación de ambas.

Entre las técnicas de Análisis Térmico más comunes destacan:

- Termogravimetría (TG)
- Análisis Térmico Diferencial (ATD)
- Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC, del inglés *Diferencial Scanning Calorimetry*)
- Análisis Termomecánico (ATM)
- Análisis Dinamomecánico (ADM)
- Termodiffractometría (TDX)

Ya que en el apartado anterior se profundizó a cerca de materiales metálicos, en este caso también se particularizara el efecto de la temperatura en las aleaciones metálicas.

### 2.8.1 Diagrama Hierro-Carbono

En el diagrama de equilibrio o de fases hierro-carbono (Fe-C) de la Figura 28, se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse. Dicho diagrama se obtiene experimentalmente identificando los puntos críticos temperaturas a las que se producen las sucesivas transformaciones por métodos diversos.

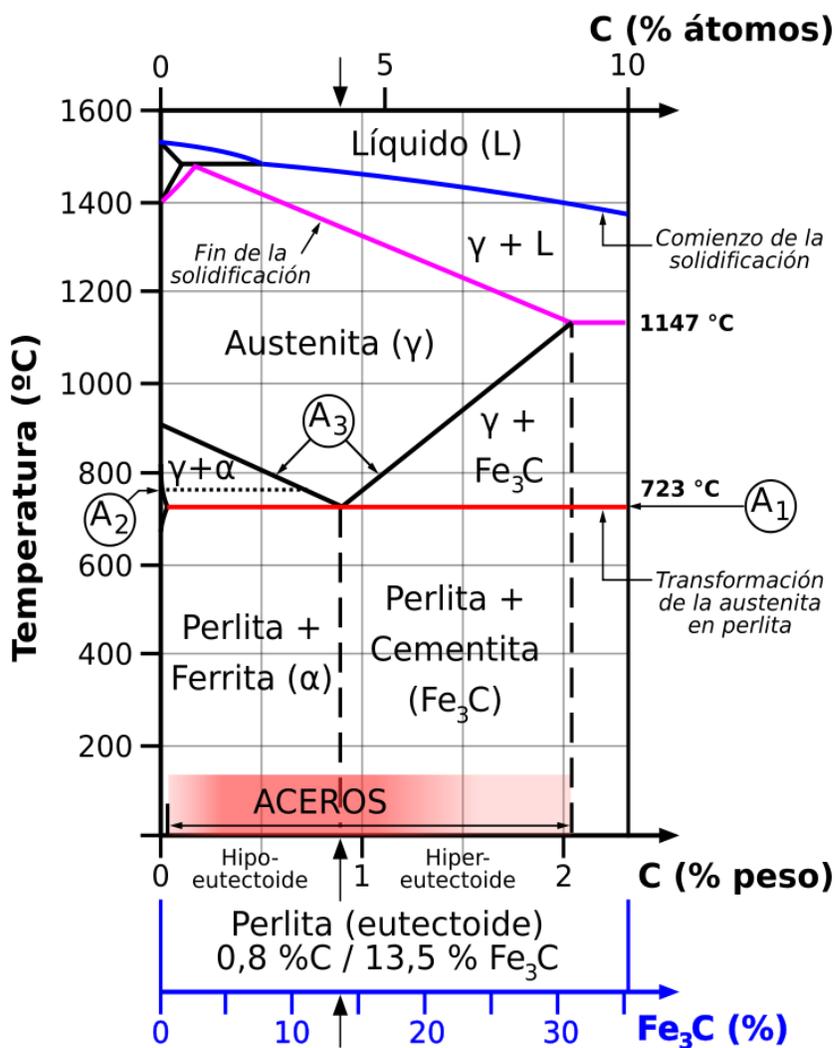


Figura 28. Diagrama Hierro-Carbono

Fuente: (Saiz, 2012)

Las propiedades mecánicas del acero no son las mismas a 20 °C (temperatura que se suele considerar de referencia para el diseño de estructuras de acero), que las que pueda tener a 200 °C, 400 °C ó a 1000 °C. De hecho, y según ensayos realizados en base a la Norma NFPA 251 el acero estructural colapsa al alcanzar los 538 °C (Figura 29). Así, y según la curva de la figura siguiente, en un incendio tipo esta temperatura se alcanzaría aproximadamente a los 5 minutos de originarse.

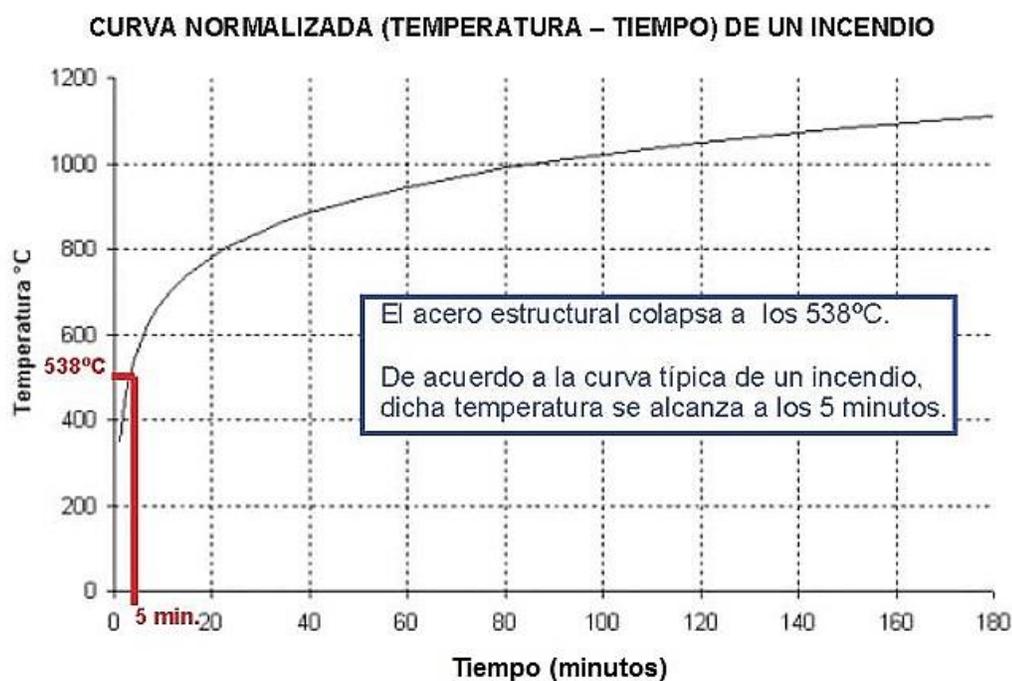


Figura 29. **Temperatura de colapso del acero estructural**

Fuente: (INGEMECANICA, 2009)

Antes de producirse el fallo estructural, las propiedades mecánicas del acero van variando gradualmente conforme se va produciendo el aumento de la temperatura.

## 2.9 INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

La instrumentación electrónica se encarga de la captación y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales se realiza el monitoreo, medida y control de procesos, empleando para ello tecnologías y dispositivos electrónicos. Ver Figura 30.

La instrumentación trata los sistemas integrados cuya finalidad es medir magnitudes físicas de un sistema externo, elaborar la información asociada a ellas y presentarla a un operador. Las características por las que la tecnología electrónica es la más utilizada por los sistemas de instrumentación, son:

- Las señales eléctricas permiten manejar señales en un rango dinámico de tiempos muy amplio, desde los picosegundos hasta horas.
- Las señales eléctricas pueden ser transmitidas muy fácilmente a través de cables metálicos, sistemas radiados, o fibra óptica.
- Las señales eléctricas pueden ser amplificadas por circuitos electrónicos de forma muy eficientes, y pueden manejarse rangos de señal muy amplios, desde los nano-voltios hasta los kilovoltios.
- Los sistemas electrónicos permiten complejas transformaciones funcionales de las señales eléctricas.
- Las señales eléctricas son las más apropiadas para ser introducidas en los computadores, los cuales representan el medio más potente de registro, transformación y presentación de la información.
- La tecnología electrónica actual es la que presenta mejor relación prestaciones /costo.

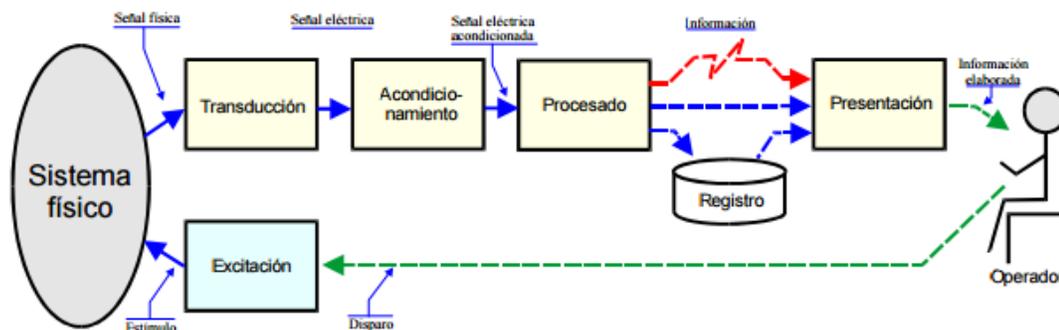


Figura 30. Esquema básico de un sistema de instrumentación

Fuente: (Villalobos, 2010)

### 2.9.1 Clasificación de los instrumentos electrónicos

- ***Instrumentos de medida y visualización.*** Son sistemas electrónicos que realizan la evaluación de uno o varios parámetros de una señal eléctrica y los presentan de forma gráfica, numérica o alfanumérica. La representación se realiza en la unidad de medida adecuada al parámetro a medir y de acuerdo con el sistema de unidades de medida adoptado. Ejemplo: el osciloscopio.
- ***Instrumentos generadores de señal.*** Son sistemas electrónicos que tienen como misión generar señales eléctricas de características determinadas. Ejemplo: el generador de señales.
- ***Instrumentos convertidores de señal.*** Son dispositivos o circuitos electrónicos que convierten una señal eléctrica o no eléctrica, en otra señal eléctrica de características y rango determinados, en uno de cuyos parámetros está contenida toda la información correspondiente a la primera. Ejemplos: los sensores y los transductores.

Estos sensores pueden ser:

- ***Resistivos:*** estos sensores convierten la variación de la magnitud que se pretende medir en una variación de resistencia eléctrica. Son muy utilizados para medir temperatura.
- ***Pasivos:*** estos sensores necesitan una contribución de energía externa.
- ***Capacitivos:*** estos sensores convierten la variación de la magnitud que se pretende medir en una variación que alcance la capacidad de un condensador.

- **Activos:** estos sensores también conocidos como sensores generadores, generan su propia energía. Es muy usado para medir concentraciones.
- **Inductivos:** se encargan de convertir la variación de una magnitud que se pretende medir en una variación de la inductancia de una bobina. De vez en cuando se utiliza para medir desplazamiento.

Generalmente la señal de salida de un sensor necesita una amplificación, ya que esta suele producir errores en su procesado. Con esta amplificación se puede adaptar los niveles de la señal de salida al resto de los circuitos.

La señal de salida también suele no ser lineal o suele depender de las condiciones de funcionamiento, lo que le hace no ser válida para su procesado. Es por ello que se debe linealizar el sensor y compensar sus variaciones, ya sea por medio de software o de hardware. Ocurren casos en que la señal de salida no está en su nivel de tensión originando los mismos percances antes citados. En este caso se necesita filtros, demoduladores o convertidores corriente-tensión, para nivelar su tensión. Para que la señal de salida tenga un procesado satisfactorio se debe de convertir la señal en digital. La instrumentación estudia y trabaja con la conversión digital-analógica y con la conversión analógica digital.

## **2.10 MOTORES ELÉCTRICOS**

Un motor eléctrico es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica mediante interacciones electromagnéticas. Algunos motores eléctricos son reversibles, pueden transformar energía mecánica en eléctrica funcionando como generadores.

Pueden funcionar conectados a una red de suministro eléctrico o a baterías.

Existen varios tipos de motores y continuará proliferando nuevos tipos de motores según avance la tecnología.

### 2.10.1 Elementos que componen a los motores.

1. La carcasa o caja que envuelve las partes eléctricas del motor, es la parte externa.
2. El inductor, llamado estator cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado estatístico, que es una parte fija y unida a la carcasa.
3. El inducido, llamado rotor cuando se trata de motores de corriente alterna, consta de un apilado de chapas magnéticas y sobre ellas está enrollado el bobinado rotórico, que constituye la parte móvil del motor y resulta ser la salida o eje del motor.

### 2.10.2 Clasificación de motores:

- a) **Motores de corriente alterna**, se usan mucho en la industria, sobretodo, el motor trifásico asíncrono de jaula de ardilla.

Se puede clasificarlos de varias maneras, por su velocidad de giro, por el tipo de rotor y por el número de fases de alimentación.

#### *Por su velocidad de giro.*

- Asíncronos. Un motor se considera asíncrono cuando la velocidad del campo magnético generado por el estator supera a la velocidad de giro del rotor
- Síncronos. Un motor se considera síncrono cuando la velocidad del campo magnético del estator es igual a la velocidad de giro del rotor. Recordar que el rotor es la parte móvil del motor. Dentro de los motores síncronos, se encuentra con una sub-clasificación:
  - Motores síncronos trifásicos
  - Motores asíncronos sincronizados
  - Motores con un rotor de imán permanente

#### *Por el tipo de rotor.*

- Motores de anillos rozantes
- Motores con colector

- Motores de jaula de ardilla

*Por su número de fases de alimentación.*

- Motores monofásicos.
- Motores bifásicos.
- Motores trifásicos.
- Motores con arranque auxiliar bobinado.
- Motores con arranque auxiliar bobinado y con condensador.

b) **Motores de corriente continua**, suelen utilizarse cuando se necesita precisión en la velocidad, montacargas, locomoción, etc.

La clasificación de este tipo de motores se realiza en función de los bobinados del inductor y del inducido:

- Motores de excitación en serie
- Motores de excitación en paralelo
- Motores de excitación compuesta

### **2.10.3 Motor eléctrico de corriente continúa**

Los motores de corriente continua (Figura 31) tienen varias particularidades que los hacen muy diferentes a los de corriente alterna. Una de las particularidades principales es que pueden funcionar a la inversa, es decir, no solamente pueden ser usados para transformar la energía eléctrica en energía mecánica, sino que también pueden funcionar como generadores de energía eléctrica. Esto sucede porque tienen la misma constitución física, de este modo, se tiene que un motor eléctrico de corriente continua puede funcionar como un generador y como un motor.



Figura 31. **Motor eléctrico D.C.**

Fuente: (Mendiburu, 2004)

Los motores de corriente continua tienen un par de arranque alto, en comparación con los de corriente alterna, también se puede controlar con mucha facilidad la velocidad. Por estos motivos, son ideales para funciones que requieran un control de velocidad. Son usados para tranvías, trenes, coches eléctricos, ascensores, cadenas productivas, y todas aquellas actividades donde el control de las funcionalidades del motor se hace esencial.

#### **2.10.4 Servomotor**

Los servos son un tipo especial de motor de c.c. que se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación. Para ello, el servomotor espera un tren de pulsos que se corresponde con el movimiento a realizar. Están generalmente formados por un amplificador, un motor, un sistema reductor formado por ruedas dentadas y un circuito de realimentación, todo en una misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de  $180^\circ$  aproximadamente. Ver Figura 32.



Figura 32. **Servomotor**

Fuente: (Villalobos, 2010)

Los Servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños, tiene internamente una circuiteria de control interna y es sumamente poderoso para su tamaño. Un servo normal o Standard como el HS-300 de Hitec tiene 42 onzas por pulgada o mejor 3kg por cm. De torque que es bastante fuerte para su tamaño. También potencia proporcional para cargas mecánicas. Un servo, por consiguiente, no consume mucha energía. Se muestra la composición interna de un servo motor en el cuadro de abajo. Podrá observar la circuiteria de control, el motor, un juego de piñones, y la caja. También puede ver los 3 alambres de conexión externa. Uno es para alimentación Vcc (+5volts), conexión a tierra GND y el alambre blanco es el alambre de control.

El sistema de control de un servo se limita a indicar en qué posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que dejarían al motor en ambos extremos ( $0^\circ$  y  $180^\circ$ ). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra ( $90^\circ$ ), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de  $180^\circ$ . Si se sobrepasan

los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

## 2.11 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

Un Controlador Lógico Programable (PLC) es un dispositivo de estado sólido, diseñado para controlar procesos secuenciales (una etapa después de la otra) que se ejecutan en un ambiente industrial. Es decir, que van asociados a la maquinaria que desarrolla procesos de producción y controlan su trabajo.

El PLC nació como solución al control de circuitos complejos de automatización. Por lo tanto se puede decir que un PLC no es más que un aparato electrónico que sustituye los circuitos auxiliares o de mando de los sistemas automáticos. A él se conectan los captadores (finales de carrera, pulsadores, etc.) por una parte, y los actuadores (bobinas de contactores, lámparas, pequeños receptores, etc.) Figura 33.



Figura 33. PLC's de la familia Allen-Bradley

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

Un controlador lógico programable es un dispositivo operado digitalmente, que usa una memoria para el almacenamiento interno de instrucciones con el fin de implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de

tiempos, conteo y operaciones aritméticas, para controlar a través de entradas/salidas digitales o analógicas, varios tipos de máquinas o procesos.

Los PLC's operan de manera secuencial y cíclica, es decir, una vez finalizado el recorrido completo de un programa, comienza a ejecutar su primera instrucción.

Los elementos que contiene un PLC son:

- Unidad Central de proceso
- Módulos de entrada
- Módulos de salida
- Fuente de alimentación
- Dispositivos periféricos
- Interfaces

Un PLC realiza, entre otras, las siguientes funciones:

- Recoger datos de las fuentes de entrada a través de las fuentes digitales y analógicas
- Tomar decisiones en base a criterios pre-programados
- Almacenar datos en la memoria
- Generar ciclos de tiempo
- Realizar cálculos matemáticos
- Actuar sobre los dispositivos externos mediante las salidas analógicas y digitales
- Comunicarse con otros sistemas externos

Los PLC se distinguen de otros controladores automáticos, en que pueden ser programados para controlar cualquier tipo de máquina, a diferencia de otros controladores (como por ejemplo un programador o control de la llama de una caldera) que, solamente, pueden controlar un tipo específico de aparato.

Además de poder ser programados, son automáticos, es decir son aparatos que comparan las señales emitidas por la máquina controlada y toman decisiones en base a las instrucciones programadas, para mantener estable la operación de dicha máquina.

Puedes modificar las instrucciones almacenadas en memoria, además de monitorizarlas.

### **2.11.1 Características generales PLC**

Los P.L.C. se encuentran en la gran mayoría de las máquinas de proceso que se fabrican actualmente y, a veces disfrazados de tablillas electrónicas de control, pero siempre reduciendo en gran medida la mano de obra que requerían todos los tableros de control alambrados que hasta hace unos años eran omnipresentes en la industria y, en gran medida su gran difusión los ha abaratado tanto que aún en las operaciones más sencillas, el P.L.C. toma el lugar de temporizadores y contadores.

Al alambrear un PLC se debe tener cuidado en emplear los cables con código de colores para evitar en lo posible cualquier error que pudiera ser muy costoso.

Las compañías fabricantes de máquinas usan el siguiente código de colores para los cables:

- AZUL para circuitos de control en corriente directa. (C.D.)
- ROJO para control en corriente alterna. (C.A.)
- VIOLETA y/o GRIS para entradas/salidas del PLC.
- NEGRO en circuitos de fuerza
- BLANCO en cables puestos a tierra en (C.A.) (neutro) y el VERDE/AMARILLO o solamente VERDE para la conexión a tierra.

### **2.12 INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)**

HMI significa Interfaz Hombre-Máquina (Human Machine Interface), es decir es el dispositivo o sistema que permite el interfaz entre la persona y la máquina. (Figura 34). Tradicionalmente estos sistemas consistían en paneles compuestos por indicadores y

comandos, tales como luces pilotos, indicadores digitales y análogos, registradores, pulsadores, selectores y otros que se interconectaban con la máquina o proceso. En la actualidad, dado que las máquinas y procesos en general están implementadas con controladores y otros dispositivos electrónicos que dejan disponibles puertas de comunicación, es posible contar con sistemas de HMI bastante poderosos y eficaces, además de permitir una conexión más sencilla y económica con el proceso o máquinas.

### 2.12.1 Tipos de HMI

- Terminal de Operador, consistente en un dispositivo, generalmente construido para ser instalado en ambientes agresivos, donde pueden ser solamente de despliegues numéricos, o alfanuméricos o gráficos. Pueden ser además con pantalla sensible al tacto (touch screen).
- PC + Software, esto constituye otra alternativa basada en un PC en donde se carga un software apropiado para la aplicación. Como PC se puede utilizar cualquiera según lo exija el proyecto, en donde existen los llamados Industriales (para ambientes agresivos), los de panel (Panel PC) que se instalan en gabinetes dando una apariencia de terminal de operador, y en general se observa muchas formas de hacer un PC, pasando por el tradicional PC de escritorio. Respecto a los softwares a instalar en el PC de modo de cumplir la función de HMI se detalla a continuación.



Figura 34. Tipos de HMI

Fuente: (Palacios, 2008)

### **2.12.2 Software HMI**

Estos softwares permiten entre otras cosas las siguientes funciones: Interfase gráfica de modo de poder ver el proceso e interactuar con él, registro en tiempo real e histórico de datos, manejo de alarmas. Si bien es cierto sólo con la primera función enunciada es la propiamente HMI, casi todos los proveedores incluyen las otras dos ya sea en el mismo paquete o bien como opcionales. También es normal que dispongan de muchas más herramientas.

Al igual que en los terminales de operador, se requiere de una herramienta de diseño o desarrollo, la cual se usa para configurar la aplicación deseada, y luego debe quedar corriendo en el PC un software de ejecución (Run Time).

Por otro lado, este software puede comunicarse directamente con los dispositivos externos (proceso) o bien hacerlo a través de un software especializado en la comunicación, cual es la tendencia actual.

### **2.12.3 Comunicación**

La comunicación con los dispositivos de las máquinas o proceso se realiza mediante comunicación de datos empleando las puertas disponibles para ello, tanto en los dispositivos como en los PCs.

Actualmente para la comunicación se usa un software denominado servidor de comunicaciones, el que se encarga de establecer el enlace entre los dispositivos y el software de aplicación (HMI u otros) los cuales son sus clientes. La técnica estandarizada en estos momentos para esto se llama OPC (Ole for Process Control), por lo que se cuenta entonces con Servidores y Clientes OPC, sin embargo aún quedan algunas instalaciones donde se usaba DDE para este propósito, como también muchos softwares de aplicación sólo son clientes DDE por lo que lo usual es que los servidores sean OPC y DDE.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO MECATRÓNICO

La UNESCO define a la Mecatrónica como la integración sinérgica de la ingeniería mecánica con la electrónica y el control inteligente por computadora en el diseño y manufactura de productos y procesos.

En la Figura 35 se muestra los diferentes aspectos que intervienen en el diseño mecatrónico de un producto.

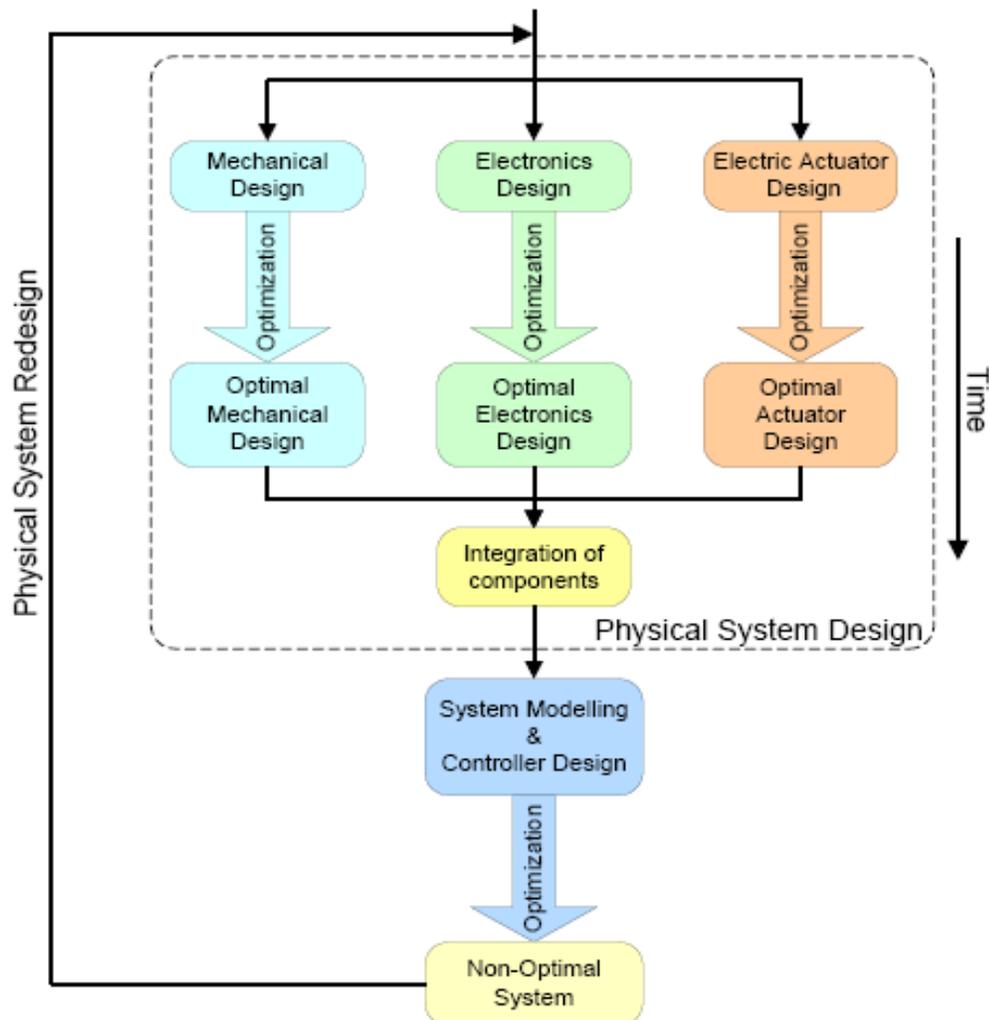


Figura 35. **Proceso de Diseño Mecatrónico**

Fuente: (Avila, 2013)

De esta forma el presente capítulo se estructura de la siguiente manera:

1. Diseño Mecánico
2. Diseño Eléctrico-Electrónico
3. Diseño del Sistema de Control

### **3.1 DISEÑO MECÁNICO**

En el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, existen módulos de aprendizaje que simulan plantas industriales, de velocidad y temperatura, que son muy comunes en el ambiente laboral en el que se desenvuelven los ingenieros de las ramas de electrónica de control y de mecatrónica, el conocimiento de técnicas de control para dichos sistemas es de vital importancia en ambas carreras.

Al momento existen módulos que por el paso del tiempo han quedado obsoletos y en muchos casos inservibles, lo que ha obligado a los estudiantes a simular las prácticas y en otros casos a evitar realizarlas.

Uno de los problemas principales de los módulos son el gran tamaño y peso que tienen cada uno de ellos, lo que les hace imposible de que sean portátiles y que puedan moverse entre los diferentes laboratorios que se necesita.

Para definir las limitaciones en el diseño se plantea los siguientes puntos fundamentales en el diseño:

- Considerablemente más livianos que sus predecesores.
- Portátiles.
- Estructura que pueda alojar a ambos módulos.
- Fácil montaje y desmontaje de las plantas.
- Acceso a conexiones principales.

#### **3.1.1 Diseño conceptual**

Después de definir las variables que influyen de forma relevante en el diseño de la estructura mecánica de los módulos de aprendizaje se debe realizar un análisis de todos los objetivos que tiene que cumplir, en este caso son los siguientes:

- ***Rigidez***

En el caso en cuestión la rigidez de los módulos de aprendizaje junto con la estructura deben ser de un material que les permita mantener su rigidez y así evitar que se comprometan otras partes de la estructura o componentes electrónicos montados en dichos módulos.

- ***Peso***

El objetivo principal del diseño es evitar que los módulos generen un peso excesivo en toda la estructura, y por consiguiente limitar la movilidad de los mismos.

- ***Durabilidad***

La estructura completa va a ser utilizada por estudiantes y maestros de la universidad, lo que a largo plazo produciría un desgaste considerable en todas las piezas mecánicas que son manipuladas diariamente.

- ***Portabilidad***

Los requerimientos de diseño indican que los módulos deben ser portátiles de fácil intercambio, lo que influye directamente en la selección que se debe hacer de materiales y estructuración de los componentes en los mismos.

Se toma en cuenta la movilidad del diseño y la facilidad en que la estructura puede cambiar de posición.

- ***Costo***

Para permitir que se repliquen los módulos que sean necesarios es fundamental que el costo no sea elevado para la producción de cada uno, por lo que se debe tomar en cuenta los materiales que cumplan con los objetivos anteriores y como valor agregado que no sean costosos.

En este objetivo también se toma en cuenta diferentes trabajos que se deberán hacer para el acople de las estructuras en el laboratorio a utilizar.

Después de conocer las necesidades que se tiene en cuanto a diseño, se opta por proponer alternativas para el diseño de la estructura, se utilizó como patrón para las ideas, modelos ya predefinidos de sistemas que cumplen funciones similares a las que van a cumplir los módulos.

### 3.1.2 Alternativas de diseño

La primera alternativa (Figura 36) es un modelo estático que se puede montar en la pared, hecho en estructura metálica y que tendrá soportes para los módulos, la ventaja de dicho sistema es el espacio que se puede obtener en la parte inferior de la estructura, para debajo del mismo poner otro tipo de estructuras como motores externos o una mesa para el computador.

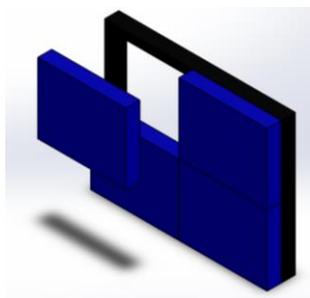


Figura 36. **Alternativa 1**

Fuente: Autores

La segunda alternativa (Figura 37) es un modelo móvil que se apoya en el piso, y permite que la estructura se pueda colocar cerca de otros equipos, los módulos igualmente son desmontables, la disposición es vertical y no se ubican en dos filas como el sistema anterior, el intercambio de módulos es más fácil y permite el acceso para reparación de los mismos.

