



**Diseño y construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la
fabricación de piezas aeronáuticas de la Dirección General de Logística de la Fuerza
Aérea Ecuatoriana**

Moromenacho Oña, Diego Patricio y Ojeda Llerena, Hércules Renato

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

31 de agosto del 2021

Urkund



Document Information

Analyzed document	Tesis Ojeda Moromenacho.pdf (D111919317)
Submitted	9/1/2021 1:59:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	6%
Analysis address	ilbbioteca.GDC@analysis.urkund.com



Sources included in the report

SA	TESIS HORNO AUTOCLAVE MARCELO SUAREZ.docx Document TESIS HORNO AUTOCLAVE MARCELO SUAREZ.docx (D54441577)	28
W	URL: https://aertecsolutions.com/2019/04/22/evolucion-de-los-materiales-aeronauticos/ Fetched: 9/1/2021 2:00:00 PM	1
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/13360/1/T-ESPE-057315.pdf Fetched: 7/23/2020 12:47:46 AM	1
W	URL: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5 Fetched: 9/1/2021 2:00:00 PM	1
W	URL: https://kupdf.net/download/temas-especiales-de-instrumentacion-y-control_5ce43cc5e2b6f5f6757f01f8_pdf Fetched: 3/18/2021 2:06:15 AM	1
W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11729/1/T-ESPE-053099.pdf Fetched: 12/17/2020 7:45:46 AM	7



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“Diseño y construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas de la Dirección General de Logística de la Fuerza Aérea Ecuatoriana”** fue realizado por el señor **Moromenacho Oña, Diego Patricio y Ojeda Llerena, Hércules Renato** 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, 02 de septiembre de 2021



Firmado electrónicamente por:
**HUGO RAMIRO
ORTIZ TULCAN**

Ing. Ortiz Tulcan, Hugo Ramiro Mgs.



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros **Moromenacho Oña, Diego Patricio y Ojeda Llerena, Hércules Renato**, con cédulas de ciudadanía n° 1722192554 y 1804808457, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas de la Dirección General de Logística de la Fuerza Aérea Ecuatoriana”** son de nuestra 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, 02 de septiembre de 2021

Firma



Firmado electrónicamente por:
**DIEGO PATRICIO
MOROMENACHO ONA**

Moromenacho Oña Diego Patricio
CI: 1722192554



Firmado electrónicamente por:
**HERCULES RENATO
OJEDA LLERENA**

Ojeda Llerena Hércules Renato
C.C. 1804808457



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros **Moromenacho Oña, Diego Patricio y Ojeda Llerena, Hércules Renato**, con cédulas de ciudadanía n° 1722192554 y 1804808457, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Diseño y construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas de la Dirección General de Logística de la Fuerza Aérea Ecuatoriana**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 02 de septiembre de 2021

Firma



Firmado electrónicamente por:
**DIEGO PATRICIO
MOROMENACHO ONA**

Moromenacho Oña Diego Patricio
CI: 1722192554



Firmado electrónicamente por:
**HERCULES RENATO
OJEDA LLERENA**

Ojeda Llerena Hércules Renato
C.C. 1804808457

Dedicatoria

“No hay fórmulas secretas para el éxito. Es el resultado de tu preparación, trabajo duro y aprender de los errores”

Colin Powell

Dedico este trabajo a Dios, quien me ha brindado sabiduría y fortaleza en momentos difíciles y por otorgarme la oportunidad de estudiar y terminar los mismos con éxito.

A mi madre María Tránsito, que es el pilar fundamental en mi vida, durante esta larga senda sin importar los altos y bajos, se ha mantenido a mi lado brindándome su apoyo y amor incondicional, por lo cual estaré agradecido eternamente.

A mi familia de manera general, que este logro es el resultado del apoyo incondicional que recibí por todos y cada uno de ellos, durante el camino de preparación académica y que su apoyo jamás se vio limitado sin importar las condiciones en las que se encontraban

A la Fuerza Aérea ecuatoriana que como institución me brindo la oportunidad de representarla en las aulas de Clase, colaborándome con el contingente humano y logístico para que este trabajo pueda llegar a culminarse y cumplir con el objetivo planteado.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron para que esta meta sea realidad, su ayuda, experiencia, guía de forma desinteresada y sobre la predisposición con la contaban es un gesto muy grato de admirar

Diego Patricio Moromenacho Oña

Dedicatoria

“Para el optimista, el vaso está medio lleno. Para el pesimista, el vaso está medio vacío. Para el ingeniero, el vaso es el doble de grande de lo que debería ser.”

Anónimo

Dedico este proyecto a las personas que han puesto su confianza en mí, mi madre Yolanda Llerena y mis hermanos, quien me han guiado y son el pilar fundamental en de mi vida, que durante todo el tiempo me han brindado sus consejos, su amor y sobre todo su confianza

A mis hermanos, Jenny, Marcelo y Juan que han estado conmigo en las buenas y las malas para brindarme su consejo y sabiduría dándome fortaleza para seguir con más ímpetu en mis metas planteadas

A mis sobrinos, Ismael Tapia y Alejandro Ojeda quienes están encaminados al mismo sistema y en especial a mi sobrino Martin Tapia quien a sido la persona que en cualquier aprieto estaba con su sonrisa dando ánimos y siendo el mismo, que Dios me lo tenga en la gloria. Igual manera a los más pequeños Santiago Ojeda y Karelis Ojeda de la familia que sigan el ejemplo

A todos y cada uno de mi familia que me han brindado su apoyo incondicional y fraterno ya que esto no sería posible sin cada uno de ustedes siempre me han brindado su bendición

De igual manera a todas las personas que de forma directa o indirecta han estado conmigo apoyándome y brindándome su paciencia, sabiduría y emociones.

Ojeda Llerena, Hércules Renato

Agradecimientos

Agradecido con Dios nuestro creador, por las bendiciones derramadas y por la oportunidad que me ha brindado de pasar por estas aulas de clase.

A mi amada madre María Transito, que sin ella este logro no habría sido posible, agradecido infinitamente por sus enseñanzas, humildad y sobre todo por el amor y sacrificio entregado, sin duda alguna es lo más importante en mi vida.

Con mi familia, abuelos, tíos, hermanos, primos entre otros, que todos de una u otra forma aportaron a este logro, estoy agradecido con todos y cada uno de ustedes, espero que este logro alcanzado hasta la fecha de hoy sirva de ejemplo para todos mis familiares, que el estudio es una aventura hermosa y que con trabajo y dedicación pueden alcanzar sus objetivos planteados.

Agradezco al Ing. Hugo Ortiz, por la predisposición prestada durante la ejecución de este proyecto, por solventar los problemas presentados sobre la marcha y guiarnos durante todo este tiempo. Espero en un futuro no muy lejano poder trabajar junto a él, que por el trabajo brindado se ha ganado mi respeto, admiración y un agradecimiento total.

A mis docentes, que durante la vida universitario a muchos llegue a considerarlos como mis amigos, que supieron compartir su conocimiento y experiencias para solventar los diferentes problemas presentados durante la carrera universitaria.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por los conocimientos impartidos y por hacer posible que haya culminado de forma exitosa esta etapa de mi vida, generando sobre mi un crecimiento tanto intelectual, profesional y sobre todo personal.

A la Fuerza Aérea Ecuatoriana por brindarme la oportunidad de cruzar por estas aulas de clase, que sin su aprobación no habría sido posible haber realizado y culminado de forma

exitosa mi carrera universitaria, por lo cual estaré en deuda toda mi vida, que de ahora en adelante pondré en práctica los conocimientos adquiridos en apoyo del desarrollo y crecimiento institucional.

Diego Patricio Moromenacho Oña.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por haber hecho posible culminar con esta instancia de vida y darme la fortaleza de seguir siempre para adelante nunca para atrás

A mi amada y querida madre Yolanda Alicia Llerena Silva que siempre ha estado a mi lado en las malas y buenas decisiones, siempre ha sido y será el pilar fundamental en mí, me ha brindado su consejo, buen genio, vivencias. Sin duda alguna madre usted es todo en mi vida, la mejor persona que e conocido y espero dedicar mi vida entera a hacerle sentir feliz y orgullosa.

Agradezco a mi hermana Jenny quien siempre estuvo ahí para darme ese empujoncito que necesitaba en esos momentos difíciles y para brindarme su consejo incondicional, a mi hermano Marcelo quien siempre estaba pendiente de cualquier novedad y me brindaba su confianza para seguir adelante. A mi hermano Juan quien de una u otra manera me apoyado con su conocimiento brindándome su confianza, apoyo, aventuras siempre a estado pendiente de mi gracias por todo eso hermanos y a mis sobrinos que siempre están ahí cuando uno se los necesita

Agradezco a mi familia entera quienes depositaron su apoyo total y confianza en poder lograr mis metas y sus sabios consejos el cual no permitieron abandonar lo ya planteado

Agradezco a mi tutor el Ing. Hugo Ortiz, por su tiempo y predisposición de poder culminar con este proyecto, guiándonos por un camino acorde y respondiendo todas las inquietudes, espero en algún futuro poder trabajar como colegas siendo una persona la cual se ganado mi respeto, admiración.

A los docentes que me han brindado su conocimiento y durante toda la trayectoria de la universidad se han ganado mi admiración y respeto, siempre con su consejo, brindándome su apoyo y respondiéndome siempre las inquietudes planteadas en el camino

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por brindarme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa universidad y que haga posible de culminar mi estudio mi más fuerte agradecimiento a todo su personal

A la Fuerza Aérea Ecuatoriana por haberme puesto y brindado las facilidades de poder pertenecer a esta institución, que sin su conformidad no hubiese sido posible. Mi agradecimiento eterno a tan noble institución que en mi futuro inmediato poder brindar todo mi conocimiento para su desarrollo y evolución institucional

GRACIAS A TODOS USTEDES

Ojeda Llerena, Hércules Renato

INDICE DE CONTENIDO

Urkund	2
Certificado de Tutor	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Agradecimiento	10
RESUMEN	27
ABSTRACT	28
Capítulo I: Estado Del Arte.....	29
Materiales compuestos.....	29
Materiales compuestos generales	29
Componentes de los materiales compuestos	31
La matriz	31
Propiedades de las matrices	32
El material de refuerzo	32
Clasificación de los materiales compuestos	34
Aplicación de los materiales compuestos	36
Importancia de los materiales compuestos en la industria aeronáutica	37
Técnicas de manufactura de materiales compuestos	38
Horno autoclave	39
Proceso general de fabricación de materiales compuestos	40
Componentes eléctricos	41
Circuitos eléctricos	41

Sensores de temperatura	45
Sistema de control.....	51
Sistema de control retroalimentado (lazo cerrado)	52
Sistema de control de lazo abierto.....	53
Controladores.....	54
Control automático	55
Controladores automáticos PID	56
Método de sintonización Ziegler & Nichols	61
Controlador lógico programable PLC.....	64
Transferencia de calor.....	68
Conducción	69
Convección	69
Radiación Térmica	70
Leyes básicas del análisis de la transferencia de calor.....	71
Sistema BPCS y SIS	74
Análisis y evaluación de riesgos del proceso.....	78
Aplicación de capas de protección de Sistemas de Seguridad no Instrumentados	81
Capítulo II: Diseño Mecánico	84
Introducción.....	84
Requerimientos del sistema	84
Seguridad.....	85
Parámetros de diseño	85
Diseño y selección de elementos y aislantes.....	86
Selección del material aislante.	86
Cálculo del aislamiento térmico adecuado para prototipo del horno autoclave	90

Variables ambientales requeridas.....	90
Dimensiones internas de horno autoclave.	91
Selección del ventilador.....	92
Determinación del ambiente convectivo.	98
Cálculos para el espesor del aislante.	101
Análisis estructural del horno.....	109
Análisis de la resistencia en la base (Soportes).....	111
Análisis de térmico dentro de la cámara de la Planta	114
Capítulo III: Diseño De Hardware Y Software	118
Requisitos	118
Requisitos de Temperatura	120
Requisitos de tiempo.....	120
Requisitos de operación	121
Diseño conceptual.....	121
Sistema SIS.	122
Controlador	123
Actuadores.....	123
Elementos receptores.....	124
Indicadores de funcionamiento.....	124
Sensores de temperatura	124
Instrumentación.....	124
Pantalla HMI.....	125
Elementos de control en el horno autoclave	125
Control de temperatura.....	125
Sistema indicador de funcionamiento.....	125

Control y supervisión del horno autoclave	126
Diseño del sistema de sensado de temperatura e instrumentación	127
Análisis.....	127
Criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura.	130
Instrumentación del sensor de temperatura.....	133
Elemento calefactor.....	138
Indicadores (luz piloto)	143
Elementos de maniobra.....	144
Paro de emergencia	144
Selector	145
Elementos de protección	146
Fusibles y porta fusibles	146
Disyuntor	147
Termostato	149
Elementos de accionamiento.....	150
Contactor electromagnético.....	150
Relé electromagnético.....	151
Relé de estado sólido (SSR)	151
Módulos PLC s7-1200.....	152
Fuente de poder 24 Vdc Logo.	152
Módulo de entradas analógicas SM1231 TC 4X16 bits	153
Módulo de salidas digitales SM1222	154
Tablero de control	156
Diagrama eléctrico.....	160
Diagrama de control	160

Diagrama de fuerza.....	161
Diagrama P&ID del horno autoclave.....	163
Grafcet proceso de secado y curado de materiales compuestos.....	166
Principal.....	166
Modo manual.....	167
Modo rampa simple.....	167
Modo rampa doble.....	168
Modo rampa triple.....	169
PWM.....	171
Descripción nomenclatura utilizada en los Grafcet.....	171
Controlador del sistema.....	172
Análisis.....	176
Sensado de la planta.....	177
Modelamiento de la planta.....	204
Cálculo y dimensionamiento del conductor.....	212
Calibre del conductor para las termorresistencias.....	212
Cálculo para obtener el calibre del conductor del ventilador.....	214
Desarrollo de interfaz HMI.....	216
Diseño HMI.....	216
Pantalla HMI.....	219
Entorno de programación.....	220
Comunicación.....	221
Análisis HMI.....	222

Variables a monitorear	223
Diseño sistema HMI	225
Capítulo IV: Pruebas Y Resultados	241
Pruebas y resultados.....	241
Estudio del comportamiento térmico.....	241
Análisis técnico del horno.....	242
Pruebas de inercia del horno a 100°C, 120°C y 130°C	243
Análisis de los sensores de la cámara del horno	246
Pruebas en base a requerimiento del cliente	248
Rampa simple	248
Rampa doble.....	249
Rampa triple.....	250
Análisis de resultados.....	251
Capítulo V: Conclusiones Y Recomendaciones	255
Conclusiones.....	255
Recomendaciones.....	256
Capítulo VI: Referencias Bibliográficas	257
Capítulo VII: Anexos	260

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rangos y dispositivos comunes de medición.....	48
Tabla 2 Características de los Controladores	60
Tabla 3 Análisis de Riesgo Método HAZOP (Parámetros).....	79
Tabla 4 Análisis de Riesgo Método HAZOP (Consecuencias).....	79
Tabla 5 Análisis de Riesgo Método en los Nudos de Control.....	79
Tabla 6 Comparación entre aislantes térmicos	86
Tabla 7 Evaluación de criterios por parte del fabricante	87
Tabla 8 Ponderación de criterios	88
Tabla 9 Datos Para la Interpolación.....	93
Tabla 10 Comparación de Ventiladores.....	94
Tabla 11 Ponderación de criterios según los usuarios.....	95
Tabla 12 Ponderación de criterios	96
Tabla 13 Evaluación de los fabricantes y usuarios en cuanto a precio	96
Tabla 14 Evaluación de los fabricantes y usuarios en todos los criterios.....	97
Tabla 15 Evaluación de los materiales	97
Tabla 16 Características del ventilador axial.....	98
Tabla 17 Tipos de transferencia de calor.....	103
Tabla 18 Valor orientativo del coeficiente de transferencia de calor	107
Tabla 19 Características y masa de la planta	109
Tabla 20 Peso de la Planta.....	110
Tabla 21 Requerimientos de Temperatura Horno Autoclave	120
Tabla 22 Requerimientos de Tiempo Horno Autoclave.....	120
Tabla 23 Requerimientos de operación Horno Autoclave	121
Tabla 24 Características Termocupla	128

Tabla 25 <i>Características PT100</i>	129
Tabla 26 <i>Características LM35</i>	129
Tabla 27 <i>Matriz de comparación Sensores de Temperatura</i>	130
Tabla 28 <i>Criterios de Evaluación Para el Sensor de Temperatura</i>	132
Tabla 29 <i>Comparación de Criterios de Evaluación</i>	132
Tabla 30 <i>Descripción A/I SM1231</i>	135
Tabla 31 <i>Rangos de Operación SM1231</i>	135
Tabla 32 <i>Características SM1231 AI 4X16</i>	137
Tabla 33 <i>Descripción y Nomenclatura Usado en los Graficets</i>	171
Tabla 34 <i>Formulas para Controlador Método Ziegler Nichols</i>	209
Tabla 35 <i>Variables de Control y Monitoreo HMI</i>	224
Tabla 36 <i>Tabla de Colores HMI</i>	230
Tabla 37 <i>Toma de datos sensor físico y sensor de la cámara</i>	246

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Red Conceptual de Materiales Compuestos</i>	30
Figura 2 <i>Generadores de energía eléctrica</i>	42
Figura 3 <i>Elementos receptores</i>	42
Figura 4 <i>Elementos de maniobra</i>	43
Figura 5 <i>Elementos de protección</i>	44
Figura 6 <i>Conductores Eléctricos</i>	44
Figura 7 <i>Contactor Electromagnético</i>	45
Figura 8 <i>Estímulos externos al sensor</i>	45
Figura 9 <i>Proceso del Sensor</i>	46
Figura 10 <i>Partes del Sensor de Temperatura</i>	47
Figura 11 <i>Sensor RTD</i>	49
Figura 12 <i>Sensor NTC PTC</i>	49
Figura 13 <i>Sensor LM35</i>	50
Figura 14 <i>Tipos de termocupla, rangos de operación</i>	51
Figura 15 <i>Bloques de un sistema de control</i>	52
Figura 16 <i>Sistema de Control Lazo Cerrado</i>	52
Figura 17 <i>Sistema de control lazo abierto (Kuo, 1996)</i>	53
Figura 18 <i>Estructura del controlador</i>	54
Figura 19 <i>Estructura control automático</i>	55
Figura 20 <i>Control ON/OFF</i>	57
Figura 21 <i>Diagrama de Acción Proporcional en el Error</i>	59
Figura 22 <i>Método Ziegler & Nichols en Lazo Abierto</i>	62
Figura 23 <i>Estructura del PLC</i>	64
Figura 24 <i>Diagrama General del PLC</i>	65

Figura 25 <i>Funcionalidad del PLC</i>	66
Figura 26 <i>Ciclo de Funcionamiento PLC (Griezmann, 2020)</i>	68
Figura 27 <i>Transferencia de Calor</i>	68
Figura 28 <i>Transferencia de Calor por Conducción</i>	69
Figura 29 <i>Transferencia de Calor por Convección</i>	70
Figura 30 <i>Transferencia de calor por radiación</i>	70
Figura 31 <i>Sistema BPCS y SIS</i>	75
Figura 32 <i>Nivel de Integridad en la Seguridad</i>	77
Figura 33 <i>Nivel de Integridad en la Seguridad</i>	77
Figura 34 <i>Nivel de Integridad en la Seguridad</i>	77
Figura 35 <i>Capas de Protección</i>	81
Figura 36 <i>Capas de Protección</i>	81
Figura 37 <i>Flujo de Calor</i>	89
Figura 38 <i>Esquema de Horno Autoclave Interior</i>	91
Figura 39 <i>Factor de Elevación de Temperatura</i>	93
Figura 40 <i>Característica de Ventilador</i>	97
Figura 41 <i>Ecuaciones Para los Coeficientes de Convección</i>	99
Figura 42 <i>Medición de la Velocidad del Viento</i>	100
Figura 43 <i>Variables Presentes en las Paredes del Horno</i>	102
Figura 44 <i>Resistencia Térmica en las Paredes del Horno.</i>	104
Figura 45 <i>Esquema Cámara Externa</i>	108
Figura 46 <i>Distribución de los soportes</i>	111
Figura 47 <i>Estructura del Horno</i>	112
Figura 48 <i>Resultado del Análisis Estructural</i>	112
Figura 49 <i>Peso Máximo de Deformación</i>	113
Figura 50 <i>Peso en Vigas</i>	113

Figura 51 <i>Resistencia Térmica y Datos Técnicos</i>	114
Figura 52 <i>Flujo de Calor de las Resistencias</i>	115
Figura 53 <i>Cargas y Temperaturas de la Cámara</i>	116
Figura 54 <i>Propiedades Acero Inoxidable 304 dadas por SOLIDWORKS</i>	116
Figura 55 <i>Cargas Térmicas y Mallado</i>	117
Figura 56 <i>Distribución de Calor</i>	117
Figura 57 <i>Distribución de Calor</i>	117
Figura 58 <i>Diagrama de Bloques Funcionamiento Horno Autoclave</i>	121
Figura 59 <i>SM 1231 TC</i>	134
Figura 60 <i>Diagrama de Cableado SM1231 TC</i>	136
Figura 61 <i>Circuito Paralelo</i>	139
Figura 62 <i>Circuito Equivalente</i>	140
Figura 63 <i>Termorresistencia Tipo M</i>	143
Figura 64 <i>Luces Piloto Proceso Horno Autoclave</i>	143
Figura 65 <i>Pulsador Paro de Emergencia</i>	145
Figura 66 <i>Selector 2 Posiciones NA</i>	145
Figura 67 <i>Fusible de 6 Amperios</i>	147
Figura 68 <i>Porta fusible para Riel DIN</i>	147
Figura 69 <i>Disyuntor 3 Polos, 40 Amperios</i>	148
Figura 70 <i>Termostato 300°C NC</i>	149
Figura 71 <i>Contactador Electromagnético 220Vac, 22 Amperios</i>	150
Figura 72 <i>Relé Electromagnético 220Vac 5A</i>	151
Figura 73 <i>SSR 40 amperios ac</i>	152
Figura 74 <i>Fuente de poder 24Vdc Logo 8</i>	153
Figura 75 <i>Diagrama de cableado SM 1231 TC</i>	153
Figura 76 <i>SM 1222 DQ 16 x 24 Vdc</i>	154

