



**Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales
compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de
la Fuerza Aérea Ecuatoriana.**

Peñañiel Pérez, Ronny Javier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en
Electrónica Automatización y Control.

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro, Mgs

30 de agosto del 2021

Curiginal

Document Information

Analyzed document	Tesis4_SUBT-PEÑAFIEL.pdf (D111834093)
Submitted	8/30/2021 3:25:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	8%
Analysis address	ilbbioteca.GDC@analysis.urkund.com



HUGO RAMIRO
ORTIZ TULCAN

Sources included in the report

SA	Urkund_Cadena_Lagua.docx Document Urkund_Cadena_Lagua.docx (D110676654)	 1
SA	TESIS HORNO AUTOCLAVE MARCELO SUAREZ.docx Document TESIS HORNO AUTOCLAVE MARCELO SUAREZ.docx (D54441577)	 11
W	URL: https://docplayer.es/89431337-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo.html Fetched: 1/3/2020 4:09:35 PM	 1
SA	TITULACION_DANIEL_AGUIRRE_VICTOR_NUNEZ.docx Document TITULACION_DANIEL_AGUIRRE_VICTOR_NUNEZ.docx (D80361273)	 28
SA	TESIS PRESION Y TEMPERATURA AUTOMATICA FINAL.docx Document TESIS PRESION Y TEMPERATURA AUTOMATICA FINAL.docx (D53592019)	 1
W	URL: https://www.prelectronics.com/es/about-pr/why-pr/case-lyonnaise-des-eaux/ Fetched: 8/30/2021 3:26:00 PM	 1



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana”** fue realizado por el señor **Peñañiel Pérez, Ronny Javier** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de agosto de 2021



HUGO RAMIRO
ORTIZ TULCAN

Firma:

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro, Mgs



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**


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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo **Peñañiel Pérez, Ronny Javier** con cédula de ciudadanía n° 1718645466, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Sangolquí, 30 de agosto de 2021

Firma:


Peñañiel Pérez Ronny Javier
CE 1718645466



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**


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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Peñañiel Pérez, Ronny Javier** con cédula de ciudadanía n° 1718645466, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de agosto de 2021

Firma:



Peñañiel Pérez Ronny Javier
CI: 1718645466

Dedicatoria

A Dios y a la virgen del Quinche, que me siempre cuidaron de mí durante este trayecto de mi vida.

A mi madre Patricia, que fue la única persona que creyó en mí y siempre me dio su apoyo incondicional ante cualquier adversidad presentada.

A mi padre Patricio por enseñarme el valor del trabajo duro y que con sacrificio y perseverancia se cumplen los objetivos planteados.

A mis hermanas: Karen y Danna, quienes han sido un pilar fundamental dentro de mi vida, para continuar adelante y continuar mejorando día a día.

A mis familiares que siempre me brindaron su apoyo en toda circunstancia para que yo pueda culminar esta etapa de mi vida.

A mis amigos y a esas personas especiales que formaron gran parte de este logro, por su ayuda y su apoyo moral a lo largo de este tiempo transcurrido.

Ronny J. Peñafiel

Agradecimiento

Antes que nada agradecer a Dios y a mi virgen del Quinche que siempre cuidaron de mí y nunca permitieron que perdiera la fe y poder alcanzar mis metas y objetivos.

Quiero expresar mi gratitud, a mis padres Patricio y Patricia que siempre me han apoyado incondicionalmente para poder formarme como profesional y siempre han sido el pilar fundamental de mi vida, que me han enseñado a luchar y trabajar duro para conseguir los objetivos que se plantea una persona en la vida.

Mi más sincero agradecimiento a mi tía Blanca Rosa y a mi prima Alexandra por ser mi segunda familia y me brindaron todo su apoyo para poder alcanzar mis metas propuestas.

También agradezco a mis hermanas Karen y Danna que siempre han estado a mi lado brindándome todo su apoyo y a quienes me debo el mejorar día a día para poder ser su ejemplo a seguir.

Agradezco a mis amigos y compañeros que me brindo esta etapa de formación y a esas personal especiales que de una u otra manera aportaron con un granito de arena, que nunca me dejaron desfallecer ante las dificultades, que siempre me brindaron su apoyo moral e incondicional y por lo cual le agradezco a la vida por ponerlos en mi camino.

Finalmente, expreso mi gratitud a la Universidad de las Fuerzas Armadas -ESPE a sus docentes por el conocimiento impartido, que en el transcurso del camino se convirtieron en amigos que me brindaron su apoyo y consejo cuando lo necesité, por lo que hoy puedo decir que, a pesar de un largo y duro camino, se ha cumplido con una gran meta dentro de mi vida.

Ronny J. Peñafiel

Contenido

Resumen.....	20
Abstract.....	21
Capítulo I.....	22
Generalidades.....	22
Antecedentes	22
Justificación e Importancia	24
Alcance	27
Objetivos	29
Objetivo General.....	29
Objetivos Específicos	29
Capítulo II.....	31
Fundamentación Teórica	31
Materiales Compuestos	31
Componentes de los materiales compuestos	32
Matriz.....	33

Refuerzo.....	33
Interfaz	34
Materiales compuestos dentro de la Industria Aeronáutica.....	34
Hornos.....	36
Horno Autoclave	36
Sensor.....	38
Sensores de Temperatura	38
Sistemas de Control.....	41
Tipos de Sistemas de Control	42
Controladores Lógicos Programables	43
Estructura Básica de un PLC	44
Estructura Funcional de un PLC.....	44
Lenguajes de programación	46
Aplicaciones	46
Interfaz Humano – Máquina (HMI)	47
Gestión del sistema HMI.....	48

	10
Funciones del HMI	48
Aparatos de Maniobra	49
Contactor.....	49
Relé Electromagnético de Mando	49
Variador de frecuencia.....	50
Luces Piloto.....	50
Capítulo III.....	52
Ingeniería básica.....	52
Introducción.....	52
Planteamiento del problema de diseño	52
Requisitos de funcionamiento	52
Requisitos generales de funcionamiento	53
Requisitos de temperatura.....	53
Requisitos de tiempo de operación	54
Requisitos de modos de operación	54
Diseño Conceptual.....	55

Diagrama de bloques.....	55
Pantalla HMI.....	56
Diseño de tableros de control.....	58
Controlador	61
Diseño del controlador PID.....	62
Sensores de temperatura	73
Luces indicadoras	73
Elemento calefactor	73
Elementos de control del horno.....	73
Selección de elementos.....	75
Diseño de los circuitos de potencia	82
Circuito de protección	85
Capítulo IV	86
Ingeniería de detalle	86
Programación.....	86
Programación PLC.....	86

Análisis y diseño del programa del controlador	87
Programación HMI	95
Arquitectura.....	96
Sistema de Control	96
Sistema de Comunicaciones	108
Sistema de Instrumentación	109
Sistema de Supervisión	112
Capítulo V	124
Pruebas y Resultados.....	124
Generalidades.....	124
Funcionamiento del control PID	124
Comparación con un sensor externo al sistema	125
Funcionamiento del Modo Automático.	128
Funcionamiento del perfil de temperatura 1.....	129
Funcionamiento del perfil de temperatura 2.....	130
Funcionamiento del perfil de temperatura 3.....	132

Funcionamiento Modo Manual.	134
Funcionamiento del Sistema de Supervisión.	135
Capítulo VI	139
Conclusiones y Recomendaciones	139
Conclusiones.....	139
Recomendaciones	140
Referencias	141
ANEXOS	146

Índice de Tablas

TABLA 1 CLASIFICACIÓN AMPLIA DE MATERIALES COMPUESTOS	31
TABLA 2 DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN TEMPRANA	38
TABLA 3 MÉTODOS MÁS COMUNES DE MEDIACIÓN	39
TABLA 4 TIPOS DE TERMORRESISTENCIAS	41
TABLA 5 REQUERIMIENTOS DE TEMPERATURA DEL HORNO.....	53
TABLA 6 REQUERIMIENTOS DE TIEMPO DEL HORNO.....	54
TABLA 7 REQUERIMIENTOS DE MODOS DE OPERACIÓN.....	54

TABLA 8 DATOS TERMOCUPLA TIPO K.....	75
TABLA 9 DATOS SENSOR PT100.....	76
TABLA 10 DATOS SENSOR LM35.....	76
TABLA 11 COMPARACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA.....	76
TABLA 12 PUNTUACIÓN SENSORES DE TEMPERATURA	78
TABLA 13 FUNCIÓN DE LUCES INDICADORAS	81
TABLA 14 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO.....	82
TABLA 15 DESCRIPCIÓN DE TÉRMINOS DE LOS GRAFCETS.....	87
TABLA 16 CARACTERÍSTICAS DEL PLC SIEMENS S7-1200.....	97
TABLA 17 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO SIEMENS 1231.....	97
TABLA 18 CARACTERÍSTICAS FUENTE DE CORRIENTE DIRECTA LOGO.....	98
TABLA 19 CARACTERÍSTICAS DEL VARIADOR DE FRECUENCIA KINCO CV20-2S-0007G.	99
TABLA 20 RELÉ DE ESTADO SÓLIDO.	100
TABLA 21 RELAY ENCAPSULADO DE 24VDC.....	101
TABLA 22 SELECTOR DE 3 POSICIONES SKOS ED33.....	101
TABLA 23 LUZ INDICADORA CAMSCO.	102
TABLA 24 CARACTERÍSTICAS DE BREAKER SCHNEIDER ELECTRIC 3 POLOS 40A.	103

TABLA 25 CARACTERÍSTICAS DEL PORTAFUSIBLES DE 40A.	104
TABLA 26 CARACTERÍSTICAS DISYUNTOR GMC-22.	105
TABLA 27 CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR PT100.	109
TABLA 28 CARACTERÍSTICAS PANTALLA HMI KINCO GL070E.....	113
TABLA 29 DATOS DE SENSORES.....	126

Índice de Figuras

FIGURA 1 EXTERIOR DE HORNO AUTOCLAVE.....	23
FIGURA 2 INTERIOR DEL HORNO AUTOCLAVE	24
FIGURA 3 COMPONENTES DE MATERIALES COMPUESTOS.....	32
FIGURA 4 PIEZAS FABRICADAS CON MATERIALES COMPUESTOS DE UN AVIÓN	35
FIGURA 5 FUNCIONAMIENTO DE UN AUTOCLAVE	37
FIGURA 6 ESTRUCTURA TERMOCUPLA.....	40
FIGURA 7 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE CONTROL	41
FIGURA 8 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL ABIERTO.....	42
FIGURA 9 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE CICLO CERRADO	43
FIGURA 10 ESTRUCTURA FUNCIONAL DE UN PLC	45

FIGURA 11 FUNCIÓN DE INTERFAZ DE LOS SENSORES Y ACTUADORES.....	45
FIGURA 12 CÓDIGO DE COLORES PARA LÁMPARAS Y EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN.....	51
FIGURA 13 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	55
FIGURA 14 NIVELES DE SUPERVISIÓN	56
FIGURA 15 PLANTILLA DE PANTALLA DE NAVEGACIÓN	57
FIGURA 16 DIAGRAMA ARDUINO	62
FIGURA 17 CIRCUITO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA.....	63
FIGURA 18 CÓDIGO DE LA FUNCIÓN IMPLEMENTADA PARA MUESTREO.	63
FIGURA 19 RESPUESTA DE LA PLANTA AL STEP.....	66
FIGURA 20 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CON N POLOS=1, M ZEROS=0.	66
FIGURA 21: SYSTEM IDENTIFICATION.	67
FIGURA 22 AJUSTE PROPORCIONADO POR LA FUNCIÓN IDENT.....	68
FIGURA 23 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	69
FIGURA 24 VENTANA DE LA FUNCIÓN PIDTOOL.....	70
FIGURA 25 PARÁMETROS DE CONTROLADOR PID	71
FIGURA 26 PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID.....	71
FIGURA 27 PARÁMETROS DEFINIDOS DEL CONTROLADOR	72

FIGURA 28 COMPARACIÓN ENTRE SENSORES.....	78
FIGURA 29 RESPUESTA DE LA NIQUELINA.....	80
FIGURA 30 AMPERAJE DE CABLES.....	84
FIGURA 31 PLATAFORMA DE PROGRAMACIÓN TIA PORTAL.....	86
FIGURA 32 OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	88
FIGURA 33 GRAFCET DEL PERFIL DE TEMPERATURA NRO.1	89
FIGURA 34 GRAFCET DEL PERFIL DE TEMPERATURA NRO.2	90
FIGURA 35 GRAFCET DEL PERFIL DE TEMPERATURA NRO.3	92
FIGURA 36 GRAFCET MODO MANUAL	94
FIGURA 37 PLATAFORMA DE PROGRAMACIÓN KINCO DTOOLS	95
FIGURA 38 IMPLEMENTACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA	107
FIGURA 39 DISTRIBUCIÓN TABLERO DE CONTROL.....	107
FIGURA 40 DATOS DEL SENSOR SEGÚN LA TEMPERATURA	110
FIGURA 41 CIRCUITO DE TEMPERATURA.....	111
FIGURA 42 DESCRIPCIÓN DE PANTALLA POR SEGMENTOS.....	113
FIGURA 43 PANTALLA DE INICIO.....	115
FIGURA 44 PANTALLA DE SELECCIÓN.....	116

FIGURA 45 PANTALLA DE MONITOREO	117
FIGURA 46 PANTALLA MODO MANUAL.....	118
FIGURA 47 PANTALLA MODO AUTOMÁTICO.....	119
FIGURA 48 PANTALLA DEL PERFIL DE TEMPERATURA 1	120
FIGURA 49 PANTALLA DEL PERFIL DE TEMPERATURA 2	121
FIGURA 50 PANTALLA DEL PERFIL DE TEMPERATURA 3	121
FIGURA 51 PANTALLA TENDENCIAS	123
FIGURA 52 RESULTADO CONTROL PID.....	125
FIGURA 53 COMPARACIÓN DE DATOS DE SENSORES	127
FIGURA 54 FUNCIONAMIENTO MODO AUTOMÁTICO	128
FIGURA 55 FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 1.....	129
FIGURA 56 RESULTADO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 1	129
FIGURA 57 FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 2.....	130
FIGURA 58 RESULTADO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 2	131
FIGURA 59 FUNCIONAMIENTO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 3.....	132
FIGURA 60 RESULTADO DEL PERFIL DE TEMPERATURA 3	133
FIGURA 61 RESULTADO MODO MANUAL.....	135

FIGURA 62 INDICADOR DE FALLO BAJA TEMPERATURA	136
FIGURA 63 INDICADOR DE FALLO ALTA TEMPERATURA	136
FIGURA 64 INDICADOR DE PARO DE EMERGENCIA	137

Resumen

El presente proyecto de titulación tiene como propósito automatizar un Horno Autoclave para de esta manera satisfacer las necesidades para desarrollar procesos de pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana; aportando y promoviendo el desarrollo de proceso de investigación que tiene la Dirección de Aeronavegabilidad (DIRAER) de la FAE. Se realizó el diseño e implementación de un sistema automatizado para el control de la temperatura al interior del horno autoclave según sean los requisitos del usuario y del tipo de reparación a realizarse dentro de este; el sistema se encuentra diseñado para que trabaje de 19 °C (temperatura ambiente) a 300 °C que es el rango en el que se realiza las reparaciones estructurales del avión Super Tucano. Se consideraron diversos parámetros de diseño, normas técnicas de seguridad industrial, materiales idóneos para este tipo de proyecto; adicional se realizaron pruebas y resultados los cuales reflejaron el adecuado funcionamiento del sistema en cuestión, para un desenvolvimiento correcto del horno autoclave en las pruebas y ensayos de reparaciones estructurales del avión, los cuales vienen a representar un gran aporte a los trabajos realizados por parte la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

Palabras Clave:

- **MATERIALES COMPUESTOS**
- **HORNO AUTOCLAVE**
- **LÓGICA DE PROGRAMACIÓN**

Abstract

The purpose of this degree project is to automate an Autoclave Furnace in order to satisfy the needs to develop testing processes and trials of composite materials used in structural repairs of the A-29B Super Tucano aircraft of the Ecuadorian Air Force; contributing and promoting the development of the research process that has the Airworthiness Directorate (DIRAER) of the FAE. The design and implementation of an automated system for the control of the temperature inside the autoclave oven was carried out according to the user's requirements and the type of repair to be carried out within it; The system is designed to work between 19°C (ambient temperature) and 300°C, which is the range in which structural repairs are carried out on the Super Tucano aircraft. Various design parameters, technical standards for industrial safety, suitable materials for this type of project were considered; In addition, tests and results were carried out which reflected the adequate operation of the system in question, for a correct development of the autoclave oven in the tests and trials of structural repairs of the aircraft, which represent a great contribution to the work carried out by the company. Ecuadorian Air Force.

Keywords:

- **COMPOSITE MATERIALS**
- **AUTOCLAVE OVEN**
- **PROGRAMMING LOGIC**

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

Los materiales compuestos como su nombre lo indica son aquellos que están formados por la combinación de dos o más materiales, estos generan un material compuesto con propiedades únicas que no se encuentran en los materiales simples.

Los materiales compuestos presentan varias ventajas en comparación con varios materiales tradicionales, pueden presentar ligereza, alta resistencia mecánica, resistencia a la oxidación y agentes químicos, menor costo, etc.

La necesidad de una mejora continua en el rendimiento de los materiales es una característica común de muchos esfuerzos de ingeniería moderna, las estructuras de ingeniería avanzada ahora incluyen una amplia gama de tecnologías del desarrollo, análisis, diseño, pruebas, producción y mantenimiento de los materiales.

El campo de aplicación de materiales compuestos que requiere de mayor control, calidad e innovación es el de la aviación, donde los materiales compuestos se encuentran expuestos a rigurosas condiciones de trabajo por lo que sufren deterioro y es necesario su correspondiente mantenimiento y curado del material. La Fuerza Aérea Ecuatoriana FAE por medio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE requiere desarrollar el presente proyecto que busca automatizar un horno autoclave para diferentes pruebas y ensayos de materiales compuestos, esto como respuesta a la

necesidad de reemplazar piezas de sus aviones y disponer del equipo para poder repararlas sin necesidad de pagar a empresas externas por sus servicios.

El horno autoclave se encuentra en funcionamiento formando parte del Proyecto de Investigación FAE-ESPE, la operación se basa en el calentamiento de resistencias térmicas y no posee un adecuado control de temperatura que se requiere para los diferentes tipos de materiales compuestos que se estudia y analiza, en la **Figura 1** se puede observar la parte exterior del horno.

Figura 1

Exterior de Horno Autoclave



Como se puede apreciar en la **Figura 2** el horno cuenta con resistencias térmicas a los costados del horno para la generación térmica, se puede apreciar que cuenta con un agitador de acero inoxidable el cual ayuda a la distribución del calor en el interior. Este

horno cuenta con dimensiones internas de 80cm de largo por 60cm de ancho y 50cm de alto.

Figura 2

Interior del Horno Autoclave



Justificación e Importancia

Conforme la ciencia y los avances tecnológicos se acrecientan, la industria aeronáutica busca disminuir el peso de las aeronaves, utilizando las nuevas tecnologías que se encuentran a su disposición como el desarrollo de nuevos motores, la sustitución de componentes metálicos de la parte estructural por otros con iguales o superiores propiedades, pero con menor peso, estos últimos hechos de materiales compuestos. En la búsqueda de nuevos materiales se crean varias combinaciones diferentes, nuevos métodos de fabricación y sobre todo de reparación.

La Fuerza Aérea Ecuatoriana - FAE dispone actualmente de aeronaves de combate tal es el caso de los aviones A-29B Super Tucano, que están constituidas por un gran número de componentes fabricados con materiales compuestos; destacando que en la actualidad posee una flota de 17 aviones Super Tucano A-29B.

Independientemente del mantenimiento preventivo que se les da a los aviones también se requiere realizar actividades de mantenimiento correctivo o modificativo debido a averías producidas en los componentes estructurales, causadas por objetos extraños que impactan contra la aeronave durante las operaciones de despegue y aterrizaje, de igual forma las aeronaves pueden sufrir daño por impactos de proyectiles en el caso de un combate.

Los aviones Super Tucano han sufrido en promedio dos averías por año dando un total de 34 averías anuales aproximadamente. De manera que el costo anual de las reparaciones en las aeronaves sería de \$400.800,00. (CICTE, 2016) Esto debido a que la FAE actualmente depende del soporte de ingeniería del fabricante, puesto que no se ha profundizado en el estudio de los materiales compuestos para implementar técnicas de fabricación y reparación de éstos.

Para que se pueda implementar un procedimiento estándar de reparación, hace falta realizar el estudio de resistencia de materiales para determinar una óptima combinación de las fibras y resinas, determinar el método de reparación más adecuado en función del costo – beneficio, investigar parámetros técnicos – económicos que permitan decidir hasta cuando es conveniente realizar una reparación o si es mejor reemplazar el componente por uno nuevo. (CICTE, 2016)

La DIRAER en la búsqueda de reparar las averías causadas por el impacto de objetos extraños en la estructura de aviones de combate y de entrenamiento en el País, desarrolla el Proyecto de Investigación “Análisis del Estado Límite de Resistencia de Componentes de Aeronaves de Combate, reparados con Materiales Compuestos” que es ejecutado de forma conjunta entre la Fuerza Aérea Ecuatoriana y la Universidad de las Fuerzas Armadas.

El proyecto de titulación busca que la FAE esté en la capacidad de reparar por sus propios medios y de la forma más óptima posible las aeronaves que sufran averías para no depender de los fabricantes y así garantizar la disponibilidad de las mismas. Por esta razón el proyecto presentado como la Automatización del Horno Autoclave de pruebas y ensayos de materiales compuestos para reparaciones estructurales de los aviones A29B Super Tucano es de suma importancia y parte fundamental del desarrollo del proyecto central.

La Dirección de Aeronavegabilidad de la FAE – DIRAER, requiere implementar procedimientos de reparación estándar para sus aviones A29B Super Tucano, esto a fin de garantizar la confiabilidad, disponibilidad, funcionalidad y la mantenibilidad de las mismas, por lo tanto, es necesario automatizar el Horno de pruebas y ensayos de materiales compuestos para reparaciones del A-29B, con la finalidad de realizar varios experimentos de curado de una forma óptima y automatizada para así determinar los parámetros óptimos de operación que permitan establecer un procedimiento de reparación estándar para los componentes de esta aeronave.

Lo anterior permitirá a la FAE realizar reparaciones por su cuenta sin depender de los Fabricantes, realizar posibles mejoras a los componentes en menor tiempo y

realizar proyectos de investigación que permitan crear varias combinaciones de materiales, resinas y métodos de fabricación.

Alcance

El proyecto tiene como finalidad la automatización del horno autoclave que se encuentra en las instalaciones del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CIAM-CICTE) ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. El horno será acondicionado para realizar tratamientos térmicos de una forma automatizada en el proceso de pruebas y ensayos de materiales compuestos, como parte fundamental del proyecto de investigación “Análisis del Estado Límite de Resistencia de Componentes de Aeronaves de Combate, reparados con Materiales Compuestos”, de la Fuerza Aérea Ecuatoriana - FAE de desarrollo conjunto con la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

La automatización del horno autoclave consiste en el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y control de temperatura, que permita manejar tiempos de permanencia a temperaturas deseadas y el control de rampas de temperaturas programadas, características del calentamiento y enfriamiento del proceso de curado.

Para el desarrollo del proyecto, inicialmente se analizarán las características funcionales del horno, se diagnosticará el estado de cada uno de sus componentes y se verificará la funcionalidad al instrumento de medición de temperatura que es un sensor PT100 con alcance teórico de medición de 650°C.

Para determinar el comportamiento en el interior se realizarán pruebas internas donde se utilizará un sistema de instrumentación, con el objetivo de conocer el comportamiento térmico en el interior del horno.

Se determinará el modelo matemático del sistema, para estar en la capacidad de diseñar y simular algunas de las diferentes técnicas de control, tanto clásicas como modernas; las mismas que serán analizadas y comparadas entre sí con la ayuda de un software matemático, escogiendo la técnica de control con mejor desempeño en el control de las variables y la que mejor se adapte a las condiciones de trabajo en el proceso de pruebas y ensayos de materiales compuestos.

Para el adecuado control del sistema se utilizará un controlador lógico programable (PLC), el cual se lo programará para su correspondiente funcionamiento, además el PLC trabajará en conjunto con una HMI (Human Machine Interface) la cual facilitará la operación del horno y brindará facilidades al operador; en la HMI se podrá visualizar las gráficas de las variables a controlar, así como también las diferentes alarmas de eventos que representen un fallo en el sistema, para que el operador realice la acción adecuada frente a dichas alarmas.

Para verificar el funcionamiento del Horno de pruebas y ensayos de materiales compuestos, se realizarán ensayos de tracción con probetas que hayan sido tratadas en el horno. Los diferentes experimentos serán desarrollados en los laboratorios del CICTE. Las diferentes pruebas tendrán un registro y junto con ellos se debe desarrollar un análisis de resultados.

Finalmente se entregará un documento que contenga toda la información pertinente sobre el uso del Horno Autoclave para el proceso de pruebas y ensayos de materiales compuestos.

Objetivos

Objetivo General

Optimizar la operación de un horno autoclave mediante la integración de un sistema de control automático que se ajuste a las necesidades de los procesos experimentales de pruebas y ensayos de materiales compuestos que serán utilizados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano.

Objetivos Específicos

- Sistematizar el proceso de pruebas y ensayos de materiales compuestos en un horno autoclave, incorporando un adecuado sistema automatizado de control para las variables de temperatura, tiempo y presión.
- Incrementar la fiabilidad de los resultados obtenidos en las pruebas y ensayos mejorando el desempeño del sistema de control automático del horno.
- Optimizar los tiempos de operación del horno autoclave para los diversos procesos de pruebas y ensayos.
- Facilitar la operación del horno mediante una HMI (Human - Machine Interface) que permita la adecuada maniobra del horno mostrando datos en tiempo real y gráficas de las variables de control.
- Supervisar parámetros de operación del horno autoclave mediante una pantalla HMI que muestre los diferentes estados de las variables de control.

