



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO AUTOCLAVE DE
SECADO DE MATERIALES COMPUESTOS DEL CENTRO DE
INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA FUERZA AÉREA
ECUATORIANA-CIDFAE**

AUTOR: SUÁREZ CAÑIZARES, MARCELO ALEJANDRO

DIRECTOR: ING. ORTIZ TULCÁN, HUGO RAMIRO MSC.

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO AUTOCLAVE DE SECADO DE MATERIALES COMPUESTOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA FUERZA AÉREA ECUATORIANA-CIDFAE**” fue realizado por el señor **Suárez Cañizares Marcelo Alejandro** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Julio del 2019

Ing. Hugo Ramiro Ortiz Tulcán

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

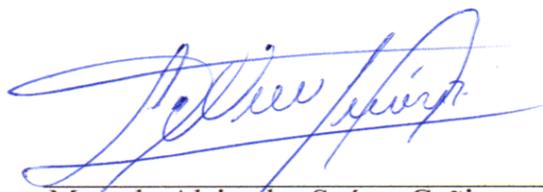
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Suárez Cañizares, Marcelo Alejandro**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO AUTOCLAVE DE SECADO DE MATERIALES COMPUESTOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA FUERZA AÉREA ECUATORIANA-CIDFAE**”, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz

Sangolquí, Julio del 2019



Marcelo Alejandro Suárez Cañizares

C.C.: 1717976169



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Suárez Cañizares, Marcelo Alejandro** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación “**AUTOMATIZACIÓN DEL HORNO AUTOCLAVE DE SECADO DE MATERIALES COMPUESTOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA FUERZA AÉREA ECUATORIANA-CIDFAE**”, en el repositorio institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, Julio del 2019



Marcelo Alejandro Suárez Cañizares

C.C.: 1717976169

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, quien me dio sabiduría y fortaleza en los momentos más difíciles, para culminar con éxito mis estudios profesionales, sin tu presencia nada es posible.

A mis padres Marcelo y Sonia, mis ejemplos de vida, su abnegación y apoyo incondicional fueron mi motivación para ser mejor cada día, para no desmayar jamás hasta conseguir mis objetivos.

También quiero dedicar este trabajo a mi hermano Andrés, este logro es la prueba de que la dedicación y sacrificio rinde sus frutos.

A todas las personas que de una u otra forma me dieron su apoyo, sus consejos y aportaron de manera desinteresada para el cumplimiento de esta meta.

AGRADECIMIENTO

Gracias a mi Dios por la vida y por estar junto a mí siempre, por ser mi guía espiritual, por ser el que nos conduce hacia el éxito, nada es posible sin tu voluntad.

Eterno agradecimiento para mis padres, gracias por soñar mis sueños, gracias por compartir mis triunfos, gracias por su apoyo en mis momentos más difíciles; gracias Sonia por tu fortaleza, gracias Marcelo por escuchar, gracias por enseñarme que el único límite es el infinito.

Gracias a mi hermano Andrés, tu como parte de nuestra familia, para mi eres una constante referente de superación.

Agradezco a mis maestros, por haber compartido no solamente sus conocimientos, sino también sus experiencias y amistad, gracias por su intolerancia a la mediocridad, sus aportes son invaluable para mi vida profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia	3
1.3. Alcance	5
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Materiales Compuestos	8
2.1.1. Componentes de los materiales compuestos	10
2.1.2. Tipos de materiales compuestos	12
2.1.3. Aplicaciones de los materiales compuestos	13
2.2. Materiales compuestos que se fabrican en el CIDFAE	13
2.2.1. AEROPOXY PR2032 Epoxy Resin	15
2.2.2. AEROPOXY PH3660 Epoxy Hardener	15
2.2.3. Uso de los materiales compuestos en aeronáutica	16
2.3. Técnicas de manufactura de materiales compuestos	16

2.4.	Horno autoclave	17
2.5.	Sensores industriales de temperatura	18
2.5.1.	Sensor	18
2.5.2.	Sensor de temperatura	19
2.6.	Controlador Lógico Programable (PLC)	27
2.6.1.	Estructura de un PLC	27
2.6.2.	Ciclo de funcionamiento	28
2.6.3.	Programación del PLC	29
2.6.4.	Controlador Programable Siemens S7-1200	30
2.7.	PID_Temp S7 -1200	34
2.8.	KEPServer	35
2.9.	ArchestrA	35
2.10.	Método de Ziegler-Nichols	36
CAPÍTULO III		37
3.	DISEÑO	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Planteamiento del problema de diseño	37
3.3.	Requerimientos de funcionamiento	37
3.3.1.	Requerimientos generales de funcionamiento	37
3.3.2.	Requerimientos de temperatura	38
3.3.3.	Requerimientos de tiempo	38
3.3.4.	Requerimientos de modos de operación	39
3.3.5.	Requerimientos eléctricos	39
3.4.	Diseño Conceptual	40
3.4.1.	Diagrama de bloques del funcionamiento del horno autoclave	40
3.5.	Diseño Detallado	42
3.5.1.	Elementos de control en el horno autoclave	42
3.5.2.	Selección de sensor de temperatura	44
3.5.3.	Controlador del sistema	51
3.5.4.	Elemento calefactor	55
3.5.5.	Luces piloto indicadoras	56

3.5.6.	Pulsador de paro de emergencia	57
3.5.7.	Diagrama eléctrico del horno autoclave	58
3.5.8.	Diagrama P&ID del horno autoclave	58
3.5.9.	Diagrama Grafcet del proceso de secado de materiales compuestos.....	59
3.5.10.	Diseño de circuitos.....	59
3.5.11.	Circuito de potencia	60
3.5.12.	Circuito de protección.....	64
3.5.13.	Circuito de acoplamiento del sensor	67
3.5.14.	Tablero de control	69
3.5.15.	Control PID.....	71
CAPÍTULO IV		85
4.	PROGRAMACIÓN	85
4.1.	Diseño HMI	85
4.1.1.	Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz HMI	85
4.1.2.	Entorno de programación	86
4.1.3.	Servidor para conexión entre el PLC y el programa Orchestra	87
4.1.4.	Generalidades del diseño	87
4.1.5.	Variables que se van a monitorear con la HMI.....	88
4.1.6.	Diseño de la consola.....	88
4.2.	Diseño de pantallas HMI.....	91
4.2.1.	Jerarquía de pantallas	91
4.2.2.	Navegación en las pantallas HMI	92
4.2.3.	Formato de la pantalla de la HMI	94
4.2.4.	Formato de texto para la HMI.....	100
4.2.5.	Uso de Color para eventos en la HMI	102
4.2.6.	Variables relevantes del proceso	103
4.3.	Aplicación de Requerimientos Funcionales	103
CAPÍTULO V		104
5.	IMPLEMENTACIÓN	104
5.1.	Implementación de circuito eléctrico, electrónico y de control	104
5.2.	Implementación programa en el PLC S7-1200.....	105

5.2.1. Implementación programa en el PLC S7-1200.....	105
5.3. Implementación HMI horno autoclave.....	109
5.3.1. Diseño del HMI basado en la Norma ISA SP 101	109
5.3.2. Creación de la simulación en Archestra.....	109
5.3.3. Desarrollo de la HMI	110
5.4. Conexión PLC S7-1200 y KEPServer.....	114
5.4.1. Tabla de Asignación de Variables KEPServer	114
5.5. Conexión Archestra y KEPServer	115
CAPÍTULO VI	117
6. PRUEBAS Y RESULTADOS.....	117
6.1. Operación del horno de materiales compuestos.	117
6.2. Tiempo de secado de materiales compuestos	121
6.3. Comparación de tiempo de secado.....	121
6.4. Funcionamiento del horno autoclave.....	122
CAPÍTULO VII.....	128
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
7.1. Conclusiones.....	128
7.2. Recomendaciones.....	129
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
ANEXOS	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Interior del horno autoclave en operación en el CIDFAE	3
Figura 2. Red conceptual de materiales compuestos	9
Figura 3. Importancia de los materiales compuestos a través del tiempo	14
Figura 4. Autoclave.....	18
Figura 5. Esquema de una termocupla	21
Figura 6. Curva característica para un termistor NTC	26
Figura 7. Estructura de un PLC.....	28
Figura 8. Ciclo de funcionamiento del PLC.....	29
Figura 9. PLC SIEMENS S7-1200	31
Figura 10. Diagrama de bloques control PID.....	33
Figura 11. Diagrama de bloques funcionamiento horno autoclave.....	41
Figura 12. Criterios de evaluación de selección de sensor de temperatura.....	50
Figura 13. Conexión de entradas S7-1200 SIEMENS	53
Figura 14. Conexión de salidas S7-1200 SIEMENS	53
Figura 15. Curva de respuesta de temperatura de la termorresistencia.....	55
Figura 16. Termorresistencia de 3000 W	57
Figura 17. Botón de paro de emergencia	58
Figura 18. Diagrama eléctrico horno autoclave	61
Figura 19. Diagrama P&ID horno autoclave	62
Figura 20. Diagrama Grafcet de funcionamiento del horno autoclave	63
Figura 21. Circuito de potencia.....	65
Figura 22. Circuito de protección.....	67
Figura 23. Disyuntor VETO DZ47	67
Figura 24. Circuito de acoplamiento de sensor.....	68
Figura 25. Módulo de acoplamiento de señales de termopar SM 1231 RTD	68
Figura 26. Tablero de control horno autoclave	70
Figura 27. Ventana función ident Matlab	71
Figura 28. Diagrama del circuito de adquisición de datos de la planta.....	72
Figura 29. Programación Arduino adquisición valores de temperatura.....	72
Figura 30. Valores función de transferencia ident Matlab.....	73
Figura 31. Comparación funciones de transferencia de la planta	74
Figura 32. Gráfico función de transferencia horno autoclave.....	74
Figura 33. Método de sintonización de Ziegler -Nichols horno autoclave	77
Figura 34. Comparación sintonización Ziegler-Nichols y PID Tuner	80
Figura 35. Control PID establecido por medio de PID_Temp.....	84
Figura 36. Subrutina de selección de programa de secado automático.....	85
Figura 37. Diagrama de flujo del funcionamiento de la pantalla HMI	86
Figura 38. Directrices para el diseño de interfaz de usuario horno autoclave	90
Figura 39. Requisitos primarios de la HMI.....	90

Figura 40. Requisitos secundarios de la HMI	91
Figura 41. Proceso de diseño	92
Figura 42. Jerarquía de pantallas.....	93
Figura 43. Navegación HMI horno autoclave.....	95
Figura 44. Navegación por niveles de jerarquía de las pantallas de la HMI.....	96
Figura 45. Formato de la pantalla de presentación, información y menú	96
Figura 46. Formato de la pantalla de operación manual	97
Figura 47. Formato de la pantalla de operación automática	98
Figura 48. Formato de la pantalla de configuración	99
Figura 49. Formato de la pantalla de password y autenticación de usuario.....	100
Figura 50. Horno autoclave con los todos los circuitos eléctricos, electrónicos y de control implementados	104
Figura 51. Proceso de implementación programa PLC S7-1200.....	105
Figura 52. Objeto tecnológico PID_Term.....	107
Figura 53. Ajustes de valor mínimo y máximo de temperatura.....	108
Figura 54. Parámetros de controlador PID horno autoclave TIA PORTAL.....	108
Figura 55. Proceso de implementación HMI	109
Figura 56. Pantalla de presentación, información y menú	110
Figura 57. Pantalla de operación modo manual	111
Figura 58. Pantalla de operación modo automático	112
Figura 59. Pantalla de operación modo configuración.....	113
Figura 60. Pantalla de contraseña.....	114
Figura 61. Gráfico de análisis pregunta a.....	117
Figura 62. Gráfico de análisis pregunta b	118
Figura 63. Gráfico de análisis pregunta c.....	118
Figura 64. Gráfico de análisis pregunta d	119
Figura 65. Gráfico de análisis pregunta e.....	119
Figura 66. Gráfico de análisis pregunta f.....	120
Figura 67. Gráfico de análisis pregunta g	120
Figura 68. Gráfico secado de la pieza 1	123
Figura 69. Secado pieza 1	123
Figura 70. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 1	124
Figura 71. Gráfico secado de la pieza 2	124
Figura 72. Secado pieza 2	125
Figura 73. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 2	125
Figura 74. Gráfico secado de la pieza 3	126
Figura 75. Secado pieza 3	126
Figura 76. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 3	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Aplicación de los materiales compuestos.....</i>	15
Tabla 2	<i>Rangos de temperatura de los sensores utilizados en la industria</i>	19
Tabla 3	<i>Dispositivos de medición de temperatura</i>	20
Tabla 4	<i>Características de termocuplas estándar.....</i>	22
Tabla 5	<i>Características termocuplas no estándar</i>	24
Tabla 6	<i>Resumen de las características de termocuplas estándar.....</i>	25
Tabla 7	<i>Características técnicas PLC SIEMENS S7-1200</i>	31
Tabla 8	<i>Requerimientos de temperatura horno autoclave CIDFAE.....</i>	39
Tabla 9	<i>Requerimientos de tiempo horno autoclave CIDFAE.....</i>	39
Tabla 10	<i>Requerimientos de modos de operación horno autoclave CIDFAE</i>	40
Tabla 11	<i>Requerimientos eléctricos horno autoclave CIDFAE.....</i>	40
Tabla 12	<i>Características termocupla tipo K</i>	45
Tabla 13	<i>Características sensor PT-100.....</i>	46
Tabla 14	<i>Características sensor LM-35.....</i>	46
Tabla 15	<i>Matriz de comparación para la selección de sensor de temperatura</i>	47
Tabla 16	<i>Criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura.....</i>	49
Tabla 17	<i>Comparación de criterios de evaluación para la selección del sensor</i>	50
Tabla 18	<i>Determinación de uso de entradas y salidas PLC S7-1200.....</i>	54
Tabla 19	<i>Luces indicadoras de proceso de secado</i>	57
Tabla 20	<i>Información sobre el tipo de circuito del pulsador de paro de emergencia</i>	58
Tabla 21	<i>Datos técnicos de funcionamiento eléctrico del horno autoclave.....</i>	59
Tabla 22	<i>Tabla AWG de cables.....</i>	65
Tabla 23	<i>Fórmulas de sintonización Ziegles-Nichols</i>	76
Tabla 24	<i>Fórmulas de sintonización Ziegler-Nichols</i>	78
Tabla 25	<i>Comparación coeficientes PID</i>	80
Tabla 26	<i>Valores del controlador PID.....</i>	83
Tabla 27	<i>Variables a monitorear y controlar con la HMI</i>	88
Tabla 28	<i>Niveles de jerarquía de pantallas.....</i>	93
Tabla 29	<i>Características técnicas pantalla de presentación, información y menú</i>	97
Tabla 30	<i>Características técnicas de la pantalla de operación manual</i>	98
Tabla 31	<i>Características técnicas de la pantalla de operación automática.....</i>	98
Tabla 32	<i>Características técnicas de la pantalla de configuración.....</i>	99
Tabla 33	<i>Características técnicas de la pantalla de password.....</i>	100
Tabla 34	<i>Formato de texto para HMI del horno autoclave</i>	101
Tabla 35	<i>Uso de colores para HMI del horno autoclave.....</i>	102
Tabla 36	<i>Tabla de asignación de variables del PLC Siemens S7-1200.....</i>	106
Tabla 37	<i>Configuración PID_Temp</i>	108
Tabla 38	<i>Asignación variables KEPServer</i>	115
Tabla 39	<i>Configuración KEPServer para conexión con Archestra.....</i>	116

Tabla 40 <i>Configuración Arcestra para conexión con KEPServer</i>	116
Tabla 41 <i>Pruebas de secado de materiales compuestos CIDFAE</i>	121
Tabla 42 <i>Comparación de tiempos de secado</i>	121

RESUMEN

El presente documento describe el diseño de la automatización del horno autoclave para materiales compuestos del Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, se incluye los diagramas eléctricos de conexiones, diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID), diagramas de bloques de funcionamiento del horno y detalles de la implementación de un control PID para mantener la temperatura del horno constante según los requerimientos del usuario. Se llevó a cabo el diseño e implementación de una interfaz HMI para el monitoreo y control de las principales variables eléctricas y no eléctricas del horno autoclave. El horno se encuentra configurado para funcionar entre 20 °C y 160 °C, rango de temperaturas adecuadas para lograr el secado de los materiales compuestos que se fabrican en el CIDFAE. Para la implementación del control se tomaron en cuenta normas técnicas de diseño, materiales adecuados y se realizaron pruebas del correcto funcionamiento del horno autoclave. El mantener una temperatura constante por un tiempo determinado en el secado de materiales compuestos mejora la calidad de las piezas de aviación fabricadas por el CIDFAE, la temperatura constante permite que la polimerización de los materiales se realice de manera adecuada obteniendo un material de alta calidad y listo para ser instalado en las aeronaves de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

Palabras Clave

- **CIDFAE**
- **AUTOCLAVE**
- **MATERIALES COMPUESTOS**
- **TERMOCUPLA**
- **CONTROL PID**
- **INTERFAZ HMI**

ABSTRACT

This document describes the automation design of the autoclave furnace for composite materials of the Research and Development Center of the Ecuadorian Air Force, it includes the electrical diagrams of connections, pipeline and instrumentation diagram (P&ID), diagrams of operating blocks of the furnace and details of the implementation of a PID control to keep the oven temperature constant according to the user's requirements. The design and implementation of an HMI interface for the monitoring and control of the main electrical and non-electrical variables of the autoclave oven was carried out. The oven is configured to operate between 20 °C and 160 °C, a range of temperatures suitable for drying the composite materials manufactured in the CIDFAE. For the implementation of the control, technical standards of design, adequate materials were taken into account and tests of the correct functioning of the autoclave oven were carried out. Maintaining a constant temperature for a certain time in the drying of composite materials improves the quality of the pieces of aviation manufactured by the CIDFAE, the constant temperature allows the polymerization of the materials to be carried out adequately obtaining a material of high quality and ready to be installed on aircraft of the Ecuadorian Air Force.

Key Words:

- **CIDFAE**
- **AUTOCLAVE**
- **COMPOSITE MATERIALS**
- **THERMOCOUPLE**
- **PID CONTROL**
- **HMI INTERFACE**

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Centro de Investigación y Desarrollo CID fue creado el 4 de mayo de 1998, mediante Directiva No. R-001-CL-H-97, teniendo como predecesor al Departamento de Ingeniería Aeronáutica, el cual se creó en el año 1994 en el Centro de Mantenimiento FAE de la ciudad de Latacunga.

Nació como un requerimiento de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, para proporcionar soluciones a los problemas técnico-operacionales de la flota de aviones militares, así como a los equipos y sistemas de la Institución, fortaleciendo al poder aeronáutico del Ecuador a través de la autosuficiencia tecnológica.

Las secciones con que se inició el CID fueron: Aerodinámica, Estructuras, Materiales Compuestos, Propulsión, Adquisición de Datos, Telemática, Dispositivos Electrónicos, Control, Guiado y Navegación, entre otros.

Con fecha 1 de enero del 2009, la FAE aprueba el nuevo orgánico del CIDFAE, dotándole de una nueva estructura organizacional y misión que sea específicamente para realizar proyectos de tipo aeronáutico y aeroespacial, que además esté orientado al apoyo al desarrollo del país.

Se asigna las instalaciones del Aeropuerto Chachoán en Ambato donde funcionaba el ex COS-3, por las facilidades de infraestructura aeronáutica, ideales para el desarrollo de

proyectos aeronáuticos; considerando que los ensayos de vuelo son una fase muy importante en el desarrollo de prototipos, sin interferencia con la actividad aeronáutica comercial. (Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, 2018)

Una de las secciones con las que cuenta el CIDFAE es la de materiales compuestos, aquí se realiza el modelamiento y construcción de piezas de repuesto para las aeronaves que operan en la FAE. Estas piezas son realizadas con distintas combinaciones de materiales dependiendo del modelo de aeronave para la cual se fabrique.

El horno autoclave para secado de materiales compuestos se emplea en el proceso de polimerización de los componentes en el sector aeroespacial.

El horno autoclave que se encuentra en funcionamiento en el CIDFAE fue diseñado y construido por el personal técnico que trabaja en la sección de materiales compuestos. Este horno no cuenta con ningún tipo de automatización, su funcionamiento se basa en encender un número determinado de focos incandescentes los cuales generan diferentes temperaturas dependiendo del número de focos que se encuentren encendidos. El horno no cuenta con un control ni medidores de temperatura, y el mecanismo de encendido de los focos es únicamente en base a disyuntores.

El horno autoclave que se encuentra operando en el CIDFAE tiene las siguientes características:

- Dispone de un espacio interior útil de dimensiones 93 cm, 73 cm, 64 cm en los ejes x, y, z respectivamente.

- En el prototipo se ha realizado un estudio térmico tomando en cuenta las dimensiones utilizables del mismo, se realizó una simulación de lo que sucedería en el interior del autoclave, existiendo en el interior de este transferencia de calor por convección y por radiación, ya que el calor es generado por fuentes lumínicas (24 focos incandescentes) como se puede observar en la Figura 1.
- La temperatura máxima de funcionamiento del autoclave es de 90 °C (trabajando al 100% de su capacidad, es decir con los 24 focos encendidos). (Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, 2017)



Figura 1. Interior del horno autoclave en operación en el CIDFAE

1.2. Justificación e importancia

El proyecto de materiales compuestos que se desarrolla en el CIDFAE es de gran importancia para la operación de las aeronaves que se encuentran en la actualidad volando para la Fuerza Aérea.

La producción de piezas de repuestos realizadas con materiales compuestos mantiene la disponibilidad operativa de las aeronaves ya que si algún avión requiere que se diseñe alguna pieza de su fuselaje por un daño estructural se lo realiza en el CIDFAE y no se recurre a los vendedores de repuestos extranjeros los cuales ofrecen las piezas a mayor precio y el tiempo de arribo al país es muy prolongado por lo que la aeronave tendría que estar inactiva produciendo un retraso en las planificaciones de vuelo y dando como resultado que la Fuerza Aérea no cumpla con su misión.

El diseño y construcción de una pieza que se va a instalar en una aeronave fabricada con materiales compuestos debe estar sujeta a estrictos estándares propios de la aviación, estas piezas deben cumplir con las exigencias de las normas de aeronavegabilidad vigentes.

Se deben cumplir con varios procedimientos para que una pieza cumpla con los estándares de aeronavegabilidad en su construcción, uno de estos procedimientos es el de secado, este proceso se lo debe llevar a cabo a una temperatura controlada durante un tiempo determinado en un horno autoclave para así lograr la correcta polimerización de los componentes y tenga una correcta calidad.

La automatización del horno autoclave permitirá tener ciclos productivos previamente programados para el secado de las diferentes piezas de materiales compuestos, controlados por una pantalla con una HMI, de esta forma el proceso de polimerización se realizará de mejor manera obteniendo piezas de aeronaves que cumplan con las normas de aeronavegabilidad.

El presente proyecto de investigación pretende dar un impulso en el desarrollo tecnológico en la FAE, a fin de satisfacer las tendencias actuales sobre actividades de apoyo a las

operaciones inherentes a la Fuerza Aérea y que se encuentra enmarcada en la Doctrina Aeroespacial Básica

1.3. Alcance

El presente perfil de proyecto de titulación pretende apoyar el desarrollo de tecnologías militares innovadoras en nuestro país como es la producción de repuestos para aeronaves fabricadas en materiales compuestos, estas actividades de apoyo se enmarcan en mantener operativas la mayor cantidad de aeronaves de la FAE y así cumplir con la misión de mantener la soberanía del espacio aéreo ecuatoriano.

En busca de este cometido, el proyecto cumplirá con las siguientes características:

- Diseño e implementación de un sistema eléctrico para la generación de diferentes set points de temperatura en el horno.
- El sistema automático de control tendrá funciones automáticas y manuales, las funciones automáticas serán enfocadas en procesos de secado preestablecidos y las funciones manuales serán orientadas para que el operador pueda realizar acciones de control o maniobra cuando requiera o sea necesario.
- El sistema contará con un controlador (PLC) en el cual se implementará un controlador PID para el control de temperatura del horno, permitiendo aumentar y disminuir la temperatura mediante un set point o mediante los procesos de secado programados.

- Se implementará un sistema de alarmas y eventos visuales a través de luces indicadoras que muestren el funcionamiento del horno.
- El sistema contará con una interfaz humano - máquina (HMI) local, que tendrá las siguientes funciones:
 - Se podrá ingresar un set point de temperatura a la cual se mantendrá el horno.
 - Se visualizará en tiempo-real los valores de las variables (eléctricas, señales visuales y de tiempo), eventos y de alarmas del horno.
 - Alarmas y eventos: se observarán en una lista todas las señales de alarma y en otra todos los eventos.

Y como características generales de la interfaz HMI serán:

- Controlar el acceso de personal, mediante una clave de acceso a la operación del horno. Para ello se manejará niveles de acceso los cuales tendrán limitaciones para realizar acciones dependiendo el usuario. Por ejemplo, los niveles pueden ser:
 - Visualización y control
 - Visualización, control y configuración del sistema:
- El sistema identificará a cada usuario por medio de contraseñas.

La interfaz HMI se instalará en una pantalla en un costado del horno en el cual se visualizarán las variables del proceso y se podrán realizar configuraciones en el funcionamiento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Mejorar la eficiencia y calidad en el secado de materiales compuestos por medio del uso de programas de polimerización acordes a las necesidades de las diferentes piezas de aviación fabricadas en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

1.4.2. Objetivos específicos

- Disminuir el tiempo de polimerización de materiales compuestos fabricados en el CIDFAE, mediante un sistema automático de control del horno autoclave que permitan mantener la temperatura adecuada.
- Aumentar la seguridad de los operadores del horno autoclave a través de la monitorización de todos los parámetros de funcionamiento por medio de una pantalla.
- Garantizar una distribución uniforme de temperatura al interior del horno autoclave.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Materiales Compuestos

Un material compuesto es una combinación constituida a partir de una unión de dos o más componentes, esta combinación da lugar a un nuevo material con propiedades y características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores. (Besednjak, 2006)

La combinación de dos o más materiales diferentes se denomina materiales compuestos. Su característica es que son heterogéneos es decir que sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. Existen algunos materiales compuestos que son naturales como el hueso y la madera, la mayoría de los materiales compuestos que se utilizan en la actualidad son diseñados y fabricados por el hombre. (Miravete & Cuartero, 2003)

El desarrollo de materiales compuestos surge de la necesidad de obtener una nueva clase de materiales con combinación de propiedades que difícilmente se encuentren en los ya existentes. Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales que puedan ser ligeros, rígidos, resistentes al impacto, que resistan bien la corrosión y el desgaste, estas propiedades muy rara vez se dan juntas de forma natural; por lo que el objetivo es diseñar un nuevo material según la aplicación para la cual se necesitan. (Hull, 2003)

Los materiales compuestos obtenidos cuentan con propiedades excepcionales, diseñados para ser utilizados en aplicaciones prácticas y cotidianas, las desventajas que presentan son un alto costo y complejidad en su fabricación.

Una similitud de todos los materiales compuestos es que, se pueden distinguir dos componentes bien diferenciados: la matriz y el refuerzo o fase discontinua. (Hull, 2003). La Figura 2 presenta una red conceptual de los materiales compuestos.

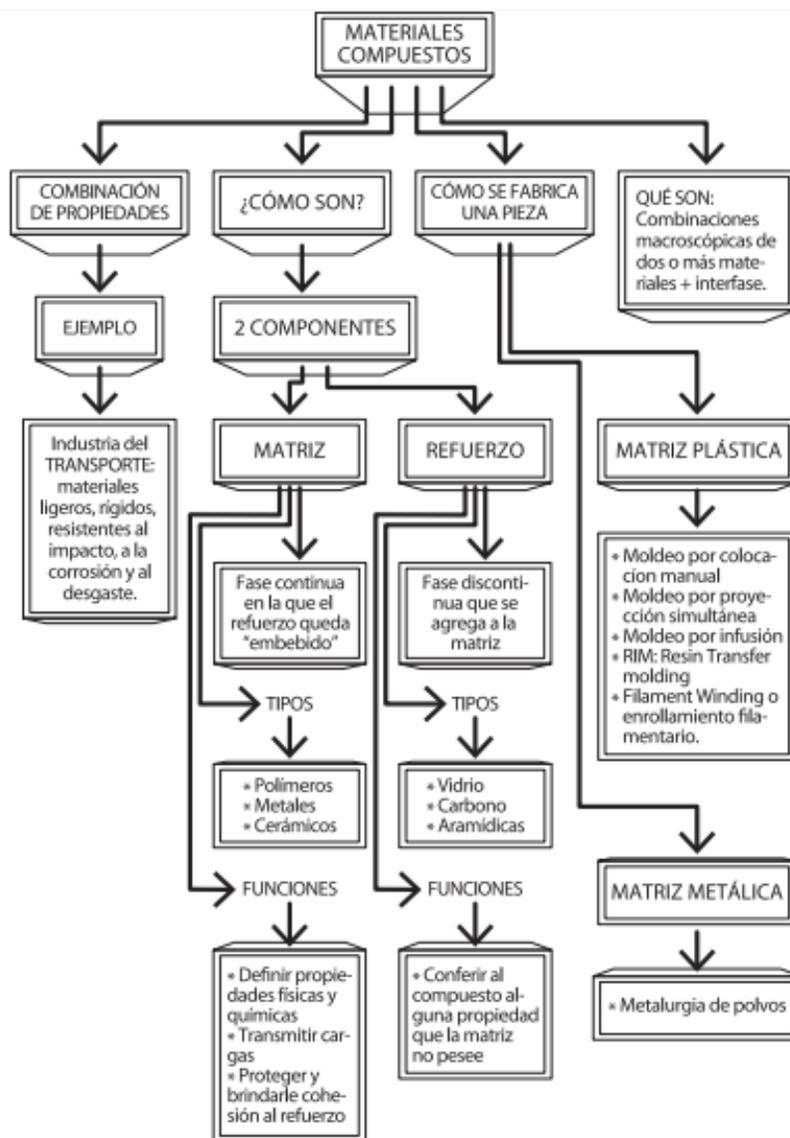


Figura 2. Red conceptual de materiales compuestos

Fuente: (Stupenengo, 2011)

2.1.1. Componentes de los materiales compuestos

2.1.1.1. La matriz

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda embebido. Algunos materiales del tipo metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden desempeñar este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se utiliza como matriz no es, de forma general, tan rígido ni tan resistente como el material utilizado de refuerzo.