Figura 77 Módulo SM1222 DQ 16 X 24 Vdc.....	155
Figura 78 Tablero tipo armario eléctrico 30x40x20 cm	157
Figura 79 Vista Frontal Tablero OFF.....	157
Figura 80 Vista Frontal Tablero ON.....	158
Figura 81 Vista Interna Tablero Eléctrico Trasera Panel HMI	159
Figura 82 Vista Interna Tablero Eléctrico.....	159
Figura 83 Diagrama de Control Horno Autoclave	160
Figura 84 Diagrama de Fuerza Horno Autoclave.....	161
Figura 85 Diagrama P&ID Horno Autoclave.....	163
Figura 86 Diagrama P&ID Sistema BPCS y SIS.....	163
Figura 87 Diagrama de Flujo Sistema SIS.....	164
Figura 88 Grafcet Principal.....	166
Figura 89 Grafcet Proceso Modo Manual	167
Figura 90 Grafcet Proceso Automático Rampa Simple.....	167
Figura 91 Grafcet Proceso Automático Rampa Doble	168
Figura 92 Grafcet Proceso Automático Rampa Triple.....	169
Figura 93 Grafcet Proceso Automático Bloque PWM	171
Figura 94 Descripción PLS Siemens SIMATIC S7-1200.....	174
Figura 95 SIMATIC S7-1200 Módulos de Expansión.....	175
Figura 96 Impulso Unitario al Sistema	177
Figura 97 Diagrama de Bloques Modelamiento de la Planta	178
Figura 98 Termocupla Tipo K.....	197
Figura 99 Módulo MAX6675.....	198
Figura 100 Arduino Uno	199
Figura 101 Matlab y Simulink (Mathworks, 2018)	201
Figura 102 Respuesta de la planta a 3000 muestras.....	203

Figura 103 Respuesta de la planta a 4000 muestras.....	203
Figura 104 Curva PID Tuner.....	205
Figura 105 Parámetros P,I,D, PID Tunner 1	206
Figura 106 Parámetros P,I,D, PID Tunner 2	206
Figura 107 Resultado planta.....	206
Figura 108 Parámetros P,I,D PID_COMPACT.....	207
Figura 109 Prueba de parámetros PID_COMPACT a 150°C.....	208
Figura 110 Método Ziegler Nichols	209
Figura 111 Sintonización Ziegler-Nichols Horno Autoclave.....	210
Figura 112 Parámetros P, I, D.	212
Figura 113 Hoja Técnica THHN-FLEX.....	214
Figura 114 Hoja Técnica THHN-FLEX.....	216
Figura 115 Diagrama de Flujo HMI Principal	217
Figura 116 Diagrama de Flujo HMI Monitoreo Proceso	218
Figura 117 Diagrama de Flujo HMI Modo Operación.....	218
Figura 118 HMI Kinco GL070E.....	220
Figura 119 Proceso de Uso Kinco DTools	221
Figura 120 Conexión HMI Kinco-PPLC S7-1200	221
Figura 121 Interacción Operario-HMI	222
Figura 122 Norma ISA 101 para el diseño de HMI.....	223
Figura 123 Software Kinco DTools	225
Figura 124 Pantalla Start Kinco DTools.....	225
Figura 125 Proceso Para el Diseño HMI.....	227
Figura 126 Jerarquía niveles pantalla HMI	227
Figura 127 Navegación pantallas HMI.....	228
Figura 128 Formato de Pantalla Presentación Inicio.....	231

Figura 129 <i>Formato de Pantalla Presentación Inicio Programada</i>	231
Figura 130 <i>Formato de Pantalla de Menú</i>	232
Figura 131 <i>Formato de Pantalla de Menú Programada</i>	232
Figura 132 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo de Proceso</i>	233
Figura 133 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo del Proceso Programada</i>	234
Figura 134 <i>Formato de Pantalla de Operación de Proceso</i>	234
Figura 135 <i>Formato de Pantalla de Operación de Proceso Programada</i>	235
Figura 136 <i>Formato de Pantalla de Estado o Visualización del Proceso</i>	235
Figura 137 <i>Formato de Pantalla de Estado o Visualización del Proceso Programada</i> .	236
Figura 138 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Simple</i>	236
Figura 139 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Simple</i> <i>Programado</i>	237
Figura 140 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Doble</i>	237
Figura 141 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Doble</i> <i>Programado</i>	238
Figura 142 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Triple</i>	238
Figura 143 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Triple</i> <i>Programado</i>	239
Figura 144 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Modo Manual</i>	239
Figura 145 <i>Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Modo Manual</i> <i>Programado</i>	240
Figura 146 <i>Configuración del módulo SM1231 TC</i>	241
Figura 147 <i>Límites de la planta</i>	243
Figura 148 <i>Curva de temperatura vs tiempo con un set point de 100°C</i>	243
Figura 149 <i>Curva de Temperatura vs Tiempo con un Setpoint de 120°C</i>	244
Figura 150 <i>Curva de temperatura vs tiempo con un set point de 130°C</i>	245

Figura 151 <i>Muestra de datos de los sensores</i>	247
Figura 152 <i>Rampa simple</i>	248
Figura 153 <i>Rampa Doble</i>	249
Figura 154 <i>Rampa Triple</i>	250
Figura 155 <i>Funcionamiento de la curva de ascenso a 5(°C)/min</i>	251

RESUMEN

El presente documento describe el proceso de diseño de la estructura mecánica y electrónica para la automatización en un horno autoclave, mismo que será utilizado en la fabricación de materiales compuestos para reparaciones estructurales de piezas de fuselaje en las aeronaves de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. Se incluyen diagramas eléctricos, interconexión, simulaciones, diagramas de tuberías e instrumentación, detalle del sistema BPCS y sistema SIS, técnica de control, diseño estructural de la estructura mecánica del horno, detalles del control PID implementado en busca de mantener el control de temperatura en el interior de la cámara del horno en base a los requerimientos del usuario. Se implementó la interfaz HMI para el monitoreo y control, con un diseño amigable con el operador fácil de manejar. El rango de operación del horno autoclave es de 25 a 260 °C, con un rango máximo tolerable de operación de hasta 450°C, que son los rangos solicitados por el usuario. Durante la implementación del control se hizo el análisis de la mejor técnica de control, realizando un correcto funcionamiento del horno autoclave. Al completar de forma satisfactoria el control de temperatura para el curado y secado de materiales compuestos durante el tiempo determinado, permite la polimerización de los materiales de una forma correcta y adecuada, obteniendo el producto final con una alta calidad y listo para ser utilizado como repuesto en las aeronaves que requieran de las flotas de Fuerza Aérea Ecuatoriana.

PALABRAS CLAVE

- **CONTROL PID**
- **MATERIALES COMPUESTOS**
- **SISTEMA PBCS Y SIS**
- **INTERFAZ HMI**

ABSTRACT

This document describes the design process of the mechanical and electronic structure for automation in an autoclave furnace, which will be used in the manufacture of composite materials for structural repairs of fuselage parts in aircraft of the Ecuadorian Air Force. Electrical diagrams, interconnection, simulations, piping and instrumentation diagrams, detail of the BPCS system and SIS system are included, control technique, structural design of the mechanical structure of the furnace, details of the PID control implemented in order to maintain temperature control inside the furnace chamber based on the user's requirements. The HMI interface for monitoring and control was implemented, with an easy-to-handle operator-friendly design. The operating range of the autoclave furnace is from 25 to 260 °C, with a maximum tolerable operating range of up to 450°C, which are the ranges requested by the user. During the implementation of the control, the analysis of the best control technique was made, performing a correct operation of the autoclave furnace. By satisfactorily completing the temperature control for the curing and drying of composite materials during the given time, it allows the polymerization of materials in a correct and appropriate way, obtaining the final product with a high quality and ready to be used as a spare in the aircraft that require the fleets of the Ecuadorian Air Force.

KEY WORDS

- PID CONTROL

- COMPOSITE MATERIALS

- PBCS AND SIS SYSTEM

- HMI INTERFACE

Capítulo I: Estado Del Arte

Materiales compuestos

Materiales compuestos generales

Los materiales compuestos, se los define como una combinación o todo un sistema de materiales constituidos en función de la unión de dos o más materiales, dando lugar a un nuevo material con características específicas o mejoradas, donde son combinadas las propiedades de los materiales, obteniendo la mejor combinación posible. Los polímeros naturales procedentes de plantas y animales han sido utilizados ya que tienen importancia en diversos procesos bioquímicos y fisiológicos, dichos polímeros como los metálicos o cerámicos se los relaciona a la estructura elemental de un material compuesto.

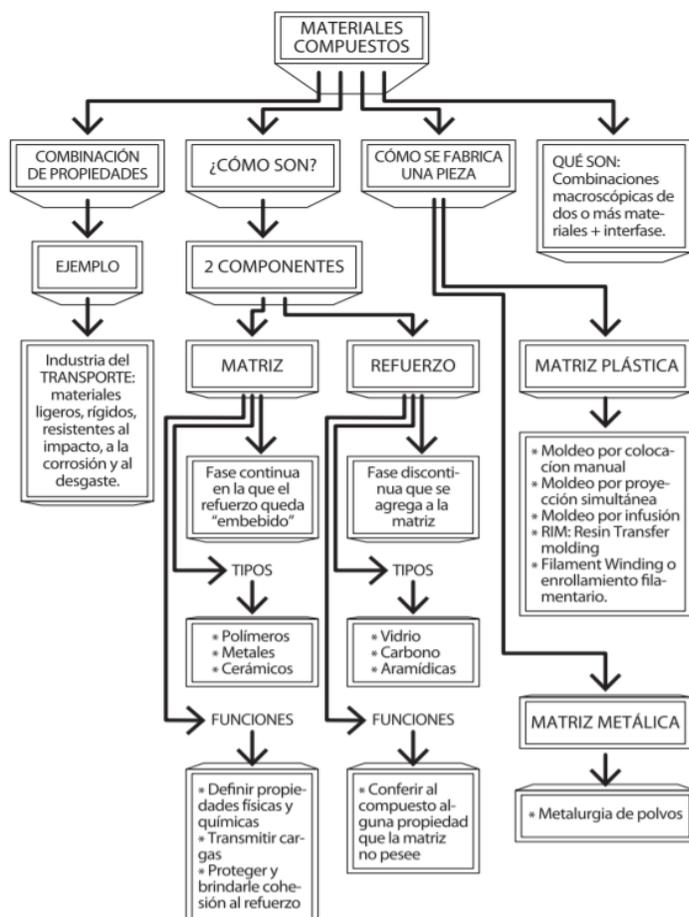
En gran parte las tecnologías modernas requieren materiales compuestos con diversas propiedades, imposibles de conseguir con los elementos convencionales. Esto es muy evidente en aplicaciones espaciales, subacuáticas y transportes. (Callister, 1995)

No existe una definición realmente adecuada de un material compuesto, pero consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente, se los fabrica mezclando diferentes materiales, las propiedades son superiores y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los componentes por separado (Hull, 2003)

Los materiales compuestos, llegan a obtener características excepcionales, diseñados para usarse en aplicaciones prácticas y cotidianas, el problema que presenta es un alto costo y complejidad en la elaboración. La (Figura 1) presenta la red conceptual de los materiales compuestos

Figura 1

Red Conceptual de Materiales Compuestos



Nota: Obtenido de (Stupenengo, 2011)

En la década de los setenta aparecen los primeros programas para los aviones de combate de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, con el objetivo de promover estructuras aeronáuticas realizadas en materiales compuestos. No obstante, en el transcurso del tiempo se incorpora para los Boeing 767 (Tsai & Miravete, 1988). Actualmente, estos materiales compuestos son de gran utilidad en la industria aeronáutica y aplicaciones afines, donde se puede obtener materiales que sean resultado de combinaciones, buscando obtener mejores propiedades de los mismos.

Componentes de los materiales compuestos

Para resolver las interrogantes que surgen de, ¿qué son los materiales compuestos y el motivo del por qué se los necesita?, se deben de conocer las características que poseen y como están relacionadas la matriz y el esfuerzo.

La matriz

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda 'embebido'. Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. Sin tomar en cuenta a los materiales cerámicos, el material usado en la matriz, normalmente no es tan fuerte, rígido o resistente que el material que se usa en refuerzo.

Funciones de la matriz:

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

En base al tipo de carga mecánica que es sometido el material compuesto, la matriz juega diferentes roles:

- Bajo cargas compresivas: la matriz soporta el esfuerzo, al tratarse de la fase continua
- En tracción: se transfiere la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las partículas de la matriz, de esta forma las partículas y fibras son las que soportan el esfuerzo.

Además, muchas veces es la matriz la que determina la resistencia al impacto y la encargada de detener la propagación de fisuras. (Stupenengo, 2011)

Propiedades de las matrices

- Responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.
- Evita propagación de grietas en las fibras a lo largo del compuesto
- Protección de daños durante uso y manufactura
- Transfiere las cargas a las fibras fuertes
- Soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta
- Las matrices poliméricas son las más comúnmente utilizadas, así como también la mayoría de polímeros están disponibles en el mercado.

Los compuestos de matriz metálica incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas y metálicas, con los cuales se cubren una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. (Hull, 2003)

El material de refuerzo

Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, también, se emplean refuerzos para mejorar la resistencia a temperaturas o a la abrasión.

El refuerzo se forma de partículas o de fibras, es más efectivo en cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz referente a la relación longitud/diámetro de la fibra.

En un amplio número de tipos de materiales compuestos, los más comunes o utilizados son aquellos que están reforzados con fibras.

En la mayoría de compuestos reforzados con fibras, estas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. (Tsai & Antonio , 1988)

Las fibras más utilizadas son las de vidrio, carbono y aramida, las cuales poseen una resistencia a la tracción extremadamente alta.

Fibra de vidrio

El vidrio utilizado como material de refuerzo es más resistente que el acero y que otros materiales.

Son las fibras más utilizadas comúnmente, en principio porque su costo es menor que las de carbono o aramídicas.

Las aplicaciones más comunes son:

1. Carrocerías de automóviles y barcos
2. Recipientes de almacenaje
3. Industria de transporte

Fibra de carbono

La fibra de carbono usada en la actualidad como refuerzo de materiales compuestos se fabrica a partir de un polímero llamada poliacrilonitrilo (PAN), a través de un complicado proceso de calentamiento.

Las fibras de carbono tienen alta resistencia mecánica y alta rigidez, pero son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía. Es muy utilizado en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil

Fibras orgánicas

La aramida es un filamento orgánico que provienen de ciertos derivados del petróleo, son utilizadas en fibras compuestas, como en las fibras de kevlar.

Poseen una alta resistencia al impacto y la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico. Utilizadas en cables, sistemas balísticos y de armamento

Fibras naturales

Debido a la utilización de materiales reforzados con fibras que son más económicas y de menor impacto medioambiental, se refuerzan muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o fibra de coco

Cabe recalcar que, cuando las fibras provienen de vegetales, el impacto medioambiental total de la fabricación de las piezas es mucho menor. Se está dedicando mucho esfuerzo de investigación en la fabricación de materiales compuestos totalmente 'ecológicos' o 'verdes', y se provee que su producción aumente en el futuro (aunque actualmente los precios son mayores que los análogos obtenidos del petróleo). (Miravete, 2003)

Clasificación de los materiales compuestos

De acuerdo al refuerzo

Materiales compuestos reforzados con partículas. A su vez estos materiales se clasifican en reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión

Consolidados por dispersión son aquellos que poseen sus partículas dispersas, la resistencia de estos materiales decrece en menor medida al incrementarse la temperatura, algunos ejemplos son: contactos eléctricos, rejillas de batería, filamento de calentadores industria aeroespacial y en reactores nucleares.

Compuestos con partículas grandes, estos materiales están diseñados para producir combinaciones poco usuales y mejorar la resistencia mecánica. Un claro ejemplo es el hormigón.

Materiales compuestos reforzados con fibras. La mayoría de estos consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso. Se emplean en muchos tipos de materiales de refuerzo

Materiales compuestos estructurales. Conformado por materiales compuestos como también por materiales homogéneos y sus propiedades no solo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los mismos. Existen 2 tipos que son los materiales compuestos laminares y los paneles sándwich (Callister, 1995)

De acuerdo a la matriz

Existe una clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

- **Compuestos de matriz polimérica:** son los más comunes. También se los conoce como polímeros (o plásticos) reforzados con fibras. La matriz es un polímero y una variedad de fibras, tales como las de vidrio, las de carbono o las aramídicas, se utilizan como refuerzos
- **Compuesto de matriz metálica:** se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están formados por metales 'livianos' como el aluminio como matriz y fibras de refuerzo como las de carburo de silicio
- **Compuesto de matriz cerámica:** se utilizan en aplicaciones de alta temperatura. Estos materiales están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers de carburo de silicio o nitruro de boro

Fuente: (Tsai & Antonio , 1988)

Aplicación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos fabricados por le CIDFAE que, trabaja en conjunto con la UFA-ESPE en las instalaciones del hangar del CICTE, donde se encuentra el taller de materiales compuestos que cuenta con personal técnico especialista en la elaboración de materiales compuestos destinado a aplicaciones en beneficio de las flotas de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

Los trabajos de este laboratorio están orientados a la reparación y fabricación de partes y componentes de las diversas flotas de la Fuerza Aérea que presenten problemas, daños o averías en su fuselaje.

Actualmente se están llevando a cabo ensayos destinados a la aeronave SUPER TUCANO A-29B en reparaciones y fabricación de piezas de repuestos, donde combinan diversas fases de materiales, principalmente las de Fiberglas cloth width y carbón fiber 284-50.

El trabajo realizado ha permitido por primera vez en nuestro país, la reparación de un componente de una aeronave de combate con materiales compuestos. La pieza es un componente del ala delantera del fuselaje de la aeronave A-29b Super Tucano, mismo que sufrió un daño por un impacto en aire con un ave, lo que afecto directamente a su operatividad.

Para llevar a cabo dicho logro, fue realizado un trabajo de ingeniería inversa, motivo de no poseer manuales de reparación para materiales compuestos de este modelo (A-29B), aportando tecnológicamente con los procedimientos y métodos idóneos de reparación de los componentes aeronáuticos afectados por daños GOUGE (delaminación por impacto).

Este es el primer procedimiento y método de reparación validado, lo que constituye un hito histórico en el desarrollo de la industria aeronáutica de Ecuador, y ubica a los actores del

proyecto como pioneros en la industria aeronáutica nacional en la reparación de piezas de aviación a base de materiales compuestos.

Dicho componente aeronáutico reparado se entregó al Escuadrón de Mantenimiento de Sistemas Aeronáuticos N° 2323 del Ala de Combate N° 23 de Manta y fue instalado en la aeronave A-29B Super Tucano, retomando la operatividad de dicha aeronave, cabe recalcar que hasta el momento cuenta con más de 100 horas de vuelo desde su instalación.

Con este hito histórico se llega a un alcance significativo de la dependencia tecnológica extranjera, reducción de costos logísticos, mantenimiento, reparación y manufactura, mismos que benefician de forma directa a la operatividad de las Fuerzas Armadas del Ecuador.

Importancia de los materiales compuestos en la industria aeronáutica

Los primeros materiales usados en la aviación se resumen en tela y madera. Madera, mucho más ligera que los aceros de la época y cuyo peso permitiría alzar vuelo con motores de hasta 100 HP durante la primera guerra mundial. Tela, que haría de fuselaje externo y proporciona el contorno aerodinámico requerido.

La importancia nace a razón del incremento de la demanda de potencia, aumento en dimensiones y capacidades del avión.

Actualmente los materiales compuestos se usan en la industria aeronáutica, ofreciendo ventajas como reducción del peso, aprovechando la carga útil y menor potencia durante el uso de la aeronave, la resistencia y rigidez es relativamente mejor en comparación al uso de materiales estructurales usados de manera convencional.

De esta forma, se cumple con el objetivo claro: conseguir disminuir el peso aún más empleando las nuevas tecnologías disponibles, afinar la aerodinámica y a la vez, desarrollar

nuevos motores que genere igualdad o superioridad en el empuje, obteniendo un menor uso de potencia.

Precisamente en lo que respecta a la disminución de peso y a la obtención de un mayor alcance operativo, junto con el incremento de la seguridad en vuelo y el retraso de la aparición del fenómeno de la fatiga del componente aeronáutico, lo que llevo a finales del siglo XX a incorporar paulatinamente los materiales compuestos (Pérez, 2012).

Los materiales compuestos han aumentado su presencia considerablemente hasta integrar el 50% de los últimos modelos de los grandes fabricantes de aeronaves: el A350 XWB de Airbus y el B787 Dremliner de Boeing (Ferrer, 2019).