- Garantizar medidas de seguridad por medio de alertas presentes en la interface HMI, para la toma de acciones inmediatas ante una deficiencia del sistema.
- Facilitar la operación y mantenimiento del Horno mediante la generación de los respectivos manuales.

Capítulo II

Fundamentación Teórica

Materiales Compuestos

Los materiales compuestos están definidos por la combinación de dos o más componentes que se encuentran dotados de magnificas propiedades dadas por su naturaleza y por lo cual se obtienen magnificas propiedades, las cuales se aprecian de manera microscópica (Hull, 1987).

Los materiales compuestos nacen de la fusión de propiedades naturales de materiales con la finalidad de obtener mejores resultados a las características del nuevo material fusionado, por lo cual es una herramienta demasiado útil para la ingeniería ya que lo que se quiere obtener es materiales más óptimos y con mejores cualidades.

Tabla 1

Clasificación amplia de Materiales Compuestos

Clasificación	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	Madera Hueso Bambú Músculo y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálicas: p.ej. Aceros Termoplásticos endurecidos: p.ej. Poliestireno de impacto, ABS. Hojas para moldeo continuo (SMC)

	Termoplásticos reforzados
Microcomposites	Acero galvanizado
(Productos ingenieriles)	Vigas de hormigón armado
	Palas de helicóptero
	Esquíis

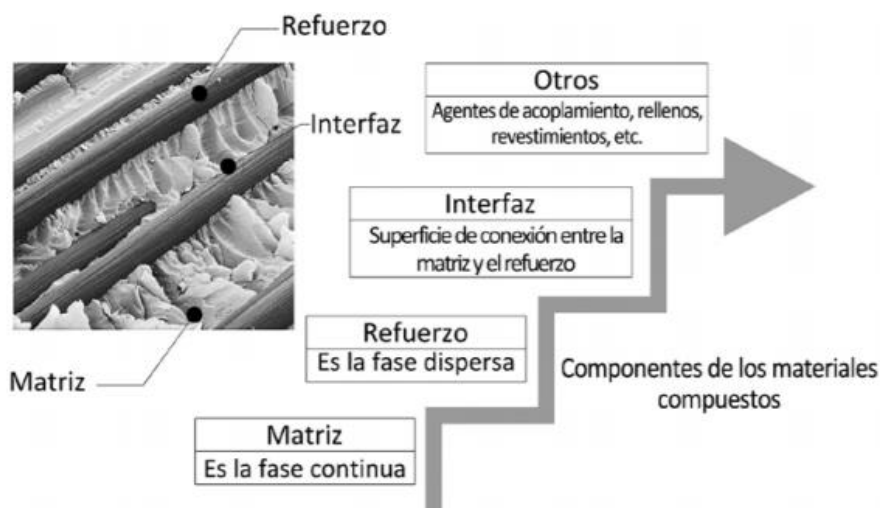
Nota: Obtenido de (Hull, 1987).

Componentes de los materiales compuestos

Los materiales compuestos se encuentran estructurados por un conjunto de elementos los cuales buscan concebir mejores características o mejores propiedades de un material en cuestión y que tales características se magnifiquen en virtud de disminuir falencias de los materiales.

Figura 3

Componentes de materiales compuestos.



Nota: Obtenido de (Guerrero, 2011).

Matriz

Es la encargada de contener a los componentes de refuerzo proporcionando continuidad y consistencia la material, es decir la fase continua del material compuesto, es la encargada de que los refuerzos se junten, transferencia de cargas hacia los refuerzos, administra soporte lateral ante flexión presentada administrando cargas de compresión, ante efectos del medio ambiente suministrar protección a la superficie de los refuerzos (Guerrero, 2011).

Tipos de Matrices

- Matriz metálica
- Matriz cerámica
- Matriz polimérica

Refuerzo

Se la considera la fase discontinua de los materiales, es el encargado de suministrar alguna propiedad que la matriz no posee para de esta manera incrementar las características y propiedades de los materiales. Tiene forma de fibras o ya sea partículas, las cuales entre más pequeñas sean producen un acoplamiento más efectivo y una distribución homogénea dentro de la matriz. Entre las fibras más comunes encontramos el carbono, vidrio, y aramida ya que tienen como característica principal alta resistencia a la tracción extremadamente fuerte (Stupenengo, 2011).

Tipos de refuerzos

- Fibra de vidrio
- Fibra de carbono
- Fibras orgánicas
- Fibras naturales

Interfaz

Es la región de contacto entre la matriz y el refuerzo y la responsable de garantizar la cohesión de todos los elementos del material. La interfaz se considera como buena cuando la unión entre la matriz y el refuerzo es altamente fuerte.

Al momento de conseguir una excelente unión entre la matriz y el refuerzo por parte de la interfaz se obtendrán mejores propiedades de los materiales compuestos y así la carga administrada al material se transmitirá a los refuerzos desde la matriz; en caso de formarse una buena unión, es decir un deficiente trabajo de la interfaz el refuerzo no cumplirá con su objetivo y saldrá de la matriz, provocando fallas en el material compuesto (Guerrero, 2011).

Materiales compuestos dentro de la Industria Aeronáutica

El uso de utilizar materiales compuestos en el campo de la aviación ha representado un gran crecimiento ya que se los puede utilizar para la creación y reparación de sus estructuras. Gracias a las grandes características que presentan los materiales compuestos como son flexibilidad y ligereza son idóneos para la fabricación

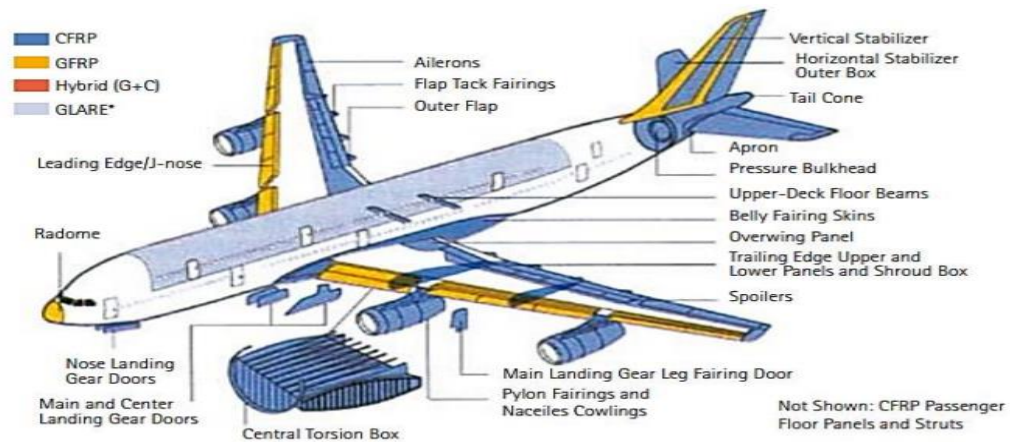
de piezas primarias y en especial en la reparación de estructuras de los aviones (Ortiz & Mácias, 2021).

Los materiales compuestos se han vuelto esenciales en la fabricación y reparación de partes aeronáuticas como vigas ventrales, canopy, superficie de alas, entre otros. Todos estos elementos se los utiliza con subestructuras metálicas para una mejor durabilidad y se unen con sujetadores metálicos para de esta manera obtener una mayor fijación de los componentes (Donoso & Rodriguez, 2005).

El proceso de fabricación y reparación de materiales compuestos sigue un proceso rotundamente distinto a comparación de otros materiales, principalmente por las características que presentan como son la rigidez y ligereza. Dentro de la industria aeronáutica el beneficio que presenta es que los materiales compuestos permiten trenzar diferentes fibras en su interior, lo cual esto produce la conformación de una matriz que distribuya de manera uniforme la tensión, adicional a esto se pueden seleccionar el tipo de matriz y de fibras para poder dotar de las propiedades mecánicas, eléctricas o químicas que se requiera para cada una de las piezas (Bey, 2006).

Figura 4

Piezas fabricadas con materiales compuestos de un avión



Nota: Obtenido de (Plataforma Aeroespacial Española, 2010).

Hornos

Ampliamente utilizado en procesos industriales, mineros, de laboratorio y de fabricación en general, tanto industriales como de pequeña escala, universalmente utilizado para perfeccionar la producción de productos y aumentar los bienes de consumo, materias primas y materiales de procesamiento. La evolución de la tecnología de nuestros equipos se traduce en alta productividad, alta eficiencia y muy bajos costos operativos a través de diseños que brindan procesos confiables en el corto plazo (Ohmmica, 2016).

Horno Autoclave

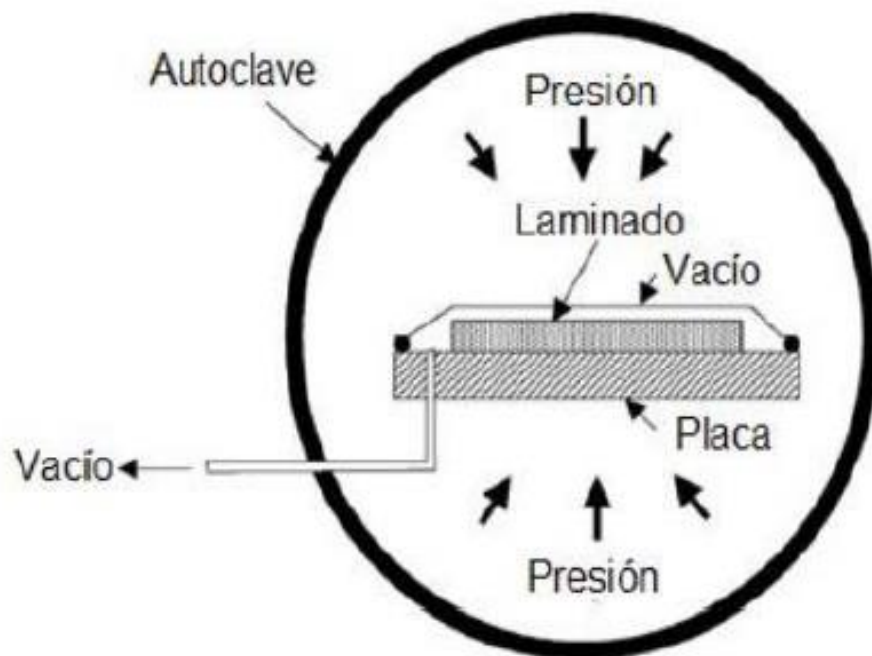
Es un horno de convección presurizado que toma el nombre de autoclave, este tipo de hornos posee grandes características, las cuales representan una herramienta crucial y que requiere mucho tiempo en este proceso de curado de los materiales

compuestos, ya que estos materiales presentan grandes aplicaciones debido a su alta resistencia, tolerancia al calor y peso mínimo (Hennessy & Hinkle, 1992).

Se trata de depósito el cual permite la generación de calor constante al interior de él. Al igual que el proceso de infusión es como se lleva a cabo el proceso de moldeo, con la única diferencia que en el autoclave el laminado se encuentra bajo una presión adicional, la cual cumple la función de curar la resina mientras al material se le aplica calor (Campbell & Flake, 2011).

Figura 5

Funcionamiento de un Autoclave



Nota: Obtenido de (Campbell & Flake, 2011).

Sensor

El sensor es un instrumento el cual acoge un estímulo o señal de cierta magnitud física, las características y propiedades que presentan los elementos al suministrarles una excitación son los que sirven a los sensores para que estos puedan generar otras señales. Un término que podemos asociar a la definición de sensor es la de un transductor ya que este percibe de una o varias formas de información en magnitudes físicas y transformándolas en otra clase de señal o información de salida (Carballo Sierra & Diego, 2011).

Sensores de Temperatura

Existen varias maneras de realizar mediciones de temperatura con una amplia variedad de sensores de naturaleza diversa.

Los sensores de temperatura son los responsables de controlar los cambios de temperatura dentro de un proceso en la industria. Por lo cual en la **Tabla 1** **Tabla 2** se puede apreciar los diversos dispositivos que se tiene (Bausa, y otros, 2003).

Tabla 2

Dispositivos de Medición Temprana

Dispositivos de medición de temperatura			
Eléctricos	Mecánicos	Radiación	Varios
		Térmica	
Termocuplas	Sistemas de	Pirómetros	Indicadores de color
Termorresistencias	dilatación	de radiación	- Lápices
Termistores			

Diodos	Termómetros	- Total	- Pinturas
Sensores de silicio con efecto resistivo	de vidrio con líquidos	(banda ancha)	Sondas neumáticas
	Termómetros bimetálicos	-Óptico	Sensores ultrasónicos
		-Pasabanda	Indicadores pirométricos
		- Relación	Termómetros acústicos
	Termómetros infrarrojos		Cristales Líquidos
			Sensores Fluidicos
			Indicadores de luminiscencia (Termografía)

Nota: Obtenido de (Bausa, y otros, 2003).

En la industria existen una amplia gama de sensores de temperatura pero en la **Tabla 3** se muestran los sensores que son comúnmente utilizados dentro de circuitos eléctricos y que intercambian información con los microcontroladores.

Tabla 3

Métodos más comunes de mediación

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

Nota: Obtenido de (Bausa, y otros, 2003).

Termocuplas

Son sensores electrónicos de temperatura con una gran aceptación dentro de la industria para utilización dentro de procesos. Están compuestas por dos alambres los cuales son de diferente material cada uno y en su extremo se unen, y ante la presencia de temperatura genera voltaje demasiado pequeño en la unión de sus extremidades. A continuación en la **Figura 6** se puede observar la forma esquemática que posee una termocupla (Bausa, y otros, 2003).

Figura 6

Estructura termocupla



Nota: Obtenido de (Bausa, y otros, 2003).

Termorresistencias

La forma de trabajo que presentan las termorresistencias es que a medida que la temperatura cambia, la resistencia que este elemento presenta a su salida varía por lo cual su magnitud se modifica con la variación de temperatura.

Los elementos RTD usados con mayor frecuencia dentro del campo industrial son los constituidos con una resistencia de platino (Pt), ya que es un material muy exacto y estable, pero en la **Tabla 4** se puede observar los diferentes materiales con los que pueden estar constituidos las termorresistencias y sus valores en rangos de temperatura (Bausa, y otros, 2003).

Tabla 4

Tipos de Termorresistencias

Material	Rango de temperatura (°C)	Variación coef (%/°C a 25°C)
Platino	-200 a+ 850	0.39
Níquel	-80 a +320	0.67
Cobre	-200 a +260	0.38
Níquel - acero	-200 a +260	0.46

Nota: Obtenido de (Bausa, y otros, 2003).

Sistemas de Control

Mediante un diagrama de bloques se puede expresar el concepto básico de un sistema de control, donde su propósito es controlar la variable una forma determinada por la señal de acción por medio de todos los elementos del sistema de control (Kuo, 2009).

Figura 7

Componentes básicos de un sistema de control



Nota: Obtenido de (Kuo, 2009).

En términos generales la señal de entrada es la señal de actuación y la salida del sistema viene a ser la variable controlada. (Pacheco , 2019).

Tipos de Sistemas de Control

Por la manera del procedimiento lógico aplicado por parte del controlador se puede expresar una clasificación para los sistemas de control para de esta forma poder manipular de mejor manera la estabilidad del proceso (Pacheco , 2019).

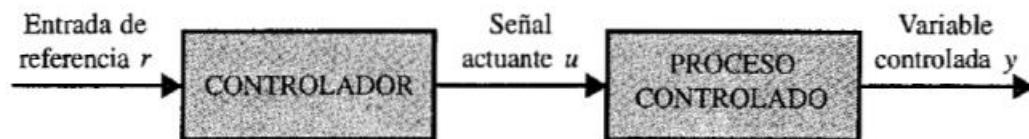
A continuación se muestran diversos tipos de sistemas de control:

Sistemas de ciclo abierto

Un sistema más simple y económico es el conocido sistema de bucle abierto ya que no posee estructura de retroalimentación, es decir la variable manipulada no influye con la variable controlada. En la **Figura 8** se puede observar el diagrama de bloques que representa este sistema, donde se puede considerar una señal comando r se la aplica al controlador, y como resultado es la señal de actuación u . Se espera que la variable controlada alcance el valor deseado al momento de la activación de la señal de actuación. Este tipo de sistemas escasean de versatilidad y precisión por ende solo se las utiliza en las aplicaciones simples. (Kuo, 2009).

Figura 8

Elementos de un Sistema de Control Abierto



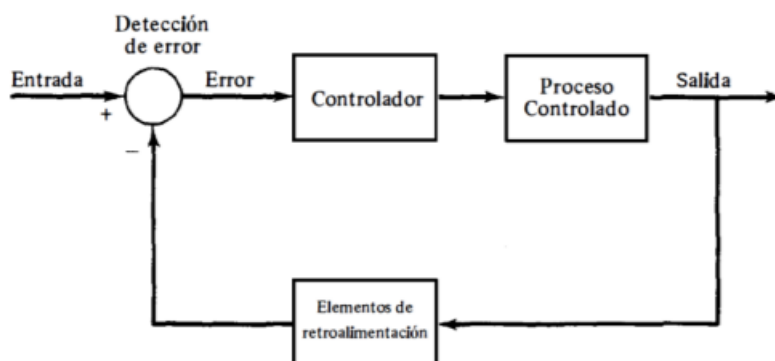
Nota: Obtenido de (Kuo, 2009).

Sistemas de ciclo cerrado

Un sistema de circuito cerrado es aquel que posee una o más enlaces de realimentación, donde los enlaces se refieren a que la señal controlada debe ser contrastada y retroalimentada utilizando la entrada de referencia, y debe enviarse por medio del sistema una señal de acondicionamiento proporcional a la diferencia salida y entrada para corregir errores. En la **Figura 9** se puede apreciar el diagrama de bloques con los elementos básicos que posee un sistema de control de ciclo cerrado, pero ya en forma general configurar un sistema de control de realimentación no se debe limitar solo al mostrado por que al existir una gran afluencia de lazos de retroalimentación y bloques de elementos si se habla de sistemas complejos. (Kuo, 2009).

Figura 9

Elementos de un Sistema de Control de Ciclo Cerrado



Nota: Obtenido de (Kuo, 2009).

Controladores Lógicos Programables

Desde los principios de la automatización, el hombre ha intentado encontrar sistemas confiables, flexibles y eficientes, y con el paso del tiempo esto se ha venido cumpliendo (IEC-61131, 2003).

El PLC fue diseñado para medios industriales y el cual es un sistema operativo electrónico digital. Posee varias funciones como son: secuencias, timers, funciones lógicas, contadores entre otras, además para almacenamiento interno está dotado de una memoria programable. Es capaz de controlar diversos procesos y maquinas por medio de sus entradas y salidas digitales y /o analógicas (IEC-61131, 2003).

Estructura Básica de un PLC

Un controlador lógico programable está estructurado por un conjunto de circuitos o tarjetas impresas, en las cuales se encuentran componentes electrónicos indispensables, el hardware de un PLC tiene la estructura similar a la de una microcomputadora, por lo tanto, está conformado por lo siguiente:

- Fuente de alimentación
- Unidad de procesamiento central (CPU)
- Módulos de memorias
- Unidad de programación (Villarreal, 2007).

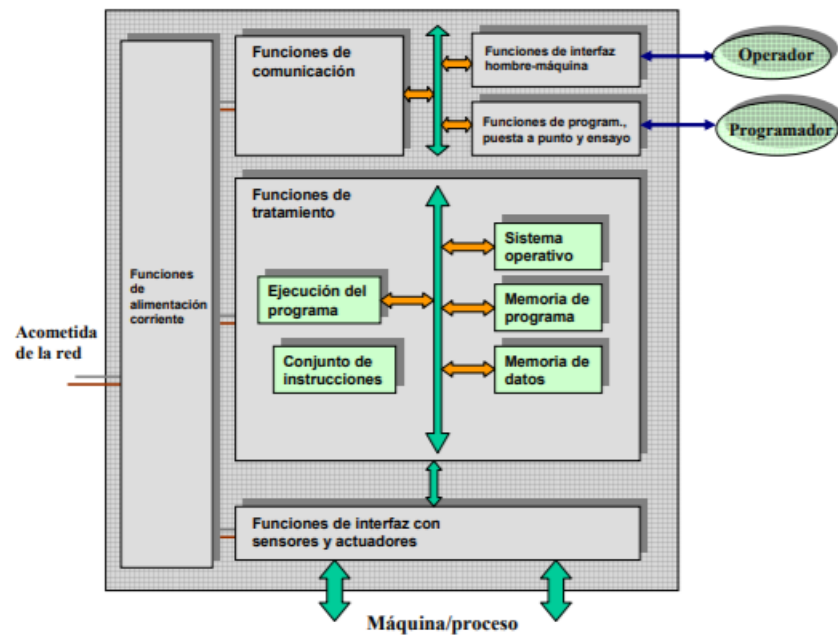
Estructura Funcional de un PLC

- Función de tratamiento de la señal.
- Función de interfaz con los sensores y actuadores.
- Función de comunicación.
- Función de interfaz hombre-máquina.

- Funciones de programación, puesta a punto, ensayo y documentación.
- Funciones de alimentación de corriente (IEC-61131, 2003).

Figura 10

Estructura Funcional de un PLC

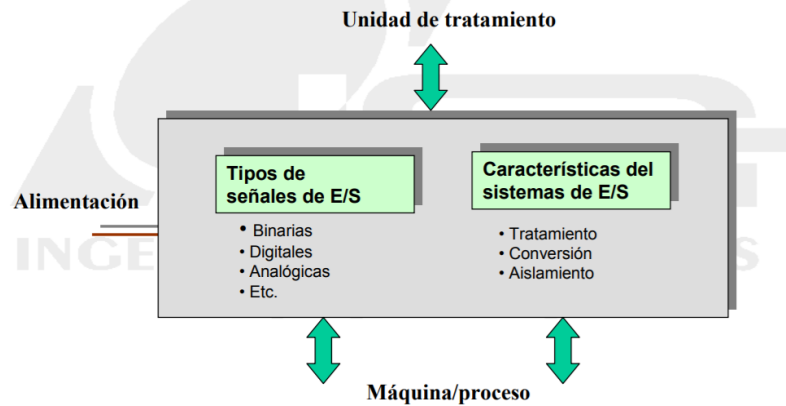


Nota: Obtenido de (Mateos, 2006).

En la **Figura 11** se puede observar cómo se encuentra constituida la interfaz del PLC con los sensores y actuadores para realizar un proceso.

Figura 11

Función de Interfaz de los sensores y actuadores



Nota: Obtenido de (Mateos, 2006).

Lenguajes de programación

- Lista de instrucciones (IL)
- Texto estructurado (ST)
- Diagrama de bloques funcionales (FBD)
- Diagrama de contactos (LD) (IEC-61131, 2003).

Aplicaciones

En la actualidad es común encontrar el uso de PLC's en la industria de la automatización y control ya que por sus características abarcan un extenso campo de diseño, y a menudo que la tecnología va avanzando con el paso del tiempo es por tal motivo que se ha convertido en un instrumento de gran ayuda para las necesidades que exige la industria.

Su aplicación se encuentra enfocado al control de procesos de secuencia, maniobra, precisión y señalización ayudado de elementos de potencia que ejecutan sus órdenes, es por todo esto que el PLC abarca toda clase de procesos industriales.

En un principio el PLC fue diseñado como elemento sustituto para el control industrial, pero al pasar del tiempo se ha convertido en un elemento de control principal para las diferentes necesidades del mundo industrial con una gran diversidad de aplicaciones que satisfacen toda clase de necesidades del usuario.

La industria presenta varias exigencias al momento de realizar una automatización es por lo cual en la actualidad los PLCs se manejan de manera modular lo cual facilita el mejor trabajo de estos y logra una expansión en sus funciones (Vallejo, 2006).

Interfaz Humano – Máquina (HMI)

La HMI es la recopilación de hardware y software que se maneja para monitorear e interactuar con el sistema de control y, en instancia final, con el proceso.

Las HMI son diseñadas con diferentes criterios y manipulados por personal de ingeniería u operadores, que muchas veces no se encuentran muy familiarizados con la operación en planta. Esto produce que los operadores combatan contra un gran número de pantallas con cantidades inmensas de información (tendencias, variables digitales analógicas de E/S, alarmas, gráficos, cálculos, históricos, etc), provocando una errada operación, un sistema de control insuficientemente confiable y respuesta tardía para cuando se exteriorizan condiciones anormales en el proceso (ANSI/ISA-101.01, 2015).

Gestión del sistema HMI

Las etapas primordiales del ciclo de vida de la HMI son: el diseño, la revisión, la implementación y la operación. El ciclo de vida tiene dos puntos de entrada: el primero, para un nuevo sistema con cambios mayores en un sistema existente que puede incluir la migración desde una plataforma HMI heredada y el segundo, la creación o cambios de desplegados. Se incluye también, dos pasos de mejora continua: el primero, un ciclo entre el diseño y los estándares del sistema y el segundo, entre la operación y el diseño, reconociendo las mejoras al sistema específico en operación (ANSI/ISA-101.01, 2015).

Funciones del HMI

- Permite ejecutar cambios en los procesos.
- Cumplen funciones de almacenamiento y muestreo de datos, para optimizar y realizar correcciones del proceso en función de datos reales.
- Presenta la facilidad de conexión a varios dispositivos, con diferentes tipos de comunicación, para adaptar soluciones a los requerimientos del cliente.
- Se maneja con datos en tiempo real, presentándolos de diversas formas como gráficos, cifras, textos para facilitar la interpretación de los datos por parte del operador.
- Se puede apreciar gráficos de Tendencias Históricas.
- Manifiesta alarmas y avisos, el HMI tiene la capacidad de informar sobre problemas que se pueden suscitar de manera ocasional al momento de realizarse

el proceso de trabajo. De producirse altercados en el proceso, el operador puede encontrar el estado de la máquina y resolver problemas sencillos o ya sean graves (Electric I. , 2015).

Aparatos de Maniobra

Son elementos cuya función es establecer o interrumpir la corriente de uno o más circuitos eléctricos.

Contactador

El contactor es un instrumento electrónico cuyo propósito es cortar el paso de corriente al circuito electrónico, en vez de ser operado en una forma manual, este por lo general trabaja con mandos a distancia, se encuentra conformado por dos partes importantes que son potencia y control, ya que su función está pensada para trabajos para condiciones de carga o no carga; también se encuentra conformado por diversos elementos que vienen a ser circuito magnético, bobina y contactos los cuales pueden ser principales o auxiliares (Rodríguez Fernández, Cerdá Filiu, & Sánchez Horneros, 2014).