Las funciones principales de la matriz son:

- Definir propiedades físicas y químicas.
- Transmitir cargas al refuerzo.
- Proteger y brindar cohesión.

La matriz permite que se puedan determinar algunas características del material compuesto como la conformabilidad y el acabado superficial, de las propiedades de la matriz dependerá la capacidad que posea el material compuesto para ser moldeado con formas geométricas complejas principalmente en procesos que no necesitarán etapas de acabado.

Al someter al material compuesto a diferentes tipos de esfuerzos mecánicos la matriz juega varias funciones:

- Bajo cargas compresivas: la matriz soporta el esfuerzo, ya que se trata de la fase continua.
- En tracción: la matriz permite transferir la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las fibras o partículas que componen el material compuesto, de manera que éstas sean las que soporten el esfuerzo.

La matriz muchas veces es la que determina la resistencia al impacto y la encargada de detener la propagación de fisuras. (Hull, 2003)

a) Propiedades de las matrices

- Soporta las fibras permitiendo que se mantengan en su posición correcta.
- Transfiere la carga a las llamadas fibras fuertes.
- Protege a las piezas de sufrir daños durante su manufactura y uso.
- Evita que se realice la propagación de grietas en las fibras en todo el compuesto.
- Es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Las matrices llamadas poliméricas son las que se utilizan de forma más común. Los compuestos de matriz metálica son los que incluyen aluminio, cobre, magnesio, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos de matriz metálica se cubre una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. (Hull, 2003)

2.1.1.2. El material de refuerzo

Se considera como la fase discontinua, se agrega a la matriz para otorgar al compuesto propiedades que la matriz no tiene. El refuerzo se usa para aumentar la resistencia y rigidez mecánica y también son empleados para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.

El refuerzo es más efectivo cuanto menor es el tamaño de las partículas y más homogénea sea su distribución en la matriz. Los materiales utilizados para refuerzo se pueden presentar en forma

de partículas en un amplio grupo de materiales compuestos, los más comúnmente utilizados son aquellos que se encuentran reforzados con fibras. La mayoría de los compuestos reforzados con fibras, son resistentes, rígidos y de poco peso. Si el compuesto es diseñado para ser utilizado a altas temperaturas, la fibra también deberá tener una temperatura de fusión elevada. (Stupenengo, 2011)

2.1.2. Tipos de materiales compuestos

La más importante clasificación de los materiales compuestos es la que se establece en relación a su matriz y en la cual se puede identificar los siguientes grupos:

- Materiales compuestos de matriz metálica
- Materiales compuestos de matriz cerámica
- Materiales compuestos de matriz polimérica

Los materiales compuestos de matriz metálica tienen su aplicación principalmente para componentes aeroespaciales y de motores de automoción. Poseen alta resistencia y muy bajo peso. (Miravete & Cuartero, 2003)

Los materiales compuestos de matriz cerámica tienen la función de mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales, la mejora es orientada a soportar bajas temperaturas. (Miravete & Cuartero, 2003)

Los materiales compuestos de matriz polimérica poseen buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, pueden ser moldeados con libertad de formas dadas sus características particulares. La matriz está constituida por un polímero y el refuerzo constituye algún tipo de fibra de material sintético o inorgánico. Se destacan los materiales compuestos termoestables, con sus principales grupos de matrices, las resinas poliéster, viniléster,

epoxi, y fenólicas; y, como materiales de refuerzo, las fibras de vidrio, las aramílicas y las de carbono, tomando la forma de numerosos tipos de estructuras textiles simples o combinadas. (Miravete & Cuartero, 2003)

2.1.3. Aplicaciones de los materiales compuestos

En los últimos años ha existido un crecimiento rápido en el desarrollo y uso de los materiales compuestos, estos materiales han sido el reemplazo de otros utilizados de forma tradicional, en especial de los metales. Las ventajas del uso de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran factores como el módulo de elasticidad por unidad de peso y la resistencia por unidad de peso. En los materiales compuestos este módulo es muy alto, lo que produce una reducción de mucho peso, lo cual es muy importante principalmente en la industria del transporte aéreo ya que, al reducir el peso en las partes móviles, se incrementa el desempeño y un ahorro de energía. En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos de las aplicaciones de los materiales compuestos. (Tsai & Miravete)

2.2. Materiales compuestos que se fabrican en el CIDFAE

En el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea-CIDFAE existe un taller de materiales compuestos que cuenta con tres técnicos especialistas en la elaboración de materiales compuestos para aviación.

La misión de esta sección está orientada a la fabricación de partes y componentes para reparaciones del fuselaje de las aeronaves de la Fuerza Aérea y la construcción de la estructura de los UAV que se desarrollan en este Centro.

Para la fabricación de piezas de aviación utilizan AEROPOXY PR2032 Epoxy Resin y AEROPOXY PH3660 Epoxy Hardener, las cuales combinan con diferentes materiales principalmente fibra de vidrio para la elaboración de partes de aeronaves.

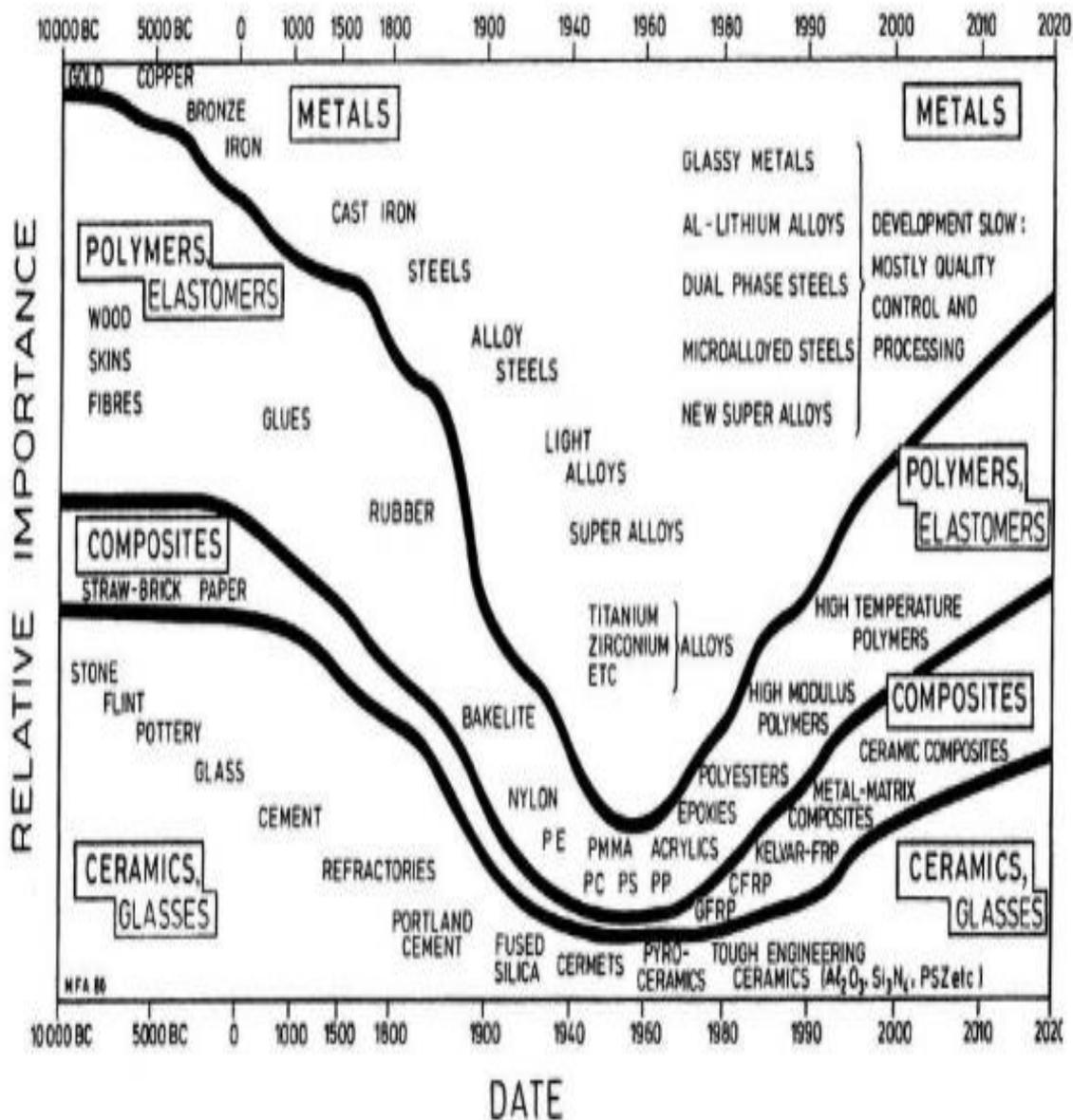


Figura 3. Importancia de los materiales compuestos a través del tiempo

Fuente: (Rodriguez, 2012)

Tabla 1*Aplicación de los materiales compuestos*

Industria	Ejemplos
Aeronáutica	Utilizado en la construcción de alas, componentes del fuselaje, trenes de aterrizaje, palas de helicóptero.
Automóviles	Utilizado en la construcción de piezas de carrocería, soportes de los faros, parachoques, bastidores de asientos, árbol y elementos del motor
Náutica	Construcción de cascos de barcos, cubiertas, mástiles, estructuras para navegación
Química	Construcción de conducciones, recipientes de presión
Mobiliario y equipamiento	Construcción de armazones, sillas, muebles, mesas, escaleras
Eléctrica	Construcción de materiales aislantes, paneles eléctricos, caja de interruptores

2.2.1. AEROPOXY PR2032 Epoxy Resin

Es una resina de laminación que está diseñada para aplicaciones de producción estructural. Cuando se usa con el endurecedor AEROPOXY PH3660, el sistema proporciona una excelente humectación de fibra de vidrio, carbono y fibras de aramida.

2.2.2. AEROPOXY PH3660 Epoxy Hardener

Es un agente de curado que proporciona una excelente humectación y adhesión con fibra de vidrio, carbono y telas de Kevlar. Es utilizado conjuntamente con la resina AEROPOXY PR2032.

2.2.3. Uso de los materiales compuestos en aeronáutica

Los materiales compuestos avanzados que se utilizan en la industria aeronáutica ofrecen ventajas de tipo económico a los fabricantes, el uso de los mismos en las aeronaves reduce el peso de la estructura y esto permite que se aumente la carga útil y se ahorre combustible. La resistencia y rigidez que presentan estos materiales por unidad de masa es superior a la de los materiales estructurales que se utilizan de manera clásica.

2.3. Técnicas de manufactura de materiales compuestos

Para los procesos de manufactura de material compuesto los procesos comunes que se realizan el de combinar algún tipo de fibra como refuerzo, una resina y un agente de curado. En el CIDFAE para elegir un proceso de manufactura se analizan varios parámetros como son:

- Tamaño del elemento que se va a fabricar.
- Geometría y forma de la pieza.
- Naturaleza de los materiales: Tipo de resina y fibra.
- Características mecánicas del elemento.
- Acabado de la superficie que se quiera obtener.
- Numérico de elementos a fabricar.
- Costo de fabricación de los elementos.

Existen varios tipos de procesos de manufactura usados en la fabricación de materiales compuestos los cuales son: de molde abierto (hand lay-up, spray-up, bolsa de vacío, filament winding y autoclave) o molde cerrado (moldeo por prensado en frío/caliente, pultrusión, moldeo

por transferencia de resina e infusión). El método que se quiere estudiar es la fabricación de materiales compuestos mediante el uso de un horno autoclave.

2.4. Horno autoclave

Para la fabricación de piezas en material compuesto utilizando un horno autoclave, el procedimiento común es el uso de fibras preimpregnadas con resina parcialmente curada, todavía reactiva (Abad, 2012). Con este proceso el catalizador permanece latente a temperatura ambiente durante varias semanas e incluso meses. La resina tiene la característica de que suele estar cerca del estado sólido a temperatura ambiente, de este modo el preimpregnado es ligeramente pegajoso. Para obtener el laminado de forma preimpregnada con fibra seca, se coloca la fibra sobre el molde o placa de metal, teniendo completado el proceso de laminado se debe colocar en el interior del autoclave y cerrar, se aplica temperatura constante hasta que termine el ciclo de secado. El proceso de secado en autoclave produce laminados de elevada calidad, el control del espesor del laminado es mucho mejor que el que se consigue con el método de moldeo por infusión. (Gómez, 2017)

Esta técnica de manufactura proporciona una buena calidad en el producto final, pero también existen ciertas desventajas como son:

- El equipo y las herramientas utilizadas son costosas.
- El número de elementos producidos es relativamente bajo debido al tamaño de la estructura del horno.
- El costo en la producción de los elementos es elevado.

Un horno autoclave es un depósito que mantiene a temperaturas constantes un determinado aire o gas y es utilizado para el curado de materiales compuestos. (Tsai S. W., 1988).

Es un recipiente que permite generar calor constante en su interior. El proceso de moldeo en un horno autoclave es similar al proceso de infusión, pero con la diferencia de que el laminado en el autoclave está sujeto a una presión adicional, mientras se le aplica al material compuesto calor para curar la resina. (IEEE, 2018).

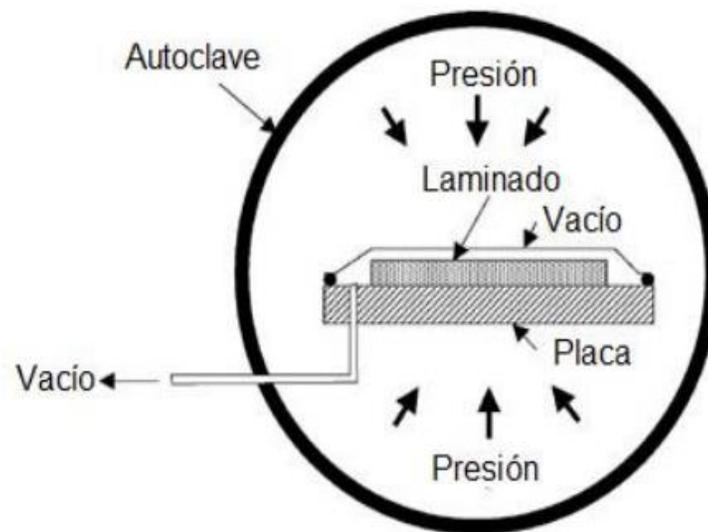


Figura 4. Autoclave

Fuente: (IEEE, 2018)

2.5. Sensores industriales de temperatura

2.5.1. Sensor

Es un dispositivo que proporciona una respuesta que se da normalmente mediante la generación de una señal eléctrica frente a estímulos o señales físicas o químicas. (Departamento de Eléctrica y Electrónica UVA, 2018).

Un sensor convierte una señal física de un tipo en una señal física de otra naturaleza.

2.5.2. Sensor de temperatura

Entre los sensores más comunes empleados para medir temperatura con instrumentación electrónica se tienen: RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas. (UNET, 2018)

2.5.2.1. Clasificación de los sensores de temperatura

Existen varias formas de realizar mediciones de temperatura con sensores de todo tipo de naturaleza. Para controlar y monitorear los cambios de temperatura en procesos industriales se han inventado, perfeccionado e innovado sensores. La tabla 2 muestra los sensores que son utilizados en la industria, y en especial, de los que se pueden usar en circuitos electrónicos junto con PLCs y otros sistemas electrónicos digitales.

Tabla 2

Rangos de temperatura de los sensores utilizados en la industria

Rangos de temperatura correspondientes a los métodos más comunes de medición	
Sistema	Rango en °C
Termocuplas	-200 a 2800
Sistemas de dilatación (capilares o bimetálicos)	-195 a 760
Termorresistencias	-250 a 850
Termistores	-195 a 450
Pirómetros de radiación	-40 a 4000

Fuente: (UPV, 2018)

La tabla 3 muestra la variedad de dispositivos diseñados para realizar medición de temperatura. Los sensores de tipo eléctrico son los que más uso tienen hoy en día debido a la posibilidad de conectarlos a elementos electrónicos de control.

Tabla 3
Dispositivos de medición de temperatura

Dispositivos de medición de temperatura			
Mecánicos	Radiación térmica	Eléctricos	Varios
<ul style="list-style-type: none"> • Termómetros de vidrio con líquidos • Termómetros bimetalógicos • Sistemas de dilatación 	<ul style="list-style-type: none"> • Pirómetros de relación • Termómetros infrarrojos 	<ul style="list-style-type: none"> • Diodos • Sensores con efecto resistivo • Termistores • Termorresistencias • Termocuplas 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicadores de color • Sondas neumáticas • Sensores ultrasónicos • Indicadores pirométricos • Termómetros acústicos • Cristales líquidos • Sensores fluídicos

Fuente: (UPV, 2018)

A continuación, se detallan las principales características de cada uno de los sensores de temperatura que se presentaron en la Tabla 2.

a) **Termocupla**

Las termocuplas son los sensores de temperatura eléctricos más utilizados en la industria. Una termocupla consta de dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar

temperatura en la unión de los metales se genera una tensión muy pequeña, del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura. (UPV, 2018)

El esquema de una termocupla se presenta en la Figura 5.

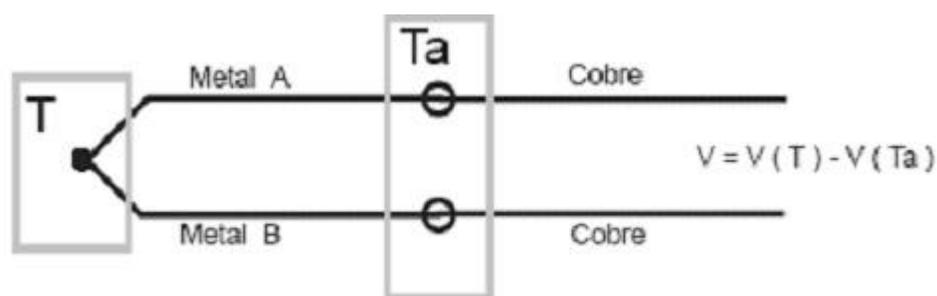


Figura 5. Esquema de una termocupla

Fuente: (Garrido, 2018).

Las termocuplas generalmente están encapsuladas en vainas, el encapsulamiento tiene la finalidad de protegerlas de las condiciones extremas a las que en ocasiones se ven expuestas debido a su uso en un proceso industrial. En caso de necesidad de transporte de señal se deben utilizar cables compensados para que la señal no se modifique y llegue de una manera fácilmente reconocible y reversible para los dispositivos de tratamiento de la señal.

La clasificación de la termocupla se puede realizar según varios criterios como son: el material de construcción, desviación o tolerancia, etc. Según estos criterios las termocuplas se pueden clasificar en dos grupos:

- **Termocuplas estándar**

Existen siete tipos de termocuplas que la Instrument Society of America (ISA) ha designado con distintos tipos de letras.

En la Tabla 4 se presentan algunas características como la composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices correspondientes a distintos tipos de termocuplas.

Tabla 4
Características de termocuplas estándar

Tipo	Denominación	Composición y símbolo	Rango de temperaturas	Diámetro del alambre apropiado	F.e.m. en mV
B	Platino-rodio 30% vs. Platino-rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0 - 1 500 (1 800)	0,35 y 0,5 mm	0 - 10,094 (13,585)
R	Platino-rodio 13% vs. Platino	PtRh 13% - Pt	0 - 1 400 (1.700)	0,35 y 0,5 mm	0 - 16,035 (20,215)
S	Platino-rodio 10% vs. Platino	PtRh 10% - Pt	0 - 1 300 (1.600)	0,35 y 0,5 mm	0 - 13,155 (15,576)
J	Hierro vs. Constatán	Fe - CuNi	-200 - 700 (900)	3 mm	-7.89 - 39,130 (51,875)
			-200 - 600 (800)	1 mm	-7.89 - 33,096 (45,498)
K	Níquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel)	NiCr - Ni	0 - 1000 (1 300)	3 ó 2 mm	0 - 41,269 (52,398)
			0 - 900	1,38 mm	

CONTINÚA 

			(1 200)		0 – 37,325 (48,828)	
T	Cobre	vs.	Cu – CuNi	-200 – 700	0,5 mm	-5,60 – 14,86
	Constatán			(900)		(20,86)
E	Niquel-cromo	vs.	NiCr – CuNi	-200 – 600	3 mm	-9,83 – 53,11
	constatán			(800)		(68,78)
	(Chromel	vs.				-8,83 – 45,08
	constatán)					(61,02)

Fuente (UPV, 2018)

- Los valores entre paréntesis que se presentan en la Tabla 4 son los admitidos en intervalos cortos (no permanentes).
- Los diámetros de alambres no son indicativos
- Los valores de fem (mV) en función de °C, referencia junta fría 0° C.
- **Termocuplas no estándar**

Existen otros materiales que son utilizados para realizar la construcción de termocuplas además de aquellos que tienen asignada una denominación con letra por la ISA (IEC).

Este tipo de termocuplas presentan algunas características diferentes y especiales que no presentan las de tipo estándar, esto hace que sean adecuadas para aplicaciones especiales, las características de cada termocupla y la fuerza electromotriz de salida pueden variar de un fabricante a otro. Estas termocuplas presentan varias características las que se pueden observar en la Tabla 5

Tabla 5
Características termocuplas no estándar

Composición	Características
NicroSil - NiSil - (níquel - cromo - silicio vs. níquel - silicio)	Calibración desde - 240 a 1.230°C; similar a la termocupla Tipo K, con una mejor estabilidad y mayor vida útil.
Platino - 20% rodio vs. platino - 5% rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas.
Platino - 40% rodio vs. platino - 20% rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas.
Platino - 13% rodio vs. platino - 1 % rodio	Mayor vida útil respecto a las termocuplas tipos R, S y B a temperaturas más elevadas.
Chromel (6) (3-G-345) vs. Alumel (6) (3-G-196)	Mayor resistencia que la termocupla Tipo K a la oxidación de cromo en atmósferas oxidantes de bajo tenor.
Tungsteno vs. tungsteno - 26% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.700 °C
Tungsteno - 3% renio vs. tungsteno - 25% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.760 °C
Tungsteno - 5% renio vs. tungsteno - 26% renio	Capaz de medir temperaturas hasta 2.700 °C
Aleación - hierro vs. Chromel	Capacidad mejorada respecto a las termocuplas de medición de temperaturas hasta -185 °C

Fuente: (UPV, 2018)

En la Tabla 6 se presentan las principales características de los diferentes tipos de termocuplas.

Tabla 6*Resumen de las características de termocuplas estándar*

Tipo	Atmósfera oxidante	Atmósfera reductora	Atmósfera inerte	Vacío	Atmósfera sulfurosa	Temperaturas subcero	Vapores metálicos
B	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO
R	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
S	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
J	SI	SI	SI	SI	NO > 500 °C	NO	SI
K	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI
T	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI
E	SI	NO	SI	NO	NO	SI	SI

Fuente: (UPV, 2018)

b) Termistores

Son sensores de temperatura que no presentan características lineales, su estructura está conformada de una mezcla de óxidos metálicos, el termistor es básicamente un semiconductor que en su funcionamiento se comporta como un resistor térmico. Con un cambio de temperatura aumenta o disminuye su resistencia. La característica que posee de alta sensibilidad a las variaciones de temperatura permite que resulte muy adecuado para la medición precisa de temperatura, es muy usado en aplicaciones de control y compensación en el rango de hasta 450°C

Los termistores tienen aplicación para medir temperatura tanto en sólidos, gases o líquidos. Se encuentran encapsulados como forma de protección y permite posicionarlos en los lugares donde se requiera medición. (Alzate, Montes, & Carlos, 2007)

- **Termistores NTC (Negative Temperature Coefficient)**

Poseen un coeficiente de temperatura negativo grande, su forma de funcionamiento se establece en que la resistencia que presentan desciende al momento que la temperatura aumenta. (Santamaría & Castejón).

La curva característica resistencia-temperatura para un termistor NTC se muestra en la Figura 6, la gráfica para la resistencia contra la temperatura en un termistor NTC es aproximadamente exponencial es decir no lineal. (Enríquez, 2012)

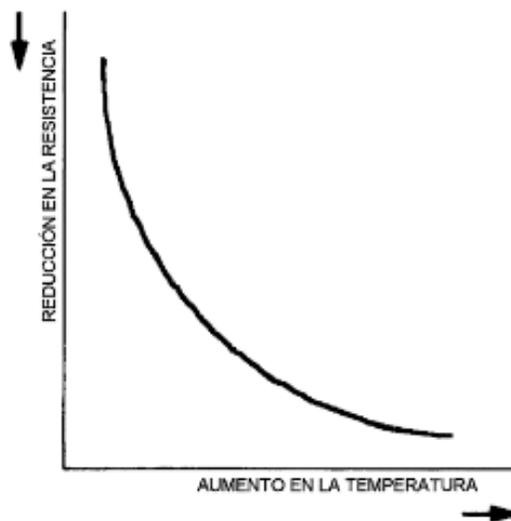


Figura 6. Curva característica para un termistor NTC

Fuente: (Enríquez, 2012)

- **Termistores PTC (Positive Temperature Coefficient)**

Poseen un coeficiente de temperatura positivo muy grande, de forma que la resistencia crece cuando la temperatura aumenta. (Santamaría & Castejón).

2.6. Controlador Lógico Programable (PLC)

PLC o Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo digital electrónico con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como ser: lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos.

Es un equipo electrónico, el cual realiza la ejecución de un programa de forma cíclica. La ejecución del programa puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero el aspecto más importante es la garantía de ejecución completa del programa principal.

Estos controladores son utilizados en ambientes industriales donde la decisión y la acción deben ser tomadas en forma muy rápida, para responder en tiempo real.

Los PLC son utilizados donde se requieran tanto controles lógicos como secuenciales o ambos a la vez. (Automación Micromecánica, 2018)

2.6.1. Estructura de un PLC

La estructura básica de un PLC que se observa en la Figura 7 está compuesta por:

- La CPU.
- Las interfases de entradas.
- Las interfases de salidas.

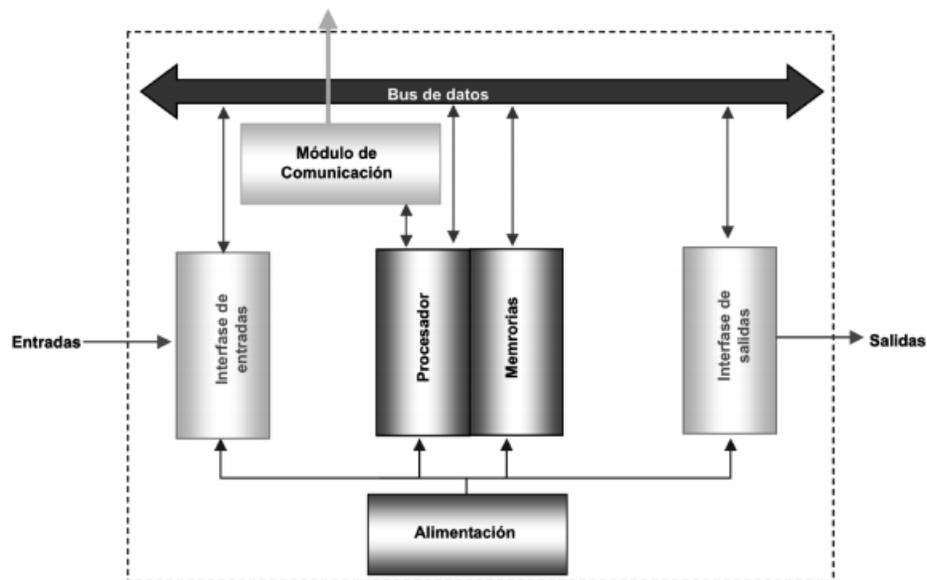


Figura 7. Estructura de un PLC

Fuente: (Automación Micromecánica, 2018)

2.6.2. Ciclo de funcionamiento

Los controladores lógicos programables tienen la característica de ser máquinas secuenciales que se utilizan para modelar sistemas que muchas veces son de evolución concurrente. El PLC ejecuta en forma correlativa las instrucciones que se encuentran almacenadas en su memoria y fueron programadas por el usuario. Su funcionamiento está basado en la lectura de entradas provenientes de la planta o del proceso, ejecuta el programa determinado por el usuario con esos valores de entradas y genera acciones de salida para realizar un control en la planta. La ejecución de esta rutina es de forma secuencial y continua para conseguir un control actualizado del proceso. (Departamento de sistemas e informática UNR, 2018).

La secuencia de operación de un PLC se puede dividir en tres fases principales:

- Lectura de señales desde la interfaz de entradas

- Procesado del programa para la obtención de las señales de control
- Escritura de señales en la interfaz de salida

El ciclo del PLC se muestra en la Figura 8

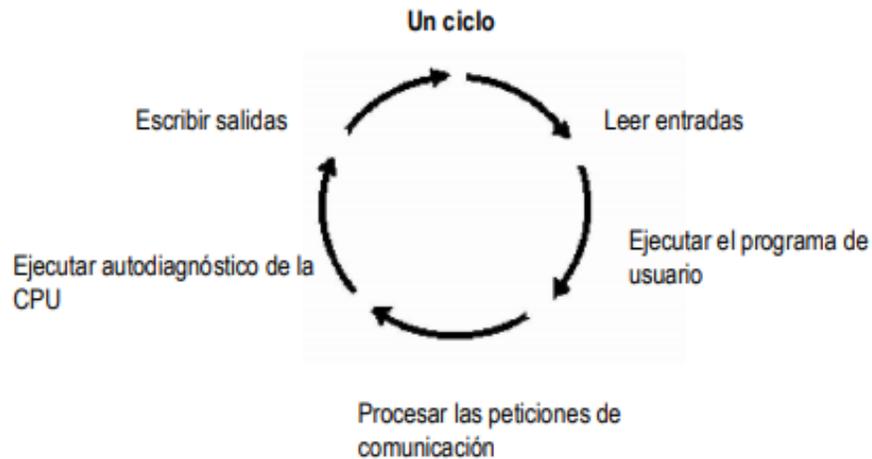


Figura 8. Ciclo de funcionamiento del PLC

Fuente: (Departamento de sistemas e informática UNR, 2018)

2.6.3. Programación del PLC

Los PLCs admiten varios lenguajes de programación, que podemos clasificar en:

- Algebraicos
 - Lenguajes booleanos
 - Lista de instrucciones
 - Lenguajes de alto nivel
- Gráficos
 - Diagrama de contactos

- Diagrama de funciones/bloques
- Intérprete GRAFCET-Gráfico Funcional de Control de Estados y Transiciones

2.6.4. Controlador Programable Siemens S7-1200

El controlador lógico programable S7-1200 ofrece como principales características flexibilidad y capacidad para controlar una gran variedad de dispositivos para realizar distintas tareas de automatización.