Técnicas de manufactura de materiales compuestos

Entre los diversos procesos de manufactura referente a los materiales compuestos, donde se realiza la acción de combinar diferentes tipos de fibras como refuerzos, agentes curativos, resinas y demás materiales necesarios para el curado; los diversos procedimientos en el laboratorio de materiales compuestos, en el proceso de manufactura se consideran varios parámetros como son:

1. Costo de fabricación del compuesto y repuesto
2. Numero de partes a fabricar
3. Acabados de las componentes aeronáuticas
4. Propiedades mecánicas del componente
5. Procedencia y naturaleza de los materiales
6. Geometría y constitución de la pieza
7. Dimensiones del componente a reparar o fabricar

Entre los cuales se pueden destacar varios procesos de manufactura realizados por el fabricante como lo son: modo abierto y cerrado

Donde se destacan para modo abierto: autoclave, filamento winding, bolsa de vacío, spray-up, hand lay-up; y los de modo cerrado que son: infusión, moldeo por transferencia de resina, pultrusion, moldeo prensado en frío o caliente.

El método elegido a realizar es el de método de horno por autoclave

Horno autoclave

La tecnología autoclave comprende de un recipiente de presión metálico con paredes gruesas con un cierre hermético que permite trabajar a alta presión para realizar una reacción industrial, una cocción o una esterilización con vapor de agua a fin de desinfectar materiales e instrumentos quirúrgicos

El equipo autoclave que se llevará a cabo hace referencia al usado para los materiales compuestos, siendo un recipiente o vasija (normalmente de forma cilíndrica) con un sistema de temperatura y presurización, que se utiliza para el curado y consolidación de los materiales compuestos.

El tamaño del horno autoclave a diseñarse, depende de la aplicación, o del tipo de piezas a procesar, normalmente esta técnica es utilizada por la industria aeronáutica, donde el tamaño de los recipientes varía de forma considerable, esto debido a que las piezas de fuselaje de aviación no poseen un tamaño estándar teniendo en cuenta las diferentes partes de una aeronave (alas-alerón-fuselaje-timón-estabilizador-flaps)

La tecnología autoclave, cumple diferentes acciones para llegar a una deshidratación eficaz, como parte de un proceso, este horno usado comúnmente para la deshidratación de

reactivos de los diferentes materiales compuestos, funciona generalmente en temperaturas comprendidas de 50 y 300 °C

Los componentes principales de una autoclave para materiales compuestos son:

- Cámara encargada de presurizar: vasija o recipiente propiamente dicha, en la que se introducen los componentes a curar
- Dispositivo de calentamiento: encargados de emitir la energía calorífica en sus diferentes niveles de temperatura para el curado de los diversos materiales a tratar.
- Sistema de vacío: es la parte fundamental para el proceso de fabricación de un laminado de material compuesto. Compacta el primer laminado, elimina componentes volátiles de la resina y permite el aplique de presión sobre la pieza a elaborar manteniéndola al margen con la atmósfera de la autoclave. Elimina la cantidad de resina sobrante y consiguen buenos acabados superficiales de la pieza aeronáutica
- Sistemas de control: asegura en todo momento el monitoreo y control de las condiciones de temperatura y presión adecuadas para el proceso

Proceso general de fabricación de materiales compuestos

Los materiales compuestos fabricados en base de matriz polimérica son más ligeros que las materias primas tradicionales (acero, aluminio), pueden ofrecer propiedades mecánicas superiores y excelente resistencia al medio en el que debe realizar su función. El proceso de diseño y fabricación de productos con materiales compuestos consta de cinco etapas, conociendo las propiedades de las materias primas y las particularidades del proceso de fabricación seleccionado.

Es fundamental considerar cual es el valor añadido al nuevo producto a base de materiales compuestos como, por ejemplo: resistencia mecánica, química, peso, precio, diseño,

etc. Ya que dicho resultado final es el que cubre las necesidades que se requieren solventar, en este caso particular piezas de aviación, así definiendo las etapas de fabricación de los mismos:

Diseño conceptual: conociendo las propiedades de las diferentes materias primas disponibles y las formas que puedan lograrse con los procesos de transformación existentes, deberá realizarse un diseño conceptual basado en la disponibilidad de fabricación del mismo

Diseño de detalle: es el momento de considerar todas las especificaciones del producto y llegar a un diseño concreto, con tamaños y espesores determinados y con componentes perfectamente identificados.

Desarrollo de útiles de fabricación: en función del proceso de transformación seleccionado será necesario diseñar unos útiles concretos. En ciertos casos también es posible reproducir numéricamente el proceso de transformación, por ejemplo, simulando como la resina va a fluir por la cavidad del molde impregnado el refuerzo, lo que permite el diseño óptimo.

Validación: la última etapa consiste en la validación de las primeras piezas obtenidas, asegurando el cumplimiento de las especificaciones para las que fueron diseñadas (AIMPLAS, 2020).

Componentes eléctricos

Circuitos eléctricos

Se lo define como circuito eléctrico al conjunto de elementos conectados entre sí, mediante conductores que permiten el paso de la corriente eléctrica, abasteciendo o distribuyéndola entre sus componentes.

Generadores

Elementos capaces de generar energía eléctrica a partir de otras formas de energía, que pueden ser energía química, mecánica, solar, etc.; entre los cuales para generadores eléctricos se pueden considerar baterías, dinamos, alternadores, paneles solares entre otros, como los de la Figura 2.

Figura 2

Generadores de energía eléctrica



Nota: Obtenido de (Búa, 2020)

Receptores

Son los elementos que consumen energía eléctrica y la transforman en otras formas de energía, ya puede ser de tipo calorífica, luminosa, rotativa, sonora entre otras; los receptores de forma general pueden ser lámparas, niquelinas, motores, timbres, radiadores, entre otros, como los que de la Figura 3.

Figura 3

Elementos receptores



Nota: Obtenido de (Búa, 2020)

Elementos de maniobra

Son aquellos elementos que se encargan de manejar la conducción o corte de energía eléctrica en los circuitos a voluntad, entre los que aparecen los interruptores, pulsadores, conmutadores entre otros, en la Figura 4 se pueden observar entre los más comunes.

Figura 4

Elementos de maniobra



Nota: Obtenido de (Hener, 2021)

Elementos de protección

Son aquellos elementos que se encargan de proteger los circuitos eléctricos contra cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, entre los más comunes se encuentran los fusibles, diferenciales de voltaje, magnetotérmicos entre otros, en la Figura 5 se observa de los más comunes referentes a protección.

Figura 5

Elementos de protección



Nota: Obtenido de (Hener, 2021)

Conductores

Son elementos eléctricos, que cumplen la función de conducir la energía eléctrica, unir todos los elementos del circuito, por lo general son compuestos de cobre y están diseñados para soportar ciertas corrientes o voltajes nominales, en la Figura 6 se pueden apreciar diferentes calibres del conductor.

Figura 6

Conductores Eléctricos



Nota: Obtenido de (Búa, 2020)

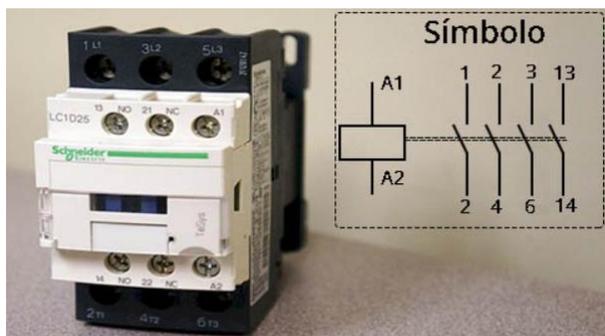
Elementos de accionamiento

Generalmente son elementos de accionamiento electromagnético o de estado sólido, que parten de una posición de reposo NC (normalmente cerrado) y NA (normalmente abierto).

La función de estos elementos es la de establecer la corriente de alimentación de un dispositivo eléctrico (receptor) al ser accionado o cambiar la forma en la que se le suministra energía eléctrica al mismo. En definitiva, el contactor permite, al ser activado, o impide, al ser desactivado, el paso de corriente en una parte del circuito de potencia.

Figura 7

Contactor Electromagnético



Nota: Obtenido de (Catambria, 2021)

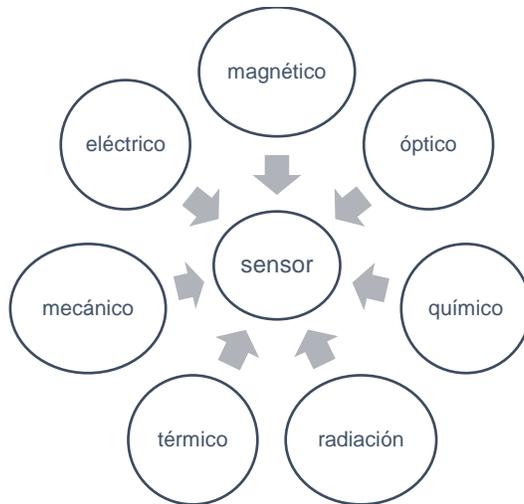
Sensores de temperatura

Sensor

Es un dispositivo que detecta acciones o estímulos externos y responde en consecuencia, captando información del medio físico al cual es sometido, en la Figura 8, detalla algunos de los estímulos que son capaces de receptor los sensores.

Figura 8

Estímulos externos al sensor

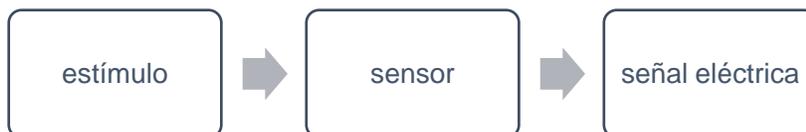


Son los encargados de medir magnitudes físicas y transfórmalas en señales eléctricas que pueden ser interpretadas por diferentes circuitos electrónicos.

Cabe mencionar que los sensores captan las magnitudes físicas del medio al que se les somete, dando como respuestas a un estímulo, una magnitud de tipo eléctrica, las mismas que pueden ser voltaje, corriente o resistencia, Figura 9.

Figura 9

Proceso del Sensor



Los sensores se clasifican en función de la información de salida que entregan, pueden ser digitales, analógicos y comúnmente son utilizados en aplicaciones para el desarrollo de interfaces físicas, sistemas de mediciones, sistemas electrónicos, sistemas de control entre otros.

Sensor de temperatura

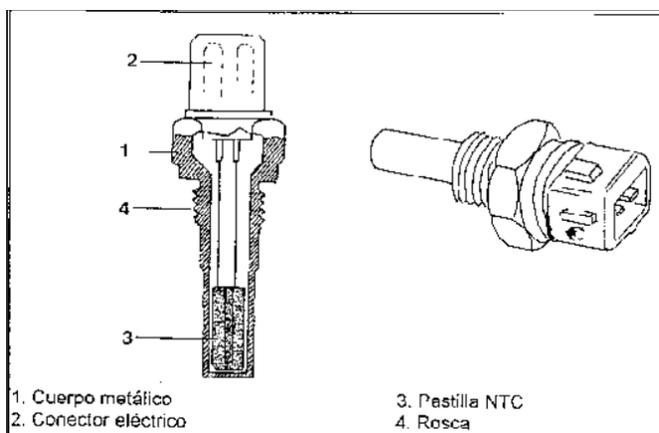
Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios de señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o electrónico (PrototipadoLAB, 2018)

Es un sistema que detecta variaciones en la temperatura del aire, agua o superficie a la que se la somete y las transforma en una señal eléctrica que es enviada a un sistema electrónico para su tratamiento o procesamiento respectivo, Figura 10. Está compuesto por los siguientes elementos:

- Elemento sensor
- Vaina que lo protege, relleno del material conductor de temperatura
- Cable de conexión
- Rosca conectora

Figura 10

Partes del Sensor de Temperatura



Nota: Obtenido de (Sensores de Temperatura, 2019)

Clasificación de los sensores de temperatura

Según la Tabla 1, se observan los sensores más comunes y empleados con sus respectivos rangos de valores típicos de medición.

Tabla 1

Rangos y dispositivos comunes de medición

Tipo de sensor	Rango de Temperatura °C
Termopar, Termocuplas	-200 a +2800°C
Piroeléctricos, termómetros de radiación	-100 a 500°C
Termo resistivos RTD	-100°C a +400°C
Bimetálicos, termostatos	-75°C a +540°C
Termistor	-195 a +450
Sensor de circuito integrado IC	-55°C a +125°C

Entre los sensores más comunes y empleados para realizar mediciones de temperatura con instrumentación electrónica por la industria se tienen: RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas .

Detector de resistencia metálica (RTD)

Es uno de los más precisos de temperatura, caracterizado por su excelente estabilidad, usualmente utilizado en rangos de temperatura que oscilan entre -55 °C a 450 °C

Su resistencia varía de forma directamente proporcional con la temperatura, entre las desventajas de las RTDs de platino (Pt100) se mencionan: 1- alto costo, instrumentación cara; 2- resistencia baja (100 ohms a 0 °C) y sensibilidad (0.4 ohm/°C) el cableado de conexión es un problema 3- la corriente de excitación produce una disipación de potencia en la RTD generando un calentamiento en el sensor

Figura 11

Sensor RTD



Nota: Obtenido de (IPOWER, 2020)

Termistor NTC y PTC

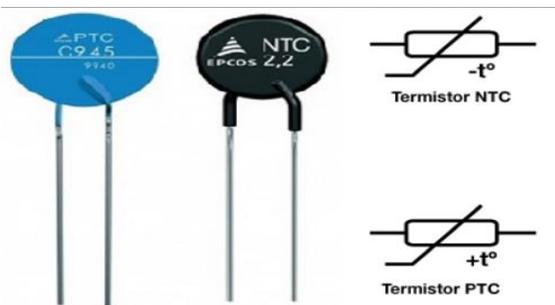
Un termistor es un semiconductor hecho de dos óxidos unidos en una pequeña bola recubierto de epóxido o vidrio, se presentan 2 clases de termistores con coeficiente positivo NTC, cuya resistencia disminuye con la temperatura y negativo PTC, cuya resistencia aumenta con la temperatura.

Los valores de resistencia más comunes son 2252, 5000, 10000 ohms, con una sensibilidad de 200 ohm/°C a temperatura ambiente comparada con 0.4 ohm/°C del pt100, la sensibilidad es bastante alta del termistor

Se usan los termistores para medir resistencias de hasta 300 °C, debido a la alta resistencia del termistor la resistencia de los conductores no afecta a la exactitud de las mediciones

Figura 12

Sensor NTC PTC



Nota: Obtenido de (Tecnología y Robótica, 2018)

Sensor de circuito integrado IC

Fundamentados en la unión p-n de los semiconductores, formados por circuitos integrados sobre un chip, que genera una salida lineal proporcional a la temperatura, por estar hechos a base de silicio, su rango de temperatura está limitado aproximadamente a los 150 °C

Figura 13

Sensor LM35



Nota: Obtenido de (LM35 , 2010)

La principal ventaja del sensor IC es su fácil interface, mientras que las desventajas que presenta son: limitado rango en temperatura de operación, la necesidad de alimentación y el auto calentamiento

Termocupla

Sensores de temperatura más usados en la industria, su funcionamiento se basa en la unión de dos alambres de distinto material por un extremo que genera una tensión muy pequeña, del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura. Dentro de los cuales se pueden clasificar en función del rango de operación en base al tipo de termocupla Figura 14.

Figura 14

Tipos de termocupla, rangos de operación

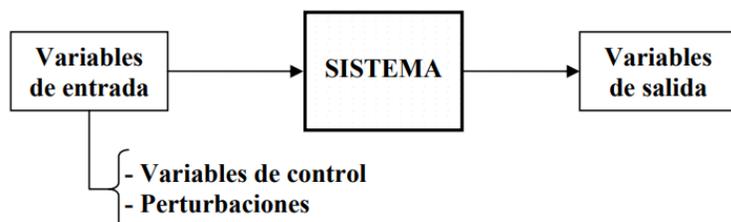


Sistema de control

Es un tipo de sistema conformado por componentes que permiten influir en el funcionamiento directo del sistema, con el fin de conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, alcanzando valores prefijados o deseados idealmente, Figura 15, existen dos tipos de sistemas de control en un conjunto mayor, donde presiden los de lazo cerrado y los sistemas de control de lazo abierto

Figura 15

Bloques de un sistema de control



Nota: Obtenido de (Catalunya, 2021)

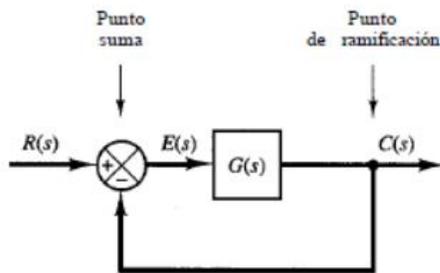
Sistema de control retroalimentado (lazo cerrado)

Es el sistema que posee una determinada relación entre la señal de salida hacia el actuador con respecto a la señal de entrada de referencia, utilizando una diferencia entre estos valores, como mecanismo de control, mismo sistema es conocido como retroalimentado, Figura 16.

El sistema de control de lazo cerrado, empieza a operar en función de una señal resultante de la diferencia entre la señal de entrada y la de retroalimentación, también conocida como señal de error. Esta señal es suministrada al controlador con la finalidad de eliminar el error, disminuyéndolo con tendencia a cero y conducir la salida del sistema a un valor en donde el actuador pueda trabajar a conveniencia.

Figura 16

Sistema de Control Lazo Cerrado

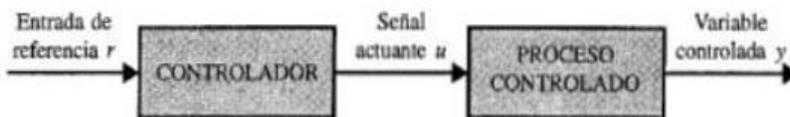


Sistema de control de lazo abierto

Estos sistemas de lazo abierto son conocidos debido a que la señal de salida no tiene influencia en la acción del control que se realiza sobre el actuador. Es decir que no se realiza una comprobación de la salida con respecto de la entrada, a lo que se resume que para cada señal de entrada referenciada existe una condición permanente de operación, de la que depende su calibración, Figura17.

Figura 17

Sistema de control lazo abierto (Kuo, 1996)



Nota: Obtenido de (Kuo, 1996)

La señal de salida y la señal de entrada no llegan a compararse, o no trabajan en función de una variación de error, por este motivo la salida depende de una calibración de que tan exacto puede llegar a ser el control.

Prácticamente el control de lazo abierto se debe de usar cuando la relación entre la entrada y salida sea conocida, y en este caso de que no exista perturbaciones ya que el

sistema de control de lazo abierto no realizará una operación de corrección en razón de solucionar dicho problema.

Controladores

Los controladores, con sus elementos hardware y software, Figura 18, encargados de procesar la información del medio al que se los somete, calculan la acción de control a aplicar a un proceso mediante algún tipo de algoritmo y utilizando información del proceso a controlar: la variable medida.

Por tanto, los componentes principales de un controlador son:

Componentes Software:

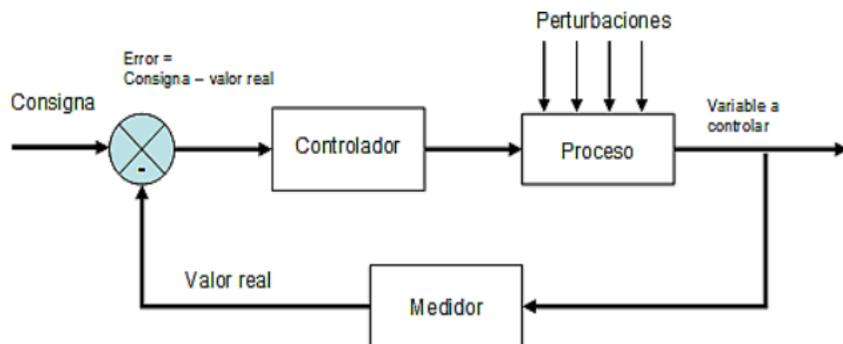
- Algoritmos de control
- Programas de aplicación

Componentes Hardware:

- Puertos analógicos y digitales de entrada y salida.
- Interfases a las redes (de datos) de control y campo.

Figura 18

Estructura del controlador



Nota: Obtenido de

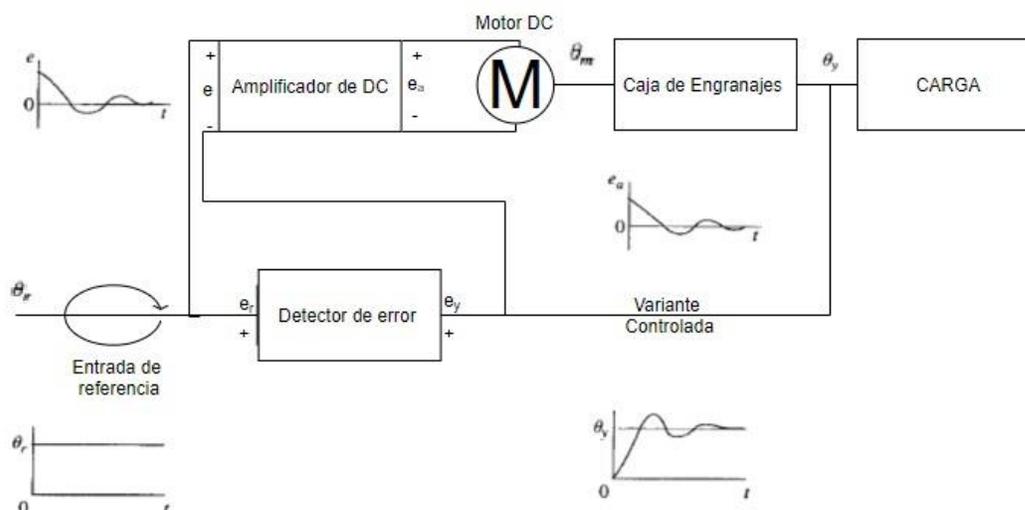
Control automático

Este control es de suma importancia en procesos industriales, producción y de manufactura, la mayoría de sus aplicaciones están encaminadas a controlar variables físicas sobre actuadores que manejar presión, temperatura, viscosidad, nivel, flujo entre otros dentro de los procesos industriales

La finalidad del estudio, progreso y acople de estas teorías para un control automático brindan los recursos en función de obtener una ejecución productiva y controlada de los sistemas incorporados dentro del conjunto como tal, mejorar el rendimiento de los equipos, reducir el trabajo y esfuerzo manual por parte de las personas u operarios que llega a ser repetitivo, tradicional y en muchas casos puede llegar a ocurrir errores o accidentes, y de esta manera mejorar el rendimiento industrial en los procedimientos de producción y manufactura, Figura 19.