Relé Electromagnético de Mando

Es un dispositivo utilizado para operar diversas partes de una instalación o circuito eléctrico, el mismo también es conocido como contactor auxiliar o relé auxiliar. Es importante mencionar que un relé tiene la misma apariencia que un contactor, sin embargo, su principal diferencia es que la capacidad de corriente del contactor es alta,

mientras que la del relé es baja, es por esto que, este dispositivo no tiene contactos principales como en el caso del contactor (Brito Orellana, 2014).

Los relés electromagnéticos de mando son utilizados comúnmente para lo siguiente:

- Extender la capacidad de corriente
- Elevar los números de contactos auxiliares
- Ampliar los niveles de voltaje

Variador de frecuencia

El Variador de frecuencia también es conocido como regulador electrónico de velocidad, el mismo que está compuesto por circuitos que tienen transistores de potencia. Dicho lo anterior, se puede indicar que el principio básico de funcionamiento de este variador es modificar la energía eléctrica de una frecuencia industrial a una frecuencia variable. Además, el variador de frecuencia ofrece procesos de arranque y frenados suaves, por medio de rampas de frenados y aceleración, logrando un aumento de vida del motor. Estos pueden ser operados por un ordenador, señales digitales, PLC o ya sea de forma manual (Blanco, 2015).

Luces Piloto

Las luces piloto son también conocidas como luces de monitor o lámparas piloto, las cuales son utilizadas en diferentes formas, tamaños y voltajes. Estas luces sirven como indicadores para poder saber si las variables de algún proceso están siendo

controladas o en qué etapa se encuentra el mismo, como también para ver si existe algún problema con el sistema, entre otros (Cedeño, 2019).

A continuación, en la **Figura 12** se puede observar algunos códigos que autores han dado a las diferentes luces piloto:

Figura 12

Código de colores para lámparas y ejemplos de utilización.

COLOR	FUNCIÓN	EJEMPLO DE UTILIZACIÓN
ROJO	 Condiciones anormales que precisan de una acción inmediata del operario (Ver nota 1 y 2)	Orden de parar la máquina inmediatamente (p.e., en caso de una sobrecarga). o Indicación de una parada de la máquina provocada por un aparato de protección (p.e. por sobrecarga, por exceso de recorrido, etc.).
AMARILLO (AMBAR)	 Atención o advertencia (Ver nota 1)	Alguna magnitud (corriente, temperatura) se aproxima al valor límite permitido. o Máquina en ciclo automático.
VERDE	 Máquina dispuesta	Máquina dispuesta para funcionar: todas las funciones auxiliares en marcha, unidades en posición de partida y presión hidráulica o tensión de salida de un grupo motor-generator en los límites especificados, etc. Fin del ciclo y máquina lista para volver a ser puesta en marcha.
BLANCO (CLARO)	 Circuito en tensión Condiciones normales	Interruptor principal en posición CERRADO (Ver nota 2). Elección de la velocidad o del sentido de giro. Los órganos auxiliares no relacionados con el ciclo de trabajo están funcionando.
AZUL	 Cualquier significado no previsto por los colores anteriores	Selector en posición "Ajuste". Una unidad adelantada de su posición de partida. Avance lento de un carro o una unidad.

Nota: Obtenido de (García, 2020).

Capítulo III

Ingeniería básica

Introducción

El diseño electrónico y eléctrico al igual que la implementación de un sistema automatizado de un Horno Autoclave destinado al curado de materiales compuestos se guía por medio de un conjunto de pasos, con el objetivo de lograr una automatización más eficaz del horno antes mencionado.

Para este tipo de diseños es necesario todos los conocimientos sobre automatización, control, programación entre otros, gracias a éstos se podrá trabajar de una manera óptima para lograr los resultados planteados.

Planteamiento del problema de diseño

La DIRAER requiere implementar la automatización de un Horno autoclave mediante un controlador lógico programable (PLC) y una pantalla HMI, con el objetivo de realizar la reparación y curado de componentes conformados por materiales compuestos del avión Super Tucano.

Requisitos de funcionamiento

La DIRAER tiene parametrizados los requisitos de funcionamiento, detallados a continuación:

Requisitos generales de funcionamiento

- La temperatura del horno autoclave debe ser controlada de manera automática.
- Por medio de una interfaz HMI se debe supervisar los niveles de temperatura hasta los valores de temperatura requeridos (SET POINTS).
- Se requiere supervisar niveles de temperatura y el incremento de dichos niveles de temperatura con el tiempo.
- Se requiere controlar los tiempos de operación de los niveles de temperatura solicitados.
- Se solicita controlar tres tipos de perfiles de temperatura específicos de temperatura.
- Se requiere implementar dos modos de operación como son: manual y automático.

Requisitos de temperatura

Los requisitos de temperatura necesarios para la operación correcta del horno autoclave son que se detallan a continuación en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Requerimientos de Temperatura del horno

Temperatura horno autoclave DIRAER	
Set point de temperatura	A elección según el perfil de temperatura de control y manualmente ingresado por el operador.

Temperatura mínima	19°C (temperatura ambiente)
Temperatura máxima	200°C
Error permisible de niveles de temperatura	± 3°C

Requisitos de tiempo de operación

Para la operación del horno autoclave se han determinado los requerimientos de tiempo que se detallan en la **Tabla 6**.

Tabla 6

Requerimientos de tiempo del horno

Tiempo horno autoclave DIRAER	
Tiempo de operación	Manualmente ingresado por el operador según el requerimiento.
Tiempo mínimo de funcionamiento	1 minuto
Tiempo máximo de funcionamiento	4 horas

Requisitos de modos de operación

Para un eficaz funcionamiento del horno se han determinado dos modos de operación, los cuales se detallan en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Requerimientos de modos de operación.

Modos de Operación horno autoclave DIRAER	
Modo manual	Los requerimientos de tiempo y temperatura son ingresados por parte del operador.

Modo automático

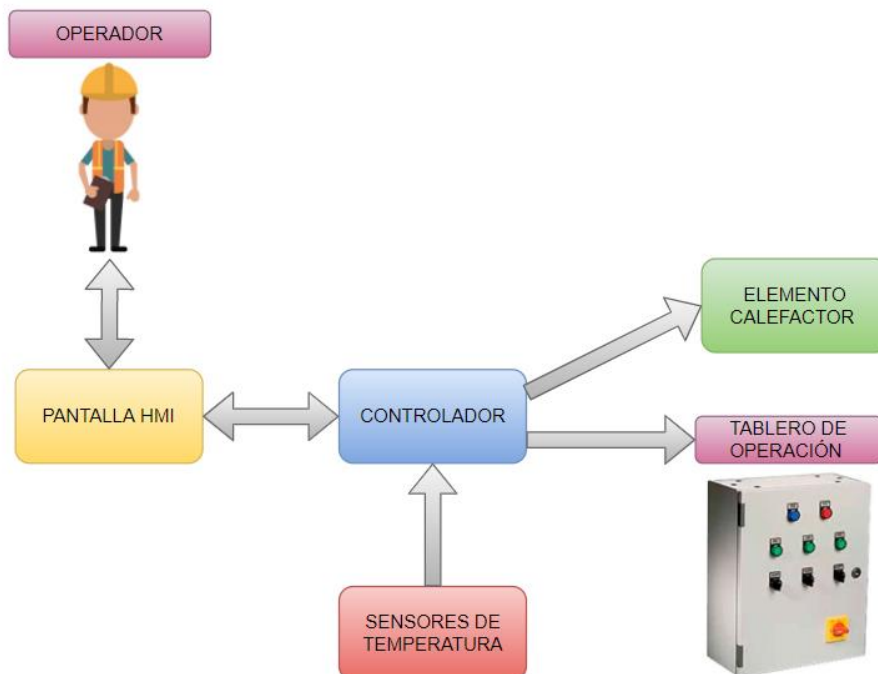
El operador puede escoger entre 3 programas diseñados para actuar según los perfiles de temperatura preestablecidos.

Diseño Conceptual**Diagrama de bloques**

A continuación, en la **Figura 13** se puede observar el diagrama de bloques del sistema propuesto para el control de temperatura del horno autoclave, donde se puede visualizar la relación entre los distintos elementos como son; sensores, pantalla HMI, controlador, operador y demás indicadores.

Figura 13

Diagrama de Bloques



Pantalla HMI

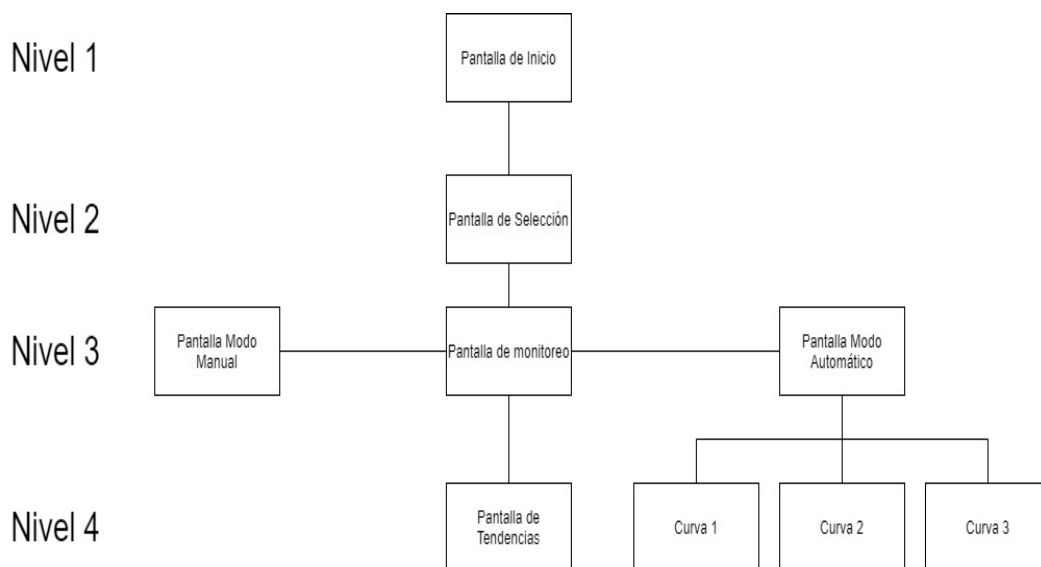
La pantalla HMI facilita la comunicación entre el usuario y la planta de temperatura, ya que por medio de ella se ingresan los datos de temperatura y tiempo requeridos para la operación del horno autoclave, de igual manera permite visualizar el modo de operación, y constantemente muestra el dato real de la temperatura en la que el horno va subiendo sus grados centígrados, adicional da señales visuales de prevención por medio de luces piloto incorporadas en la pantalla.

Arquitectura

Como se muestra en la **Figura 14**, se ha realizado un sistema jerárquico para facilitar la navegación entre las pantallas o paneles del sistema de supervisión, y esta será utilizada en la implementación de los mismo como mecanismo de movilidad entre ellas.

Figura 14

Niveles de Supervisión



Plantilla de la Interfaz

Como se muestra en la **Figura 15**, en este apartado se pretende utilizar el diseño de las pantallas HMI y su distribución alrededor de las mismas, esto con la finalidad de evitar molestias visuales al operador de acuerdo a la norma ISA 101, los elementos serán distribuidos por recuadros para una mayor comprensión de los mismo.

Figura 15

Plantilla de pantalla de navegación



Nota: Esta plantilla será similar para el número de pantallas establecidas en toda la navegación

Diseño Pantallas HMI

Con la finalidad de crear un entorno amigable hacia el usuario, las pantallas del sistema de supervisión se distribuyen de tal manera que se pueda fácilmente maniobrar entre los actuadores y sensores de manera práctica y visual rápidamente y así contar con una mejor respuesta a los procesos requeridos.

Diseño de tableros de control

Para el presente tema de titulación se utilizó las siguientes normas: NEC-SB-IE, NEC-15 e IEC-61439-1, las cuales fueron consideradas ya que para el diseño se debe considerar reglas y condiciones para garantizar el correcto funcionamiento y la protección del tablero de control.

NEC-SB-IE

La Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC), la cual tiene diversas normas e indicaciones para instalaciones eléctricas, existe normas específicas que se refieren específicamente a tablero eléctricos y de control, las cuales se van a mencionar a continuación ya que tienen relación con el presente proyecto de titulación:

- Su ubicación debe estar en paredes de factible acceso para las personas que realicen labores de mantenimiento o reconexión, adicional se debe encontrar en un lugar donde no exista humedad para que no exista daños en los equipos y que se encuentre en un punto cercano a todas las cargas de la instalación.
- Se deben balancear todas las cargas establecidas en la medida de la posibilidad.
- Se debe tener una salida de reserva en el tablero de distribución por cada por cada 5 salidas que se alimenten del mismo.
- Por cada cinco salidas que se alimenten del tablero de distribución se debe dejar por lo menos una salida de reserva.
- En cuanto al tema de sobrecorrientes es necesario tener un elemento de

protección para cada circuito (NEC, 2018).

NEC-15

Las Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC) del año 2013, dentro de su contenido posee ciertas reglas, las cuales comprende un tema sobre tableros eléctricos y de control, a continuación se mencionan las reglas que poseen incidencia dentro del presente proyecto de titulación:

- **Regla 1: Resistencia de materiales y partes:** Las características de ensamblado y construcción de los elementos a ser utilizados deben garantizar que sus capacidades mecánicas, térmicas y eléctricas cumplan con los requerimientos adecuados.
- **Regla 2: Verificación de protección IP:** Todo equipo utilizado dentro de los tableros de control deben poseer una protección IP, la cual es se refiere a los niveles de protección de líquidos y cuerpos solidos del elemento.
- **Regla 4: Eficacia del circuito de protección:** Es de gran importancia el adecuado trabajo del circuito de protección dentro de la seguridad del sistema, por lo cual es necesario realizar pruebas de todos los elementos que intervienen en esta operación por separado, sometiénolos a una corriente baja, alta y muy alta para denotar su comportamiento.
- **Regla 7: Circuitos internos y conexiones:** Hace referencia al cableado utilizado dentro del sistema como es el dimensionamiento de cables, colores del circuito implementado, puesta a tierra de los circuitos y potencia admisible del cableado.

- **Regla 8: Bornes para conductores externos:** Expresa todo el apartado de bornes, los conductores a ser utilizados en los bornes y los tipos de bornes para ser utilizados dentro de las entradas y salidas de los cables que se encuentran al interior del tablero de control.
- **Regla 10: Límites de calentamiento:** Se debe realizar pruebas de verificación de temperatura de los tableros aplicando un condiciones máximas de uso como son: número de dispositivos, corriente de consumo, volumen de la envolvente, esto debe mantenerse en márgenes inferiores a los 30°C para el calentamiento del aire dentro del sistema y para las borneras un calentamiento menor a 70°C.
- **Regla 12: Compatibilidad Electromagnética:** Se debe llevar a cabo pruebas de perturbaciones electromagnéticas cuando el sistema se encuentre en funcionamiento, para que no existan perturbaciones que puedan interferir en el normal desenvolvimiento del sistema (Gobierno Nacional de la República del Ecuador, 2013).

IEC-61439-1

El “International Electrotechnical Commission” (IEC) es el encargado de establecer normas internacionales para todas las tecnologías eléctricas y electrónicas. En la normativa existe una sección referente a tableros de control (IEC61439-1, 2009).

A continuación, se enlista los reglamentos en mención:

- No se debe conectar piezas metálicas a conductores de protección.
- Por algún motivo de desconexión accidental se debe evitar que piezas metálicas

entren en contacto con los conductores.

- Se debe construir el tablero de tal manera que no exista tensiones que se puedan transmitir desde el interior al exterior del mismo sin pasar por las borneras de seguridad.
- Todo conductor y dispositivo utilizado de poseer material aislante en su exterior.
- La cobertura del material aislante no debe poseer daños o rajaduras en toda la extensión del material, para que no exista fuga de tensión al exterior del envolvente.
- El circuito de protección debe mantenerse aislado de cualquier pieza metálica y del chasis metálico del tablero para evitar accidentes.

Controlador

El controlador es el encargado de ejecutar el proceso que realiza el horno autoclave, ya que por medio del mismo se receptan las señales desde el sensor de temperatura, las cuales son analizadas para poder emitir órdenes o indicaciones de salida hacia las resistencias térmicas.

Otra función que cumple el controlador, es de encender las luces piloto que muestran cómo se encuentra trabajando el horno autoclave y da avisos visuales cuando exista alguna anomalía en el proceso que se ejecuta.

Es importante mencionar que por medio del controlador se va a implementar un control PID para la adecuada operación al momento de realizar el curado de materiales compuestos.

Diseño del controlador PID.

Diseño Teórico

Diseño en plataforma de programación Matlab.

Partiendo de los requerimientos del sistema, se optó por conectar las resistencias de temperatura (fuente de calor) de manera directa a una entrada de tipo step, se utiliza un sensor Pt 100, mediante un circuito divisor de tensión el cual se mencionará en el apartado de cálculos preliminares, en el capítulo 5. El mismo que se usa para que se obtenga los valores de temperatura que se albergan en Horno Industrial que posteriormente se registrará por medio de una tarjeta de adquisición de datos (Arduino) para realizar las estimaciones de las funciones de transferencia, en consecuencia, el diagrama arduino y el circuito de implementación se muestra en la **Figura 16** y **Figura 17** respectivamente.

Figura 16

Diagrama Arduino

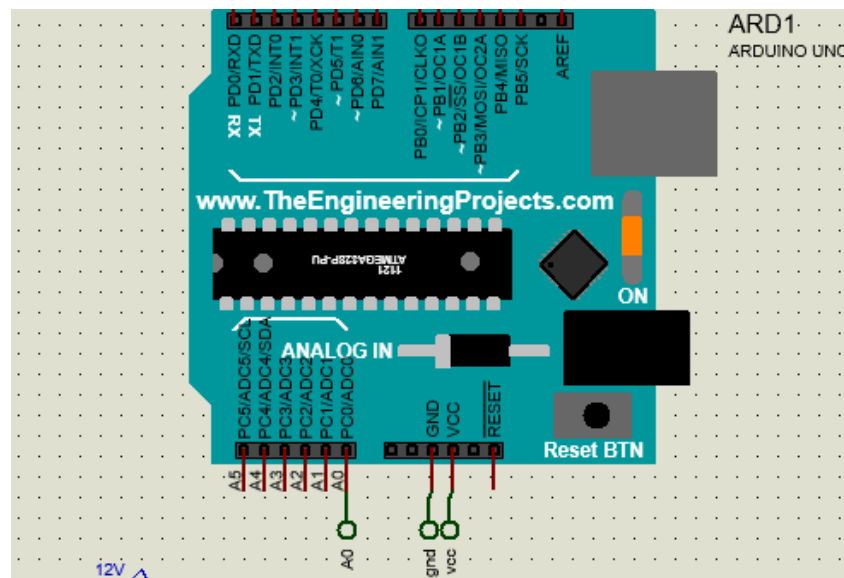
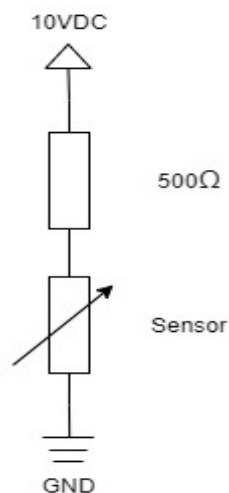


Figura 17

Circuito de implementación de la planta.



Toma y Registro de muestras.

Programa de muestreo en Arduino.

En la **Figura 18** se puede apreciar el código de las interrupciones que se implementó para la toma de muestras:

Figura 18

Código de la función implementada para muestreo.

```
float temperatura,voltaje;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  temperatura = analogRead(A0);
  voltaje = (temperatura*5)/1023;
  temperatura = voltaje*100;
  //Serial.print(voltaje);
  //Serial.print(" ");
  Serial.println(temperatura);
  delay(500);
}
```

Programa de muestreo en Matlab.

Apertura del puerto serie (COM)

```

clear all;

%borrar previos

delete(instrfind({'Port'},{'COM4'}));

%crear objeto serie

s = serial('COM4','BaudRate',9600,'Terminator','CR/LF');

warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');

%abrir puerto

fopen(s);

i=1;

```

Preparar medida

```

n_muestras=900; % tiempo de captura en s
t=zeros(1,n_muestras); % resultado experimental (comprobar)
muestras=[];
fprintf('muestreando...\n')
% preparar la figura
f = figure('Name','Captura');
a = axes('XLim',[0 n_muestras],'YLim',[0 100]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',2);
l2 = line(nan,nan,'Color','b','LineWidth',2);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Temperatura (°C)')
%title('Captura de voltaje en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on
% ejecutar bucle cronometrado
tic
while i<=n_muestras
    t = toc;
    % leer del puerto serie
    muestras=[muestras fscanf(s,'%d')];
    % dibujar en la figura
    x = linspace(0,i/1,i);
    set(l1,'YData',muestras(1:i),'XData',x);
    %set(l2,'YData',v2(1:i),'XData',x);
    drawnow
end

```



```
% seguir
t(i)=toc;
i=i+1;
end
% resultado del cronometro
save('vectorsalida.mat','t','muestras');
%save('vectorentrada.mat','t','v2');
clc;
```

En el código utilizado, primero se declaran los puertos a utilizar para la obtención de datos, luego se procede a inicializar los vectores donde se grafica en tiempo real la obtención de datos recibidos por medio de la tarjeta de adquisición.

Después se procede a grabar en dichos vectores los datos adquiridos del muestreo y se grafica con un comando “while”, que finalmente procede a guardar todo el vector en un documento de Matlab .m para la posteriormente analizar y hacer uso del mismo.

Para el registro de muestras se utilizó una conexión directa de 220 hacia las resistencias de temperatura, de esta manera se obtuvo los distintos vectores para su posterior análisis.

Modelamiento de la Planta.

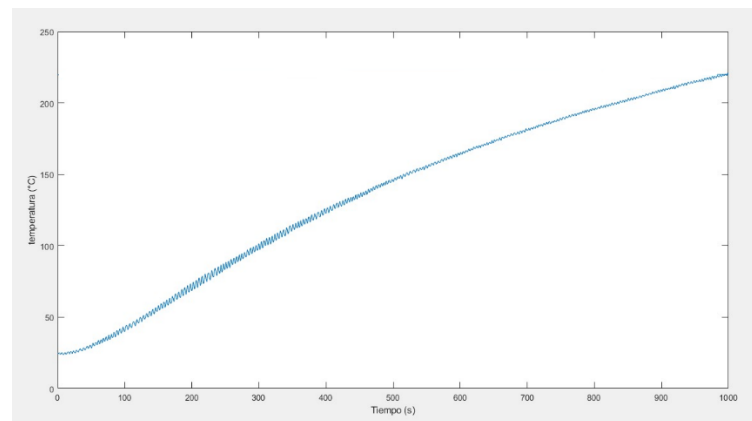
Respuesta de la planta ante una entrada de tipo step.

Una vez que se obtuvo los datos de la planta de temperatura de forma experimental mediante el proceso descrito anteriormente, se procedió a realizar el análisis de los mismos y la identificación del modelo matemático que caracteriza a la planta con la ayuda del Software Matlab y su herramienta **ident** para una entrada de tipo escalón.

En la función **ident** se ingresaron los vectores de datos de temperatura obtenidos previamente, se debe tomar en cuenta que en la frecuencia de muestreo de datos, experimentalmente se ha trabajado con un valor de 1Hz, es decir que en cada intervalo de un segundo se obtiene una muestra.

Figura 19

Respuesta de la planta al step.



En la **Figura 19** se observa los datos de respuesta de la planta dada una entrada escalón de 220 VAC, utilizando la opción Process Models se obtiene el modelo matemático de acuerdo al número de polos y ceros que se añadan a la función de transferencia.

Figura 20

Función de transferencia con $N \text{ polos}=1$, $M \text{ zeros}=0$.