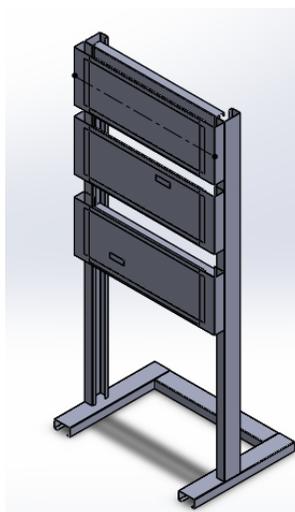


Figura 37. **Alternativa 2**

Fuente: Autores

### 3.1.3 Matriz de selección de soluciones

La Tabla 2 muestra la ponderación para la selección del diseño a desarrollar.

**Tabla 2.**

**Matriz de selección de soluciones**

	Rigidez	Peso	Durabilidad	Portabilidad	Costo	Total
<b>Alternativa 1</b>	9	6	6	5	6	32
<b>Alternativa 2</b>	7	6	8	9	8	38

Fuente: Autores

Para la selección de la alternativa se utilizó una matriz de decisión, en la que se plantearon los objetivos y se dio una calificación para cada una de las estructuras, en el caso en cuestión la estructura secundaria es más conveniente por su fácil movilidad y desmontaje, para el proceso de selección véase la tabla anterior.

### 3.1.4 Descripción de la alternativa seleccionada

La estructura es un diseño vertical en el que los módulos tienen un ancho determinado para desarrollar todos sus componentes entre los que están incluidos motores, ventiladores, riel para borneras y pantallas lcd.

Todos los módulos son intercambiables y móviles, hechos de un ancho cómodo para mover y transportar, en la parte posterior de los mismos se ubica una caja hecha del mismo material del módulo, y que se sujeta al mismo por medio de pernos o tornillos para poder desmontar cuando se necesite realizar mantenimiento de los componentes internos de los mismos.

La estructura metálica tiene una huella más ancha y larga que los perfiles de los que se debe fabricar, para tener mayor estabilidad evitando posibles caídas de los equipos, lo que también depende del material, que debe ser en lo posible metálico para cumplir con el parámetro de durabilidad.

### 3.1.5 Diseño de la estructura soporte

El diseño estructural abarca la determinación de un sistema de resistencia idóneo que cuando se vea sometido a las diversas cargas que puedan actuar sobre la construcción, mantenga las características de seguridad y funcionalidad.

La estructura de sujeción, es el lugar donde descansarán los módulos, y cables de conexión, como características principales, dicha estructura debe ser rígido, resistente, y estar aislado eléctricamente para evitar inconvenientes con el manejo del mismo, además debe ser transportable para que las practicas se hagan con comodidad y seguridad de los estudiantes y el maestro.

De acuerdo al Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 037:2009 dado por el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, donde se aplicará el Método de diseño ASD. Método de diseño por resistencia admisible (Allowable strength design).

El diseño además debe estar centrado en la comodidad de los estudiantes para realizar las tareas en el mismo, como esta estructura va a soportar a los módulos debe ser rígida además que debe tener las medidas correctas, para que ningún modulo sea inalcanzable por ningún estudiante por lo que se toma en consideración la estatura estándar en el Ecuador.

**Tabla 3.**

#### **Estatura promedio Ecuador**

<b>Estatura promedio en el Ecuador</b>	
<b>Hombres</b>	1.63 [m]
<b>Mujeres</b>	1.53 [m]
<b>Media</b>	1.58 [m]

Fuente: Autores

Según la Tabla 3, el promedio de las estaturas de hombres y mujeres es de 1,58 [m], lo que brinda una visión del tamaño aproximado de la estructura, en el caso en cuestión se decidió que dicho elemento no sea mayor a 1,60 m de altura, además limitando la altura, también se limita el peso de la estructura total. En el caso del el ancho del objeto por el hecho de ser transportable y para que los módulos no sean masivos y además

cómodos para el intercambio, por criterio de diseño de la estructura se acordó una media de 0.7 [m].

### **3.1.6 Selección de material**

Según las especificaciones que se tienen en cuenta con el diseño de la estructura, el material debe tener alta resistencia, es decir un módulo de Young elevado, mientras más alto sea dicha propiedad la estructura será más rígida y evitara la deformación, esto es ideal conociendo que la estructura va a estar sometida a desgaste por el cambio de módulos, o al propio movimiento que hace a esta estructura transportable.

En caso de replicar la estructura, los materiales a utilizar deben ser de bajo costo y fáciles de comprar en el mercado ecuatoriano, por lo que el segundo parámetro de selección de material será el costo, en unidades monetarias por kilogramo de material.

Para la elección del material es necesario un software de diseño y selección de materiales, en este proyecto se utilizó un software conocido y utilizado en diseño mecatrónico, el software CES, para selección de materiales de la universidad de Cambridge, esta herramienta brinda una idea de los materiales que pueden ser utilizados en el proyecto.

Como primer parámetro se escogió un material de grupo de los metales y aleaciones, otros materiales como cerámicos maderas o polímeros pueden llegar a ser altamente rígidos por lo que son frágiles, o no tener suficiente módulo de Young por lo que llegaría a deformarse en poco tiempo.

Después se fijan los parámetros, y el software crea un gráfico en el que se visualizan el un parámetro con respecto al otro el módulo de Young se lo visualiza en el eje Y, mientras que el costo por kilogramo se observa en el eje X.

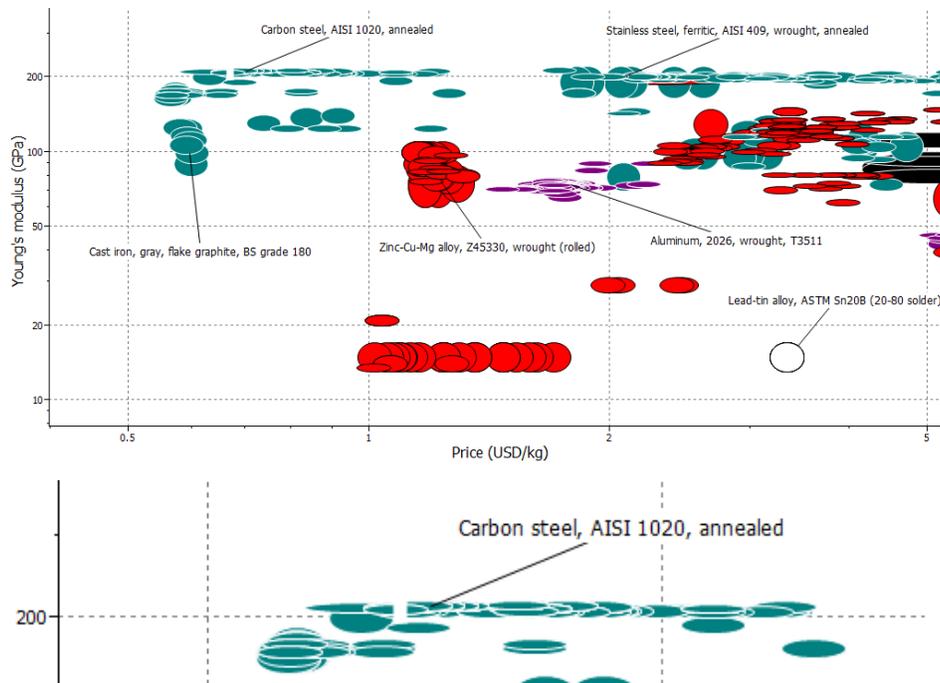


Figura 38. **Software CES, Visualización del material escogido**

Fuente: Autores

Como se observa en la Figura 38, uno de los materiales que se pueden utilizar en la aplicación deseada es el Acero de bajo contenido de carbono, llamado AISI 1020, que tiene el módulo de Young extremadamente elevado, rondando los 200 [GPa], además que según el software el kilogramo de este acero no sobrepasa el dólar, lo que lo convierte en el candidato ideal para la fabricación de la estructura.

Como la mayoría de las estructuras se derivan de perfiles de acero ya prefabricados, el diseño también se hizo en base de perfiles ya existentes, por lo que se analizó varios catálogos con los diferentes productos que existen, y se seleccionó un perfil en C (Figura 39), también conocido como perfil estructural correa.

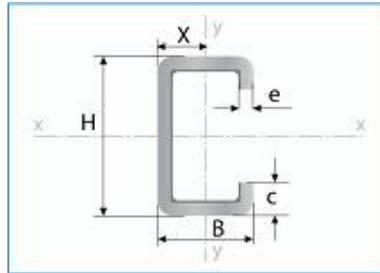


Figura 39. Forma y dimensiones de perfil prefabricado

Fuente: (PENTA-KA, 2015)

Designaciones				Área	Peso	Propiedades Estáticas						
						Eje x-x			Eje y-y			
H	B	c	e	A	P	I	W	i	I	W	i	X
mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm
60	30	10	1,50	1,95	9,19	11,16	3,72	1,82	3,96	2,06	1,08	1,07
			2,00	2,54	11,95	14,88	4,96	2,42	5,28	2,74	1,44	1,07
			3,00	3,61	16,99	20,90	6,96	2,40	7,26	3,77	1,41	1,08
80	40	15	1,50	2,70	12,73	28,20	7,05	3,06	6,58	2,61	1,39	1,45
			2,00	3,54	16,66	32,25	8,81	3,16	8,07	3,18	1,51	1,46
			3,00	5,11	24,06	49,04	12,26	3,10	10,85	4,27	1,46	1,46
150	50	15	1,50	4,05	19,09	140,47	18,43	5,85	14,49	3,98	1,88	1,41
			2,00	5,34	25,14	178,71	23,83	5,79	17,13	4,78	1,79	1,42
			3,00	7,81	36,78	255,23	34,03	5,72	23,49	6,56	1,73	1,42
		25	4,00	10,95	51,56	323,00	43,10	5,65	28,50	7,95	1,68	1,41
200	50	15	2,00	6,34	29,85	354,92	35,49	7,48	18,59	4,91	1,71	1,21
			3,00	9,31	43,84	510,32	51,03	7,40	25,51	6,73	1,66	1,21
			25	4,00	12,95	60,98	682,10	68,20	7,15	40,60	11,49	1,74

*X = Distancia entre el eje menor y-y a la superficie exterior del perfil*

Figura 40. Tabla del catálogo de Correas estructurales

Fuente: (PENTA-KA, 2015)

Después de un análisis de la forma de la estructura se seleccionó la segunda opción (Figura 40) de perfil estructural, por sus medidas principales es fácil de fabricar la estructura deseada y también permite poner los acoples para sujetar los módulos en su posición.

El material del perfil es el acero ASTM A36, un material de baja cantidad de carbono y de características parecidas con el acero AISI 1020, por su parecido químico y físico, con lo que se seleccionó exactamente este perfil para la estructura.

En la Figura 41 se muestra las características mecánicas requeridas para realizar un correcto análisis de la estructura:

Physical Properties	Metric
Density	7.85 g/cc
Mechanical Properties	Metric
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa
Tensile Strength, Yield	250 MPa
Elongation at Break	20 %
	23 %
Modulus of Elasticity	200 GPa
Bulk Modulus	160 GPa
Poissons Ratio	0.26
Shear Modulus	79.3 GPa
Component Elements Properties	Metric
Carbon, C	0.25 - 0.29 %
Copper, Cu	0.20 %
Iron, Fe	98 %
Manganese, Mn	1.03 %
Phosphorous, P	<= 0.040 %
Silicon, Si	0.28 %
Sulfur, S	<= 0.050 %

Figura 41. **Propiedades mecánicas del acero ASTM A36**

Fuente: (MATWEB, 2015)

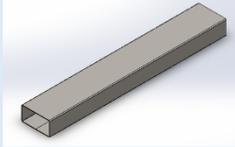
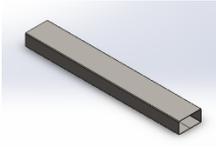
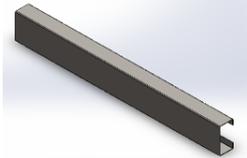
### 3.1.7 Diseño y Simulación

Conociendo estos parámetros se puede realizar el diseño de la estructura en el software de diseño paramétrico 3D SolidWorks, para posteriormente realizar un análisis de esfuerzos con el método de elementos finitos en el software de simulación Ansys

Para crear la estructura el material que viene en medida estándar de 6 metros se divide en varias piezas para formar el cuerpo del módulo, los tamaños se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4.

## Piezas para estructura y simulación en SolidWorks

Pieza	Tamaño [m]	Representación en SolidWorks
Base lateral	0.5	
Base Transversal	0.54	
Lateral	1.56	
Transversal	0.62	

Fuente: Autores

Ya dibujadas las piezas se procede a crear el sólido completo, y se da relación de posición, con el cual se forma la estructura, que tiene una medida total de 1.60x0.70x0.50 [m], y se puede apreciar en la Figura 42.

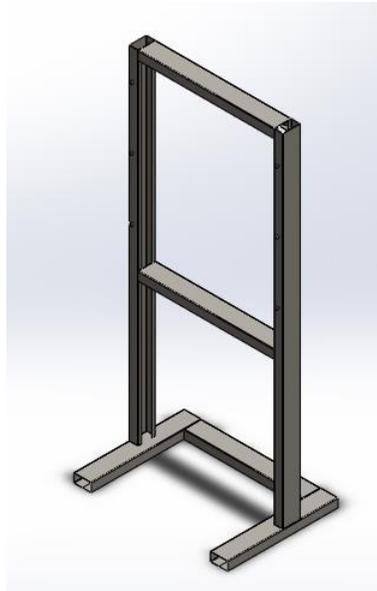


Figura 42. **Estructura en SolidWorks**

Fuente: Autores

Velando por la seguridad, es imperativo determinar el estado de esfuerzos al cual va a estar sometida la estructura. Primero se debe conocer el peso de cada módulo para determinar el tipo de esfuerzo y la deformación admisible que va a soportar la estructura.

Para efectos de diseño se procederá a realizar un análisis estructural mediante el método de elementos finitos con la ayuda del software de simulación ingenieril ANSYS 14.5 con licencia estudiantil dada por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Previamente se dibujó la estructura en el software de diseño paramétrico 3D SolidWorks 2015. Ver Figura 43.

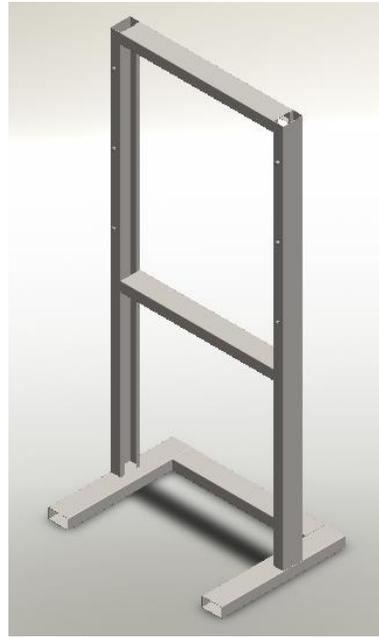


Figura 43. **Diseño 3D estructura metálica**

Fuente: Autores

Se guarda el dibujo con la extensión X\_T para que sea compatible con el software de simulación donde se va a realizar el análisis de esfuerzos, deformaciones y su correspondiente factor de seguridad.

Debido a que se trata de una estructura cuya función principal es brindar un adecuado soporte para los módulos de control de velocidad y temperatura se necesita realizar un análisis estático como se muestra en la Figura 44:

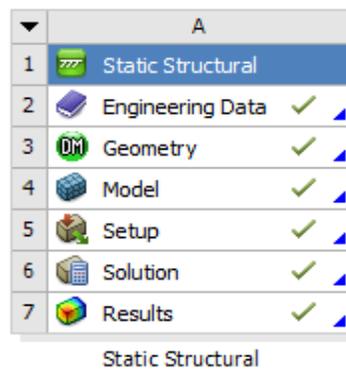


Figura 44. **Análisis estructural**

Fuente: Autores

Primero se aplica el material seleccionado previamente en este caso acero estructural ASTM A36 (Figura 45).

The image shows two windows from the ANSYS Workbench software. The top window, titled 'Outline of Schematic A2: Engineering Data', displays a tree view with columns A, B, C, and D. Row 3 is highlighted, showing 'Structural Steel' selected under the 'Material' category. The source is noted as 'Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1'. The bottom window, titled 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel', shows a table of material properties.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
4	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>		
5	Reference Temperature	22	C		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
24	Tensile Yield Strength	250	MPa		
25	Compressive Yield Strength	250	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	460	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

Figura 45. Asignación de material para la simulación

Fuente: Autores

Una vez seleccionado el material es importante definir una malla adecuada (Figura 46), y dado que los elementos donde se aplica el mayor concentración de esfuerzos están en los parantes verticales se debe realizar un afinamiento de la malla así como determinar un método con el cual los resultados obtenidos tengan un menor margen de error y los resultados se asemejen más a la realidad.

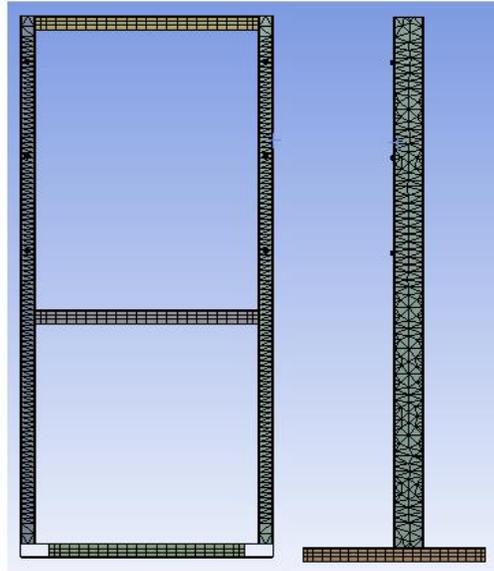


Figura 46. Mallado de la estructura

Fuente: Autores

Con lo cual se obtiene un total de 85010 nodos y 36930 elementos, además se aplica carga en la unión emperrada y también se considera el peso de cada elemento y la gravedad. Ver Figura 47

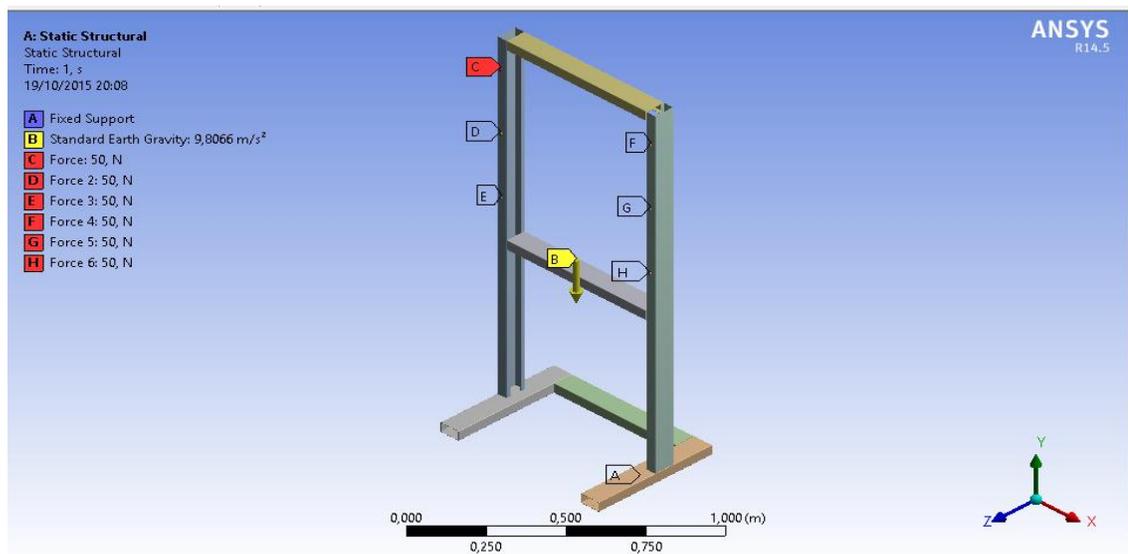


Figura 47. Aplicación de apoyos y cargas

Fuente: Autores

El peso de cada módulo esta alrededor de 10 Kg, dicha carga se divide en cada parante por lo que se tiene una fuerza total de 300 N. Utilizando el presente estado de cargas en la estructura se procede a solucionar la estructura, obteniendo los siguientes resultados mostrados en las Figura 48, Figura 49 y Figura 50:

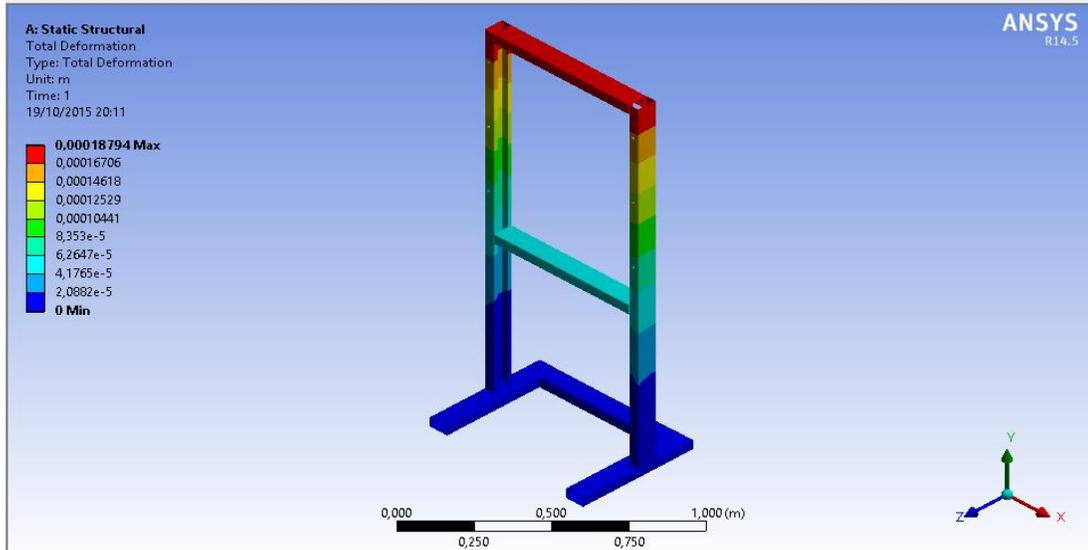


Figura 48. Deformación Total

Fuente: Autores

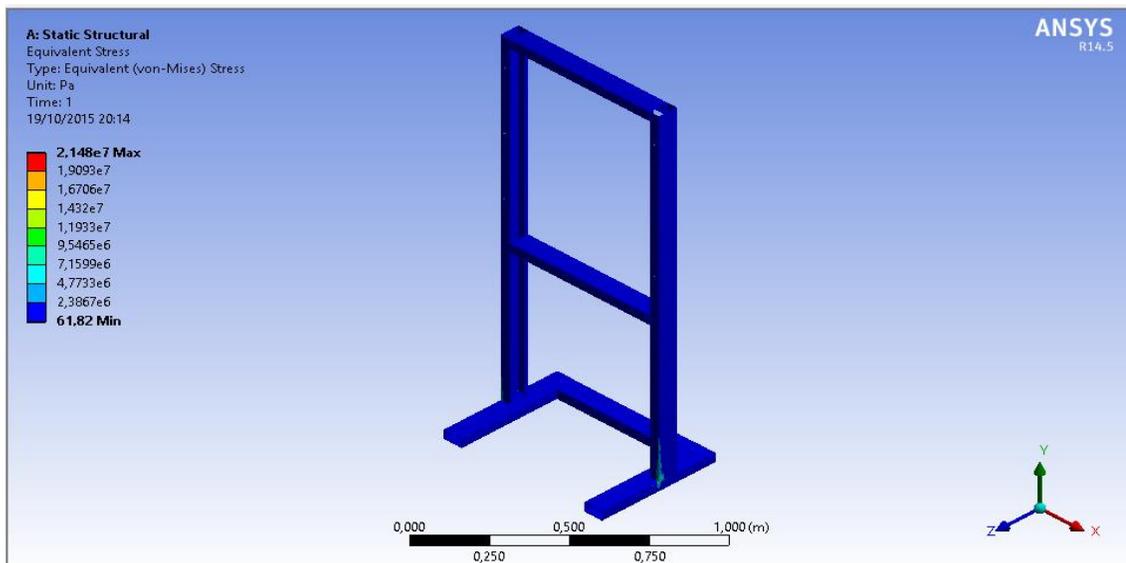


Figura 49. Esfuerzo equivalente de Von Mises

Fuente: Autores

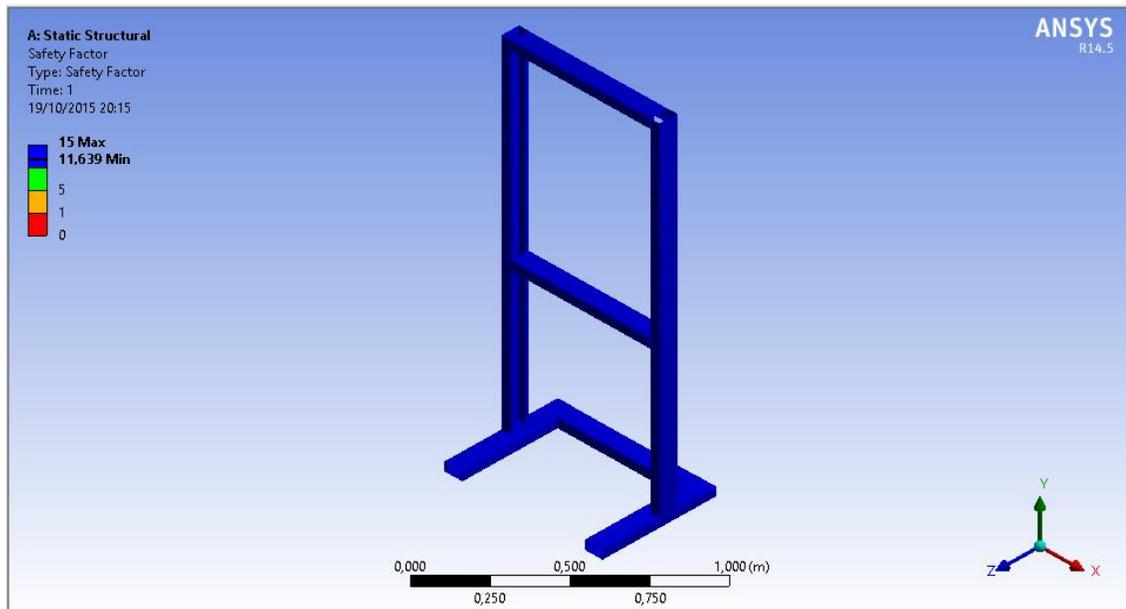


Figura 50. Factor de seguridad

Fuente: Autores

A continuación se detalla los valores obtenidos en la simulación (Tabla 5):

**Tabla 5.**  
**Resultados de la simulación**

Resultados de la simulación	
Carga aplicada en cada unión	10 Kg
Carga total aplicada	300 N
Esfuerzo equivalente máximo	21.48 MPa
Deformación máxima	0.00018 mm
Factor de seguridad	11.64

Fuente: Autores

Debido a que el esfuerzo máximo soportado es de 21,48 MPa y la resistencia a la fluencia del material es de 250 MPa, se puede calcular el factor de seguridad de la estructura.

$$FS = \frac{S_y}{\sigma'}$$

Donde:

- FS: Factor de seguridad
- Sy: Resistencia a la fluencia
- $\sigma'$ : Esfuerzo equivalente de Von Mises

$$FS = \frac{21,48}{250}$$

$$FS = 11,64$$

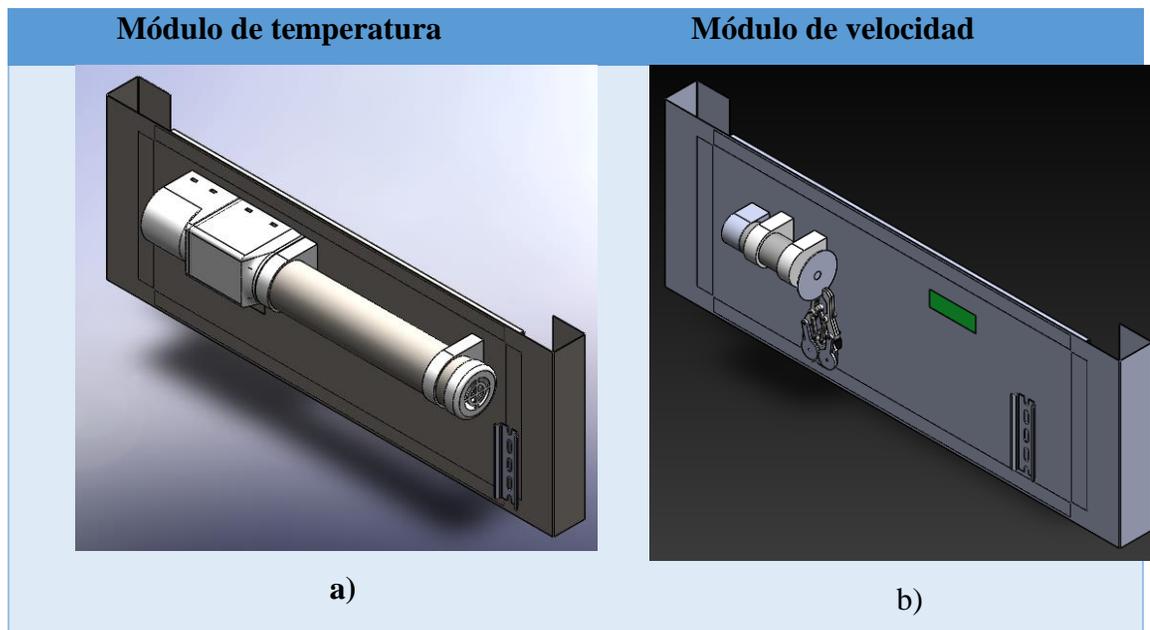
Por tanto se puede afirmar que la estructura no falla y es segura para soportar a los módulos de velocidad y temperatura.

Los módulos de control de temperatura y velocidad se diseñaron en base a sus predecesores y se muestran a continuación (

Tabla 6):

**Tabla 6.**

**Módulos de control de procesos a) Temperatura b) Velocidad**



Fuente: Autores

## **3.2 DISEÑO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

A continuación se detalla el conjunto de elementos que permiten generar, conducir y recibir corriente eléctrica, se parte de la alimentación del equipo y los sistemas de control y de potencia, definiendo niveles de voltaje y tipo de corriente requeridos para el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores. Además se define los tipos y características de los actuadores empleados para cada subproceso. También se detalla los periféricos de entrada y salida, sensores, actuadores, unidades de control, así como el diseño de circuitos impresos para que el equipo perciba su entorno de manera adecuada y pueda ejecutar las tareas de control requeridas.