Figura 19

Estructura control automático



Nota: Obtenido de (Ogata, 1998)

Los controles automáticos, trabajan en función del control de lazo cerrado, retroalimentados, comparando el valor real de salida con una entrada de referencia (set-point), determinar el error existente y generar una señal de control que produzca una señal de error de valor muy pequeño o muy cercana a cero, de esta forma obteniendo una acción de control

Controladores automáticos PID

Los controladores dentro de la familia de los PID, se derivan en tres acciones diferentes que son:

- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativo (D)

En función de estas acciones, los controladores se pueden llegar a clasificar en:

- i. Control On-Off, controlador de dos posiciones
- ii. Controlador proporcional (P)
- iii. Controlador integral (I)
- iv. Controlador proporcional – integral (PI)
- v. Controlador proporcional-derivativo (PD)
- vi. Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

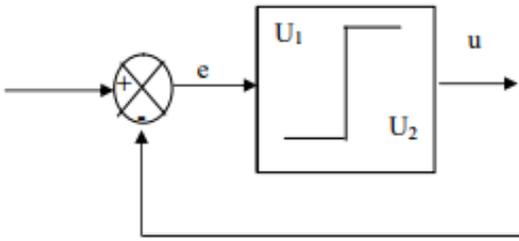
La decisión de cual controlador poder utilizar para realizar una aplicación en especial, depende de la naturaleza de la planta, función de transferencia de la misma, condiciones de operación, consideraciones de costo, seguridad, fiabilidad, tamaño, disponibilidad y precisión. En base a estos datos se procede a tomar la mejor decisión que mejor se acople a nuestras necesidades

Control ON/OFF

La acción de control Encendido-Apagado es también muy conocida por su nombre en inglés On-Off. Para esta acción de control el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que en la mayoría de los casos son apagado y encendido, Figura 20. Este control es relativamente simple y barato, por lo cual su uso es muy extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Figura 20

Control ON/OFF



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

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) > 0 \quad 1$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) < 0 \quad 2$$

De este modo en donde U_1 y U_2 son constantes. Por lo general, el valor mínimo de U_2 es cero o menos que U_1 .

Control P

Para un controlador de tipo proporcional, el valor de salida es proporcional a la magnitud del error:

$$u(t) = k_p * e(t) \quad 3$$

Donde k_p es la ganancia proporcional del controlador.

Sin considerar el dispositivo en concreto y la configuración de fuerza o potencia de operación, un controlador de tipo proporcional es un tipo de circuito amplificador, que su ganancia puede ajustarse (Ogata, 1998)

Figura 21

Diagrama de Acción Proporcional en el Error



Nota: Obtenido de (Morilla, 2007)

Existirá una correlación continua entre el posicionamiento del dispositivo final de control y la variable controlada.

La acción proporcional tendrá un inconveniente referente a la desviación permanente de la variable a estabilizar con relación al setpoint, a esta desviación se la conoce como offset (Kuo, 1996).

Control PI

La acción de control Proporcional Integral se define mediante:

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad 4$$

En donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral. El tiempo integral ajusta la acción del control, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) \quad 5$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{s T_i} \right) \quad 6$$

Se aplica la transformada Z en (6):

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_p \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T}{T_i} \frac{1}{(1 - z^{-1})} \right) \quad 7$$

Control PID

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

La Tabla 2 resume las características de los controles mencionados.

Tabla 2

Características de los Controladores

Tipo de Control	Tiempo de subida	Sobre impulso	Tiempo de estabilización	Error en estado estable
Proporcional	Decrece	Crece	Cambio menor	Decrece
P. Integral	Decrece	Crece	Crece	Se elimina
P. Derivativa	Cambio menor	Decrece	Decrece	Cambio menor

Las correlaciones de la Tabla 2 mostrada no son muy precisas, debido a que K_p , K_i y K_d son dependientes entre sí, por lo cual esta tabla sólo debe ser tomada como una referencia.

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

$$u(t) = K_P e(t) + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_P}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad 8$$

en donde K_P es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo Derivativo. Si se aplica la transformada de Laplace se obtiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad 9$$

Se aplica la transformada Z en (9) se obtiene: (hacer redacción de ecuaciones como si fuesen libros)

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_P \left(1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} - \frac{T_d}{T} z^{-1} + \frac{1}{T_i} \frac{1}{(1 - z^{-1})} \right) \quad 10$$

Método de sintonización Ziegler & Nichols

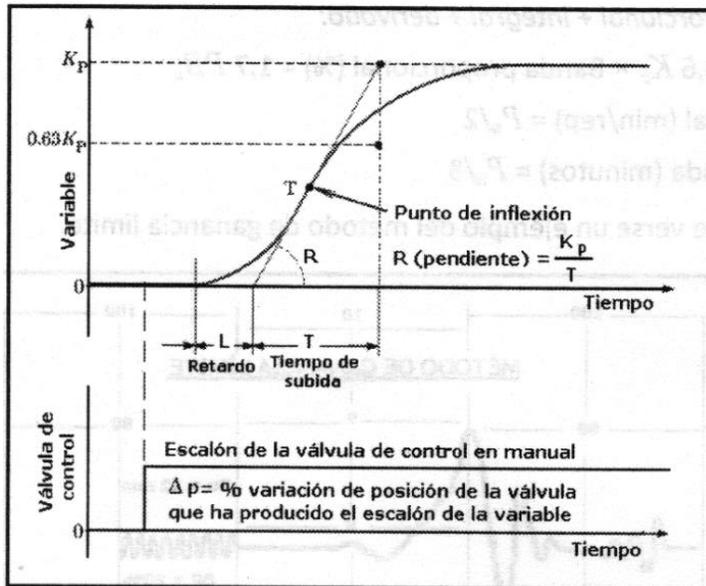
Este método en lazo abierto, es uno de los métodos más utilizados para la obtención de los términos P-I-D de ajuste del controlador.

Este procedimiento se basa en abrir el lazo de control, controlando el actuador de forma manual, generando un cambio en escalón al proceso de entrada.

A razón de esto se obtiene una respuesta de la planta, donde se traza una tangente en el punto de inflexión de la curva (Figura 22), a partir de esos parámetros se procede a encontrar los valores R y L.

Figura 22

Método Ziegler & Nichols en Lazo Abierto



Nota: Obtenido de (Creus, 2010)

Donde se define a:

- R: Pendiente de la recta tangente sobre el punto de inflexión de la curva
- L: Retardo que transcurre entre el cambio de escaló de la entrada de la planta y el punto en que la tangente cruza con el valor inicial de la variable.

Se aplican las siguientes formulas:

- **Control proporcional:**

$$g = \frac{\Delta p}{R * L} \quad 11$$

$$BP\% = \frac{100 * R * L}{\Delta p} \quad 12$$

- **Control Proporcional integral**

$$g = \frac{0.9 * \Delta p}{R * L} \quad 13$$

$$BP\% = \frac{110 * R * L}{\Delta p} \quad 14$$

$$\frac{\text{Minutos}}{\text{repeticion}} = \frac{L}{0.3} \quad 15$$

- **Control P+I+D**

$$g = \frac{1.2 * \Delta p}{R * L} \quad 16$$

$$BP\% = \frac{83 * R * L}{\Delta p} \quad 17$$

$$\frac{\text{Minutos}}{\text{repeticion}} = \frac{L}{0.5} = 2 * L \quad 18$$

$$\text{Minutos de anticipo} = 0.5 * L \quad 19$$

Fuente: (Creus, 2010)

Controlador lógico programable PLC

Concepto del PLC

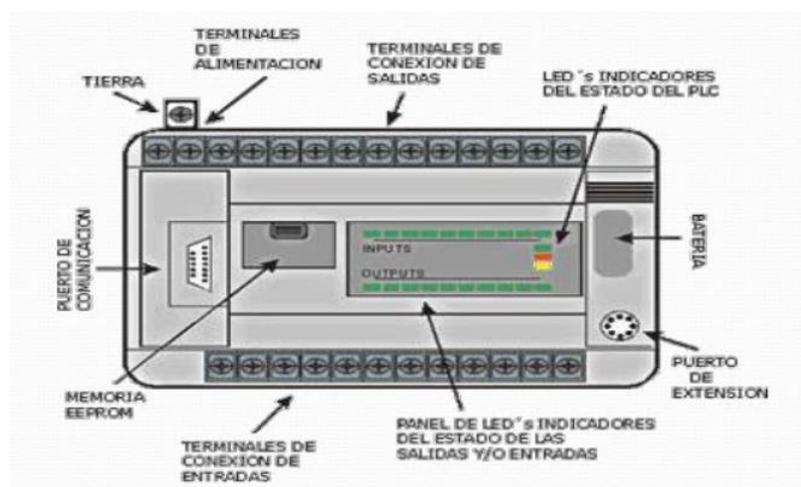
Es una computadora, utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de maquinaria de fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.

Sin embargo, la definición más precisa de estos dispositivos es la dada por la NEMA que dice:

“Instrumento electrónico, que utiliza memoria programable para guardar instrucciones sobre la implementación de determinadas funciones, como operaciones sobre la implementación de determinadas funciones, como operaciones lógicas, secuencia de acciones, especificaciones temporales, contadores y cálculos para el control mediante módulos de E/S analógicos o digitales sobre diferentes tipos de máquinas y de procesos”.

Figura 23

Estructura del PLC



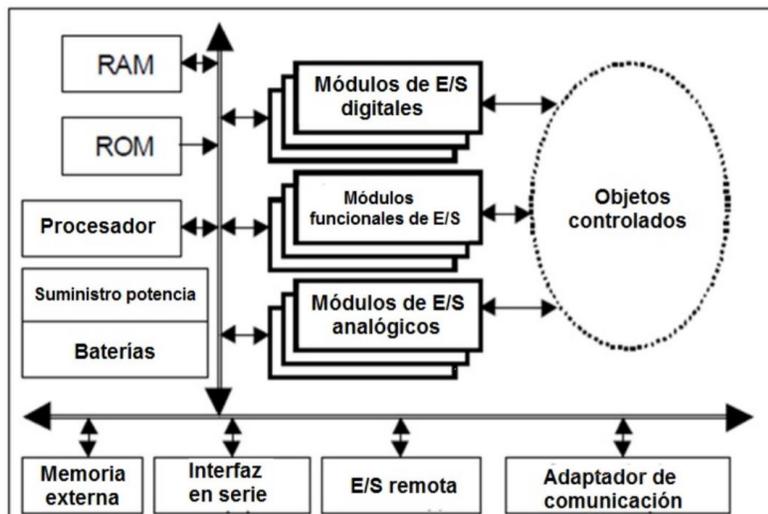
El campo de aplicación de los PLC's es muy diverso (automoción, aeroespacial, construcción, etc). A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada/salida, amplios rangos de temperatura, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas instaurados referente a control de funcionamiento de los procesos tratados se almacenan en memorias no volátiles (Aguirre, 2020)

Estructura básica de un PLC

En la Figura 24, se muestra el diagrama de flujo, los componentes y la estructura de un PLC

Figura 24

Diagrama General del PLC



Nota: Obtenido de (PAC, 2020)

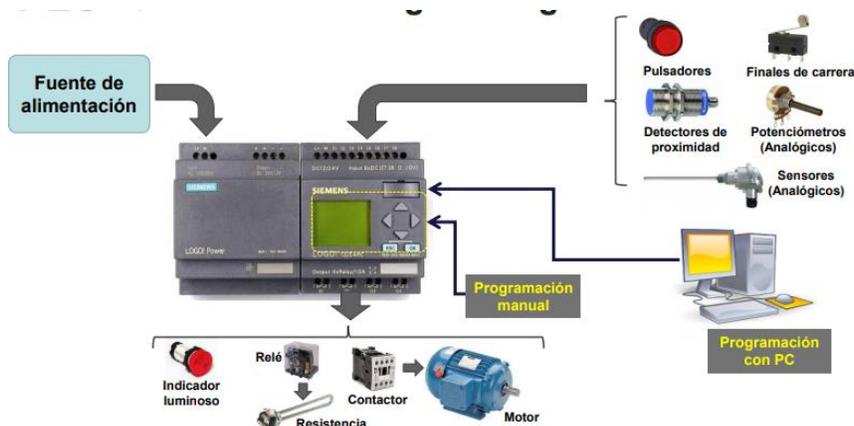
Para que el sistema funcione es necesario un suministro de potencia cuyo propósito principal es garantizar los voltajes de operación internos del controlador, los valores más frecuentes son $\pm 5, 12$ y 24 [VDC]

- La unidad central de procesamiento o CPU que contiene función de procesamiento del controlador
- Las interfaces de entrada
- Las interfaces de salida

Con el uso de las diferentes interfaces I/O, la unidad de procesamiento CPU, una programación manual o por consola, lleva a todo este conjunto a controlar un proceso mediante elementos de acción que envían información al PLS (pulsadores, sensores, detectores, etc), que terminan dando un funcionamiento dependiendo de los equipos conectados a las salidas (motores, resistencias, relés, luces, etc), (Figura 25).

Figura 25

Funcionalidad del PLC



Nota: Obtenido de (Aguirre, 2020)

Ciclo de funcionamiento

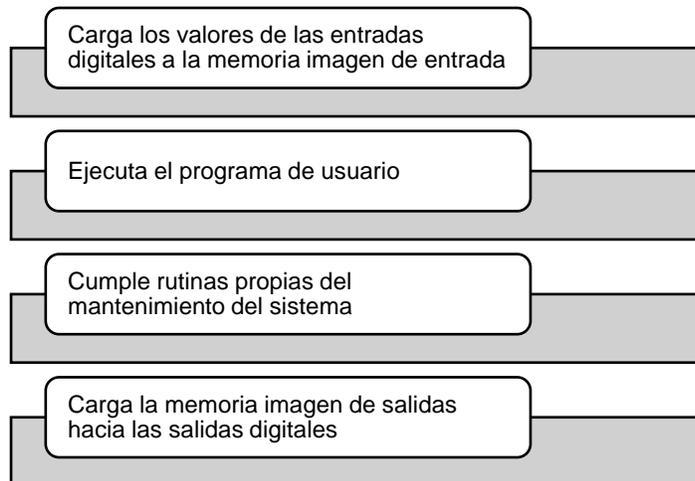
Poseen la característica de ser maquina secuenciales que se utiliza para modelar sistemas y acoplar las instrucciones al programa.

Existen dos posibilidades en cuanto al ciclo de ejecución, que el autómatas se encuentre en RUN o en STOP, comportándose para cada ocasión de la siguiente manera

- **Autómata modo RUN:** el procesador ejecuta el tratamiento interno, la confirmación de entradas, el tratamiento del programa y la actualización de las salidas
- **Autómata modo STOP:** para este caso, no se ejecuta el tratamiento del programa.

En la mayoría de los autómatas, existe un indicador, cuando el equipo está en RUN se está ejecutando el programa, cuando dicho indicador esta apagado no se está ejecutando el programa o entra en modo STOP.

Otro indicar es de modo ERROR, que indica cuando se presenta una falla en la etapa de autodiagnóstico, la mayoría de casos cuando se detecta un error se detiene la ejecución del programa automáticamente (ELECTRIN, 2020).

Figura 26*Ciclo de Funcionamiento PLC (Griezmann, 2020)***Transferencia de calor**

Es el proceso de propagación de calor por distintos medios, este proceso se produce siempre que existe un gradiente térmico o cuando dos sistemas con diferente temperatura entran en contacto. Este proceso estará presente hasta que ambos sistemas encuentren un equilibrio térmico, igualando las temperaturas

Figura 27*Transferencia de Calor*

Nota: Obtenido de (Adams, 1974)

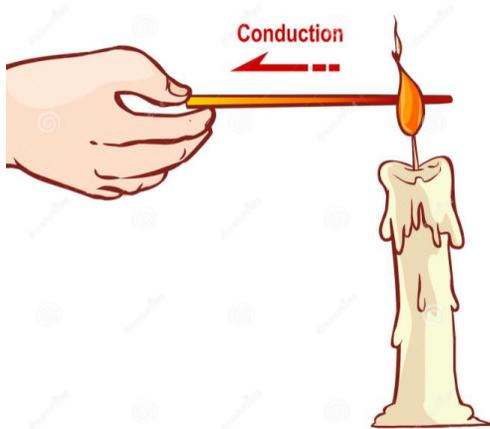
Todos estos aspectos son estudiados por la termodinámica que es la ciencia que estudia la relación entre el calor y otras formas de energía, dando como resultado el estudio del tránsito de calor en diferentes sistemas.

Conducción

Es la primera forma básica, la transferencia de calor se lleva a cabo por dos mecanismos. El primero es la interacción molecular, donde moléculas de niveles de energía relativamente altos (definido por temperatura) otorgan energía a moléculas vecinas en niveles inferiores. El segundo mecanismo es el de electrones libres, presentes en los sólidos metálicos puros, se espera que los metales puros sean mejores conductores de calor .

Figura 28

Transferencia de Calor por Conducción



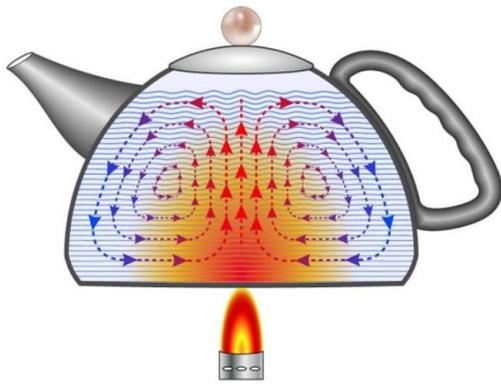
Convección

La segunda forma básica. La transferencia de calor se lleva a cabo mediante el intercambio de energía entre un fluido y una superficie o interface. Existen 2 tipos de procesos,

la convección forzada en que se obliga el movimiento de un fluido por una superficie debido al efecto de un agente externo, y la convección natural o libre en que los cambios de densidad en el fluido debido a un cambio de energía provocan un movimiento natural del fluido .

Figura 29

Transferencia de Calor por Convección



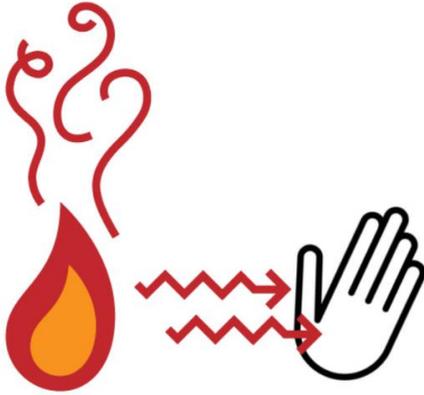
Nota: Obtenido de (Welty, 1995)

Radiación Térmica

Esta transferencia de calor no requiere de un medio para su propagación. El intercambio radiante entre las superficies es máximo cuando no hay material que ocupe el espacio intermedio. Este intercambio puede ocurrir entre dos superficies, una superficie y un gas o medio participante, o la interacción compleja de varias superficies y fluidos participantes. Este fenómeno electromagnético es desconocido su naturaleza exacta, pero se hace una referencia a un cuerpo negro, emisor o absorbente de radiación térmica.

Figura 30

Transferencia de calor por radiación



Nota: Obtenido de (Welty, 1995)

Leyes básicas del análisis de la transferencia de calor

Para el análisis de la transferencia de calor, se considera las siguientes leyes básicas:

- i. Primera ley de la termodinámica
- ii. Conservación de la masa
- iii. Segunda ley del movimiento de Newton

Fuente: (Adams, 1974)

Primera ley de la termodinámica.

Muchos motores y plantas de energía operan convirtiendo energía térmica en trabajo. La razón es que un gas al calentarse puede hacer trabajo mecánico sobre turbinas o pistones, lo que ocasiona que se muevan. La primera ley de la termodinámica aplica el principio de conservación de energía a sistemas donde la transferir de calor y hacer un trabajo son los métodos de intercambio de energía dentro y fuera del sistema. La primera ley de la termodinámica establece que el cambio en la energía interna de un sistema, donde se define la ecuación de la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q + W$$

ΔU Cambio de energía interna de un sistema

Q el calor neto que se le transfiere

W el trabajo neto que se hace sobre el

Es decir, Q es la suma de todo el calor transferido por y hacia el sistema y W es el trabajo neto realizado sobre el sistema, siendo Q y W positivos, simplemente establece que se puede aumentar la energía interna de un sistema al calentarlo o al hacer trabajo sobre el sistema (CNX, 2021).

Conservación de la masa

“La masa no se crea ni se destruye, solo se transforma”. Lavoisier comprobó que, al calentar metales como el estaño y el plomo en recipientes cerrados con limitada cantidad de flujo de aire, estos se recubrían con una capa calcinada, una vez realizado este proceso se pesa el metal después de calentarlo, el resultado era igual que al inicio del proceso. Por tal motivo se demostró que la calcinación de un metal no era el resultado de la pérdida del misterioso flogisto, sino la ganancia de algo material, una parte del aire, poniendo en cuenta todas las sustancias que forman parte en una reacción química y a todos los productos formados, nunca varía la masa, que se la puede enunciar de la siguiente manera:

“ En toda reacción química la masa se conserva, esto es, la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos”

Fuente: (SALAMARKESA, 2020)

Segunda ley de movimiento de Newton

También conocida como Ley Fundamental de la dinámica, es la que determina una relación proporcional entre fuerza y variación de la cantidad de movimiento o momento lineal de un cuerpo, la fuerza es directamente proporcional a la masa y a la aceleración de un cuerpo.