Su diseño es compacto, tiene configuración flexible y cuenta con un amplio juego de instrucciones. Incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, así como circuitos de entrada y salida en una carcasa compacta.

La CPU vigila y lee las señales que reciben las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa ingresado por el usuario, permite incluir lógica booleana, instrucciones de contaje y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes.

La CPU incorpora un puerto PROFINET que es un estándar de la industria para intercambiar datos entre dispositivos y controladores a través de Ethernet. Los módulos de comunicación están disponibles para la comunicación en redes RS485 o RS232. (SIEMENS, 2009). Las características del PLC S7-1200 se presentan en la tabla 7.

Control PID

El controlador PID cuyas siglas significan proporcional-integral-derivativo, es utilizado para realizar control genérico, en este controlador el diseñador tiene que dar valores adecuados, según

lo requiera la situación de control, a los distintos parámetros que contiene (Dorf & Bishop, 2011).

El esquema del controlador PID se observa en la figura 10.

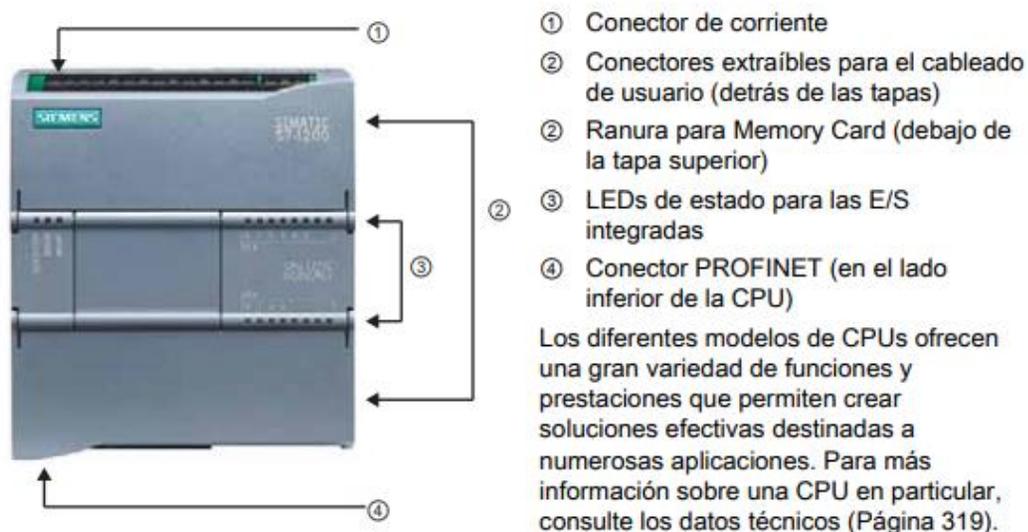


Figura 9. PLC SIEMENS S7-1200

Fuente: (SIEMENS, 2009)

Tabla 7

Características técnicas PLC SIEMENS S7-1200

Función	CPU 1211C	CPU 1212C	CPU 1214C
Dimensiones físicas (mm)	90 x 100 x 75		110 x 100 x 75
Memoria de usuario			
• Memoria de trabajo	• 25 KB		• 50 KB
• Memoria de carga	• 1 MB		• 2 MB
• Memoria remanente	• 2 KB		• 2 KB
E/S integradas locales			
• Digitales	• 6 entradas/4 salidas	• 8 entradas/6 salidas	• 14 entradas/10 salidas
• Analógicas	• 2 entradas	• 2 entradas	• 2 entradas
Tamaño de la memoria imagen de proceso	1024 bytes para entradas (I) y 1024 bytes para salidas (Q)		
Área de marcas (M)	4096 bytes		8192 bytes

CONTINÚA ➡

Ampliación con módulos de señales	Ninguna	2	8
Signal Board	1		
Módulos de comunicación	3 (ampliación en el lado izquierdo)		
Contadores rápidos	3	4	6
• Fase simple	• 3 a 100 kHz	• 3 a 100 kHz 1 a 30 kHz	• 3 a 100 kHz 3 a 30 kHz
• Fase en cuadratura	• 3 a 80 KHz	• 3 a 80 kHz 1 a 20 kHz	• 3 a 80 kHz 3 a 20 kHz
Salidas de impulsos	2		
Memory Card	SIMATIC Memory Card (opcional)		
Tiempo de respaldo del reloj de tiempo real	Típico: 10 días / Mínimo: 6 días a 40 °C		
PROFINET	1 puerto de comunicación Ethernet		
Velocidad de ejecución de funciones matemáticas con números reales	18 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución booleana	0,1 µs/instrucción		
Velocidad de ejecución de transferencia de palabras	12 µs/instrucción		
Comunicación			
Número de puertos	1		
Tipo	Ethernet		
Conexiones	<ul style="list-style-type: none"> • 3 para HMI • 1 para la programadora • 8 para instrucciones Ethernet en el programa de usuario • 3 para CPU a CPU 		
Transferencia de datos	10/100 Mb/s		
Aislamiento (señal externa a lógica del PLC)	Aislado por transformador, 1500 V DC		
Tipo de cable	CAT5e apantallado		
Fuente de alimentación			
Rango de tensión	85 a 264 V AC	20,4 a 28,8 V DC	
Frecuencia de línea	47 a 63 Hz	---	
Intensidad de entrada CPU sólo a carga máx.	80 mA a 120 V AC	400 mA a 24 V DC	
CPU con todos los accesorios de ampliación a carga máx.	40 mA a 240 V AC	1200 mA a 24 V DC	
Corriente de irrupción (máx.)	20 A a 264 V AC	12 A a 28,8 V DC	

CONTINÚA 

Aislamiento (potencia de entrada a lógica)	1500 V AC	Sin aislamiento
Corriente de fuga a tierra, línea AC a tierra funciona	0,5 mA máx.	
Fusible interno, no reemplazable por el usuario	3 A, 250 V, de acción lenta	
Alimentación de sensores		
Rango de tensión	20,4 a 28,8 V DC	
Intensidad de salida nominal (máx.)	300 mA (protegido contra cortocircuito)	

Fuente: (SIEMENS, 2009)

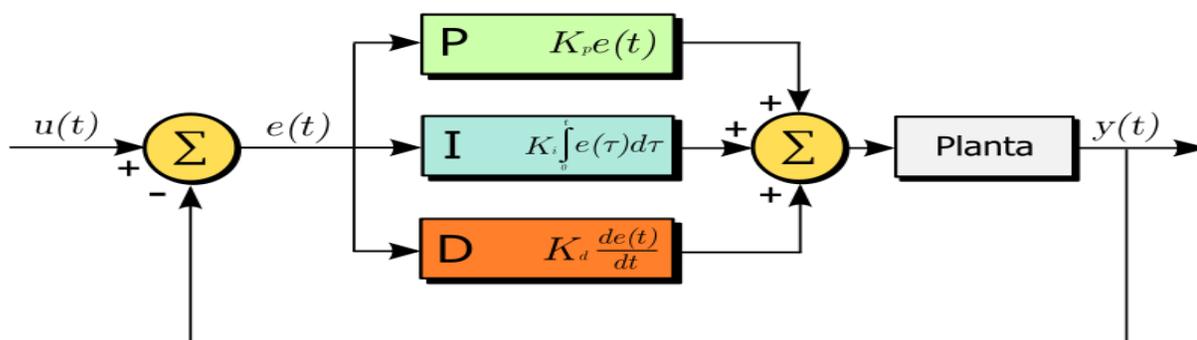


Figura 10. Diagrama de bloques control PID

Fuente: (Dorf & Bishop, 2011)

En el diagrama de bloques de la Figura 10 representa un sistema controlado por un controlador PID.

El control PID se presenta de diferentes modos, la respuesta proporcional es la base de los tres modos de control: si los otros dos, acción integral y acción derivativa, están presentes, estos son sumados a la respuesta proporcional. Las ecuaciones básicas del control PID se presentan a continuación:

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t) dt + k_d \cdot \left(\frac{de(t)}{dt} \right)$$

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

Donde:

u(t): Variable de control o salida del PID.

e(t): Error del sistema o medición menos valor de consigna.

Kp: Constante proporcional.

Ki: Constante integral.

Ti: Tiempo integral.

Kd: Constante derivativa.

Td: Tiempo derivativo

2.7. PID_Temp S7 -1200

El objeto tecnológico PID_Temp ofrece un regulador PID continuo con optimización integrada. Está diseñado especialmente para regular la temperatura y es apto para aplicaciones de calefacción o calefacción/refrigeración. PID_Temp captura de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación y lo compara con la consigna ajustada. A partir de los errores de regulación que se producen, la instrucción PID_Temp calcula el valor de salida para la calefacción o la refrigeración, a través del cual el valor real se iguala a la consigna. En el regulador PID, los valores de salida se componen de tres acciones:

- Acción P: La acción P del valor de salida aumenta proporcionalmente al error de regulación.

- Acción I La acción I del valor de salida aumenta hasta que se compensa el error de regulación.
- Acción D La acción D aumenta con una velocidad de variación creciente del error de regulación.

El valor real se iguala lo más rápidamente posible con la consigna. Si la velocidad de variación del error de regulación vuelve a reducirse, también lo hace la acción D. (SIEMENS, 2017)

La instrucción PID_Temp calcula los parámetros P, I y D para el sistema regulado de forma autónoma durante la optimización inicial. Los parámetros pueden optimizarse aún más a través de una optimización final. No es necesario determinar los parámetros manualmente. (SIEMENS, 2017)

2.8. KEPServer

Es una plataforma que permite conectividad, constituye una fuente única de datos de automatización industrial para realizar varias aplicaciones. Permite a los usuarios conectarse, administrar, monitorear y controlar diversos dispositivos, procesos de automatización y aplicaciones de software. KEPServer utiliza el estándar OPC para proporcionar a los usuarios una fuente de datos industriales y permite la comunicación entre los dispositivos de automatización industrial como PLCs y programas de desarrollo de interfaz como ArchestrA. (Kepware, 2019)

2.9. ArchestrA

Es la arquitectura tecnológica, desarrollada por Wonderware con el objetivo de para facilitar e impulsar la integración de dispositivos y sistemas de control industrial a distintos niveles. Permite

el desarrollo de interfaz HMI debido a la elevada cantidad de instrucciones destinadas al desarrollo con las que cuenta. (Reindustria, 2019)

2.10. Método de Ziegler-Nichols

Este método permite sintonizar o ajustar un controlador PID de una forma empírica, sin necesidad de conocer la función de transferencia de la planta, permite definir los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO

3.1. Introducción

Para realizar el diseño eléctrico, electrónico e implementación del control PID del horno de materiales compuestos del CIDFAE se debe seguir una serie de pasos mediante los cuales se va a buscar obtener una solución funcional y práctica para satisfacer la solución del problema particular, a partir de los requerimientos del usuario (datos iniciales).

Para realizar el proceso de diseño se debe utilizar la creatividad y la aplicación de conocimientos, combinado con un método de investigación y práctico, esto posibilitará que se trabaje de forma organizada lo que permite llegar a obtener los resultados deseados.

3.2. Planteamiento del problema de diseño

El CIDFAE busca la implementación en el horno autoclave de un control de temperatura monitoreado mediante una computadora para realizar el proceso de secado de partes y piezas de repuestos de aviones de la Fuerza Aérea Ecuatoriana fabricados en materiales compuestos.

3.3. Requerimientos de funcionamiento

El CIDFAE estableció los requerimientos de funcionamiento del horno autoclave, los cuales se detallan a continuación.

3.3.1. Requerimientos generales de funcionamiento

- Realizar el control automático de temperatura del horno autoclave.

- Implementar una interfaz HMI en una computadora para el control y monitoreo de la temperatura y el tiempo de funcionamiento del horno autoclave.
- Se deben reemplazar los 24 focos incandescentes con una resistencia eléctrica para ser utilizada como elemento calefactor.
- Se debe utilizar para la implementación del control automático de temperatura un PLC S7-1200. Este PLC se encontraba en los inventarios del CIDFAE por lo que uno de los requerimientos del operador fue su uso obligatorio.
- El horno debe tener dos modos de funcionamiento, un modo manual en el cual el operador ingrese de acuerdo a las necesidades de secado el tiempo y la temperatura y otro modo automático en el cual ya se encuentren establecidos los valores de temperatura y tiempo en el proceso de secado.
- Implementar un botón de paro de emergencia que detenga el proceso de secado y luces indicadoras de operación del horno autoclave.

3.3.2. Requerimientos de temperatura

Para la automatización del horno autoclave de materiales compuestos del CIDFAE se han establecido los requerimientos de temperatura que se muestran en la tabla 8.

El sistema debe mantener una temperatura constante en el interior del horno por un tiempo seleccionado por el usuario.

3.3.3. Requerimientos de tiempo

Para la automatización del horno autoclave de materiales compuestos del CIDFAE se han establecido los requerimientos de tiempo que se muestran en la tabla 9.

Tabla 8*Requerimientos de temperatura horno autoclave CIDFAE*

Temperatura horno autoclave CIDFAE	
Set point de temperatura	Ingresado por el operador de acuerdo con las necesidades o ingresado automáticamente por los programas de secado configurados
Temperatura mínima	22 °C (temperatura promedio ambiente)
Temperatura máxima	160 °C
Variación de temperatura	±2 °C

Tabla 9*Requerimientos de tiempo horno autoclave CIDFAE*

Tiempo horno autoclave CIDFAE	
Tiempo de funcionamiento	Ingresado por el operador de acuerdo con las necesidades o ingresado automáticamente por los programas de secado configurados.
Tiempo mínimo de funcionamiento	1 minuto
Tiempo máximo de funcionamiento	6 horas

3.3.4. Requerimientos de modos de operación

Para el funcionamiento del horno autoclave se han establecido tres modos de operación: manual, automático y configuración. Modos que se muestran en la Tabla 10.

3.3.5. Requerimientos eléctricos

Los requerimientos eléctricos de funcionamiento del horno autoclave de materiales compuestos y de sus elementos se muestran en la Tabla 11. La fuente de alimentación para el horno autoclave es la del hangar del CIDFAE la cual es de 110 VAC y 60 Hz.

Tabla 10*Requerimientos de modos de operación horno autoclave CIDFAE*

Modos de operación horno autoclave CIDFAE	
Modo manual	Permite el ingreso de temperatura y tiempo por parte del operador según las necesidades de secado
Modo automático	Permite la selección de programas de secado, los cuales tienen tiempo y temperatura previamente configurados en el sistema.
Modo configuración	Permite que el operador cambie los coeficientes P, I y D del controlador PID.

Tabla 11*Requerimientos eléctricos horno autoclave CIDFAE*

Requisitos eléctricos horno autoclave CIDFAE	
Voltaje de operación horno	110 VAC
Voltaje de operación PLC	110 VAC
Voltaje operación luces piloto	110 VAC
Voltaje operación pantalla HMI	110 VAC

3.4. Diseño Conceptual

3.4.1. Diagrama de bloques del funcionamiento del horno autoclave

En la figura 11 se visualiza el diagrama de bloques propuesto para el funcionamiento del proceso de control de temperatura para el secado de materiales compuestos en el horno autoclave, se muestran la relación existente entre los diversos componentes que constituyen el proceso de secado a una temperatura constante y por un tiempo determinado.

3.4.1.1. Pantalla HMI

La pantalla HMI posibilita la comunicación entre el usuario y el horno, permite el ingreso del set point de temperatura y tiempo de funcionamiento del horno autoclave, además visualizar la

temperatura en la que se encuentra el horno en todo momento y el tiempo de funcionamiento que ha cumplido.

3.4.1.2. Controlador

El controlador permite la automatización del proceso de secado del horno autoclave, recibe la señal del sensor de temperatura; procesa, calcula y emite la señal de salida hacia el elemento calefactor, activa las luces indicadoras según la operación en la que se encuentre el horno autoclave. En el controlador se va a implementar un control PID para la automatización del proceso de secado del horno autoclave.

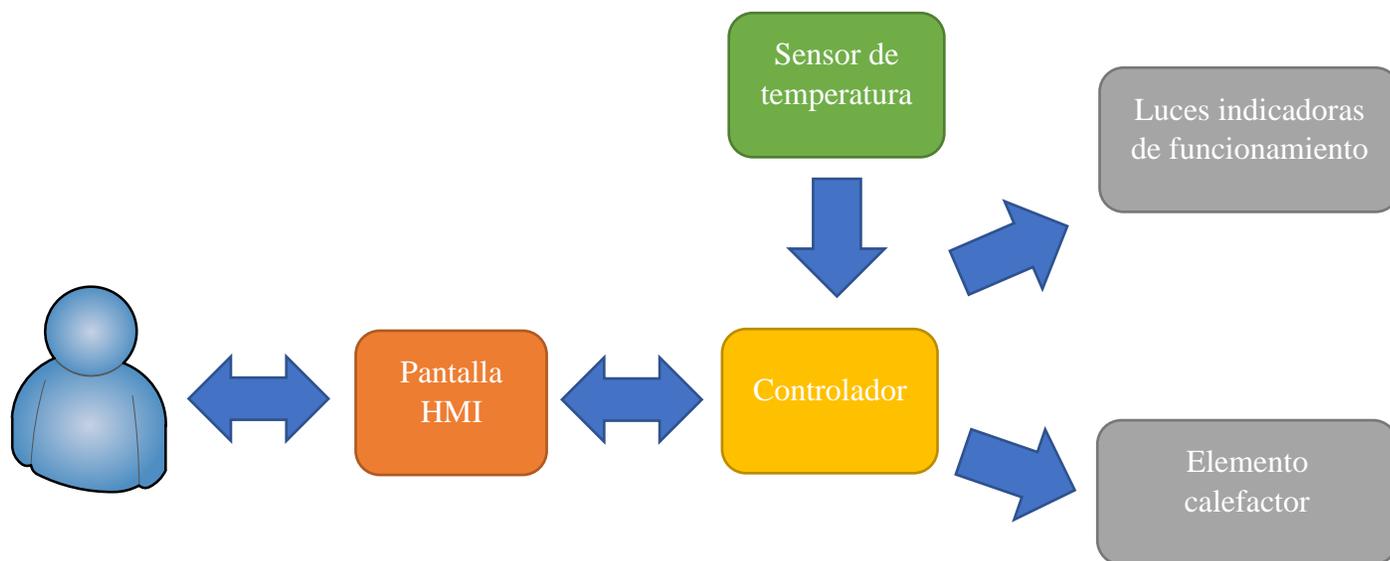


Figura 11. Diagrama de bloques funcionamiento horno autoclave

3.4.1.3. Sensor de temperatura

Transmite la señal de temperatura del interior del horno autoclave hacia el controlador, el rango de la señal de temperatura esta expresada entre 0 y 10 V.

3.4.1.4. Luces indicadoras de funcionamiento

Las luces constituyen un indicador visual sobre el estado de operación del horno autoclave. Si la luz roja se encuentra encendida el horno no se encuentra en funcionamiento, si la luz verde se encuentra encendida el horno se encuentra realizando el proceso de secado y si la luz roja se encuentra intermitente se encuentra el paro de emergencia activado.

3.4.1.5. Elemento calefactor

De acuerdo con las señales que el controlador envíe el elemento calefactor va a elevar o disminuir la temperatura del horno autoclave.

3.5. Diseño Detallado

3.5.1. Elementos de control en el horno autoclave

3.5.1.1. Control automático de temperatura

Para implementar un control de temperatura, se debe realizar un sistema de cambio y supervisión de temperatura en el interior del horno autoclave. Para la implementación de este sistema se necesita:

- Sensor de temperatura
- Elemento calefactor (Termorresistencia)

- Cables y conectores

3.5.1.2. Sistema visual de control de funcionamiento

Para implementar un sistema visual de control de funcionamiento se deben instalar luces indicadoras y un botón de paro de emergencia. Para la implementación de este sistema se necesita:

- Luz piloto roja
- Luz piloto verde
- Botón de paro de emergencia
- Cables y conectores

La luz roja encendida da una indicación de que el horno no se encuentra en funcionamiento, la luz verde encendida significa que el horno se encuentra cumpliendo con el proceso de secado y la luz roja intermitente significa que se ha presionado el paro de emergencia y se ha detenido el proceso de secado.

3.5.1.3. Sistema de control y variación de temperatura

Para implementar un control que mantenga el valor de la temperatura constante por un tiempo determinado se debe tener un sistema que reciba la señal del sensor de temperatura y administre la señal al elemento calefactor para que la temperatura se mantenga constante y por un tiempo determinado. Para la implementación de este sistema se necesita:

- PLC
- Interfaz Humano Máquina (HMI)
- Protecciones
- Relés

- Circuitos de acoplamiento
- Fuente de tensión
- Cables y conectores

3.5.2. Selección de sensor de temperatura

Para la selección del sensor de temperatura se debe analizar que cumpla con todas las características deseadas y que permita el mejor funcionamiento del horno autoclave.

La principal función que tiene el horno autoclave es la de mantener la temperatura constante por periodos de tiempo determinados, por lo que la selección del sensor de temperatura es fundamental para el correcto funcionamiento.

Requisitos mínimos del sensor

- Rango de temperatura de 0 a 200 °C
- Robusto
- Estándar industrial para señales analógicas; 0 a 10 V o 4 a 20 mA
- Fácil montaje

3.5.2.1. Análisis

Para seleccionar el sensor se debe realizar una comparación entre instrumentos de medición de temperatura utilizados en el mercado y de fácil adquisición por lo que se analizará:

- Sensor de temperatura Termocupla Tipo K
- Sensor de temperatura PT-100

- Sensor de temperatura LM35

3.5.2.2. Sensor de temperatura termocupla tipo K

La termocupla está formada por la unión por un extremo de dos metales diferentes. Cuando la unión de los dos metales se enfría o calienta produce una diferencia de potencial muy pequeña que se puede correlacionar mediante un circuito de acoplamiento con la temperatura. La termocupla no debe ser utilizada cuando se realizan mediciones a largas distancias (más de 10 a 20 m).

En la tabla 12 se muestran las características de la termocupla tipo K.

Tabla 12

Características termocupla tipo K

Termocupla tipo K	Características
Rango de temperaturas	-200 hasta 1250 °C
Material de la sonda	Acero inoxidable
Trenzado de aislamiento interno	Fibra de vidrio
Conector	Tipo spade

3.5.2.3. Sensor de temperatura PT-100

Es un detector de temperatura RTD (detector de temperatura por resistencia). Se encuentran fabricados en platino. Aumenta su resistencia con el aumento de la temperatura. El incremento de la resistencia del PT-100 no es lineal, pero si es creciente y se puede caracterizar.

En la tabla 13 se muestran las características del PT-100

Tabla 13*Características sensor PT-100*

PT-100	Características
Rango de temperaturas	-50 hasta 600 °C
Forma	Cilindro
Material	CrNiMoTi
Transmisión de temperatura	Acoplar de 0 a 10 V

3.5.2.4. Sensor de temperatura LM35

Es un sensor en base a un circuito electrónico que proporciona una salida analógica proporcional a la temperatura. El LM35 proporciona 10 mV por cada grado centígrado. Puede ser usado sin offset a la salida.

En la tabla 14 se muestran las características del LM35

Tabla 14*Características sensor LM-35*

LM35	Características
Rango de temperaturas	-55 hasta 150 °C
Resolución	10 mV por cada °C
Salida	Analógica
Número de pines	3 pines

En la tabla 15 se muestra una comparación entre los tres sensores, se observan las ventajas y desventajas de cada instrumento.

Tabla 15

Matriz de comparación para la selección de sensor de temperatura

Sistema Control de temperatura, horno autoclave			
Sensor de temperatura	Termocupla tipo K	Sensor PT-100	Sensor LM35
Imagen del sensor			
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño compacto • Robusta • Cable de instalación con aislamiento incluido. • Mayor rango de temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de mediciones. • Alta precisión. • Salida en protocolo industrial. • Encapsulado 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran exactitud de medición • Facilidad en la lectura de la temperatura. • No necesita circuitos de acoplamiento para temperatura. • Bajo costo
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere circuito de acoplamiento. • No tiene encapsulamiento. • Mediano costo 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene una salida lineal. • Circuito de acoplamiento complejo. • Alto costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de temperaturas limitado. • Sensibilidad a daños.

3.5.2.5. Criterios a evaluar para la selección de sensor de temperatura

Los diferentes criterios que se van a evaluar para la selección del sensor de temperatura se deben cuantificar en un valor de 100 puntos, el sensor que dentro del análisis de los parámetros cumpla con la calificación más alta será el que cumpla los requisitos para ser implementado en el control de temperatura del horno autoclave.

- **Montaje:** La facilidad de montar un sensor en la estructura del horno autoclave es importante, se debe analizar si el sensor puede ser montado directamente al sistema o se deben implementar circuitos de acoplamiento y que tan complejos son estos circuitos. El valor asignado a este criterio es de 20 puntos, el valor más alto será en cuanto el sensor sea más fácil de montar y de menor ponderación si el sistema tiene más dificultad en su montaje, según el criterio del diseñador.
- **Seguridad:** Se debe analizar si el sensor cuenta con robustez en el sistema, si su funcionamiento va a ser confiable y no va a sufrir daños que produzcan alguna condición insegura en el funcionamiento del horno autoclave. Se debe analizar si va a proporcionar mediciones seguras y con repetitividad. Este criterio tiene un valor de 20 puntos, siendo el más alto cuando el sensor es más seguro y de menor ponderación si se tiene menor seguridad en la medición, según el criterio del diseñador.
- **Mantenimiento:** Se debe analizar si el sensor implementado en el horno autoclave necesita de mantenimientos tanto preventivo como correctivo de forma periódica. Este criterio se le asigno un valor de 20 puntos, siendo el más alto cuando menor mantenimiento necesita y el valor más bajo cuando mayor cantidad de mantenimiento necesita, según el criterio del diseñador.

- **Costo:** El análisis del costo es fundamental ya que se debe resultar lo más rentable posible ofreciendo las características de medición que se busca para el control de temperatura del horno autoclave. Se le asignó un valor de 20 puntos, siendo el más alto el de menor costo y el más bajo el de mayor costo, según el criterio del diseñador.
- **Funcionalidad:** Este criterio analiza que el sensor satisfaga las necesidades del usuario en cuanto al rango de medición de temperaturas, de manera fácil, a este criterio se le asignó un valor de 20 puntos, siendo el más alto el de mejor funcionalidad y el más bajo el de menor funcionalidad.

Tabla 16

Criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura

Criterios de evaluación	Símbolo	Valor
Montaje	M	20
Seguridad	S	20
Mantenimiento	MA	20
Costo	C	20
Funcionalidad	F	20

La tabla 17 muestra la comparación en los criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura.

Como se observa en la figura 12, el sensor con mayor puntaje según los criterios de evaluación fue la termocupla tipo K.

Tabla 17

Comparación de criterios de evaluación para la selección del sensor

Ítem	Criterios						Total
	de	M	S	MA	C	F	
Sensor temperatura							
LM35		15	20	15	20	0	70
PT100		10	20	20	5	20	75
Termocupla tipo K		15	15	20	10	20	80

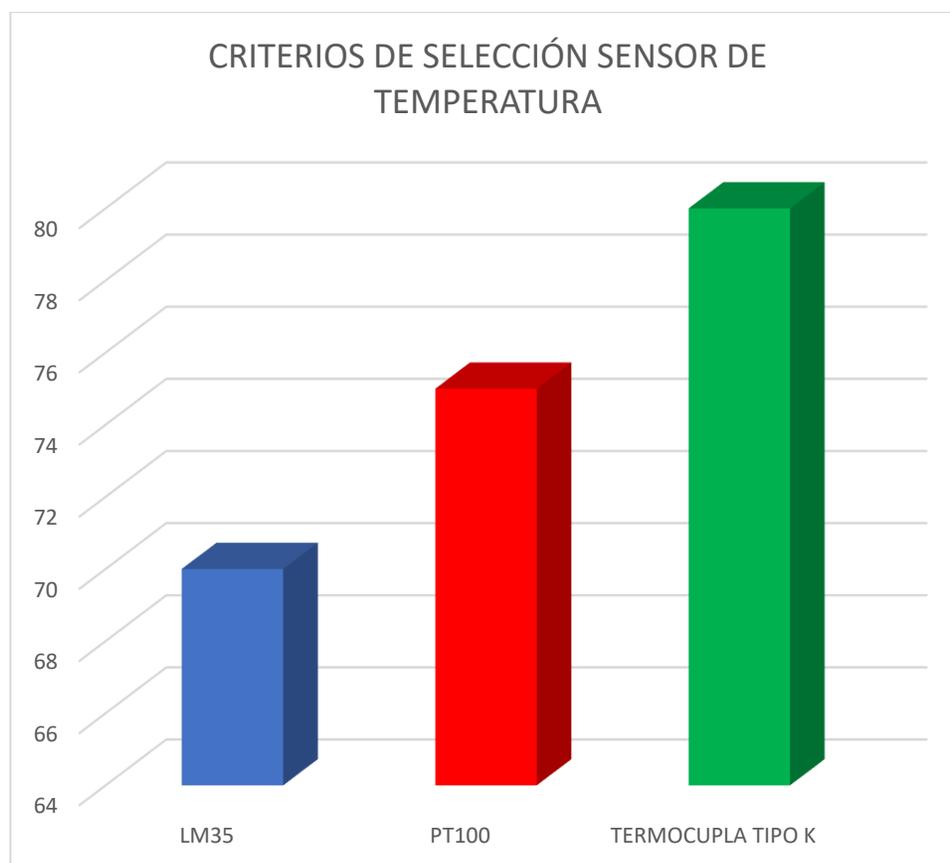


Figura 12. Criterios de evaluación de selección de sensor de temperatura

Para el circuito de acoplamiento entre la termocupla tipo K y el PLC se va a utilizar un módulo de señales de termopar SM 1231 RTD, este módulo es suministrado por el CIDFAE.

3.5.2.6. Conclusión del tipo de sensor a utilizar en el horno autoclave

Luego del análisis de los tres instrumentos preseleccionados, se obtuvo según los criterios de evaluación que el sensor que más puntaje obtuvo es la termocupla tipo K, este sensor es el idóneo para la implementación en el horno autoclave de materiales compuestos.

3.5.3. Controlador del sistema

Existen muchas alternativas de controladores para realizar la automatización del proceso de control de temperatura para el secado de materiales compuestos, para el horno autoclave del CIDFAE uno de los requerimientos del operador fue el que se utilice el PLC S7-1200 que es de su propiedad, por lo que el controlador que se va a utilizar para la implementación del control de temperatura es un PLC SIEMENS S7-1200.