### **3.2.1 Estructura general del sistema electrónico**

Un sistema electrónico está compuesto por elementos sensoriales que captan las variables que se van a supervisar, después la unidad de control manipula, interpreta y transforma las señales provenientes de los sensores para que finalmente un elemento actuador recibe la orden del controlador y en función de ella genere una acción. Estos elementos interactúan entre sí para obtener el resultado deseado. Ver Figura 51.

Para desarrollar la solución que mejor se adapte a los requerimientos de diseño se sigue el orden mostrado en la figura siguiente y se debe considerar los siguientes aspectos:

- Seleccionar la fuente de alimentación y niveles de voltaje requeridos para el correcto funcionamiento del prototipo.
- Determinar la instrumentación idónea para captar las señales físicas y las convierten en señales eléctricas.
- Seleccionar el mejor controlador para manipular, interpretar y transformar las señales provenientes de los sensores.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita la comunicación entre el sistema de entrenamiento y el usuario.

- Diseño y selección de drivers y circuitos electrónicos que permitan controlar los actuadores.

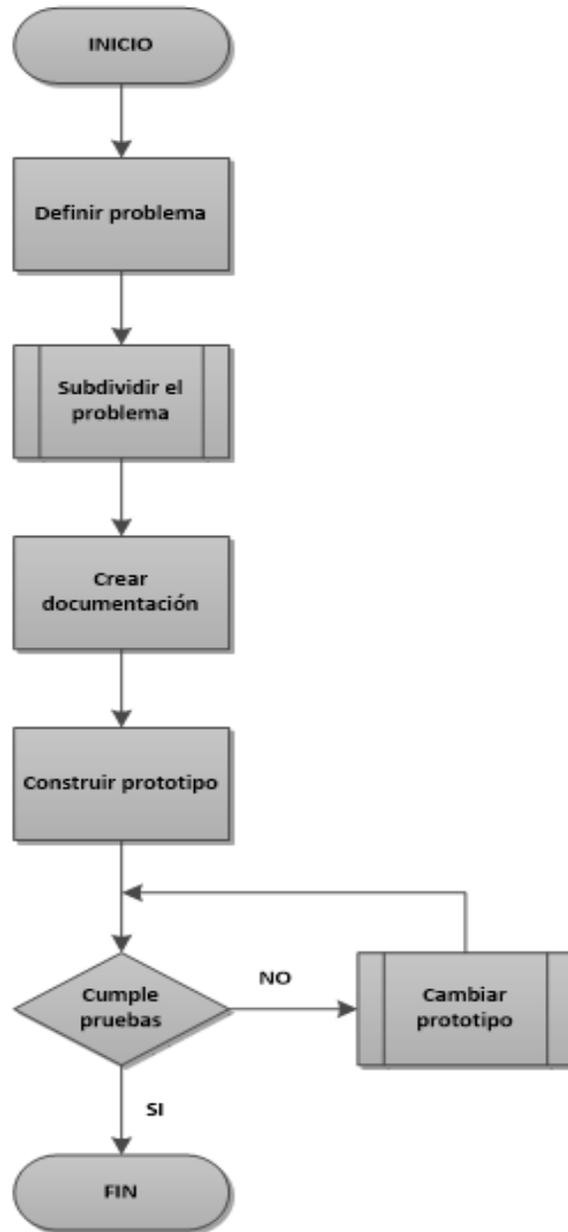


Figura 51. **Proceso de diseño electrónico**

Fuente: Autores

En este punto es importante recordar el objetivo del presente trabajo donde se requiere el diseño de un prototipo que permita el control, simulación y monitoreo de los procesos de temperatura y velocidad por lo que a continuación se detallan dichos procesos.

### **3.2.2 Control de Temperatura**

De acuerdo a la Real Academia Española, la temperatura es una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente. Su unidad en el Sistema Internacional es el kelvin (K).

El control de temperatura es de vital importancia en la industria, se usa en una variedad de procesos industriales, para obtener los resultados deseados. en las industrias. Los controladores de temperatura ya sea analógico o digital, deben ofrecer un rápido ajuste y proporcionan una gestión de temperatura precisa y segura.

Para el control de temperatura se requiere un controlador para que coordine las acciones a ejecutar, junto con los acondicionamientos electrónicos necesarios para la utilización de un sistema de flujo de aire (Ventilador ) y de un actuador en este caso una niquelina controlada por DC podrá realizar el control a través de un sistema PWM . El ventilador es el encargado de repartir el calor de la cámara de calefacción hacia el túnel donde se encuentran los sensores que son los encargados de proporcionar la información necesaria del evento en proceso.

### **3.2.3 Control de Velocidad**

De acuerdo a la Real Academia Española, la velocidad es una magnitud física que expresa el espacio recorrido por un móvil en la unidad de tiempo. Su unidad en el Sistema Internacional es el metro por segundo (m/s).

Para el control de velocidad se utilizará un controlador junto con los acondicionamientos electrónicos necesarios; el motor debe ser controlado por una señal pwm, la lectura de los sensores debe ser por medio de entradas analógicas, el freno mecánico será controlado simplemente mediante una pinza o gripper cuya abertura será proporcionada por el usuario mediante un potenciómetro, la carga electrónica o perturbación será proporcionada por una resistencia variable de potencia controlada manualmente por el usuario de forma manual.

En la Figura 52 se muestra un esquema general del sistema electrónico

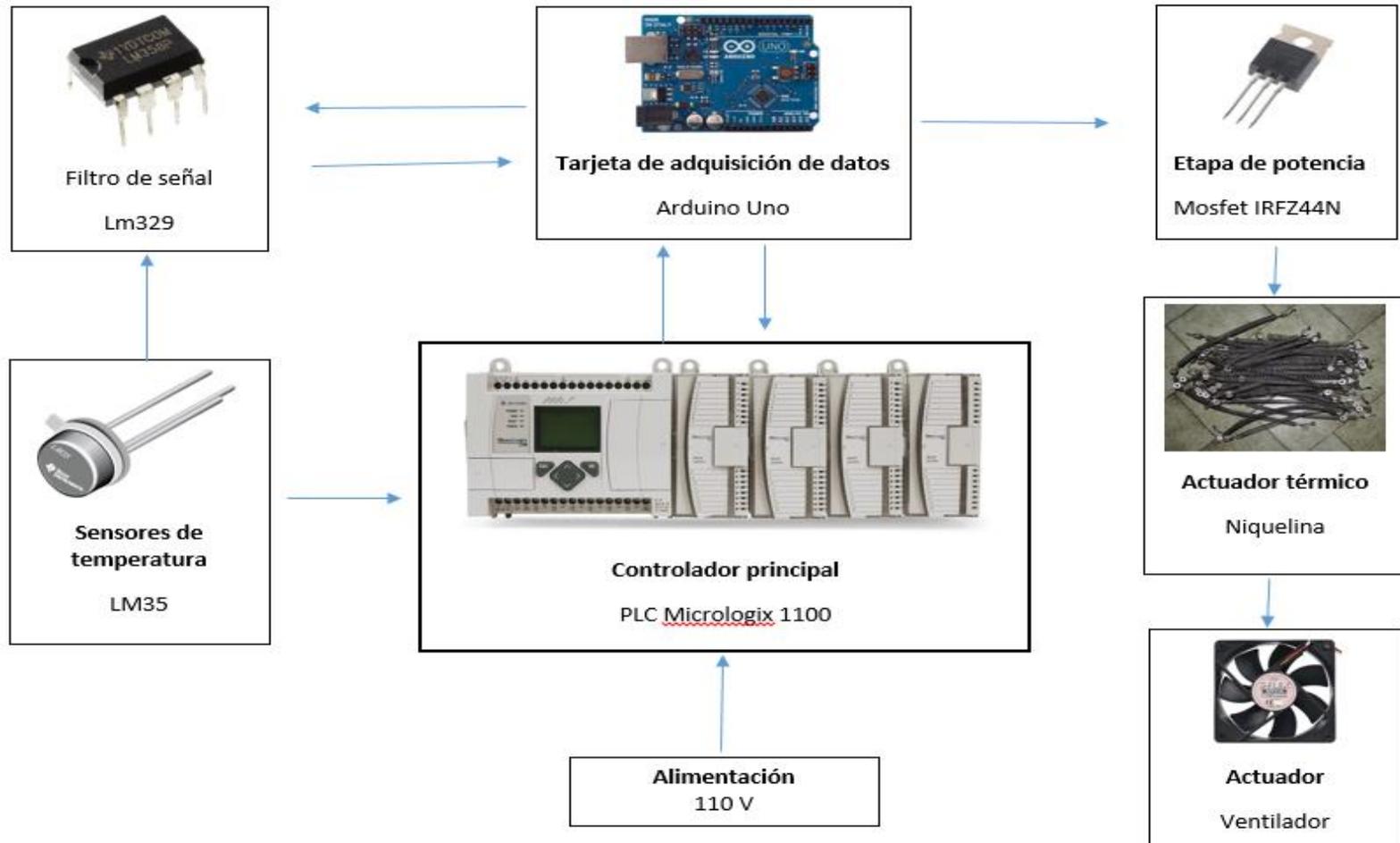


Figura 52. Diagrama de bloques del Sistema Electrónico

Fuente: Autores

Donde se puede apreciar los elementos básicos de un sistema electrónico:

- Alimentación
- Sensores
- Controladores
- Actuadores

### 3.2.4 Sistema de alimentación

Debido a que uno de los principales objetivos de este trabajo es que el equipo sea portable, se tiene dos alternativas como fuente de alimentación, el uso de corriente alterna o de corriente continua. Sin embargo debido a que el equipo de laboratorio está construido bajo ciertas medidas de seguridad y control de fallos eléctricos dados por la norma RTE INEN 098 del Servicio Ecuatoriano de Normalización y el Código Eléctrico Ecuatoriano, se empleara el uso de corriente alterna para la alimentación del sistema de entrenamiento para el laboratorio de control de procesos.

Además se debe tener diferentes niveles de tensión para alimentar a circuitos de control y de potencia, lo cual se realiza con la ayuda de un regulador de voltaje existente en el mercado el cual basa su funcionamiento en el regulador de voltaje LM2596 mostrado en la Figura 53.

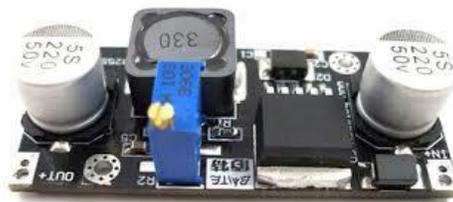


Figura 53. **Regulador de voltaje LM2596**

Fuente: (Avila, 2013)

Este circuito impreso es un regulador de voltaje tipo “step down”, es decir, su voltaje de salida es menor que su voltaje de alimentación. El valor de voltaje de salida se regula mediante el potenciómetro de precisión presente en la placa, ver Figura 54.

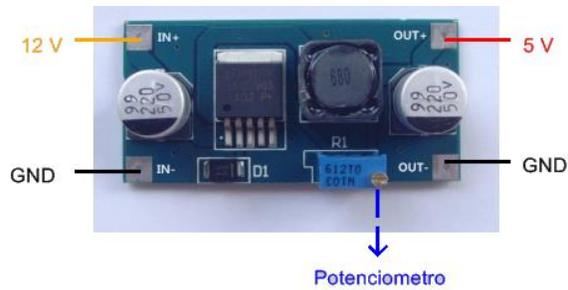


Figura 54. **Conexión del LM2596**

Fuente: (Avila, 2013)

Las características de este driver se detallan a continuación:

- Convertidor de alta eficiencia: 80%
- Voltaje de entrada: 4.75 a 30V
- Voltaje de salida: 1.25 a 26V
- Voltaje de salida ajustable
- Corriente promedio de salida: 2A
- Corriente pico de salida: 3A
- Basado en el regulador LM2596S
- Led indicador de encendido

### 3.2.5 Instrumentación

La correcta selección de los sensores permite que el sistema perciba el entorno que lo rodea de la mejor manera posible.

#### **Sensores Planta de Temperatura**

El LM35 (Figura 55), es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1 °C. Su rango de medición abarca desde -55 °C hasta 150 °C. La salida es lineal y cada grado centigrado equivale a 10 mV, por lo tanto:

$$150\text{ }^{\circ}\text{C} = 1500\text{ mV}$$

$$-55\text{ }^{\circ}\text{C} = -550\text{ mV}$$



Figura 55. **Sensor de Temperatura**

Fuente: (Villalobos, 2010)

#### **Características:**

- La tensión de salida es proporcional a la temperatura.
- Tiene una precisión garantizada de  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Baja impedancia de salida.
- Baja corriente de alimentación ( $60\text{ }\mu\text{A}$ ).
- Bajo coste.

#### **Sensores Planta de Velocidad**

La etapa de medición se realiza mediante el uso de un opto-acoplador, siguiendo el principio de funcionamiento de un tacómetro digital, a través del cual se hace pasar un disco de ranurado codificado colocado en la parte posterior del eje del motor. El disco codificado de 30 pulsos/rev (Figura 56). Los pulsos emitidos son realimentados al microcontrolador para así calcular la velocidad de rotación del motor.

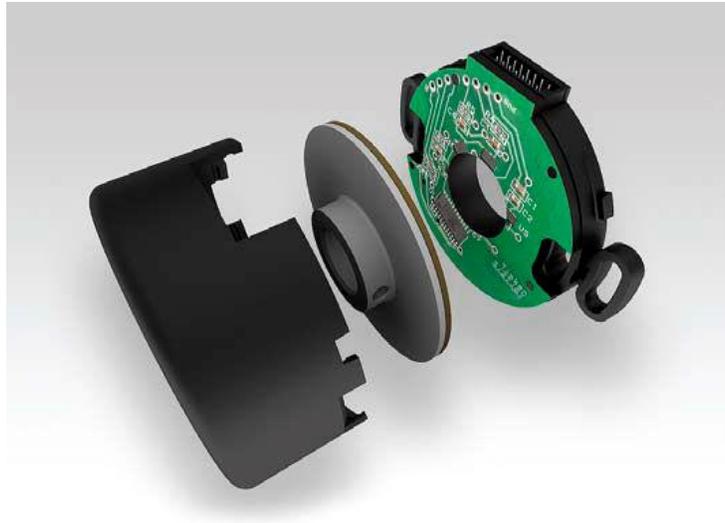


Figura 56. **Encoder incremental acoplado al motor**

Fuente: (Sanchez, 2008)

Un encoder, también llamado codificador del eje o generador de pulsos, suele ser un dispositivo electromecánico usado para convertir la posición angular de un eje a un código digital, lo que lo convierte en una clase de transductor.

### **3.2.6 Controladores**

Dispositivos electrónicos generalmente placas microcontroladas, sistemas embebidos son usados para manipular, interpretar y transformar las señales de voltaje y corriente provenientes de los transductores para accionar un módulo de salida o actuador.

Los controladores lógicos programables (PLC) están adaptados para un amplio rango de tareas de automatización. Estos son típicos procesos industriales en la manufactura donde el coste de desarrollo y mantenimiento de un sistema de automatización es relativamente alto contra el coste de la automatización, y donde van a existir cambios en el sistema durante toda su vida operacional. Los PLC contienen todo lo necesario para manejar altas cargas de potencia; se requiere poco diseño eléctrico y el problema de diseño se centra en expresar las operaciones y secuencias en la lógica de escalera (o diagramas de funciones). Las aplicaciones de PLC son normalmente hechos a la medida del sistema, por lo que el costo del PLC es bajo comparado con el costo de la contratación del diseñador para un diseño específico que solo se va a usar una sola vez.

Por otro lado, en caso de productos de alta producción, los sistemas de control a medida se amortizan por si solos rápidamente debido al ahorro en los componentes, lo que provoca que puede ser una buena elección en vez de una solución genérica, la cual generalmente se realiza con la ayuda de un microcontrolador.

### **Sistemas de controlador lógico programable MicroLogix 1100**

El controlador lógico programable MicroLogix™ 1100 (Figura 57) añade EtherNet/IP™ incorporada, edición en línea y un panel LCD a la familia MicroLogix. El panel LCD incorporado muestra el estado del controlador, el estado de E/S y mensajes del operador simples. Con dos entradas analógicas, 10 entradas digitales y seis salidas digitales, el controlador MicroLogix 1100 puede manipular una amplia variedad de tareas.



Figura 57. **MicroLogix 1100**

Fuente: (Rockwell Automation, 2015)

#### **Características:**

- Incluye un puerto EtherNet/IP™ de 10/100 MBps incorporado para mensajería entre dispositivos similares
- Proporciona una memoria de 8 KB (4 KB de programas de usuario con 4 KB de datos de usuario)
- Permite el acceso, el monitoreo y la programación desde cualquier conexión Ethernet
- Admite la edición en línea

- Proporciona un servidor web incorporado que permite configurar los datos del controlador para que aparezcan como una página web
- Contiene un puerto combinado RS-232/RS-485 aislado para comunicación en serie y conectada en red
- Permite monitorear y modificar los datos del controlador a través de una pantalla LCD incorporada
- Compatible con módulos de E/S de expansión MicroLogix 1762 (hasta cuatro módulos por controlador)
- Admite un máximo de 144 puntos de E/S digitales

Un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. En los últimos años el uso de microcontroladores PIC ha ido decayendo drásticamente siendo los AVR's los elementos más empleados actualmente en proyectos de electrónica.

Existen un sin número de modelos de AVR e igual de lenguajes de programación, pero una marca que sin duda ha revolucionado el mercado y mundo de los microcontroladores es Arduino, ver Figura 58.



Figura 58. **Arduino UNO**

Fuente: (ARDUINO, 2015)

Arduino posee varios modelos de placas microcontroladas que permiten una fácil implementación de los proyectos. La tarjeta microprocesada denominada Arduino UNO se utiliza como sistema auxiliar con las siguientes características:

- Microcontrolador: Atmega328
- Voltaje de operación: 5V DC
- Voltaje de entrada (Recomendado): 7 – 12V DC
- Voltaje de entrada (Límite): 6 – 20V DC
- Pines para entrada - salida digital: 14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
- Pines de entrada analógica: 6
- Corriente continua por pin IO: 40 mA
- Corriente continua en el pin 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Frecuencia de reloj: 16 MHz

### 3.2.7 Actuadores

#### Niquelina

Son elementos que se fabrican a base de níquel, donde la energía eléctrica se transforma en calor. Mediante la ley de Joule podemos determinar la cantidad de calor que es capaz de entregar una resistencia. La cantidad de calor dependerá de la intensidad de tiempo que esté conectada. De acuerdo a la ley de Joule decimos que la cantidad de calor desprendido de una resistencia es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente y directamente proporcional al valor de la resistencia y al tiempo.

La niquelina (Figura 59) es una aleación cobre-níquel. Su coeficiente de temperatura es mayor que el del constantán, por tanto la niquelina solo es adecuada para aquellas resistencias para las que la variación de la resistencia con la temperatura no sea importante. Con niquelina se fabrican, por ejemplo, resistencias de arranque y de carga. La niquelina admite bien el estañado, tanto duro como blando, así como la soldadura.



Figura 59. **Niquelina eléctrica**

Fuente: (TERMOKEW, 2015)

**Características:**

- Resistencia Específica:  $0,4 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
- Coeficiente de dilatación:  $\pm 0,00015/^\circ C$
- Resistencia al calor: Hasta  $500^\circ C$
- Tensión térmica respecto al cobre:  $25 \mu V/^\circ C$

**Ventilador**

Un ventilador es una máquina de fluido, concebida para producir una corriente de aire. Se utiliza para producir corrientes de aire, es decir, mover el aire para usos muy diversos. Ver Figura 60.



Figura 60. **Ventilador**

Fuente: (Keen, 2012)

**Características:**

- Velocidad: 1500 rpm.
- Voltaje: 12 V
- Corriente: 0.2 A
- Ruido: 22.4 dBA.
- Volumen de aire: 35.36 CFM.
- Presión de aire: 1.71 mm<sup>2</sup>
- Consumo: 3.96 w máx.

**Motor DC**

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotativo. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Ver Figura 61.



Figura 61. **Motor DC**

Fuente: Autores

**Características:**

- Velocidad: 4400 rpm.
- Voltaje: 24 V
- Potencia: 19 W
- Diámetro: 38 mm
- Longitud total: 101.8 mm
- Diámetro del eje: 5 mm
- Longitud del eje: 25 mm

**Servomotor**

Un servomotor es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición. Este motor eléctrico puede ser controlado tanto en velocidad como en posición.

Un servomotor tiene además de su gran capacidad de control, una elevada fuerza, velocidad y baja inercia, por lo que se utilizará para generar la perturbación mecánica en el sistema de control de velocidad.

En la Figura 62 se muestra el mecanismo acoplado al motor así como sus características técnicas:

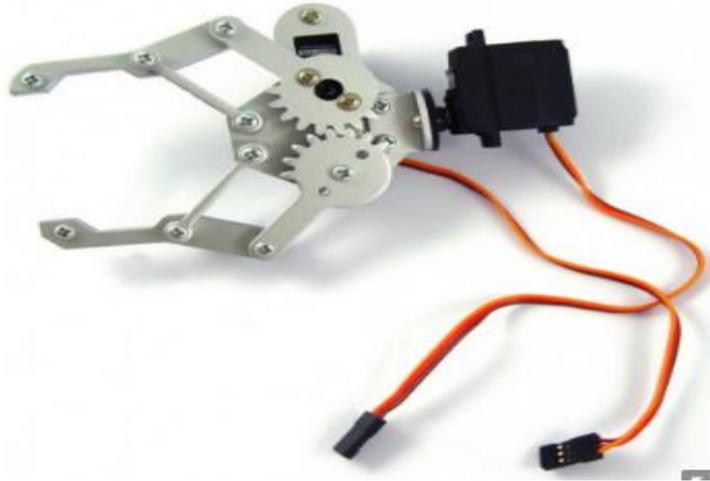


Figura 62. **Servomotor**

Fuente: (Villalobos, 2010)

Este servomotor opera de 0-180 grados de rango de movimiento, con un control de ángulo de alta calidad.

**Características:**

- Voltaje de funcionamiento: 4.8V a 6.0V DC
- Señal de control: ángulo neutro en 1.5 milisegundos ancho de pulso
- Par parada: 13Kg.cm
- Velocidad angular: 60 grados en 0.18 segundos
- Caja de cambios: Metal

### **3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL**

#### **3.3.1 Control automático de procesos**

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control, es muy simple. El mismo principio del control automático se usa en diversos campos, como control de procesos químicos y del petróleo, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, y en el control y trayectoria de un proyectil.

Los actuadores previamente descritos requieren un control de posición o velocidad. En esta sección se detalla los elementos y técnicas a emplearse para controlar cada uno de estos sistemas; así como la creación de circuitos impresos y la implementación de un armario eléctrico y un control remoto.

En este apartado se va a establecer los parámetros de control para el equipo de temperatura y velocidad.

### 3.3.2 Control de temperatura

La placa que corresponde al módulo de temperatura es un intermediario entre el microcontrolador Arduino y la planta en sí, el diseño del circuito se muestra en la Figura 63.

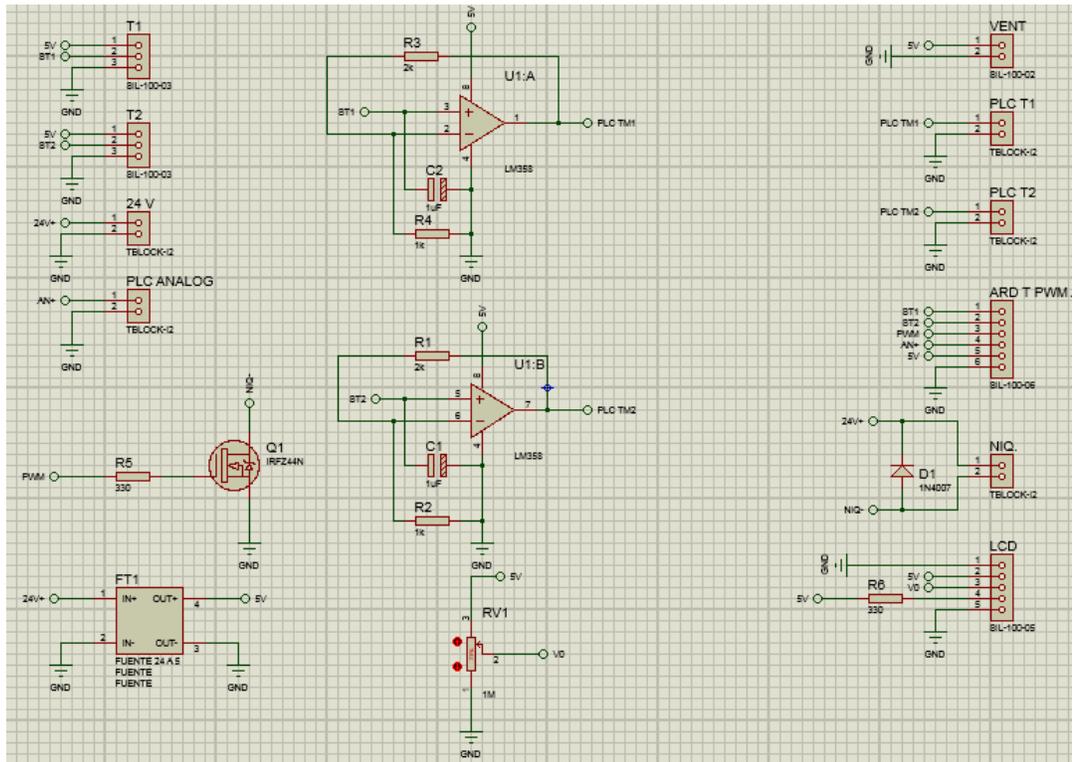


Figura 63. Circuito de Control de Temperatura

Fuente: Autores

Se conecta los sensores de temperatura t1 y t2, el sensor LM35 obtiene alimentación de la placa y el sensor envía la señal que se filtra con un capacitor de 1 uF,

después entra al integrado LM358 que es un amplificador operacional, filtra la señal y actúa como un amplificador no inversor, con resistencias de 1K y de 2K.

La alimentación es proporcionada por un conversor DC-DC, que reduce el voltaje de 24v a 5v.

En la Figura 64 se muestra el diagrama para la implementación del circuito impreso realizado en el software de diseño electrónico PROTEUS.

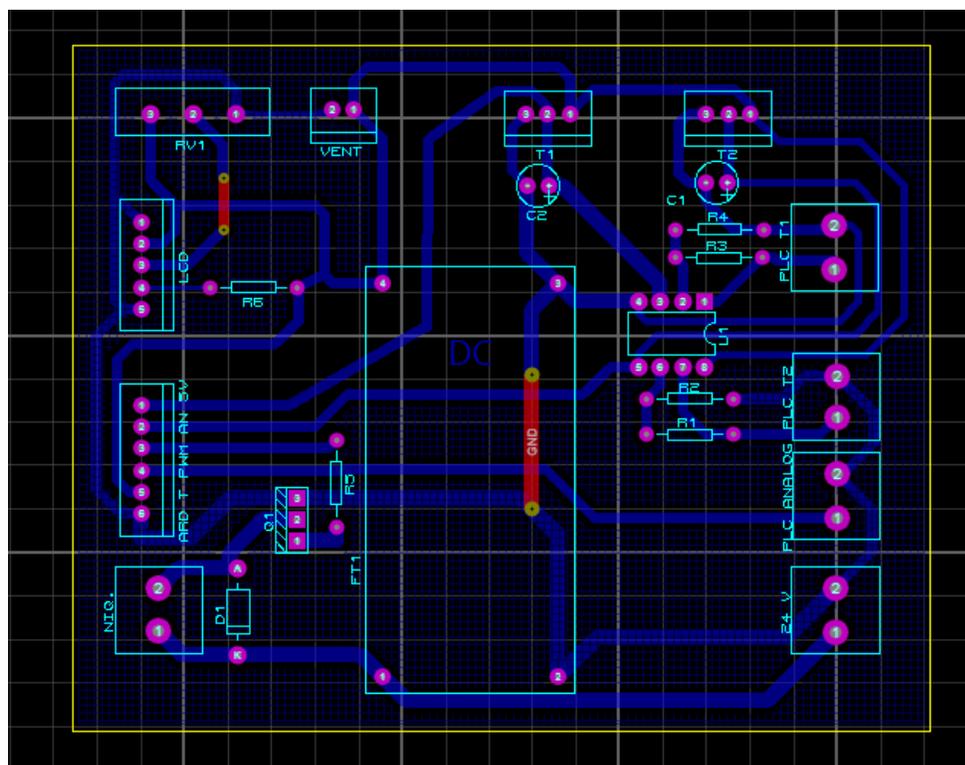


Figura 64. Ruteado de pistas para el Control de Temperatura

Fuente: Autores

El circuito también controla la niquelina de la planta de temperatura y evita las corrientes reversas, tiene un diodo y un mosfet el irfz44n para control de la niquelina por medio de PWM.

Tiene salidas del LCD para que se pueda alimentar el backligh y contraste.

Tiene una salida para el ventilador que activa el ventilador desde que se activa la fuente.