La Segunda Ley de Newton se encarga de cuantificar el concepto de fuerza dice que: la fuerza neta aplicada sobre un cuerpo es proporcional a la aceleración que adquiere dicho cuerpo. La constante de proporcionalidad es la masa del cuerpo, de manera que se expresa la relación de la siguiente forma:

$$F = m * a$$

21

Donde:

- F es la fuerza que se le aplica al objeto
- m es la masa del objeto
- a es la aceleración

Esta ley establece que cuando se le aplica una fuerza a un objeto, este tiende a acelerarse y abandonar su estado de inercia.

Fuente: (EcuRed, 2021)

Sistema BPCS y SIS

BPCS, Sistema de Control Básico de Proceso (BPCS, Basic Process Control System), es la capa de automatización que permite el control del proceso manteniendo las variables dentro de los valores normales de operación.

SIS, Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS, Safety Instrumented System), es un sistema compuesto por sensores, procesadores lógicos y elementos finales de control que tiene el propósito de implementar las funciones de seguridad necesarias para llevar al proceso a un estado seguro, cuando se han violado condiciones predeterminadas (García, 2018)

El sistema SIS es generado por diversos resultados de estudios, donde se ve inmerso el desarrollo del “**ciclo de vida**” y se implementan las normas internacionales de seguridad funcionales tales como: la ISA S84.01 de 1996, la IEC 61508 de 1998 y la IEC 61511 del año 2003 donde se busca cubrir y solventar los siguientes escenarios hostiles que pueden generar fallos que son:

- 44% de los accidentes, se debieron a deficiencias en las especificaciones de los equipos e instrumentos
- 15%, a deficiencias en el diseño e instalación
- 6%, durante el arranque de la planta
- 15%, durante el mantenimiento y operación
- 20%, a cambios y modificaciones después del arranque de la planta.

En la actualidad estas normas están actualizadas y son usadas como base de la normativa ANSI/ISA S84.00.01 que adoptó íntegramente a la Norma IEC 61511 del año 2003 y la norma IEC 61508 del año 2010.

Actualmente el sistema de control industrial posee los siguientes sistemas:

- SIS, Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS, Safety Instrumented System)
- BPCS, Sistema de Control Básico de Proceso (BPCS, Basic Process Control System)

La normativa ANSI/ISA 84.01 define el término SIS como:

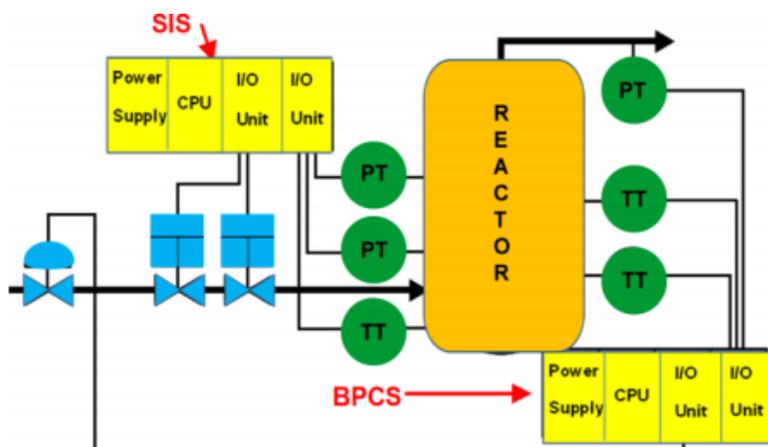
"Un Sistema compuesto por sensores, lógica y elementos finales con el propósito de llevar el proceso a un estado seguro cuando determinadas condiciones preestablecidas son violadas"

IEC-61511 define el término SIS como:

"Un Sistema Instrumentado usado para implementar una o más funciones instrumentadas de Seguridad (SIF) y se compone de una o más combinaciones de sensores, lógica y elementos finales" (SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD (SIS), s.f.)

Figura 31

Sistema BPCS y SIS



Nota: Obtenido de (Pecsen & Pecsen, n.d., p. 3)

En la figura 31 se muestra un proceso industrial que consta de un sistema BPCS conformado por dos transmisores de temperatura (TT) y un transmisor de presión (PT) interconectados a un reactor, mismas variables que controlan el accionar de la válvula de paso principal regulando su entrada según el requerimiento de la planta. Mientras que en el sistema SIS que posee dos transmisores de presión (PT) y uno de temperatura (TT) encargados de realizar la medición del mismo reactor, controlan el sistema de seguridad de las válvulas secundarias de alimentación del reactor para garantizar la operación de forma segura de la planta como tal, esto ante un posible escenario hostil o cambio brusco de temperatura o presión del reactor durante operación.

En el caso del horno autoclave el sistema BPCS, la señal controlada actúa sobre las resistencias térmicas (niquelinas) que son las encargadas de variar temperatura del horno. El sistema SIS actúa directamente sobre las líneas de alimentación del controlador y de las resistencias térmicas, de esta forma se genera seguridad en las interconexiones y durante la ejecución del proceso de la planta. En un caso de fallo durante la operación, el sistema SIS actúa como un sistema maestro-esclavo siendo predominante el sistema SIS, dicho esto una vez que actúa la señal del SIS la señal del BPCS pasa a segundo plano dentro del procedimiento.

Se realiza un análisis del sistema en cuanto a las normativas vigente para el cumplimiento de la misma, a razón de cumplir con las especificaciones técnicas, estándares de diseño y sobre todo de normativas para su construcción del sistema en parámetros que garanticen la seguridad del proceso.

SIL (Safety Integrity Level) o Nivel de Integridad de Seguridad.

SIL indica la disponibilidad de un Sistema de Seguridad, es decir "La probabilidad de que un sistema relacionado con la seguridad ejecute de forma satisfactoria las funciones de

seguridad requeridas en todas las condiciones especificadas en un periodo de tiempo especificado".

Figura 32

Nivel de Integridad en la Seguridad

Safety Integrity Level	Probability of failure on demand, average (Low demand mode of operation)	Risk Reduction Factor
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	100000 to 10000
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	10000 to 1000
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	1000 to 100
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	100 to 10

Nota: Tomado de (Pecsén & Pecsén, n.d., p. 3)

Figura 33

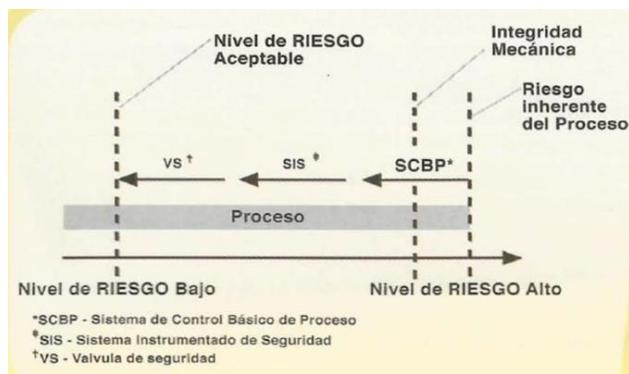
Nivel de Integridad en la Seguridad

SIL	PFD	Fallo máximo aceptado del SIS
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	Un fallo peligroso en 10000 años
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	Un fallo peligroso en 1000 años
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	Un fallo peligroso en 100 años
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	Un fallo peligroso en 10 años

Nota: Tomado de (Pecsén & Pecsén, n.d., p. 3)

Figura 34

Nivel de Integridad en la Seguridad



Nota: Tomado de (García, 2018, pág. 4)

En las figuras 32 y 33 se describe la tabla que caracteriza de los niveles de SIL, en el caso particular, en el caso particular se debe de elegir el SIL 1 ya que es un fallo peligroso en la menor cantidad de tiempo, identificando las características y tipo de uso que se va a brindar al prototipo en base a un diseño planteado.

Análisis y evaluación de riesgos del proceso

En base a las normativas vigentes (ANSI/ISA S84.00.01, IEC 61508), la necesidad controlar una planta segura durante su operación, se tiene como objetivo primordial entender y conocer todos los riesgos a los que el operador y usuario están directamente asociados, de esta manera se conoce cuál es el impacto que se tiene en el personal que opera la planta, la eficiencia durante la producción y la contaminación del ambiente.

Para dicho efecto se utiliza la técnica de análisis HAZOP, que es un Análisis Funcional de Operatividad, es una metodología con la finalidad de detectar las situaciones de inseguridad en plantas industriales debida a la operación o los procesos productivos de estas. Fue desarrollado por la Imperial Chemical Industries (ICI) en 1963 para su aplicación en el diseño de plantas para la fabricación de pesticidas.

Es necesario conocer los planos, dimensiones y diseño de la planta, en base al diagrama P&ID donde se ven involucrados el sistema BPCS y el sistema SIS.

Es necesario plantear lineamientos referentes a los parámetros de temperatura y las consecuencias de ante posibles daños en la estructura del horno autoclave.

Tabla 3

Análisis de Riesgo Método HAZOP (Parámetros)

Parámetro	Palabra guía	Elemento	Desviación	Posibles causas
Temperatura	Alta, bajo	Horno	Sobrecalentamiento o sobre enfriamiento	Falla de control, Falla de lectura de sensores

Tabla 4

Análisis de Riesgo Método HAZOP (Consecuencias)

Consecuencias	Salvaguarda o protección	Comentarios	Acción requerida
Daño al horno, material defectuoso	Instalar un sistema SIS que funcione como maestro	Debe ser revisado y monitoreado la lectura de los sensores al menos una vez al mes	Informar al responsable de mantenimiento, control y supervisión de existir alguna anomalía

En base a las tablas 3 y 4 se hace un análisis de riesgo de los parámetros y las acciones a tomar de las consecuencias que se presenten si llegase a existir un riesgo eminente, para ello se subdivide en los diferentes nodos que controlan la planta

Tabla 5

Análisis de Riesgo Método en los Nodos de Control

Nudo	Palabra Guía	Desviación de la variable	Posibles causas	Respuesta de control	Acciones a tomar	Comentarios
Alimentación a las niquelinas	Alta alimentación, inexistencia de alimentación	Sobre alimentación	Falla de control, falla de relé de estado solido	Alarma de funcionamiento	Verificar la tensión en los extremos, verificar medidas de sensores	Monitoreo contante del funcionamiento, visualizar variables de temperatura
Agitador	Ningún	Variación de temperatura en los sensores	Falla de contacto, falla de control	Alarma de funcionamiento	Verificar la tensión en el contacto	Realizar mantenimiento del uso del ventilador al menos una vez cada 3 meses

Una vez definido todos los parámetros se analiza los posibles riesgos, que entre los más comunes están:

- **Error humano**

En este evento puede darse debido a causas de mal manipulación de la planta, colocar parámetros de forma errónea, manipulación de los cables o interconexiones.

- **Falla del equipamiento**

En el caso de que falle el controlador o exista un fallo en los actuadores, los parámetros del sensor no sean los correctos en base a las lecturas

- **Eventos externos**

Que exista alguna catástrofe como terremoto, sobre tensión en la red eléctrica, humedad excesiva en el ambiente el cual dañe los circuitos.

Definido todos los riesgos se diseña la planta con un sistema de seguridad en cual busque evitar la ocurrencia de dichos eventos o mitigar su efecto durante la operación del horno autoclave.

Aplicación de capas de protección de Sistemas de Seguridad no Instrumentados

Análisis de Capas de Protección (LOPA, Layers of Protection Analysis), “Las capas de protección son sistemas de protección independientes que reducen el riesgo mediante el control, la prevención o la mitigación”. (García, 2018, pág. 5)

Figura 35

Capas de Protección



Nota Tomado de (Pecsén & Pecsén, n.d., p. 5)

Figura 36

Capas de Protección



Nota Tomado de (Pecsén & Pecsén, n.d., p. 5)

En la figura 35 y 36 se aprecian los niveles de riesgo que se pueden dar en la ejecución de un proyecto, por el riesgo al que la planta se somete, el sistema se encuentra en la capa de prevención, cualquier anomalía que se podría suscitar en un caso de falla del control o del sistema, el sistema reacciona mediante una acción de control específica de seguridad o en base a un corte del suministro de energía (paro de emergencia) hacia el sistema

- **Objetivo del SIL en cada función.**

El objetivo de esta fase es identificar cada SIL (Nivel de Integridad de Seguridad) para cada SIS implementado, para el caso particular de la planta en base a las tablas 3, 4 y 5 es el SIL 1, para conseguir una adecuada mitigación del riesgo llegando a tener un nivel aceptable, se debe tener claro que el SIL no es una medida o dimensión del riesgo de la planta, más bien es la prevención que existe para mantener el proceso de funcionamiento normal de la planta en un nivel de confiabilidad aceptable para el operador o usuario

- **Especificación de seguridad.**

En base a los requisitos de seguridad, se manifiesta la lógica funcional del sistema, se cumple la normativa para la prevención de riesgos y así poder evitar el funcionamiento erróneo del proceso.

Capítulo II: Diseño Mecánico

Introducción

En este capítulo se detalla el diseño y la construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas, los requisitos, diseño estructural, análisis de transferencia de calor y el análisis estructural del mismo.

Requerimientos del sistema

Los requerimientos por parte del Laboratorio de Materiales compuestos para construcción de un horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas son los siguientes:

- Estructura metálica del horno de 150cm, 75cm, 60cm en los ejes x, y, z respectivamente.
- La transferencia de calor al interior del horno buscando una distribución uniforme.
- Control de temperatura del sistema permitiendo un rango de operación entre 25°C y 260 °C, con un error máximo para temperatura de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ en temperaturas de 150 a 260°C y $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en temperaturas inferiores a 150 °C
- Identificadores visuales de tal forma que muestre el funcionamiento del horno y de igual manera alarmas el cual indique funcionamiento anormal.
- Determinar y generar la documentación técnica necesaria del proyecto, incluyendo manuales de operación y de mantenimiento del sistema.
- Estructura metálica sea resistente y cumpla con seguridad para el usuario.
- Debe ser fácil de manipular para el usuario facilitando el trabajo diario con materiales compuestos.
- Debe ser el horno autoclave con las características pedidas para el espacio de trabajo útil.

Para el diseño y construcción de la parte mecánica se debe tomar en cuenta y garantizar los aspectos de seguridad que se detalla en las normas a continuación nombradas.

- Norma IEC-60335-2-36:2002+A1:2004+A2:2008, Artefactos electrodomésticos y análogos. Seguridad. Parte 2-36: Requisitos particulares para cocinas, hornos, encimeras y placas de encimera eléctricas de uso colectivo.
- Norma Europea Armonizada EN60204-1, Sistemas de aviso luminoso en caso de alarmas
- Normas Europeas Armonizadas EN60204-1, EN13849-1. Sistemas de emergencias, botón de emergencia etc.
- Normas Europeas Armonizadas EN60204-1, EN62061, EN50495, EN61508-1,2,6. Sistemas de mitigación de las temperaturas peligrosas.
- NFPA-86 Standard for ovens and furnaces a nivel internacional

Seguridad

En el diseño de la estructura metálica, las soldaduras deben cumplir con todas las características de seguridad y garantizar que la carcasa sea hermética, no exista filtraciones de calor para la observación y tratado de material. Por lo tanto, debe cumplir con normas de seguridad correspondientes a procesos industriales, para el seleccionado de materiales, soldaduras, aislantes y selladores.

Parámetros de diseño

En función de los requerimientos por parte del Laboratorio de Materiales Compuestos para construcción del prototipo de horno autoclave automatizado para secado en la fabricación de piezas aeronáuticas tendría una cámara interna de 1.5m, 0.75m, 0.60m en los ejes x, y, z respectivamente, con una cámara útil 0.675 m^3 . Para el tamaño y forma se considera la

factibilidad de construcción del horno autoclave con las características y dimensiones de piezas aeronáuticas tradicionales que serán sometidas a dicho proceso.

Diseño y selección de elementos y aislantes

Lo más importantes es considerar una buena selección del elemento aislante, debido a que con ello facilitará el control de la temperatura, impidiendo fugas de calor en la cámara del horno, ayudando así para un mejor ahorro energético durante el proceso.

Selección del material aislante.

Para la selección del aislante a utilizar, el coeficiente de conductividad debe ser bajo para obtener una estabilidad óptima del sistema, mediante el análisis de ingeniería concurrente y según los criterios del usuario, esto genera la ayuda necesaria para escoger con mayor eficiencia el aislante, buscando un enfoque ideal y que la pérdida de calor sea lo más cercana a nula, entre mayor calor la pérdida de calor será mayor, para ello es de vital importancia la correcta elección del aislante a instalarse.

De la misma forma si la temperatura exterior es muy baja, se debe considerar que el aislante tenga una conductividad muy baja para que no afecte a las condiciones interiores de mencionado horno para proporcionar una estabilidad en el control

Para el análisis particular de este sistema, la temperatura máxima será de 300°C como referencia de temperatura alta, con ello se debe considerar que para mayor temperatura las fugas térmicas serán altas, a lo que es menester seleccionar un aislante correcto

Tabla 6

Comparación entre aislantes térmicos

AISLANTE	VENTAJA	DESVENTAJA
Lana de vidrio	Resistencia a la humedad	Mayor protección y cuidado.

	Ahorro costos en calefacción y climatización. Bajo costo Más liviana y de muy baja conductividad térmica. Manipulación simple. 100% reciclable.	Inestabilidad al sol Finura y fragilidad de las fibras Vida relativamente corta.
Poliestireno extruido	Son muy resistentes a la alta compresión. Es un material sumamente durable. Instalación sencilla y fácil mantenimiento. Resiste al agua	Vulnerable a los rayos ultravioleta Coste alto No biodegradable Contiene químicos peligrosos

En la tabla 6 se detalla las características de los dos aislantes más comunes en el mercado y con mejor costo beneficio, definiendo así las ventajas y desventajas de cada uno de ellos con sus respectivas características técnicas. Para que tenga mayor confiabilidad se realiza un análisis en base a consenso de criterios, el cual genera una mejor confiabilidad del producto seleccionado

Para la solución se tiene los criterios a ser evaluado los materiales: precio, resistencia a la humedad, la manipulación, la durabilidad, el peso y mantenimiento, por lo consiguiente se procede a evaluar siendo 6 la mayor confiabilidad mientras que 1 será la peor

Tabla 7

Evaluación de criterios por parte del fabricante

Criterio	Evaluados		SUMA
	Lana de vidrio	Poliuretano extraído	
Precio	6	5	11
Resistencia a la humedad	4	3	7
Manipulación	2	1	3

Durabilidad	3	6	9
Peso	5	4	9
Mantenimiento	1	2	3
Total	-		42

En la tabla 7 se aprecia que la confiabilidad más alta está en el precio del producto en lana de vidrio mientras que para el poliestireno extraído su ponderación más alta es para la durabilidad del producto. Se debe obtener la fracción de cada criterio para lo cual se divide cada punto para la suma total es decir 42 logrando las fracciones de cada criterio.

Tabla 8

Ponderación de criterios

Criterio	Ponderación
Precio	0,26
Resistencia a la humedad	0,17
Manipulación	0,07
Durabilidad	0,21
Peso	0,21
Mantenimiento	0,07
Total	1

En la tabla 8 se aprecia los criterios más importantes para la selección del material siendo el precio el más importante seguido de la durabilidad y peso, mientras que lo menos significativo fue el mantenimiento y la manipulación del material.

Los dos materiales expuestos anteriormente son los más utilizados en el mercado, esto debido a su fácil acceso y fácil comercialización. Para el diseño del horno autoclave se utiliza el método de conceso de criterios o ingeniería concurrente llegando a la conclusión de instalar lana de vidrio, debido a su baja conductividad térmica, precio, durabilidad, peso y que es el

material más utilizado para hornos, esto lo convierte en un material ideal para cubrir los requerimientos del horno autoclave referente a la estructura mecánica. Las características del material “lana de vidrio” se aprecian en la Figura 37.

Figura 37

Flujo de Calor

Material	Densidad	Conductividad	Calor Especifico	Difusividad	Retardo
	ρ Kg/m ³	λ W/m.K	c J/Kg.K	D s.m ²	r cm/h
Acero	7500	50	450	1,481E-05	16,7
Agua	1000	0,60	4184	1,434E-07	1,6
Aluminio	2700	204	897	8,423E-05	39,9
Arena	1400	0,58	835	4,962E-07	3,1
Bloque de hormigón	1400	0,56	1000	4,000E-07	2,7
Fibrocemento	2000	0,93	1250	3,720E-07	2,6
Hormigón	2400	1,630	880	7,718E-07	3,8
Ladrillo común	1600	0,810	837	6,048E-07	3,4
Ladrillo hueco	930	0,490	1000	5,269E-07	3,2
Lana de vidrio	14	0,043	1030	2,982E-06	7,5
Lana mineral	30	0,042	1000	1,400E-06	5,1
Madera	700	0,170	480	5,060E-07	3,1
Piedra	2600	2,30	1000	8,846E-07	4,1
Placa cartón-yeso	800	0,37	920	5,027E-07	3,1
Poliestireno expandido	15	0,037	1450	1,701E-06	5,7
Poliuretano	33	0,022	1400	4,762E-07	3,0
Revoque cemento	1900	0,930	836	5,855E-07	3,3
Revoque yeso	1500	0,560	920	4,058E-07	2,8

Nota: Obtenido de (FLUJO DE CALOR Y VAPOR DE AGUA EN CERRAMIENTO OPACOS - PDF Free Download, n.d.)

$$\text{Densidad} \quad \rho = 14 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Conductividad térmica} \quad k = 0,043 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$\text{Calor específico} \quad C_p = 0,42 \frac{\text{K} \cdot \text{cal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Cálculo del aislamiento térmico adecuado para prototipo del horno autoclave

El propósito principal del aislamiento térmico es controlar el flujo de la temperatura hacia el exterior de la cámara, con ello se busca evitar fugas excesivas de calor para poder controlar de una forma óptima la planta, logrando así mejor eficiencia y disminuir el consumo eléctrico.