3.5.3.1. PLC SIEMENS S7-1200

Este PLC ofrece características como flexibilidad y la capacidad de controlar gran cantidad de dispositivos, en varios procesos de automatización, posee un diseño compacto, una configuración flexible y amplia gama de herramientas e instrucciones incorporadas. Dentro de las características principales para la utilización de este PLC en el control de temperatura del horno autoclave se encuentra que cuenta con un objeto tecnológico llamado PID_TEMP el cual permite implementar un control PID que se sintoniza automáticamente según las necesidades de control. Tiene la posibilidad de controlar las luces indicadoras de funcionamiento, recibir la señal del sensor de

temperatura y comunicarse con una interfaz HMI. Este PLC es el idóneo para realizar el control de temperatura del horno autoclave.

3.5.3.2. Conclusión en la selección del controlador

El PLC S7-1200 de SIEMENS posee las funciones y herramientas adecuadas para controlar el funcionamiento del control de temperatura del horno autoclave de materiales compuestos, además su utilización es un requerimiento del CIDFAE que es el usuario del horno autoclave por lo que el controlador que se va a utilizar es el PLC SIEMENS S7-1200.

3.5.3.3. Conexión del PLC Siemens S7-1200

Para realizar el montaje del PLC en el horno autoclave, se debe tomar en cuenta las recomendaciones establecidas en el manual de funcionamiento del PLC S7-1200. (SIEMENS, 2009)

- Dejar una zona de disipación de calor de 25 mm por encima y por debajo de la unidad para que el aire circule libremente y evitar recalentamientos.
- Desconectar la alimentación siempre antes de montar o desmontar un PLC S7-1200.
- Conectar los módulos de ampliación y comunicación.
- Los cables deben tener una longitud adecuada para que no existan cables tensionados que puedan desconectarse o cortocircuitarse.

El PLC S7-1200 tiene las siguiente entradas y salidas. (SIEMENS, 2009)

- 8 entradas digitales
- 2 entradas analógicas

- Salidas digitales 8

3.5.3.4. Conexión de sensores a PLC S7-1200

Las entradas del PLC S7-1200 no tienen aislamiento galvánico, por lo que requieren el mismo potencial de referencia (masa). Las entradas se conectan como se observa en la figura 13.

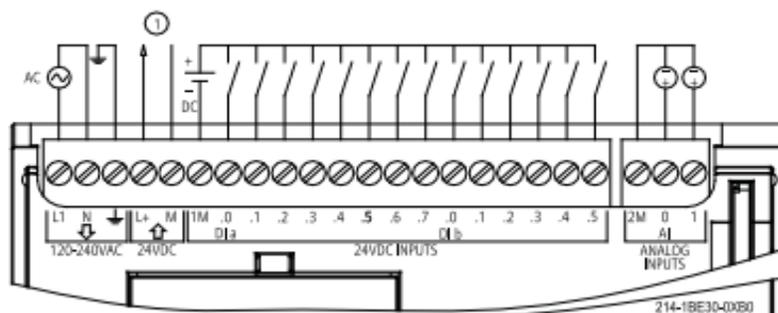


Figura 13. Conexión de entradas S7-1200 SIEMENS

Fuente: (SIEMENS, 2009)

3.5.3.5. Conexión de Salidas

Las salidas del PLC S7-1200 se pueden manipular de manera independiente conectando a diferentes cargas. Las salidas se conectan como se observa en la figura 14.

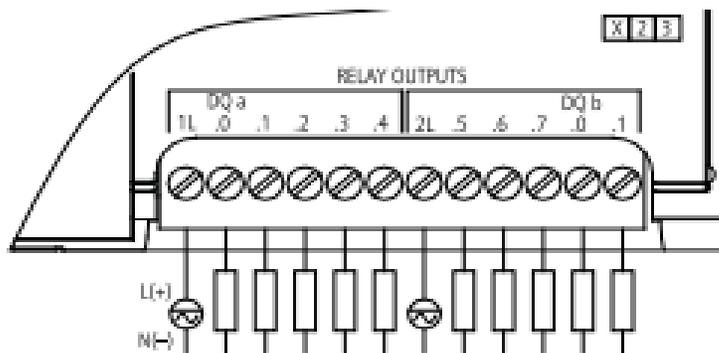


Figura 14. Conexión de salidas S7-1200 SIEMENS

Fuente: (SIEMENS, 2009)

3.5.3.6. Determinación de entradas y salidas a utilizar del PLC S7-1200

Para la determinación del número de entradas y salidas que se va a utilizar del PLC S7-1200 se analizará cada sistema. Los sistemas serán:

- Sistema visual de control de funcionamiento
- Sistema de variación y control de temperatura

Con el análisis de estos sistemas en la tabla 18 se presenta el número de entradas y salidas que se van a utilizar para la implementación del control de temperatura del horno autoclave en el PLC S7-1200.

Tabla 18

Determinación de uso de entradas y salidas PLC S7-1200

Determinación de uso de entradas y salidas					
Sistema	Subsistema	Número de entradas	Tipo de entrada	Número de salidas	Tipo de salida
Visual de control de funcionamiento	Botón de paro de emergencia	1	Digital		
	Luces indicadoras			2	Relé
Variación y control de temperatura	Sensor de temperatura	1	Analógica		
	Elemento calefactor			1	Digital

El PLC S7-1200 tiene las entradas y salidas suficientes para poder realizar la implementación del control del horno autoclave.

3.5.4. Elemento calefactor

Es una estructura que en base a carga eléctrica genera calor. El elemento calefactor basa su funcionamiento en la circulación de corriente a través de una tira de alambre de distintos grosores, la tira convierte la energía eléctrica en calor, este calor es irradiado en todas las direcciones.

3.5.4.1. Termorresistencia de 3000 W

Para la implementación del control de temperatura en el horno autoclave de materiales compuestos del CIDFAE se va a utilizar una termorresistencia de 3000 W de funcionamiento a 110 VAC que el CIDFAE suministra, esta termorresistencia reemplazará a los 24 focos incandescentes que se encontraban instalados en el interior del horno. La termorresistencia se puede observar en la figura 16.

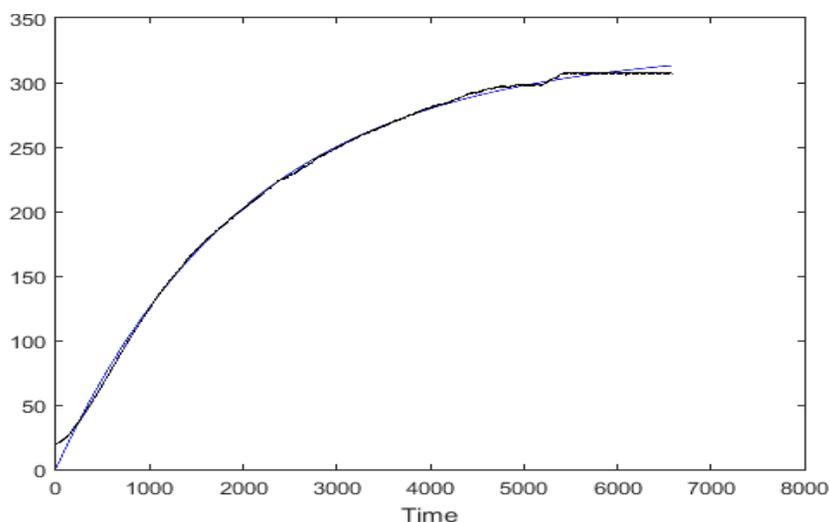


Figura 15. Curva de respuesta de temperatura de la termorresistencia

Se realizó una prueba de calentamiento con la termorresistencia de 3000 W, la temperatura máxima que alcanza el horno autoclave es de 307 °C, esta temperatura se encuentra por encima de la temperatura máxima de operación establecida para el horno que es de 160 °C. La curva de respuesta de temperatura de la termorresistencia en el horno autoclave se puede observar en la figura 15.

3.5.4.2. Conclusión en la selección del elemento calefactor

Para implementar el control de temperatura en el horno autoclave se debe utilizar una termorresistencia de 3000 W suministrada por el CIDFAE, la cual cumple con la generación de calor adecuado para que el horno se caliente a la temperatura máxima requerida que es de 160 °C. La curva de respuesta de temperatura de la termorresistencia en el interior del horno autoclave se puede observar en la figura 15.

3.5.5. Luces piloto indicadoras

El objetivo de la implementación de estas luces es dar una percepción visual de la fase de funcionamiento en la que se encuentra el horno autoclave. Es por eso que se debe considerar la implementación de una luz roja y una luz verde ya que en los procesos de automatización la luz verde significa que el proceso está en marcha sin ningún problema y la luz roja significa que el proceso se encuentra detenido o paralizado. La luz roja encendida muestra que el proceso de secado se encuentra detenido o no se ha iniciado, la luz verde encendida muestra que el proceso de secado se encuentra activo y la luz roja de forma intermitente muestra que el paro de emergencia ha sido activado. Las luces indicadoras fueron suministradas por el CIDFAE.

Tabla 19*Luces indicadoras de proceso de secado*

Luces indicadoras del proceso de secado	
Luz verde continua	Proceso de secado en marcha
Luz roja continua	Proceso de secado detenido
Luz roja intermitente	Paro de emergencia activado

*Figura 16.* Termorresistencia de 3000 W

3.5.6. Pulsador de paro de emergencia

El pulsador de paro de emergencia sirve para prevenir situaciones que puedan poner en peligro a los operadores y los componentes electrónicos del horno autoclave, al pulsarlo desconecta la resistencia eléctrica de calentamiento de la alimentación. El pulsador suministrado por el CIDFAE y que se va a utilizar en la implementación del horno autoclave es un Schneider ZBE-101. El pulsador se observa en la figura 17.

Tabla 20

Información sobre el tipo de circuito del pulsador de paro de emergencia

Botón de paro de emergencia	
Tipo de circuito	Normalmente cerrado



Figura 17. Botón de paro de emergencia

3.5.7. Diagrama eléctrico del horno autoclave

La figura 18 presenta el diagrama del circuito eléctrico general del horno autoclave, se muestran las diferentes conexiones de los componentes eléctricos y electrónicos que forman parte del proceso de control de temperatura para el secado de materiales compuestos.

3.5.8. Diagrama P&ID del horno autoclave

En la figura 19 se puede visualizar el diagrama general P&ID del horno autoclave, se muestra el flujo del proceso de secado de materiales compuestos en el horno autoclave, de igual forma se

muestran los equipos y el instrumental utilizado de forma general para realizar el proceso de secado.

3.5.9. Diagrama Grafset del proceso de secado de materiales compuestos

En la figura 20 se puede visualizar el diagrama de control con etapas y transiciones, en este se muestra cómo se realiza el funcionamiento general de la programación del PLC, se representan tres etapas de funcionamiento del horno autoclave con sus respectivas transiciones y acciones asociadas a cada una de las etapas, en este diagrama se fundamenta la programación del PLC.

3.5.10. Diseño de circuitos

Para realizar el diseño de los diferentes circuitos eléctricos y electrónicos que se van a implementar en el horno autoclave se deben utilizar los datos que se observan en la tabla 21, el valor de la tensión se encuentra de acuerdo con el sistema de alimentación que existe en el CIDFAE.

Tabla 21

Datos técnicos de funcionamiento eléctrico del horno autoclave

Potencia de la resistencia eléctrica	3 000 W
Voltaje de funcionamiento	110 VAC

Para realizar el cálculo de la intensidad de corriente que va a utilizar el horno autoclave en su circuito de potencia se utilizó la siguiente fórmula:

$$P = I \times V$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{3000 W}{110 V}$$

$$I = 27.27 A$$

Donde:

P: Potencia de la termorresistencia

I: Intensidad de corriente de la termorresistencia

V: Tensión de alimentación de la termorresistencia

Para los cálculos se va a tener en cuenta un rango de seguridad del 10%. Por lo que la corriente de funcionamiento del horno autoclave se va a considerar con el valor de 30 A.

3.5.11. Circuito de potencia

Este circuito es diseñado para proteger a los equipos utilizados en el control, este circuito es un nexo entre el controlador y los actuadores, para el funcionamiento del horno autoclave se diseñó un circuito de potencia basado en un relé de estado sólido.

3.5.11.1. Relé de estado sólido

El relé de estado sólido se encuentra conectado a la salida de control del PLC S7-1200, en este caso el relé de estado sólido realiza su funcionamiento de acuerdo con las señales que proporciona el control PID programado en el PLC. Se utiliza un relé de estado sólido debido a sus características de conmutación, este se activa por medio de un interruptor electrónico sin partes mecánicas mejorando el tiempo de respuesta del circuito de potencia y proporcionando un control adecuado en la temperatura del horno autoclave.

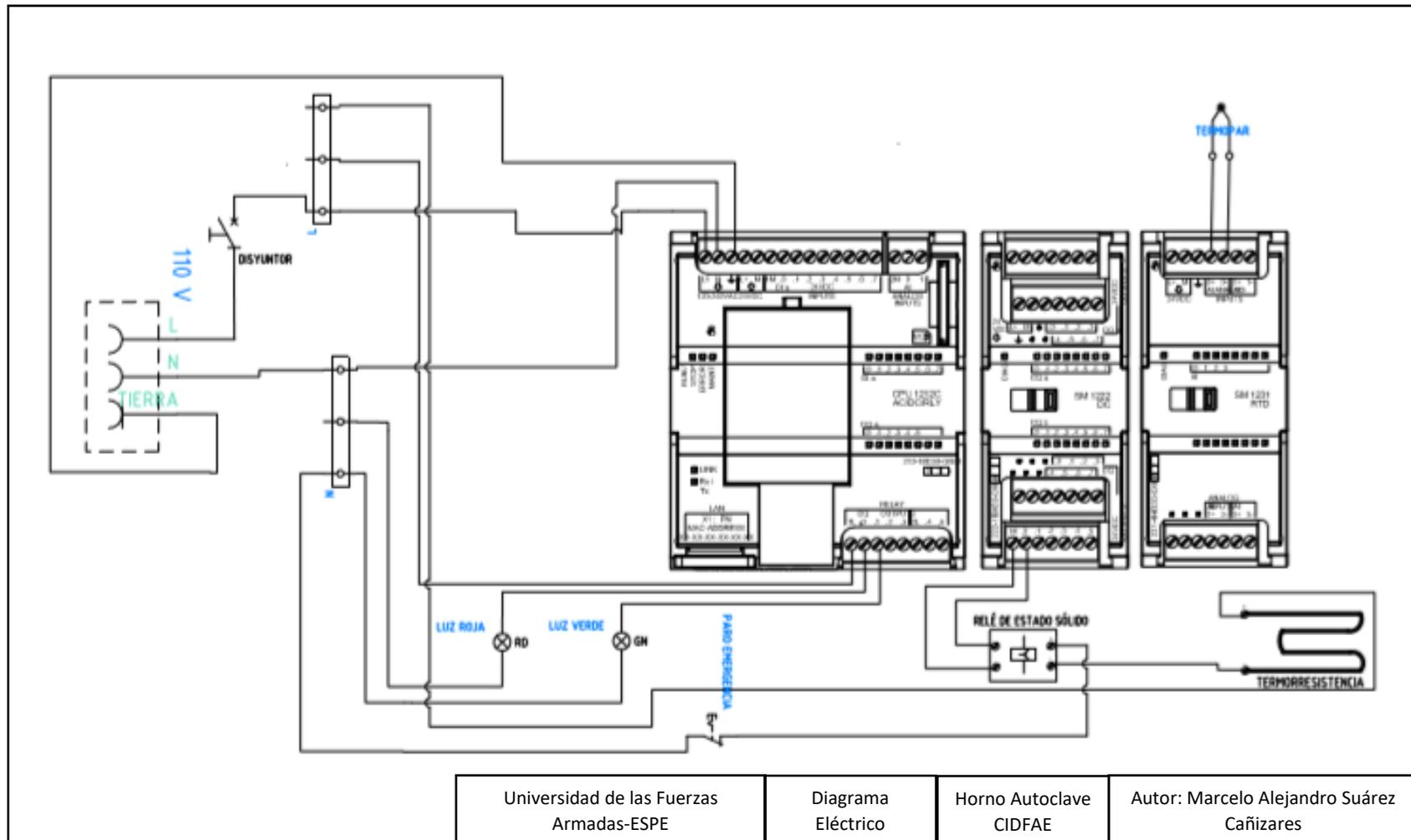


Figura 18. Diagrama eléctrico horno autoclave

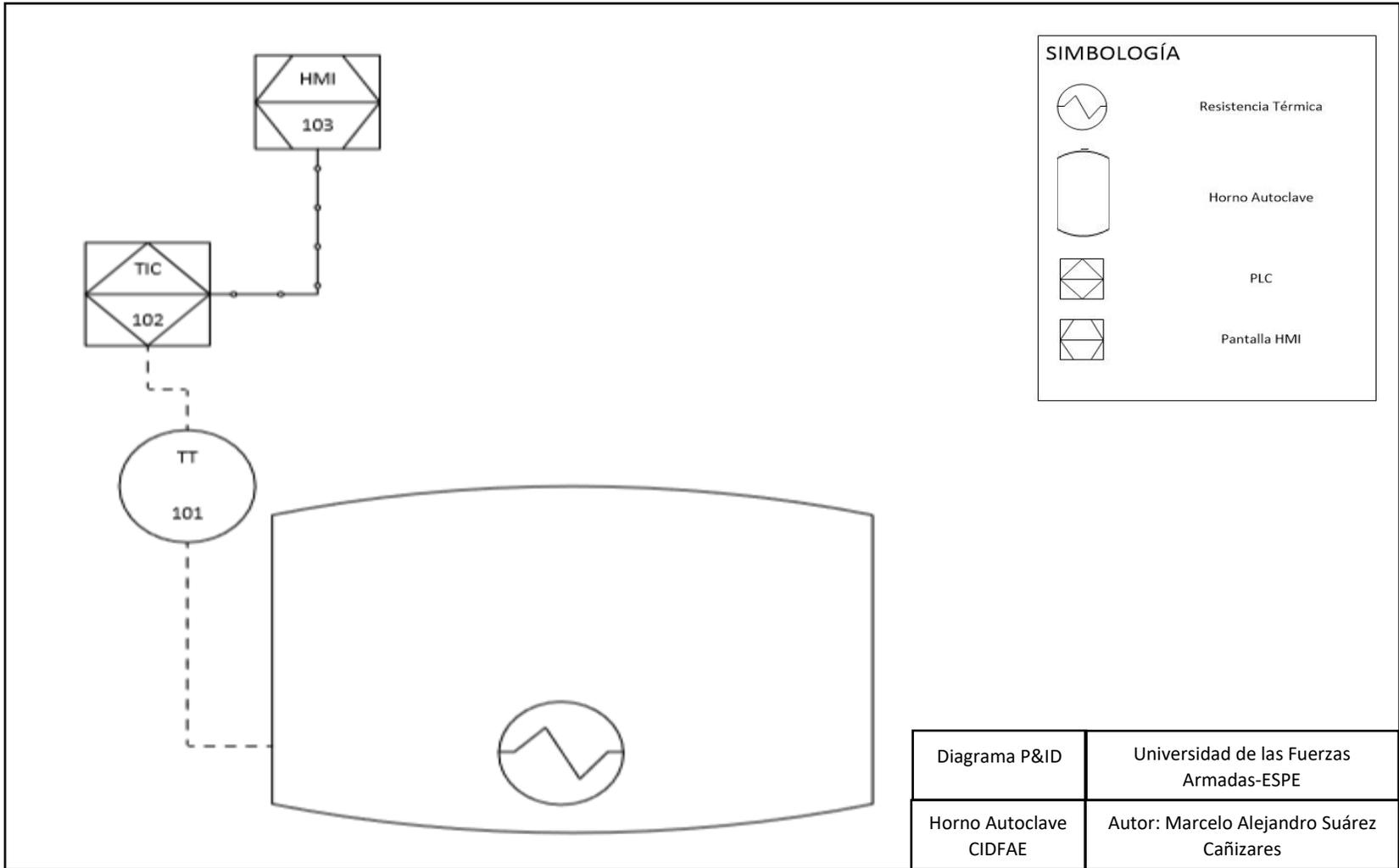


Figura 19. Diagrama P&ID horno autoclave

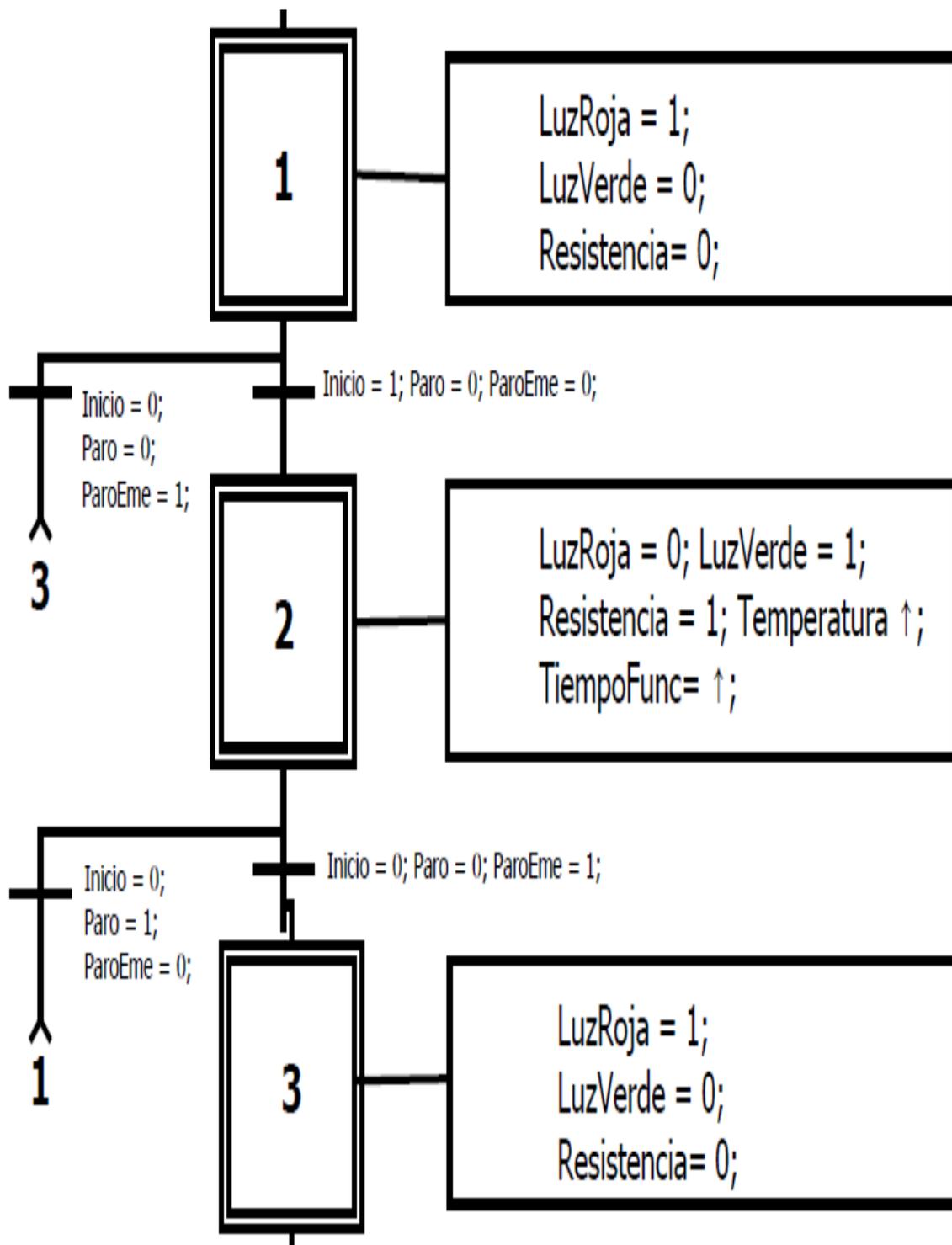


Figura 20. Diagrama Grafset de funcionamiento del horno autoclave

$$P = I \times V$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{3000 \text{ W}}{110 \text{ V}}$$

$$I = 27.27 \text{ A}$$

Donde:

P: Potencia de la termorresistencia

I: Intensidad de corriente de la termorresistencia

V: Tensión de alimentación de la termorresistencia

Se va a tomar en cuenta un rango de seguridad del 10% para la selección de relé de estado sólido, por lo que se va a utilizar un relé de 30 A. El relé de estado sólido que se va a utilizar es el FOTEK SSR-60 DA. Este relé fue suministrado por el CIDFAE.

3.5.11.2. Conexión de circuito de potencia

Para la selección del cable a utilizar en la implementación del circuito de potencia, se debe considerar la tabla 22, tomando en cuenta los datos tanto de tensión y corriente del funcionamiento del horno autoclave.

Basándose en la tabla 22 el cable que se debe utilizar es el número 10 AWG.

3.5.12. Circuito de protección

Este circuito sirve para proteger a los componentes eléctricos y electrónicos del horno autoclave de sobrecargas eléctricas que se puedan producir en el sistema de alimentación del hangar del CIDFAE.

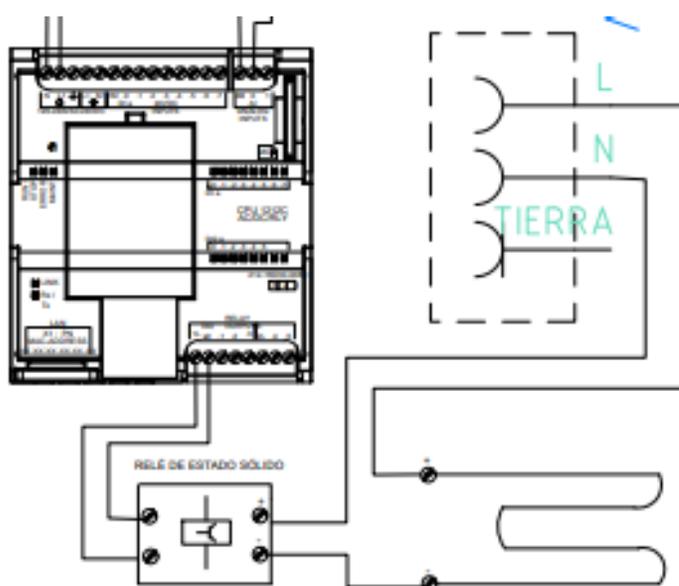


Figura 21. Circuito de potencia

Tabla 22
Tabla AWG de cables

AWG	Diam. Mm	Amperaje
1	7.35	120
2	6.54	96
3	5.86	78
4	5.19	60
5	4.62	48
6	4.11	38
7	3.67	30
8	3.26	24
9	2.91	19
10	2.59	15
11	2.30	12
12	2.05	9.5
13	1.83	7.5
14	1.63	6
15	1.45	4.8
16	1.29	3.7

3.5.12.1. Diseño del circuito de protección

Para el diseño del circuito de protección el programa Autocad Electrical 2017, el cual permite crear diagramas eléctricos de conexión. Para implementar el circuito de potencia del horno autoclave se debe utilizar un disyuntor el cual se encuentra conectado con la alimentación eléctrica y los componentes eléctricos y electrónicos del horno autoclave, como se muestra en la figura 22.

3.5.12.1.1. Disyuntor

El disyuntor es un elemento eléctrico de protección que tiene la capacidad de producir una interrupción o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de corriente que circula por este elemento excede un valor determinado, este circuito cortará el paso de la corriente en caso de existir una sobrecarga eléctrica en el sistema de alimentación del hangar del CIDAFE. Debido a las características de funcionamiento del horno que se observan en la tabla 21, el disyuntor a utilizar para la protección del circuito de potencia va a ser de 40 A sobredimensionando su capacidad en caso de que se quiera aumentar la potencia del horno. El disyuntor utilizado es un VETO DZ47 de 40 A.

3.5.12.1.2. Conexión para circuito de protección

Para la selección del cable a utilizar en la implementación del circuito de protección, se debe considerar la tabla 22, tomando en cuenta los datos tanto de tensión y corriente del funcionamiento del horno autoclave.

Basándose en la tabla 22 el cable que se debe utilizar para la implementación del circuito de protección es el número 7 AWG.

3.5.13. Circuito de acoplamiento del sensor

El sensor utilizado es de tipo analógico, este sensor utiliza un módulo de acoplamiento de señales de termopar SM 1231 RTD propio del PLC S7-1200, este módulo obtiene las señales de la termocupla tipo K y adapta la tensión de salida del sensor escalándolo de 0 a 10 V según los valores de temperatura máxima y mínima que se programe. Este módulo fue suministrado por el CIDFAE.

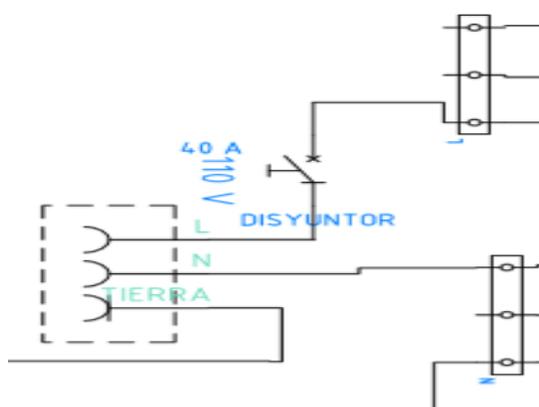


Figura 22. Circuito de protección



Figura 23. Disyuntor VETO DZ47

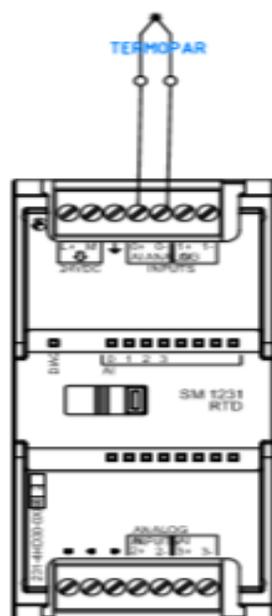


Figura 24. Circuito de acoplamiento de sensor



Figura 25. Módulo de acoplamiento de señales de termopar SM 1231 RTD

Fuente: (SIEMENS, 2009)

3.5.14. Tablero de control

El tablero de control contiene todos los elementos eléctricos necesarios para el funcionamiento del horno autoclave. En el interior del tablero de control se encuentran los siguientes elementos como se puede observar en la figura 26

1. Borneras de conexión
2. PLC SIEMENS S7-1200 y módulos
3. Relé de estado sólido.

El tablero de control tiene las siguientes especificaciones técnicas:

- Tipo: Armario
- Número de paneles: 6
- Material: Tol galvanizado 2mm de espesor
- Color: Metal
- Alto: 25 cm
- Ancho: 20 cm
- Profundidad: 15 cm

Estas dimensiones se establecieron tomando en cuenta los elementos que se van a colocar en el tablero de control. El diagrama eléctrico y ubicación de los elementos del tablero de control se observa en la figura 26.