Además en la Figura 65, se muestra un esquema 3D del circuito de control de temperatura:

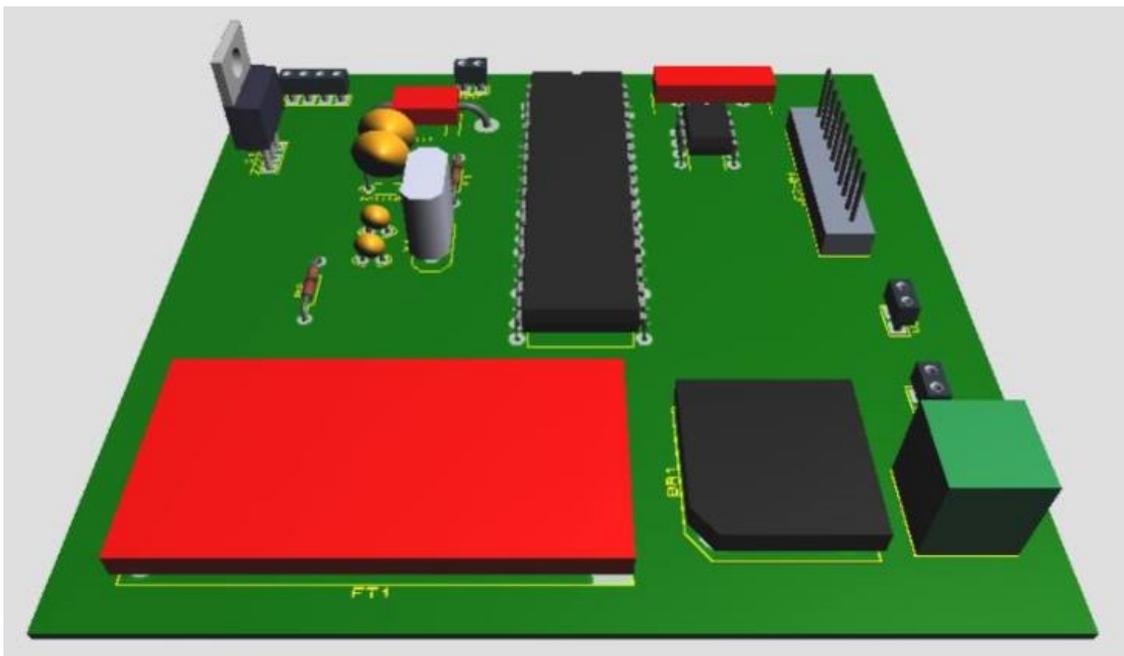


Figura 65. **Visualización 3D del Control de Temperatura**

Fuente: Autores

### 3.3.3 Control de velocidad

Para lograr una alta prestación de los accionamientos llevados a cabo por un motor que forma parte de un sistema de control, es necesario estudiar las características dinámicas de estos y desarrollar estrategias de control acorde con las mismas.

Es por esta razón que la presente actividad pretende tener un acercamiento al control en una planta real, donde se diseñará un control de velocidad del motor DC y se lo manejará de manera adecuada a la aplicación elegida.

En el siguiente diagrama (Figura 66) se muestra un diagrama general a cerca del control de la planta de velocidad:

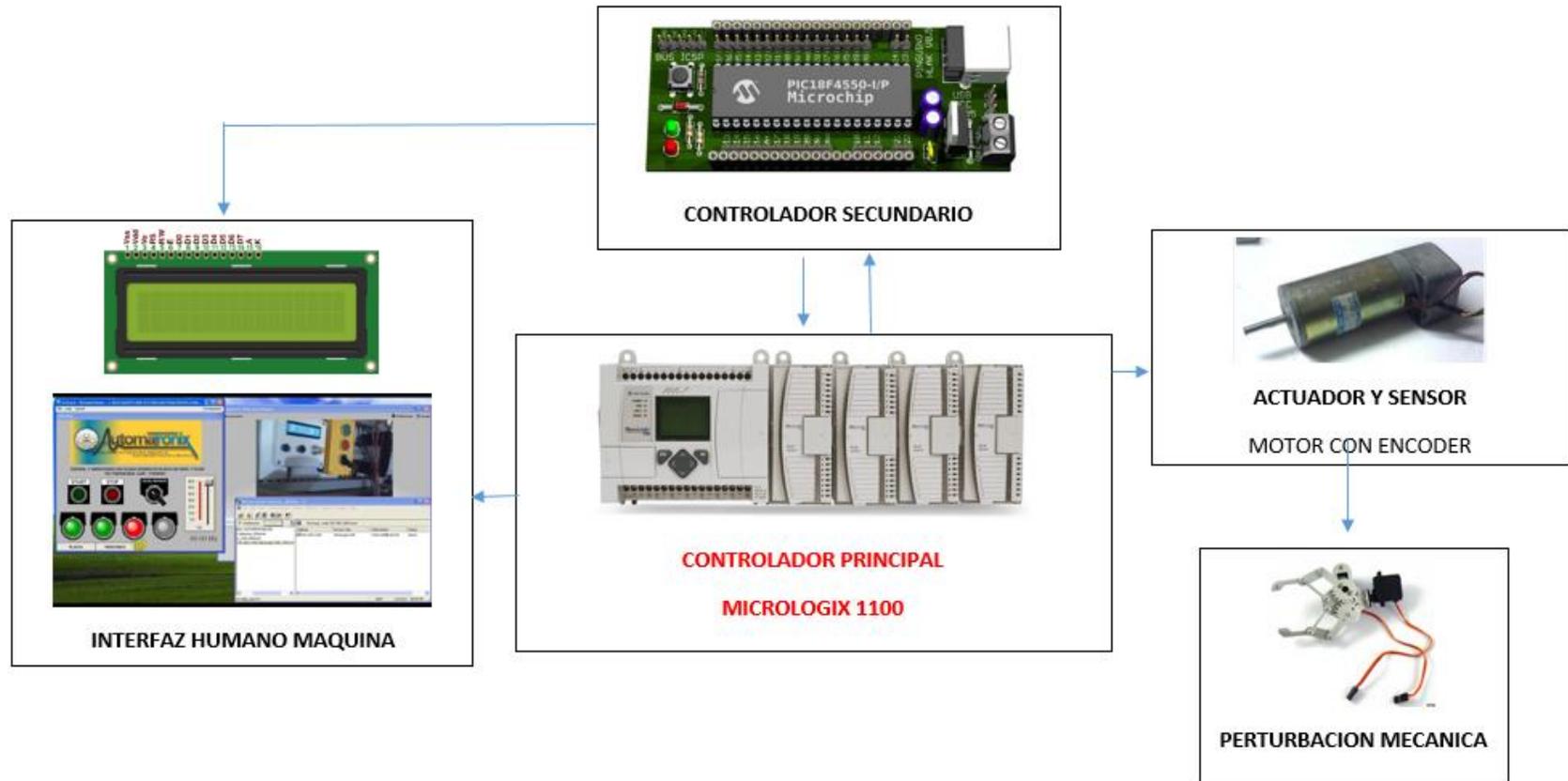


Figura 66. Esquema de control de planta del motor

Fuente: Autores

La placa de velocidad (Figura 67) tiene embebido el microcontrolador que es un 18f4550 de microchip. Tiene las salidas a LCD y tiene un convertidor de 24 a 5 V, para la alimentación del mismo, cristal de 4 MHz salida a motor con diodo de protección y control del mismo por PWM con un mosfet irfz 44n tiene un puente rectificador a la entrada para evitar que se conecte al revés.

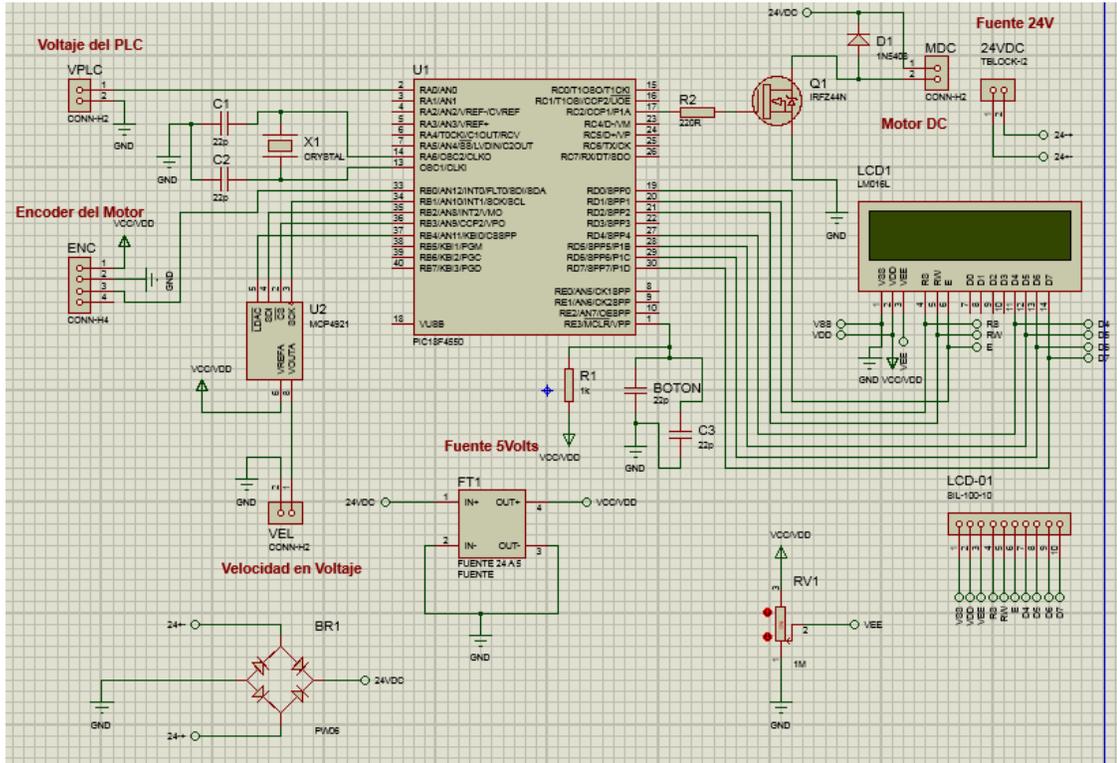


Figura 67. Circuito de Control de Velocidad

Fuente: Autores

Para enviar la señal al PLC tiene una salida analógica que se logra con el integrado mcp4921 que es un integrado que funciona con comunicación i2c.

Tiene una entrada digital para el encoder que se utiliza en el motor y el motor funciona con 24 volts.

A continuación se muestra el diagrama (Figura 68) para la implementación del circuito impreso realizado en el software de diseño electrónico PROTEUS.

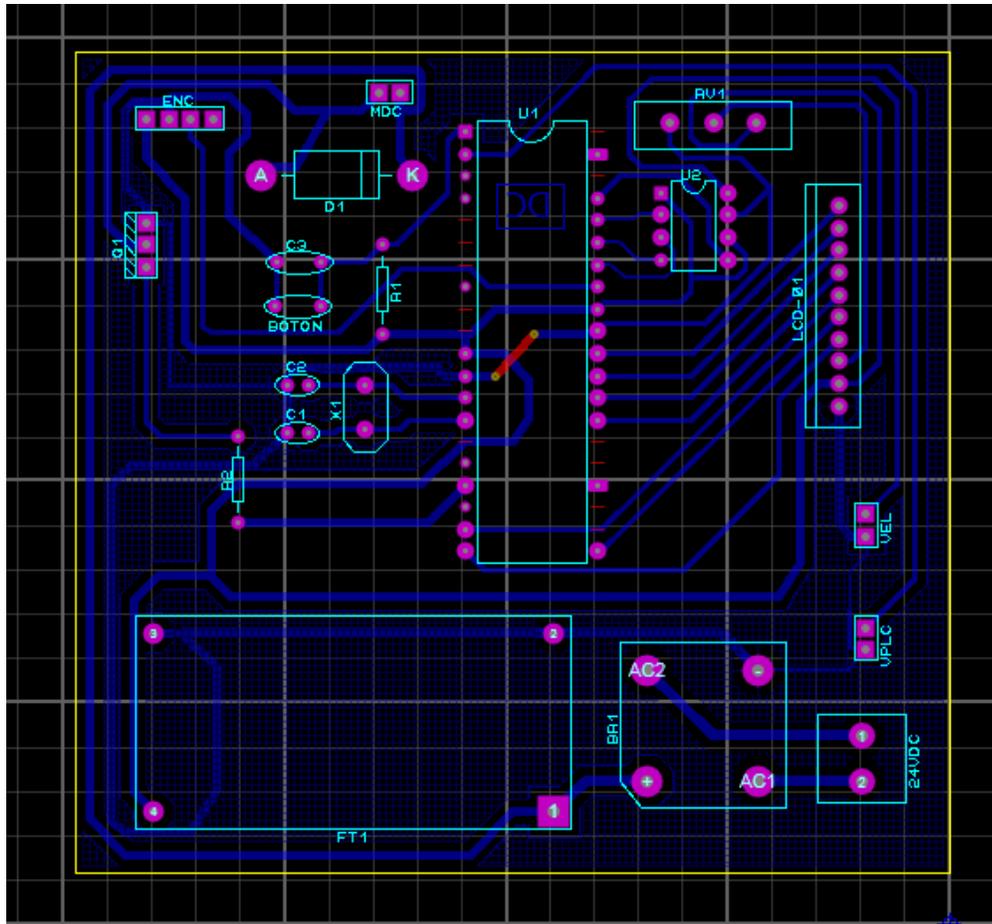


Figura 68. Ruteado de pistas para el Control de Velocidad

Fuente: Autores

Además se muestra un esquema 3D (Figura 69) del circuito de control de velocidad:

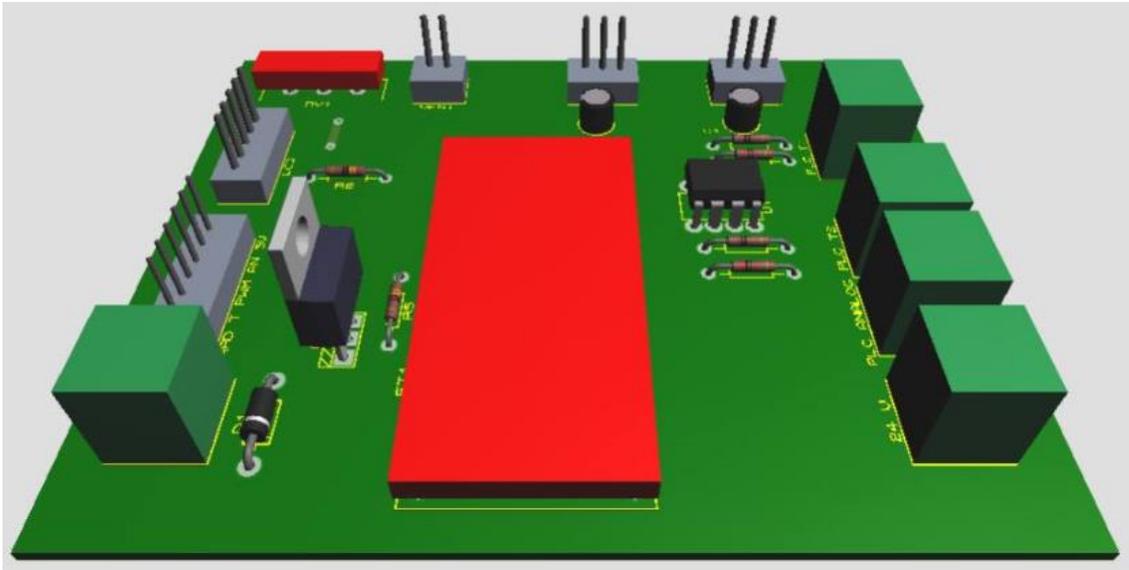


Figura 69. **Visualización 3D del Control de Temperatura**

Fuente: Autores

### 3.3.4 Generación de la perturbación mecánica

Los servomotores hacen uso de la modulación por ancho de pulsos (PWM) para controlar la dirección o posición de los motores de corriente continua. La mayoría trabaja en la frecuencia de los cincuenta hertz, así las señales PWM tendrán un periodo de veinte milisegundos. La electrónica dentro del servomotor responderá al ancho de la señal modulada. Si los circuitos dentro del servomotor reciben una señal de entre 0,5 a 1,4 milisegundos, éste se moverá en sentido horario; entre 1,6 a 2 milisegundos moverá el servomotor en sentido antihorario; 1,5 milisegundos representa un estado neutro para los servomotores estándares.

Mediante el ancho de pulso se ajusta las pinzas sobre el eje, produciendo una oposición al movimiento del eje del motor DC.

## CAPÍTULO IV

### CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

Ya que en el capítulo anterior se seleccionaron los diferentes tipos de materiales a utilizar, así como la geometría requerida de cada elemento dentro de la estructura mecánica, además de los circuitos y placas microcontroladas en la etapa electrónica, en el desarrollo del presente capítulo se detalla el proceso tecnológico utilizado para desarrollar la solución escogida en la etapa de diseño y la integración de componentes para tener un óptimo control del sistema de entrenamiento.

Al seleccionar el material no sólo se garantiza las propiedades mecánicas, físicas, tecnológicas, etc. También debe garantizarse que las mismas se obtengan al final del proceso de producción de la pieza. Ver Figura 70.

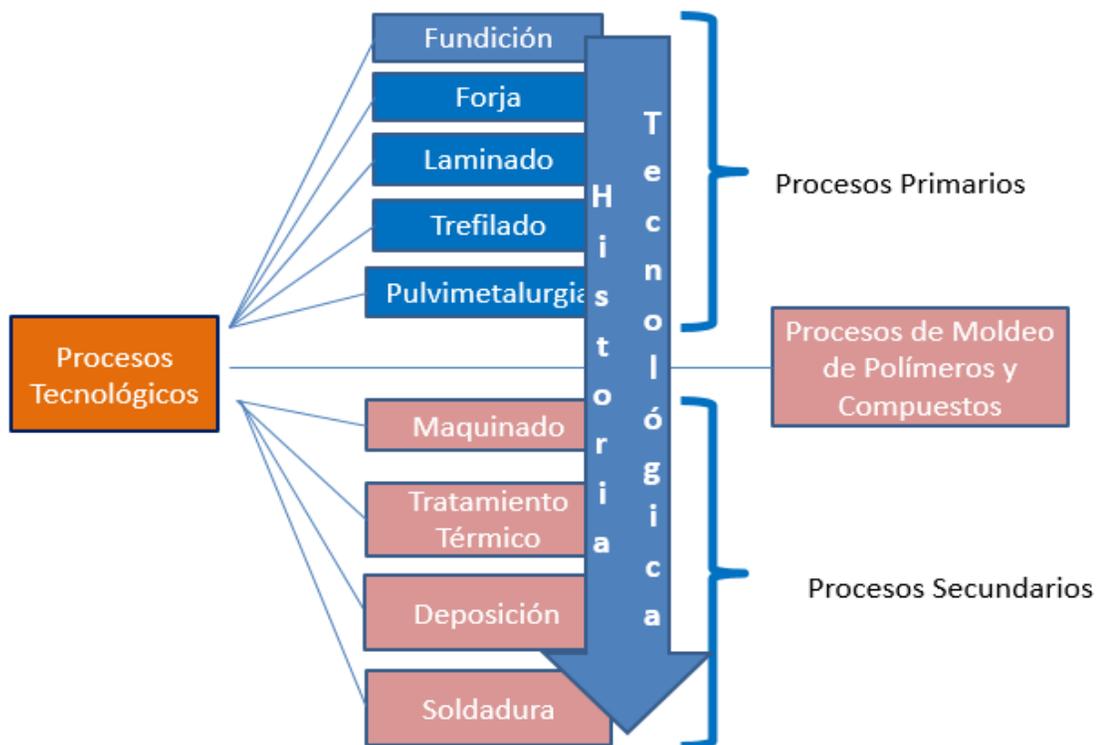


Figura 70. **Procesos tecnológicos primarios y secundarios**

Fuente: Autores

## 4.1 CONSTRUCCIÓN

Para la producción de planchas de acero generalmente se obtiene por laminado, estas son requeridas para dar soporte a los módulos de velocidad y temperatura, además los perfiles en forma de “C” se obtiene por doblado o extrusión, etc. Existen piezas más complejas las cuales requieren de un tipo de fabricación más avanzado en la actualidad como es la impresión 3D, por este motivo a continuación se detalla la historia tecnológica de cada elemento.

### 4.1.1 Construcción de la estructura

Una vez seleccionado el tipo de perfil utilizado para la estructura, mostrado en la Figura 71.



Figura 71. Perfil estructural en C

Fuente: (PENTA-KA, 2015)

Posteriormente se corta en los siguientes tamaños (Tabla 7):

**Tabla 7.**

**Tamaño de piezas para estructura**

Partes de la estructura	Tamaño [mm]	Cantidad
Base lateral	500	2
Base Transversal	540	1
Lateral	1560	2
Transversal	620	2

Fuente: Autores



Figura 72. **Medición perfil estructural**

Fuente: Autores

Se suelda con electrodo para tener una unión permanente entre los miembros estructurales (Figura 73):



Figura 73. **Soldadura con electrodo**

Fuente: Autores

Y se pule para eliminar impurezas producidas por el proceso de corte y soldadura.  
Ver Figura 74.



**Figura 74. Estructura soporte y módulos acoplados**

Fuente: Autores

Finalmente se aplica una capa de pintura electrostática (Figura 75), que es un tipo de recubrimiento que se aplica como un fluido, de polvo seco, para crear un acabado duro que es más resistente que la pintura convencional.



**Figura 75. Estructura final**

Fuente: Autores

Además se agrega soportes de goma (Figura 76) a los extremos de los módulos de velocidad y temperatura para poder sujetarlos con facilidad.



Figura 76. Mangos de goma

Fuente: Autores

#### 4.1.2 Construcción del Módulo de Temperatura

En el apartado siguiente se indican las partes constitutivas (Figura 77) del módulo de temperatura, así como su historia tecnológica (Tabla 8).

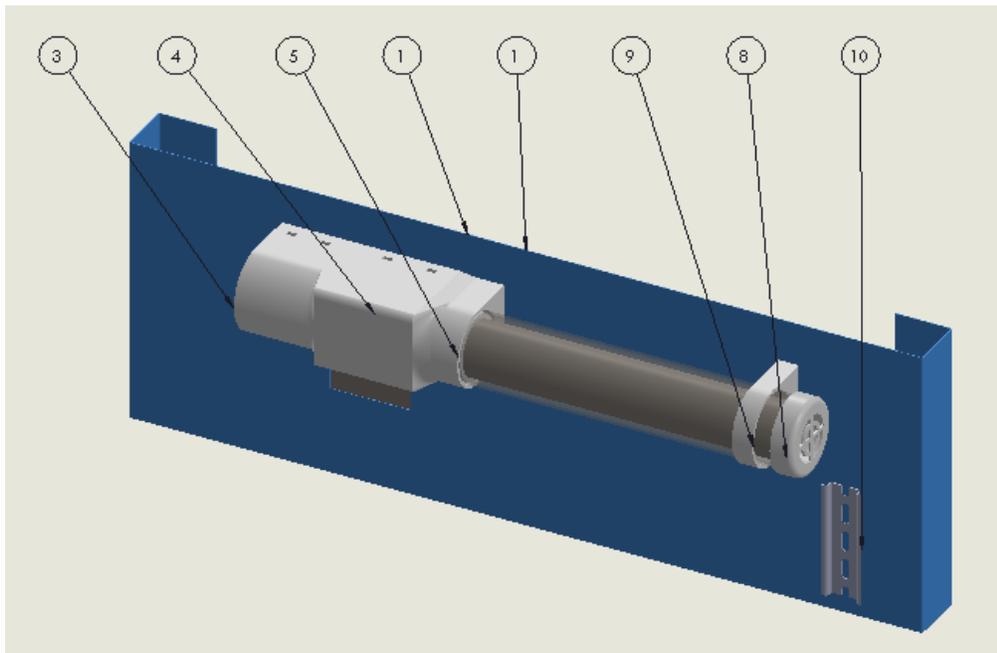


Figura 77. Partes del Módulo de Temperatura

Fuente: Autores

**Tabla 8.**  
**Piezas a fabricar**

<b>N.º DE ELEMENTO</b>	<b>PIEZA</b>	<b>FABRICACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>
1	Placa frontal	Doblado	1
2	Placa posterior	Doblado	1
3	Soporte ventilador	Impresión 3D	1
4	Banco de resistencias	Impresión 3D	1
5	Inicio tubo	Impresión 3D	1
6	Tubo interior	Corte	1
7	Tubo exterior	Corte	1
8	Tapa tubo	Impresión 3D	1
9	Soporte intermedio	Impresión 3D	1
10	Din rail V	Extrusión	1

Fuente: Autores

Para la fabricación de los tubos se usó acero cromado, el cual es un acero para trabajo en caliente, de gran resistencia al desgaste, buena tenacidad y alta resistencia a la formación de grietas por choque térmico.

Para el tubo exterior se usa tubo de 2.5 pulgadas y 30 mm de longitud (Figura 78).



Figura 78. **Tubo exterior**

Fuente: Autores

Para el tubo interior se usa tubo de 1 pulgada 3/4 y 30 mm de longitud (Figura 79).



Figura 79. **Tubo interior**

Fuente: Autores

Para el ensamblaje de los tubos se requiere de un soporte especial, lo cual implica un diseño innovador en cuanto a las prestaciones necesarias de dicho soporte, por lo cual se ha fabricado mediante impresión 3D. Ver Figura 80.

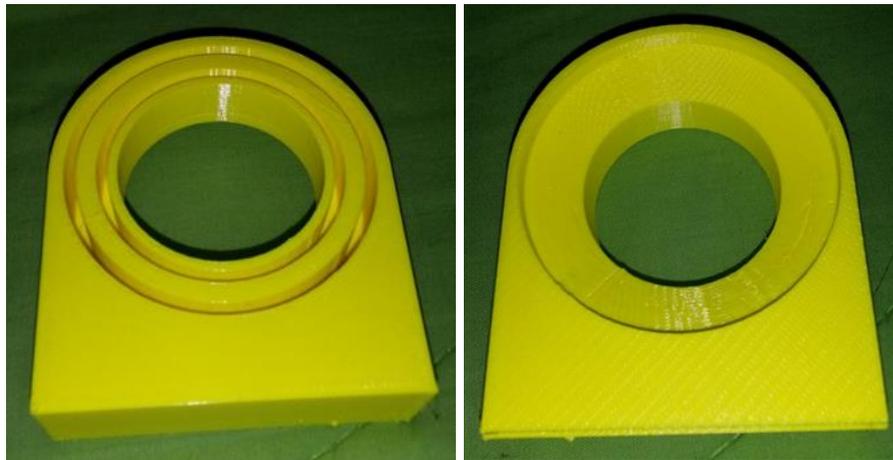


Figura 80. **Soportes para tubos**

Fuente: Autores

De esta forma se ensamblan los tubos dentro del soporte (Figura 81 y Figura 82).



Figura 81. **Ensamble de tubos**

Fuente: Autores



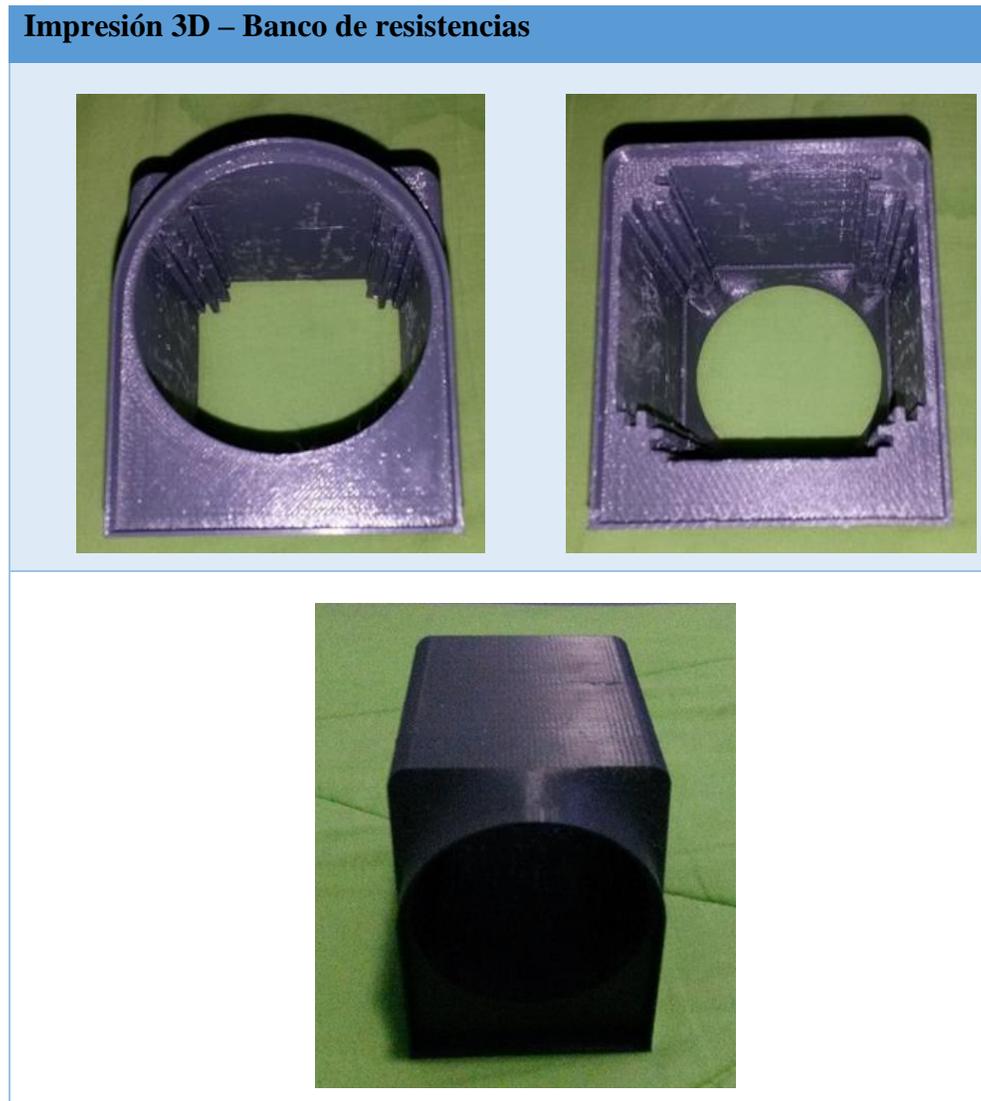
Figura 82. **Ensamblaje soporte-tubos**

Fuente: Autores

Además se ha diseñado un banco de resistencias para el calentamiento de la planta (Tabla 9).