Se definen algunos datos y cálculos necesarios para llegar al objetivo.

Variables ambientales requeridas.

Se especifican las condiciones internas de horno durante el acondicionamiento según Norma (ISO 3795:1989.)

Datos:

Temperatura interior $T_i = 300^{\circ}\text{C} = 573.15^{\circ}\text{K}$

Humedad relativa $H_{ri} = 50\%$

Variables ambientales presentes en Quito INAMHI INNAQUITO (ANEXO INAMHI, PAG 44.)

Datos

Temperatura exterior $T_0 = 13.9^{\circ}\text{C} = 287.05^{\circ}\text{K}$

Humedad relativa exterior $H_{ro} = 84\%$

La temperatura pertenece a los reportes meteorológicos del INAMHI pag.44 para Quito con el mes que tiene una mayor humedad, siendo el mes de marzo y abril, en el mes de abril el más húmedo del año, con el mes de abril se plantea la peor condición para el diseño del horno. Mediante petición del usuario y teniendo en cuenta los datos requeridos, se define el tiempo de estabilización del sistema.

Datos:

Tiempo de estabilización $T_o = 20 \text{ min} = 0.3h$

Espesores y conductividad térmica de aceros y aislante

Datos:

Acero inoxidable 304:

Espesor $e_1 = 1,4mm = 0.0014m$

Conductividad térmica $k_1 = 0.022 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$

Lana de vidrio:

Espesor $e_2 = \text{incognita}$

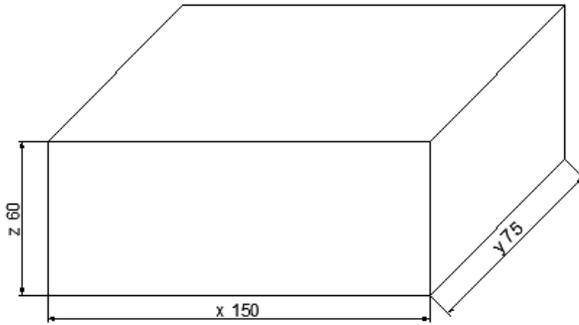
Conductividad térmica $k_2 = 0.043 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$

Dimensiones internas de horno autoclave.

Mediante el diseño se determinó según los tamaños de elementos a utilizar de calentamiento del ambiente y ventilación, ubicados en la parte superior e inferior respectivamente.

Figura 38

Esquema de Horno Autoclave Interior



Donde

$$x = 150\text{mm} = 1.5\text{m}$$

$$y = 75\text{mm} = 0.75\text{m}$$

$$z = 60\text{mm} = 0.6\text{m}$$

Selección del ventilador.

Para la sección del ventilador interviene el aire que se encuentra al interior de la cámara, el cual influye en la transferencia de calor para la parte externa de la cámara, este movimiento de aire reduce la humedad relativa en su interior, generando así un ambiente artificial con aire forzado, dando como resultado una temperatura constante y distribuida en toda la cámara interna del horno. Bajo estos preceptos se calcula los parámetros necesarios y apropiados para la correcta selección del ventilador.

Para ello se debe tener la temperatura en grados Fahrenheit.

$$T_i = 300^\circ\text{C}$$

$$^\circ\text{F} = \frac{9}{5}^\circ\text{C} + 32$$

22

Se reemplaza el dato T_i en la Ecuación (22)

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}(300^{\circ}\text{C}) + 32 = 572^{\circ}\text{F}$$

Con este valor se determina el factor de elevación de temperatura.

Para determinar el valor del CFM (Pies cúbicos por minuto) junto con la temperatura calculada debido a que el aire se encuentra en recirculación dentro del horno y debido a que no se necesita

Figura 39

Factor de Elevación de Temperatura

Amt. of Air CFM	Temperature Rise (°F)										
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600
100	1,7	3,3	5	6,7	8,3	10	11,7	13,3	15	16,7	20
200	3,3	6,7	10	13,3	16,7	20	23,3	26,7	30	33,3	40
300	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60
400	6,7	13,3	20	26,7	33,3	40	46,7	53,3	60	66,7	80
500	8,3	16,7	25	33,3	41,7	50	58,3	66,7	75	83,3	100
600	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
700	11,7	23,3	35	46,7	58,3	70	81,7	93,3	105	116,7	140
800	13,3	26,7	40	53,3	66,7	80	93,3	106,7	120	133,3	160

Nota Tomado de Factor de elevación de la temperatura (José et al., n.d., p. 75)

Para el cálculo se toma de la Figura 39, la temperatura de 572°F Y 25 CMF, debido a que estos datos especificados no se encuentran en la Tabla 8 con un valor exacto, se debe realizar una interpolación de dichos valores a fin de encontrar los valores reales.

Tabla 9

Datos Para la Interpolación

CMF	Temperatura. (F)	Factor de elevación de Temperatura.
25	500	16,7

572	ET
600	20

Calculando la interpolación

$$ET = 16,7 + \frac{20 - 16,7}{600 - 500} (578 - 500) \quad 23$$

$$ET = 16,7 + \frac{3,3}{100} (72)$$

$$ET = 19,076 \text{ adimensional}$$

Con este cálculo del factor encontrado, se procede a determinar la potencia para el ventilador de la cámara.

$$P = \frac{CMF * ET}{3} \quad 24$$

$$P = \frac{25 * 19,076}{3}$$

$$P = 158,967 [W]$$

La potencia requerida para el ventilador será 159 [W]

Para la elección del ventilador se hará entre un ventilador centrífugo y un ventilador axial, dependiendo de las características y destinación a ser utilizado.

Tabla 10

Comparación de Ventiladores

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas
------	-------------	----------	-------------

Centrífugo	El aire es impulsado por una turbina o rodete que lo aspira por el centro y lo expulsa a través de sus álabes o palas.	Desplazan grandes volúmenes de aire. Resisten altas temperaturas. Producen altas presiones. Resistentes a la corrosión.	Alto costo Menor volumen de aire Ruidoso
Axial	El aire (o gas) entra y sale del ventilador siguiendo una trayectoria paralela al eje de la hélice.	Gran volumen de aire Bajo costo Bajo ruido	Presiones bajas. Rendimiento medio

Nota: Obtenido de (*Ventiladores Industriales: La Diferencia Entre El Ventilador Axial y El Ventilador Radial*, n.d.)

En la tabla 10 se visualiza los conceptos del ventilador axial y centrífugo, sus ventajas y desventajas, pero para llegar a la selección correcta se debe hacer un análisis de consenso de criterios, para ello estable que el grupo de evaluación de las características del ventilador estará dado por los dos usuarios y por los fabricantes del mismo.

Tabla 11

Ponderación de criterios según los usuarios.

	Precio	Ruido	Corrosión	Durabilidad	Volumen de aire	
Fabricante 1	5	1	4	3	2	
Fabricante 2	4	3	1	2	5	TOTAL
Usuario 1	3	4	1	2	5	
Usuario 2	3	5	1	2	4	
SUMA	15	13	7	9	16	60

En la tabla 11 se encuentra que el fabricante 1 tiene mayor interés por el precio mientras que para el fabricante 2 opta por el volumen de aire, mientras que el usuario pide que

no tenga ruido y tenga un buen volumen de aire. La fracción de cada criterio se da en la siguiente tabla 12

Tabla 12

Ponderación de criterios

	Ponderación
Precio	0,25
Ruido	0,217
Corrosión	0,117
Durabilidad	0,15
Volumen de aire	0,267

Mediante la tabla 13 se encuentra que tanto usuario como fabricante optan por tener un volumen de aire considerable para el diseño del prototipo. Mediante el consenso de los criterios se realiza el estudio a 2 tipos diferentes de ventilador (axial y centrífugo), siendo 3 la ponderación más alta mientras que 1 la más baja.

Tabla 13

Evaluación de los fabricantes y usuarios en cuanto a precio

Material	Usuario 1	Usuario 2	Fabricante 1	Fabricante 2	Promedio
Axial	3	2	3	1	2,25
Centrífugo	1	1	2	2	1,5

En la tabla 14 se realiza la evaluación de los fabricantes y usuarios en todos los criterios de los ventiladores (axial y centrífugo)

Tabla 14

Evaluación de los fabricantes y usuarios en todos los criterios

Material	Criterios				
	Precio	Ruido	Corrosión	Durabilidad	Volumen de aire
Axial	2,25	2	2,25	2,5	2,25
Centrífugo	1,5	2,25	2,75	2,25	2,25

La tabla 15 genera los valores de todos los criterios en promedio, encontrando estos datos se realiza la ponderación entre los dos criterios

Tabla 15

Evaluación de los materiales

Material	Criterios					
	Precio	Ruido	Corrosión	Durabilidad	Volumen de aire	Evaluación
Axial	2,25	2	2,25	2,5	2,25	2,21975
Centrífugo	1,5	2,25	2,75	2,25	2,25	2,1075
Ponderación	0,25	0,217	0,117	0,15	0,26	

En la tabla 15 se encuentran los criterios de evaluación de cada uno de los ventiladores con una ventaja mínima para el axial siendo punto clave el precio para la elección de mencionada ventilación. Dicho en el análisis y las características de cada ventilador, se opta por la elección de un ventilador con mayor volumen de aire, debido a que genera una distribución uniforme de la temperatura al interior de la cámara y ayuda a la correcta ejecución del control de temperatura.

Figura 40

Característica de Ventilador

	Wired	U	f	n	P _e	I	q _v	P _{ts}	q _v	P _{ts}
		V	Hz	min ⁻¹	W	A	m ³ /h	Pa	cfm	in. wg
1	Y	400	60	2950	160	0.26	1870	0	1100	0.00
2	Y	400	60	2850	177	0.28	1720	50	1010	0.20
3	Y	400	60	2810	184	0.29	1485	100	875	0.40
4	Y	400	60	2805	184	0.29	1200	140	705	0.56

Wired = Wiring · U = Power supply · f = Frequency · n = Speed (rpm) · P_e = Power consumption · I = Current draw · q_v = Air flow · p_{ts} = Pressure increase

Nota Tomado de (MK, n.d., p. 5)

Tabla 16

Características del ventilador axial

Características	
Marca	RS
Modelo	Ventilador Axial ebm-papst de 250 x 83mm
Potencia	160 [W]
Voltaje	230 [V]

Determinación del ambiente convectivo.

Se refiere primordialmente a la circulación y velocidad del viento tanto en el exterior como en interior del horno, lo que llega a influir directamente en la transferencia de calor, la misma que se busca trabaje de forma rápida al choque de aire en las paredes, así mismo al no existir velocidad de viento haciendo la transferencia de calor lenta, de esta manera se obtiene que sea libre o forzada.

Convección libre: es un tipo de transporte de masa y calor, en el que el movimiento del fluido se genera solo por diferencias de densidad en el fluido que se producen debido a gradientes de temperatura, no por una fuente externa (como una bomba, ventilador, dispositivo de succión).

Convección forzada: Además de la presencia térmica del ambiente el movimiento del fluido que es generado por fuerzas externas impulsoras, como la aplicación de gradientes externos como una bomba, un ventilador entre otros.

En la Figura 41 se presentan los valores para el ambiente convectivo interior y el ambiente convectivo exterior según la velocidad del viento. (*Qué Es La Convección Natural - Convección Libre - Definición*, n.d.)

Figura 41

Ecuaciones Para los Coeficientes de Convección

Equation	Limits	Condition	Remarks/Sources
$h_c = 8.3 V^{0.6}$ $h_c = 3.1$	$0.2 < V < 4.0$ $0 < V < 0.2$	Seated with moving air	Mitchell (1974)
$h_c = 2.7 + 8.7 V^{0.67}$ $h_c = 5.1$	$0.15 < V < 1.5$ $0 < V < 0.15$	Reclining with moving air	Colin and Houdas (1967)
$h_c = 8.6 V^{0.53}$	$0.5 < V < 2.0$	Walking in still air	V is walking speed (Nishi and Gagge 1970)
$h_c = 5.7 (M - 0.8)^{0.39}$	$1.1 < M < 3.0$	Active in still air	Gagge et al. (1976)
$h_c = 6.5 V^{0.39}$	$0.5 < V < 2.0$	Walking on treadmill in still air	V is treadmill speed (Nishi and Gagge 1970)
$h_c = 14.8 V^{0.69}$ $h_c = 4.0$	$0.15 < V < 1.5$ $0 < V < 0.15$	Standing person in moving air	Developed from data presented by Seppenan et al. (1972)

Note: h_c in $W/(m^2 \cdot K)$, V in m/s, and M in met units, where 1 met = 58.2 W/m^2 .

Nota Tomado de Ecuaciones para los coeficientes de convección, PARSONS, Robert A.

Handbook. Atlanta: ASHRAE, 1997, pp. 8.8.

Para el análisis del prototipo se utiliza la primera condición, la que especifica que: el cuerpo en estudio se encuentra sentado y con movimiento de aire. En las instalaciones que va a realizar el proceso de elaboración de materiales compuestos está en el interior de un hangar

o un cuarto cerrado, la velocidad del viento será mínima, el ambiente convectivo al exterior será de tipo libre lo cual se determinará de la siguiente manera.

Velocidades del viento que varía entre $0 < V < 0.2$ donde V estará en $\frac{m}{s}$ lo cual en la Figura 41 genera un ambiente convectivo exterior de:

$$h_{c0} = 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad 25$$

Se requiere la velocidad en el interior del horno emitida por el ventilador para los cálculos respectivos del ambiente convectivo interno y al no tener tabulado se necesita de un dispositivo para su medición, en este caso se procede a utilizar un anemómetro lo cual brinda un resultado.

Figura 42

Medición de la Velocidad del Viento



En la Figura 42, se realiza la medición del ventilador con un resultado de $2.9 \frac{m}{s}$, dando como resultado que el ambiente al interior de la cámara es convectivo y de flujo forzado.

El cálculo de las velocidades de viento está entre $0,2 \frac{m}{s} < V < 4,0 \frac{m}{s}$, en base a la Figura 41 se obtiene un ambiente convectivo exterior de:

$$h_{ci} = 8.3 V^{0.6}$$

$$h_{ci} = (8.3)(2.9)^{0.6} \quad 26$$

$$h_{ci} = 15.722 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Cálculos para el espesor del aislante.

El acondicionamiento de temperatura en la cámara interna del horno autoclave, estará sujeto a una temperatura establecida por el usuario, por lo tanto, se requiere una capa de aislamiento considerable para generar un mejor control, de esta forma evitar pérdidas excesivas de calor al exterior del horno.

El material que se elige para el diseño del prototipo, como se manifiesta anteriormente es lana de vidrio, la cual actúa como un aislante térmico, además como una capa protectora de agentes externos para el interior del horno. Los requerimientos pedidos por parte del usuario son

Temperatura interior $T_i = 300^\circ\text{C} = 573.15^\circ\text{K}$

Humedad relativa $H_{ri} = 50\%$

Para los requisitos presentes en el exterior se tomó la peor temperatura para su diseño según localidad (Quito INAMHI INNAQUITO)

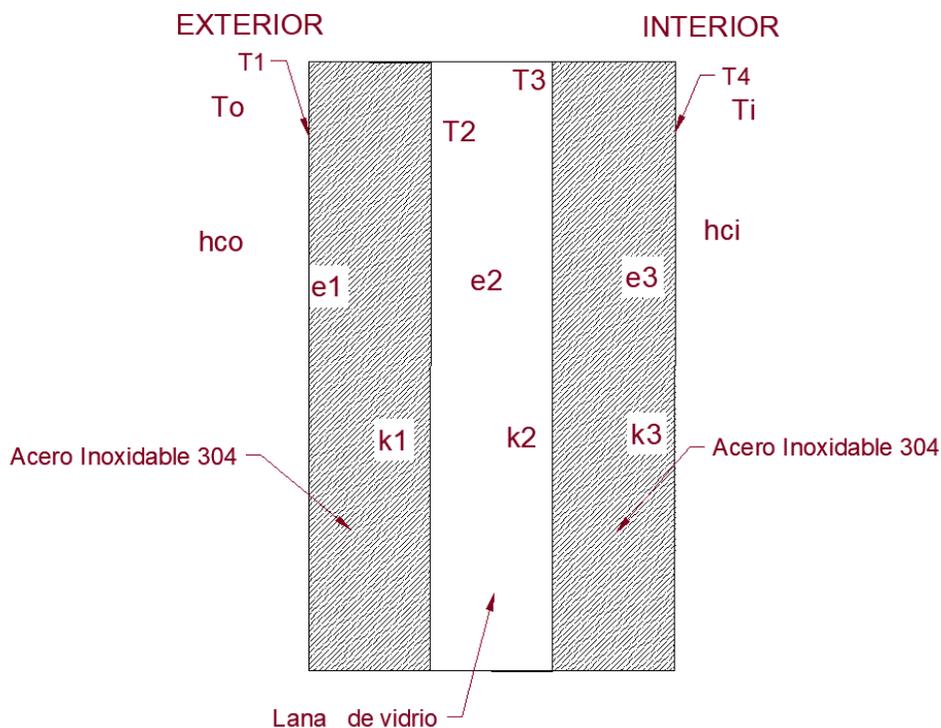
Temperatura exterior $T_o = 13.9^\circ\text{C} = 287.05^\circ\text{K}$

Humedad relativa exterior $H_{ro} = 84\%$

En la Figura 43 se ilustra las características de temperatura, humedad relativa y el ambiente convectivo al que se someterá las paredes del horno a diseñar.

Figura 43

Variables Presentes en las Paredes del Horno.



Donde:

$T_0 = 13,9^\circ\text{C}$ *Temperatura en el exterior del horno*

$T_1 = a^\circ\text{C}$ *Temperatura en la cara exterior del Acero Inoxidable*

$T_2 = b^\circ\text{C}$ *Temperatura en la cara exterior del lana de vidrio*

$T_3 = c^\circ\text{C}$ *Temperatura en el cara interior de lana de vidrio*

$T_4 = d^\circ\text{C}$ *Temperatura en la cara interior del Acero Inoxidable*

$T_i = a^\circ\text{C}$ *Temperatura en la parte interior del horno*

$h_{co} = 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ *Coficiente convectivo exterior del horno*

$$h_{ci} = 15,722 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \quad \text{Coeficiente convectivo interior del horno}$$

$$e_1 = 0.0014 \text{ m} \quad \text{Espesor del acero inoxidable 304}$$

$$e_2 = x \text{ m} \quad \text{Lana de vidrio}$$

$$e_3 = 0.0014 \text{ m} \quad \text{Espesor del acero inoxidable 304}$$

$$k_1 = 14,9 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \quad \text{Conductividad del acero inoxidable 304}$$

$$k_2 = 0,022 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \quad \text{Conductividad del poliuretano extruido}$$

$$k_3 = 14,9 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \quad \text{Conductividad del acero inoxidable 304}$$

El condicionamiento interno del horno estará sometido a dos tipos de transferencia de calor, las cuales son:

- Transferencia de calor por convección
- Transferencia de calor por radiación

Tabla 17

Tipos de transferencia de calor

Transferencia de calor	Definición
Convección	La energía calorífica se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa, equilibrándose las temperaturas. Puede ser forzada cuando está ayudada por el movimiento de las superficies en contacto con el fluido o libre (llamada también natural) cuando se produce únicamente en virtud de una diferencia de densidades causada por una diferencia de temperaturas.
Conducción	La energía calorífica se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o partes de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas

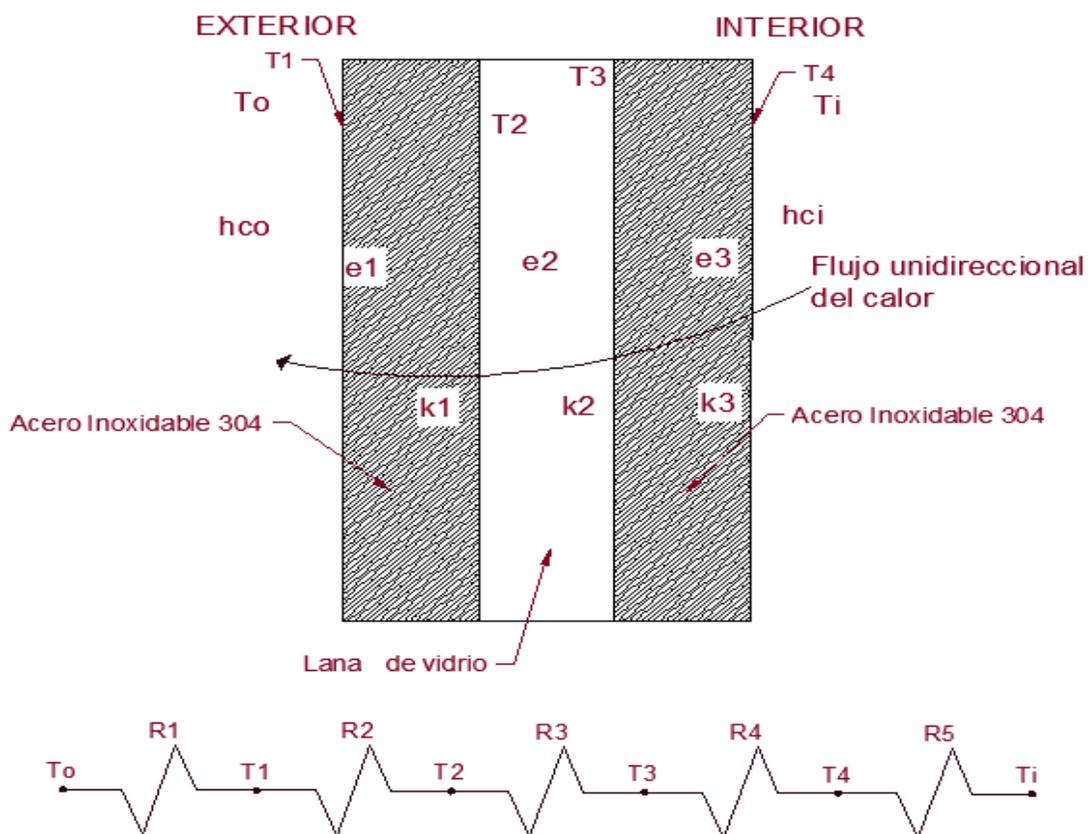
	más calientes, con mayor energía térmica y otras en las zonas más frías, con menor energía térmica).
Radiación	La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura T, y que se propaga a la velocidad de la luz (porque es luz de distintas longitudes de onda) y puede ser absorbida por los cuerpos, aumentando su temperatura. La radiación es el único medio de transmisión del calor cuando ésta tiene lugar a través del vacío.