- Borneras de conexión: Reciben la alimentación de fase, neutro y tierra de 110 VAC de la red eléctrica del CIDFAE.

- PLC S7-1200: Se encuentra conectado con las borneras de conexión obteniendo los 110 VAC necesarios para la energización del PLC y se conecta para proporcionar la señal PWM de control mediante la salida digital al relé de estado sólido.
- Relé de estado sólido: Recibe la señal PWM de control del PLC S7-1200 mediante la salida digital.

Las borneras de conexión reciben la alimentación de fase, neutro y tierra de 110 VAC de la red eléctrica del taller de materiales compuestos del CIDFAE, el PLC S7-1200 se conecta a las borneras de conexión para recibir los 110 VAC necesarios para la energización del PLC, y el relé de estado sólido se conecta al PLC S7-1200 para recibir la señal PWM de control mediante la salida digital del PLC.

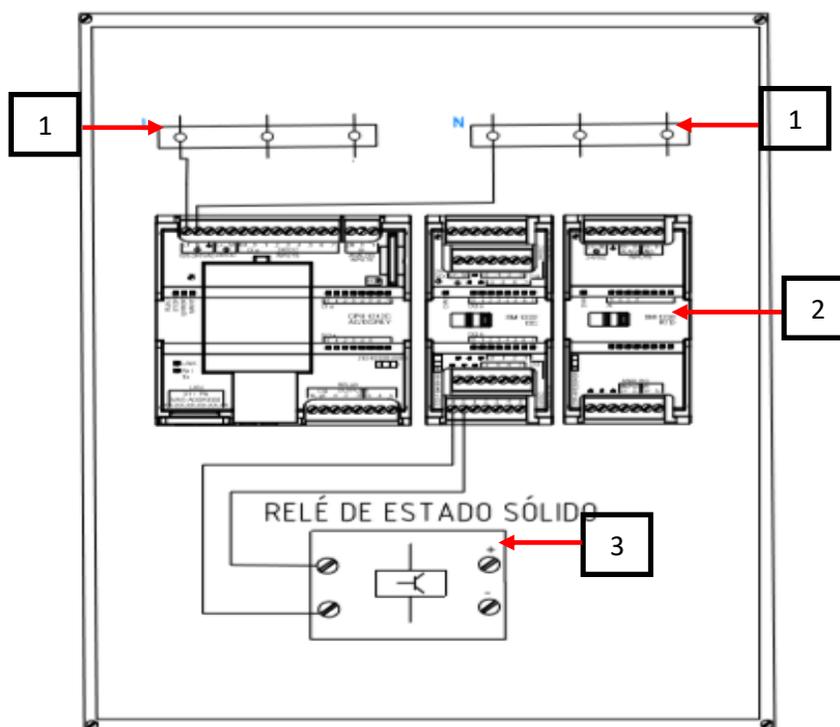


Figura 26. Tablero de control horno autoclave

3.5.15. Control PID

3.5.15.1. Requisitos

Los requisitos del control PID implementado en el control de secado del horno autoclave son:

- Mantener la temperatura constante del horno autoclave en base a un set point seleccionado por el usuario, durante un tiempo determinado por el usuario.
- Variación de temperatura ± 2 °C.
- Tiempo máximo para alcanzar una elevación en el cambio del set point: 6 minutos

3.5.15.2. Modelamiento de la planta

Para realizar el modelamiento de la planta y obtener su función de transferencia se utilizó la función `ident` de Matlab, esta función permite crear modelos de sistemas dinámicos lineales y no lineales a partir de datos medidos de entrada y salida.

Para la determinación de la función de transferencia de la planta se necesitan tanto los datos de entrada y salida de la misma, como datos de entrada se registraron los valores de la tensión de alimentación (110 VAC) del horno autoclave y como datos de salida se registraron los valores de la temperatura con un intervalo de 0.5 segundos entre mediciones.

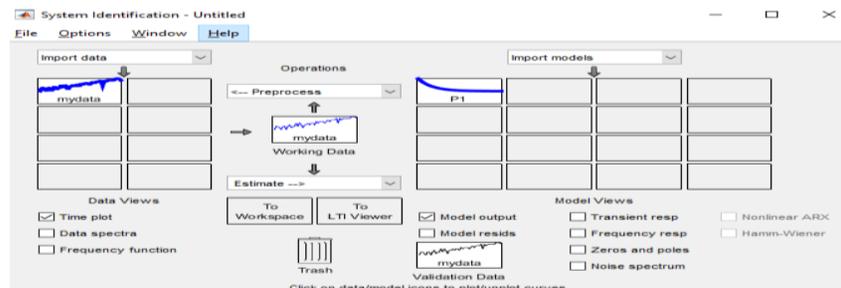


Figura 27. Ventana función `ident` Matlab

- **Circuito de adquisición de datos para determinación de la función de transferencia de la planta**

La adquisición de estos valores se realizó mediante el circuito que se observa en la figura 28.

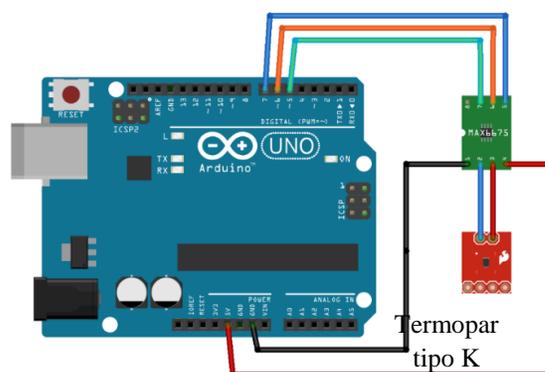


Figura 28. Diagrama del circuito de adquisición de datos de la planta

La programación de la tarjeta Arduino Uno para la adquisición de los datos de temperatura de la planta se puede observar en la figura 29.

```

HORNO_AUTOCLAVE Arduino 1.8.6 Hourly Build 2018/07/...
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
HORNO_AUTOCLAVE $
//ADQUISICION DE DATOS TEMPERATURA HORNO AUTOCLAVE CIDFAE
#include "max6675.h"//Se incluye la libreria del max 6675
float temperatura=0; //Se crea una variable flotante para almacenar
//Se definen los pines a usar para conectar el modulo MAX6675
int ktcSO = 5;
int ktcCS = 6;
int ktcCLK = 7;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
void setup() {
//activa comunicacion serial.
Serial.begin(9600);
delay(500);
}
void loop() {
//Leer temperatura.
temperatura=ktc.readCelsius();
//Enviar dato de temperatura por el puerto serial.
Serial.print(temperatura);
//Pausa de medio segundo para repetir el proceso
delay(500);
}

```

Figura 29. Programación Arduino adquisición valores de temperatura

Función de transferencia de la planta utilizando ident de Matlab

Para el modelamiento de la planta se ingresan los valores tanto de entrada como de salida, para los valores de entrada se toma el valor de la alimentación del horno autoclave (110 VAC) y para los valores de salida se toman los valores adquiridos mediante el circuito de la figura 28, estos valores se tomaron con un intervalo de 0.5 segundos. En los datos obtenidos el mayor valor de temperatura alcanzado por el horno fue de 307 °C, a esta temperatura se estabilizó el calentamiento del horno.

Se debe realizar el modelamiento con la opción Time domain data en la función ident. La función de transferencia obtenida es la que se observa a continuación:

$$G(t)_{HA} = \frac{2.97}{1 + 1033.6969s}$$

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	2.97	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	1033.6969	Auto	[0 1047082.0]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]

Initial Guess:
 Auto-selected
 From existing model:
 User-defined: Value-->Initial Guess

Disturbance Model: Initial condition: Regularization...
 Focus: Covariance: Options...
 Display progress

Name:

Figura 30. Valores función de transferencia ident Matlab

Con la opción Model output se puede observar una comparación entre la función de transferencia obtenida por la función ident y la de la planta como se observa en la Figura 31. En esta figura se observa que la función de transferencia generada por ident tiene una concordancia del 96.69%.

En la figura 32 se observa el gráfico de la función de transferencia generada para el funcionamiento del horno autoclave

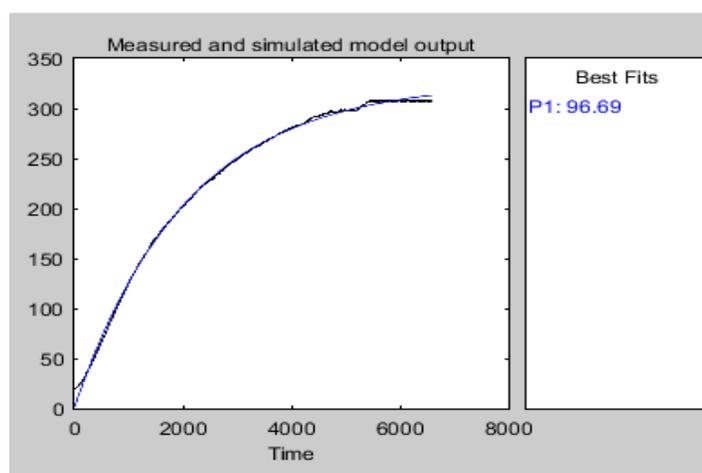


Figura 31. Comparación funciones de transferencia de la planta

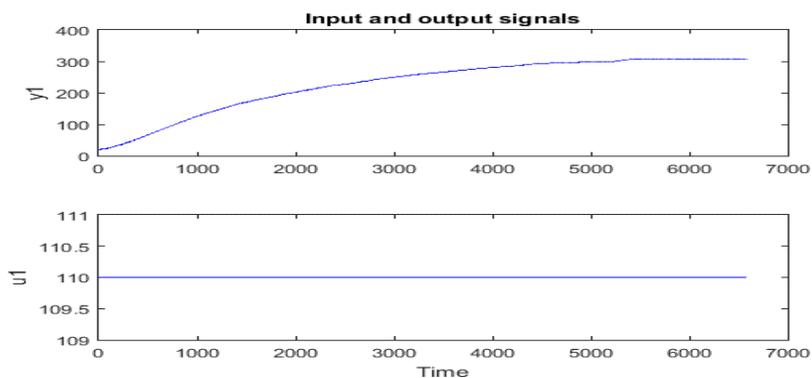


Figura 32. Gráfico función de transferencia horno autoclave

3.5.15.3. Técnica apropiada

El objetivo del control es mantener una temperatura del horno autoclave a un valor deseado. Para establecer la técnica apropiada se deben determinar los tipos de elementos del sistema de control implementado en el horno autoclave:

- **Valor de referencia, consigna o set point:** El valor de consigna o valor deseado de la variable controlada, va a determinarlo el usuario, ingresando su valor a través de la pantalla HMI.
- **Variable manipulada:** Es la tensión de salida hacia la termorresistencia, esta tensión está determinada por una salida PWM del PLC S7 1200, según los valores calculados por el PID_Temp.
- **Variable controlada:** La variable controlada es la temperatura del horno autoclave.

Para el control de temperatura del horno autoclave se requiere un sistema que pueda adoptar cambios bruscos de temperatura y no sea sensible, que compense los valores muy cambiantes e inestables. El controlador PID combina las ventajas de cada una de las acciones de control individuales, permite realizar un control por retroalimentación que calcula el error entre un valor que se mide y el valor que se pretende alcanzar, permite aplicar una acción de corrección para realizar el ajuste del proceso. El control PID permite al horno automáticamente compensar cambios en el sistema frente a perturbaciones.

3.5.15.4. Sintonización

Para realizar la sintonización del controlador PID se va a utilizar el método de Ziegler-Nichols.

Para determinar los valores P, I, D del controlador se utilizan las siguientes fórmulas:

Tabla 23*Fórmulas de sintonización Ziegles -Nichols*

Control PID		
Kp	Ti	Td
1,2ko	2T1	0.5T1

$$k_0 = (dx * T2)/(dy * T1)$$

Donde:

T1: Tiempo que se demora el sistema en comenzar la respuesta.

T2: Tiempo que se determina en el punto que corta la tangente entre el valor en el que empieza a comenzar la respuesta y el tiempo en alcanzar la máxima temperatura el horno.

dx: Es la señal de control, la tensión suministrada para el funcionamiento del horno

dy: Temperatura máxima a la que se estabiliza el sistema menos la temperatura inicial de funcionamiento.

$$dx = 110$$

$$dy = 307 - 24 = 283$$

$$k_0 = (110 * 850)/(283 * 120)$$

$$k_0 = 2.8$$

Con las fórmulas establecidas en la tabla 23 se calculan los valores de kp, Ti y Td del controlador PID para el horno autoclave.

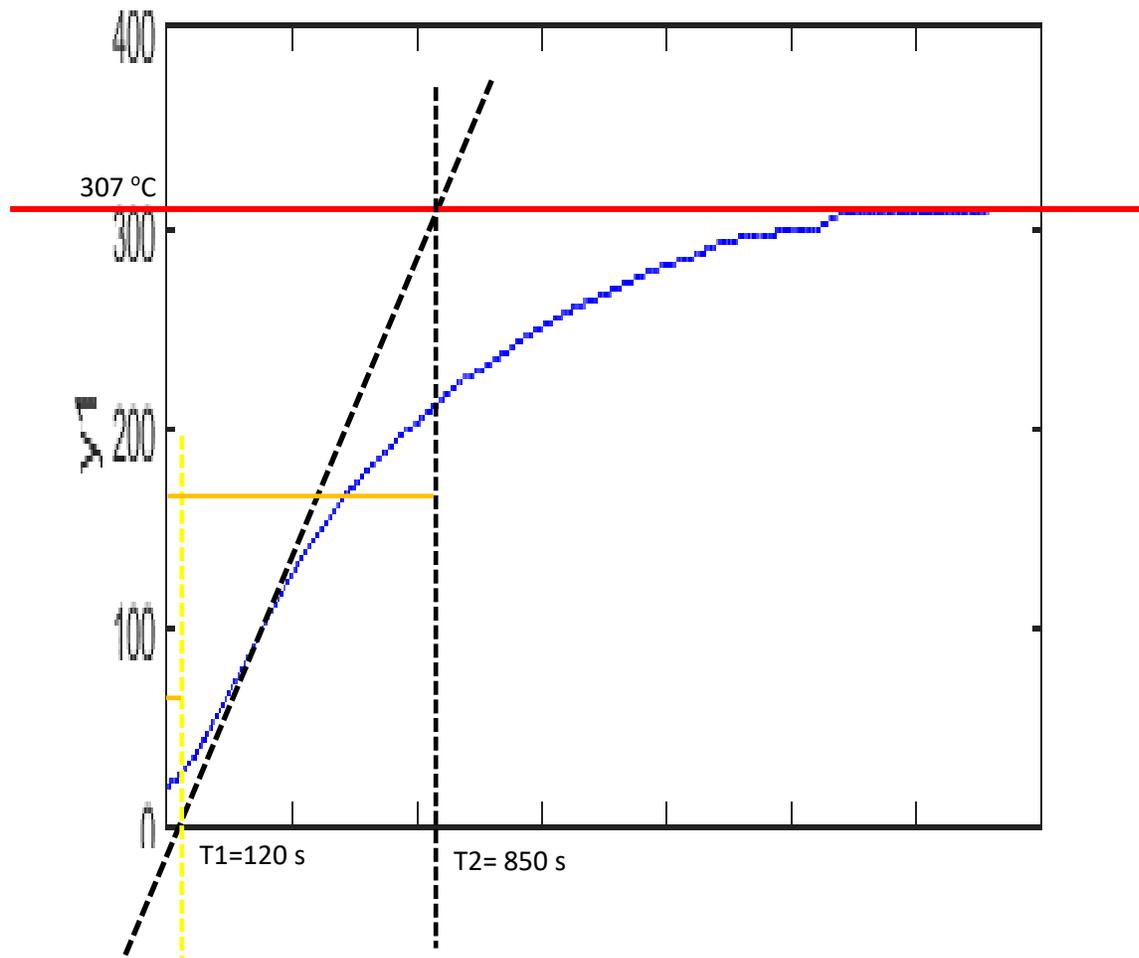


Figura 33. Método de sintonización de Ziegler -Nichols horno autoclave

- Para calcular k_p

$$k_p = 1.2 * k_o$$

$$k_p = 1.2 * 2.8$$

$$k_p = 3.36$$

- Para calcular T_i

$$T_i = 2 * T_1$$

$$T_i = 2 * 120$$

$$T_i = 240 \text{ s}$$

- Para calcular T_d

$$T_d = 0.5 * T_1$$

$$T_d = 0.5/120$$

$$T_d = 60 \text{ s}$$

Para calcular las constantes k_p , k_i y k_d se utilizan las fórmulas de la tabla 24.

Tabla 24

Fórmulas de sintonización Ziegler-Nichols

Control PID		
K_p	K_i	K_d
1,2 k_o	0.60* k_o/T_1	0.60* k_o*T_1

- Para calcular k_p

$$k_p = 1.2 * k_o$$

$$k_p = 1.2 * 2.8$$

$$k_p = 3.36$$

- Para calcular k_i

$$k_i = 0.60 * k_o/T_1$$

$$k_i = 0.30 * 2.8/120$$

$$ki = 0.014$$

- Para calcular kd

$$kd = 0.60 * ko * T1$$

$$kd = 0.60 * 2.8 * 120$$

$$kd = 201.6$$

3.5.15.5. Simulación

Utilizando la herramienta PID Tuner de Matlab, se realiza la simulación ingresando los valores k_p , k_i y k_d calculados en la sintonización de Ziegler-Nichols. En base a estos valores y con el modelo de la planta del horno autoclave se puede obtener la simulación del controlador que se observa en la figura 34.

En la figura 34 se observa la comparación entre los controladores utilizando los valores de sintonización obtenidos en Ziegler-Nichols y la sintonización utilizando PID Tuner de Matlab. Se observa que mediante los valores obtenidos en Matlab se logra el controlador deseado para el funcionamiento del horno autoclave. Estos valores son:

- $k_p = 0.74$
- $k_i = 0.00096$
- $k_d = 51.07$

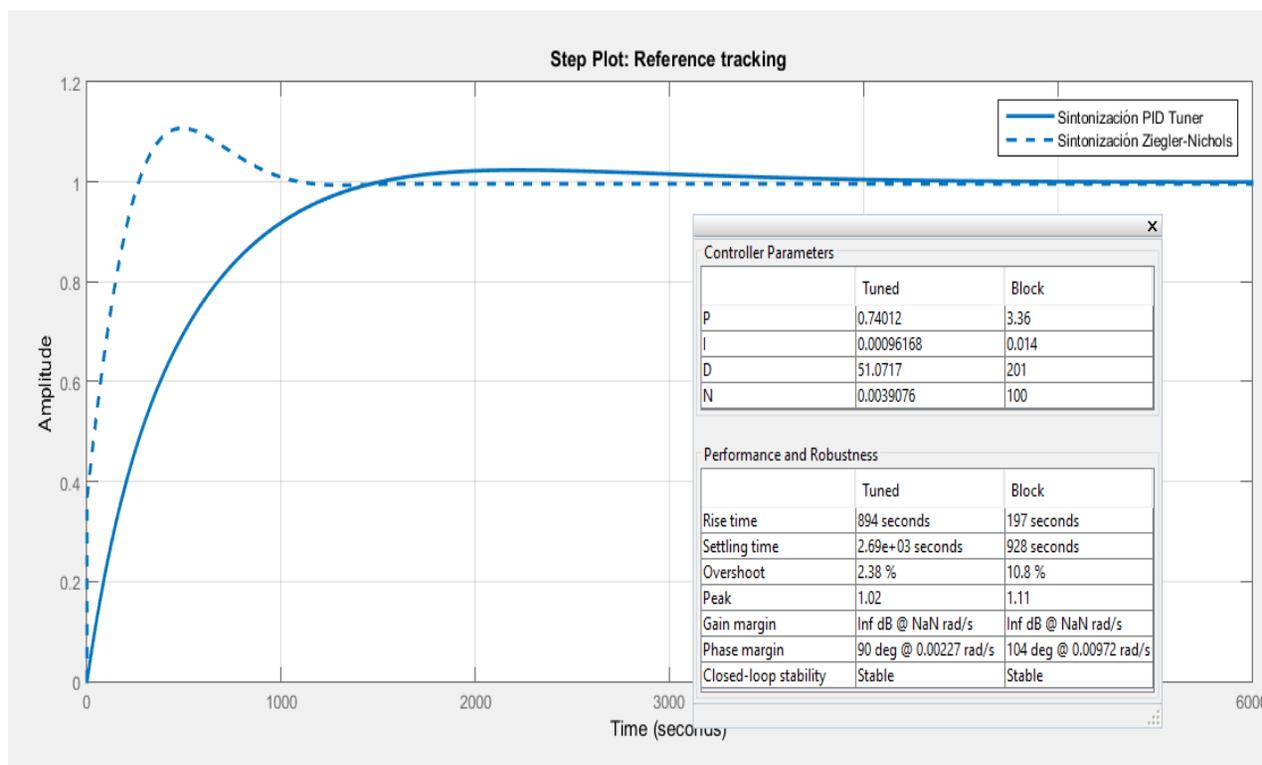


Figura 34. Comparación sintonización Ziegler-Nichols y PID Tuner

3.5.15.6. Comparación de coeficientes PID

En la tabla 25 se muestra la comparación de los valores de los coeficientes calculados por los diferentes métodos tanto la sintonización de Ziegler-Nichols, la simulación del PID Tuner de Matlab y la autosintonización del objeto tecnológico PID_Temp del PLC S7-1200.

Tabla 25

Comparación coeficientes PID

Comparación coeficientes PID			
Método	Kp	Ki	Kd
Ziegler-Nichols	3.36	0.014	120
PID Tuner	0.74	0.0096	51.08

CONTINÚA ➡

PID_Temp	1.15	0.0045	92
----------	------	--------	----

Mediante la realización de una simulación utilizando PID Tuner de Matlab con cada uno de los valores obtenidos por los diferentes métodos, se determina que los mejores coeficientes a implementar en el control PID son los obtenidos mediante la autosintonización del PID_Temp del PLC S7-1200, los resultados se presentan en las figuras 34 y 35, en estas se puede observar que con la implementación de los valores obtenidos por el PID_Temp se obtiene el mejor control del horno autoclave, por lo que estos valores son los implementados para realizar el control PID.

3.5.15.7. Implementación

Para la implementación del control PID se utilizó el módulo PID_Temp del PLC SIEMENS S7-1200. Este objeto tecnológico en la opción PID calcula los parámetros para el control durante la optimización inicial y optimización final, ajusta automáticamente los valores de las constantes proporcional, integrativo y derivativo del controlador según el modelo de la planta que se va a controlar.

El PID_Temp con el que cuenta el PLC S7-1200 es diseñado para el control PID de procesos específicos de temperatura, se realizó la selección de este objeto tecnológico en base a los siguientes criterios:

- Viene incluido en las herramientas del PLC S7-1200.
- Es específicamente para control de temperatura.

- Cuenta con una sintonización inicial y una final de forma automática, calcula los parámetros proporcional, integrativo y derivativo del PID automáticamente según las características del control que se quiere implementar.
- Su implementación es fácil, únicamente se lo incluye y configura en las líneas de programación del programa TIA PORTAL V14.
- Utiliza una salida del tipo Output_PWM.
- Tiene la opción de ingresar manualmente las constantes proporcional, integrativo y derivativo.
- Permite ingresar los valores de temperaturas mínimos y máximos para realizar el control.

Se va a utilizar la salida de tipo Output_PWM del controlador PID, ya que esta realiza el control mediante una modulación de ancho de pulso que se conecta con el relé de estado sólido y se realiza el control de la resistencia de calefacción, esta modulación de ancho de pulsos permite formar tiempos de conexión y desconexión variables para realizar el control. Se debe realizar una optimización inicial y una optimización final de los parámetros PID para obtener un correcto cálculo de los parámetros por parte del módulo PID_Temp y así obtener un buen funcionamiento del controlador.

En la optimización inicial se determina el comportamiento del proceso de secado de materiales compuestos a un escalón del valor de salida y busca el punto de inflexión. A partir del valor de la pendiente máxima y del tiempo muerto del sistema regulado se calcularon los PID óptimos. Para obtener los mejores parámetros PID, se realizó la optimización inicial y final.

Los valores obtenidos mediante la sintonización automática del PID_Temp que se presentan en la tabla 26 son los adecuados para el correcto funcionamiento del horno autoclave de materiales

compuestos del CIDFAE. Este control permite cumplir con los requerimientos de temperatura y variación de temperatura establecidos

Tabla 26

Valores del controlador PID

Parámetro	Valor
Valor parámetro proporcional (kp)	1,15
Valor parámetro integrativo (Ti)	260 s
Valor parámetro derivativo (Td)	80 s

Los valores k_p , k_i y k_d del controlador establecido por la auto sintonización se calculan de la siguiente manera:

- Para el cálculo de k_i

$$k_i = \frac{k_p}{T_i}$$

$$k_i = \frac{1.15}{260}$$

$$k_i = 0.0045$$

- Para el cálculo de k_d

$$k_d = k_p * T_d$$

$$k_d = 1.15 * 80$$

$$kd = 92$$

Mediante la implementación de los valores calculados por el PID_Temp se logra un control adecuado del horno y se establece el cambio de temperatura dentro de los requerimientos del control PID, estos parámetros permiten realizar el control deseado del horno autoclave, la representación del control se muestra en la figura 35.

Con este controlador el tiempo máximo de cambio de set point desde la temperatura mínima ambiente 20 °C y la temperatura máxima de operación 160 °C es de 5 minutos y 45 segundos.

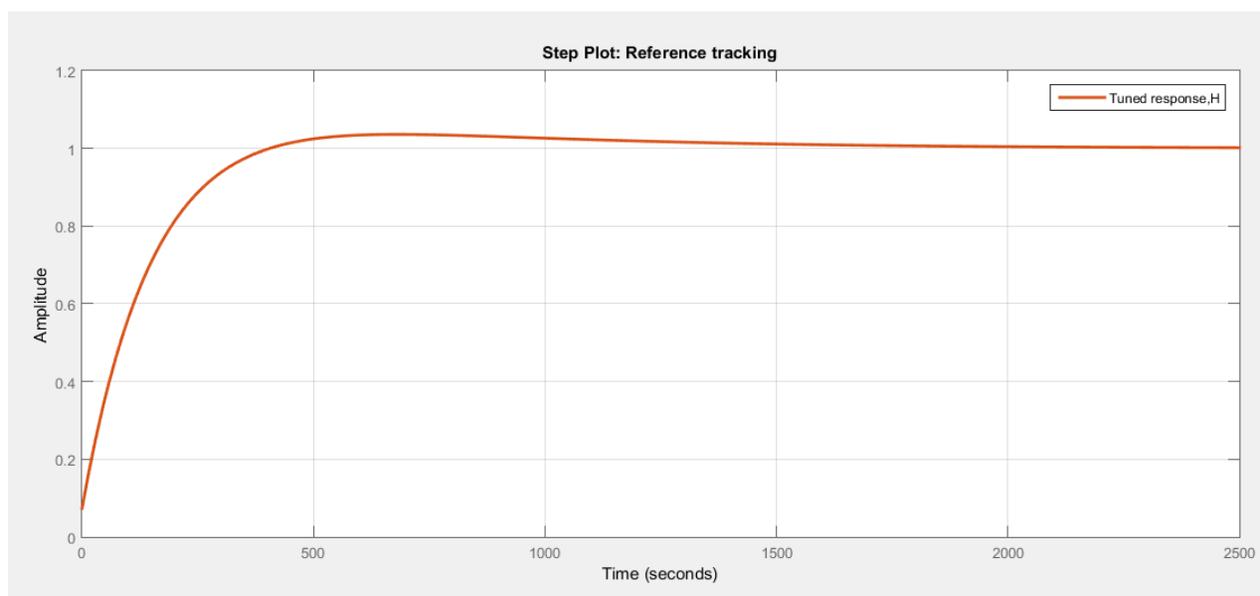


Figura 35. Control PID establecido por medio de PID_Temp

CAPÍTULO IV

4. PROGRAMACIÓN

4.1. Diseño HMI

4.1.1. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz HMI

En las figuras 36 y 37 se visualiza el funcionamiento general en base a un diagrama de flujo de la interfaz HMI durante todo el proceso de operación del horno autoclave, se muestran paso a paso como se va cumpliendo el funcionamiento de la interfaz HMI para el control de temperatura.