**Tabla 9.**

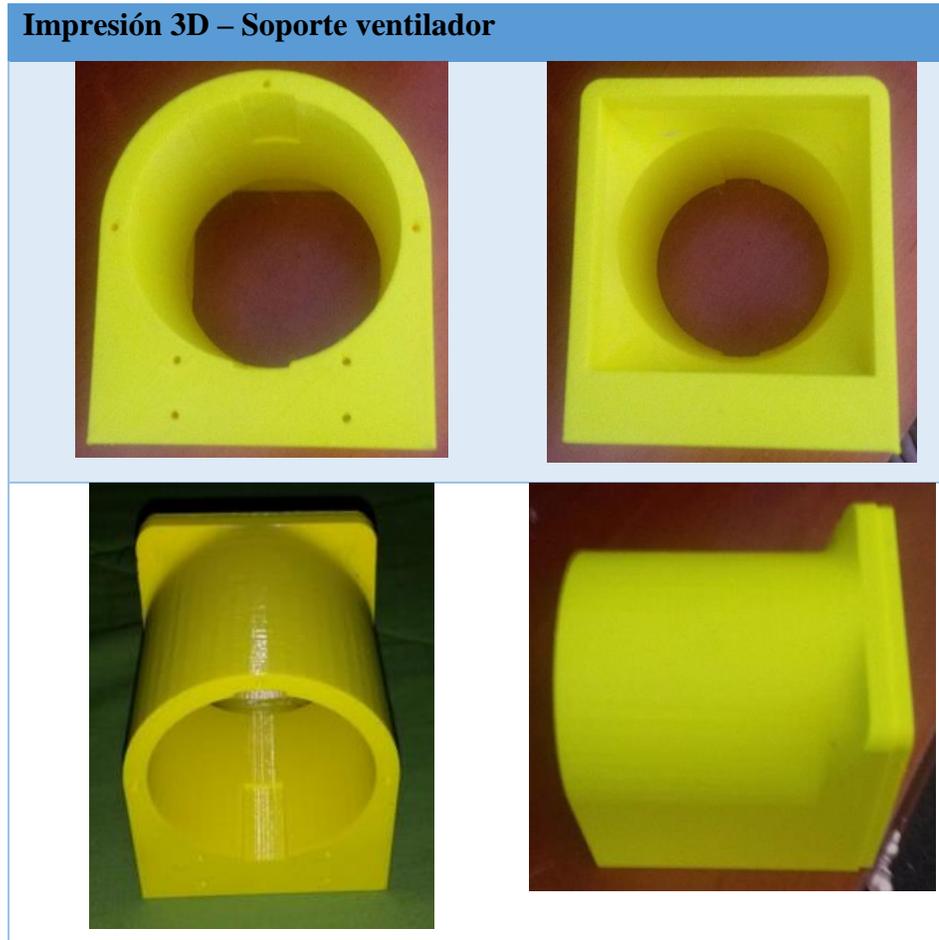
**Banco de resistencias**



Fuente: Autores

Para que exista una dispersión adecuada del flujo de temperatura se coloca un ventilador para el movimiento y recirculación de aire caliente (Tabla 10).

**Tabla 10.**  
**Soporte ventilador**



Fuente: Autores

Adicionalmente se requiere una tapa para los tubos para mantener el calor interno, esta se fabricó en ABS mediante impresión 3D (Figura 83).



Figura 83. **Tapa soporte de tubos**

Fuente: Autores

Finalmente se ensamblan todos los componentes incluyendo el riel Din para la colocación de borneras, además de un LCD para el monitoreo y visualización de las variables a controlar. Ver Figura 84.



Figura 84. **Módulo de temperatura**

Fuente: Autores

### 4.1.3 Módulo de Velocidad

En el apartado siguiente se indican las partes constitutivas (Figura 85) del módulo de velocidad, así como su historia tecnológica (Tabla 11).

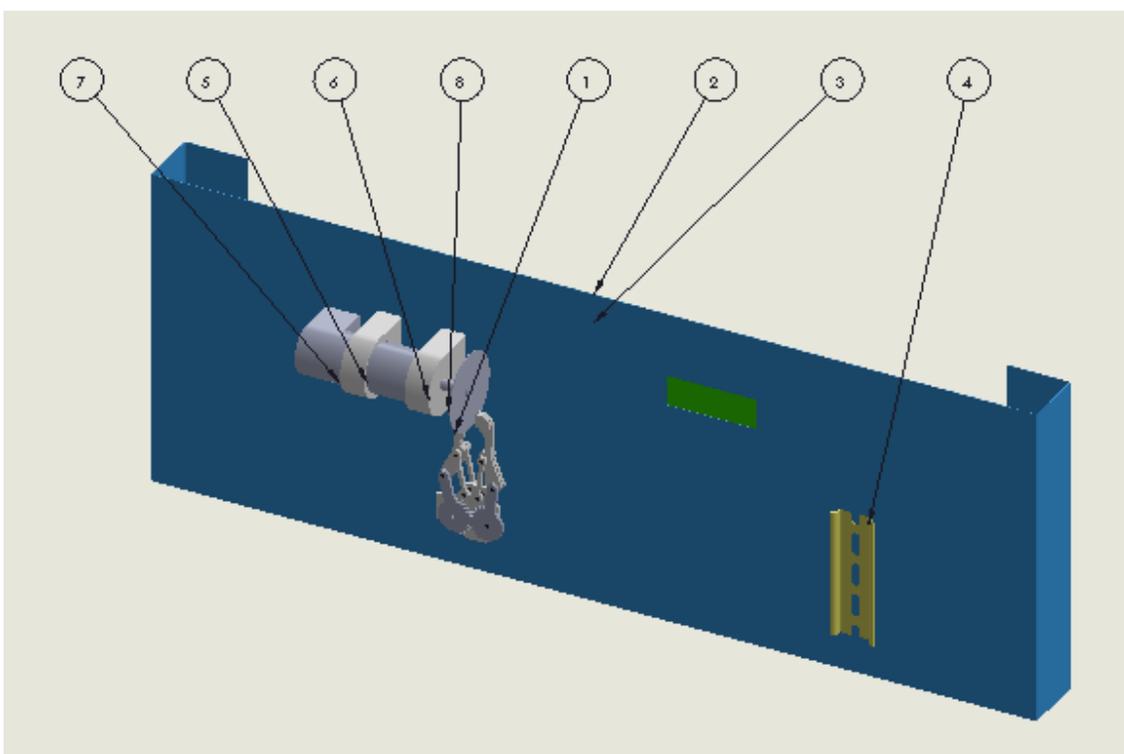


Figura 85. **Partes del Módulo de Velocidad**

Fuente: Autores

**Tabla 11.****Piezas de módulo de velocidad**

N.º DE ELEMENTO	PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Freno Mecánico		1
2	Placa frontal	Doblado	1
3	Placa posterior	Doblado	1
4	Din rail	Extrusión	1
5	Soporte motor-1	Impresión 3D	1
6	Soporte motor-2	Impresión 3D	1
7	Motor DC		1
8	Disco de frenado	Maquinado	1

Fuente: Autores

El elemento fundamental dentro del módulo de velocidad es el motor, para lo cual es necesario asegurar su estabilidad dentro del módulo (Figura 86).



Figura 86. **Motor de corriente directa**

Fuente: Autores

Para asegurar el motor se fabricaron bridas fabricadas mediante impresión 3D en ABS, las cuales se muestran en la Figura 87.

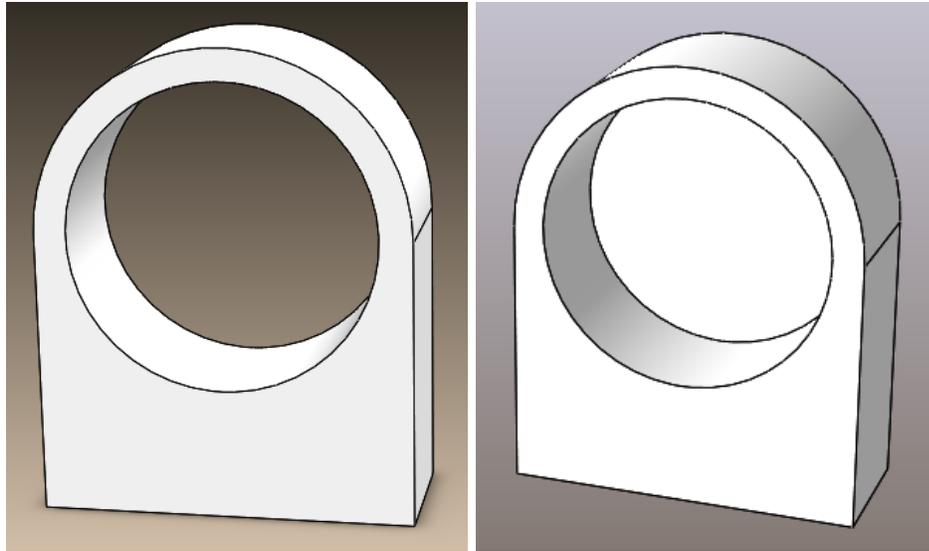


Figura 87. **Soportes de motor**

Fuente: Autores

El disco de frenado fue diseñado para que se acople fácilmente al motor mediante una unión empennada al eje del motor (Figura 88).



Figura 88. **Disco de frenado**

Fuente: Autores

Para ejercer una fuerza de interferencia sobre el motor se utiliza un mecanismo controlado mediante servomotor (Figura 89), el cual abrirá o cerrará las pinzas de acuerdo al sistema de control seleccionado.

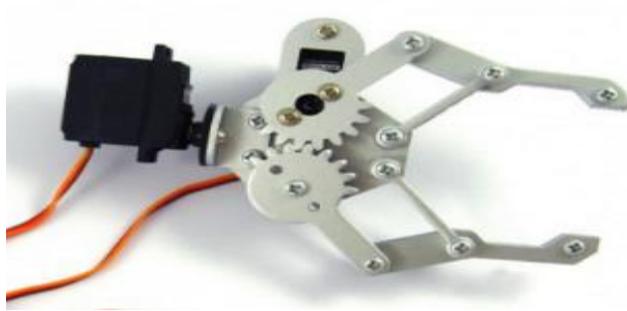


Figura 89. **Freno mecánico**

Fuente: Autores

Finalmente se ensamblan todos los componentes incluyendo el riel Din para la colocación de borneras, además de un LCD para el monitoreo y visualización de las variables a controlar. Ver Figura 90.



Figura 90. **Módulo de velocidad**

Fuente: Autores

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y/O ELECTRÓNICOS

### 4.2.1 Sensores

Para el módulo de temperatura se requiere censar constantemente la temperatura al interior de la planta, por lo que se utiliza sensores LM35, los cuales están dispuestos dentro del tubo como se muestra en la Figura 91.



Figura 91. **Sensores de temperatura**

Fuente: Autores

#### 4.2.2 Actuadores

Se implementa un ventilador dentro del soporte plástico para el transporte de flujo de aire dentro de los tubos cromados (Figura 92).

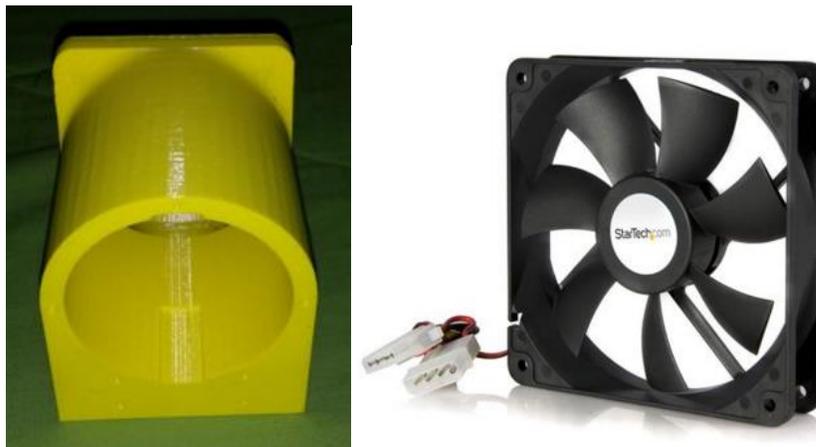


Figura 92. **Ensamble Soporte – Ventilador**

Fuente: Autores

Para el módulo de control de velocidad se diseñó una placa de circuitos (Figura 93) para obtener la señal de control.



Figura 93. **Placa de circuito impreso para el control de velocidad**

Fuente: Autores

La placa del circuito de velocidad tiene un microcontrolador PIC 18f4550, el cual realiza 3 funciones principales:

- Por medio del encoder embebido en el motor toma datos de velocidad del motor.
- La segunda función es tomar los datos del PLC por medio del conversor análogo digital que tiene el PIC, el rango de entrada es de 0 a 5 VDC.
- Y la tercera función es por medio de PWM transmitir la velocidad al motor.



El módulo de control de control se conecta con un sistema de seguridad típico para instalaciones eléctricas controladas por un PLC (Figura 96) con fuente de alimentación incluida, así como módulo de entradas analógicas corriente/voltaje, módulo de salidas VAC/VDC con salida a relé.

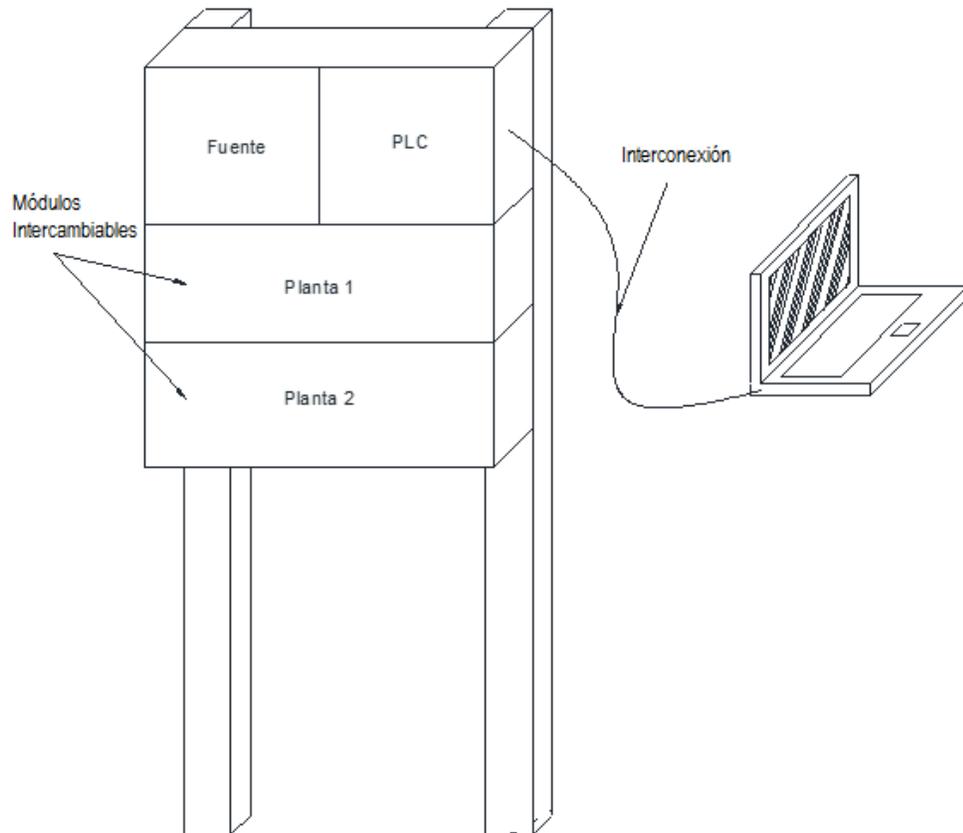


Figura 96. **Esquema de conexión general**

Fuente: Autores

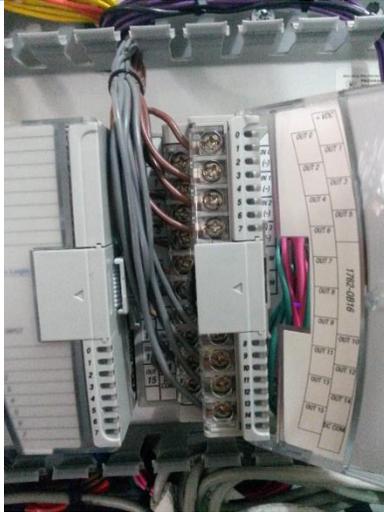
#### 4.2.4 Cableado

La interconexión de componentes eléctricos/electrónicos y cableado se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12.

## Cableado circuitos de control al PLC

## Interconexion Sistema electrónico



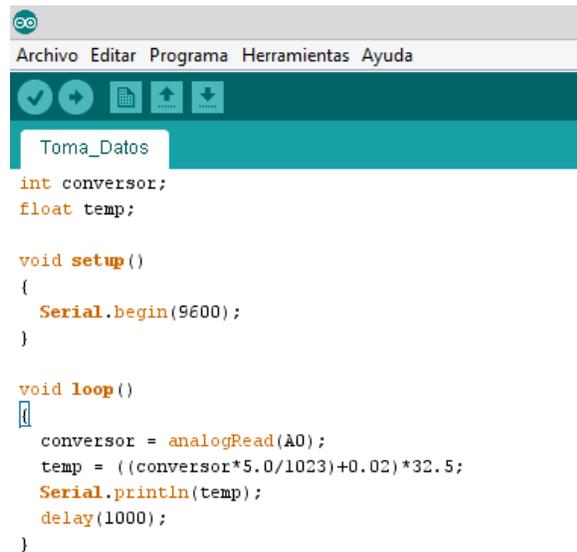
Fuente: Autores

## 4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

### 4.3.1 Modelamiento planta de temperatura

Se ha optado por realizar la comunicación con la PC mediante el puerto serial empleando el Protocolo de Comunicación RS-232, a través del microcontrolador Arduino se adquiere la señal de los sensores de temperatura filtrados previamente.

En la Figura 97 se muestra el programa realizado en la plataforma Arduino para la toma de datos.



```

int conversor;
float temp;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  conversor = analogRead(A0);
  temp = ((conversor*5.0/1023)+0.02)*32.5;
  Serial.println(temp);
  delay(1000);
}

```

Figura 97. Programación para obtención de datos

Fuente: Autores

Para identificar el modelo matemático que gobierna el sistema del módulo de temperatura, se adquiere los datos de entrada y salida durante un intervalo de tiempo y con un tiempo de muestreo preestablecido.

La transmisión de datos entre la tarjeta Arduino y el computador se realiza mediante comunicación serial, el cable USB es la interfaz física de comunicación. Mediante el entorno de comunicación serial propio de Arduino se obtienen los datos que se indica en la Figura 98.

1	24.16	28	38.46	61	54.98	94	64.67	127	70.38	160	74.83	193	77.53	226	80.39	259	81.66
2	24.32	29	38.93	62	55.13	95	64.82	128	70.70	161	74.51	194	78.01	227	80.71	260	81.98
3	24.79	30	39.57	63	55.61	96	64.98	129	70.54	162	74.83	195	77.69	228	80.07	261	81.82
4	25.11	31	40.20	64	55.93	97	65.30	130	70.54	163	74.67	196	78.01	229	80.39	262	82.14
5	25.43	32	40.68	65	56.25	98	65.62	131	70.86	164	74.99	197	77.85	230	80.39	263	81.82
6	25.75	33	41.31	66	56.56	99	65.78	132	71.18	165	74.99	198	78.17	231	80.39	264	81.98
7	25.91	34	41.79	67	57.04	100	65.94	133	71.18	166	75.47	199	77.85	232	80.39	265	82.30
8	26.70	35	42.43	68	57.83	101	65.78	134	71.34	167	75.31	200	78.17	233	80.55	266	81.98
9	26.70	36	43.06	69	57.99	102	66.09	135	71.34	168	75.47	201	78.33	234	80.39	267	82.46
10	27.02	37	43.38	70	58.47	103	66.41	136	71.65	169	75.63	202	78.48	235	80.55	268	82.30
11	27.65	38	44.17	71	58.95	104	66.57	137	71.81	170	75.94	203	78.80	236	80.55	269	82.14
12	27.65	39	44.65	72	59.26	105	67.05	138	71.81	171	75.63	204	78.48	237	80.55	270	82.46
13	27.97	40	45.29	73	59.74	106	67.05	139	71.97	172	75.94	205	78.48	238	80.71	271	82.93
14	28.45	41	45.76	74	59.42	107	67.05	140	71.97	173	76.10	206	78.48	239	80.87	272	82.46
15	29.24	42	46.24	75	59.74	108	67.21	141	72.29	174	76.10	207	78.48	240	80.55	273	82.46
16	29.72	43	46.72	76	60.06	109	67.37	142	72.61	175	76.10	208	78.48	241	80.87	274	
17	30.51	44	47.35	77	60.22	110	68.16	143	73.08	176	76.26	209	78.96	242	81.03	275	
18	31.15	45	47.51	78	60.69	111	67.84	144	72.45	177	76.42	210	79.12	243	80.87	276	
19	31.78	46	48.30	79	61.01	112	67.84	145	72.93	178	76.42	211	78.96	244	81.19	277	
20	32.10	47	48.62	80	61.17	113	67.84	146	73.08	179	76.58	212	79.28	245	81.19	278	
21	32.10	48	49.26	81	61.49	114	68.32	147	73.88	180	76.58	213	78.96	246	81.98	279	
22	33.21	49	49.57	82	61.81	115	68.32	148	73.56	181	76.42	214	79.12	247	81.82	280	
23	33.69	50	50.05	83	62.12	116	68.64	149	73.08	182	76.58	215	79.28	248	81.34	281	
24	34.17	51	50.69	84	62.28	117	68.80	150	73.56	183	76.74	216	79.28	249	81.50	282	
25	34.96	52	51.32	85	62.44	118	69.11	151	73.56	184	76.90	217	79.60	250	81.34	283	
26	35.44	53	51.32	86	62.92	119	68.95	152	73.40	185	77.21	218	79.44	251	81.50	284	
27	35.91	54	51.64	87	63.08	120	69.27	153	73.72	186	77.21	219	79.60	252	81.50	285	
28	35.91	55	52.28	88	63.39	121	69.59	154	73.56	187	77.69	220	79.44	253	81.34	286	
29	36.71	56	52.91	89	63.39	122	69.75	155	73.88	188	77.21	221	79.91	254	81.82	287	
30	37.50	57	53.23	90	63.71	123	69.91	156	74.35	189	77.06	222	79.60	255	81.66	288	
31	37.82	58	53.55	91	63.71	124	70.07	157	74.04	190	77.21	223	79.76	256	81.98	289	
32	38.46	59	53.86	92	64.03	125	70.07	158	74.35	191	77.69	224	79.91	257	81.50	290	
33	38.93	60	54.34	93	64.35	126	70.07	159	74.35	192	77.21	225	80.23	258	81.98	291	
34	39.57	61	54.98	94	64.67	127	70.38	160	74.83	193	77.53	226	80.39	259	81.66	292	

Figura 98. Datos adquiridos en Excel

Fuente: Autores

Estos datos se ingresan como vectores en el entorno de Matlab para determinar la función de transferencia. Ver Figura 99 hasta Figura 105.

### Programa Matlab

- Vector de salida datos Excel
- Numero de datos 273
- Vectores de entrada 5v

For i=1:273

x(i)=273

end

x='x';

## Modelamiento Matlab Ident

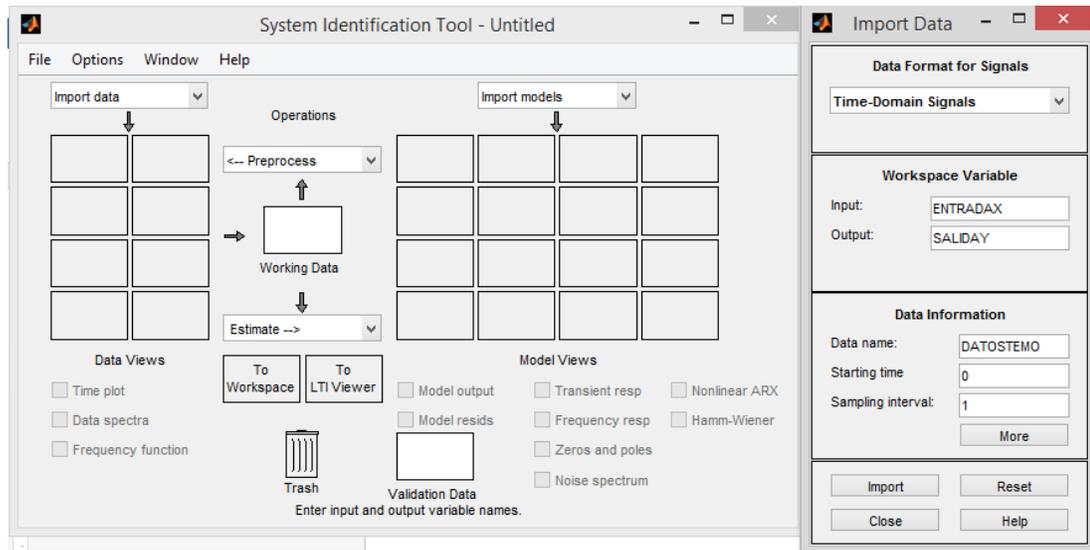


Figura 99. Ident – Herramienta de identificación de sistemas

Fuente: Autores

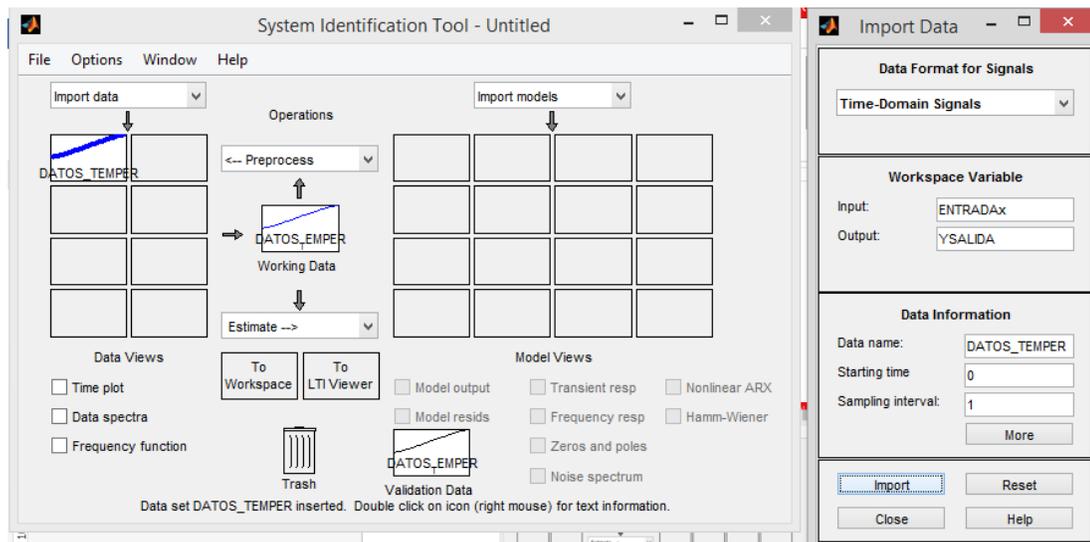


Figura 100. Entorno Ident

Fuente: Autores

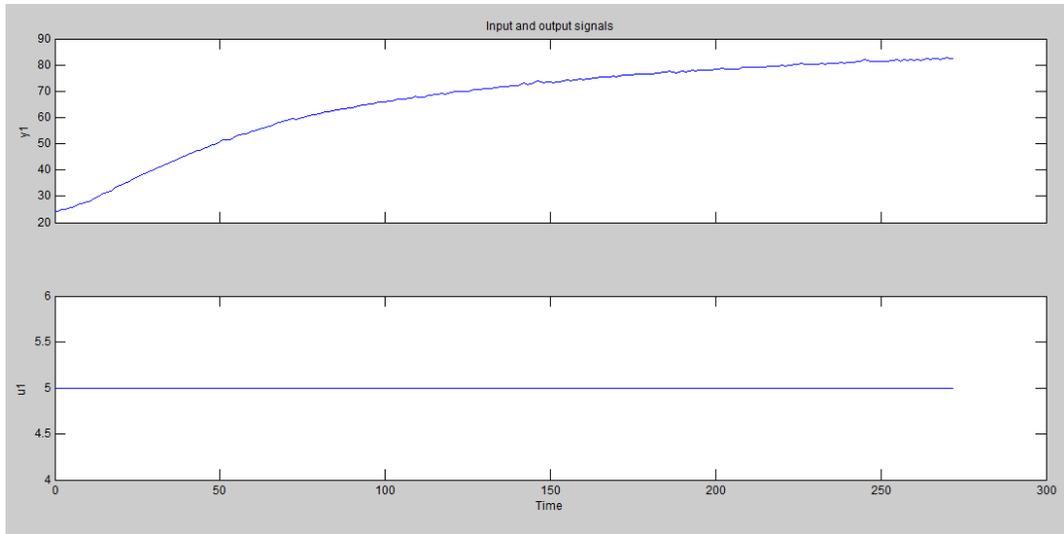


Figura 101. Señales de entrada y salida

Fuente: Autores

## PROCESS MODEL

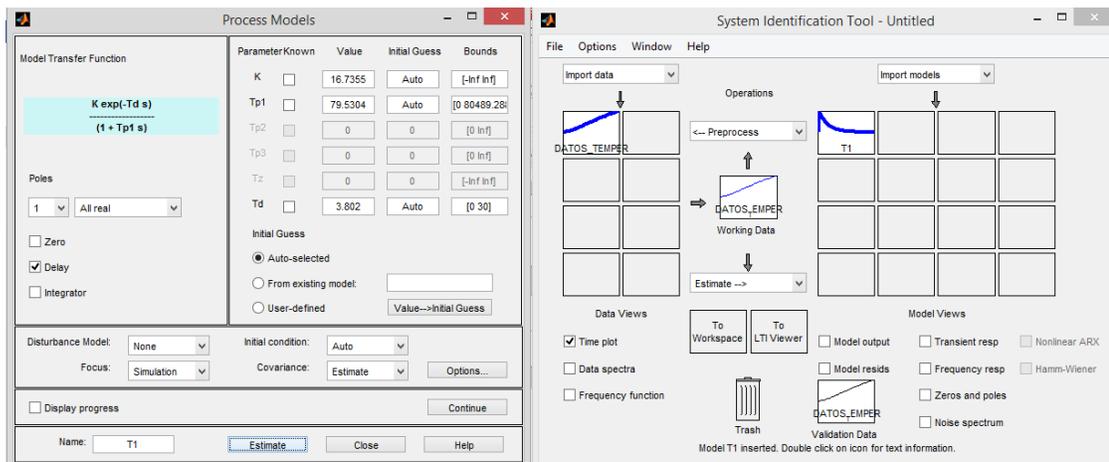


Figura 102. Modelo de proceso – Ident

Fuente: Autores

Valores de K

- TP1
- TD

## Respuesta al escalón

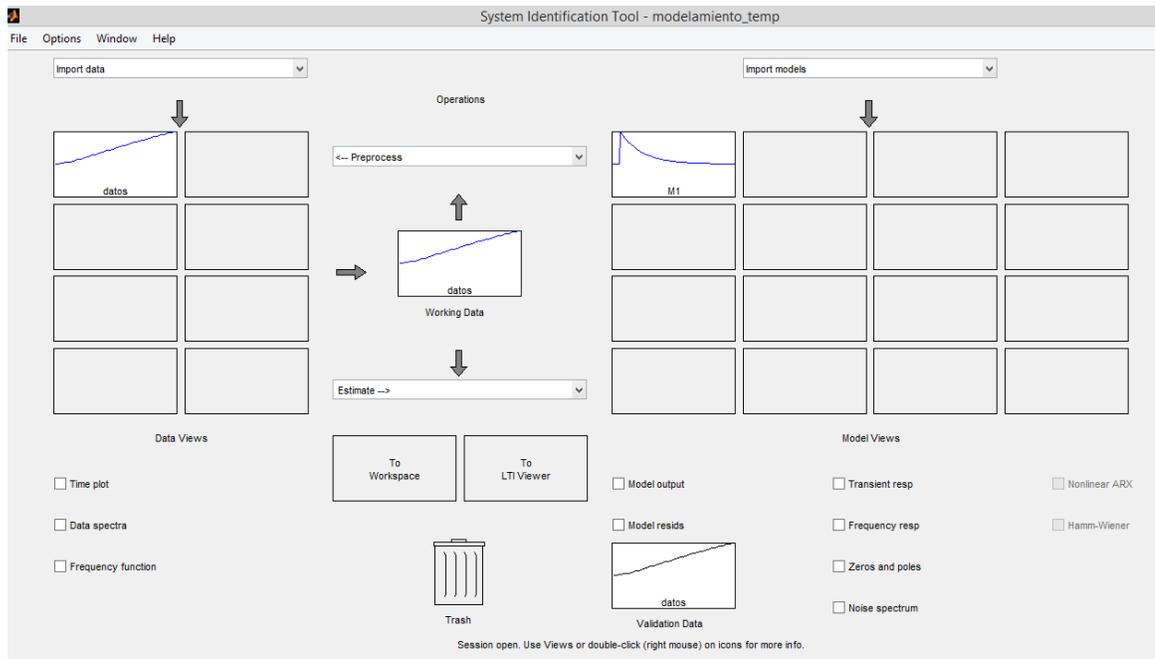


Figura 103. Identificación del sistema

Fuente: Autores

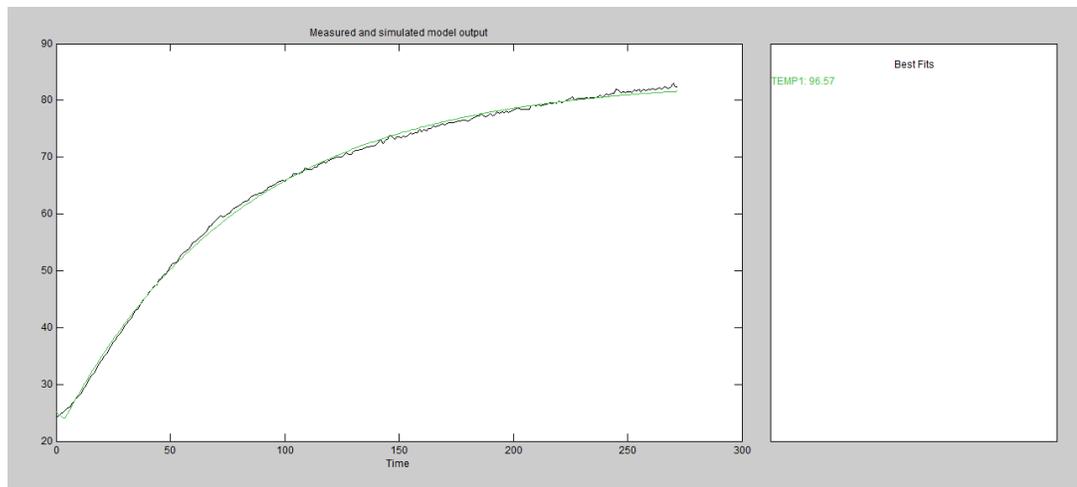


Figura 104. Aproximación del sistema de temperatura

Fuente: Autores

Porcentaje de aproximación: 96% por lo tanto aceptado.