The screenshot shows the 'Process Models' window with the following configuration:

Transfer Function:
$$\frac{K}{(1 + T_{p1} s)}$$

Poles: 1 (dropdown), All real (dropdown)

Options: Zero, Delay, Integrator (all unchecked)

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>	3.2974	Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>	1855.6048	Auto	[0 1817080.0]
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

Disturbance Model: None (dropdown)

Focus: Simulation (dropdown)

Initial condition: Auto (dropdown)

Covariance: Estimate (dropdown)

Buttons: Regularization..., Options..., Continue

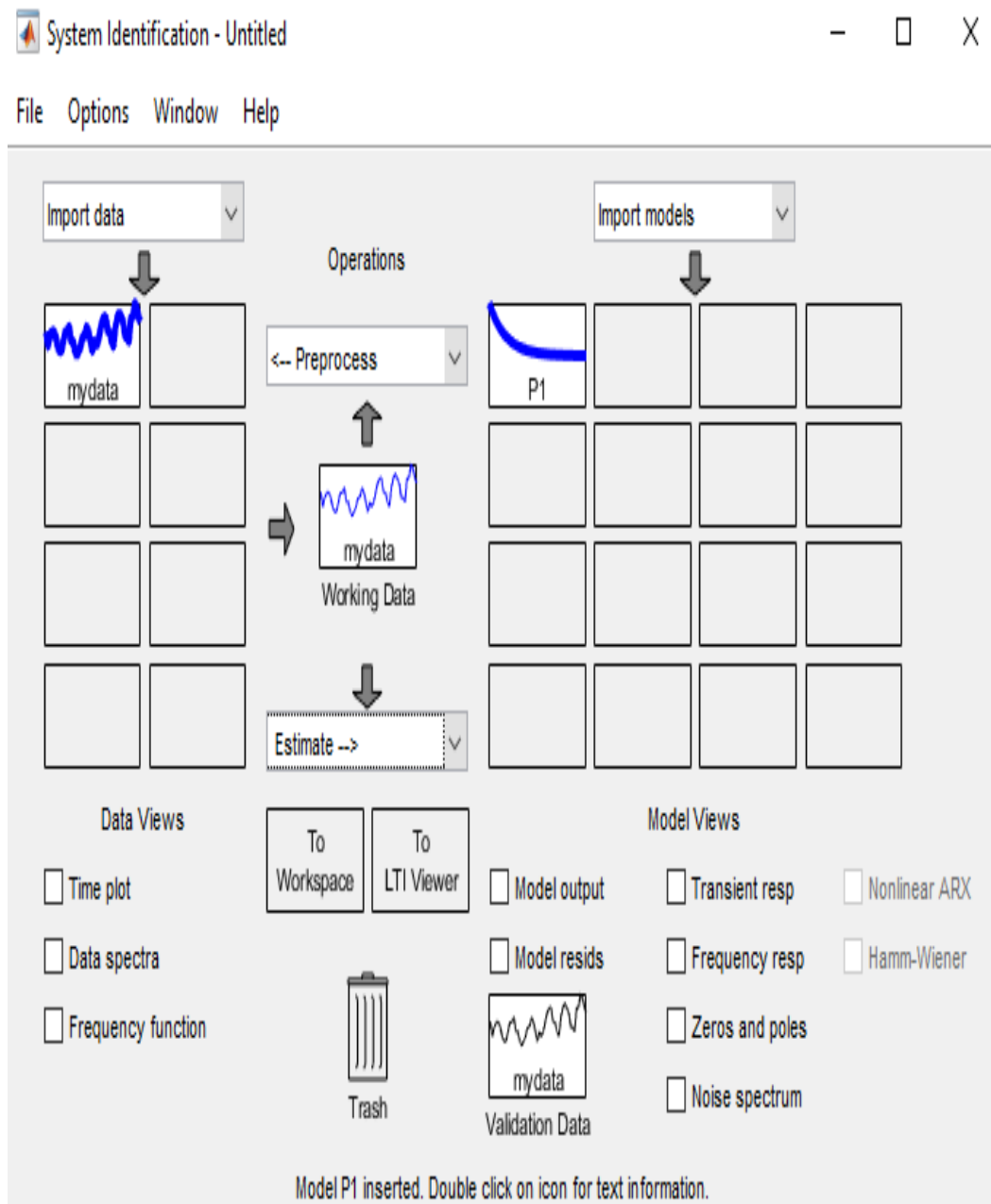
Name: P1

Buttons: Estimate, Close, Help

En la **Figura 20**, se observa el modelo de la función de transferencia con $N^\circ \text{ polos}=1$ y $N^\circ \text{ zeros}=0$, siendo un modelo de primer orden, de tal manera que obtenidos los parámetros se modela la función de transferencia acorde a los pasos explicados con anterioridad de cómo utilizar la función ident.

Figura 21:

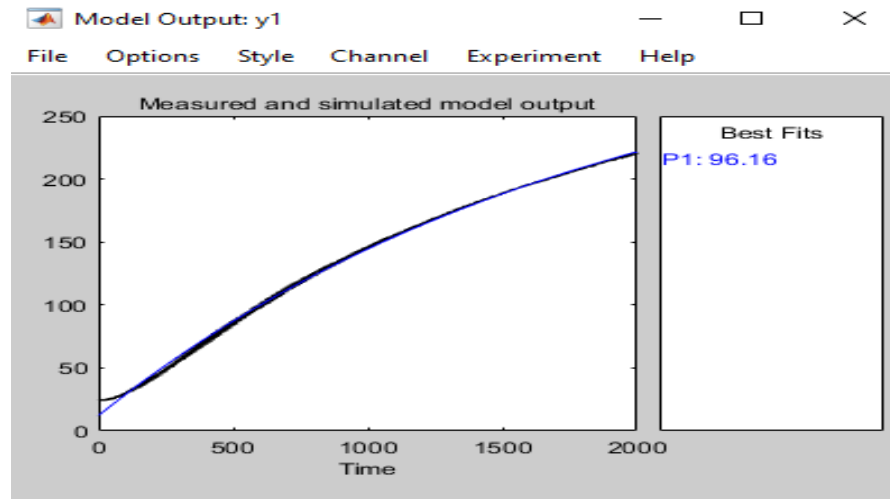
System Identification.



De esta forma se obtiene una Función de Traserencia P1 la cual se muestra en la **Figura 21** y **Figura 22**.

Figura 22

Ajuste proporcionado por la función ident.



Una vez conseguida el perfil de temperatura que más se ajusta al comportamiento de la planta de temperatura utilizada, se procede a exportar dicha función de transferencia para posteriormente ser utilizada.

Figura 23

Función de transferencia

```
Plant1 =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

      Kp = 325.43
      Tp1 = 1815.8
      Tp2 = 21.608

Parameterization:
  'P2'
  Number of free coefficients: 3
  Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data.
Fit to estimation data: 96.96%
FPE: 3.346, MSE: 3.329
```

Como se observa en la **Figura 23**, esta función de transferencia $G(s)$ tiene un grado de estimación del 96,96%, lo cual se apega mucho a la planta principal.

Explicación de la Función PIDTool

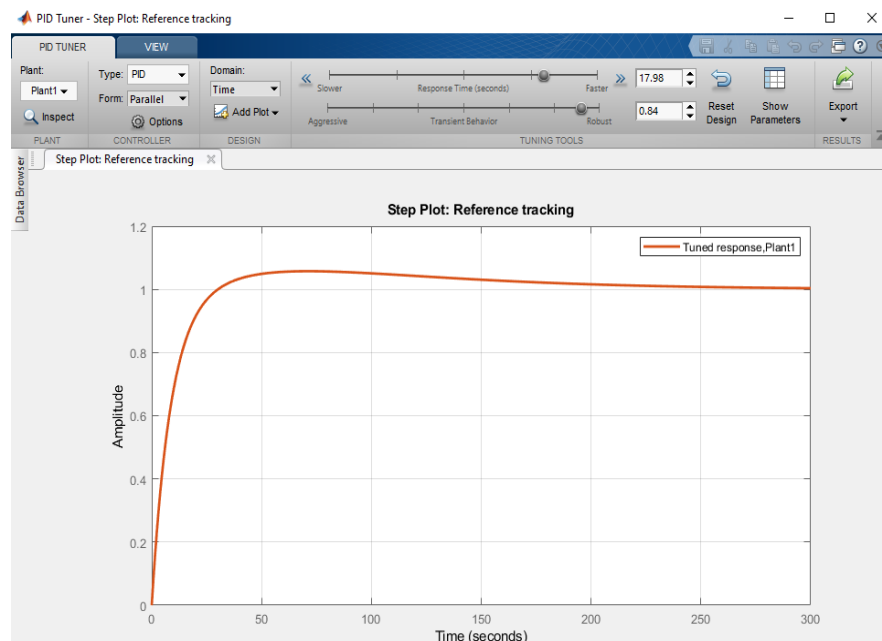
Este comando permite ingresar una función de transferencia $G(s)$ y mediante la misma calcular los valores de K_p , T_i y T_d según el controlador que se requiera. Esta función muestra una ventana de simulación de los posibles valores que estos parámetros pueden tomar según la respuesta al escalón que se desee.

Primero se tiene que ingresar la función de transferencia de la planta $G(s)$ en lazo abierto como se muestra en la **Figura 23**.

Seguido se llama la función pidtool donde se muestra una ventana para variar las respuestas del sistema, y según eso varía los parámetros requeridos para el controlador.

Figura 24

Ventana de la Función pidtool.



Como se puede observar en la **Figura 24**, se ha establecido la respuesta del sistema para que su tiempo de asentamiento se reduzca a 250 segundos

Una vez realizado este procedimiento, se envían los datos al espacio de trabajo de Matlab, obteniendo así los parámetros del controlador PID como se muestra en la

Figura 25.

Figura 25

Parámetros de controlador PID

$$K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * s$$

$$\text{with } K_p = 1.58, K_i = 0.0183, K_d = 33.9$$

Continuous-time PID controller in parallel form.

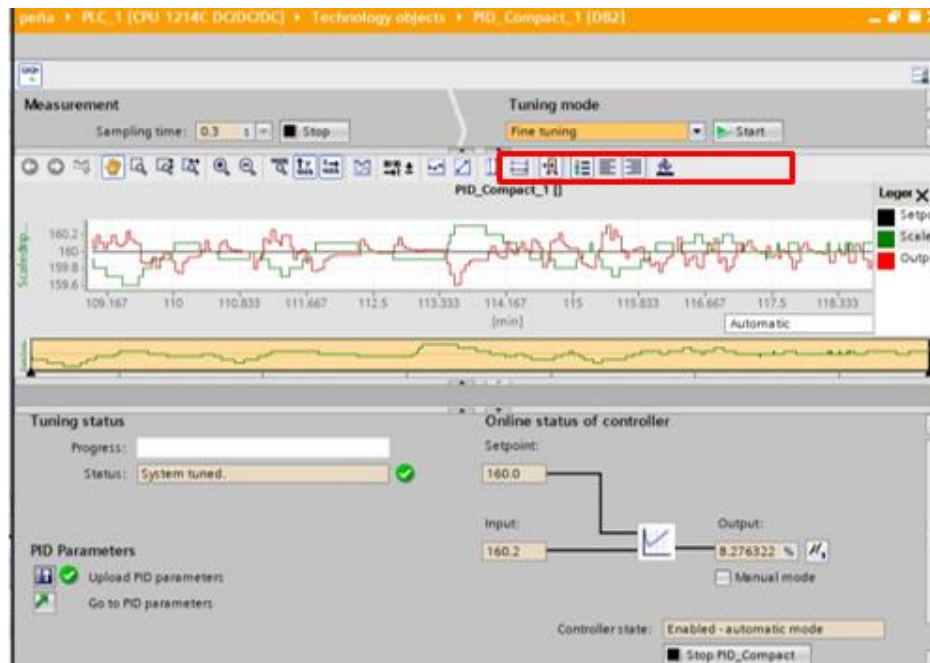
Estos parámetros serán utilizados posteriormente para el control de la planta.

Diseño en plataforma de programación Tia Portal.

Para la implementación del Controlador PID con el Programa Tia Portal y el PLC s7 1200, el mismo tiene un AutoTunner el cual procesa los datos de respuesta de la planta a un estímulo y los almacena, generando así de forma automática la función de transferencia de la planta y posteriormente, los parámetros del controlador PID como se muestra en la **Figura 26**, en el recuadro rojo:

Figura 26

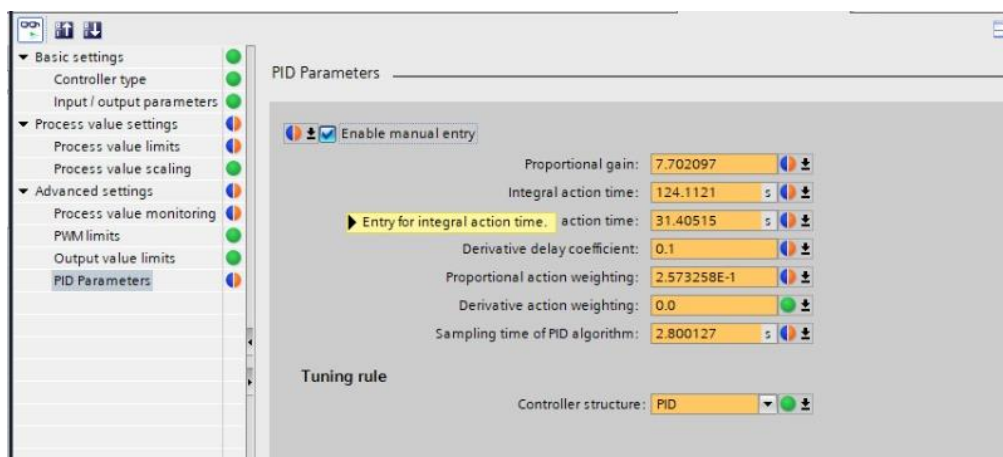
Parámetros del controlador PID



En la **Figura 27**, se muestran los parámetros ya definidos del controlador.

Figura 27

Parámetros definidos del controlador



Tomando en cuenta el rendimiento de los tres tipos de diseño mencionados, se ha decidido utilizar el Auto-tuning de la Plataforma Tia Portal, ya que la misma tenía una mejor respuesta a cada estímulo en el proceso.

Sensores de temperatura

Es el dispositivo encargado de proporcionar la temperatura interna del horno hacia el controlador mediante una señal de voltaje entre el rango de 0 a 10 V DC.

Luces indicadoras

Los indicadores como su nombre lo indica, brindan una señal visual del proceso dependiendo el estado en el que se encuentre.

Elemento calefactor

El elemento calefactor es el encargado de modificar la temperatura interna del horno autoclave dependiendo las señales que le ha proporcionado el controlador.

Elementos de control del horno

Control automático de temperatura

Para realizar la implementación del controlador de temperatura en el horno autoclave, se debe implementar un sistema capaz de manipular un actuador (dispositivo calefactor), leer las variables de control (temperatura), con la finalidad de modificar los parámetros de funcionamiento interno como también supervisar los mismos, para ello se necesita contar con los siguientes elementos:

- Sensor de temperatura.
- Elemento calefactor o termorresistencia.
- Controlador Lógico Programable (PLC)
- Interfaz Humano Máquina
- Conductores y conectores.

Sistema de indicadores y paro de emergencia

La implementación del sistema de indicadores consiste en implementar una serie de luces capaces de mostrar el estado del proceso, de igual manera, para el paro de emergencia es necesario contar con un accionador capaz de detener de manera inmediata el funcionamiento del horno, para ello es necesario contar con los siguientes elementos;

- Luz piloto roja.
- Luz piloto verdes
- Pulsador de paro de emergencia.
- Conductores y conectores

Selección de elementos.

Sensor de temperatura.

Para realizar la selección del sensor de temperatura se debe realizar un análisis de las características que debe cumplir para llevar a cabo el correcto funcionamiento del horno autoclave.

Se puede encontrar una gran variedad de sensores en el mercado, pero se debe tener en consideración las siguientes características:

- El rango de temperatura debe ser de 0 a 200°C
- Soportar ambientes industriales
- Manejar un estándar de señales análogas de 0 – 10 V DC o 4 – 20 mA

Análisis de preselección.

Entre los distintos instrumentos de medición, se tiene los siguientes:

- Termocupla tipo K.
- Pt – 100
- LM 35

Termocupla tipo K.-

Tabla 8

Datos termocupla tipo K

Termocupla tipo K	Características
-------------------	-----------------

Rango de temperatura	de -200 hasta 1250°C
Material del transductor	Acero inoxidable
Tipo de conector	Spade

Pt – 100.-**Tabla 9***Datos sensor PT100*

PT - 100	Características
Rango de temperatura	de -200 hasta 650°C
Material	CrNiMoTi
Señal de respuesta	0 a 10 VDC

LM 35**Tabla 10***Datos sensor LM35*

LM 35	Características
Rango de temperatura	de -55 hasta 150°C
Material	circuito integrado
Señal de respuesta	10mV por cada °C

Una vez observado algunas de las características que presentan los diferentes sensores, a continuación, se puede observar una tabla comparativa de ventajas y desventajas de los mismos.

Tabla 11*Comparación de sensores de temperatura*

	Termocupla tipo K	PT - 100	LM 35
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> * Compacto * Rango de trabajo acorde a lo necesitado * Fácil adquisición en el mercado 	<ul style="list-style-type: none"> * Amplio rango de medida * Alto grado de precisión * Fácil adquisición en el mercado 	<ul style="list-style-type: none"> * Fácil instalación * Bajo costo en el mercado * Compacto

Desventajas	* Es necesario contar con un circuito de acoplamiento	* Salida no lineal	* Rango de temperatura limitado
	* Precio en el mercado	* Necesita de un circuito de acoplamiento	* No soporta ambientes industriales

Criterios de selección

Se debe establecer diferentes criterios para la selección del sensor de temperatura, los cuales se cuantifica en un valor de 100 puntos y el dispositivo que cumpla el puntaje más elevado será el elegido para llevar a la implementación del sistema de control del horno.

- **Montaje:** Previo a la implementación, el montaje es un criterio de alta relevancia a ser evaluada, por ello se debe analizar si el sensor se puede acoplar directamente al sistema o es necesario de acudir a otro tipo de circuito de acoplamiento y la complejidad del mismo, este criterio se ha establecido un puntaje de 20 puntos al sensor que presente menor dificultad a la hora de la implementación.
- **Seguridad:** El sensor debe ser lo suficiente robusto para soportar los horarios de trabajo, debe ser confiable y no producir condiciones inseguras de funcionamiento, como dar lecturas erróneas del sistema, este criterio se pondera con 20 puntos, siendo este cuando el sensor alcance un alto grado de seguridad en cuanto a su respuesta y repetitividad.
- **Mantenimiento:** Este criterio de evaluación hace referencia a las revisiones tanto de mantenimientos futuros ya sean estos de prevención o correctivos, este

criterio se evalúa con un puntaje de 20 puntos, siendo el máximo puntaje cuando el sensor cumpla con estas características.

- **Costo:** El costo es uno de los parámetros más importantes a evaluar, ya que de ello depende el presupuesto del sistema, por ello se considera un puntaje de 20 puntos al sensor que se ajuste a los requisitos previos y que, además, se ajuste al presupuesto del proyecto.
- **Funcionalidad:** El sensor debe satisfacer las necesidades del proyecto en cuanto al desempeño de la tarea de monitorear constantemente la variable de temperatura, debe ajustarse al rango de trabajo previsto, para ello se ha asignado una puntuación de 20 al dispositivo que se ajuste de mejor manera a dicho rango.

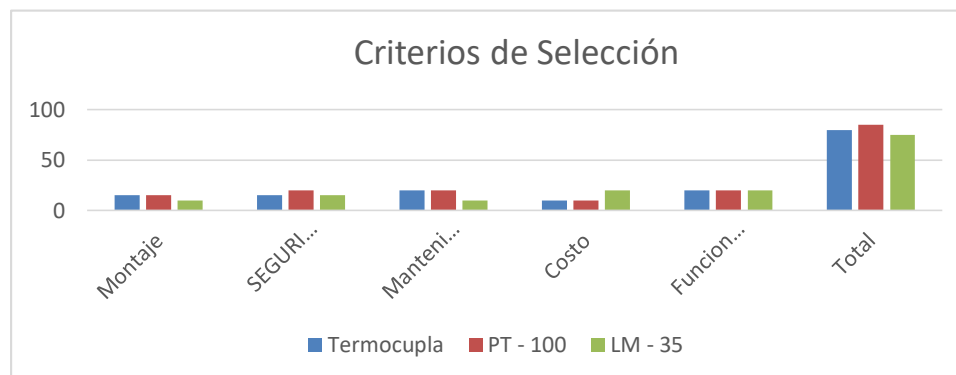
Tabla 12

Puntuación sensores de temperatura

Criterio	Termocupla	PT - 100	LM - 35
Montaje	15	15	10
SEGURIDAD	15	20	15
Mantenimiento	20	20	10
Costo	10	10	20
Funcionalidad	20	20	20
Total	80	85	75

Figura 28

Comparación entre sensores



Luego de haber realizado el análisis respectivo de cada uno de los sensores, acorde a la ponderación que se le ha brindado a cada uno de ellos, queda demostrado que el sensor adecuado para realizar la implementación del sistema en el horno autoclave es el sensor PT – 100.

Controlador o PLC

Dentro del mercado industrial, se puede encontrar diversas alternativas de controladores para ejecutar procesos automáticos, tomando en cuenta los requerimientos de la institución que financia el proyecto, se debe utilizar un PLC S7-1200 ya que es uno de los elementos que dicha institución posee dentro del laboratorio donde se implementará el proceso.

Siemens S7-1200

Este controlador muy conocido dentro del mercado ofrece grandes características que resaltan en cuanto al beneficio del proyecto de titulación, como es la flexibilidad y la capacidad del manejo de gran cantidad de dispositivos de control, como

son: relés, luces indicadoras, etc. Algunas de las características de software que más sobresalen son las herramientas tecnológicas como el PID_TEMP, el cual permite realizar la implementación de un control PID que es sintonizado de manera automática dependiendo las necesidades de control.

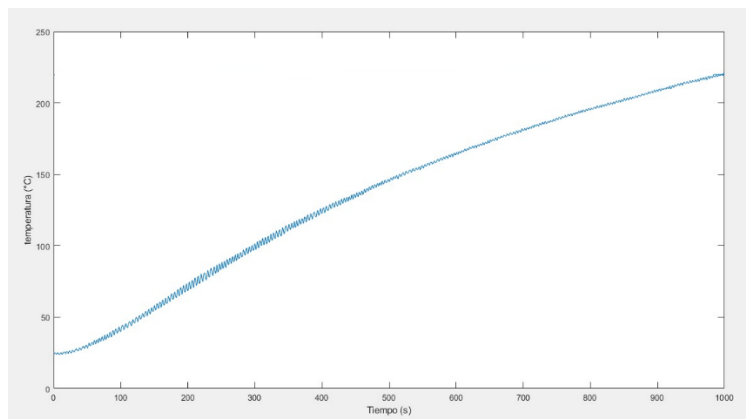
El S7-1200 posee las particularidades adecuadas para realizar el manejo adecuado de los múltiples elementos y variables del proceso de control de temperatura para el horno autoclave.

Elemento calefactor

Este dispositivo es aquel que mediante su estructura con carga eléctrica se utiliza para producir calor en los aparatos eléctricos con la finalidad de generar un control sobre la calefacción, para realizar la implementación del elemento calefactor en el horno autoclave, como parte del proceso es necesario reutilizar el elemento calefactor con el que ya contaba el horno previo al trabajo de titulación, ya que el trabajo de calentamiento lo efectúa de manera correcta, este elemento es una **termorresistencia de 3000W**, a continuación en la **Figura 29** se puede observar la respuesta de temperatura respecto al tiempo de excitación.

Figura 29

Respuesta de la Niquelina



Luces indicadoras

Con el objetivo de presentar los estados del proceso al operador es necesario de la implementación de luces indicadoras, donde por criterio se establece una luz verde la cual indica que el proceso marcha sin presentar problema alguno, de igual manera una luz roja que indicará que el proceso se encuentra detenido o que existe una interferencia dentro del proceso, estas luces indicadoras serán reutilizadas dentro de la implementación del proceso, ya que se ha realizado pruebas de funcionamiento de las mismas y que se verifica su funcionamiento.

Tabla 13

Función de luces indicadoras

Indicadores del proceso	
Luz verde	Proceso en marcha
Luz roja	Proceso detenido
Luz roja intermitente	Paro de emergencia

Paro de emergencia

Este pulsador sirve para detener totalmente el proceso, este elemento se acoplará al sistema existente con la finalidad de que el operador tenga la seguridad dentro del proceso o inclusive para prevenir situaciones de riesgo, con un accionamiento directo hacia el corte de energía de la resistencia térmica, de igual manera este elemento se realizó pruebas de funcionamiento como parte del trabajo para reutilizar dentro del sistema propuesto en el proyecto de titulación.

Diseño de los circuitos de potencia

Para realizar la implementación del sistema eléctrico del horno autoclave es necesario establecer los parámetros de funcionamiento del horno, es decir los valores de voltaje y corriente nominales con las cuales el horno funcionará, para ello se tiene a continuación en la **Tabla 14** los parámetros de funcionamiento.

Tabla 14

Parámetros de funcionamiento del horno

Parámetros de funcionamiento del horno	
Potencia del elemento calefactor	3000W
Voltaje de funcionamiento	220 V AC

Cálculo del consumo de corriente y calibre del conductor

Para realizar la selección del conductor a utilizar por parte de la resistencia térmica, se debe efectuar el cálculo del consumo de corriente de la misma y, además, agregar un factor de seguridad de acuerdo a las normas establecidas por la NEC para instalaciones eléctricas.

$$P = I * V$$

Donde se tiene que:

P: Potencia de la termoresistencia

I: Intensidad de corriente de la termoresistencia

V: Tensión de la termoresistencia

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

$$I = \frac{3000 \text{ W}}{220 \text{ V}}$$

$$I = 13.63 \text{ Amp}$$

Aumentando un factor de seguridad del 15% como lo establece la norma NEC, se tiene:

$$I = 13.63 \text{ Amp} * 115\%$$

$$I = 15.68 \text{ Amp}$$

Una vez que se ha realizado el cálculo del consumo de corriente por parte de la resistencia térmica, se procede a seleccionar el conductor, el cual se ha determinado de acuerdo a la

Figura 30, el conductor AWG calibre #12, ya que este soporta hasta los 20 amperios que es un valor superior de corriente al preestablecido de acuerdo a los cálculos preliminares.

Figura 30

Amperaje de cables

Amperaje que soportan los cables de cobre					
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C	
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT	
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A	18 AWG	10 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A	16 AWG	13 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A	14 AWG	18 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A	12 AWG	25 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A		
3 AWG	85 A	100 A	115 A		
2 AWG	95 A	115 A	130 A		
1 AWG	110 A	130 A	145 A		
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A		
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A		
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A		
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A		

Relé de estado sólido

Este elemento se debe acoplar al sistema de control, ya que por medio de este se realizará las acciones del controlador PID proveniente del PLC, de igual manera sirve como circuito de protección aislando la parte de control con la de potencia, de acuerdo al cálculo previo, es necesario un relé de estado sólido que maneje un mínimo de corriente de 15.68 amperios, lo cual concuerda con el disponible en el horno dentro de los elementos que se han encontrado en el dispositivo previo al trabajo de titulación, por ende se hace la selección del mismo, con el fin de reutilizar elementos bajo una estricta prueba de funcionamiento.

Circuito de protección

El circuito de protección es uno de los parámetros más importantes a considerar en el circuito eléctrico del horno autoclave, donde la función principal como su nombre lo indica, es brindar la protección necesaria a cada uno de los equipos de control de las sobre corrientes que se puedan presentar y averiar el proceso como tal.

Disyuntor

Este elemento de protección tiene la capacidad de abrir o cerrar el circuito eléctrico cuando circula una corriente eléctrica y esta sobrepasa el valor nominal de corriente para la cual está diseñado.

De acuerdo a los cálculos que se realizó, este disyuntor deberá ser de capacidad para 20 amperios, ya que el calibre del conductor es un AWG #12 con capacidad de manejo de corriente hasta 20 Amperios.