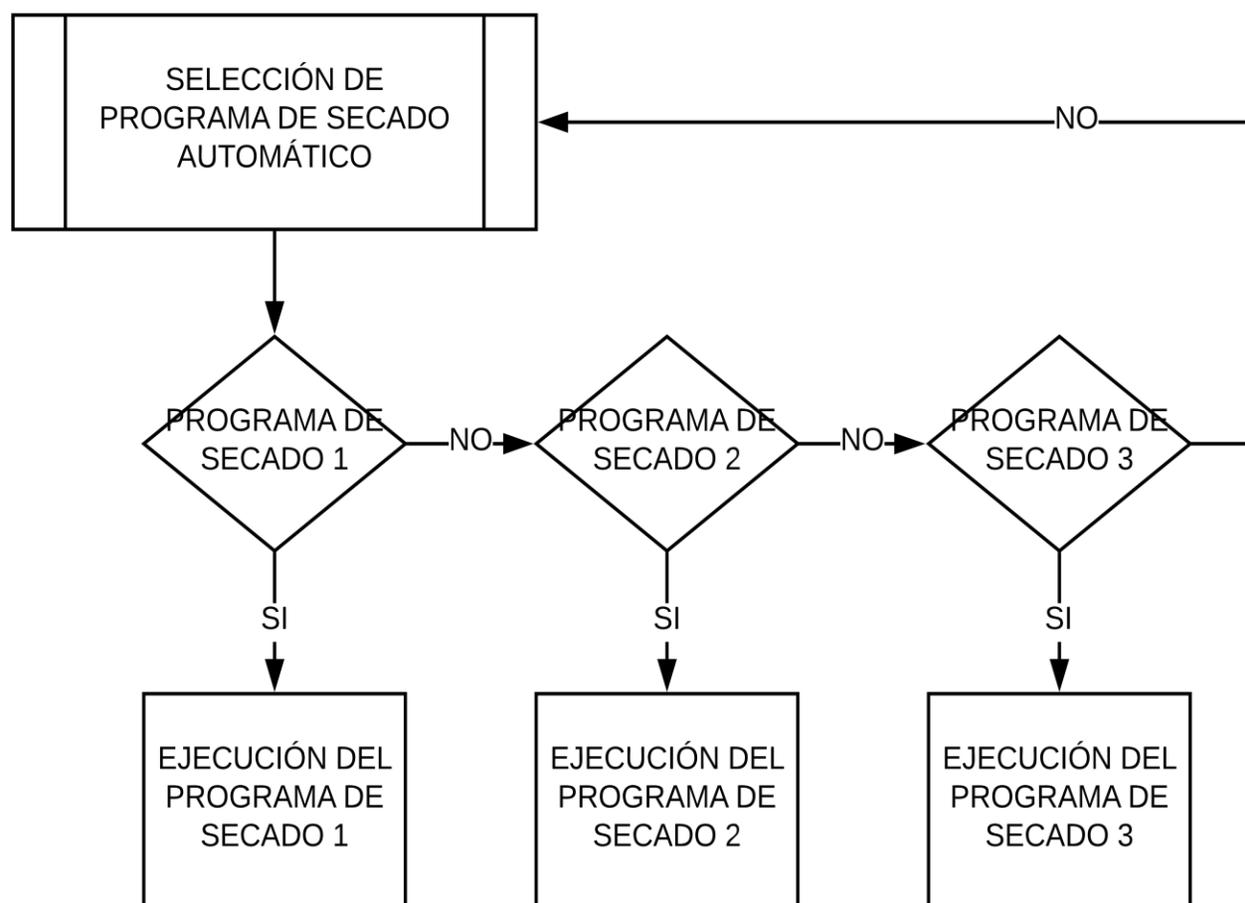


Figura 36. Subrutina de selección de programa de secado automático

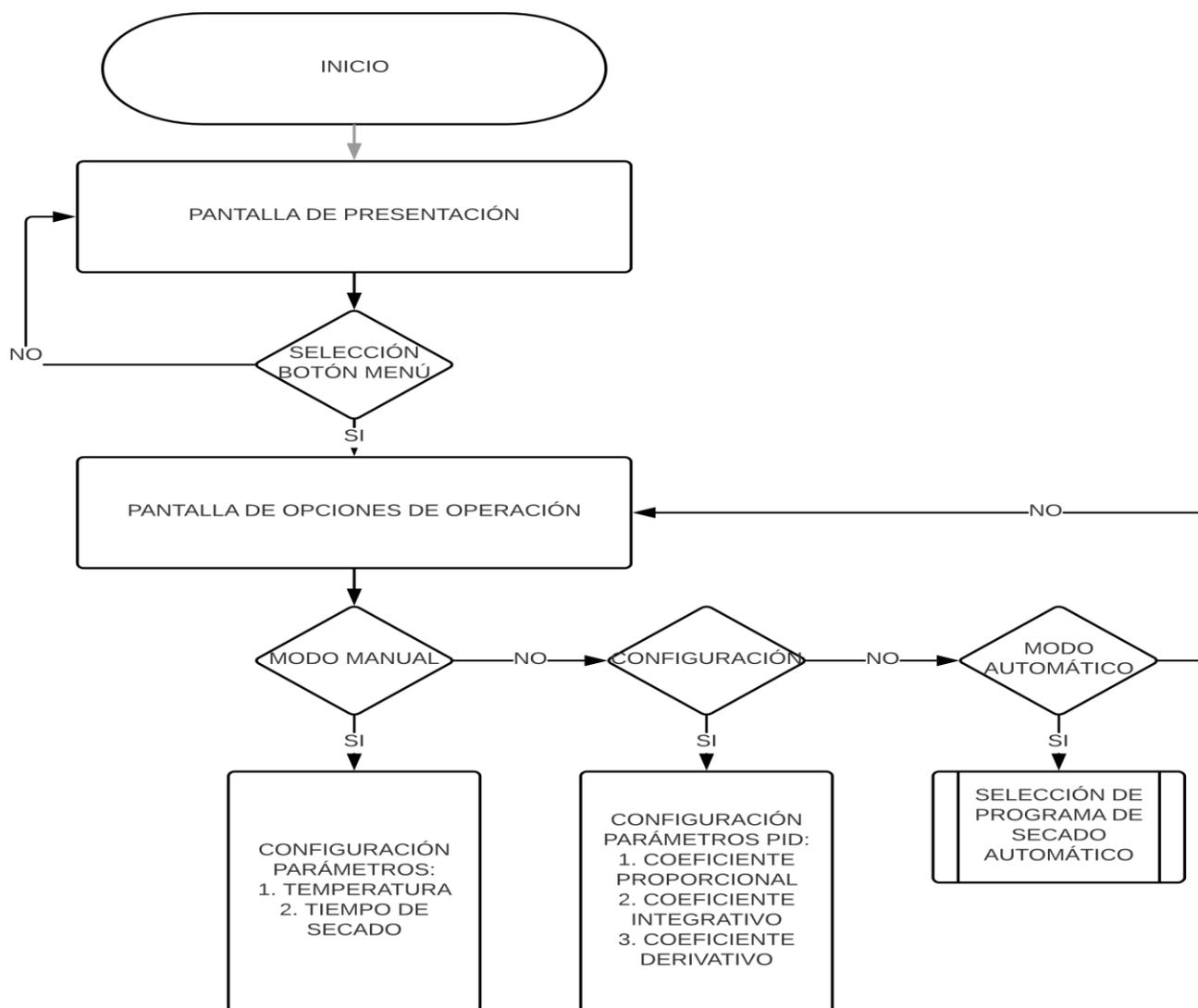


Figura 37. Diagrama de flujo del funcionamiento de la pantalla HMI

4.1.2. Entorno de programación

Para la implementación de la HMI del horno autoclave para materiales compuestos del CIDFAE se va a utilizar la aplicación ArchestraA, debido a los siguientes criterios:

- Múltiples opciones y herramientas para la creación de la interfaz HMI.

- Disponibilidad del programa instalado en las computadoras del CIDFAE.
- Se puede crear HMI personalizadas de acuerdo a las necesidades del operador.
- Familiarización de operación por parte de los técnicos operadores del horno autoclave en el CIDFAE.

4.1.3. Servidor para conexión entre el PLC y el programa ArchestrA

Para realizar la conexión entre las variables del PLC y el entorno de programación ArchestrA se va a utilizar el servidor KEPServer, la selección se realizó debido a los siguientes criterios:

- Permite una fácil comunicación entre en PLC S7-1200 y el entorno de programación ArchestrA.
- Configuración de conexión entre S7-1200 y ArchestrA de manera sencilla.
- El CIDFAE suministra el servidor KEPServer para la conexión con el PLC S7-1200.

4.1.4. Generalidades del diseño

El diseño del HMI está basado en el desarrollo de la filosofía, la guía de estilo y las herramientas de la plataforma ArchestrA, como está establecido en la norma ISA 101 diseño de interfaces humano máquina. El proceso de diseño e implementación de la interfaz se realizó identificando el tipo de usuario, parámetros ergonómicos y los requerimientos de operación del horno autoclave.

El proceso de diseño basándose en la norma ISA 101 establece algunos pasos a desarrollar como son:

- Diseño de la consola

- Diseño del sistema HMI
- Aplicación de los requerimientos funcionales

Con el desarrollo de cada uno de estos procesos se obtiene una interfaz HMI adecuada para el control y supervisión del funcionamiento del horno autoclave del CIDFAE.

4.1.5. Variables que se van a monitorear con la HMI

En la tabla 27 se encuentran las variables que se van a monitorear y controlar con la HMI implementada.

Tabla 27

Variables a monitorear y controlar con la HMI

Variables	
Variables a monitorear	Temperatura interna del horno
	Tiempo de funcionamiento del horno
Variables a controlar	Temperatura interna del horno
	Tiempo de funcionamiento del horno
	Parámetros del controlador PID

4.1.6. Diseño de la consola

El control y monitoreo de las principales variables eléctricas y no eléctricas se van a observar y a realizar en una pantalla desarrollada en el software ArchestrA, que está ubicada en la estructura metálica del horno.

a) Caracterización del Hardware

Para la implementación de la HMI se cuenta con una pantalla, con su respectivo teclado para el ingreso de datos que tiene la capacidad de comunicación con el PLC.

b) Caracterización del Software

Para el desarrollo de la HMI con el Software ArchestrA, se comunica al PLC Siemens S7-1200 a través del programa KepServer tienen total compatibilidad lo que permite el desarrollo de la interfaz y su implementación.

4.1.7. Diseño del sistema HMI

La efectividad y rendimiento de la interfaz HMI radica en su aceptación por parte del operador del horno, la visualización de las variables y componentes en la pantalla HMI deben aproximarse a lo que el operador está acostumbrado a manejar.

La función que cumple la interfaz es la de monitorear y permitir el control de las variables eléctricas y no eléctricas del horno autoclave mencionadas en la Tabla 27. Por lo que se han establecido directrices que se pueden observar en la figura 38 para realizar el diseño de la interfaz.

a) Requisitos Primarios del HMI

Las características principales de la HMI implementada para el monitoreo y control del horno autoclave se presenta en la figura 39.

b) Requisitos Secundarios del HMI

La HMI tiene la tarea de mantener informado al operario del funcionamiento del horno autoclave, permitir el ingreso de los parámetros de temperatura y tiempo a los que se desee que funcione el horno y permitir la configuración de los parámetros del controlador PID. En la figura 40 se muestran los parámetros que se deben tomar en cuenta en el proceso de diseño.

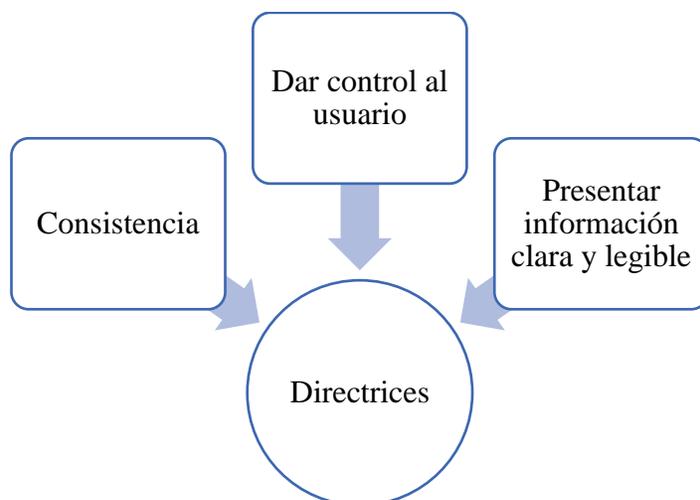


Figura 38. Directrices para el diseño de interfaz de usuario horno autoclave

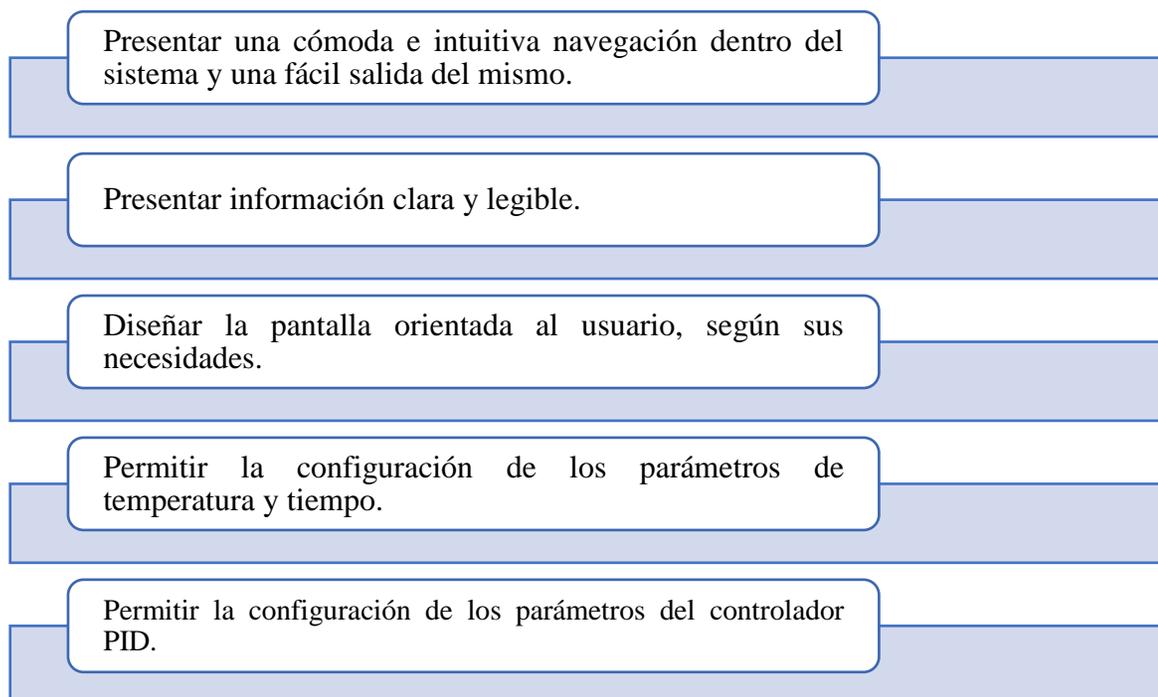


Figura 39. Requisitos primarios de la HMI

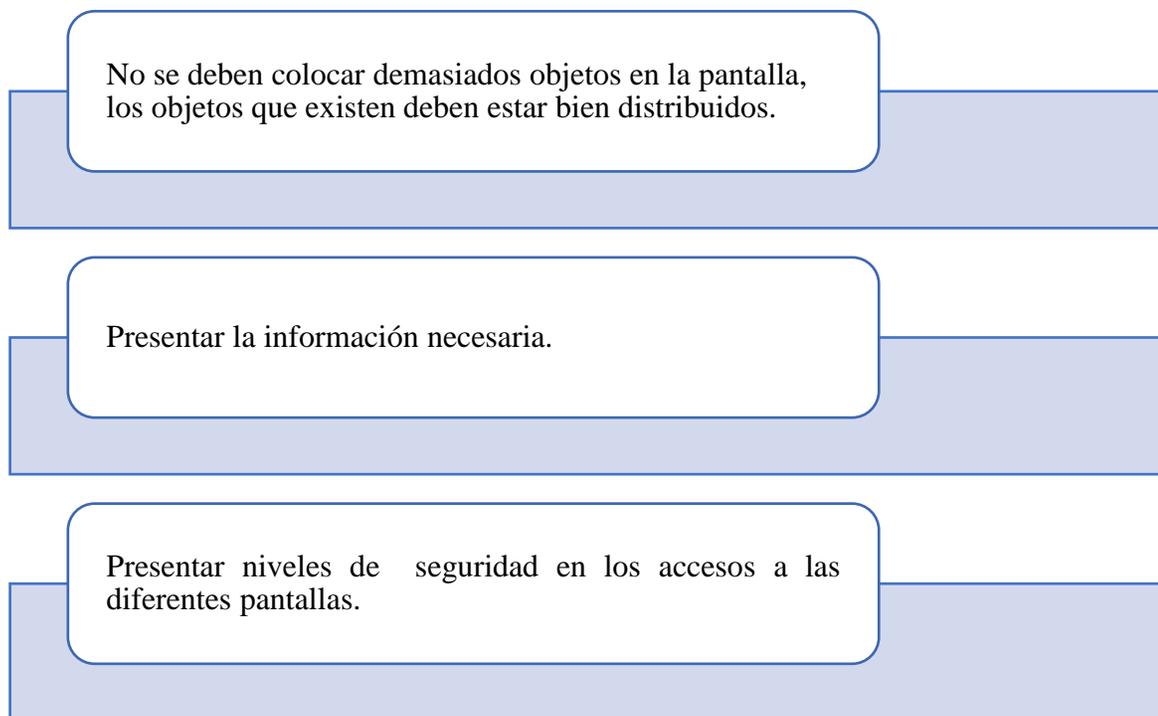


Figura 40. Requisitos secundarios de la HMI

4.2. Diseño de pantallas HMI

Para realizar el proceso de diseño de las diferentes pantallas, se debe realizar una estandarización previa y utilizar la experiencia y el conocimiento de trabajar con el horno autoclave, en la Figura 41, se muestran los procesos para obtener una interfaz funcional y adaptada a las necesidades del usuario.

4.2.1. Jerarquía de pantallas

Dentro de la jerarquía de las pantallas se tienen 5 pantallas, las cuales se categorizan en 3 niveles como se puede observar en la figura 42.

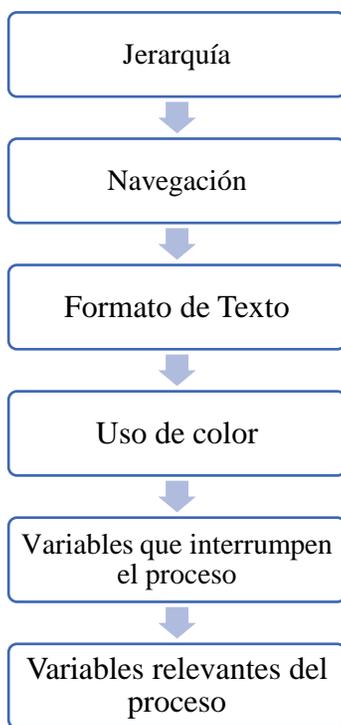


Figura 41. Proceso de diseño

En la tabla 28 se indican las características y la configuración de cada una de las pantallas que conforman la HMI.

Los niveles de jerarquía muestran como se encuentra la estructura de la HMI que va a monitorear y controlar el funcionamiento del horno autoclave del CIDFAE.

4.2.2. Navegación en las pantallas HMI

Es importante establecer el flujo de comunicación entre las diferentes pantallas que conforman la HMI del horno autoclave, el tipo de navegación es horizontal.

En la figura 42 se presenta como se encuentra el diseño de la navegación entre las diferentes pantallas.

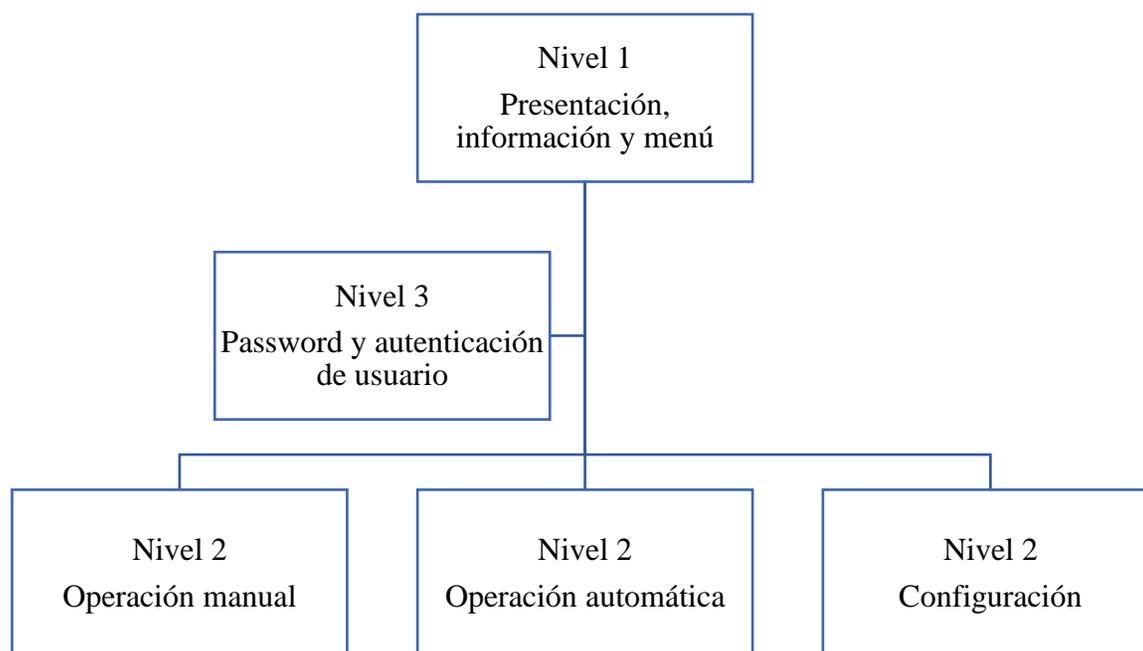


Figura 42. Jerarquía de pantallas

Tabla 28

Niveles de jerarquía de pantallas

Jerarquía de pantallas			
Nombre de la pantalla	Características	Tipo de Nivel	Configuración de la pantalla
Presentación, información y menú	Es la primera pantalla que se presenta al momento de encender el sistema, contiene la presentación y tres botones, cada uno de los cuales direcciona a una pantalla del nivel 2.	Nivel 1	Replace
Operación Manual	En esta pantalla se pueden ingresar manualmente los valores de temperatura y tiempo que el usuario desee. Se va a presentar un monitoreo de las variables de	Nivel 2	Replace

CONTINÚA →

	funcionamiento del horno autoclave.		
Operación Automática	En esta pantalla se van a mostrar opciones de programas de secado de materiales compuestos previamente configurados, se va a presentar un monitoreo de las variables de funcionamiento del horno autoclave.	Nivel 2	Replace
Configuración	En esta pantalla se va a permitir la configuración de los valores de los parámetros del control PID. Se va a presentar un monitoreo de las variables de funcionamiento del horno autoclave.	Nivel 2	Replace
Password y autenticación de usuario	En esta pantalla será desplegada al momento de que el usuario quiera entrar en el menú de configuración. Presenta dos entradas de texto tanto para el nombre del usuario como para el password.	Nivel 3	Replace

a) Navegación entre niveles

En la figura 44 se detalla cómo es la navegación entre los diferentes niveles de pantallas que conforman la HMI del horno autoclave.

En el diseño de la navegación de las pantallas de la HMI se cumple uno de los requisitos primarios que es presentar una cómoda e intuitiva navegación dentro del sistema y una fácil salida del mismo.

4.2.3. Formato de la pantalla de la HMI

El formato de las pantallas de la HMI debe ser consistente y se establece según las características técnicas de la pantalla que se está utilizando para la implementación. Las cuatro

pantallas tienen una resolución de 1603x816 pixeles y la pantalla de contraseña una resolución de 395x217 pixeles.

En base a la guía de estilo se establece que las pantallas deben tener colores neutros de fondo que no generen gran resplandor, ya que se debe cuidar la percepción visual.

La norma ISA 101 establece que se debe mantener un fondo neutro que se define como un color de saturación muy baja, en este caso para la implementación de cada una de las pantallas de la HMI se va a utilizar los colores que se muestran en la descripción de cada pantalla.

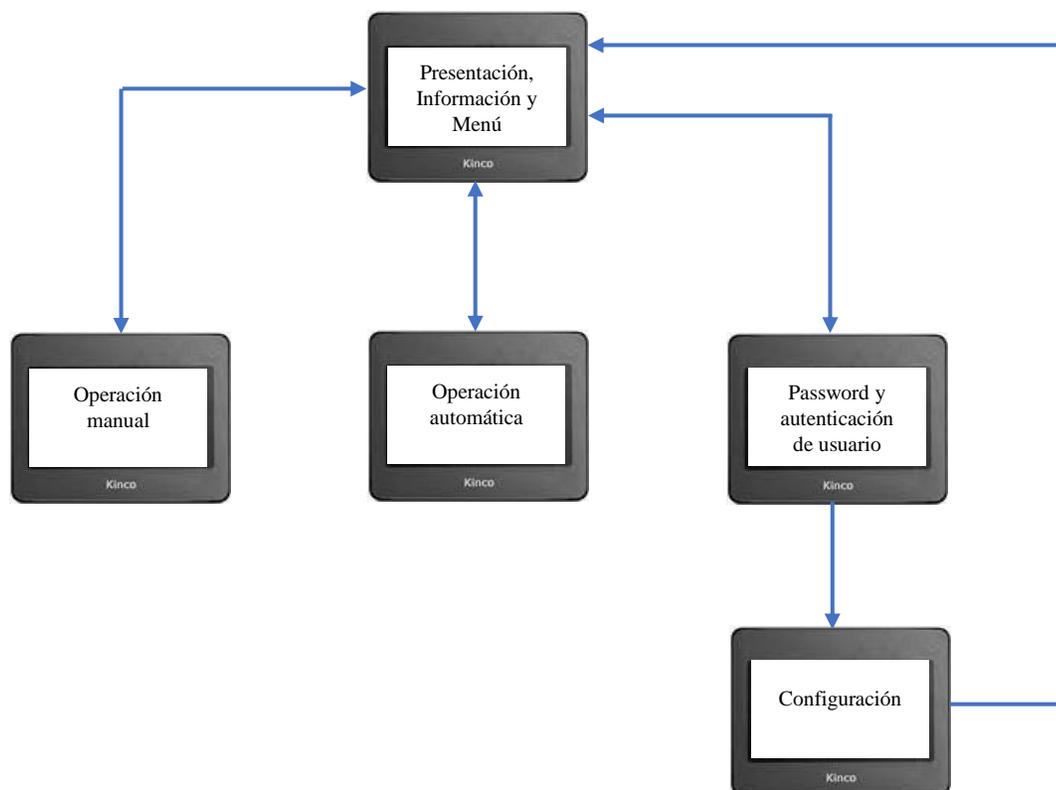


Figura 43. Navegación HMI horno autoclave

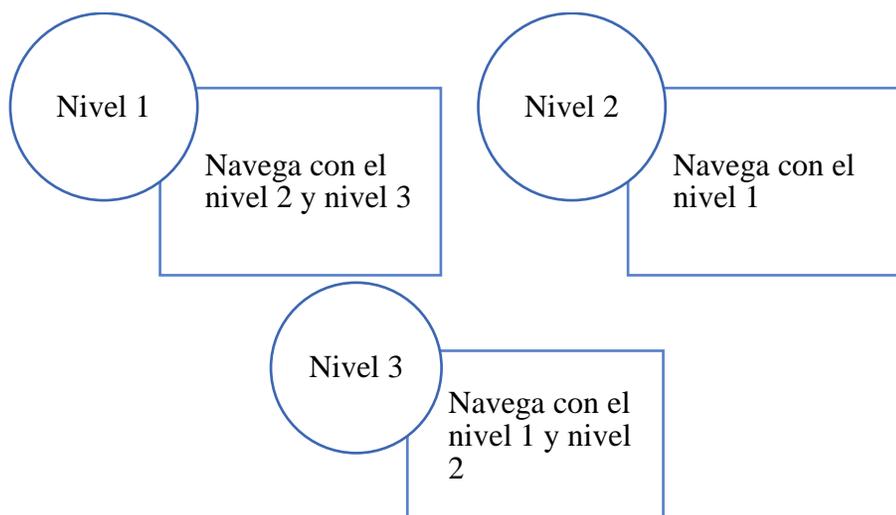


Figura 44. Navegación por niveles de jerarquía de las pantallas de la HMI

a) Pantalla de Presentación, información y menú

El formato de esta pantalla se muestra en la Figura 45.

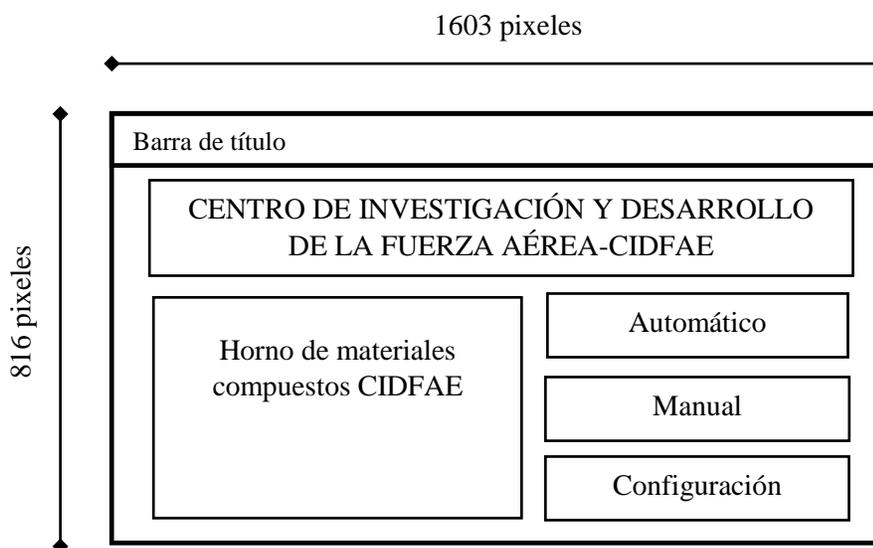


Figura 45. Formato de la pantalla de presentación, información y menú

Las características de la pantalla de presentación, información y menú se muestran en la tabla 29.

Tabla 29

Características técnicas pantalla de presentación, información y menú

Pantalla de presentación, información y menú	
Medidas	1603x816 pixeles
Color de fondo	Blanca (RGB (255, 255, 255))
Color de barra de título	Azul (RGB (0, 0, 255))
Color botones	Gris oscuro (RGB (240, 230, 140))

b) Pantalla de Operación manual

El formato de esta pantalla se muestra en la Figura 46.

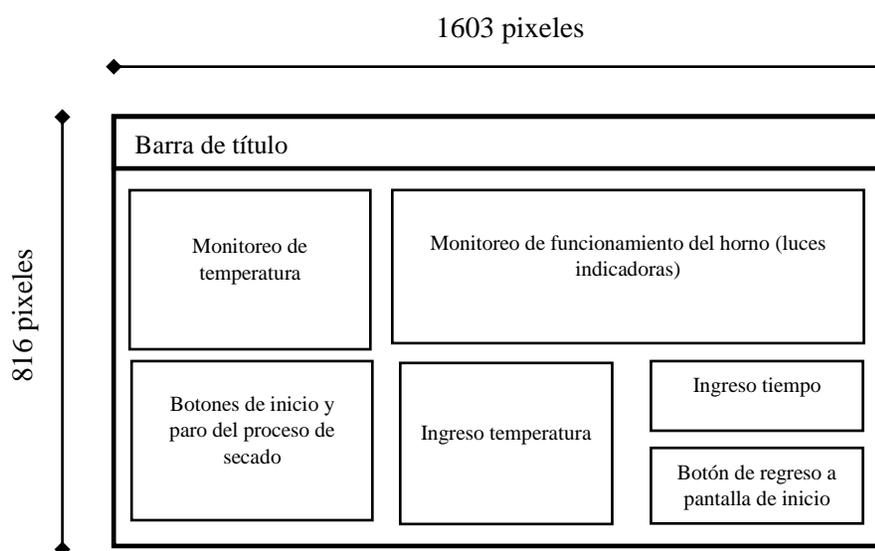


Figura 46. Formato de la pantalla de operación manual

Las características de la pantalla de operación manual se muestran en la tabla 30.