Nota: Extraído de (Clocchiatti & Catelan, 2018, pp. 5–40)

Los datos obtenidos facilitan calcular el correcto espesor del aislamiento térmico, se realiza una analogía a base de la ley de Ohm de circuitos eléctricos con respecto a las paredes del horno, debido a que cada material constituye una resistencia térmica encontrándose en serie a todas las resistencias. También se encuentra la transferencia de calor por convección en la superficie externa e interna de las paredes y la transferencia de calor por radiación en la unión de las paredes.

Figura 44

Resistencia Térmica en las Paredes del Horno.



$$R_1 = \frac{1}{h_{co} * A} \quad R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A} \quad R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A} \quad R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A} \quad R_5 = \frac{1}{h_{ci} * A}$$

Las resistencias térmicas por convección son

$$R_1 = \frac{1}{h_{co} * A} \quad 27$$

$$R_5 = \frac{1}{h_{ci} * A}$$

Variables conocidas

Las resistencias térmicas por conducción son

$$R_2 = \frac{e_1}{k_1 * A} \quad 28$$

$$R_3 = \frac{e_2}{k_2 * A}$$

$$R_4 = \frac{e_3}{k_3 * A}$$

De acuerdo con las variables conocidas y no conocidas, espesor 2 (e_2) es incógnito, a despejar en la ecuación 28, usada para determinar el coeficiente de transferencia de calor total expuesto, para nuestro caso se obtiene una temperatura alta en el interior del horno siendo un flujo unidimensional hacia el exterior, que se obtiene:

$$U = \frac{1}{A \sum RT} \quad 29$$

Se reemplaza en la Ecuación (29)

$$U = \frac{1}{A \left(\frac{1}{hco * A} + \frac{e_1}{k_1 * A} + \frac{e_2}{k_2 * A} + \frac{e_3}{k_3 * A} + \frac{1}{hci * A} \right)}$$

Simplificando se obtiene

$$U = \frac{1}{A \left(\frac{1}{hco} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{hci} \right)}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{hco} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{hci} \right)}$$

Se despeja la incógnita de (29)

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{hco} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{hci}\right)}$$

$$\frac{1}{hco} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2} + \frac{e_3}{k_3} + \frac{1}{hci} = \frac{1}{U}$$

$$\frac{e_2}{k_2} = \frac{1}{U} - \frac{1}{hco} - \frac{e_1}{k_1} - \frac{e_3}{k_3} - \frac{1}{hci}$$

$$e_2 = k_2 \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{hco} - \frac{e_1}{k_1} - \frac{e_3}{k_3} - \frac{1}{hci} \right)$$

La variable U se define como el coeficiente global de transferencia de calor según el ahorro energético en calefacción y se lo obtiene de la Tabla 18:

Tabla 18

Valor orientativo del coeficiente de transferencia de calor

Cerramiento	$U \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
Muros y suelos	1,27
Cubiertas	1.06

Nota: Tomado de (UNE-EN-ISO-6946, 2012)

Para el diseño se toma de referencia muros y suelos donde:

$$U = 1,27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Reemplazando todos los valores en la ecuación 29.

$$e_2 = k_2 \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{hco} - \frac{e_1}{k_1} - \frac{e_3}{k_3} - \frac{1}{hci} \right)$$

$$e_2 = k_2 \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{hco} - \frac{e_1}{k_1} - \frac{e_3}{k_3} - \frac{1}{hci} \right)$$

$$e_2 = 0,022 \left(\frac{1}{1,27} - \frac{1}{3,1} - \frac{0,0014}{14,9} - \frac{0,0014}{14,9} - \frac{1}{15,722} \right)$$

$$e_2 = 0,088 \approx 0,09 \text{ m}$$

El valor calculado para el aislamiento correcto y acondicionamiento de la cámara es $e_2 = 0.09\text{m}$, una vez obtenidos todos los cálculos se procese con la simulación del prototipo horno autoclave para el curado y secado de materiales compuestos.

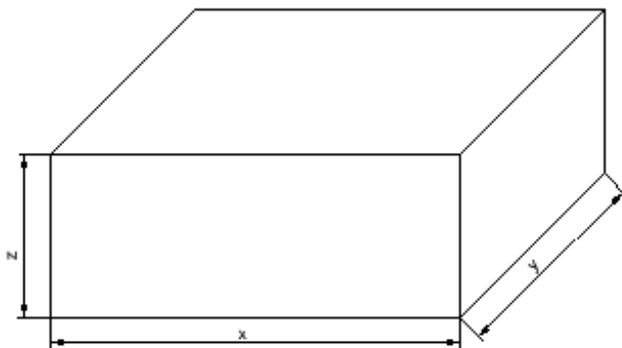
Dimensionamiento parte exterior de la estructura. Realizado el cálculo del aislante de las paredes del horno, se procede a diseñar la parte exterior, la cual estará instalada con acero inoxidable 304 con lo que se impide la existencia de óxido, adicional de generar un diseño atractivo

Diseño del dimensionamiento estructura exterior. Los cálculos se realizarán en base a la cámara interna del horno sumando por cada pared 0.09m , junto con $1,2\text{mm}$ del acero inoxidable 304 de cada lado adicional, en el eje z se sumarán una distancia extra para el cableado y demás acondicionamientos de la máquina.

Obteniendo el siguiente diseño:

Figura 45

Esquema Cámara Externa



Donde

$$x = 150 + 2(9 + 1,2 * 2)$$

$$x = 172,8cm$$

$$y = 75 + 2(9 + 1,2 * 2)$$

$$y = 97,8cm$$

$$z = 60 + 2(9 + 1,2 * 2) + 10$$

$$z = 92,8cm$$

Mediante el análisis anterior se obtuvo los parámetros de diseño exterior

Análisis estructural del horno

Al determinar y analizar las variantes de la estructura del horno se presenta el peso total del horno prototipo que se exhibe el resumen en la Tabla 19:

Tabla 19

Características y masa de la planta

Masa por material		
Descripción	Material	Masa(Kg)

Estructura	Acero inoxidable 304	121,8
Aislante	Lana de vidrio	3,7
Panel de control	Controladores	4,3
Otros (Motor, cableado)	Varios	2,4
Masa total		132,2

Para poder determinar la carga total se visualiza en la Tabla 20:

Tabla 20

Peso de la Planta

Peso total	
Masa en (Kg)	132,2
Masa en (lb)	290,84
Peso (N)	1295,56

$$W_{HORNO} = 1295,56 [N]$$

Por lo expuesto anteriormente en la Tabla 20, el peso total del horno será 1295,56 [N] en vista que el horno fue diseñado para componentes aeronáuticos de 40[kg], por lo tanto, se tiene:

$$W_{total} = W_{HORNO} + W_{COMPONENTE} \quad 30$$

$$W_{total} = 1295,56[N] + 40[Kg] * \frac{9.8m}{s^2}$$

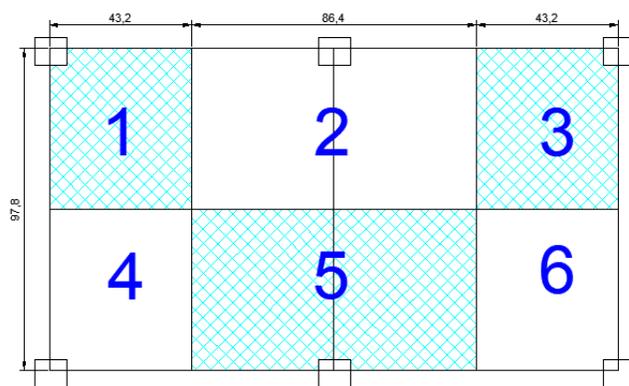
$$W_{total} = 1655,56[N]$$

Análisis de la resistencia en la base (Soportes)

El horno está diseñado con 6 soportes, los mismos que se encuentran distribuidos uniformemente, soportando un peso total de 1655,56[N] por lo consiguiente tendrá una distribución de peso de la siguiente manera, Figura 46.

Figura 46

Distribución de los soportes



En base a la Figura 46 se comprende que el soporte 1,3,4,6 soportan la misma cantidad mientras que 2 y 5 soportan el doble de esa cantidad entonces se dice que

$$W_{total} = \frac{1655,56[N]}{8}$$

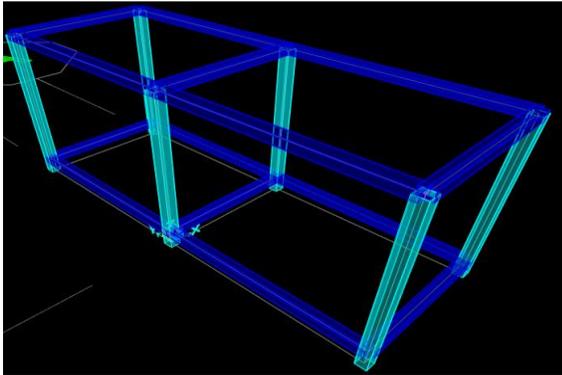
$$W_{total} = 206,95[N]$$

Siendo así

$$W_{1,3,4,6} = 206,95[N]$$

$$W_{2,5} = 413,89[N]$$

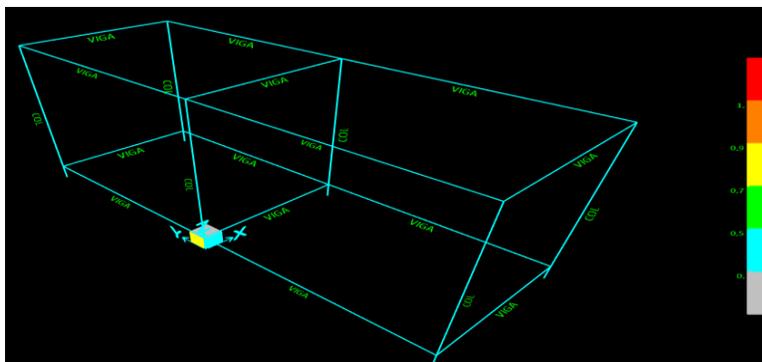
Para comprobar la resistencia de horno se realiza la simulación estructural mediante el software Sap 2000.

Figura 47*Estructura del Horno*

Para el análisis estructural del horno, tomando como modelo referencial la estructura, la cual permite tener datos específicos y claros sobre la misma, para dicho caso se procede a utilizar el software SAP2000 V21.2

El software SAP2000 V21.2 coloca el peso total a soportar en cada una de las vigas y columnas, la cuales arrojan el resultado de deformación cumpliendo así un análisis de la estructura, lo que generará un resultado satisfactorio o no, Figura 48.

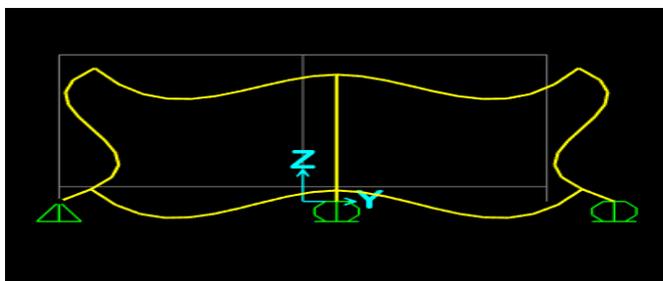
Figura 48*Resultado del Análisis Estructural*



La simulación arroja que la estructura está a una capacidad mínima de peso, obtenido estos resultados es factible y confiable la construcción de la estructura. Se realiza una simulación de peso máximo para la deformación de la estructura, llegando a la conclusión de cuál es el lugar más propenso a sufrir deformación como se representa en la Figura 49.

Figura 49

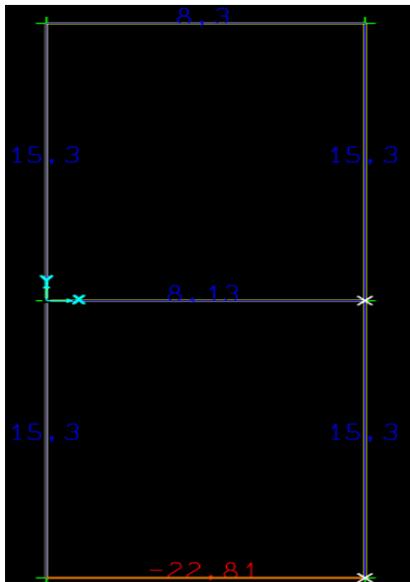
Peso Máximo de Deformación



Siendo esta una perspectiva de una deformación máxima de la estructura del horno, Figura 49, de la misma manera se obtiene los datos de la compresión de mencionada estructura.

Figura 50

Peso en Vigas



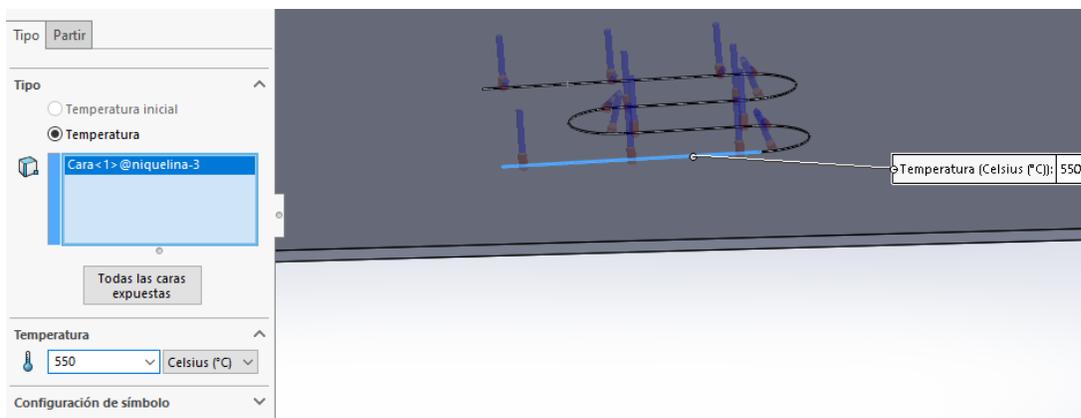
Se obtienen así los datos calculados y aprobados con éxito para la estructura diseñada para la planta, se procede a la simulación técnica y posterior su respectivo análisis

Análisis de térmico dentro de la cámara de la Planta

El flujo de calor al interior de la cámara del horno se da por generación de calor, debido a las resistencias térmicas instaladas, las mismas que alcanzan 550°C en su capacidad máxima, estos datos serán utilizados para el análisis y simulación del comportamiento en el software SOLIDWORKS.

Figura 51

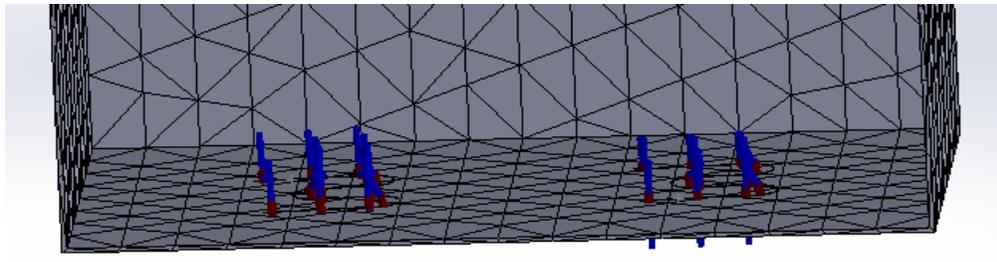
Resistencia Térmica y Datos Técnicos



Las resistencias térmicas son tres, las mismas que están instaladas una en la mitad superior de la cámara y dos en la parte inferior de la cámara, de la misma potencia y características

Figura 52

Flujo de Calor de las Resistencias

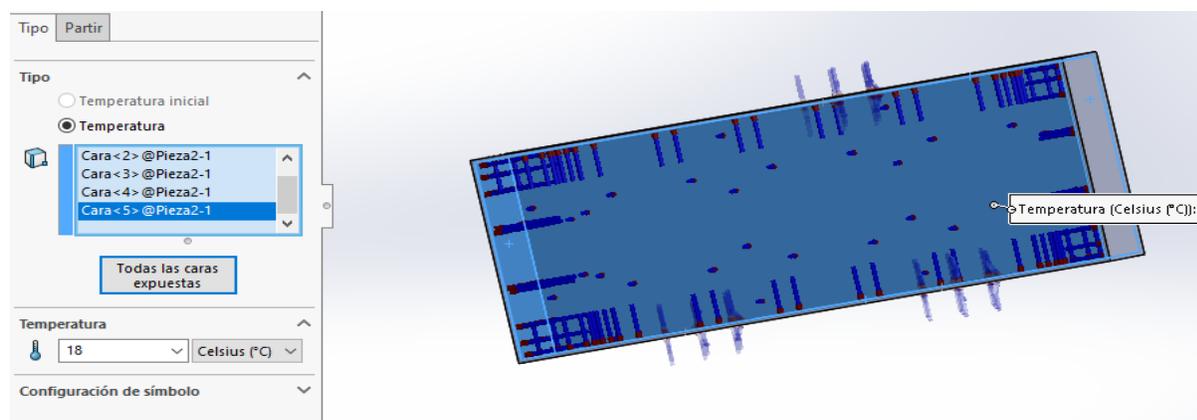


En la simulación, Figura 52, se coloca las cargas térmicas de cada una de las resistencias con un calor máximo de funcionamiento para 2000[W]. Para la simulación se adapta de forma coincidente entre la simulación y la cámara interna, esto en relación al prototipo físico de la planta del horno autoclave.

Es necesario insertar las distintas cargas de temperatura que existen en el horno, esto se lo realiza al colocar en cada una de las paredes de la cámara interna la temperatura ambiente que genera al iniciar el proceso desde el reposo, mediante la lectura inicial al encender los controladores y visualizar en la interfaz

Figura 53

Cargas y Temperaturas de la Cámara



Se considera el material con el que se trabaja, en este caso acero inoxidable 304 utilizado en el diseño y construcción.

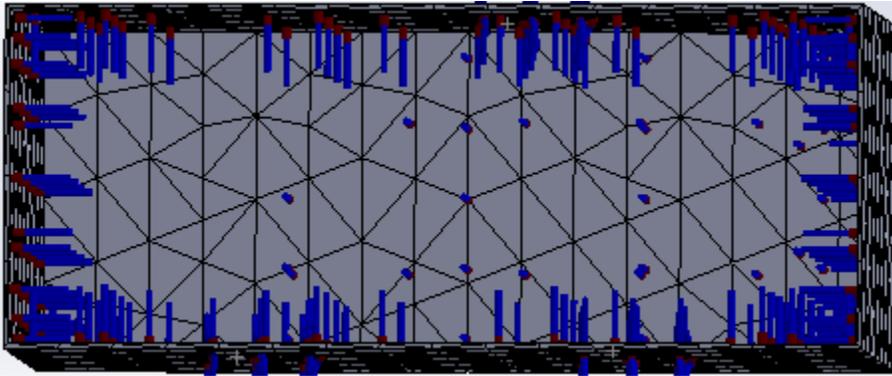
Figura 54

Propiedades Acero Inoxidable 304 dadas por SOLIDWORKS

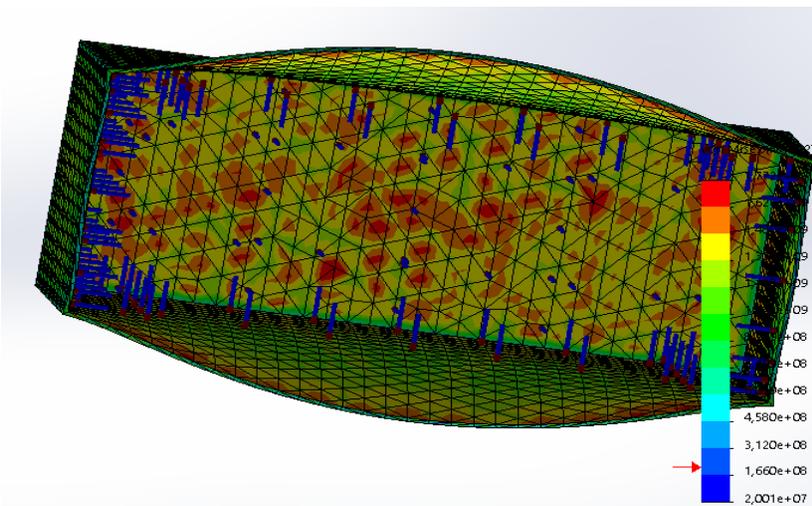
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	190000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante	75000	N/mm ²
Densidad de masa	8000	kg/m ³
Límite de tracción	517.017	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	206.807	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.8e-05	/K
Conductividad térmica	16	W/(m·K)

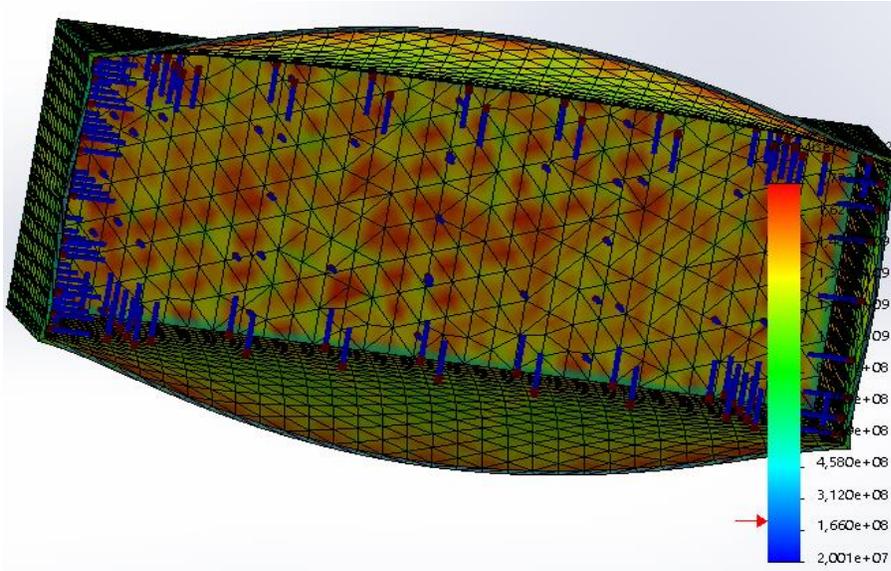
Se inserta las propiedades de las resistencias térmicas, las cuales están constituidas por una aleación con 80% níquel y un 20% cromo

Se procede a insertar las cargas térmicas de todos los materiales intervinientes en el proceso, en este caso se tiene un flujo constante de temperatura en todas las paredes debido a que se utiliza un agitador, que es el encargado de generar una temperatura constante y distribuida al interior de la cámara interna del horno autoclave.