Capítulo IV

Ingeniería de detalle

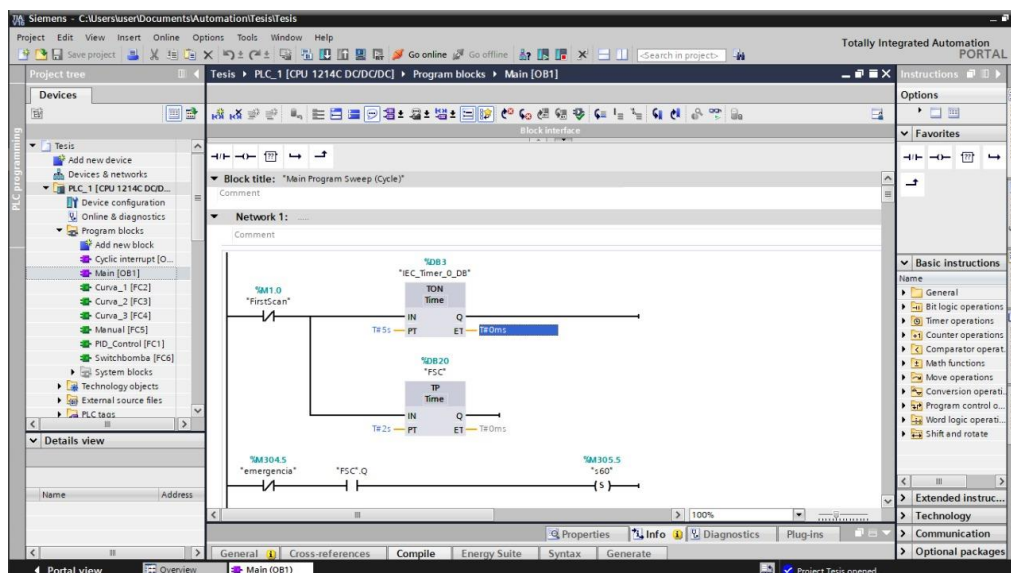
Programación

Programación PLC

La plataforma que se utiliza es Tia Portal, y es por medio de esta plataforma que se realizó la programación usando lenguaje ladder o escalera, poder realizar la automatización del horno autoclave, en donde se definió todas las acciones a realizarse por parte del PLC, posterior a la obtención de señales por parte de los sensores de temperatura, para definir la etapa de control de todo el sistema.

Figura 31

Plataforma de programación Tia Portal



Análisis y diseño del programa del controlador

Descripción de las variables

Como se puede observar en la **Tabla 15** se encuentra detallada la nomenclatura de cada una de las variables utilizadas en la programación, así como también la respectiva descripción de los elementos utilizados en los graficets.

Tabla 15

Descripción de términos de los graficets

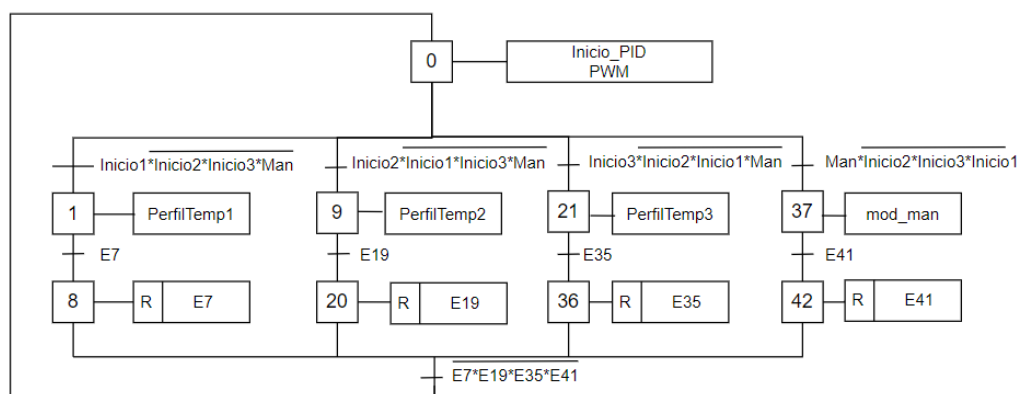
	Descripción
SP1, SP2, SP3, SP	Set Point de las rectas 1, 2 y 3 y del modo manual
Ramp1, Rampa2, Rampa3	Temperatura de ascenso por minuto de las rampas 1, 2 y 3
Recta1, Recta2, Recta3, Tiempom	Tiempo de ejecución de las temperaturas en SP1, SP2 y Sp3, y del modo manual
T1, T3, T5, T7, T9 T11	Temporizadores de 60s para la subida en las Rampas
T2, T4, T6, T8, T10, T12, Tm	Temporizadores del tiempo en las Rectas 1, 2 y 3, y del modo manual
SPa	Set point Auxiliar para el controlador PID
Inicio1, Inicio2, Inicio3, Man	Inicio de los perfiles de temperatura 1, 2 y 3, y el modo manual
E#	Estados de Ejecución

Graficet principal

En la **Figura 32** se puede observar en el graphicet y cómo se encuentran distribuidas las opciones para operación del horno autoclave, donde constan los perfiles de temperatura 1,2, 3 y adicional el modo manual; según sea la necesidad del trabajo a realizarse, el operador será el encargado de dar selección a la opción que se requiera para la operación del horno autoclave y el tipo de materiales compuestos a ser utilizados dentro del proceso térmico de curado a realizarse. El programa principal espera que el operador defina las variables del programa que desea utilizar y posteriormente active la variable de inicio del programa.

Figura 32

Operación del sistema

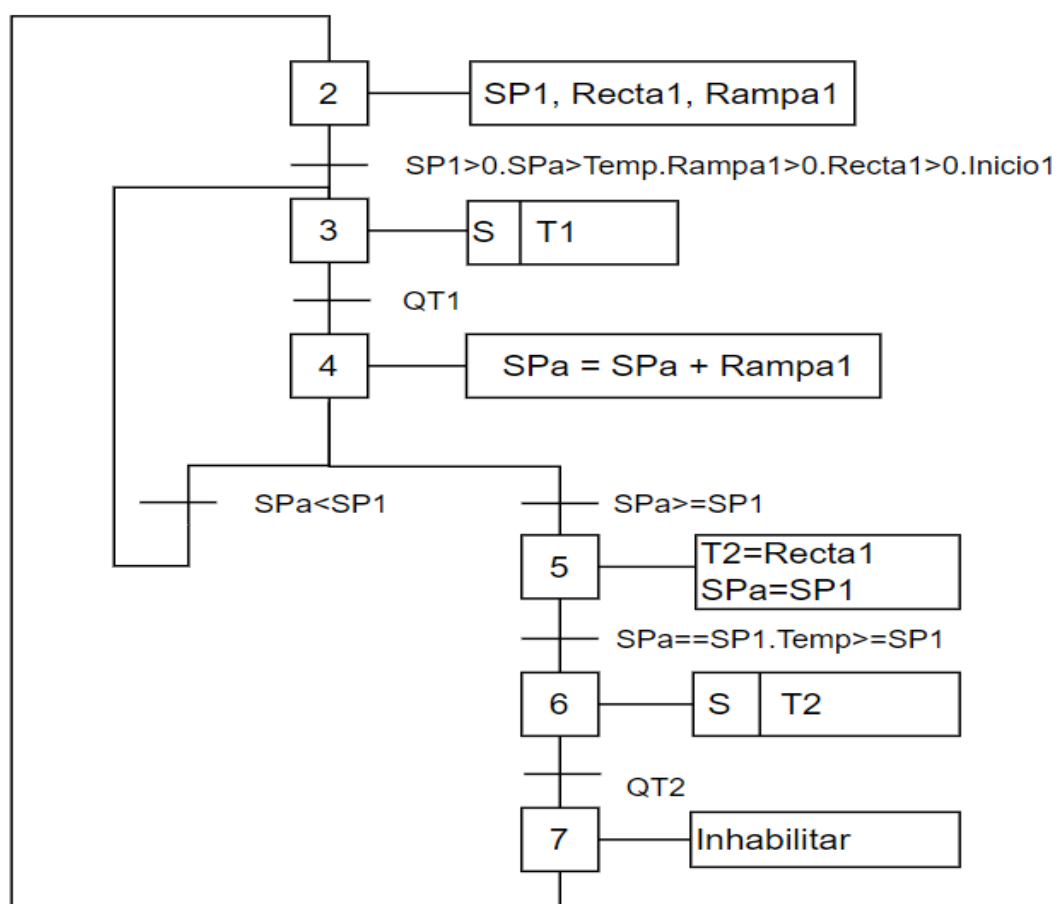


Grafcet del perfil de temperatura 1

Como podemos observar en la **Figura 33** el programa solicita el ingreso de las variables SP1, Spa, Rampa1, Recta1, una vez hecho se activa la variable Inicio1, lo que da inicio al temporizador T1 el cual va subiendo la temperatura de la rampa solicitada, hasta llegar a la temperatura del set point 1 (SP1), donde se activa el temporizador 2 iniciando el tiempo de la recta del SP1. Una vez finalizado la ejecución del temporizador el programa regresa a la etapa principal.

Figura 33

Grafcet del perfil de temperatura Nro.1

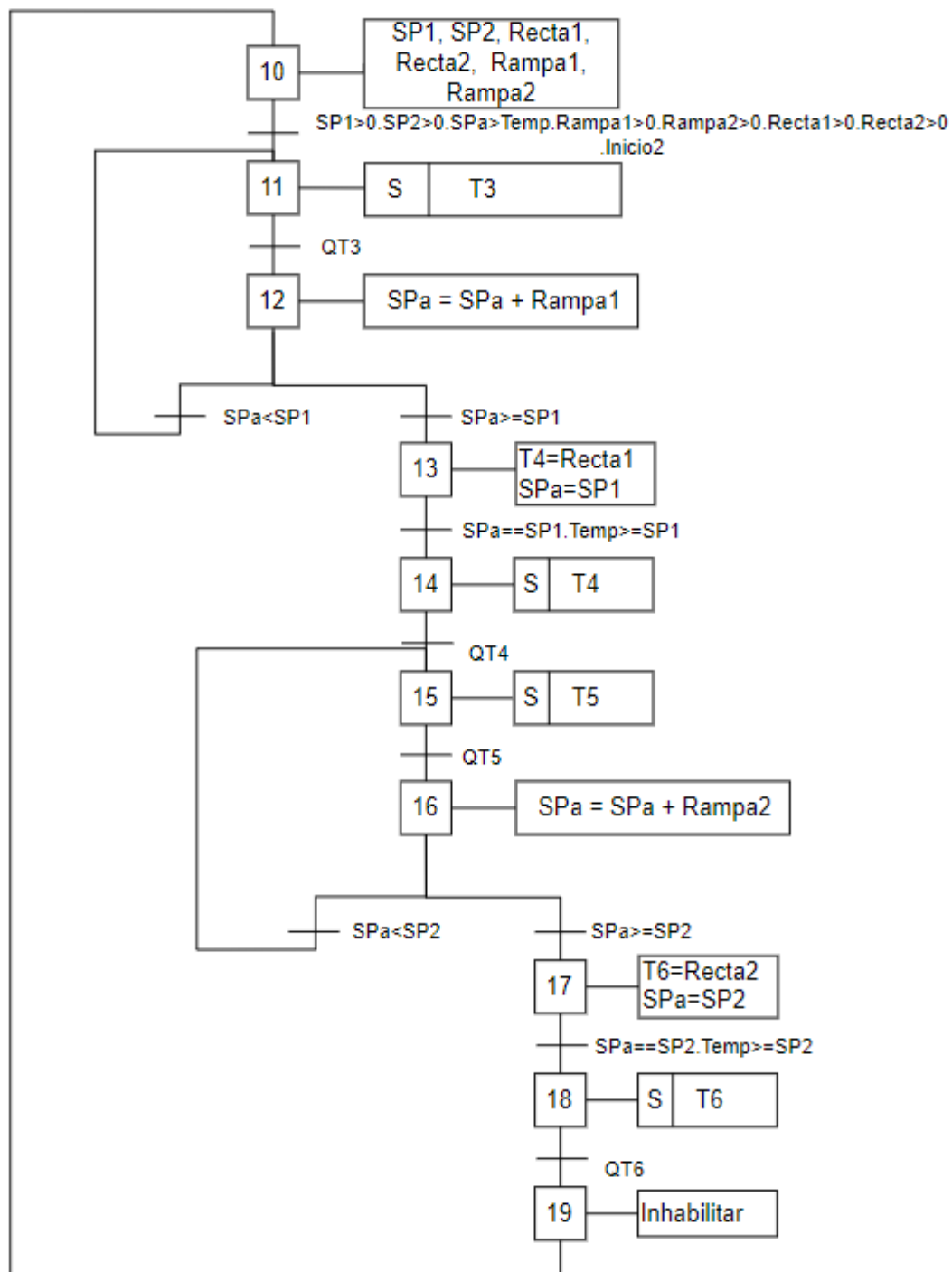


Graficet del perfil de temperatura 2

En la **Figura 34** el programa solicita la inicialización de las variables SP1, Spa, SP2, Rampa1, Rampa2, Recta1, Recta2. Una vez cumplidas estas condiciones, se activa la variable Inicio2 y en consecuencia el temporizador 3, el cual eleva la temperatura según lo solicitado en la Rampa1 hasta llegar a la SP1, después se activa el temporizador T4 que mantiene el tiempo solicitado en Recta1, y una vez finalizado el temporizador inmediatamente inicia el temporizador T5, elevando la temperatura según lo solicitado en la Rampa2 hasta llegar al SP2, donde se activa el temporizador T6, manteniendo la temperatura SP2 según el tiempo solicitado en Inicio2. Una vez finalizado T6 el programa regresa a la rama principal.

Figura 34

Graficet del perfil de temperatura Nro.2

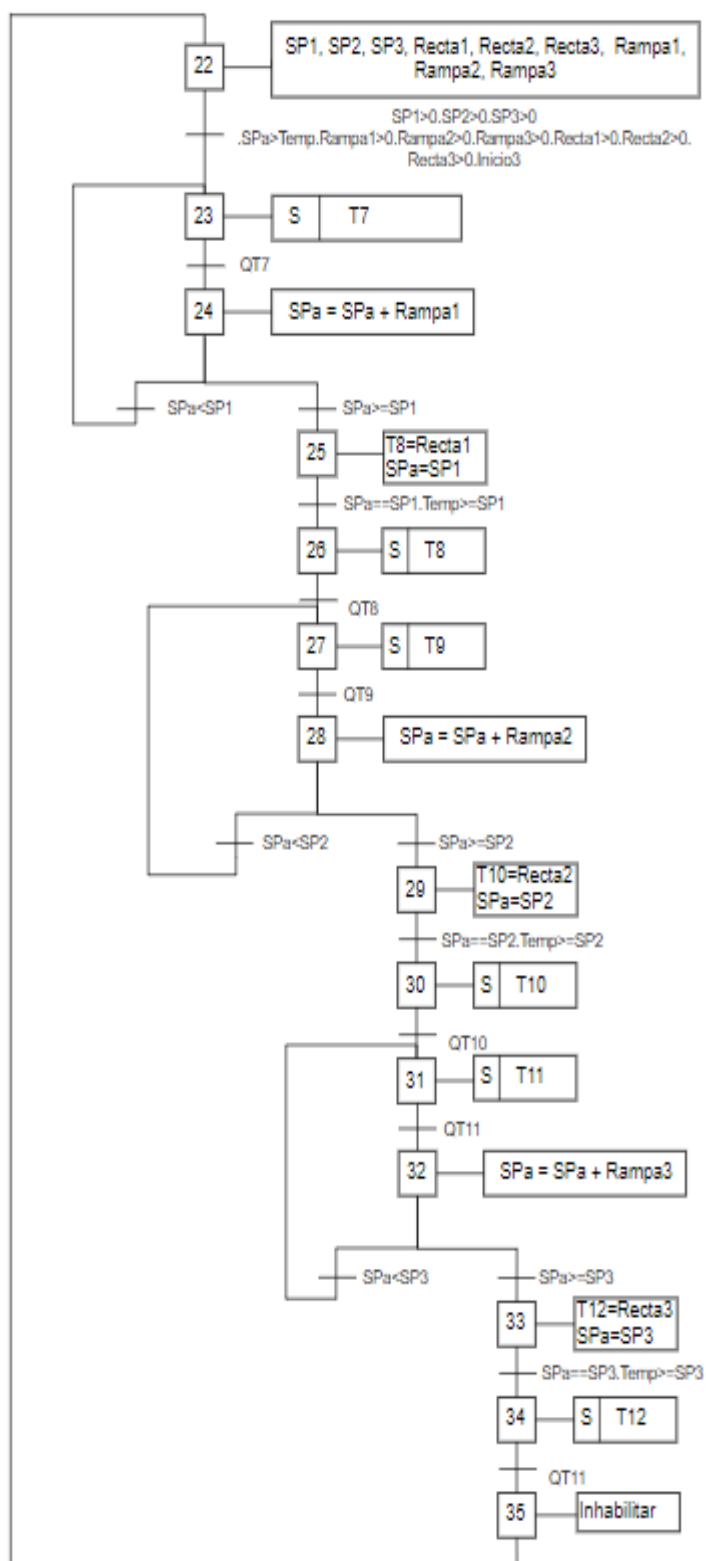


Graficet del perfil de temperatura 3

En la **Figura 35** se observa la forma en que se ejecuta el programa del perfil de temperatura 3, donde el programa solicita que se definan las variables de inicialización, posteriormente se activa la variable Inicio3, esto ejecuta el temporizador T7 el cual eleva la temperatura hasta llegar a SP1, donde se activa el temporizador 8, para mantener una temperatura constante según el tiempo solicitado en Recta1. Una vez finalizado T8, se activa el temporizador T9 el cual eleva la temperatura según lo solicitado en Rampa2 hasta llegar a la temperatura SP2 donde se activa el temporizador T10 para mantener la recta de temperatura según el tiempo solicitado en Recta2, por último se activa el temporizador T11, elevando la temperatura según se indica en la variable Rampa3 hasta llegar a SP3, donde se activa el temporizador T12 para mantener la temperatura según el tiempo solicitado en Recta3. Al finalizar el programa regresa a la rama principal.

Figura 35

Graficet del perfil de temperatura Nro.3

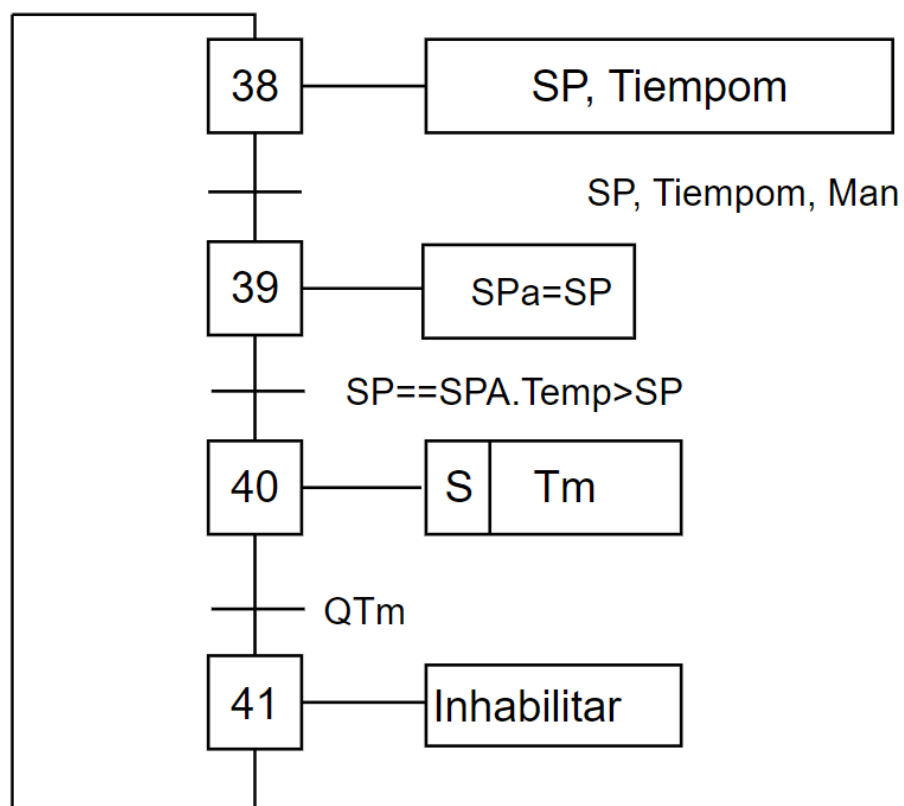


Grafcet modo manual

En la **Figura 36** observamos que al iniciar, el programa solicita las variables de tiempo en la recta y Set point, las cuales deben ser ingresadas manualmente por el operador según el requerimiento de trabajo del horno, una vez definidas dichas variables se activa la variable “Man” la cual da la orden de encendido del horno hasta que la temperatura llegue al set point donde se mantiene el tiempo solicitado en “Tiempom”. Una vez solicitado este proceso el programa regresa a la rama principal.

Figura 36

Grafcet Modo manual



El programa en todo momento mantiene en ejecución las variables de alta temperatura, baja temperatura y emergencia, las cuales se activan cuando la temperatura sube o baja 5° centígrados a lo solicitado o se presenta alguna emergencia dentro del proceso.

Posee variables indicadoras de proceso en el programa cuando el horno se encuentra en ejecución de proceso, paro del proceso y emergencia en el proceso, lo cual nos permite supervisar de mejor manera que el proceso se esté desarrollando de una manera adecuada y se puedan tomar acciones correctivas a cada falencia del proceso.

Programación HMI

Plataforma de Programación HMI

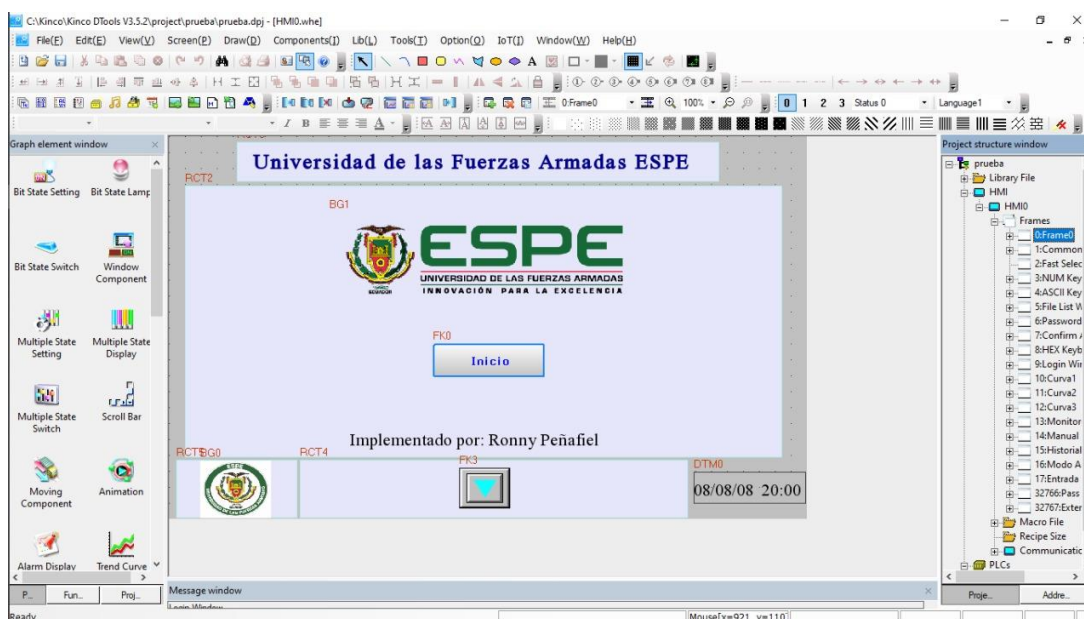
Para la programación de las pantallas HMI se utilizó Kinco Dtools, que es una plataforma muy versátil al momento de realizar diseños de pantallas HMI, y que brinda múltiples herramientas para la elaboración de pantallas HMI personalizadas que sean de fácil entendimiento y manipulación para los operadores del horno autoclave, y así de esta forma se puedan familiarizar de mejor manera con el sistema y se pueda tener un mejor manejo y supervisión del proceso de curado de materiales compuestos.

En la

Figura 37 podemos apreciar todos los elementos que nos ofrece esta plataforma para la realización de pantallas HMI.

Figura 37

Plataforma de programación Kinco Dtools



Arquitectura

Este sistema se ha dividido en secciones: Sistema de Control, Sistema Instrumentación, sistema de comunicaciones y Sistema de Supervisión.

Sistema de Control

a) Selección de Elementos.

Se consideró un controlador Siemens S7 1200 modelo 1214C DC/DC/DC el cual es el encargado de procesar y ejecutar las señales de entrada y salida para el correcto funcionamiento del proceso de reparación de materiales compuestos.


Este controlador posee una comunicación tipo Modbus TCP/IP que permite la comunicación con la pantalla HMI para que desde este elemento el operador pueda

controlar y supervisar todas las operaciones del horno y del proceso que se lleva a cabo.

En la **Tabla 16** podemos observar ciertas características que posee este tipo de controlador, las cuales son requeridas para el funcionamiento óptimo del proceso y las cuales están detalladas en el apartado de criterios de selección.

Tabla 16

Características del PLC Siemens S7-1200

Dispositivo	Característica	Valor
	Modelo	1214C
		DC/DC/DC
	Voltaje de funcionamiento	24 V DC
	Número de entradas digitales	14
	Número de salidas digitales	10
	Número de entradas analógicas	2

Nota: Obtenido de (Automation24, 2014).

Para la recepción de la señal de temperatura se utilizó un módulo siemens 1231 RTD que se lo considero para la optimización del proceso, a continuación en la **Tabla 17** observamos las características que presenta este elemento.

Tabla 17

Características del módulo Siemens 1231

Dispositivo	Característica	Valor
	Tipo	Módulo de entrada analógica
	Voltaje de funcionamiento	24 V DC
	Número de entradas analógicas	4(Pt100/Pt1000)
	Protección	IP20

Nota: Obtenido de (Automation24, 2013).

Se ha elegido una fuente de corriente directa para alimentación de ciertos elementos involucrados en el proceso, los cuales necesitan de este tipo de alimentación para poder funcionar; este elemento fue proporcionado por la DIRAER y cumple con los requerimientos previamente establecidos en la sección de criterios de selección; a continuación en la **Tabla 18** podemos apreciar ciertas características de este elemento.