## Modelado de la planta: función de transferencia

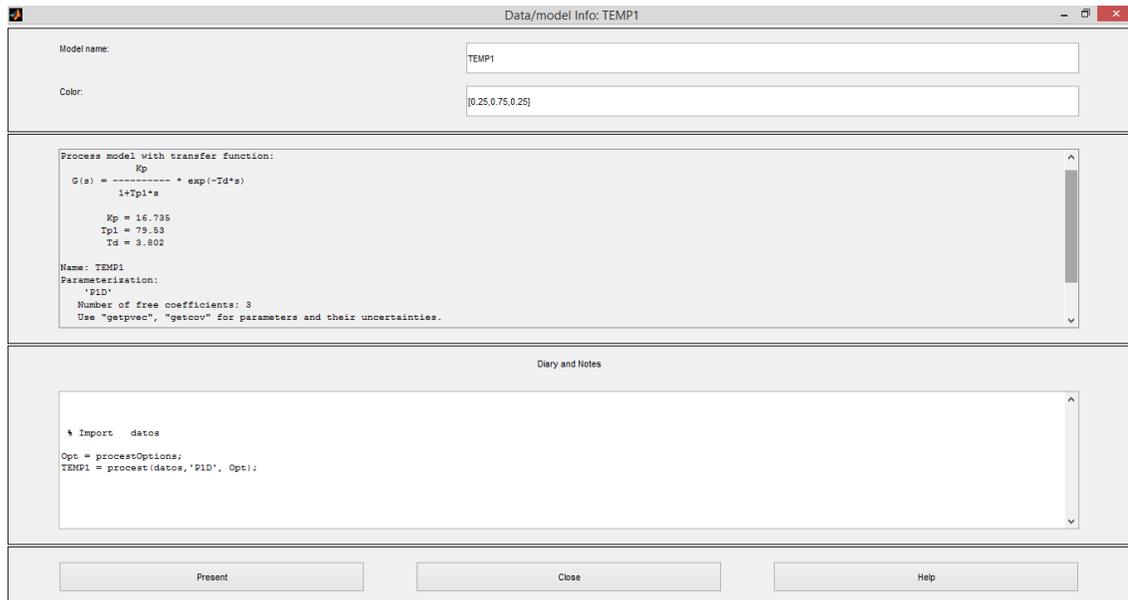


Figura 105. Función de transferencia

Fuente: Autores

Constantes del controlador requeridas por el PLC

```

>> CONTROLADORPID_TEMPERATURA

K =

    16.7350

T =

    79.5300

L =

    30

KP =

    2.3859

L =

    30

KP =

    2.3859

TI =

    100

TIPLC =

    1.6667
  
```

Figura 106. Constantes para el PLC

Fuente: Autores

### 4.3.2 Modelamiento planta de temperatura

Se ha optado por realizar la comunicación con la PC mediante el puerto serial empleando el Protocolo de Comunicación RS-232, a través del microcontrolador Arduino se adquiere la señal de los sensores de temperatura filtrados previamente.

Para identificar el modelo matemático que gobierna el sistema del módulo de temperatura, se adquiere los datos de entrada y salida durante un intervalo de tiempo y con un tiempo de muestreo preestablecido. Ver Figura 108 - Figura 115.

La transmisión de datos entre la tarjeta Arduino y el computador se realiza mediante comunicación serial, el cable USB es la interfaz física de comunicación. Mediante el entorno de comunicación serial propio de Arduino se obtienen los datos que se indican a continuación.

A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A							
0	0	29	1791	58	2325	86	2677	115	2733	144	2750	172	2812	200	2865	228	3000	256	2967
184	52	30	1777	59	2346	87	2680	116	2653	145	2771	173	2956	201	2873	229	3000	257	2982
197	170	31	1788	60	2337	88	2662	117	2686	146	2750	174	2829	202	2859	230	3000	258	2979
197	49	32	1777	61	2419	89	2551	118	2733	147	2762	175	2812	203	2894	231	2935	259	2961
197	49	33	1800	62	2431	90	2554	119	2750	148	2759	176	2835	204	2897	232	2929	260	3000
184	117	34	1785	63	2422	91	2545	120	2759	149	2756	177	2826	205	2903	233	2929	261	3000
193	52	35	1829	64	2413	92	2557	121	2674	150	2771	178	2856	206	2903	234	3000	262	3000
179	49	36	2041	65	2407	93	2554	122	2800	151	2762	179	2888	207	2894	235	3000	263	2988
175	111	37	2041	66	2404	94	2548	123	2692	152	2765	180	2853	208	2891	236	2926	264	2982
175	46	38	2052	67	2413	95	2580	124	2683	153	2777	181	2994	209	2970	237	3000	265	2994
933	762	39	2043	68	2401	96	2583	125	2680	154	2788	182	2938	210	2894	238	3000	266	2979
915	780	40	2143	69	2466	97	2586	126	2686	155	2809	183	2847	211	2903	239	3000	267	3000
902	724	41	2137	70	2460	98	2577	127	2683	156	2780	184	2847	212	2891	240	3000	268	2991
965	771	42	2067	71	2454	99	2630	128	2706	157	2794	185	2850	213	2894	241	3000	269	2979
888	724	43	2052	72	2448	100	2586	129	2715	158	2785	186	2865	214	2894	242	2941	270	3000
911	771	44	2214	73	2551	101	2583	130	2718	159	2782	187	2879	215	2909	243	2944	271	3000
781	721	45	2228	74	2577	102	2580	131	2703	160	2780	188	2920	216	2920	244	2941	272	3000
879	765	46	2225	75	2586	103	2607	132	2697	161	2818	189	2868	217	2923	245	2947	273	3000
902	1390	47	2246	76	2571	104	2612	133	2700	162	2809	190	2932	218	2903	246	2944	274	2982
1930	1375	48	2322	77	2565	105	2624	134	2700	163	2806	191	2865	219	2897	247	2979	275	3000
2011	1413	49	2217	78	2501	106	2607	135	2700	164	2812	192	2941	220	2935	248	2953	276	3000
1898	1369	50	2217	79	2598	107	2612	136	2736	165	2800	193	2865	221	2926	249	3000	277	3000
1966	1348	51	2208	80	2630	108	2621	137	2741	166	2800	194	3000	222	2941	250	2938	278	3000
1907	1401	52	2219	81	2615	109	2677	138	2739	167	2803	195	2865	223	2914	251	2973	279	3000
1975	1369	53	2334	82	2586	110	2674	139	2739	168	2920	196	2994	224	3000	252	3000	280	2997
1975	1436	54	2328	83	2501	111	2659	140	2736	169	2803	197	2868	225	2914	253	2953	281	2994
1885	1366	55	2337	84	2510	112	2780	141	2739	170	2900	198	2868	226	2923	254	2970	282	3000
2675	1771	56	2328	85	2501	113	2759	142	2744	171	2821	199	2870	227	2917	255	2991	283	2994
2783	1791	57	2334	86	2677	114	2744	143	2741	172	2812	200	2865	228	3000	256	2967	284	2994

Figura 107. Datos adquiridos en Excel

Fuente: Autores

Estos datos se ingresan como vectores en el entorno de Matlab para determinar la función de transferencia.

#### Programa Matlab

- Vector de entrada datos 127xcel
- Numero de datos 286

- Vector de entrada 5v

```
for i=1:286
```

```
  x(i)=286
```

```
end
```

```
x='x';
```

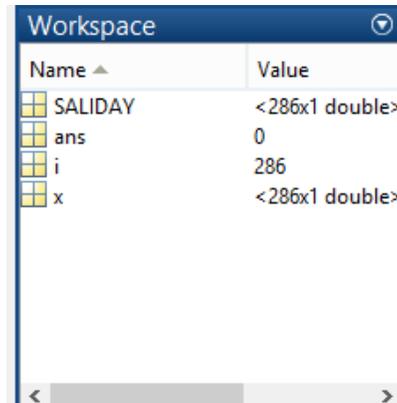


Figura 108. **Variables**

Fuente: Autores

## Modelamiento Matlab Ident

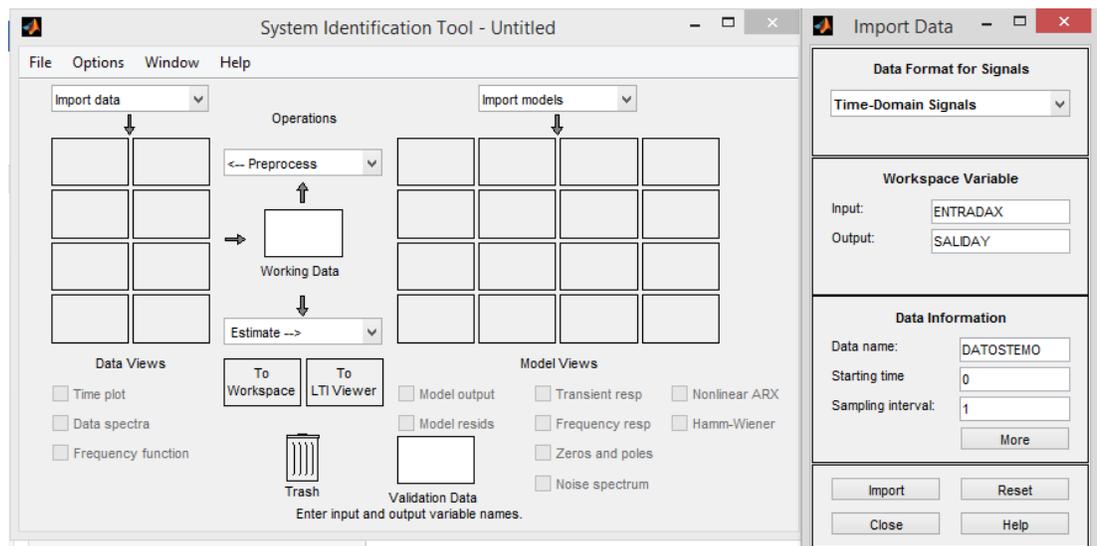


Figura 109. **Ident – Herramienta de identificación de sistemas**

Fuente: Autores

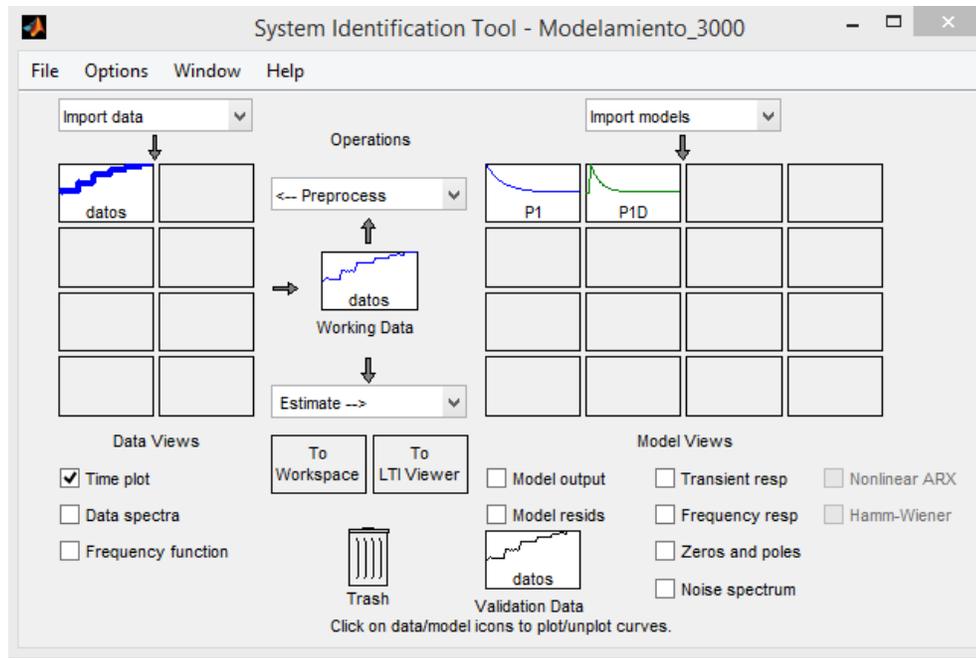


Figura 110. Entorno Ident

Fuente: Autores

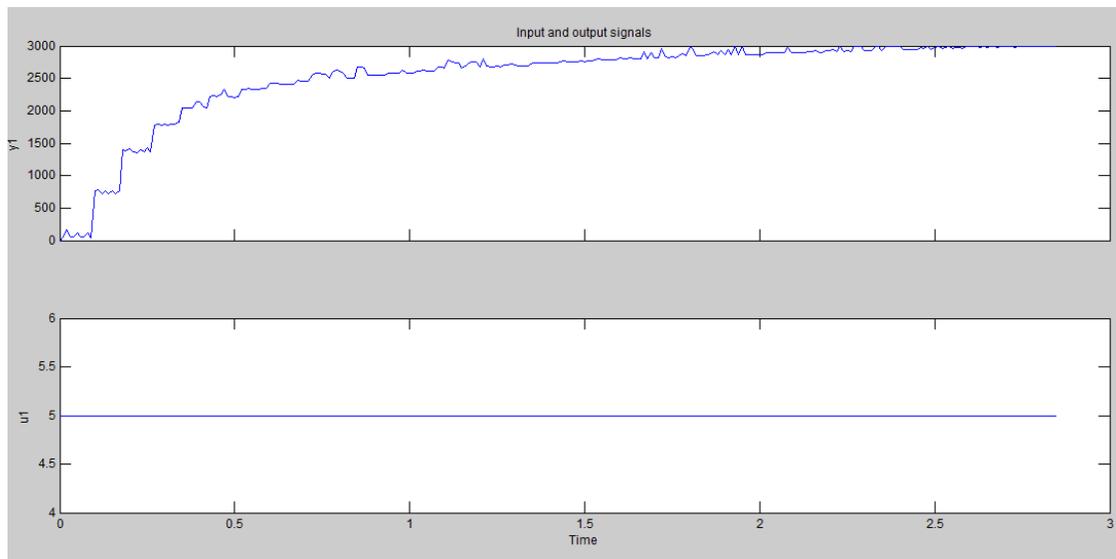


Figura 111. Señales de entrada y salida

Fuente: Autores

## PROCESS MODEL

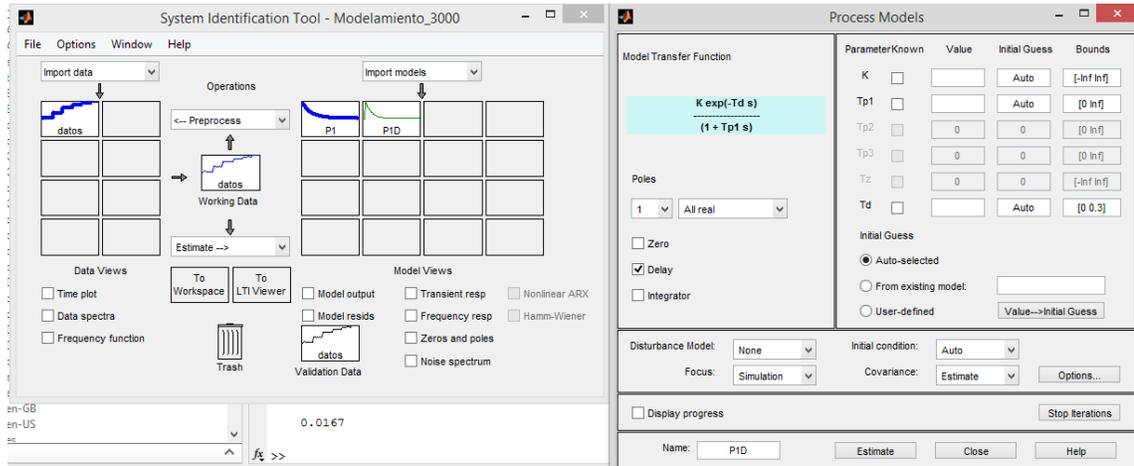


Figura 112. Modelo de proceso – Ident

Fuente: Autores

Valores de K

- TP1
- TD

## Respuesta al escalón

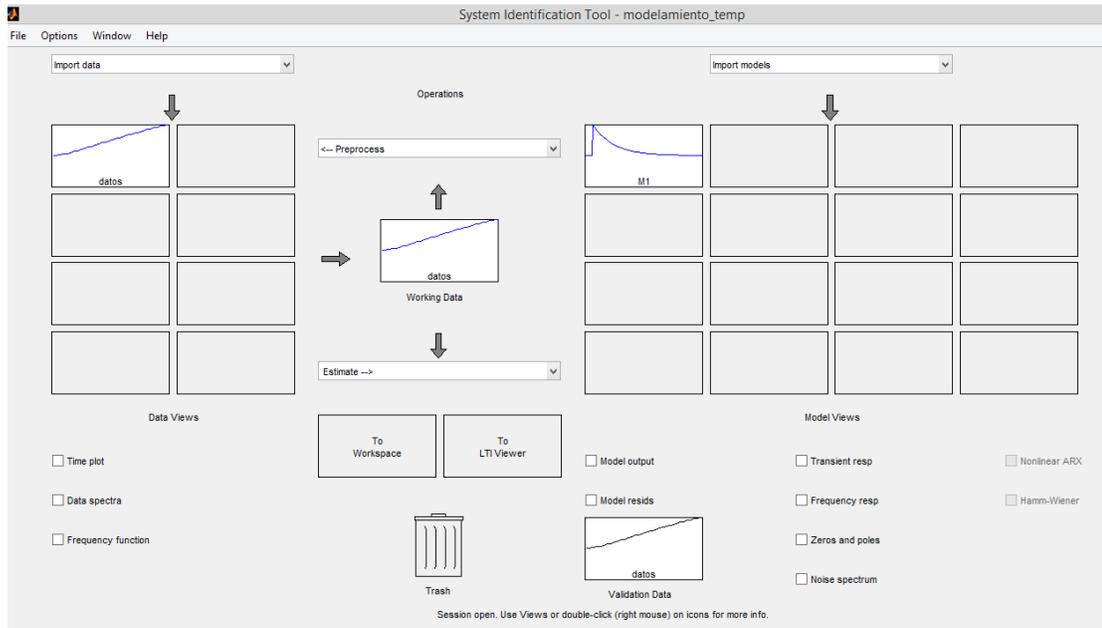


Figura 113. Identificación del sistema

Fuente: Autores

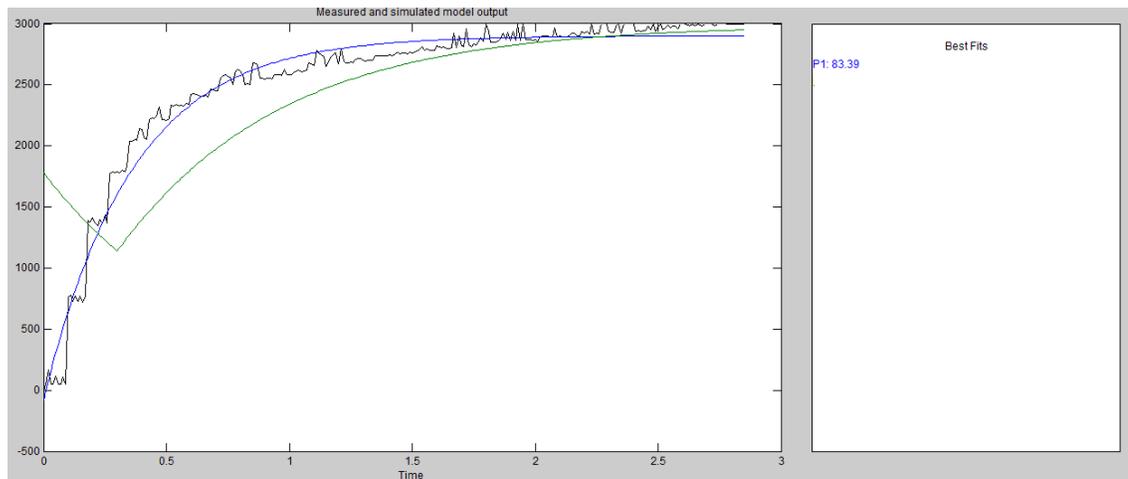


Figura 114. Aproximación del sistema de temperatura

Fuente: Autores

Porcentaje de aproximación: 86% por lo tanto aceptado.

### Modelado de la planta: función de transferencia

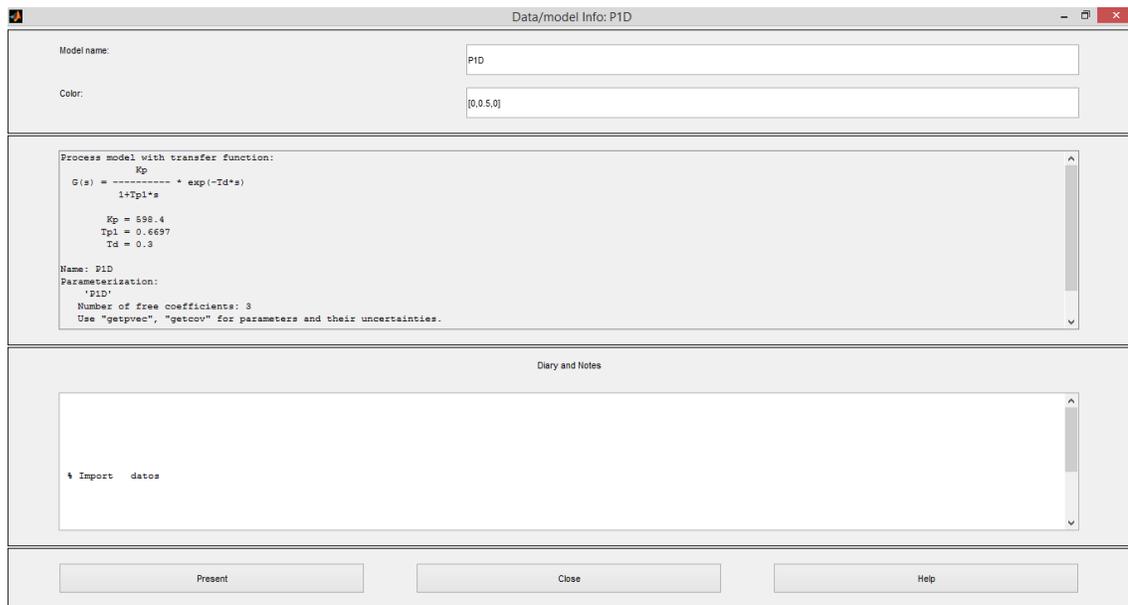


Figura 115. Función de transferencia

Fuente: Autores

Constantes del controlador requeridas por el PLC obtenidas en Matlab, ver Figura 116.

```
>> CONTROLADORPID_VELOCIDAD  
  
K =  
    598.4000  
  
T =  
    0.6697  
  
L =  
    0.3000  
  
KP =  
    2.0091  
  
TI =  
    1  
  
T =  
    0.6697  
  
L =  
    0.3000  
  
KP =  
    2.0091  
  
TI =  
    1  
  
TIPLC =  
    0.0167
```