Tabla 30

Características técnicas de la pantalla de operación manual

Pantalla de presentación, información y menú	
Medidas	1603x816 pixeles
Color de fondo	Blanca (RGB (255, 255, 255))
Color de barra de título	Azul (RGB (0, 0, 255))
Color botones	Gris oscuro (RGB (240, 230, 140))

c) Pantalla de Operación automática

El formato de esta pantalla se muestra en la figura 47.

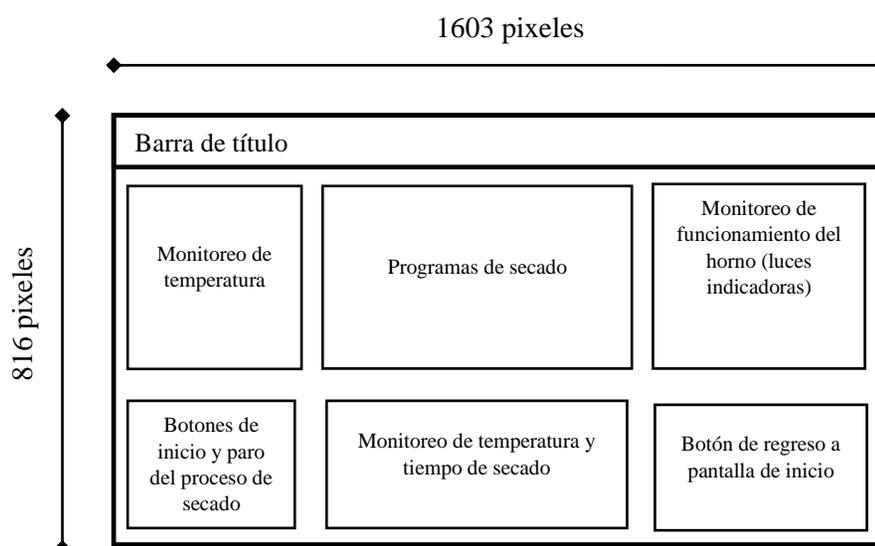


Figura 47. Formato de la pantalla de operación automática

Las características de la pantalla de operación automática se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31

Características técnicas de la pantalla de operación automática

Pantalla de presentación, información y menú	
Medidas	1603x816 pixeles
Color de fondo	Blanca (RGB (255, 255, 255))
Color de barra de título	Azul (RGB (0, 0, 255))
Color botones	Gris oscuro (RGB (240, 230, 140))

d) Pantalla de Configuración

El formato de esta pantalla se muestra en la Figura 48.

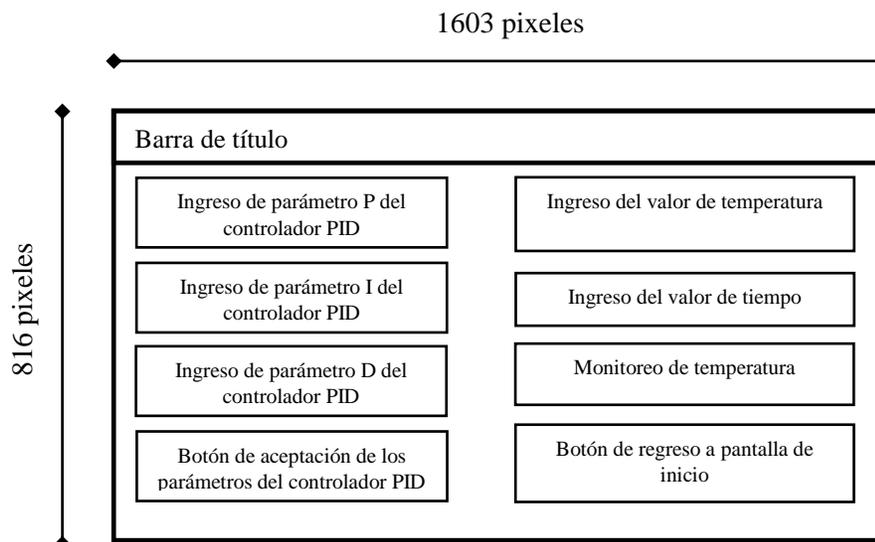


Figura 48. Formato de la pantalla de configuración

Las características de la pantalla de configuración se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32

Características técnicas de la pantalla de configuración

Pantalla de presentación, información y menú	
Medidas	1603x816 píxeles
Color de fondo	Blanca (RGB (255, 255, 255))
Color de barra de título	Azul (RGB (0, 0, 255))
Color botones	Gris oscuro (RGB (240, 230, 140))

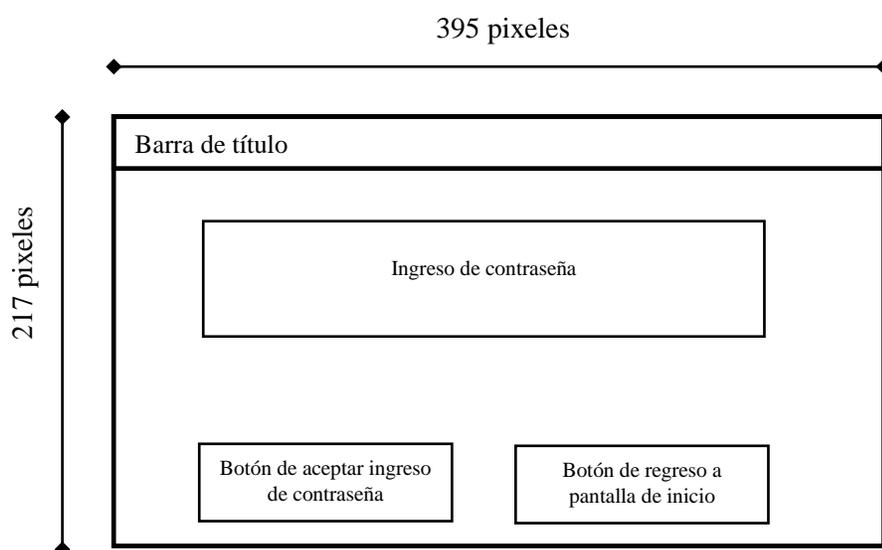
e) Pantalla de Password y Autenticación de Usuario

El formato de esta pantalla se muestra en la figura 49.

Las características de la pantalla de configuración se muestran en la tabla 33.

Tabla 33*Características técnicas de la pantalla de password*

Pantalla de presentación, información y menú	
Medidas	395x217 pixeles
Color de fondo	Blanca (RGB (255, 255, 255))
Color de barra de título	Azul (RGB (0, 0, 255))
Color botones	Gris oscuro (RGB (240, 230, 140))

**Figura 49.** Formato de la pantalla de password y autenticación de usuario

4.2.4. Formato de texto para la HMI

La información de la HMI se presenta mediante las etiquetas de texto que se encuentran en cada una de las pantallas, estas etiquetas deben ser completamente legibles y entendibles por el usuario, para presentar la información de estas etiquetas se ha escogido un formato de texto estandarizado para utilizarlo en todas las pantallas.

El tipo de fuente utilizado para las etiquetas en cada una de las pantallas es Sans Serif y el tipo de letra será Arial.

En la tabla 34 se presentan la distribución del formato de texto para cada una de las pantallas.

Tabla 34

Formato de texto para HMI del horno autoclave

Formato de texto para la HMI del horno autoclave		
Pantalla de Presentación, información y menú	Título principal	Tamaño de letra: 14 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto en la barra de título	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto en los botones de selección	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
Pantalla de operación manual	Texto en la barra de título	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto de etiquetas	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto en los botones de selección	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
Pantalla de operación automática	Texto en la barra de título	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto de etiquetas	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto en los botones de selección	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
Pantalla de Configuración	Texto en la barra de título	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto de etiquetas	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro

CONTINÚA 

	Texto en los botones de selección	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
Pantalla de password y autenticación de usuario	Texto en la barra de título	Tamaño de letra: 10 Tipo de letra: Arial Color de letra: Negro
	Texto de etiquetas	
	Texto en los botones de selección	

Todos los títulos, subtítulos y etiquetas se encuentran escritos en mayúsculas en su totalidad.

4.2.5. Uso de Color para eventos en la HMI

Con el objetivo de crear una adecuada interacción para el operario del horno autoclave es importante establecer colores de alto contraste para representar el estado del equipo, cada representación debe informar la situación actual del funcionamiento del horno.

Los colores utilizados en la HMI deben ser los mismos que el operario está familiarizado a observar en la estructura física del horno. Es por eso que para indicar el estado de funcionamiento del horno se ha establecido el uso de los colores según la tabla 35.

Tabla 35

Uso de colores para HMI del horno autoclave

Uso de colores para HMI del horno autoclave		
Color	Significado	Descripción
Rojo	Emergencia o paro de funcionamiento	Establece que el horno se encuentra en condiciones que no permiten la puesta en marcha del sistema.
Verde	Normal	Establece que el funcionamiento del horno se ha puesto en marcha y que se encuentra en condiciones normales.

4.2.6. Variables relevantes del proceso

Para que exista un correcto funcionamiento del horno existen tres variables relevantes las cuales son:

- Temperatura del horno
- Tiempo programado de funcionamiento
- Tiempo restante de funcionamiento

El monitoreo de estas tres variables por medio de la HMI es de gran importancia para que se produzca el correcto funcionamiento del horno autoclave.

4.3. Aplicación de Requerimientos Funcionales

El diseño presentado garantiza que la interfaz va a ser sencilla pero altamente sofisticada y que cumple con los requerimientos primarios y secundarios establecidos.

La información que presenta la HMI es concisa, el operador del horno autoclave podrá abstraer completamente la información que se le presenta en la pantalla.

CAPÍTULO V

5. IMPLEMENTACIÓN

5.1. Implementación de circuito eléctrico, electrónico y de control

La implementación del circuito eléctrico, electrónico y de control del horno autoclave se realiza según lo establecido en el capítulo 3 de diseño. Se utiliza el diagrama eléctrico y de conexiones presentado en la figura 18. Los elementos utilizados en la implementación del circuito son los definidos en el capítulo de diseño.

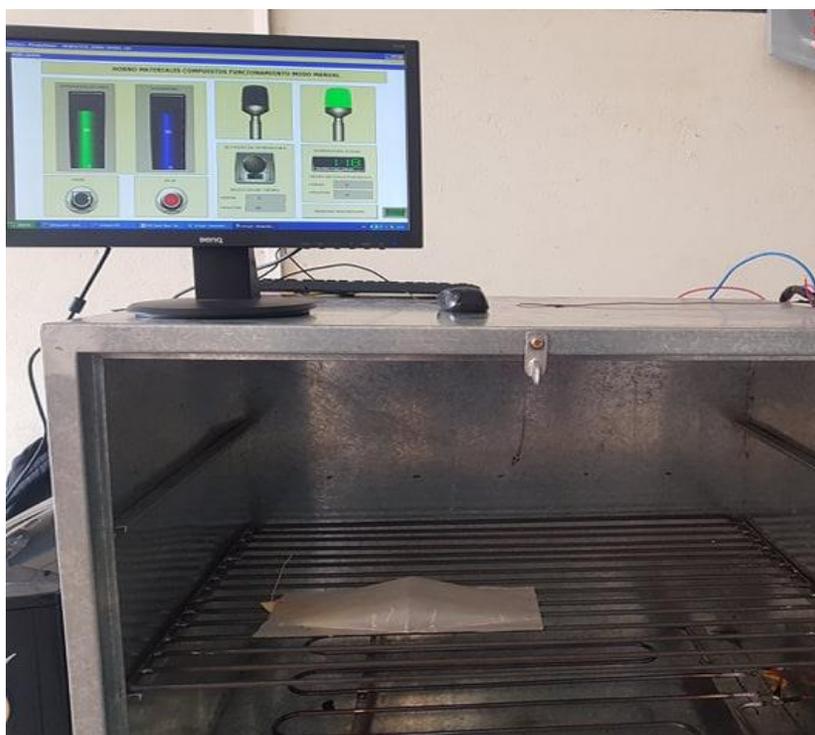


Figura 50. Horno autoclave con los todos los circuitos eléctricos, electrónicos y de control implementados

5.2. Implementación programa en el PLC S7-1200

En la Figura 51 se muestra el proceso para la implementación de la programación en el PLC S7-1200.

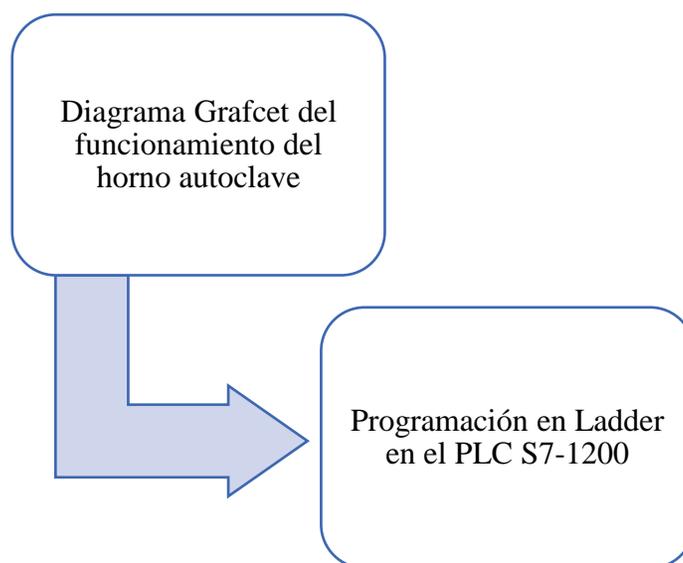


Figura 51. Proceso de implementación programa PLC S7-1200

El diagrama Grafcet de funcionamiento del horno autoclave se muestra en la figura 20.

5.2.1. Implementación programa en el PLC S7-1200

La programación en el PLC S7-1200 se debe realizar en tipo Ladder o escalera (KOP), utilizando el programa Tia-Portal V14.

El programa ladder implementado para la automatización en el proceso de secado de materiales compuestos se observa en el Anexo 01.

5.2.1.1. Tabla de asignación de variables

En la tabla 36 se muestran las características de las variables utilizadas para la programación en el PLC Siemens S7-1200.

Tabla 36

Tabla de asignación de variables del PLC Siemens S7-1200

No	Denominación	Indicador	Tipo	Dirección I/O
1	Inicio	Da el inicio al proceso de secado	Bool	%M10.0
2	TermoRest	Salida del proceso de secado PWM	Bool	%Q0.5
3	LV	Luz verde	Bool	%Q0.1
4	LR	Luz roja	Bool	%Q0.2
5	Paro_Emer	Indica que existe paro de emergencia	Bool	%IO.0
6	Paro	Para el proceso de secado	Bool	%M10.1
7	Tiempo_Mins	Minutos seleccionados de secado	Time	%MD30
8	Tiempo_Horas	Horas seleccionadas de secado	Time	%MD91
9	SetPoint	Set Point de Temperatura	Real	%MD50
10	Temp_Actual	Temperatura actual del sensor	Real	%MD112
11	Tiempo_Cumplido	Indicador de que el tiempo de secado se ha cumplido	Bool	%M200.3
12	SensorTemp	Temperatura del sensor antes del escalamiento	UInt	%IW64
13	TIEMPO_ACTUAL	Tiempo transcurrido del secado	Time	%MD130
14	Estado1	Estado 1 de condiciones de secado	Bool	%M200.0
15	Estado2	Estado 2 de condiciones de secado	Bool	%M200.1
16	Estado3	Estado 3 de condiciones de secado	Bool	%M200.2
17	Auxiliar	Registro auxiliar	Real	%MD300

CONTINÚA 

18	Min_Transcurridos	Minutos de secado transcurridos	Int	%MW400
19	Hora_Transcurridos	Horas de secado transcurridas	Int	%MW410
20	ParámetroP	Parámetro Proporcional de PID	Real	%MD51
21	ParámetroI	Parámetro Integrativo de PID	Real	%MD52
22	ParámetroD	Parámetro Derivativo de PID	Real	%MD53

5.2.2. Módulo PID_Temp del PLC S7-1200

Para realizar la configuración del controlador PID de temperatura del horno autoclave se utiliza el módulo tecnológico PID_Temp con el que cuenta el PLC S7-1200, en este módulo se realizaron las siguientes configuraciones:

Se establece el registro del cual se va a obtener el Set Point, la entrada del sensor de temperatura escalado y la salida que se va a utilizar es la Output_PWM, esta configuración se muestra en la Figura 52.

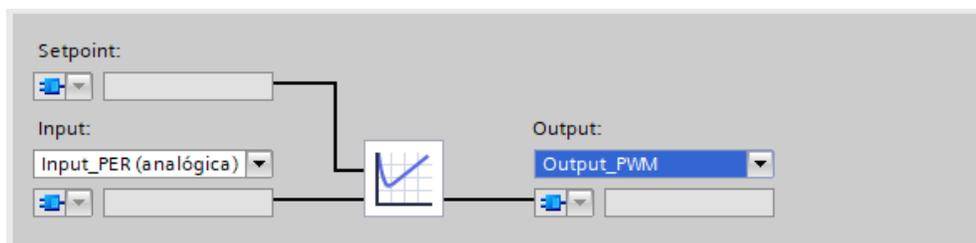


Figura 52. Objeto tecnológico PID_Term

Los parámetros de los registros del PLC ingresados en el Set Point, Input y Output_PWM se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37
Configuración PID_Temp

Variable	Dirección
Setpoint	%MD50
Temp_Actual	%MD112
Output_PWM	% Q0.5

Se debe seleccionar el límite superior e inferior de temperatura a controlar como lo muestra la figura 53. Se establece como máxima temperatura 160 °C y como mínima 0 °C. El escalamiento del sensor de temperatura se realiza en la programación del PLC.

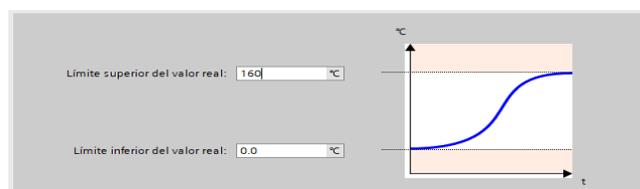


Figura 53. Ajustes de valor mínimo y máximo de temperatura

En la figura 54 se observan los valores de las constante proporcional, tiempo de integración y tiempo derivativo implementados en el objeto tecnológico PID_Temp del PLC S7-1200.

Figura 54. Parámetros de controlador PID horno autoclave TIA PORTAL

5.3. Implementación HMI horno autoclave

En la Figura 55 se muestra el proceso que se siguió para la implementación del diseño de la HMI del horno autoclave.

5.3.1. Diseño del HMI basado en la Norma ISA SP 101

La HMI para el horno autoclave fue diseñado mediante la norma ISA SP 101, el diseño se lo presentó anteriormente en la sección 4.1.

5.3.2. Creación de la simulación en Archestra

Para el desarrollo de la programación de la HMI se necesita el Software Archestra, el cual tiene las herramientas necesarias que permiten el desarrollo de la interfaz y su implementación.

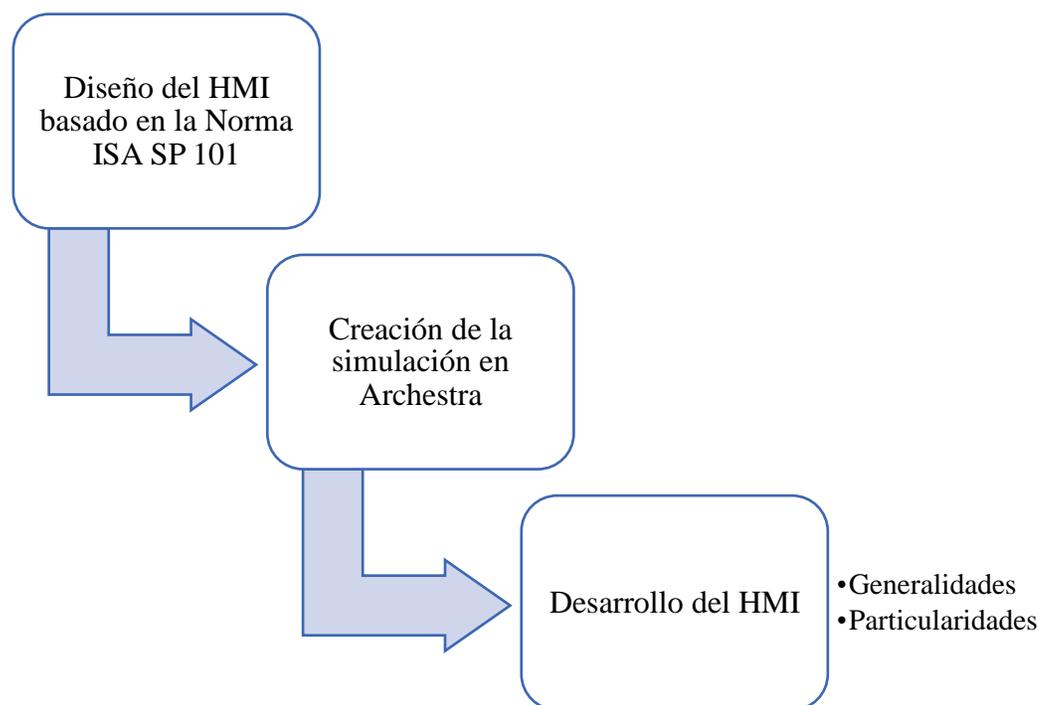


Figura 55. Proceso de implementación HMI

5.3.3. Desarrollo de la HMI

5.3.3.1. Pantalla de Presentación, información y menú

Esta pantalla contiene la portada principal del HMI indicando información como:

- Nombre de la institución (Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea-CIDFAE).
- Barra de título (INFORMACIÓN Y MENÚ)
- Tres botones de navegación los cuales conducen a las pantallas de operación manual, operación automática y configuración.

La pantalla de Presentación, información y menú se puede ver en la figura 56.



Figura 56. Pantalla de presentación, información y menú

5.3.3.2. Pantalla de Operación manual

Esta pantalla contiene las opciones para realizar la operación en modo manual del horno autoclave, muestra información como:

- Título de la pantalla (HORNO MATERIALES COMPUESTOS FUNCIONAMIENTO MODO MANUAL).
- Barra de título (MODO MANUAL)
- Dos botones de inicio y paro del proceso de secado
- Dos luces (una verde y una roja).
- Casilleros de ingreso para la temperatura y tiempo deseado.
- Casilleros de información del tiempo restante y la temperatura del sensor.
- Barras indicadoras de temperatura.

La pantalla de Operación manual se puede ver en la figura 57.



Figura 57. Pantalla de operación modo manual

5.3.3.3. Pantalla de Operación Automática

Esta pantalla contiene las opciones para realizar la operación en modo automático del horno autoclave, muestra información como:

- Título de la pantalla (HORNO MATERIALES COMPUESTOS FUNCIONAMIENTO MODO AUTOMÁTICO).
- Barra de título (MODO AUTOMÁTICO)
- Dos botones de inicio y paro del proceso de secado
- Dos luces (una verde y una roja).
- Casilleros de información de la temperatura y tiempo deseado.
- Casilleros de información del tiempo restante y la temperatura del sensor.
- Barras indicadoras de temperatura.
- Tres botones para escoger los diferentes programas de secado.

La pantalla de Operación automática se puede ver en la Figura 58.



Figura 58. Pantalla de operación modo automático

5.3.3.4. Pantalla de Configuración

Esta pantalla contiene las opciones para realizar la configuración de los parámetros PID del controlador del horno autoclave, muestra información como:

- Título de la pantalla (HORNO MATERIALES COMPUESTOS FUNCIONAMIENTO MODO CONFIGURACIÓN).
- Barra de título (MODO CONFIGURACIÓN)
- Dos botones de inicio y paro del proceso de secado
- Dos luces (una verde y una roja).
- Tres casilleros para ingresar los parámetros P, I, D del controlador PID.
- Botón para enviar los parámetros al PLC
- Casilleros de información de la temperatura y tiempo deseado.
- Casilleros de información del tiempo restante y la temperatura del sensor.
- Barras indicadoras de temperatura.

La pantalla de Operación modo configuración se puede ver en la Figura 59.



Figura 59. Pantalla de operación modo configuración

5.3.3.5. Pantalla de Password y Autenticación de Usuario

Esta pantalla contiene la autenticación del usuario para ingresar a configurar los valores del controlador PID del horno autoclave, indicando información como:

- Barra de título (CONTRASEÑA)
- Dos botones de navegación
- Casillero para ingreso de contraseña

La pantalla de contraseña se puede ver en la Figura 60.



Figura 60. Pantalla de contraseña

5.4. Conexión PLC S7-1200 y KEPServer

Para realizar la conexión entre el PLC S7-1200 Y KEPServer se debe realizar las configuraciones para que se reconozca que los datos provienen del PLC S7-1200.

5.4.1. Tabla de Asignación de Variables KEPServer

En la table 38 se muestran las variables asignadas en el programa KEPServer que se utilizan para la conexión entre el PLC S7-1200 y Archestra.

Tabla 38
Asignación variables KEPServer

No	Denominación	Indicador	Tipo	Dirección I/O
1	Inicio	Da el inicio al proceso de secado	Bool	%M10.0
2	Horas_Transcurridas	Tiempo transcurrido de las horas en el proceso de secado	Word	%MW410
3	Luz_Verde	Luz verde	Bool	%Q0.1
4	Luz_Roja	Luz roja	Bool	%Q0.2
5	Minutos_Transcurridos	Tiempo transcurrido de los minutos en el proceso de secado	Bool	%MW400
6	Sensor	Transmite la temperatura del sensor	Dword	%ID64
7	Set_Point	Valor de la consigna de temperatura para el horno autoclave	Float	%MD50
8	Stop	Detiene el proceso de secado	Bool	%MD10.1
9	Temp_Act	Temperatura actual del sensor	Float	%MD112
11	Tiempo_Actual	Indica el tiempo de secado	DWord	%MD130
12	Tiempo_Horas	Indica el tiempo que se va a ingresar para el secado en horas	DWord	%MD91
13	Tiempo_Minutos	Indica el tiempo que se va a ingresar para el secado en minutos	DWord	%MD30
14	Proporcional	Parámetro proporcional	Float	%MD51
15	Integrativo	Parámetro integrativo	Float	%MD52
16	Derivativo	Parámetro derivativo	Float	%MD53

5.5. Conexión Archestra y KEPServer

Para realizar la conexión entre KEPServer y Archestra, se debe configurar la conexión SuiteLink con los parámetros que se muestran en la tabla 39 y tabla 40.

Tabla 39*Configuración KEPServer para conexión con Arcestra*

Configuración KEPServer	
Variable	Configuración
Application Name	server_runtime
Tipo de Conexión	FastDDE/SuiteLink
Alias	Intouch

Tabla 40*Configuración Arcestra para conexión con KEPServer*

Configuración Arcestra	
Variable	Configuración
Access	Kepware
Application Name	server_runtime
Protocol	SuiteLink
Topic Name	Intouch

CAPÍTULO VI

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1. Operación del horno de materiales compuestos.

- Se realizó la operación del horno de materiales compuestos por parte de los técnicos del CIDFAE, posterior a la manipulación de la HMI, luces indicadoras y paro de emergencia se procedió a realizar una encuesta a los dos técnicos que trabajan en el CIDFAE.
- Se realizó la encuesta a los dos técnicos de materiales compuestos que trabajan en el CIDFAE acerca de la visualización y control del horno autoclave por medio de las pantallas HMI, luces indicadores y paro de emergencia obteniendo los siguientes resultados:
 - a) ¿Los colores de las pantallas son los adecuados para que usted pueda operar el horno autoclave?

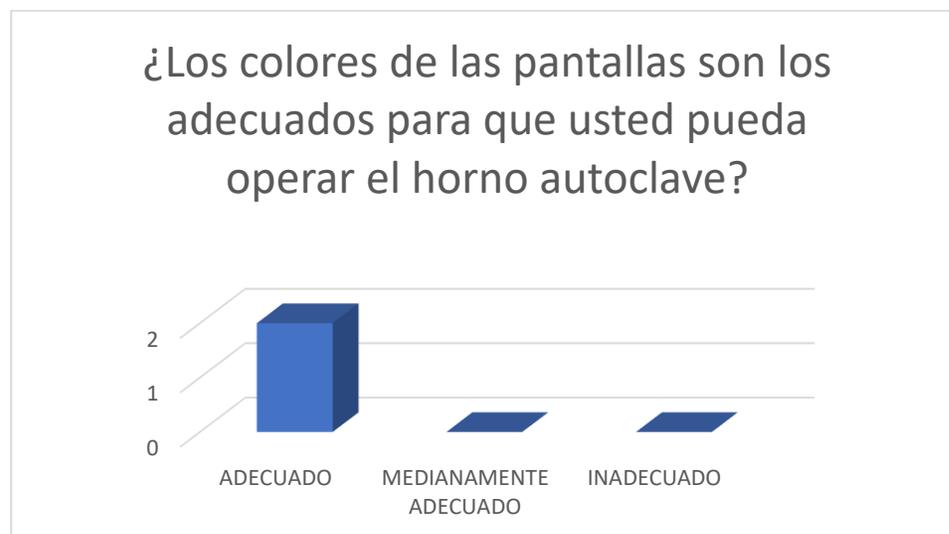


Figura 61. Gráfico de análisis pregunta a

- b) ¿Las pantallas de la HMI presentan la información suficiente para que se pueda operar y controlar el funcionamiento del horno autoclave?

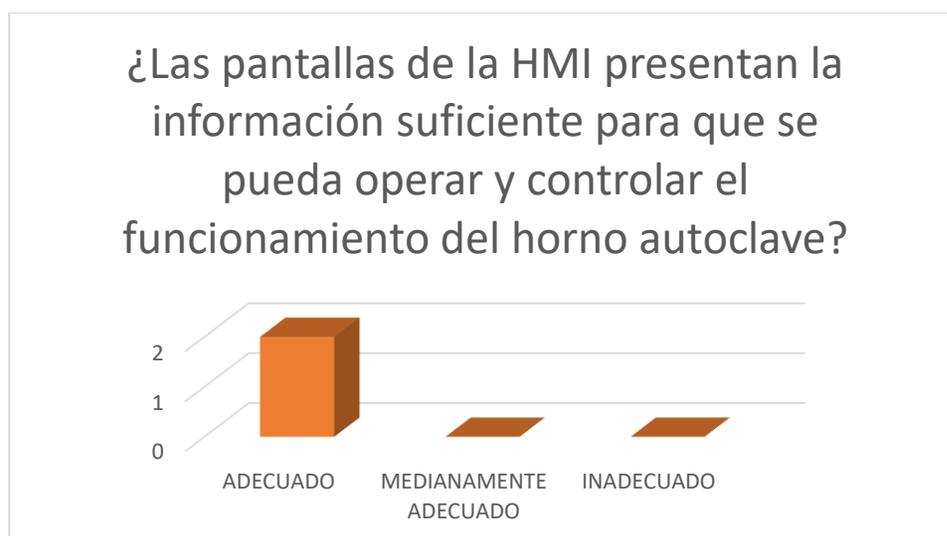


Figura 62. Gráfico de análisis pregunta b

- c) ¿Los botones de navegación presentan la información adecuada para realizar una correcta exploración entre pantallas?