Tabla 18

Características Fuente de corriente directa LOGO.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de funcionamiento	100/240 VAC.
	Voltaje de Salida.	24 VDC
	Corriente de Salida	2.5 A



Potencia de salida

60 W

Nota: Obtenido de (Allied, 2021).

El agitador que posee el horno y que es utilizado para que el calor se distribuya al interior del horno es accionado por un motor trifásico por lo cual se utiliza un variador de frecuencia para el arranque de este elemento, cabe recalcar que este elemento se encontraba instalado en el horno autoclave, previo al trabajo de titulación.

A continuación en la **Tabla 19** se muestra ciertas características de este elemento utilizado dentro del proceso del horno autoclave.

Tabla 19

Características del variador de frecuencia Kinco CV20-2S-0007G.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de funcionamiento	220 VAC
	Frecuencia	0 a 300 Hz.
	Capacidad de Potencia	1,5 kVA
	Corriente de entrada	8,2 A


	Corriente nominal	4 A
	Protección	IP20

Nota: Obtenido de (Kinco, 2020).

Para un adecuado control de las niquelinas del horno autoclave se utilizó un relé de estado sólido proporcionado por la DIRAER, el cual cumple con requerimientos del proceso del horno y a continuación podemos apreciar características de este elemento en la **Tabla 20**.

Tabla 20

Relé de estado sólido.

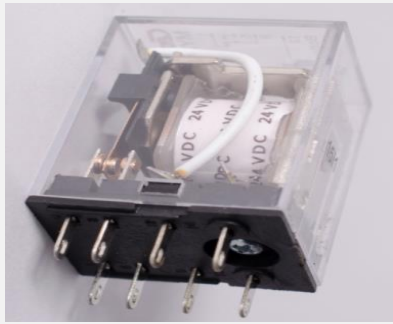
Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de carga.	24 - 480 VAC
	Frecuencia	50/60 HZ
	Corriente de carga	25 A

Nota: Obtenido de (Maxwell, 2020).

Para un adecuado control de las niquelinas del horno autoclave se utilizó un relé de estado sólido proporcionado por la DIRAER, el cual cumple con requerimientos del proceso del horno y a continuación podemos apreciar características de este elemento.

Tabla 21

Relay encapsulado de 24VDC.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de carga.	24 VDC - 220 VAC
	Frecuencia	50/60 HZ
	Corriente de carga	5 A


Nota: Obtenido de (Gonzaga & Rodriguez, 2021).

Para el encendido del sistema de automatización se realizara por medio de un selector de dos posiciones (ON/OFF), este elemento fue proporcionado por la DIRAER y cumple con los requisitos establecidos en el apartado de criterios de selección; la posición de este elemento es en el tablero de control para que el operador tenga facilidades al momento dar inicio al proceso, en la **Tabla 22** se puede observar características representativas de este elemento.

Tabla 22

Selector de 3 posiciones SKOS ED33.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje máximo de operación	600 VAC
	Corriente nominal	10 A


	Protección	IP65
---	------------	------

Nota: Obtenido de (Adajusa, 2019).

En la **Tabla 23** se puede observar algunas de las características de las luces indicadoras que se obtuvo del reciclaje bajo revisión previa.

Tabla 23

Luz indicadora CAMSCO.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de alimentación.	24 VAC/DC
	Protección	IP65
	Diámetro	22mm

Nota: Obtenido de (Rodríguez, 2021).

En el Anexo II, se puede apreciar la información detallada de cada uno de los elementos que se ha mencionado en este apartado.

b) Protecciones Eléctricas.

Es muy importante realizar cálculos de la corriente total que se consume por parte de todos los elementos que forman parte de todo el circuito de nuestro sistema eléctrico, para que de esta manera se pueda dimensionar un elemento de protección, el cual entre en acción al suscitarse alguna emergencia o falla en el sistema.

$$I_T = I_{controlador} + I_{modulo} + I_{driver} + I_{motor} + I_{resistencias} + I_{lucespiloto} + I_{Fuente24v} \\ + I_{reles} + I_{pantalla}$$

$$I_T = 0.5A + 0,4A + 8A + 1.5A + 2 * 9.3A + 3 * 0.2A + 1.3A + 2 * 0.1A + 0.15A$$

$$I_T = 31.15A$$

A este dato se le debe considerar normas para instalaciones eléctricas, y es por eso que se va a basar en la norma NEC-SB-IE, la cual estipula que para considerar un elemento de protección se debe incrementar el 25% de la corriente total de todo el sistema.

$$I_T = 31.15 * 1.25 = 38.93A$$

Una vez conocidos los valores de carga que deben soportar los elementos de protección se procede a implementarlos, a continuación en la **Tabla 24** se puede observar diversas características del elemento en cuestión.

Tabla 24

Características de Breaker Schneider Electric 3 polos 40A.

Dispositivo	Característica	Valor
	Voltaje de alimentación.	220 - 240 VAC
	Protección	IP20
	Intensidad de empleo	40A
	Frecuencia	50/60 Hz



Nota: Obtenido de (CAMEI, 2019).

Se consideró como también para el sistema un elemento de protección de corriente los cuales vienen a ser fusibles con sus respectivos porta fusibles, los cuales van a cumplir la función de cortar la energía del sistema cuando este sobrepase la corriente de normal funcionamiento y la cual se obtuvo de los cálculos de consumo de corriente realizados y en la **Tabla 25** podemos observar las características de este elemento.

Tabla 25

Características del portafusibles de 40A.

Dispositivo	Característica	Valor
	Número de Polos	3
	Voltaje nominal de aislamiento	500 V


	Corriente nominal	40A
---	-------------------	-----

Nota: Obtenido de (Ebasee, 2021).

Adicional se utilizó un elemento de protección térmica llamado disyuntor el cual fue proporcionado por la DIRAER y cumple con los requisitos, como se menciona en el apartado de criterios de selección, a continuación en la **Tabla 26** se observa las características de este elemento.

Tabla 26

Características disyuntor GMC-22.

Dispositivo	Característica	Valor
	Número de Polos	3
	Voltaje nominal	200 - 690 V
	Corriente nominal	40A

Nota: Obtenido de (Isis, 2005).

c) Diagramas Esquemáticos.

Diagramas Eléctricos

En el Anexo I y II se puede observar el esquema eléctrico del sistema propuesto para realizar el control de temperatura del horno autoclave, en el cual se detalla las conexiones de cada uno de los elementos constitutivos del sistema.

Diagrama P&ID del sistema.

El diagrama P&ID se puede observar los diferentes elementos utilizados dentro del lazo de control, donde se puede especificar de manera simbólica el equipo instrumental que será utilizado dentro del proceso, en el Anexo III se puede observar este diagrama.

Implementación tablero de control

Se implementó dos sensores de temperatura para una mejor adquisición de datos dentro del horno autoclave por lo cual, estos sensores adquieren los datos de niveles de temperatura y son enviados al tablero de control donde se encuentra el PLC para la recepción de dichas señales de temperatura.

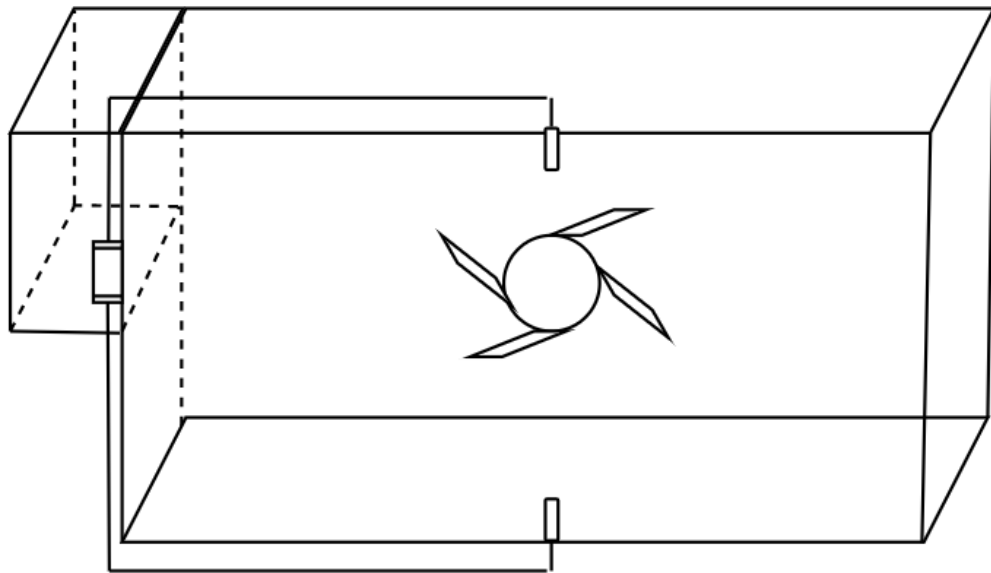
En la

Figura 38 se puede apreciar cómo se encuentran ubicados los sensores de temperatura, uno en la parte superior interna y el otro en la parte inferior interna y

posterior son llevados al tablero de control y conectados al PLC para el recibimiento de las señales.

Figura 38

Implementación de los sensores de temperatura

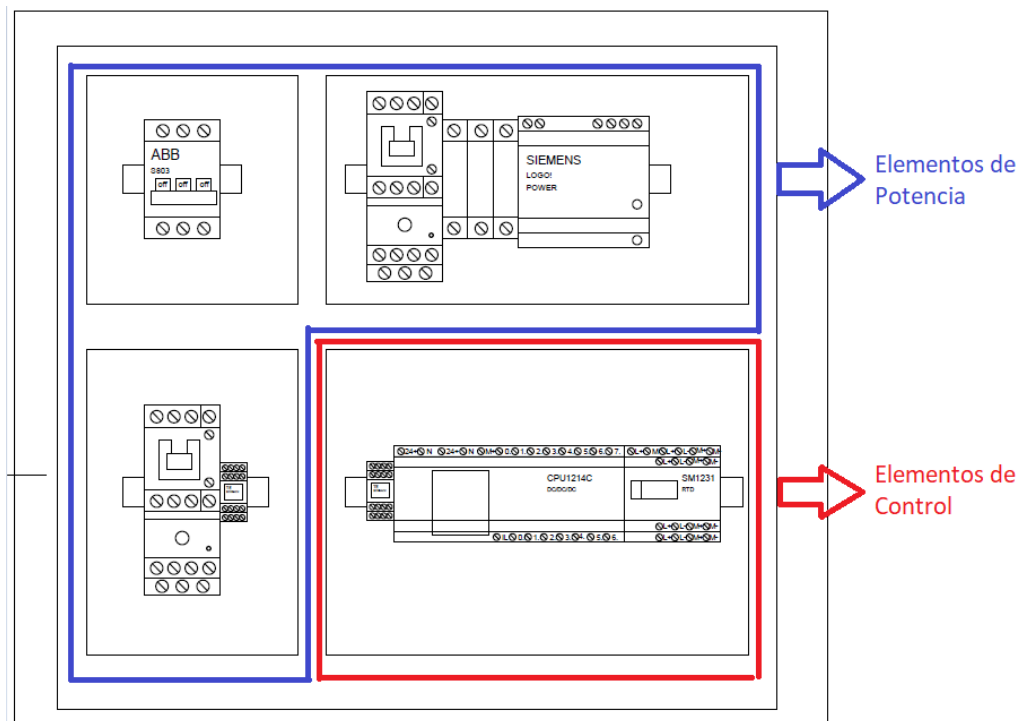


En el tablero de control se encuentran integrados los elementos a utilizarse en la automatización del horno autoclave, para que desde este se tenga la parte industrial del sistema y se pueda ejecutar tanto la parte de control como la parte de potencia.

Al interior del tablero de control tenemos una distribución seccionada de los elementos utilizados en el circuito de potencia y los utilizados en el circuito de control para tener una mejor visión y desempeño de los elementos al interior del tablero de control como se puede apreciar en la **Figura 40**.

Figura 39

Distribución tablero de control



En los apartados de los Anexos IV, V, VI, VII se puede apreciar los diversos diagramas del tablero de control tanto en dimensiones como en cómo se encuentra constituido los elementos dentro del mismo.

Sistema de Comunicaciones

Para poder entablar el sistema de comunicación entre el controlador lógico programable y la pantalla HMI ya que estos elementos poseen una conexión de tipo ethernet RJ45 y por medio de ella empleo el protocolo Modbus TCP/IP realiza la transferencia de datos mediante el uso de direcciones IPs.

Sistema de Instrumentación

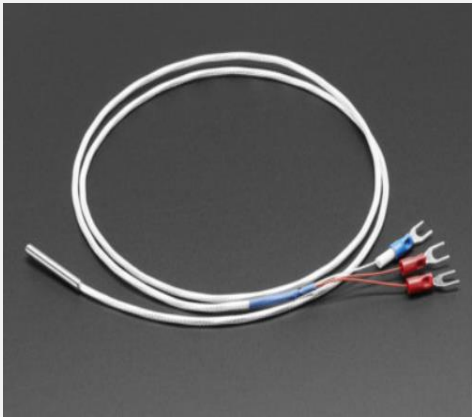
a) Selección de Elementos

Se utiliza dos sensores de temperatura PT100 para tener mejores datos de la temperatura ya que se requiere conocer si la temperatura dentro del horno se distribuye equitativamente, para un mejor desarrollo del proceso, por lo cual uno encontrara ubicado en la parte interna superior y otro en la parte interna inferior del horno.

Esos elementos fueron proporcionados por la DIRAER y cumplen con los requerimientos establecidos en el diseño del proceso y se puede observar en la sección de criterios de selección; en la **Tabla 27** se puede observar ciertas características de este tipo de sensor.

Tabla 27

Características del sensor PT100.

Dispositivo	Característica	Valor
	Número de hilos	3
	Rango de Medida	-200 a 550 °C
	Variación resistencia/temperatura	0,385 Ω/°C nominal
	Exactitud	±0,5 °C de -10 °C a + 85 °C

Nota: Obtenido de (Electronilab, 2019).

b) Cálculos preliminares necesarios para las señales análogas de control.

Sensor de Nivel Análogo de temperatura PT100

Este tipo de sensor de temperatura envía una señal de 100Ω en 0°C y va subiendo o disminuyendo según la temperatura aumenta o disminuye correspondientemente. Esto se muestra en la **Figura 40**.

Figura 40

Datos del sensor según la temperatura

Temperatura [°C]	Temperatura [°F]	Resistencia [ohmios]
-200.00	-328.00	18.5201
-100.00	-148.00	60.2558
0.00	32.00	100.0000
100.00	212.00	138.5055
200.00	392.00	175.8560
300.00	572.00	212.0515
400.00	752.00	247.0920
500.00	932.00	280.9775
600.00	1112.00	313.7080
700.00	1292.00	345.2835
800.00	1472.00	375.7040
850.00	1562.00	390.4811

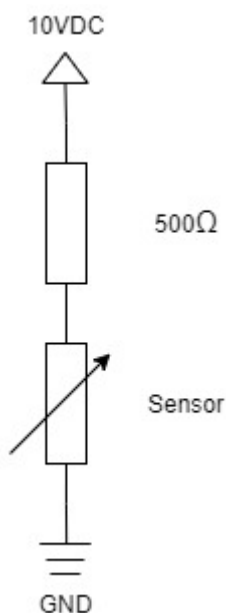
Tomando en cuenta estos datos y con un intervalo de 0 a 300°C , se procede a aplicar las fórmulas para su correspondiente linealización.

Ya que dicha resistencia va a variar según su temperatura, se procede a acoplar a un circuito divisor de tensión, para así obtener una señal de voltaje la cual se puede

asociar al controlador. En serie se conecta una resistencia de 500 y se alimenta a las dos resistencias con 10 v DC como se muestra en la **Figura 41**.

Figura 41

Circuito de temperatura



Por lo tanto, cuando dicha variable este en 0°C (100Ω), el sensor tendrá un voltaje de salida correspondiente a la fórmula:

$$V_s = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} V_f$$

$$V_s = \frac{100}{500 + 100} 10v = 1,67v$$

El sensor en 300°C tendrá un valor de resistencia igual a 212,05 Ω, aplicando la misma fórmula, el voltaje de salida del sensor será

$$V_s = \frac{212,05}{500 + 212,05} 10v = 2,978v$$

Una vez obtenidos los datos de salida de voltaje del sensor, se procede a linealizar la recta para su correcta interpretación en el controlador, utilizando la fórmula de la recta:

$$y = mx + b$$

Donde:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{300 - 0}{2,978 - 1,67} = \frac{300}{1,308} = 229,35$$

$$300 = (229,35)2,978 + b$$

$$b = 300 - 683$$

$$b = -383$$

$$y = 229,35x - 383$$

Esta ecuación debe ser ingresada en el controlador para la correcta interpretación de la temperatura. El módulo seleccionado SM1231/RTD se encarga de convertir esta señal en temperatura automáticamente.

Sistema de Supervisión

a) Selección de Elementos

En este apartado se procedió a desarrollar el sistema de supervisión y para lo cual se utilizó una pantalla HMI marca Kinco proporcionada por la DIRAER, la cual por

sus características expuestas en la **Tabla 28** cumple con los requerimientos para el proceso del horno autoclave.

Tabla 28

Características Pantalla HMI Kinco GL070E.

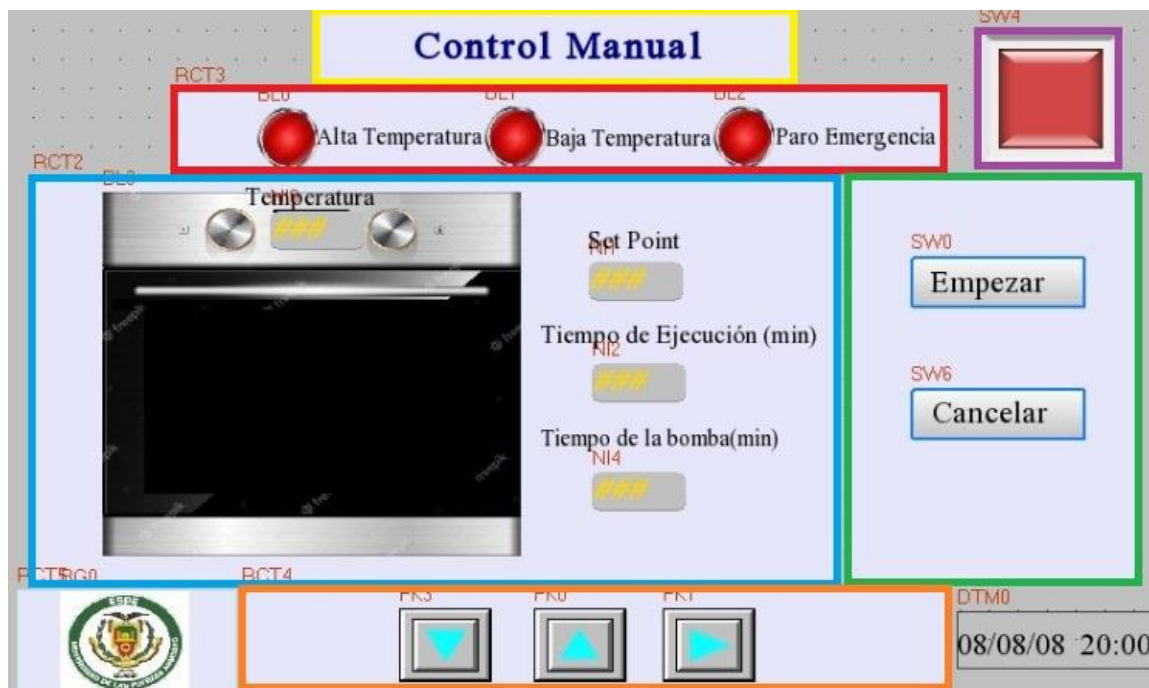
Dispositivo	Característica	Valor
	Resolución	800x480 pixels
	Tipo de Conexión	RS232, RS485, RS422, RJ45.
	Voltaje de funcionamiento	24 VDC
	Tamaño	7 "
	Protección	IP65

Nota: Obtenido de (Slicetex Electronics, 2021).

b) Descripción de las Pantallas Requeridas

Figura 42

Descripción de pantalla por segmentos



Como se puede observar en la **Figura 42**, las pantallas estan conformadas por distintos segmentos de distribucion para la comprension facil del operador asi como lo indica la norma ANSI/ISA-101.01, estos segmentos se describen a continuacion:

- En el “recuadro amarillo”, se encuentra el título de la pantalla actual.
- En el “recuadro rojo”, se encuentran las luces indicadoras de los 3 tipos de fallas que hay en el sistema, como son: Alta temperatura, Baja temperatura y Paro de emergencia.
- En el “recuadro morado”, se encuentra un paro de emergencia virtual, el cual cancela todo tipo de proceso y reinicia todas la variables.
- En el “recuadro azul”, se muestran los mimicos y se supervisan las

diferentes variables del proceso según la pantalla en uso.

- En el “recuadro verde”, se encuentra el sistema de control y los diferentes tipos de controles que se ejecutan en cada pantalla.
- En el “recuadro naranja”, se encuentra el sistema de navegación entre pantallas, el cual permite acceder a las diferentes funciones y procesos del sistema.

Todos los recuadros mencionados se encuentran en cada pantalla del sistema de supervisión.

Pantalla de Inicio.

Figura 43

Pantalla de Inicio



Como se muestra en la **Figura 43**, en la pantalla de inicio se muestra el nombre de la institución, el nombre del autor y un boton que lleva a la selección de los procesos.

Pantalla de selección.

Figura 44

Pantalla de Selección

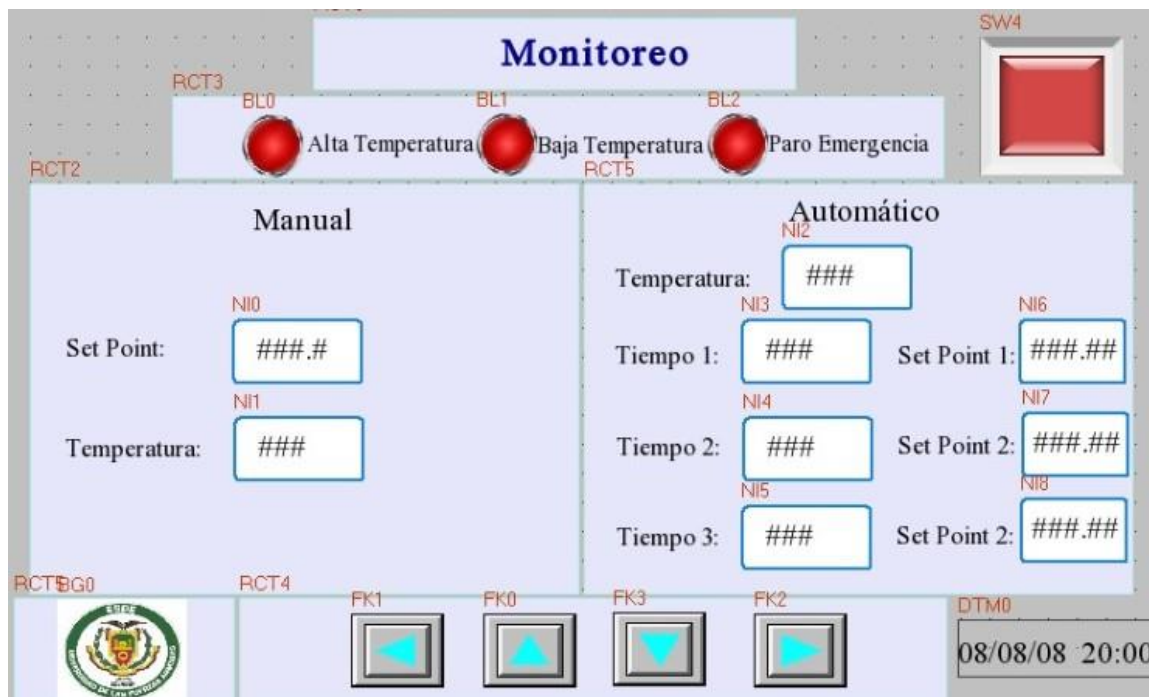


Como se puede observar en la **Figura 44**, en esta pantalla se puede acceder al 3er nivel de supervición, como son las pantallas de proceso y monitoreo del sistema.

Pantalla de Monitoreo.

Figura 45

Pantalla de Monitoreo

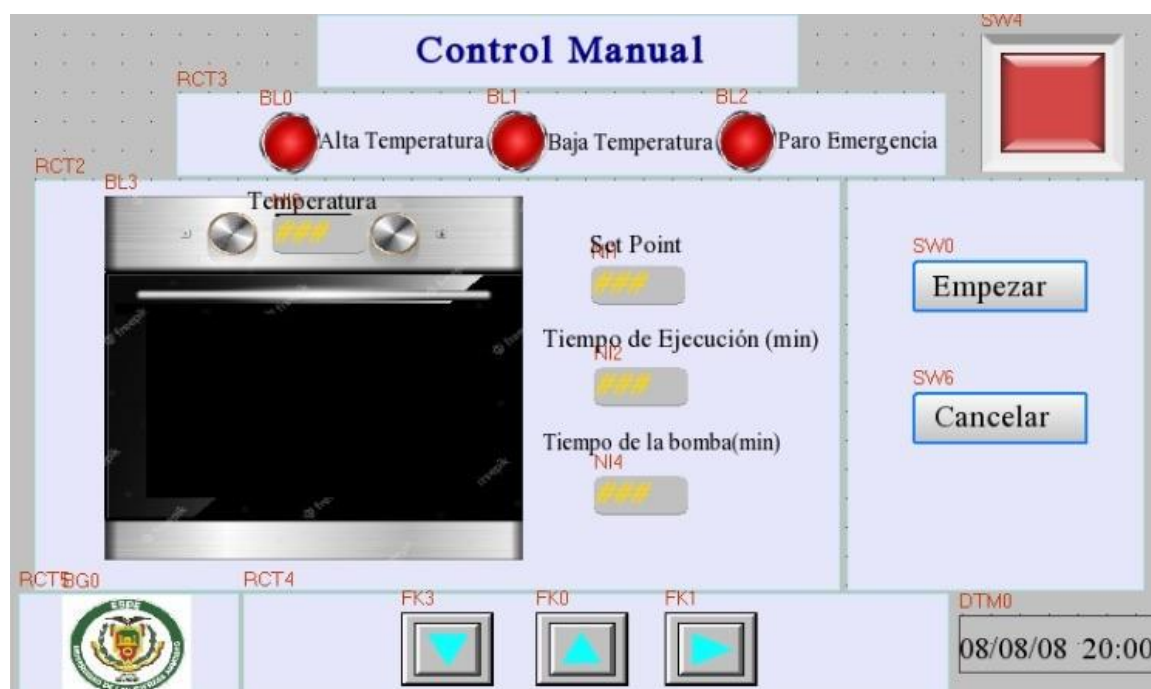


Como se muestra en la **Figura 45**, en esta pantalla se puede observar en el lado derecho el modo automatico como son tanto los set points de cada perfil de temperatura, el tiempo en el que se mantiene en dicha recta, ademas se supervisa la temperatura en la que se encuentra el promedio de los sensores dentro del horno. En el lado izquierdo se encuentra el modo manual, el cual muestra el set point al que se desea llegar y el tiempo de la recta en la que se mantiene.