Figura 116. Constantes para el PLC

Fuente: Autores

## 4.4 PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

### 4.4.1 Diagramas de flujo programación del PIC

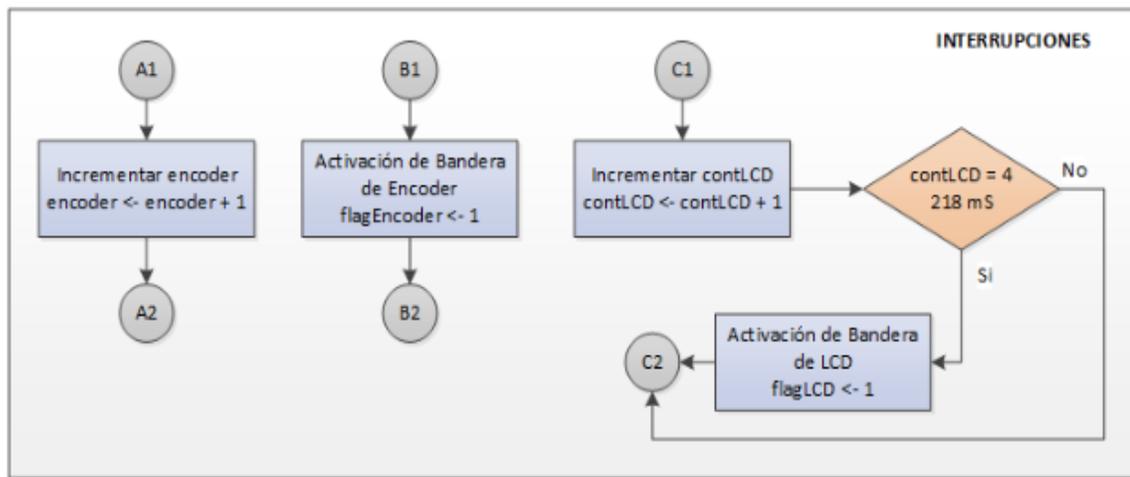


Figura 117. Diagramas de flujo programación del PIC - Interrupciones

Fuente: Autores

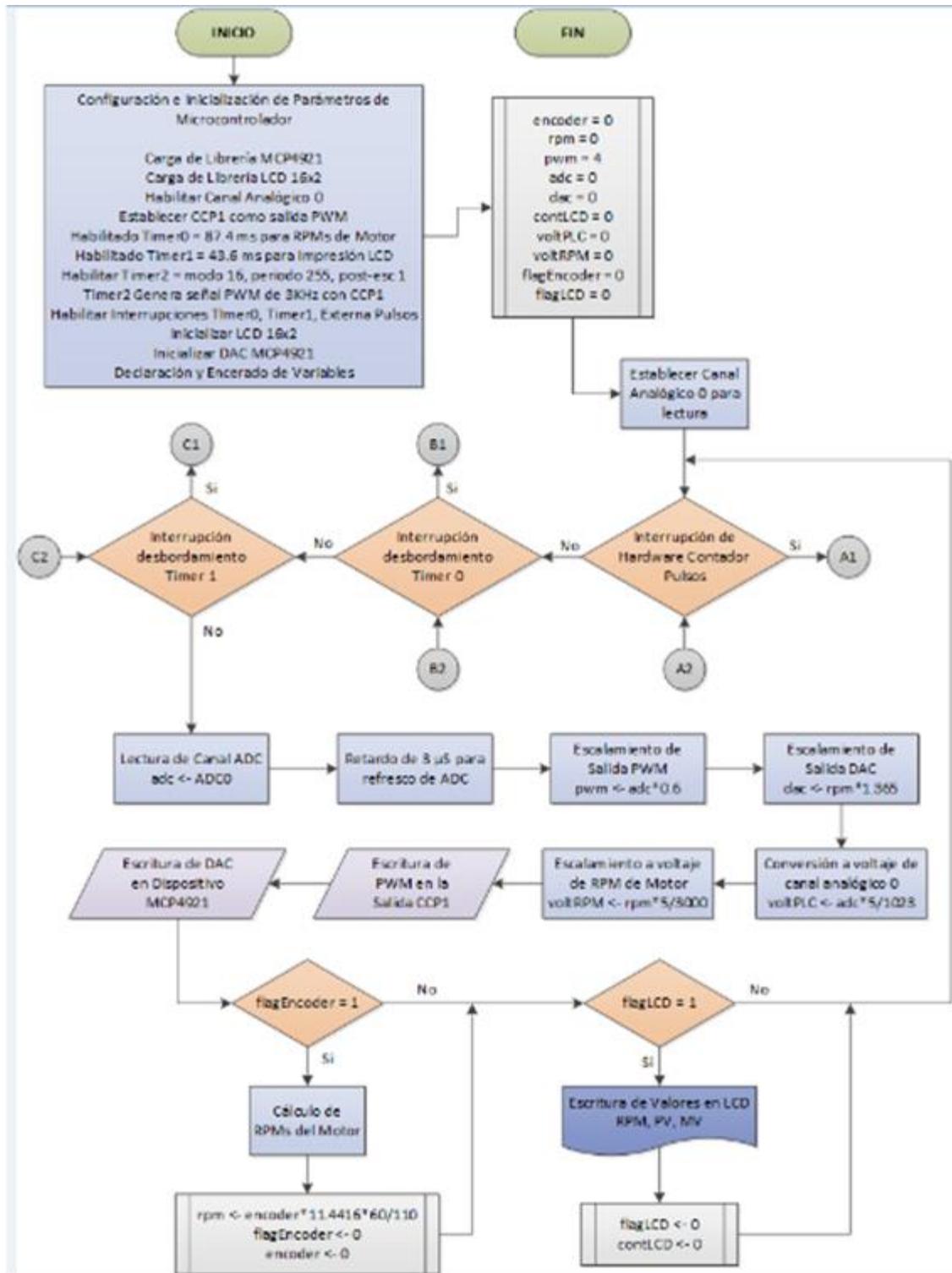


Figura 118. Diagramas de flujo programación del PIC

Fuente: Autores

#### 4.4.2 Diagramas de flujo programación del arduino

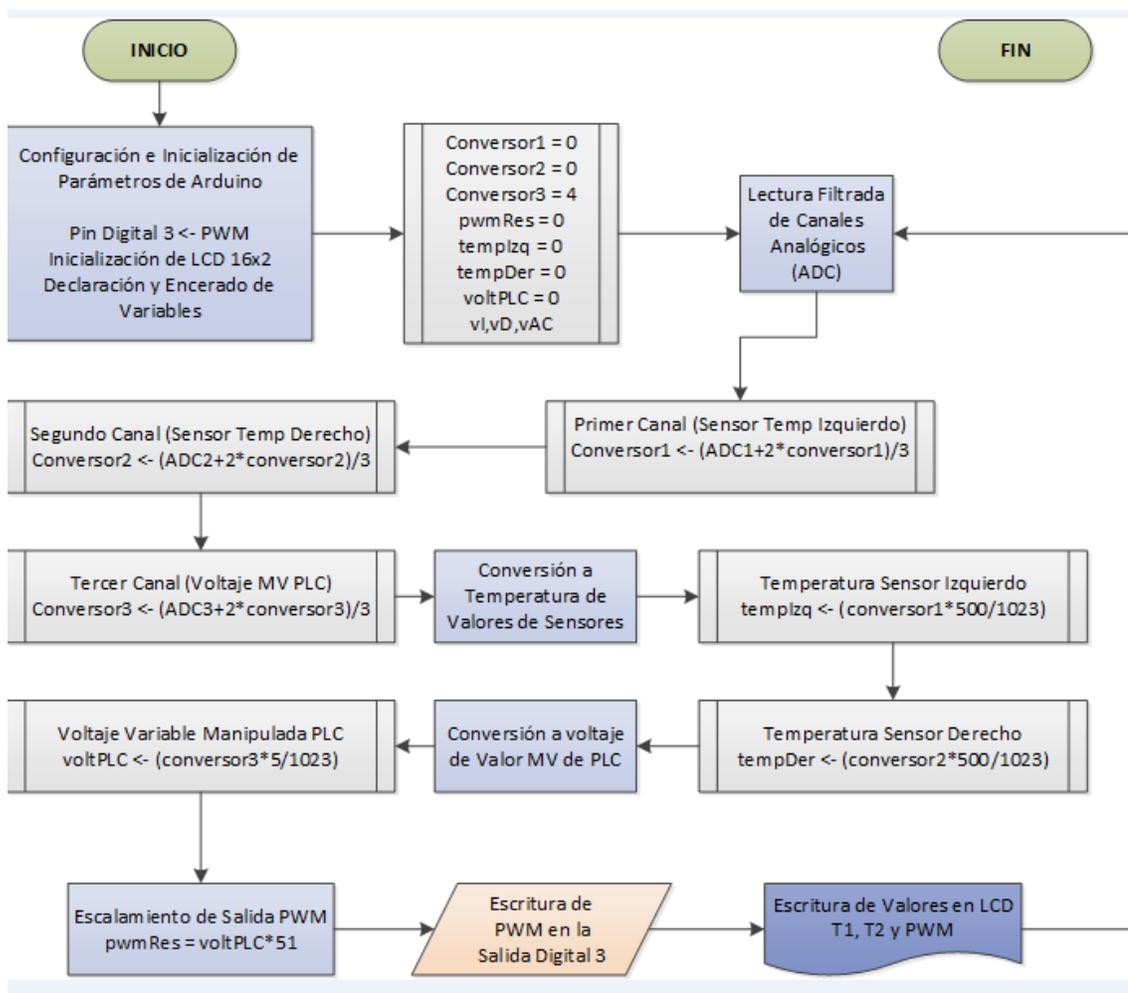


Figura 119. Diagramas de flujo programación del Arduino

Fuente: Autores

## **CAPÍTULO V**

### **GUÍA DE PRÁCTICAS**

En el desarrollo del presente capítulo se detalla los resultados obtenidos y procesados por parte de un profesional estadístico, así como se da una breve descripción de los métodos usados por el estadista.

#### **5.1 PRACTICA 1: CONTROL ON OFF.**

##### **5.1.1 Objetivos**

- Desarrollar la técnica de control On Off para las plantas de Velocidad y temperatura.
- Fundamentar Los conocimientos adquiridos en clase referentes a la técnica de control antes mencionada.
- Realizar el análisis del Control On-off mediante un lazo de histéresis
- Determinar las ventajas y desventajas del control On-Off.

##### **5.1.2 Materiales y Equipos**

- Módulo De Control, PLC Allen Bradley Micrologix 1100, con módulos de expansión de entradas y salidas analógicas.
- Módulo de Velocidad o temperatura.
- Cables de Conexión.
- RS Logix 500
- RS Link
- In Touch

### 5.1.3 Marco Teórico

La acción de control Encendido-Apagado (Figura 120) es también muy conocida por su nombre en inglés On-Off. Para esta acción de control el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que en la mayoría de los casos son apagado y encendido. Este control es relativamente simple y barato, por lo cual su uso es muy extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Si se tiene una señal de salida del controlador  $u(t)$  y una señal de error  $e(t)$ , en el control de dos posiciones, la señal  $u(t)$  permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de error es positiva o negativa. De este modo:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) < 0$$

Donde  $U_1$  y  $U_2$  son constantes. Por lo general, el valor mínimo de  $U_2$  es cero o menos  $U_1$ .

La siguiente figura muestra el diagrama a bloques de un controlador Encendido-Apagado.

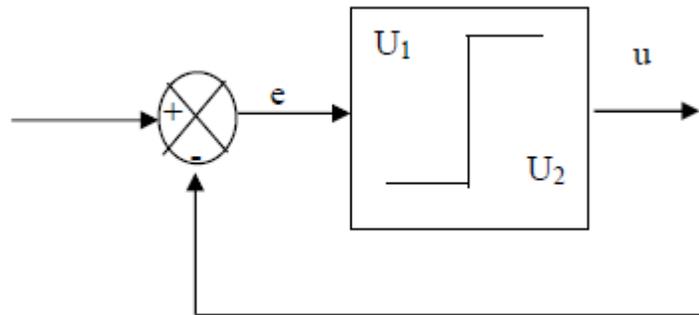


Figura 120. **Control Encendido-Apagado.**

Fuente: Autores

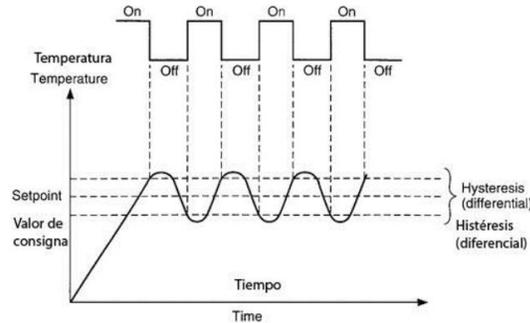


Figura 3. Funcionamiento control ON-OFF con histéresis

### Figura 121. Lazo de histéresis en el control ON-OFF.

Fuente: Autores

#### 5.1.4 Planteamiento

##### a) Planta de Temperatura

El procesamiento de la madera consiste en una serie de pasos que van desde el corte del producto al secado del mismo, con el módulo de temperatura se puede simular varios tipos de plantas y en este caso se utilizara para simular un horno de secado de madera, la madera como producto orgánico necesita cierta temperatura para evitar que se queme y a su vez extraer la humedad sobrante.

El Horno consta de 3 componentes, un ventilador, una niquelina que se controla por medio de una salida análoga, y un sensor que mide la temperatura adentro del tubo. Este sensor envía una señal analógica que puede ser medida con entradas del plc.

Por medio de una interfaz HMI se busca encender el horno hasta cierta temperatura y mantenerlo en un rango cercano a dicho parámetro, no se requiere exactitud, el rango será fijado en la interfaz y se utilizara un botón de encendido o apagado que puede ser físico o por software.

Las especificaciones de desempeño del controlador serán asignadas por el tutor.

### 5.1.5 Procedimiento

Configurar comunicación PC/PLC.

Crear un nuevo proyecto.

Guardar el proyecto como PRÁCTICA 1.

Desarrollar el programa en lenguaje KOP y la interfaz Gráfica.

Transferir el programa al PLC.

Después de verificar que el programa cumple con los requerimientos de la práctica. Realizar la misma usando el sistema de entrenamiento.

## 5.2 PRÁCTICA 2: CONTROL PID.

### 5.2.1 Objetivos

- Desarrollar la técnica de control PID para las plantas de temperatura y de control de velocidad.
- Fundamentar Los conocimientos adquiridos en clase referentes a la técnica de control antes mencionada.
- Determinar qué control es necesario aplicar en cada uno de los módulos, si es necesario únicamente un PI(Proporcional-Integral) o si es necesario un control PID(Proporcional-Integral-Derivativo)
- Determinar las ventajas y desventajas del control tanto para el control proporcional integral y para el proporcional integral derivativo

### 5.2.2 6.2.2 Materiales y equipos

- Módulo De Control, PLC Allen Bradley Micrologix 1100, con módulos de expansión de entradas y salidas analógicas.

- Módulo de Velocidad o temperatura.
- Cables de Conexión.
- RS Logix 500
- RS Link
- In Touch

### 5.2.3 6.2.3 Marco teórico

- **Control Proporcional**

El controlador Proporcional es en realidad un amplificador con ganancia ajustable. Este control reduce el tiempo de subida, incrementa el sobretiro y reduce el error de estado estable.

Para una acción de control Proporcional la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde  $K_p$  es la ganancia proporcional.

- **Control Integral**

La acción de control Integral se denomina control de reajuste (reset). En un controlador integral la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  es:

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

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

donde  $K_i$  es una constante ajustable.

Si se duplica el valor de  $e(t)$ , el valor de  $u(t)$  varía dos veces más rápido. Para un error de cero, el valor de  $u(t)$  permanece estacionario.

- Control Proporcional Integral

El control Proporcional Integral decrementa el tiempo de subida, incrementa el sobre impulso y el tiempo de estabilización, y tiene el efecto de eliminar el error de estado estable pero empeorará la respuesta transiente.

La acción de control Proporcional Integral se define mediante:

$$u(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t)$$

en donde Kp es la ganancia proporcional y Ti se denomina tiempo integral.

El tiempo integral ajusta la acción del control, mientras que un cambio en el valor de Kp afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral Ti se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto.

- Control Proporcional Derivativo

El control Proporcional Derivativo reduce el sobre impulso y el tiempo de estabilización, por lo cual tendrá el efecto de incrementar la estabilidad del sistema mejorando la respuesta del sistema. La relación de un controlador Proporcional Derivativo entre la salida  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  está dada por:

$$u(t) = Kp e(t) + Kp Td \frac{de(t)}{dt}$$

en donde Kp es la ganancia proporcional y Td es una constante denominada tiempo Derivativo.

La acción de control Derivativo, en ocasiones llamada control de velocidad, ocurre donde la magnitud de la salida del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. El tiempo Derivativo  $T_d$  es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. La acción de control Derivativo tiene un carácter de previsión. Sin embargo, es obvio que una acción de control Derivativo nunca prevé una acción que nunca ha ocurrido.

Aunque la acción de control Derivativo tiene la ventaja de ser de previsión, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede provocar un efecto de saturación en el actuador.

- **Control Proporcional Integral Derivativo**

La combinación de una acción de control Proporcional, una acción de control Integral y una acción de control Derivativo se denomina acción de control Proporcional Integral Derivativo. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

La relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$  de la acción de control Proporcional Integral Derivativo está dada por:

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

en donde  $K_p$  es la ganancia proporcional,  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo Derivativo.

#### **5.2.4 6.2.4 Planteamiento**

##### **a) Planta de Temperatura**

Un horno de laboratorio es un horno comúnmente es utilizado en procesos de esterilización o deshidratación en el cual el horno aumenta o disminuye su temperatura de acuerdo a los requerimientos bacteriológicos,

mediante la planta de temperatura se puede simular el horno para este proceso (Figura 122).

El Horno consta de 3 componentes, un ventilador, una niquelina que se controla por medio de una salida análoga, y un sensor que mide la temperatura adentro del tubo. Este sensor envía una señal analógica que puede ser medida con entradas del PLC.

Por medio de una interfaz HMI se busca encender el horno hasta cierta temperatura y mantenerlo en un rango cercano a dicho parámetro, al ser controlado mediante un PI o PID, su control debe ser lo más eficiente y exacto posible.

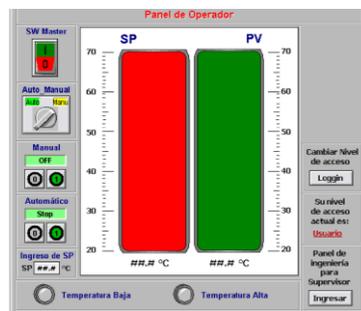


Figura 122. **HMI – horno de laboratorio**

Fuente: Autores

### b) **Planta de Velocidad**

El electro ventilador de un sistema mecánico es el encargado de permitir una temperatura adecuada en un motor mediante un flujo de aire controlado por las aspas de un ventilador que varían su velocidad de acuerdo a la temperatura deseada.

El Sistema del electro ventilador consta de 3 componentes, un ventilador, Acople a un eje con encoder para el giro del motor y sus revoluciones por minuto, y un sensor de temperatura que envía la señal para el incremento de Revoluciones por minuto a fin de generar mayor

cantidad de aire y enfriar más rápido el sistema mecánico este proceso mediante el encoder proporciona la señal al PLC.

Por medio de una interfaz HMI se busca encender el horno hasta cierta temperatura y mantenerlo en un rango cercano a dicho parámetro, al ser controlado mediante un PI o PID, su control debe ser lo más eficiente y exacto posible.

Las especificaciones de desempeño del controlador serán asignadas por el tutor.

#### **5.2.5 6.2.5. Procedimiento**

1. Configurar comunicación PC/PLC.
  2. Crear un nuevo proyecto.
  3. Guardar el proyecto como PRÁCTICA 2.
  4. Desarrollar el programa en lenguaje KOP.
  5. Transferir el programa al PLC.
  6. Después de verificar que el programa cumple con los requerimientos de la práctica. Realizar la misma usando el sistema de entrenamiento.
- 

### **5.3 PRÁCTICA 3: CONTROL RAZÓN.**

#### **5.3.1 Objetivos**

- Desarrollar la técnica de control razón para las plantas de temperatura.
- Fundamentar Los conocimientos adquiridos en clase referentes a la técnica de control antes mencionada.
- Determinar las ventajas y desventajas del control tanto para el control de razón y sus aplicaciones industriales

### 5.3.2 Materiales y equipos

- Módulo De Control, PLC Allen Bradley Micrologix 1100, con módulos de expansión de entradas y salidas analógicas.
- Módulo de Velocidad o temperatura.
- Cables de Conexión.
- RS Logix 500
- RS Link
- In Touch

### 5.3.3 Marco teórico

- **Control de Razón**

Se utiliza en los casos en que se requiera que dos o más reactivos, u otros elementos, se tengan que mezclar en una cierta proporción instante a instante (no es posible pesar uno y luego el otro para juntarlos de una vez), ver Figura 123 y Figura 124.

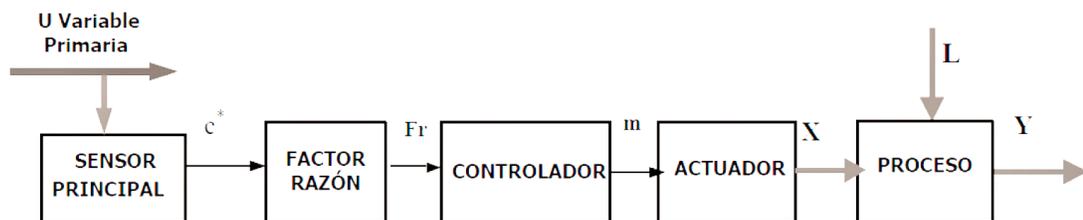


Figura 123. **Control de razón en Lazo Abierto**

Fuente: Autores

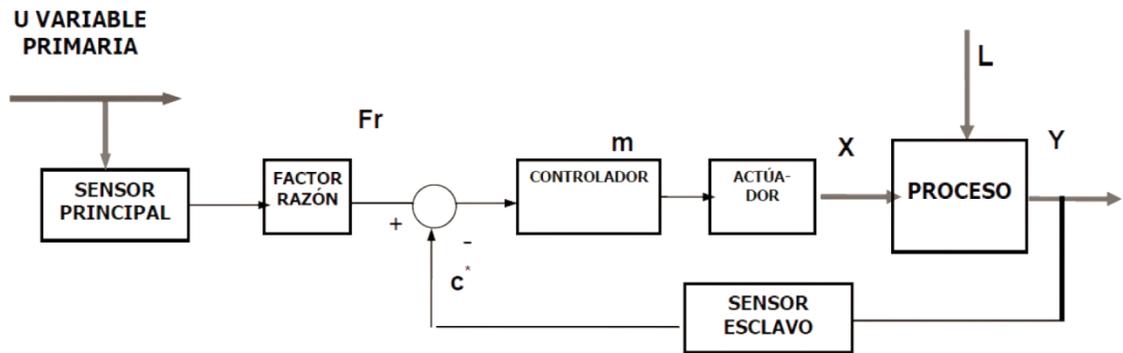


Figura 124. **Control de razón en Lazo Cerrado**

Fuente: Autores

### 5.3.4 Planteamiento

#### a) **Planta de Temperatura- Temperatura**

En este proceso se detalla el funcionamiento de dos hornos de temperatura generalmente utilizado para proceso de elaboración de Snacks, al ser un proceso de elaboración alimenticia estos hornos deben ser de alta precisión y exactitud mismos en los que se implemente el control de razón referente a un horno libre A y un horno controlado b. El controlador implementado para obtener la temperatura deseada es mediante un controlador PI diseñado para Un PLC, el sensor o salida del primer Horno más la razón impuesta en la aplicación permite que el siguiente horno realice su trabajo de cocción

Procesos o señales que son enviadas al PLC a fin de realizar el control de los procesos. .

#### b) **Planta de Velocidad - Temperatura**

El electro ventilador de un sistema mecánico es el encargado de permitir una temperatura adecuada en un motor mediante un flujo de aire controlado por las aspas de un ventilador que varían su velocidad de acuerdo a la temperatura deseada, ver Figura 125

El Sistema del electro ventilador se encuentra en proporción de la temperatura de un motor a combustión donde la temperatura debe ser monitoreada constantemente y controlada mediante un sistema de calefacción o enfriamiento en donde la razón de energía proporcionada por el alternador del automóvil es la de 3 a 1 en gasto de energía para la temperatura y el movimiento del motor.

Por medio de una interfaz HMI se busca encender el horno hasta cierta temperatura y mantenerlo en un rango cercano a dicho parámetro, al ser controlado mediante un PI o PID en base a la razón impuesta por el problema, su control debe ser lo más eficiente y exacto posible.

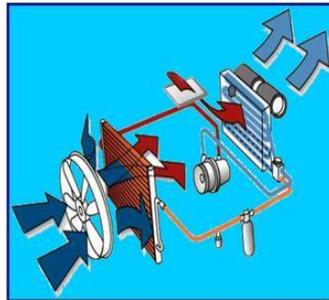


Figura 125. **Calefacción de un automóvil**

Fuente: Autores

Las especificaciones de desempeño del controlador serán asignadas por el tutor.

### 5.3.5 Procedimiento

1. Configurar comunicación PC/PLC.
2. Crear un nuevo proyecto.
3. Guardar el proyecto como PRÁCTICA 3.
4. Desarrollar el programa en lenguaje KOP.
5. Transferir el programa al PLC.
6. Después de verificar que el programa cumple con los requerimientos de la práctica. Realizar la misma usando el sistema de entrenamiento.

## **5.4 PRÁCTICA 4: CONTROL DE SUPERPOSICIÓN.**

### **5.4.1 Objetivos**

- Desarrollar la técnica de control superposición combinando las plantas de temperatura y de Velocidad.
- Fundamentar Los conocimientos adquiridos en clase referentes a la técnica de control antes mencionada.
- Realizar el análisis de superposición para las plantas analizando la conmutación que existe y el instante que existe la superposición de las variables.
- Determinar las ventajas y desventajas del control tanto para el control de superposición y sus aplicaciones industriales

### **5.4.2 Materiales y equipos**

- Módulo De Control, PLC Allen Bradley Micrologix 1100, con módulos de expansión de entradas y salidas analógicas.
- Módulo de Velocidad o temperatura.
- Cables de Conexión.
- RS Logix 500
- RS Link
- In Touch

### **5.4.3 Marco teórico**

El control por sobreposición es una técnica mediante la cual las variables de proceso son mantenidas dentro de ciertos límites, usualmente con propósitos de protección. Existen otros esquemas de control más extremos orientados a la parada de la planta para enfrentar estados de disfunción grave de los equipos. El control por

sobreposición no es tan drástico y mantiene el proceso en operación pero dentro y bajo condiciones seguras.

Una consideración importante al diseñar un sistema de control por sobreposición es que si en cualquiera de los controladores existe modo integral de control, también debe existir protección contra reajuste excesivo.

### **Aplicaciones**

- Control de nivel
- Protección de un sistema de recalentador
- Protección de un compresor
- Protección de un sistema de distribución de vapor

### **Ejemplo: Protección de un sistema de distribución de vapor**

En cualquier proceso químico existen redes de distribución de vapor, a varios niveles de presión, hacia las diferentes unidades de proceso. La cantidad de vapor que se deja descender a la línea de baja presión es controlada por la demanda de presión en esta línea. Para proteger de presiones excesivas la línea de alta presión, se puede instalar un sistema de control por superposición, el cual transfiere la acción de control del lazo 1 al lazo 2 cuando la presión en la línea de alta presión excede el límite superior (Figura 126).

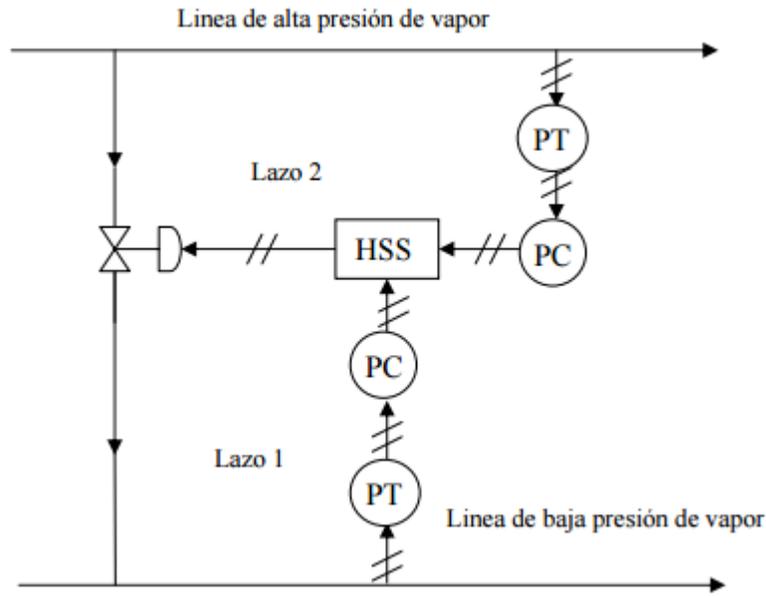


Figura 126. **Control por superposición para un sistema de distribución de vapor.**

Fuente: Autores

El control por sobreposición se utiliza como un esquema de protección, tan pronto como el sistema a sus condiciones normales de operación, el esquema de sobreposición regresa automáticamente a su estado de operación normal.

#### 5.4.4 Planteamiento

##### a) Planta de Velocidad y Planta de temperatura

En este proceso se detalla el funcionamiento de una manera análoga utilizando las plantas de velocidad y la planta de temperatura para el control de flujo en una tubería empleando la estrategia de sobre posición, en el cual mediante dos sensores uno de nivel y uno de flujo se implementa dos controladores de Pid en un PLC para realizar este proceso ya que es muy importante evitar que el la bomba sufra cavitación y daños severos.

Las especificaciones de desempeño del controlador serán asignadas por el tutor.

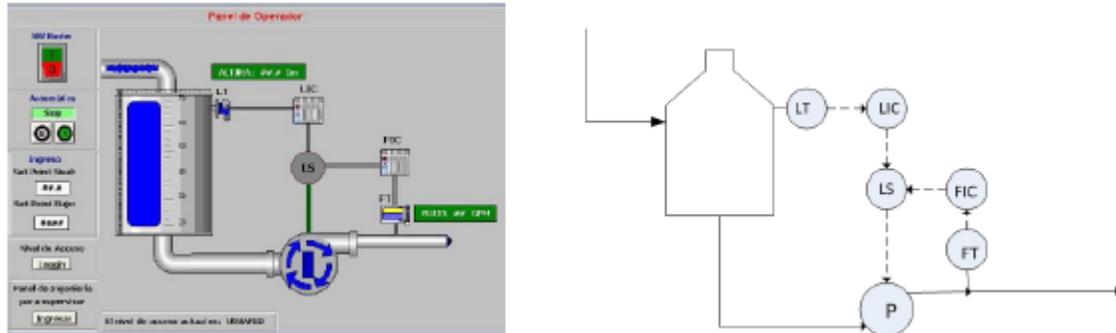


Figura 127. Plantas para control de superposición

Fuente: Autores

#### 5.4.5 Procedimiento

1. Configurar comunicación PC/PLC.
2. Crear un nuevo proyecto.
3. Guardar el proyecto como PRÁCTICA 4.
4. Desarrollar el programa en lenguaje KOP.
5. Transferir el programa al PLC.
6. Después de verificar que el programa cumple con los requerimientos de la práctica. Realizar la misma usando el sistema de entrenamiento.

### 5.5 PRÁCTICA 5: CONTROL EN CASCADA.

#### 5.5.1 Objetivos

- Desarrollar la técnica de control en cascada utilizando el sistema de entrenamiento.
- Fundamentar Los conocimientos adquiridos en clase referentes a la técnica de control antes mencionada.

- Realizar el análisis de control en cascada utilizando el sistema de entrenamiento.
- Determinar las ventajas y desventajas del control tanto para el control de superposición y sus aplicaciones industriales

### **5.5.2 Materiales y equipos**

- Módulo De Control, PLC Allen Bradley Micrologix 1100, con módulos de expansión de entradas y salidas analógicas.
- Módulo de Velocidad o temperatura.
- Cables de Conexión.
- RS Logix 500
- RS Link
- In Touch

### **5.5.3 Marco teórico**

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de retroalimentación es el punto de ajuste para otro controlador de retroalimentación, por lo menos. El control de cascada involucra sistemas de control de retroalimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro. Por lo que se utiliza cuando:

- Cuando el control realimentado simple no provee un desempeño satisfactorio a lazo cerrado.
- Cuando se tiene una variable manipulable y más de una variable medida.
- Cuando las perturbaciones afectan directamente a la variable de proceso manipulada.

El control en cascada tiene dos lazos un lazo primario con un controlador primario también llamado "maestro" y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado "esclavo", siendo la salida del primario el punto de consigna del secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso (Figura 128).

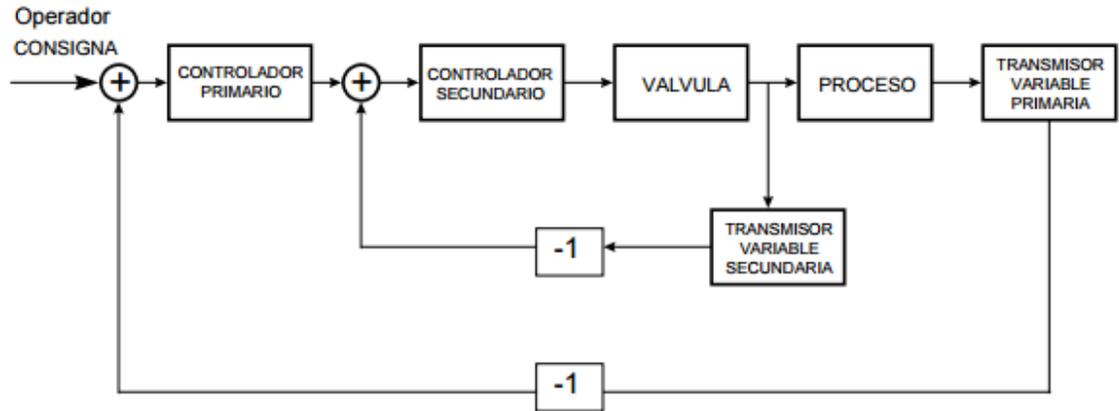


Figura 128. **Control de Cascada**

Fuente: Autores

Desde el punto de vista de rapidez en el control del proceso se puede ver que las perturbaciones instantáneas en la variable secundaria se corrigen autónomamente, mientras que las variaciones más lentas en la variable primaria, que pueden producirse por múltiples causas, se corrigen por el núcleo del sistema de control para mantener el punto de consigna.