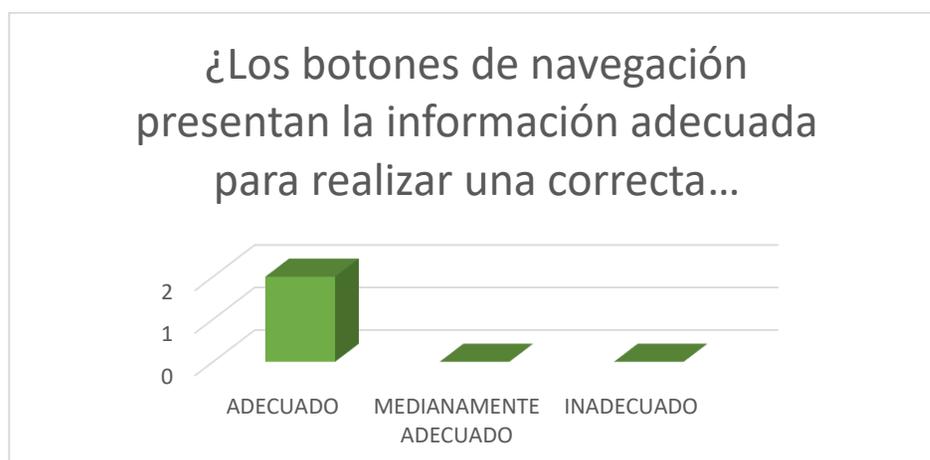


Figura 63. Gráfico de análisis pregunta c

- d) ¿Los casilleros de ingreso y visualización de temperatura y tiempo son de las dimensiones adecuadas y se encuentran plenamente identificadas?

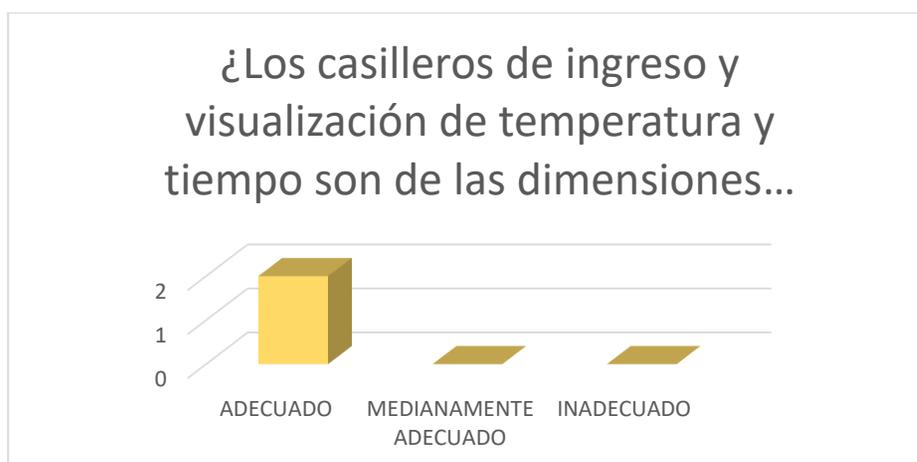


Figura 64. Gráfico de análisis pregunta d

- e) ¿La visualización de las variables tanto de tiempo y temperatura del horno autoclave es la correcta?

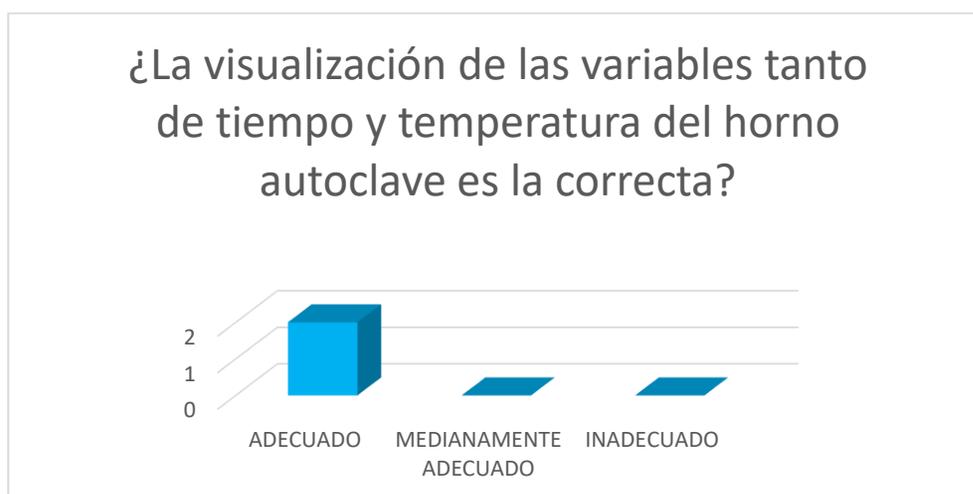


Figura 65. Gráfico de análisis pregunta e

- f) ¿Las luces indicadoras de funcionamiento se encuentran en una posición correcta y dan una idea clara del estado (funcionamiento o paro) en el que se encuentra el horno?

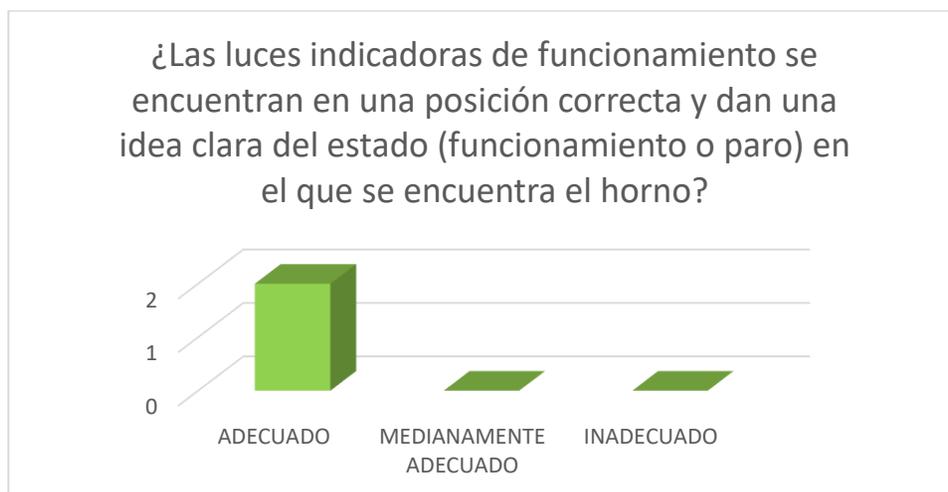


Figura 66. Gráfico de análisis pregunta f

- g) ¿El paro de emergencia se encuentra en una correcta ubicación y plenamente identificado en caso de que tenga que realizar un paro de emergencia del proceso de secado?



Figura 67. Gráfico de análisis pregunta g

Realizando un análisis de todas las preguntas de la encuesta planteada se determina que todos los parámetros de visualización, control, información de funcionamiento de las pantallas HMI, luces indicadoras y paro de emergencia son los adecuados y son aceptados por los técnicos del CIDFAE.

6.2. Tiempo de secado de materiales compuestos

Mediante la aplicación del proceso de secado en tres piezas de diferentes dimensiones de materiales compuestos utilizando el horno autoclave se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 41.

Tabla 41

Pruebas de secado de materiales compuestos CIDFAE

Número de pieza	Dimensiones	Tiempo de secado	Temperatura de secado	Porcentaje de secado
1	Largo: 20 cm Ancho: 8 cm Espesor: 2 cm	3 horas con 30 minutos	120 °C	100%
2	Largo: 35 cm Ancho: 20 cm Espesor: 6 cm	4 horas con 30 minutos	150 °C	100%
3	Largo: 80 cm Ancho: 32 cm Espesor: 8 cm	6 horas	160 °C	100%

6.3. Comparación de tiempo de secado

Tabla 42

Comparación de tiempos de secado

Número de pieza	Dimensiones	Tiempo de secado con el horno	Tiempo de secado sin el horno	Temperatura de secado con el horno	Temperatura de secado sin el horno
1	Largo: 20 cm Ancho: 8 cm	3 horas con 30 minutos	24 horas	120 °C	Ambiente

CONTINÚA 

	Espesor: 2 cm				
2	Largo: 35 cm Ancho: 20 cm Espesor: 6 cm	4 horas con 30 minutos	24 horas	150 °C	Ambiente
3	Largo: 80 cm Ancho: 32 cm Espesor: 8 cm	6 horas	24 horas	160 °C	Ambiente

Como se observa en la tabla 42 antes de la utilización del horno autoclave se realizaba el secado de las piezas de materiales compuestos a temperatura ambiente por lo que el proceso de secado duraba 24 horas sin mantener una temperatura constante, con el uso del horno autoclave se utiliza para las piezas de mayor dimensión el 25% del tiempo que se utilizaba antes del horno.

6.4. Funcionamiento del horno autoclave

- El horno autoclave realizó un funcionamiento al máximo de su temperatura 160 °C durante seis horas seguidas.
- La luz indicadora verde funcionó seis horas de manera ininterrumpida.
- Los parámetros de temperatura fueron los correctos manteniéndose dentro del margen de error de ± 2 °C establecido en los parámetros de diseño del horno autoclave.
- La luz roja se encendió al momento que el horno autoclave terminó con el proceso de secado determinado por el usuario.
- La luz roja de manera intermitente se encendió al momento de pulsar el botón de paro de emergencia.

Las figuras 68, 71 y 74 muestran los procesos de secado de las piezas de materiales compuestos que se utilizaron para realizar las pruebas de funcionamiento del horno autoclave. En cada gráfico

se puede observar la relación entre la temperatura y el tiempo de operación, mostrando que las variaciones de temperatura en el periodo de uso del horno se encuentran entre los rangos establecidos dentro de las especificaciones de operación del horno. Los parámetros del secado de las piezas se muestran en la tabla 41.

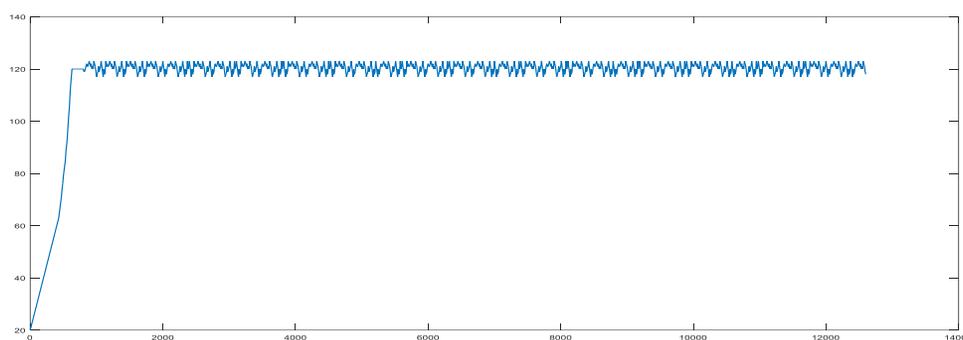


Figura 68. Gráfico secado de la pieza 1

En las figuras 69 y 70 se puede observar el funcionamiento del horno autoclave en el secado de la pieza 1, en donde se mantiene la temperatura en el rango aceptado en el diseño, después de 3 horas y 24 minutos de funcionamiento.



Figura 69. Secado pieza 1

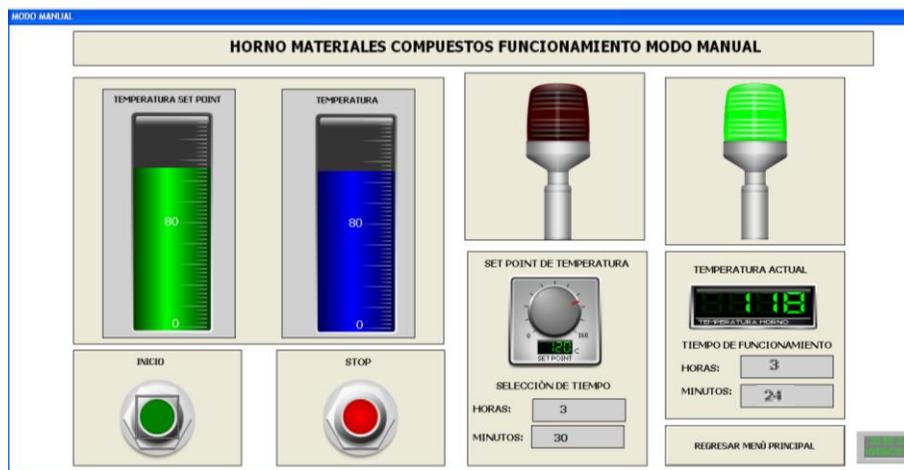


Figura 70. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 1

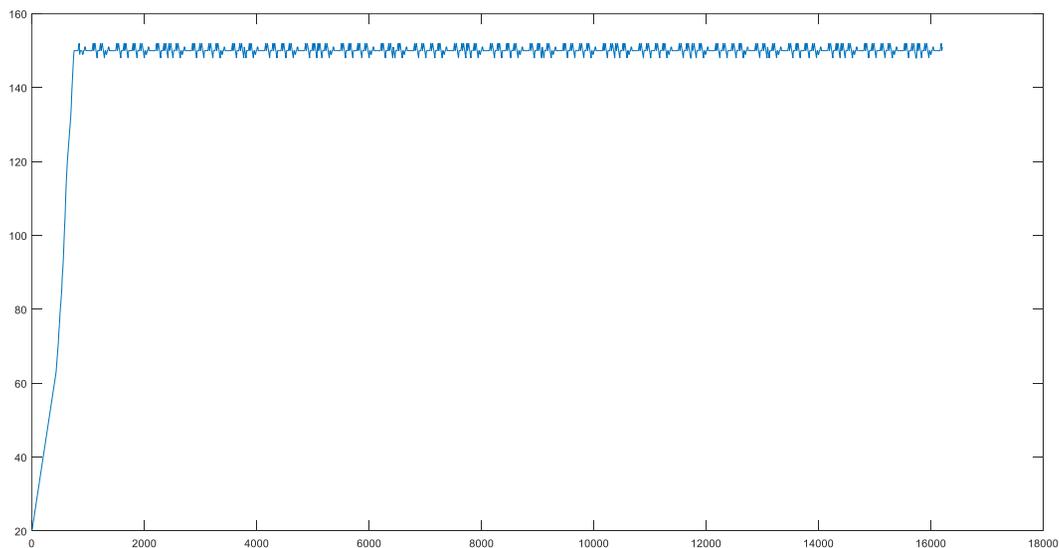


Figura 71. Gráfico secado de la pieza 2

En las figuras 72 y 73 se puede observar el funcionamiento del horno autoclave en el secado de la pieza 2, en donde se mantiene la temperatura en el rango aceptado en el diseño, después de 4 horas y 26 minutos de funcionamiento.



Figura 72. Secado pieza 2

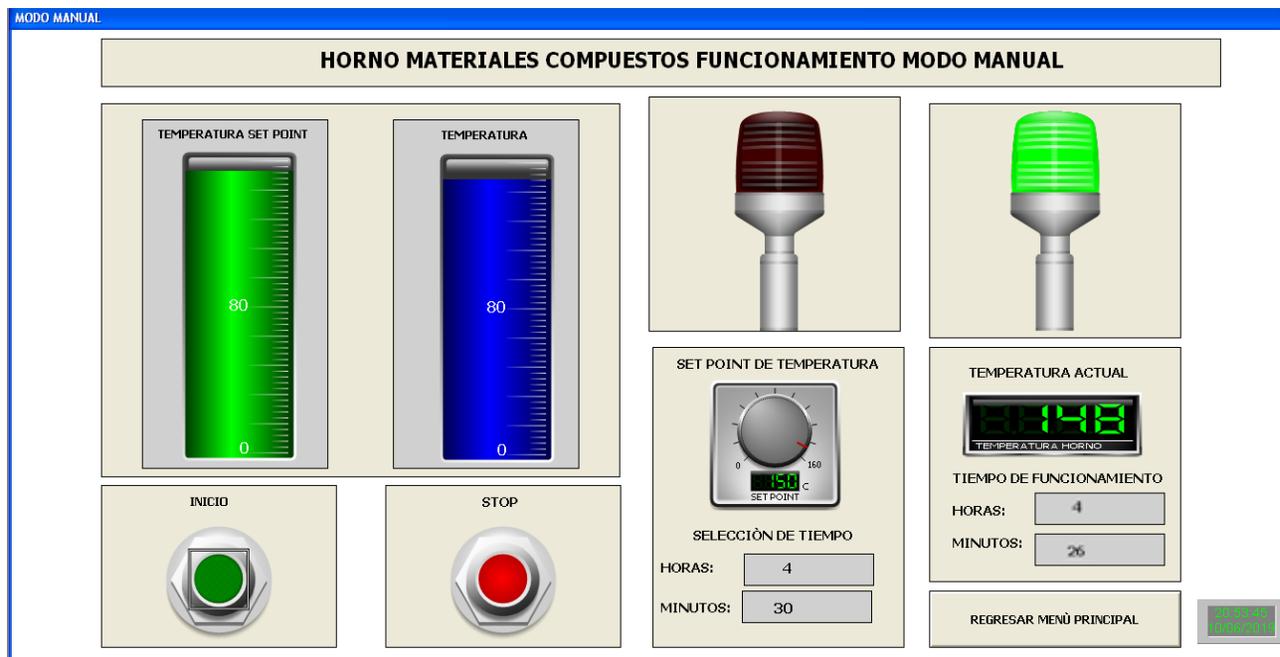


Figura 73. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 2

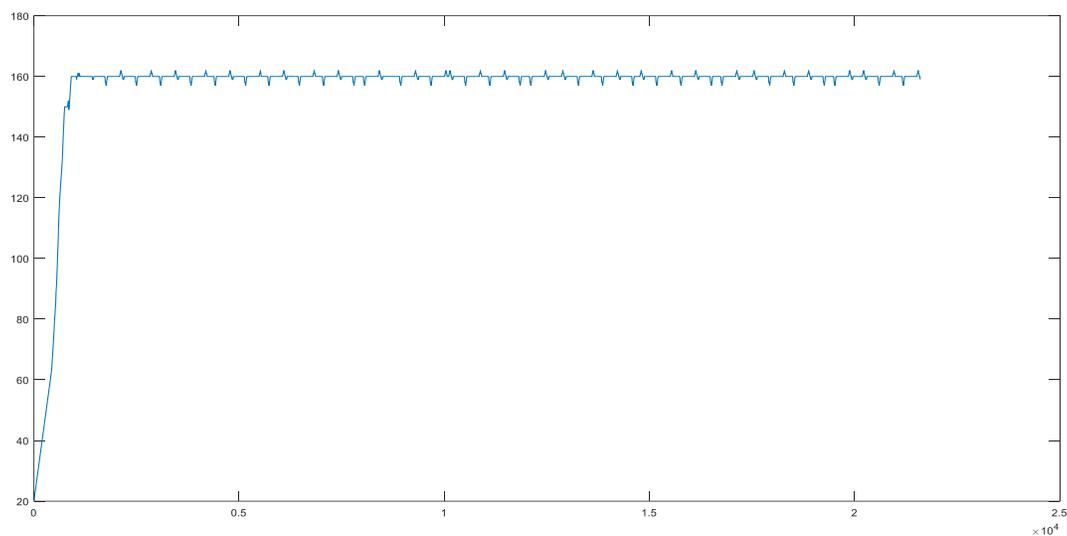


Figura 74. Gráfico secado de la pieza 3

En las figuras 75 y 76 se puede observar el funcionamiento del horno autoclave en el secado de la pieza 3, en donde se mantiene la temperatura en el rango aceptado en el diseño, después de 5 horas con 48 minutos de funcionamiento.

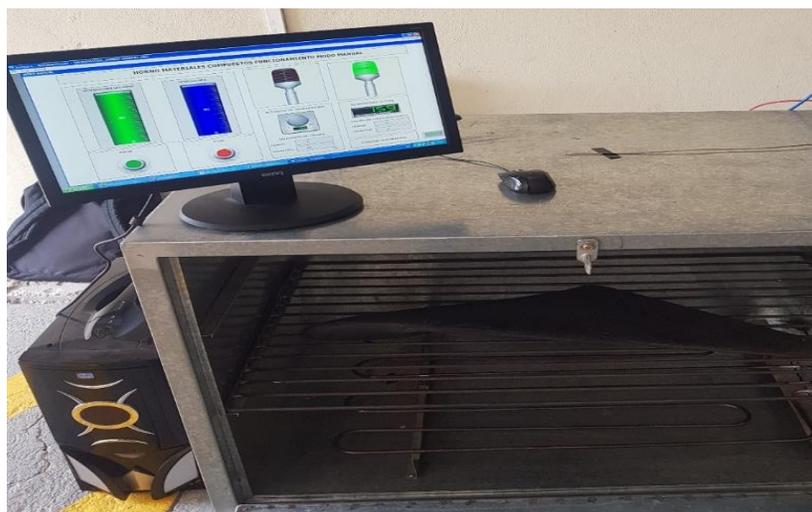


Figura 75. Secado pieza 3

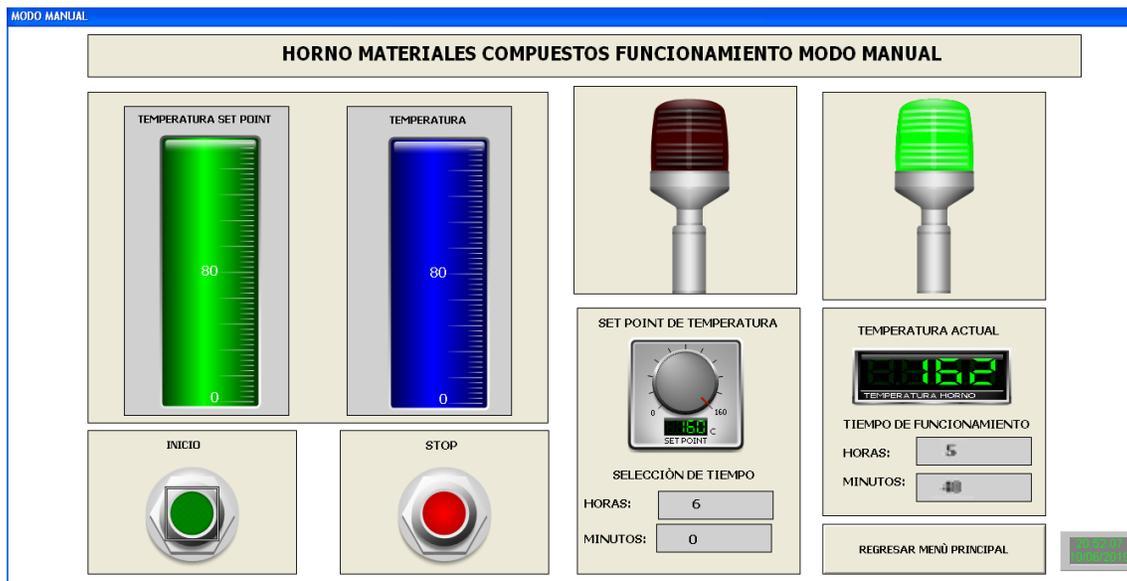


Figura 76. Funcionamiento del horno autoclave secado pieza 3

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- La calidad y tiempo de secado de las partes de materiales compuestos realizadas por el CIDFAE se ha mejorado, el secado de las partes de aeronaves se realizaba a la temperatura del medio ambiente y con una duración de 24 horas, sin tomar en cuenta los cambios de temperatura existentes en la ciudad de Ambato, con el horno autoclave el tiempo de secado se redujo a un promedio de 6 horas permitiendo que se produzca un mayor número de piezas en menor tiempo, el secado de los materiales es uniforme a una temperatura constante por lo que se mejora el proceso de polimerización y así se logra una mejor calidad del material compuesto.
- El desarrollo de las pantallas HMI para el monitoreo y control del funcionamiento del horno autoclave fue el adecuado ya que se adaptó a las necesidades y requerimientos de los técnicos operadores del CIDFAE, las pantallas desarrolladas permiten un correcto control y visualización de la temperatura y funcionamiento del horno.
- El operador del horno autoclave únicamente controla y monitorea las variables del horno mediante una interfaz HMI que fue aprobada por las necesidades del operador, esta interfaz permite que se realice un control de las variables sin necesidad de acercarse al horno, evitando que el operador sufra accidente de quemaduras debido a la temperatura. Las indicaciones visuales de la interfaz HMI son las adecuadas para el control y configuración de las variables que debe monitorear el horno autoclave.

- El control PID implementado permite tener una temperatura constante durante todo el tiempo que dura el proceso de secado al interior del horno autoclave, en el tiempo de funcionamiento máximo de seis horas la temperatura fue constante de acuerdo con los parámetros de diseño.

7.2. Recomendaciones

- Antes de realizar la operación del horno autoclave, se debe tomar conocimiento del manual de operación para evitar daños personales y al horno. El manual de operación del horno autoclave se encuentra en los Anexo 03.
- Se debe ubicar el horno en un lugar adecuado con cubierta para evitar daños ocasionados por la humedad, ya que esta podría ocasionar cortocircuitos o corrosión en la estructura del horno.
- Evitar el uso de materiales de baja calidad, buscando el abaratamiento de costos, ya que en la operación se encuentra en consideración heridas que puedan sufrir los operadores.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abad, A. (2012). *Determinación experimental del daño transversal en la matriz de un material compuesto mediante la utilización de un sistema de emisiones acústicas*. Madrid: Universidad Carlos III.

Alzate, E., Montes, J., & Carlos, S. (2007). *Medición de Temperatura: Sensores termoeléctricos*. Pereira.

Automación Micromecánica. (12 de 06 de 2018). *Controlador Lógico Programable (PLC)-Curso 061*. Obtenido de [http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramable PLC.pdf](http://www.microautomacion.com/capacitacion/Manual061ControladorLgicoProgramablePLC.pdf)

Besednjak, A. (2006). *Materiales Compuestos-Procesos de fabricación de embarcaciones*. Cataluña: UPC.

Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. (6 de Junio de 2018). *Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana*. Obtenido de <http://leon.260mb.net/>

Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. (2017). *Diseño y Construcción de un Autoclave para Secado de Piezas Laminadas en Material Compuesto*. Ambato.

Departamento de Eléctrica y Electrónica UVA. (12 de Junio de 2018). *Sensores*. Obtenido de https://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Master_IE/Sensores.pdf

Departamento de sistemas e informática UNR. (12 de 06 de 2018). *Introducción a los Controladores Lógicos Programables*. Obtenido de https://www.dsi.fceia.unr.edu.ar/downloads/digital_I/Apunte_PLC.pdf

Dorf, R., & Bishop, R. (2011). *Modern Control Systems*. New Jersey: Pearson.

Enríquez, H. (2012). *El ABC de la Instrumentación en el Control de Procesos Industriales*. México D.F.: Limusa.

Factoria de ingenieros. (18 de Junio de 2018). *Factoria de Ingenieros*. Obtenido de <https://www.factoriadeingenieros.com/pantalla-tactil/>

Garrido, P. (12 de Junio de 2018). *El ABC de la automatización*. Obtenido de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sensores-de-temperatura.pdf>

Gómez, V. (2017). *Caracterización mecánica de materiales compuestos manufacturados fuera de autoclave*. Santiago de Querétaro: CIDESI.

Hull, D. (2003). *Materiales Compuestos*. España: Reverté S.A.

IEEE. (11 de Junio de 2018). *Engineering360*. Obtenido de <https://www.globalspec.com/reference/37444/203279/7-9-curing>

Interelectronix. (18 de Junio de 2018). *Pantallas táctiles como interfaz de usuario en la industria*. Obtenido de <https://www.interelectronix.com/es/rubros/pantalla-tactil-industrial.html>

Kepware. (15 de Febrero de 2019). *KEPServerEX*. Obtenido de <https://www.kepware.com/en-us/products/kepserverex/>

Miravete, A., & Cuartero, J. (2003). *Materiales Compuestos*. Zaragoza: Reverté S. A.

Reindustria. (20 de Febrero de 2019). *Red de conocimiento en Innovación, Gestión en Tiempo Real y Agilidad Empresarial*. Obtenido de <http://redindustria.blogspot.com/2008/07/qu-es-archestra.html>

Rodríguez, E. (2012). Desarrollo de materiales compuestos avanzados basados en fibras de carbono para la industria aeroespacial. *Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat.*, , 64. Obtenido de http://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/2243/Desarrollo_de_materiales_compuestos_avanzados_basados_en_fibras_de_carbono_para_la_industria_aeroespacial.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rueda, J. M. (2007). *Sistemas Eléctricos y Electrónicos de las Aeronaves*. Madrid: Paraninfo.

Santamaría, G., & Castejón, A. (s.f.). *Electrotecnia*. Editex.

SIEMENS. (Noviembre de 2009). *Manual SIEMENS S7-1200*. Obtenido de <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF>

SIEMENS. (2017). *S7-1200, S7-1500 Regulación PID Manual de Funciones*.

Slicetex Electronics. (09 de Agosto de 2018). *HMI Kinco*. Obtenido de <http://www.slicetex.com/hmi/kinco/index.php#model1>

Stupenengo, F. (2011). *inet.edu.ar*. Obtenido de <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>

Tsai, S., & Miravete, A. (s.f.). *Diseño y Analisis de Materiales Compuestos*. Barcelona: Reverté S.A.

UNET. (12 de Junio de 2018). *Sensores*. Obtenido de <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>

UPV. (12 de Junio de 2018). *Sensores de temperatura*. Obtenido de http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lsted/2003-04/0.Sens_Temp/ARCHIVOS/SensoresTemperatura.pdf

WATTCO. (2018). *Elemento Calefactor Eléctrico*. Obtenido de <https://www.wattco.com/es/2018/09/elemento-calefactor-electrico/>

ANEXOS