Pantalla Modo Manual.

Figura 46

Pantalla Modo Manual



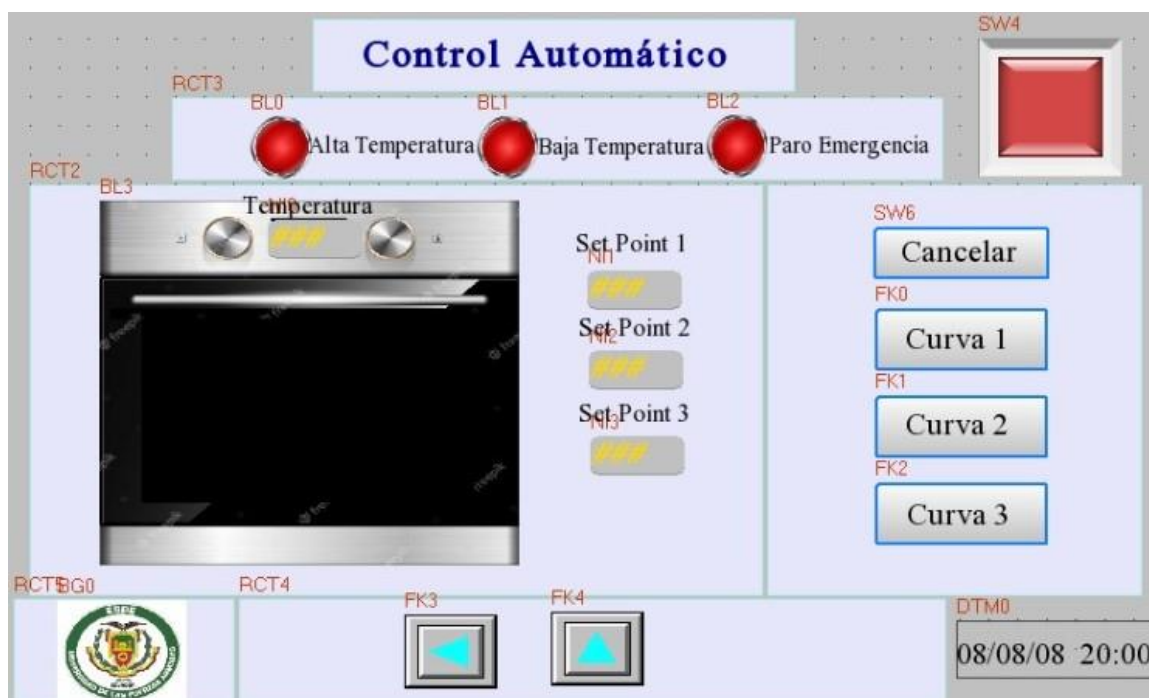
Como se muestra en la **Figura 46**, en el recuadro de monitoreo se encuentra tanto de las variables de operación del modo manual como son: Set point, Tiempo de ejecución del calentamiento y tiempo de funcionamiento de la bomba, como la temperatura en tiempo real del Horno.

En el recuadro de control se encuentra el encendido del proceso el cual solo funciona si los parametros ya estan establecidos, y el boton de cancelar el proceso, para parar en proceso en cualquier momento.

Pantalla Modo Automático.

Figura 47

Pantalla Modo Automático



Como se puede observar en la **Figura 47**, en el recuadro de monitoreo se puede supervisar las variables de los 3 diferentes set points para los perfiles de temperatura 1, 2 y 3 respectivamente, asi como un recuadro que muestra la temperatura del horno en todo momento. En el recuadro de control se puede acceder al proceso de los perfiles de temperatura 1, 2 y 3, y a su vez, cancelar cualquier proceso previamente ejecutado en todo momento. Los botones de acceso de perfiles de temperatura 1,2 y 3 se bloquean

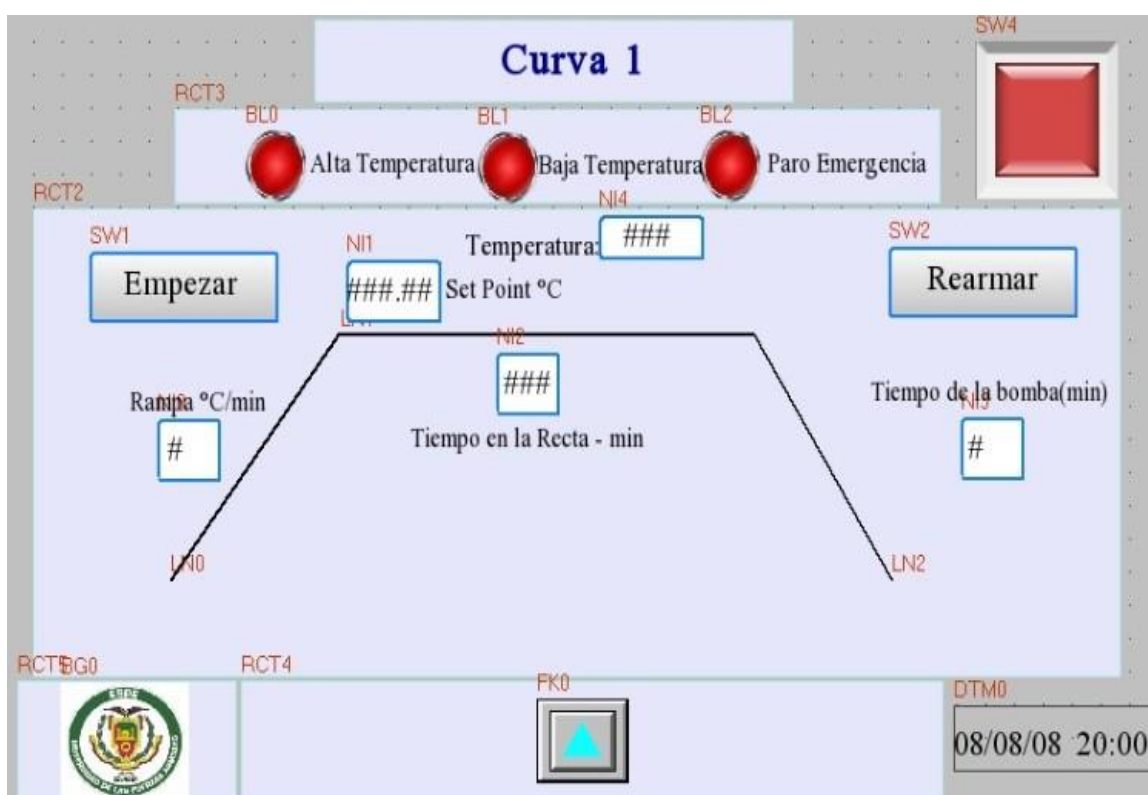
cuando cualquier otro proceso se encuentra en ejecución para que el programa no tenga conflictos de funcionamiento.

Pantallas de los perfiles de temperatura 1, 2 y 3.

Pantalla del perfil de temperatura 1

Figura 48

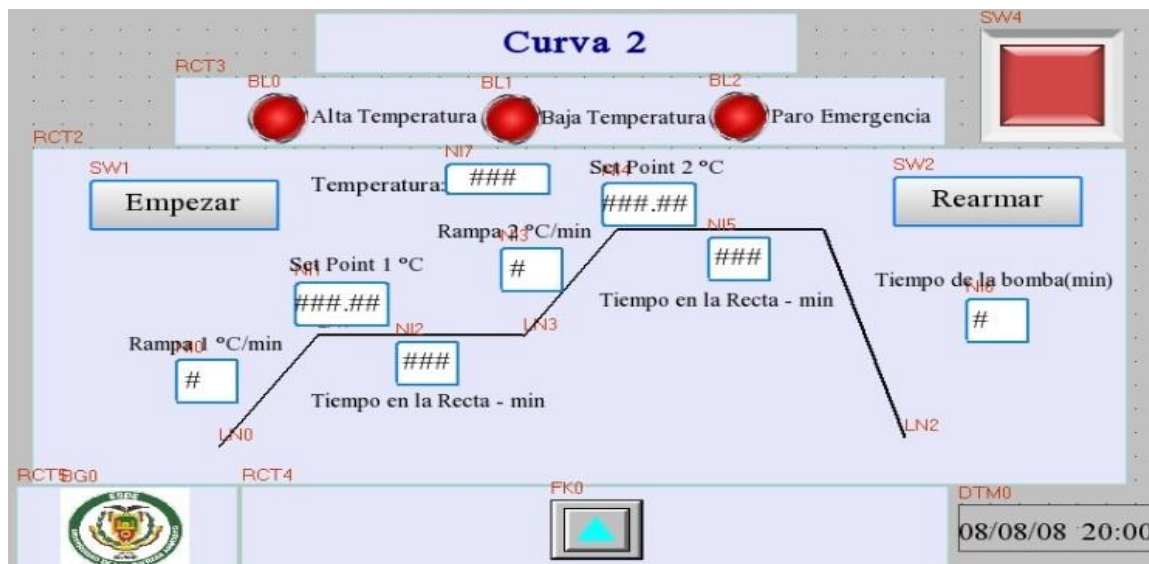
Pantalla del perfil de temperatura 1



Pantalla del perfil de temperatura 2

Figura 49

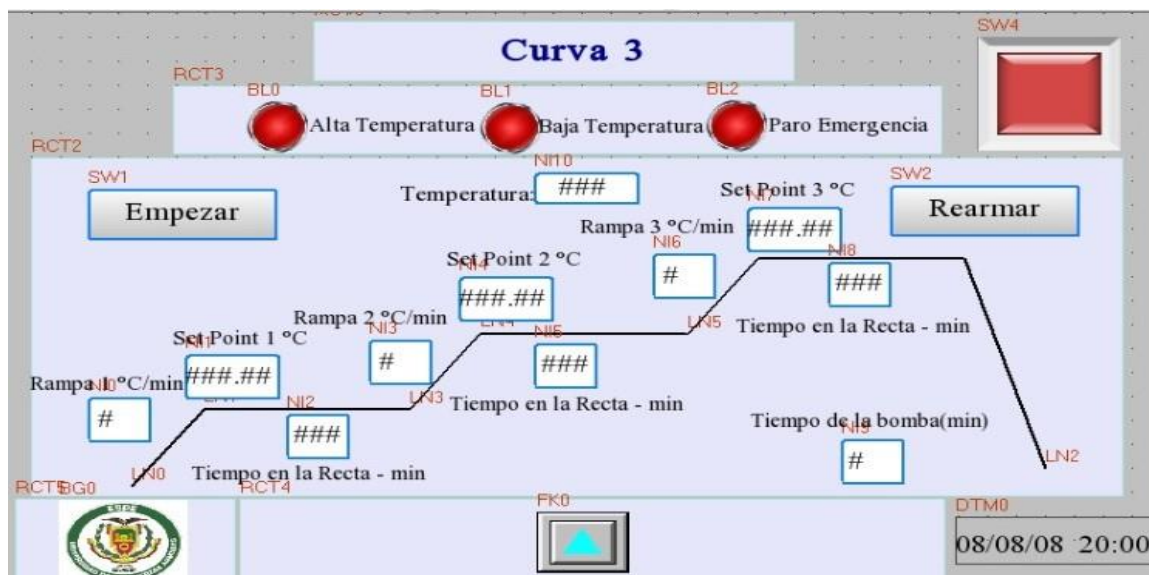
Pantalla del perfil de temperatura 2



Pantalla del perfil de temperatura 3

Figura 50

Pantalla del perfil de temperatura 3



Como se puede observar en la **Figura 49**, **Figura 50** y **Figura 50** los tres perfiles de temperatura tienen funcionamientos similares y repetitivos, en el recuadro de supervisión se definen las variables de inicio del proceso seleccionado como son:

- Set point 1, 2 y 3 según el proceso.
- Recta 1, 2 y 3, que son los tiempos de ejecución de temperatura en las rectas del set point seleccionado según el proceso correspondiente.
- Rampa 1, 2 y 3 que definen la temperatura por minuto en la que el proceso aumenta según el perfil de temperatura seleccionado.
- También se encuentra un panel de visualización de la temperatura en tiempo real del horno.

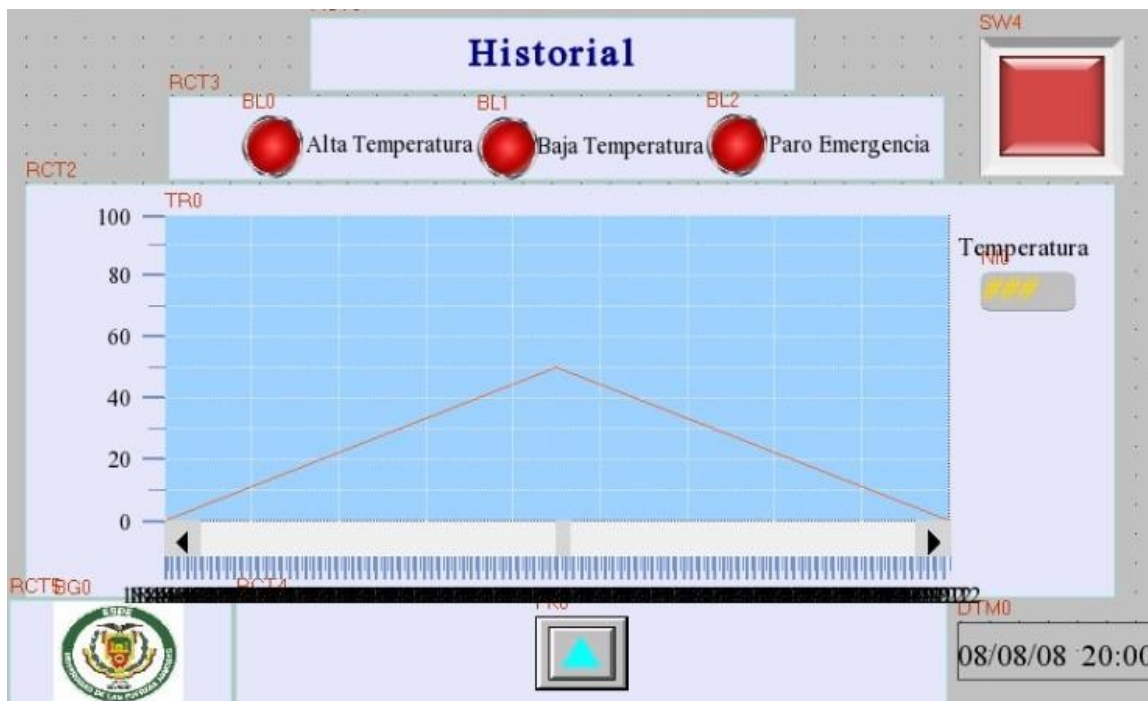
Existen también 2 botones:

- **Rearme**: reinicia todas las variables definidas por el operador.
- **Empezar**: ejecuta el proceso seleccionado una vez definidas las variables de inicialización.

Pantalla de Tendencias.

Figura 51

Pantalla Tendencias



Como se puede observar en la **Figura 51**, en la pantalla de Tendencias se puede observar de forma grafica la variación de la temperatura con respecto al tiempo y existe tambien un recuadro de la temperatura actual del horno.

Capítulo V

Pruebas y Resultados

Generalidades

En esta sección se demuestra los diferentes tipos de pruebas a las que fue sometido el Horno para garantizar su uso constante y calificado, los principios que se tomó en cuenta para las pruebas y resultados del mismo se enumeran a continuación:

1. Funcionamiento de control PID
2. Comparación con un sensor externo al sistema.
3. Funcionamiento del Modo Automático
4. Funcionamiento del perfil de temperatura 1
5. Funcionamiento del perfil de temperatura 2
6. Funcionamiento del perfil de temperatura 3
7. Funcionamiento Modo Manual.
8. Funcionamiento del sistema de supervisión.

Funcionamiento del control PID

Prueba:

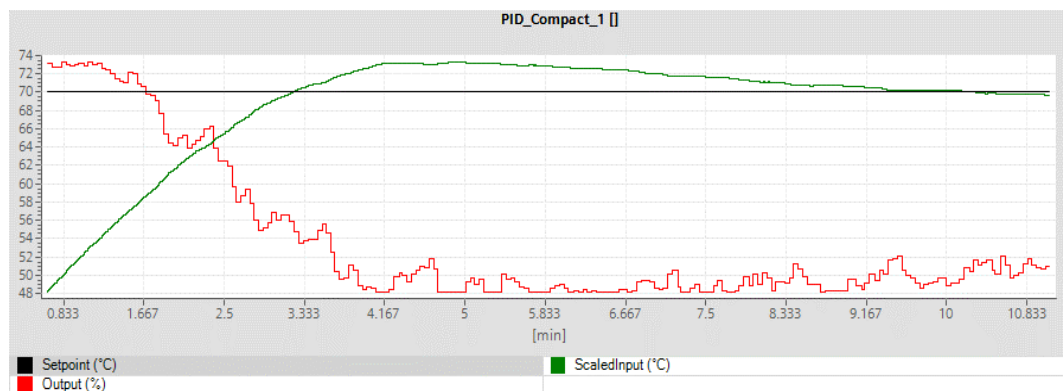
Para esta prueba se utilizó la graficadora interna del programa Tia Portal, donde se muestra a escala el comportamiento del promedio de los sensores como Input (color

verde), el comportamiento del controlador en respuesta error como Output (color rojo), y el Set Point que en este caso fue de 70°C específicamente para esta prueba.

Resultados:

Figura 52

Resultado control PID



Como se muestra en la **Figura 52**, la respuesta del controlador al error empieza en lo más alto ya que el error entre la temperatura actual y el punto de referencia es amplio, pero a medida que la temperatura va incrementando, el error va disminuyendo hasta obtener un error negativo, el cual es conocido como pico máximo de subida, es ese momento el controlador desciende totalmente su respuesta apagando incluso al actuador (resistencias térmicas). Una vez alcanzado el punto de referencia, el controlador envía pequeñas señales hacia el actuador para mantener su estabilidad en dicha referencia. Esto demuestra que el controlador PID está correctamente configurado y listo para trabajar.

Comparación con un sensor externo al sistema

Prueba:

Para esta prueba se utilizó un sensor de temperatura Lm35 externo al sistema de control, es decir, que no pertenece al proyecto implementado. La señal del sensor de temperatura Lm35 es un voltaje que varía 0.01 v DC por cada °C al que es expuesto, es decir en 25°C, dicho sensor envía una señal de 0.25 v DC.

Esta prueba fue hecha para garantizar la distribución equitativa de la temperatura, así como la respuesta de los sensores internos del sistema.

Para dicha prueba se obtuvo los datos en cada minuto durante 20 minutos del sensor Lm35, del promedio de los sensores Pt 100 y un Set Point de 70°C.

Resultado:

Tabla 29

Datos de sensores

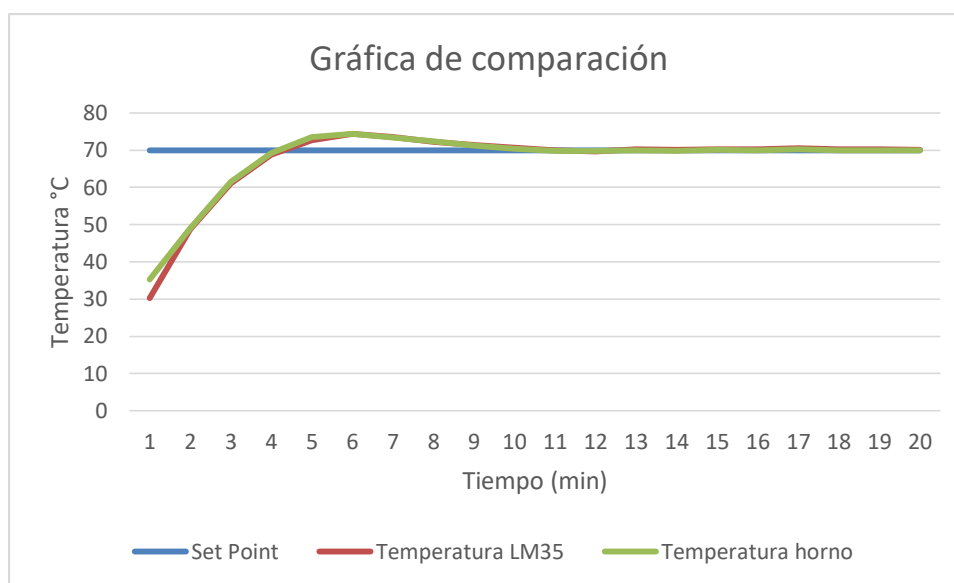
Set Point	Temperatura LM35	Temperatura horno
70	30,3	35,2
70	48,7	49
70	61,1	61,5
70	68,8	69,2
70	72,7	73,5
70	74,4	74,35
70	73,5	73,45
70	72,3	72,35
70	71,4	71,25
70	70,7	70,45
70	70	69,85
70	69,7	69,8
70	70,2	70
70	70,1	69,85
70	70,3	70,1
70	70,3	69,9
70	70,5	70,2
70	70,2	69,95

70	70,2	69,95
70	70,1	70

En la **Tabla 29** se puede observar los datos obtenidos en este periodo de tiempo de los sensores previamente mencionados.

Figura 53

Comparación de datos de sensores



Como se puede observar en la **Figura 53**, el error entre los sensores internos y externo del sistema es mínimo y el control de temperatura de dicho sistema es óptimo para el proceso requerido.

Funcionamiento del Modo Automático.

Prueba:

El modo automático fue puesto a prueba mediante las diferentes condiciones implementadas en el sistema, como la variación de los perfiles de temperatura, los sistemas de alerta, la habilitación y des habilitación de ciertas variables para que no interrumpan los procesos, etc.

Resultados:

Figura 54

Funcionamiento modo automático



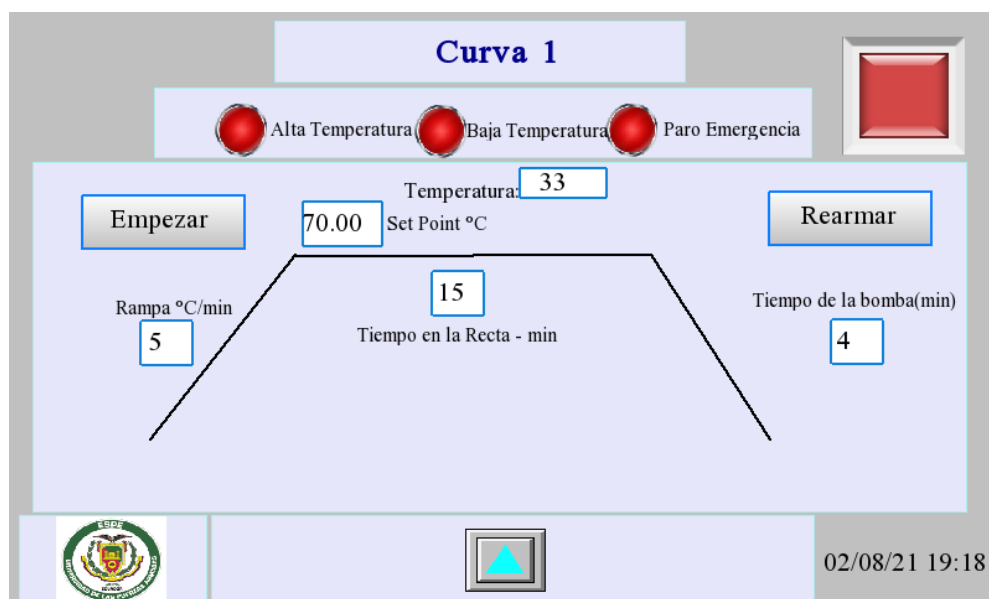
Como se muestra en la **Figura 54**, al ser habilitada una de los perfiles de temperatura del sistema automático, los otros dos perfiles de temperatura se deshabilitan. Las demás condiciones a tratar se explicarán a continuación.

Funcionamiento del perfil de temperatura 1.

Pruebas:

Figura 55

Funcionamiento del perfil de temperatura 1

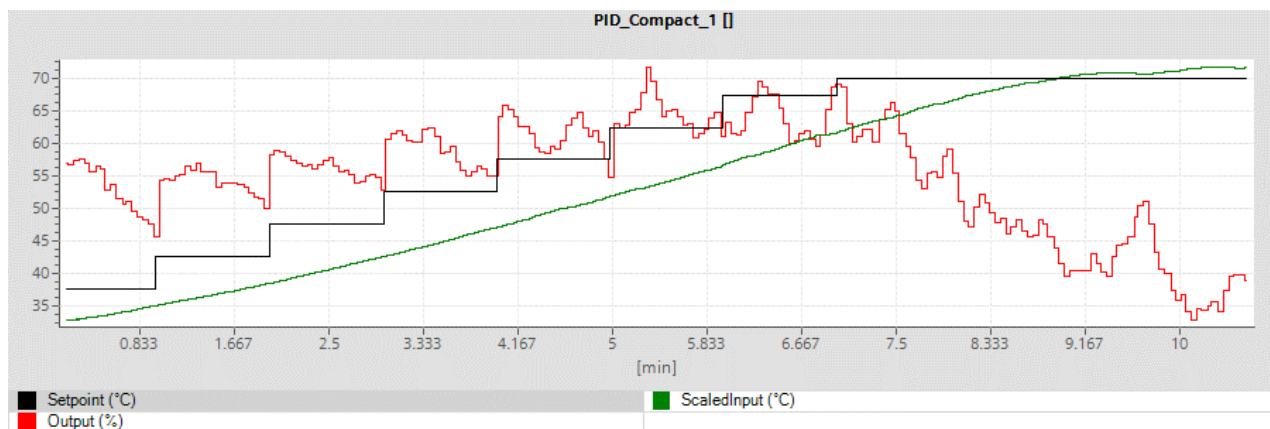


Como se muestra en la **Figura 55**, para la prueba del perfil de temperatura 1 se utilizó como variables de inicialización una rampa de 5 °C/min, un Set Point de 70°C y un tiempo en la recta de 15 minutos, gracias a esto se podrá visualizar como la temperatura va incrementando en el tiempo solicitado hasta llegar al Set Point donde se establecerá el tiempo de recta predefinido.