#### 5.5.4 Planteamiento

##### a) Planta de temperatura

En este proceso se realizara un control de cascada para una aplicación que consiste en el control de temperatura en dos puntos de un termo cuna (Figura 129).

La temperatura en un cubículo de neonatos es fundamental ya que simula el vientre de una madre por lo que requiere un control robusto y exacto que es proporcionado por dos controles PID aplicados en esta estrategia de control, se requiere mantener una temperatura adecuada y con un error admisible del 0.5 %

## CONTROL EN CASCADA

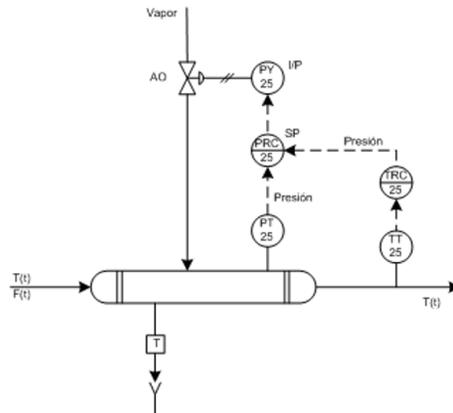


Figura 129. Control cascada de termo cuna

Fuente: Autores

### 5.5.5 Procedimiento

1. Configurar comunicación PC/PLC.
2. Crear un nuevo proyecto.
3. Guardar el proyecto como PRÁCTICA 5.
4. Desarrollar el programa en lenguaje KOP.
5. Transferir el programa al PLC.
6. Después de verificar que el programa cumple con los requerimientos de la práctica. Realizar la misma usando el sistema de entrenamiento.

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS ECONÓMICO - FINANCIERO**

En el presente capítulo se realizará el análisis económico- financiero para poner en marcha el proyecto de un Sistema de Entrenamiento para el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

A través del estudio de los diferentes aspectos del proyecto se obtienen informaciones sobre los ingresos y egresos del proyecto, el estudio financiero busca clasificar y ordenar sistemáticamente estos valores monetarios con el fin de obtener una base para la evaluación financiera de proyecto

Los diferentes rubros monetarios del proyecto se pueden clasificar en ingresos, inversiones y costos.

Para determinar la viabilidad del proyecto se requiere determinar los indicadores financieros como son el VAN, la TIR y la relación Beneficio/Costo.

#### **6.1 COSTES DE INVERSIÓN**

Los costes de inversión incluyen el costo de compra o producción de la máquina y los costes de ingeniería asociados a su instalación en el lugar de trabajo

Los costos presentados en la Tabla 13 son valores estimados.

En este presupuesto se analizan los costos reales y aproximados para un prototipo en el mercado, no se tomarán en cuenta materiales reciclados ni obtenidos en el laboratorio.

**Tabla 13.**  
**Costos de materiales**

<b>Descripción del Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (\$)</b>	<b>Costo total (\$)</b>
<b>MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS CORRIENTE/VOLTAJE</b>	1	300,00	300,00
<b>MÓDULO DE SALIDAS VAC/VDC RELAY</b>	1	250,00	250,00
<b>CABLE PLC A PC</b>	1	40,00	40,00
<b>NIQUELINAS O RESISTENCIAS TERMICAS(ESTIMADAS)</b>	4	10,00	40,00
<b>SENSORES INDUSTRIALES PT 100</b>	3	10,00	30,00
<b>PERFILES PARA CONSTRUCCION MODULO(ESTIMADO)</b>	1	200,00	200,00
<b>VENTILADOR DE AIRE</b>	1	15,00	15,00
<b>TUBO PARA CIRCULACION AIRE</b>	1	80,00	80,00
<b>FUENTE AUXILIAR 10 AMPS</b>	1	50,00	50,00
<b>MOTOR ELECTRICO DC (SERVOMOTOR CON TACOMETRO INCLUIDO) 0.5 WATTS, ALTO TORQUE</b>	1	100,00	100,00
<b>ENCODER Y SENSORES ANALOGOS</b>	1	30,00	30,00
<b>SISTEMA DE FRENADO ( MECANICO O ELECTROMAGNETICO)</b>	1	100,00	100,00
<b>EXTRAS COMPONETES ELECTRONICOS</b>	1	120,00	120,00
<b>Costo total materiales (\$)</b>			<b>1355,00</b>

Fuente: Autores

## 6.2 COSTOS DE SERVICIOS BÁSICOS

En estos se encuentran gastos correspondientes a servicios básicos empleados para e el desarrollo del proyecto (Tabla 14).

**Tabla 14.**

### Costos de servicios básicos

ITEM	SERVICIO INDUSTRIAL	COSTO MENSUAL (\$)	COSTO ANUAL (\$)
1	Luz	10	120
2	Agua	10	120
4	Internet	20	240
<b>TOTAL SERVICIOS BÁSICOS</b>			<b>480</b>

Fuente: Autores

### 6.2.1 COSTOS FIJOS

Dentro de estos costos se encuentran los pagos de sueldos o salarios a empleados, pero para la realización de este proyecto no se ha considerado la contratación de personal.

### 6.2.2 COSTO TOTAL

Es la suma de los costos fijos y los costos variables para este proyecto tenemos como costos fijos el Costo total anual de salarios pero para este proyecto no fue considerado y como costos variables Costos total de materiales y los costos de servicios básicos, estos se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15.**

### Costos totales

ITEM	DESCRIPCIÓN	MONTO (\$)
1	Total de materiales	1355,00
2	Total servicios básicos	480,00
Costo total		1835,00

Fuente: Autores

### 6.3 RENTABILIDAD

La rentabilidad se denomina como el porcentaje de ganancia que se tendrá por concepto de la venta de la máquina.

Este valor normalmente oscila entre 15% y 30% razón por cual para este proyecto se ha considerado un 25% de rentabilidad.

$$\text{Rentabilidad} = 0.25 * (\text{Costo total})$$

$$\text{Rentabilidad} = 0.25 * (1835,00)$$

$$\text{Rentabilidad} = 458,75 \$$$

El análisis de rentabilidad se realizó mediante cotizaciones previas con empresas similares con módulos que ofrezcan las mismas características o parecidas una de ellas fue la empresa de origen Uruguayo “INSUR” en donde se seleccionó el modelo de tablero Modelo ETRON 31 ya que presenta características similares este modelo se ve en la Figura 130.

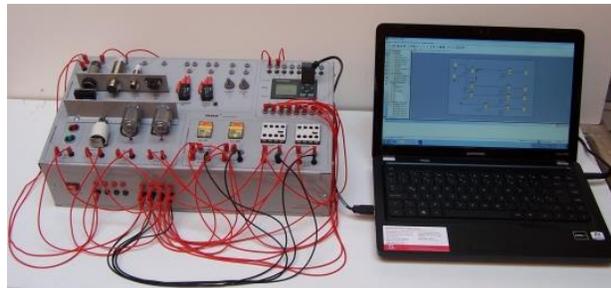


Figura 130. **ETRON 31**

Fuente: Autores

La empresa envió un costo por el tablero de 3500 dólares por unidad y de 2500 dólares en un pedido de más de diez tableros, estos costos no incluyen transporte a Ecuador, por lo que no resulta rentable una implementación a nivel Didáctico.

### 6.4 FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

El Flujo de Caja es un informe financiero que presenta un detalle de los flujos de ingresos y egresos de dinero que tiene una empresa en un período dado. Algunos ejemplos de ingresos son los ingresos por venta, el cobro de deudas, alquileres, el cobro de préstamos, intereses, etc. Ejemplos de egresos o salidas de dinero, son el pago de facturas, pago de impuestos, pago de sueldos, préstamos, intereses, amortizaciones de deuda,

servicios de agua o luz, etc. La diferencia entre los ingresos y los egresos se conoce como saldo o flujo neto, por lo tanto constituye un importante indicador de la liquidez de la empresa. Si el saldo es positivo significa que los ingresos del período fueron mayores a los egresos (o gastos); si es negativo significa que los egresos fueron mayores a los ingresos.

El Flujo de Caja es uno de los mejores aliados en cualquier proyecto de inversión. En base a la información que nos entrega con el saldo neto, podemos tomar decisiones estratégicas para el futuro (Figura 131).

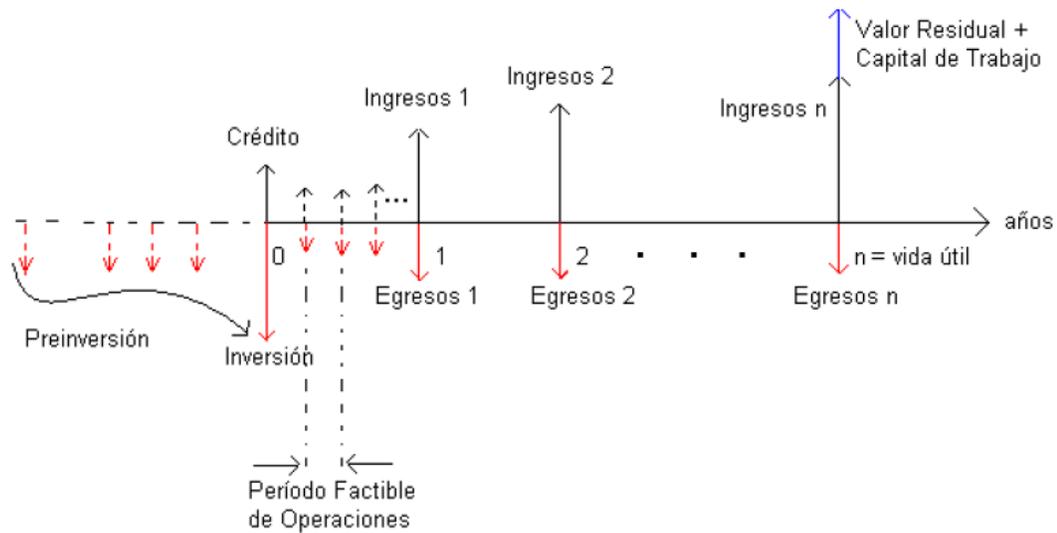


Figura 131. **Flujo de caja**

Fuente: Autores

Para la realización de este flujo de caja se realizaron ciertas consideraciones y estimaciones, en primer lugar se establece que la inversión inicial es igual al valor de costos totales, para el primer año se considera que solo se elabora un equipo por lo que el ingreso obtenido es igual a \$2569,00 y para el segundo año en adelante se estima que se elabora el doble reduciendo de esta manera los costos totales en aproximadamente un 5%.

El flujo de caja se lo realizo para un periodo de 5 años (Tabla 16):

**Tabla 16.**  
**Flujo de Caja**

PERIODOS	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>		2569,00	5138,00	5138,00	5138,00	5138,00
<b>Costos y Gastos</b>		1835,00	3486,50	3486,50	3486,50	3486,50
<b>Inversión inicial</b>	1835,00					
<b>Flujo de Caja</b>	1835,00	734,00	1651,50	1651,50	1651,50	1651,50

Fuente: Autores

Una vez obtenido el flujo de caja podemos proceder a calcular los indicadores financieros con una tasa de interés de 15%

### 6.5 VALOR ACTUAL NETO (VAN)

El valor actual neto (VAN) o valor presente neto (VPN), es un indicador financiero en términos monetarios que representa el equivalente financiero en el presente del flujo de fondos neto.

El Valor Actual Neto es la cantidad monetaria que resulta de regresar los flujos netos del futuro hacia el presente con una tasa de descuento. El proyecto se acepta siempre y cuando el VAN sea mayor o igual a cero caso contrario se rechaza.

$$VAN = F_0 + \frac{F_1}{(1+d)^1} + \frac{F_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+d)^n}$$

Dónde:

- VAN: Valor actual neto
- $F_0$ : Coste total de inversión
- $F_n$ : Flujo de carga neto anual
- $d$ : Tasa de interés
- $n$ : número de años

Este indicador depende de los flujos de fondos netos y de la tasa de descuento determinada.

**Viabilidad del proyecto con el VAN:**

- VAN = 0; proyecto indiferente
- VAN > 0; proyecto viable
- VAN < 0; proyecto no viable

$$VAN = -1835,00 + \frac{734,00}{(1+0,15)^1} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^2} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^3} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^4} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^5}$$

$$VAN = 2903,23$$

$$VAN > 0$$

El valor del VAN (\$2903,23) es mayor que cero, por esta razón se puede confirmar que el proyecto es viable.

**6.6 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**

La tasa interna de retorno (TIR) es un indicador equivalente en términos porcentuales que representa la máxima rentabilidad que el proyecto podría ofrecer.

El criterio para aceptar o rechazar el proyecto se fundamenta en que si la TIR es menor que la tasa de descuento se debe rechazar el proyecto, en caso contrario se lo acepta.

El cálculo de la TIR no depende de la tasa de descuento, es más constituye la solución a la ecuación:  $VAN(d) = 0$ , para  $a$  incógnita  $d$ .

$$VAN = F_0 + \frac{F_1}{(1+TIR)^1} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

Dónde:

- $F_0$ : Coste total de inversión
- $F_n$ : Flujo de carga neto anual
- $n$ : número de años
- TIR: Tasa interna de retorno

Esta ecuación tendrá tantas soluciones como la vida útil del proyecto. Las soluciones negativas así como las complejas no interesan.

Gráficamente las soluciones reales están en el corte con el eje  $d$ , en la función VAN (Figura 132).

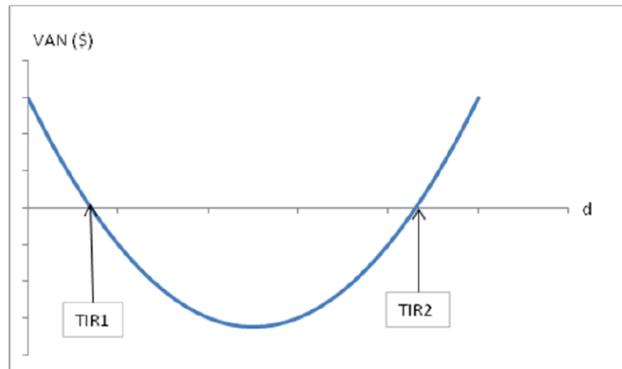


Figura 132. **Representación TIR**

Fuente: Autores

El problema con este indicador es cuando exista varias TIR, es más se recomienda tomar la decisión con los indicadores VAN y TIR conjuntamente.

### 6.7 VIABILIDAD DEL PROYECTO:

- $TIR = d$ ; proyecto indiferente
- $TIR > d$ ; proyecto viable
- $TIR < d$ ; proyecto no viable

$$0 = -1835,00 + \frac{734,00}{(1+TIR)^1} + \frac{1651,50}{(1+TIR)^2} + \frac{1651,50}{(1+TIR)^3} + \frac{1651,50}{(1+TIR)^4} + \frac{1651,50}{(1+TIR)^5}$$

$$TIR = 62,85 \%$$

Se obtuvo que el valor del TIR es 62,85 %. Para determinar si el proyecto es rentable el valor del TIR debe ser comparado con la tasa de interés.

$TIR > d$ ; proyecto viable

$$TIR \geq d$$

$$62,85 \% \geq 15\%$$

Se cumple que la TIR es mayor que la tasa de interés razón por la cual el proyecto es viable.

### 6.8 RELACIÓN BENEFICIO/ COSTO

Es un indicador financiero en terminos a-dimensionales, equivalente al VAN.

En general partimos de las consideraciones para determinar la TUR solo que los flujos positivos llevamos al presente (Figura 133).

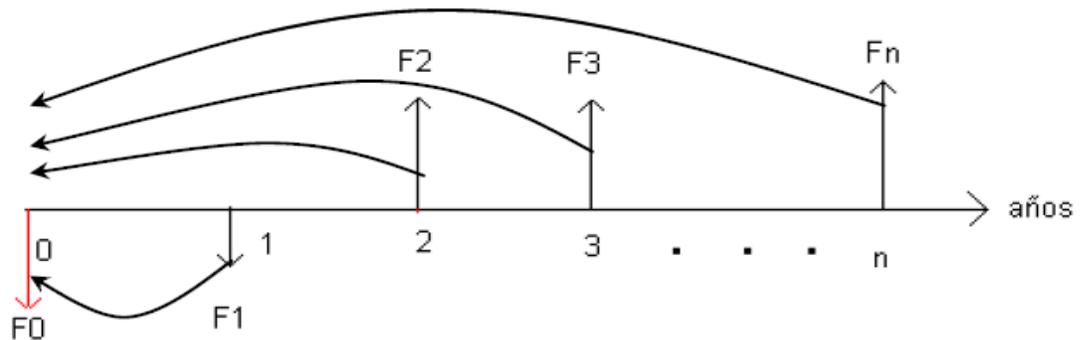


Figura 133. **Relación Beneficio/ Costo**

Fuente: Autores

B es el equivalente financiero de los flujos positivos en el presente y C es el equivalente financiero de los flujos negativos en el presente siempre con valor absoluto ya que tanto B como C deben ser positivos.

Para nuestro caso de estudio el único flujo negativo es el inicial razón por la cual C es igual únicamente a  $F_0$ .

$$B = \frac{F_1}{(1+d)^1} + \frac{F_2}{(1+d)^2} + \frac{F_3}{(1+d)^3} + \dots + \frac{F_n}{(1+d)^n}$$

#### Viabilidad del proyecto

a)  $VAN = 0$

Es equivalente a  $\frac{B}{C} = 1$  por lo tanto el proyecto es indiferente.

b)  $VAN > 0$

Es equivalente  $\frac{B}{C} > 1$ , es decir el proyecto es viable.

c)  $VAN < 0$

Es equivalente  $\frac{B}{C} < 1$ , es decir que el proyecto no es viable.

$$B = \frac{734,00}{(1+0,15)^1} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^2} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^3} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^4} + \frac{1651,50}{(1+0,15)^5}$$

$$B = 4738,26$$

$$C = 1835,00$$

$$\frac{B}{C} = \frac{4738,26}{1835,00}$$

$$\frac{B}{C} = 2,58$$

Se obtuvo que el valor de la relación Beneficio/Costo es 2,58 y para determinar si el proyecto es viable el valor de B/C debe ser mayor a uno.

$$\frac{B}{C} > 1$$

$$2,58 > 1$$

Se cumple que  $\frac{B}{C}$  es mayor que 1 razón por la cual el proyecto es viable.

## 6.9 VIABILIDAD DEL PROYECTO

Con los indicadores financieros planteados la viabilidad del proyecto se resume en la Tabla 17:

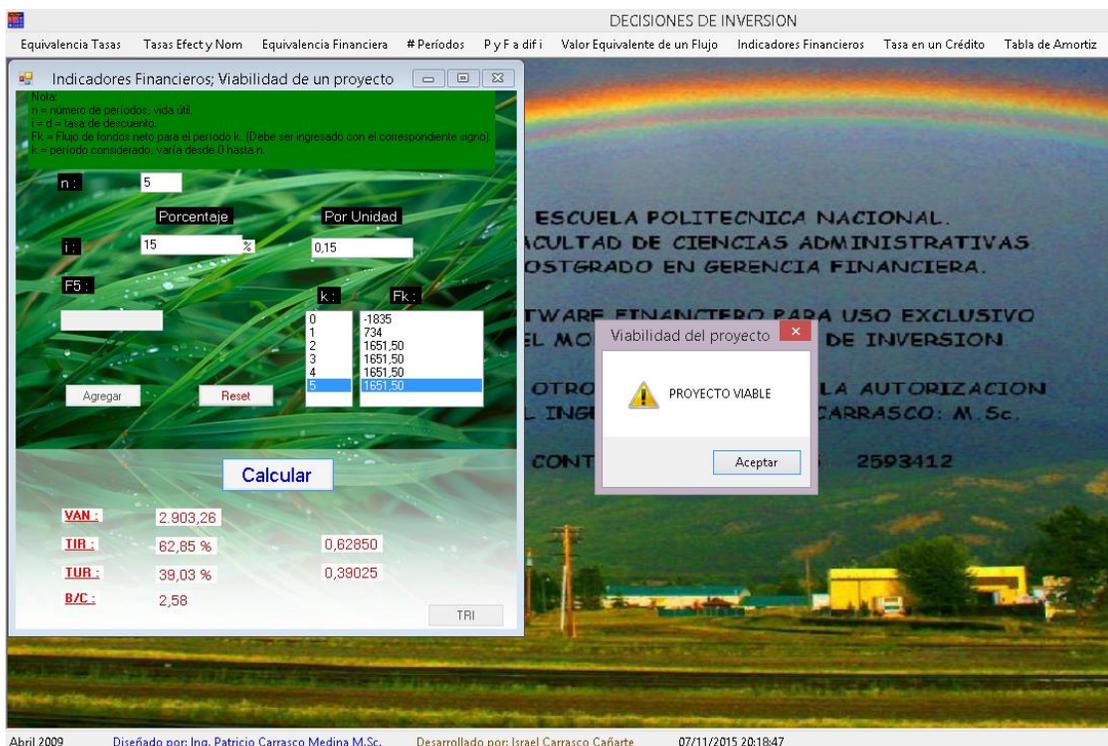
**Tabla 17.**  
**Indicadores**

	INDICADOR FINANCIERO		
PROYECTO	VAN	TIR	B/C
Indiferente	$VAN = 0$	$TIR = d$	$B/C = 1$
Viable	$VAN > 0$	$TIR > d$	$B/C > 1$
No viable	$VAN < 0$	$TIR < d$	$0 < B/C < 1$

Fuente: Autores

De los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores financieros en este proyecto se puede concluir que todos cumplen con las condiciones requeridas para que el mismo se viable y se lo comprobo empleando un Software.

Empleando el Software: Decisiones de Inversión, ver Figura 134



**Figura 134. Software - Decisiones de Inversión**

Fuente: Autores

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

- El módulo de aprendizaje permitirá realizar varias prácticas de estrategias de control y técnicas de control como la de superposición, rango partido, cascada además de los controles clásicos como el P.I.D, On-Off, todo esto con la modernización en la construcción de la planta de temperatura y la planta de control de velocidad en un sistema embebido con menos componentes electrónicos y ofreciendo un sistema más robusto acorde a las prácticas para el estudiante.

- Replicando este prototipo de entrenamiento varias veces permitirá incrementar el número de usuarios y de grupos en el laboratorio al disminuir el espacio físico de la maquina en sí y proporcionar una facilidad de interacción con interfaz HMI, Humano máquina.

- El sistema de conexión del PLC y la ubicación estratégica de Borneras proporcionan al estudiante un fácil acceso a las entradas, salidas del PLC y a la alimentación necesaria para permitir la ejecución de las practicas, de igual forma permite la comprobación del funcionamiento de cada uno de los Slots de manejo del Controlador Lógico Programable, siendo mucho fácil realizar una prueba de continuidad en las diferentes conexiones.

- Una vez diseñado e implementado el sistema de entrenamiento en el laboratorio de control de procesos se pudo comprobar que el uso del espacio se volvió más eficiente debido a las dimensiones totales de la máquina y a que es modular, ahorrando tiempo y espacio al momento de la conexión de las plantas de trabajo de una manera colectiva e individual.

- La realización de las dos plantas de entrenamiento cuenta con sistemas modernos de adquisición, procesamiento y control de datos y variables, elaborado mediante Arduino y también Micro controladores proporcionando un sistema flexible.

- El diseño de la estructura fue panificado en base a la necesidad de que los módulos sean resistentes e intercambiables, además el uso de materiales con características de tenacidad, dureza y ligereza aportaron a disminuir las propiedades negativas que influyeron en la decisión de reemplazar los antiguos módulos.
- La modernización de este sistema modular de aprendizaje para el laboratorio de control contribuirá a la acreditación de las carreras de Electrónica y Mecatrónica

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda en un futuro la implementación de más plantas de control que serán fácilmente adaptables al módulo de aprendizaje
- Se recomienda ampliar en el plan analítico de la carrera de Ingeniería Mecatrónica una asignatura dedicada al aprendizaje de las estrategias y técnicas de control avanzadas aplicadas industrialmente en el PLC ya que la mayoría de estas técnicas de control son aplicadas en el sector petrolero e industrial.
- Se recomienda la replicación de este sistema de entrenamiento posterior a un semestre de pruebas rigurosas, a fin de permitir la modernización del laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)
- Se recomienda la implementación o modernización del laboratorio mediante otro sistema de entrenamiento que maneje un controlador lógico programable puede ser SIEMENS, que si se dispone en la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE)
- Para la replicación del módulo de entrenamiento en la fabricación de las piezas mecánicas en 3D en el slot de temperatura se recomienda la fabricación de moldes para una producción más fácil mediante la inyección de plástico en dichos moldes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arántegui, J. (2011). *Control de procesos*. Obtenido de

[http://web.udl.es/usuaris/w3511782/Control\\_de\\_procesos/Unidades\\_files/apuntes\\_10-11.pdf](http://web.udl.es/usuaris/w3511782/Control_de_procesos/Unidades_files/apuntes_10-11.pdf)

ARDUINO. (2015). *Arduino UNO*. Obtenido de

<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

Avila, E. (2013). *Diseño Mecatrónico*. Obtenido de

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8579/1/AC-MECA-ESPE-047844.pdf>

Camacho, O. (2007). *Técnicas de control avanzado*. Obtenido de

[http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/ocamacho/sistemas%20de%20control/CAPITULO\\_4.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/ocamacho/sistemas%20de%20control/CAPITULO_4.pdf)

Cosco, J. (2011). *Estructuras avanzadas de control*. Obtenido de

<https://coscomantauni.files.wordpress.com/2014/02/3-estrategias-de-control.pdf>

Duque, M. d. (2006). *Estructuras*. Obtenido de

<http://estructuras.eia.edu.co/estructurasl/conceptos%20fundamentales/conceptos%20fundamentales.htm>

EDIBON. (2014). *Equipamiento didáctico técnico*. Obtenido de

<http://www.edibon.com/products/systems.php?area=10&lang=es>

Generadores de conocimientos. (2001). *Otros esquemas de control*. Obtenido de

[http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Instrumentaci%C3%B3n%20y%20Control%20\(PS-1316\)/Material%20Te%C3%B3rica%20Por%20Temas%20\(PS-1316\)/PS-1316%20Tema%204.4%20-%20Otros%20Esquemas%20de%20Control%201.pdf](http://gecousb.com.ve/guias/GECO/Instrumentaci%C3%B3n%20y%20Control%20(PS-1316)/Material%20Te%C3%B3rica%20Por%20Temas%20(PS-1316)/PS-1316%20Tema%204.4%20-%20Otros%20Esquemas%20de%20Control%201.pdf)

- INGEMECANICA. (2009). *Comportamiento del Acero*. Obtenido de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn107.html>
- Keen, D. (2012). *Definición de ventiladores para CPU*. Obtenido de [http://www.ehowenespanol.com/definicion-ventiladores-cpu-hechos\\_100466/](http://www.ehowenespanol.com/definicion-ventiladores-cpu-hechos_100466/)
- MATWEB. (2015). *ASTM A36 Steel*. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9c95ae90f034430ca9c1461deb1cc1bb&ckck=1>
- MAVAINSA. (2011). *Control de Procesos Industriales*. Obtenido de [https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control\\_procesos-valvulas.pdf](https://pastranamoreno.files.wordpress.com/2011/03/control_procesos-valvulas.pdf)
- Mendiburu, H. (2004). *AUTOMATIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL*. Obtenido de <http://www.liceus.com/cgi-bin/ac/pu/AutomatizacionMedioambiental.pdf>
- Montero, C. (2012). *Control en cascada*. Obtenido de <https://dinamicaycontrol.files.wordpress.com/2012/03/resumen-control-cascada.pdf>
- Navarro, C., & Pérez, J. L. (2008). *INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS*. Obtenido de [http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo\\_1\\_I\\_-Introduccion\\_a\\_las\\_estructuras.pdf](http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_1_I_-Introduccion_a_las_estructuras.pdf)
- Nuñez, F. (2007). *Acciones de control*. Obtenido de [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/nunez\\_e\\_f/capitulo\\_1.html#](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/nunez_e_f/capitulo_1.html#)
- Palacios, F. (2008). *Advancen Human machine interface*. Obtenido de <http://fhanorelectri.blogspot.com/2008/07/controlador-logico-programable.html>

PENTA-KA. (2015). *Perfiles estructurales*. Obtenido de

[http://www.pentaka.com/productos/perfil-c\\_p-invertida](http://www.pentaka.com/productos/perfil-c_p-invertida)

Rockwell Automation. (2015). *Sistemas de controlador lógico programable MicroLogix 1100*.

Obtenido de <http://ab.rockwellautomation.com/es/Programmable-Controllers/MicroLogix-1100>

Saiz, C. (2012). *Diagrama Hierro-Carbono*. Obtenido de

<http://carlossaiz.blogspot.com/2012/12/diagrama-hierro-carbono.html>

Sanchez, R. (2008). *Accionamientos y actuadores electricos*. Obtenido de

<http://www.uhu.es/rafael.sanchez/ingenieriamaquinas/carpetaapuntes.htm/Apuntes%20Tema%206%20nuevo%20formato.pdf>

SIEMENS. (2015). *CAE / Computer-Aided Engineering*. Obtenido de

[http://www.plm.automation.siemens.com/es\\_sa/plm/cae.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cae.shtml)

Smith, W. (2010). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Barcelona: McGraw-Hill.

TERMOKEW. (2015). *Resistencias de Calentamiento*. Obtenido de

<http://www.termokew.mx/resistencias-calentamiento.php>

Vega, M. (2012). *Principios de Estática*. Obtenido de

[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/docs\\_curso/contenido.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001734/docs_curso/contenido.htm)

|

Vignoni, J. (2002). *Control de Procesos*. Obtenido de

[http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/transparencia/Control\\_de\\_Procesos.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/transparencia/Control_de_Procesos.pdf)

Villalobos, A. (2010). *El ABC de la Automatización*. Obtenido de

[http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Estrategias\\_de\\_Control.pdf](http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Estrategias_de_Control.pdf)