Resultados:

Figura 56

Resultado del perfil de temperatura 1



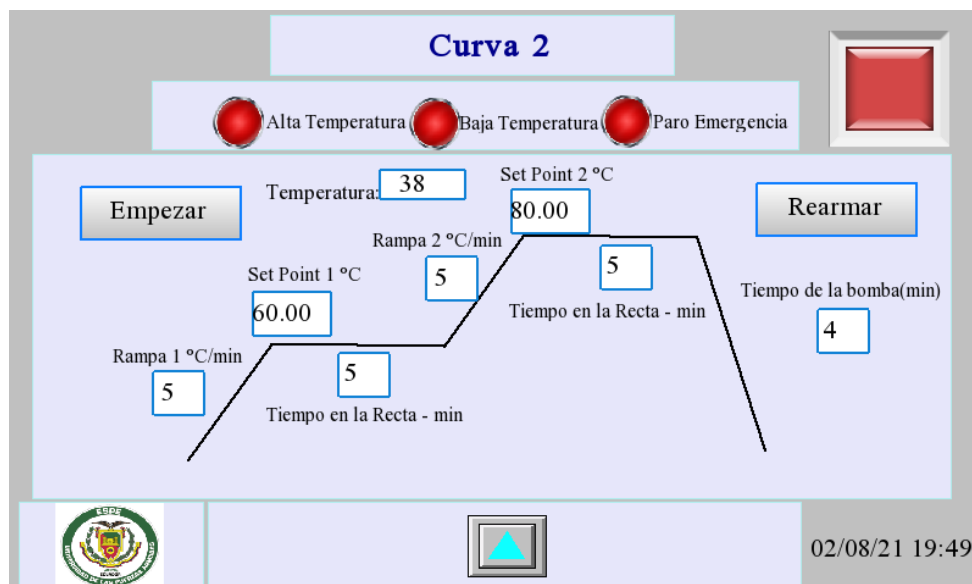
Como se muestra en la **Figura 56**, para controlar la rampa del perfil de temperatura 1 y la de los demás perfiles de temperatura, el Set Point que ingresa al control PID varía minuto a minuto según lo configura el operador en la pantalla de control. El perfil de temperatura de respuesta del controlador incrementa cada vez que el Set Point hace lo mismo, haciendo que la temperatura incremente siguiendo dicho perfil de temperatura, hasta llegar al Punto de referencia indicado, donde se mantendrá por el tiempo requerido.

Funcionamiento del perfil de temperatura 2.

Pruebas:

Figura 57

Funcionamiento del perfil de temperatura 2

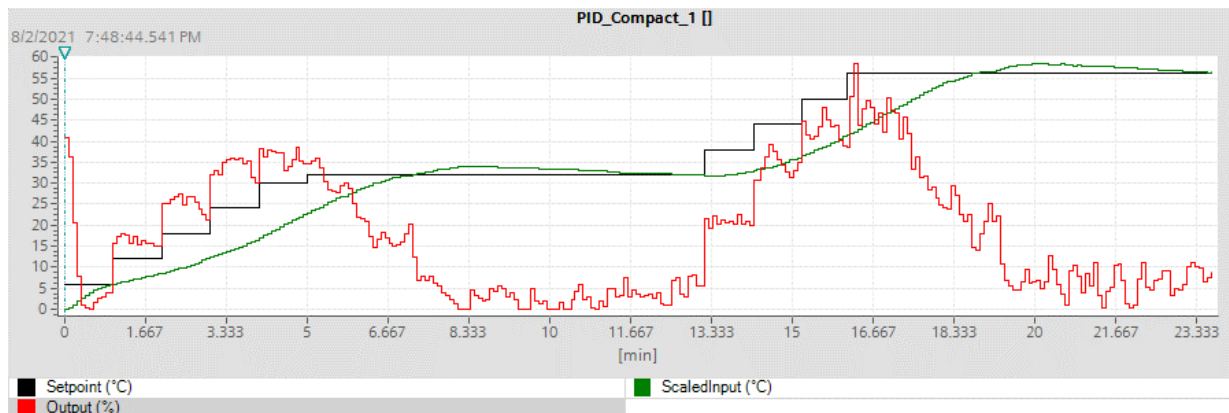


Como se muestra en la **Figura 57**, para la prueba del perfil de temperatura 2 se utilizó como variables de inicialización una rampa1 de 5 °C/min, un Set Point 1 de 60°C y un tiempo en la recta1 de 5 minutos, una rampa2 de 5 °C/min, un Set Point 2 de 80°C y un tiempo en la recta2 de 5 minutos, gracias a esto se podrá visualizar como la temperatura va incrementando en el tiempo solicitado hasta llegar a los Set Point donde se establecerá el tiempo de recta predefinido en cada una de las rampas.

Resultados:

Figura 58

Resultado del perfil de temperatura 2



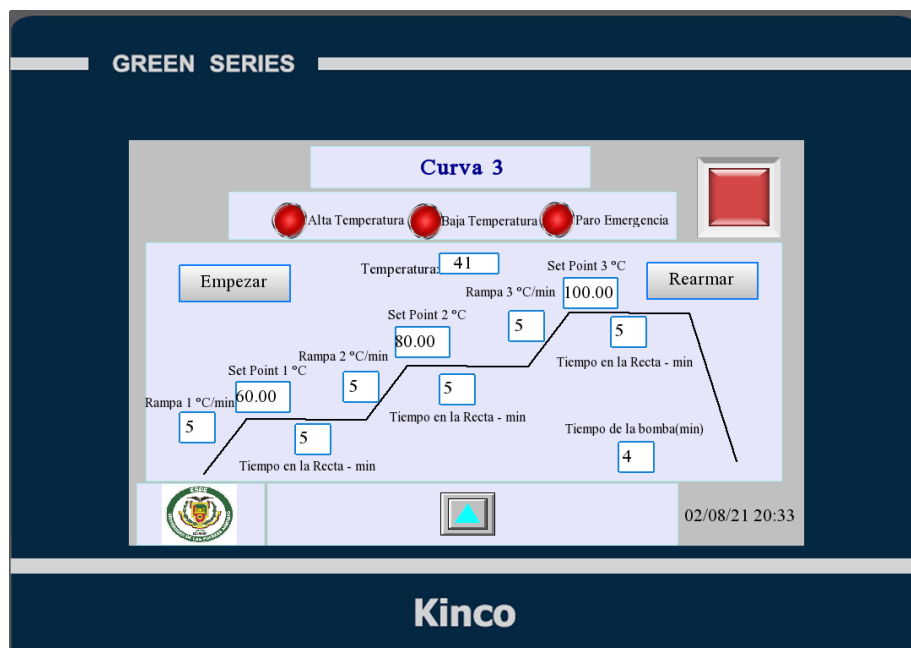
Como se muestra en la **Figura 58**, El Set Point en la primera rampa del perfil de temperatura 2 incrementa cada minuto 5°C como se inicializo en la pantalla de supervisión por el operador hasta llegar al Set Point 1 donde el controlador mantendrá la temperatura indicada según el tiempo establecido en Recta 1, una vez terminado este tiempo, el sistema incrementa el Set Point que ingresa al controlador PID, elevando la temperatura según se configura en Rampa 2, hasta llegar a un segundo Set Point 2, donde finalmente la temperatura se establecerá según el tiempo indicado.

Funcionamiento del perfil de temperatura 3.

Pruebas:

Figura 59

Funcionamiento del perfil de temperatura 3

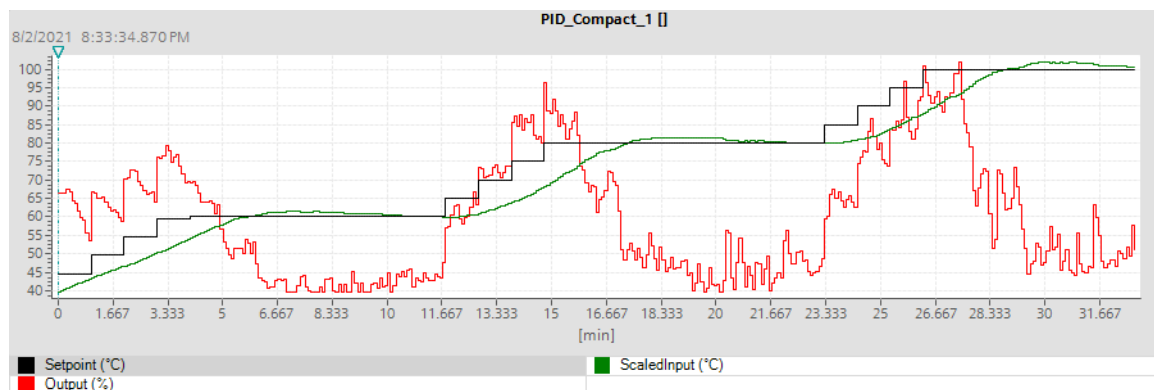


Como se muestra en la **Figura 59**, para la prueba del perfil de temperatura 3 se utilizó como variables de inicialización una rampa1 de 5 °C/min, un Set Point 1 de 60°C y un tiempo en la recta1 de 5 minutos, una rampa2 de 5 °C/min, un Set Point 2 de 80°C y un tiempo en la recta2 de 5 minutos y una rampa3 de 5 °C/min, un Set Point 3 de 100°C y un tiempo en la recta3 de 5 minutos, gracias a esto se podrá visualizar como la temperatura va incrementando en el tiempo solicitado hasta llegar a los Set Point donde se establecerá el tiempo de recta predefinido en cada una de las rampas.

Resultados:

Figura 60

Resultado del perfil de temperatura 3



Como se muestra en la **Figura 60**, El Set Point en la primera rampa del perfil de temperatura 3 incrementa cada minuto 5°C como se inicializo en la pantalla de supervisión por el operador hasta llegar al Set Point 1 donde el controlador mantendrá la temperatura indicada según el tiempo establecido en Recta 1, una vez terminado este tiempo, el sistema incrementa el Set Point que ingresa al controlador PID, elevando la temperatura según se configura en Rampa 2, hasta llegar a un segundo Set Point 2, donde la temperatura se establecerá según el tiempo indicado, una vez terminado el tiempo preestablecido de la recta 3, el sistema incrementa minuto a minuto el Set Point que ingresa al controlador PID, elevando la temperatura según se configura en Rampa 3, hasta llegar a un segundo Set Point 3, donde finalmente la temperatura se establecerá según el tiempo indicado.

Funcionamiento Modo Manual.

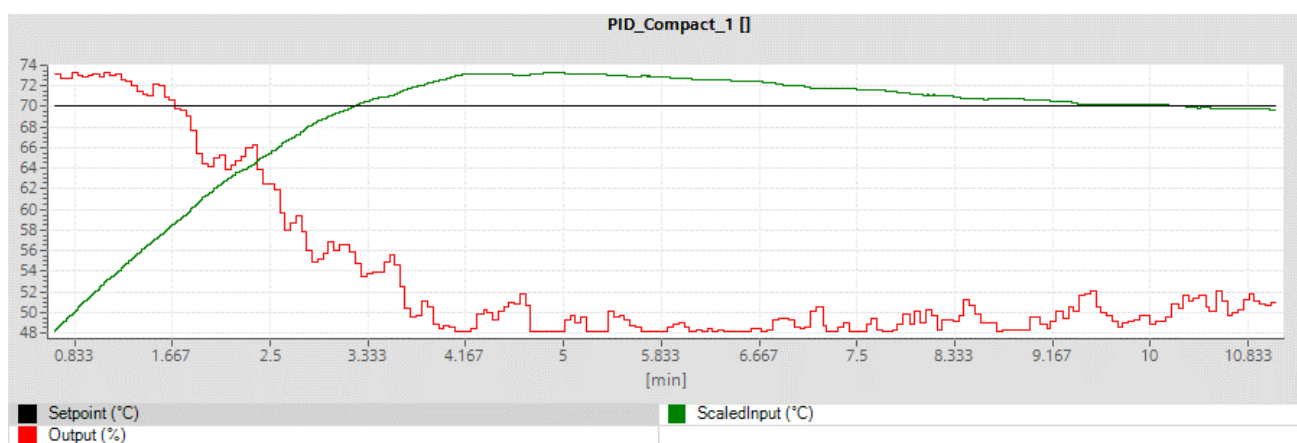
Pruebas:

Para las pruebas del modo manual se utilizó un Set Point de 70°C y un tiempo de recta de 15 minutos, así se puede observar como el controlador PID se adapta a los requisitos y lleva a la temperatura hasta dicho Set Point.

Resultados:

Figura 61

Resultado modo manual



Como se puede observar en la **Figura 61**, el controlador PID lleva a la temperatura hacia el Set Point requerido por el usuario y lo mantiene en dicha posición durante el tiempo configurado previamente.

Funcionamiento del Sistema de Supervisión.

Pruebas:

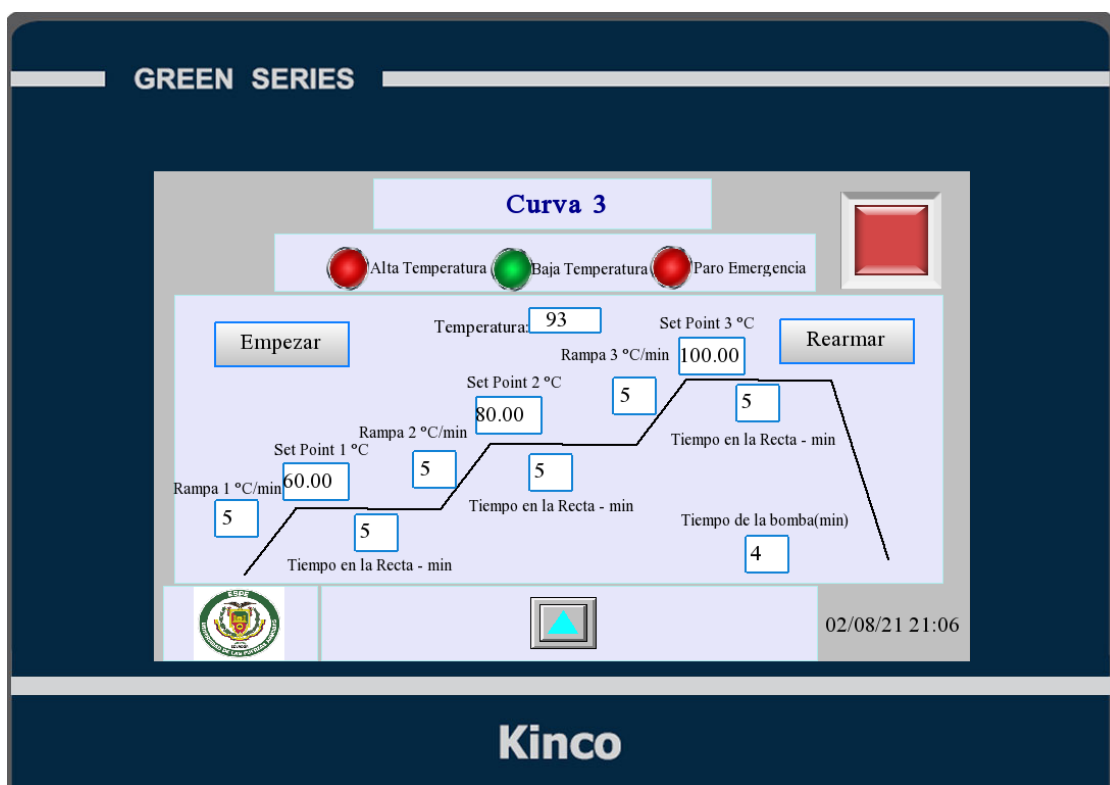
Para las pruebas de funcionamiento del sistema de supervisión, se tomó en cuenta que cada uno de los botones y recuadros de control funcionen de la manera correcta, apuntando a las direcciones del controlador necesarias para su mejor monitoreo y control, esto se puede observar en la **Figura 56**, **Figura 58** y **Figura 60**.

También se tomó en cuenta que los indicadores de fallo del sistema funcionen de manera correcta.

Resultados:

Figura 62

Indicador de fallo baja temperatura



Como se puede observar en la **Figura 62**, el Set Point3 es de 100°C y la temperatura en ese momento descendió a los 93°C, esto activo la alarma de temperatura baja, por lo tanto, el indicador correspondiente se encendió.

Figura 63

Indicador de fallo alta temperatura

Como se puede observar en la **Figura 63**, el Set Point es de 70°C y la temperatura en ese momento ascendió a los 76°C, esto activo la alarma de temperatura alta, por lo tanto, el indicador correspondiente se encendió.

Figura 64

Indicador de Paro de emergencia



Como se puede observar en la **Figura 64**, el paro de emergencia fue accionado, por lo tanto, se encendió el indicador correspondiente.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Se optimizó el proceso de pruebas y ensayos para reparaciones de materiales compuestos para reparaciones del avión Super Tucano, lo cual redujo tiempos operación y proporcionó mejores resultados en cuanto a las pruebas y ensayos realizados.
- Se realizó un sistema de control automático para medir los niveles de temperatura del horno autoclave, mediante la utilización de diversos dispositivos de instrumentación y control que permiten el monitoreo en tiempo real de los niveles de temperatura dentro del horno.
- Mediante lógica de programación se especificó ciertos parámetros de temperatura para el calentamiento del horno autoclave, y, por otro lado, apagar las niquelinas para evitar niveles de temperatura muy altos o no deseados.
- El sistema de control implementado tipo PID permite que el horno realice su operación en los tiempos y lineamientos de niveles de temperatura requeridos para los trabajos de reparaciones con una duración de 4 horas de funcionamiento continuo según los requerimientos solicitados.
- Se implementó un sistema de supervisión HMI en el que se cuenta con pantallas distribuidas por procesos y poseen su respectivo nivel jerárquico para la adecuada manipulación del operador y de esta manera poder monitorear en tiempo real el

adecuado funcionamiento del horno autoclave.

Recomendaciones

- Se debe tener presente las instrucciones del manual del uso para que no exista confusiones al momento de empezar la operación del horno autoclave.
- No se debe realizar el uso de materiales de baja calidad, ya que esto puede afectar a la seguridad del operador y adicional puede causar daños en los trabajos a realizarse, y tomando en cuenta que se va a trabajar con materiales aeronáuticos lo cual conllevaría a costosas pérdidas de materiales de aviación.
- Procurar que el personal de operadores utilicen prendas de protección ya que los niveles de temperatura con el que trabajara el horno son elevados y puede causar perjuicios a la salud de los operadores.

Referencias

ABB. (2015). *ABB Product Details* (ABB).

<https://new.abb.com/products/en/2CCF019034R0001/s803hv-k8-high-performance-mcb>

ABB. (2020). Library.e.abb.com. *ABB*.

https://library.e.abb.com/public/58e00a49211b690bc125786f00458cfb/ES_ACS150_UM_C_screen_res.pdf

Anónimo. (2010). EcuRed. *EcuRed*. https://www.ecured.cu/Red_en_%C3%A1rbol

Automation24. (2012). Siemens Logo. *Automation*. <https://www.automation24.biz/siemens-logo-12-24-rce-6ed1052-1md08-0ba0>

B&H. (2020). Ubiquiti Networks. *B&H*. https://www.bhphotovideo.com/c/product/1110516-REG/ubiquiti_networks_rocketm5_us_rocketm5_5_ghz_2x2.html?gclid=CjwKCAjwydP5BRBREiwA-qrCGjkgp_tR1-hw0TqooqrdeX5NgxXAse2aKBTiulSeFUZfIJKotIQOu_hoCbqwQAvD_BwE

Ciateq. (2012). Sistema de control supervisorio para agua potable. *Ciateq*.

<https://www.ciateq.mx/es/agua/228-sis-control.html>

Cpinstruments. (2020). Ametek. *Ametek*. <https://cpinstruments.com/wp-content/uploads/2020/02/manual-hidrostatico-sst-slimline.pdf>

Edward, D. B. (2019). mplementación de la norma ISA 1011, sobre las HMI pertenecientes a los módulos de instrumentación de la Universidad ECCI. *SEMINARIO INTERNACIONAL*, 3.

Elías Iriarte. (2015). Telemetría. *Electro Industria*.

<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2495>

EMAPALA EP. (2014). Conoce más sobre EMAPALA. *EMAPALA EP*.

<https://emapala.gob.ec/nosotros/historia/>

EMAPSQ. (2020). Distribución de Agua. *EMAPSQ*. <https://www.aguaquito.gob.ec/sistema-de-distribucion/>

Gobierno Nacional de la Republica del Ecuador. (2013). *NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC CAPÍTULO 15 INSTALACIONES ELECTROMECAÓNICAS*.

Goncalves, E. (2016). *Sensores de Presión. Instrumentación y Control Industrial*.

Gonzales. (2002). *Fundamentos de Instrumentación*.

Google. (2020). Google Earth. *Google*.

Granollers, P. (2020). *Diseño Industrial DISEÑO DE PANTALLA MIP*.

https://www.academia.edu/5166745/Dise%C3%B1o_Industrial_DISE%C3%91O_DE_PANTALLA_MIPO_M%C3%A1ster_en_Interacci%C3%B3n_Persona_Ordenador

harvest. (2018). CS-PT1200 Series. *Harvest*. <http://www.harvestalarms.com/pdf/PT1200.pdf>

Ing. Adrián David Sandoya Unamuno. (2018). *Norma Ecuatoriana de Construcción Instalaciones Eléctricas*.

Ingeniería Extraordinaria. (2019). Información Detallada sobre el Protocolo Modbus.

Ingeniería Extraordinaria. <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>

INNERGY ELECTRIC. (2015). INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HUMAN MACHINE

INTERFACE). *Innergy*. <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-electric/soluciones/software/hmi>

Itaca. (2014). *Abastecimiento de agua potable por gravedad con tratamiento*.

<https://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%20%20Gravedad/Manual%20Abastecimiento%20Agua%20Potable%20por%20gravedad%20con%20tratamiento.pdf>

Lacroix. (2016). *Soluciones para gestionar y optimizar el funcionamiento de las estaciones de*

bombeo. <https://www.lacroix-sofrel.es/aplicaciones/gestion-agua/soluciones-produccion-agua-potable/captacion-sondeo-bombeo/>

lyonnaise-des-eaux. (2006). Vigilancia y gestión de una estación de bombeo de aguas

residuales: la forma más sencilla, económica y flexible. *Lyonnaise-Des-Eaux*.

<https://www.prelectronics.com/es/about-pr/why-pr/case-lyonnaise-des-eaux/>

Mayur Gandhi. (2020). Sistemas de Control. *AUTYCOM*. [https://www.autycom.com/que-es-](https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-de-control)

[un-sistema-de-control](https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-de-control)

Mayur Ghandi. (2020). Redes Industriales. *Autycom*. [https://www.autycom.com/que-son-redes-](https://www.autycom.com/que-son-redes-industriales/)

[industriales/](https://www.autycom.com/que-son-redes-industriales/)

Naciones Unidas. (2020). Agua. *Naciones Unidas*.

NEC. (2018). Instalaciones Quito. *MIDUVI*.

OMEGA TM. (2020). Sensor de Nivel. *Omega TM*. <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>

Organización Mundial de la Salud. (2020). Guías para la calidad del agua potable, tercera edición: Volumen 1 - Recomendaciones. *OMS*.

https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/gdwq3/es/

Pedro Ruesca. (2016). Telemetría. *Radio Comunicaciones*.

<http://www.radiocomunicaciones.net/radio/telemetria/>

Roberto García. (2020). Elementos de Control y Maniobra. *Ingeniero Marino*.

<https://ingenieromarinero.com/electricidad-elementos-de-control-y-maniobra>

Rodríguez Fernández, J. (2014). Automatismos Industriales. *Parainfo*.

Sánchez, A. M. (2019). Interfaces Humano-Máquina para Sistemas de Automatización de Procesos. *InTech México Automatización*.

Sandoval, L. F. (2013). Sistema para control y gestión de redes de agua potable de dos localidades de México. *ISSN*.

Schneider Electric. (2005). *Vijeo-Designer Tutorial 35007041_01 Enero 2005 spa*.

Schneider Electric. (2015). Harmony GTO_HMIGTO5310. *Schneider Electric*.

<https://www.se.com/ww/en/product/HMIGTO5310/advanced-touchscreen-panel-640-x-480-pixels-vga--10.4%22-tft---96-mb/>

Siemens. (2012). Catálogo 5SL3204-7MB. *Siemens*.

<https://mall.industry.siemens.com/mall/es/ar/Catalog/Product/5SL3204-7MB>

Sierra, J. C., Romero, D., Universidad, L., de Bolívar, T., De, F., Eléctrica, I., & Electrónica, Y.

(2011). *TUTORIAL NORMA ISA S5.1 Y DIAGRAMAS P&ID*.

<https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0062398.pdf>

Terán, J. M. (2013). Manual para el Diseño de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado

Sanitario. *Universidad Veracruzana*.

Vallejo, H. D. (2006). Controladores Lógicos Programables. *Quark*.

Villajulca, J. C. (2019). Control ON OFF. *Instrumentación*.

<https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada/>

Villarreal, C. R. (2007). Controladores Lógicos Programables. *Mailxmail*.

Zenon, R. (2015). HMI. *Copadata*. [https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-](https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualization-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data)

[platform/visualization-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data](https://www.copadata.com/es/productos/zenon-software-platform/visualization-control/que-significa-hmi-interfaz-humano-maquina-copa-data)

ANEXOS