Figura 55*Cargas Térmicas y Mallado*

Como resultados de la simulación, la distribución de la temperatura de las paredes de la cámara con este análisis garantiza el funcionamiento y la resistencia del prototipo

Figura 56*Distribución de Calor***Figura 57***Distribución de Calor*



Con el diseño y cálculo de cada una de las variantes de la cámara del horno autoclave, y en función de las respectivas simulaciones realizadas, se procede a construir el horno.

Capítulo III: Diseño De Hardware Y Software

Requisitos

El horno autoclave de materiales compuestos destinado para el Laboratorio de Materiales Compuestos, en las instalaciones del CICTE, sigue una serie de pasos, donde se busca una solución final práctica para satisfacer las necesidades de dichos compuestos y a partir de los requerimientos del usuario (datos en el alcance)

- i. Analizar y determinar el comportamiento de la planta una vez finalizada su construcción, realizando un levantamiento de información y de esta forma utilizar

dichos parámetros en los diseños y análisis de posibles soluciones y alternativas de automatización y control que mejor se ajusten.

- ii. Análisis y determinación del sistema de control, algoritmo y técnica de control, lógica de operación, supervisión y programas automatizados, en base a las necesidades del cliente, para mantener los parámetros de los materiales compuestos, tanto en el proceso de secado y curado, así como también en el proceso de autoclave presentes en la fabricación de componentes aeronáuticos.
- iii. Analizar y determinar la tecnología de los componentes eléctricos y electrónicos que mejor se ajusten a utilizarse, una vez definida la técnica y algoritmo de control que se implementara en dicho proyecto, para los diferentes bloques de funcionamiento como etapa de potencia, instrumentación, control, tablero eléctrico, sistema eléctrico, etc. para la operación segura del horno.
- iv. Aplicar una estrategia de control que mejor convenga para la optimización en la operación del proceso a automatizarse en el curado y secado del horno autoclave.
- v. En conformidad con los requerimientos del usuario final, la etapa de control maneja a los actuadores del sistema permitiendo un rango de operación entre 25°C y 260°C, con un error máximo de ± 3 °C en temperaturas de 150 a 260 °C y ± 2 °C de error máximo en temperaturas de 25 a 150 °C.
- vi. Análisis y determinación del sistema alarmas integrando los componentes de hardware y software utilizando en la construcción, de tal forma se dé la presencia de indicadores visuales que indiquen las condiciones de funcionamiento del horno
- vii. Diseñar una interface HMI donde se integre, supervise, monitoree y controle las variables de control que el sistema ofrezca para la correcta operación del horno, así como también históricos y curvas de tendencia del proceso y funcionamiento del sistema.

- viii. Determinar y generar la documentación técnica necesaria del proyecto, incluyendo manuales de operación y de mantenimiento del sistema.

Requisitos de Temperatura

Los requisitos de temperatura para el funcionamiento del horno autoclave, se establecen y detallan en la Tabla 21

Tabla 21

Requerimientos de Temperatura Horno Autoclave

Temperatura horno autoclave	
SP Temperatura	Ingreso del operador o en función de programas automatizados
Temp mínima	25 °C (ambiente)
Temp máxima	260 °C
Error máximo	+ - 3 °C en temperaturas superiores a 150 °C y + -2 °C en temperaturas inferiores a 150 °C

Requisitos de tiempo

Los requisitos de tiempo para el funcionamiento del horno autoclave, se establecen y detallan en la Tabla 22.

Tabla 22

Requerimientos de Tiempo Horno Autoclave

Tiempo horno autoclave	
Tiempo funcionamiento.	Ingreso por el operador o en función de programas automatizados
Tiempo min. funcionamiento	5 minutos
Tiempo máx. funcionamiento	6 horas

Requisitos de operación

Los requerimientos de funcionamiento y operación del horno autoclave de materiales compuestos se muestra según la Tabla 23.

Tabla 23

Requerimientos de operación Horno Autoclave

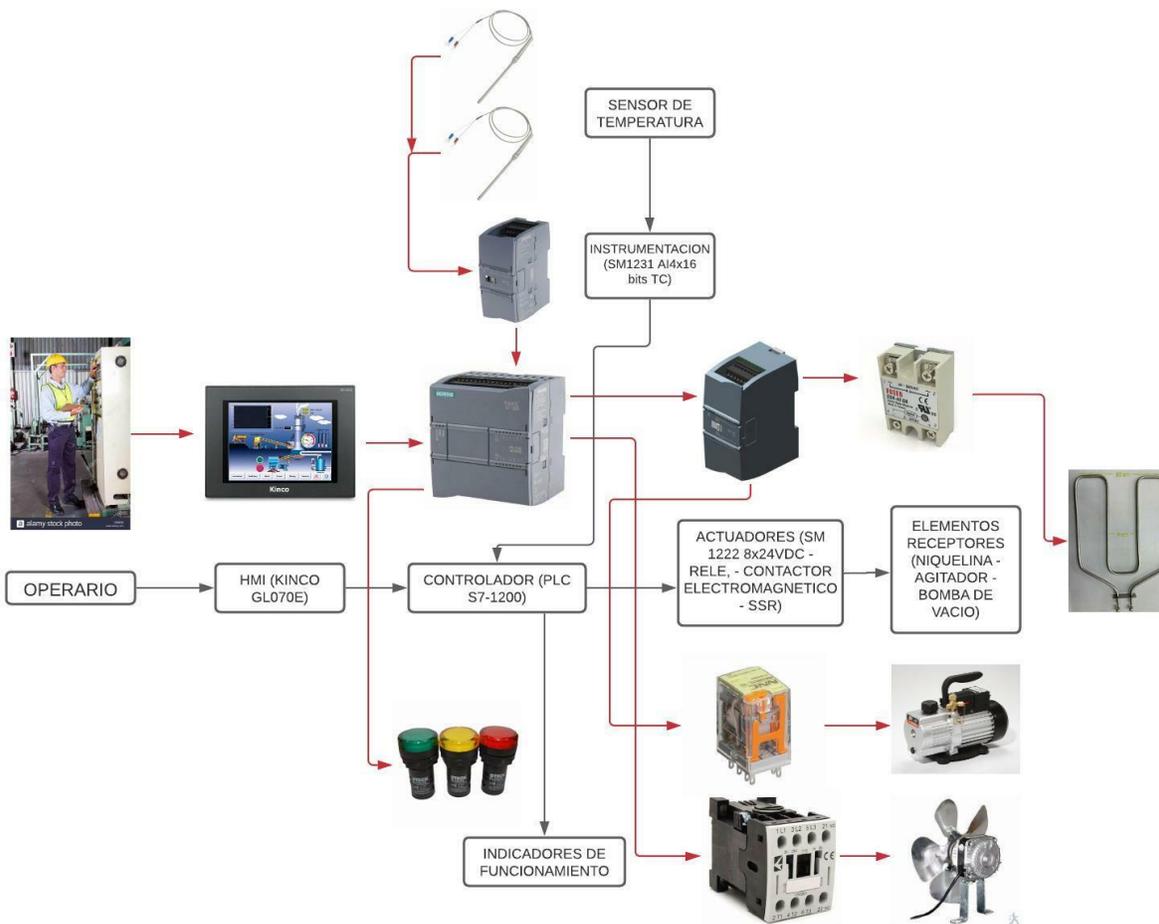
Modo de operación Horno Autoclave	
Modo Manual.	Ingreso de temperatura y tiempo de operación por parte del operador
Modo automático	Permite la selección del programa automatizado de secado, los cuales son configurados en el sistema.

Diseño conceptual

En la Figura 58 se visualiza el diagrama de bloques (etapas del sistema), propuesto para el funcionamiento del proceso de control de temperatura del horno autoclave para materiales compuestos, se procede a definir la relación existente entre los diversos componentes que constituyen el proceso determinado para el curado y secado de materiales compuestos, considerando el sistema de control básico de proceso (BPCS) y el sistema instrumentado de seguridad (SIS) para el diseño a detalle del proceso a automatizar.

Figura 58

Diagrama de Bloques Funcionamiento Horno Autoclave



Sistema SIS.

Partiendo de la tecnología a implementarse en la planta (controlador), el cual monitorea el funcionamiento de las variables físicas del sistema, se implementa un controlador (PLC) el sistema maestro que controla el funcionamiento del sistema SIS y del sistema BPCS en segundo plano.

Si se llega a tener anomalías durante la operación, el PLC apagaría el sistema maestro y se reinicia el sistema, los históricos generan el reporte del fallo para poder corregir y continuar con el correcto funcionamiento como ayuda de una retroalimentación.

La arquitectura maneja los sistemas de forma independiente y encuentra con facilidad el fallo existente durante el proceso.

Para comprobar el sistema, se interconecta de forma directa a las resistencias térmicas (niquelinas), buscando sobrepasar los límites de funcionamiento del sistema, un error superior al manifestado en los requisitos del proyecto, arroja una alarma de mal funcionamiento y si excede los límites planteados el sistema, genera un corte en los actuadores, se reinicia y se muestra históricos correspondientes para dicho caso.

De esta manera se cumple que el sistema no sea complejo, el tamaño moderable para la manipulación, la velocidad de respuesta que está dada por los actuadores, las señales entre PLC con los actuadores y sobre todo teniendo una interfaz hombre maquina amigable con el usuario final que alerte de dichas anomalías que suceden durante el proceso de curado y secado de materiales compuestos

Controlador

Permite el control y automatización del proceso de curado y secado de materiales compuestos en el horno autoclave, este encargado de recibir la información proveniente de los sensores tanto para el sistema BPCS y el sistema SIS, esta información es tratada mediante la instrumentación implementada para luego poder procesar, calcular y emitir una señal en respuesta hacia los elementos actuadores dependiendo de la operación a la que sea sometido el horno autoclave, ya sea en condiciones normales de trabajo o condiciones de peligro donde salga a flote el sistema SIS, llevando el proceso a un estado seguro.

Actuadores

El actuador o accionamiento, es el dispositivo capaz de intervenir en el proceso que se pretende controlar, funciona directamente supervisado por el controlador como mando, en la aplicación del horno autoclave los actuadores intervinientes, cumplen el trabajo de

amplificadores para los elementos receptores o de fuerza, están encargados de suministrar la suficiente energía a los elementos calefactores (niquelinas), motor (agitador). Así como también en base a los lineamientos del sistema SIS, que puede desconectar o cortar el funcionamiento de los actuadores cuando se presenten condiciones de peligro.

Elementos receptores

En función de las señales de salida que envíe el controlador, estas serán puestas en marcha sobre los elementos receptores, la niquelina encargada de aumentar o disminuir la temperatura dentro de la cámara del horno autoclave y el motor encargado de realizar una distribución uniforme del calor dentro del mismo.

Indicadores de funcionamiento

En función de la operación o del modo en el cual se encuentre el controlador, es necesario un indicador visual donde se interprete el estado real del horno autoclave, se toma en cuenta las luces piloto (verde-amarilla-roja) que representan el encendido, proceso de operación, fallo o error respectivamente donde ingresa el sistema SIS como sistema de seguridad.

Sensores de temperatura

Encargados de transmitir la señal de temperatura desde el interior de la cámara del horno autoclave como información para ser procesada por el controlador, esta información emitida por los sensores de temperatura, puede ser enviada en forma de corriente o voltaje al controlador dependiendo del tipo de instrumentación que se aplique. En esta etapa posee sensores independientes tanto para el sistema BPCS y sistema SIS.

Instrumentación

Encargado de acondicionar la señal emitida por el sensor de temperatura, amplificarla, transformarla y enviarla al controlador del horno autoclave para el procesamiento respectivo.

Pantalla HMI

Encargada de establecer la comunicación directa entre el operario y el horno, donde se definen los parámetros de trabajo, modos de operación, temperatura de trabajo, tiempo de funcionamiento y demás parámetros intervinientes en la operación del horno autoclave y que también permite realizar un monitoreo y supervisión constante en tiempo real de la condición de trabajo del horno autoclave, se anuncian mediante la HMI señales del sistema BPCS y del sistema SIS.

Elementos de control en el horno autoclave

Control de temperatura

Para la implementación del control automático de temperatura, es necesario elaborar un sistema capaz de realizar el control y supervisión de temperatura en el interior de la cámara del horno autoclave, mismo que necesita para su implementación de:

- Elemento sensor de temperatura
- Controlador CPU
- Elementos receptores (niquelinas-motor)
- Instrumentación
- Actuadores

Sistema indicador de funcionamiento

El sistema visual, donde se indica la condición de funcionamiento del horno autoclave, se debe de implementar luces indicadoras (piloto), mismas que comunican al operario de forma visual la condición del proceso durante la operación del horno autoclave, donde se necesita:

- Indicadores luz piloto verde
- Indicadores luz piloto amarilla
- Indicadores luz piloto roja
- Paro de emergencia
- Selector manual

Este sistema obedece tanto al sistema BPCS para el control como tal y al sistema SIS como medida de prevención y seguridad del proceso.

Control y supervisión del horno autoclave

Para realizar el control de la variable de temperatura en un tiempo determinado de uso del horno autoclave, es necesario la implementación de una interfaz humano-máquina que permita insertar los valores o datos que serán usados en el proceso de curado y secado del horno autoclave, un CPU que procese la señal de los sensores de temperatura, envíe la señal de salida hacia los actuadores y estos serán los encargados de mantener la temperatura deseada en el tiempo determinado, mismo que necesita de:

- CPU (PLC)
- HMI (Interfaz humano maquina)
- Actuadores (relé-contactor)
- Elementos receptores (niquelinas-agitador)
- Sensores de temperatura
- Instrumentación o circuito de acople

Diseño del sistema de sensado de temperatura e instrumentación

En base a los requerimientos del usuario final (Laboratorio de Materiales Compuestos FAE), de acuerdo a los diferentes sensores de temperatura detallados anteriormente, y teniendo en cuenta que la temperatura máxima de operación del horno es de 260°C y una temperatura mínima ambiente de 25°C, se procede a analizar cual sensor es el adecuado para esta aplicación, así también analizar cuál es la mejor forma de transmitir dicha información (instrumentación – módulo PLC) al controlador, a fin de procesar dicha información y poder usarla para el proceso respectivo de curado y secado de materiales compuestos destinados para aviación, así como también para el sistema SIS encargado de poner en condiciones seguras al sistema en el caso de existir errores durante el proceso.

Análisis

Se analiza que cumpla con los requerimientos para la operación y correcto funcionamiento del horno autoclave en el sistema BPCS y en el sistema SIS.

Debido a que el proceso fundamental es el control de temperatura dentro de la cámara del horno autoclave por periodos determinados de tiempo en función del modo de operación, se debe de realizar una selección adecuada del sensor de temperatura, instrumentación, linealización y transmisión de la información del sensor al controlador para el procesamiento de la información en el sistema, ya que es de vital importancia para el correcto funcionamiento del horno autoclave.

Para el sensor de temperatura debe de cumplir con los requisitos mínimos necesarios que son:

- Rango de operación de 0°C a 400°C (BPCS y SIS)
- Fácil montaje
- Precio accesible

- Fácil mantenimiento
- Funcionamiento confiable
- Posible instrumentar, linealizar o acoplar a un controlador

Para proceder al análisis y selección de este instrumento de medición de temperatura, detalla los más utilizados en el mercado y de fácil adquisición que son:

- Termocupla
- PT-100
- LM35

Termocupla tipo

Formada por la unión de 2 metales diferentes, al calentarse o enfriarse estos materiales existe una variación de potencial eléctrico, que se la acopla en función de los rangos de temperatura, es ideal el uso de la misma cuando se miden temperaturas comprendidas por distancias de 20 a 10 metros

Tabla 24

Características Termocupla

Termocupla tipo K	Características
Rango temp.	-180 a 1370°C
Material	Acero inoxidable
Aislamiento interno	Fibra de vidrio

2.1.1.1 PT-100

Sensor tipo RTD, detector de temperatura por resistencia, tipo de material platino. Su funcionamiento está en que aumenta el valor de su resistencia con el aumento de la temperatura, no es lineal, posee una curva creciente que se la puede caracterizar o instrumentar

Tabla 25

Características PT100

PT-100	Características
Rango temp.	-200 a 500°C
Material	Platino
Aislamiento interno	Fibra de vidrio

2.1.1.2 LM 35

Sensor de temperatura, que proporciona una variación de 10mV por cada grado centígrado, en función de la temperatura de entrada puede entregar una salida proporcional

Tabla 26

Características LM35

LM 35	Características
Rango temp.	-55 a 150°C
Salida	Lineal
Variación	10mV/°C

Al detallar las características de los tres sensores más comunes y de fácil acceso en el mercado, se procede a determinar ventajas y desventajas que presenta cada instrumento, para lo cual se las compara en la Tabla 27.

Tabla 27

Matriz de comparación Sensores de Temperatura

Control de temperatura, horno autoclave			
Sensor de temperatura	LM 35	PT 100	Termocupla
Ilustración del sensor			
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de instrumentación • no necesita circuito de acople o instrumentación necesariamente • Bajo costo • Desmontable • Salida ideal sin perturbaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de medición • Señal de salida en protocolo industrial • Posee una alta precisión • El encapsulado permite un fácil desmontaje del sensor 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependiendo del tipo, posee un mayor rango de temperatura de operación • Tamaño compacto • Robusto • Fácil desmontaje
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de temperatura corto o limitado • Sensibilidad en sus conectores 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita un circuito de acoplamiento o instrumentación • La salida no es lineal • Complejidad para el acople o instrumentación • Costo relativamente alto 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere un circuito de acoplamiento • No posee encapsulado • Circuito de instrumentación de alta complejidad • Costo relativamente mediano

Criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura.

Para proceder a elegir el sensor adecuado en esta aplicación, se procederá a analizar diversos criterios del sensor, calificándolo mediante una tabla de ponderación, así de esta

forma el sensor que posea la mejor puntuación y que cumpla con los requisitos, para ser implementado en el sensado y control de temperatura del horno autoclave.

Costo: fundamental ya que debe ser rentable, cumpliendo con los parámetros de medición para el control de temperatura del horno, puntuación 20/20. Ponderado como mejor puntuado el de menor valor y peor ponderado el de mayor costo

Funcionalidad: Se busca satisfacer las necesidades del usuario en base a las temperaturas a medir, de manera fácil, viable y confiable. La puntuación es de 20/20, siendo el más alto el de mayor funcionalidad y el más bajo el de menor funcionalidad.

Mantenimiento: Cuando el sensor instalado en el horno necesite de cuidados y mantenimiento. La puntuación es 20/20, siendo el más alto cuando menos mantenimiento necesite y más bajo cuando mayor mantenimiento requiera según los estándares del diseñador.

Seguridad: respecto a la robustez comparado con el sistema, si el funcionamiento es confiable y los datos son confiables, que no sucedan condiciones de inseguridad y sobre todo que soporten de forma segura los rangos de operación del horno autoclave. La puntuación es 20/20, siendo la puntuación más alta con el sensor más segura y la de menor ponderación si tiene una menor seguridad durante la medición

Montaje: se analiza la viabilidad y facilidad de montar el sensor al sistema del horno autoclave o si se necesita de circuitería auxiliar, acoples entre otros circuitos. La puntuación es 20/20, siendo la puntuación más alta el sensor más fácil de montar y el de puntuación más baja el sensor más difícil de montar.

La Tabla 28, muestra la ponderación en base a los diferentes criterios de selección para el sensor de temperatura.

Tabla 28*Criterios de Evaluación Para el Sensor de Temperatura*

Criterio	Ponderación
Montaje	20
Seguridad	20
Mantenimiento	20
Costo	20
Funcionalidad	20

Comparados los sensores analizados, en función de los criterios de evaluación para la selección del sensor de temperatura Tabla 29.

Tabla 29*Comparación de Criterios de Evaluación*

Sensor/ criterio	Montaje	Seguridad	Manteni.	Costo	Funciona.	Total
Lm 35	15	15	15	20	10	75
PT-100	15	20	18	16	20	89
Termocupla tipo	15	20	17	17	20	89

Conclusión y selección del sensor de temperatura a utilizar

En base al análisis, entre los instrumentos de medición anteriores pre elegidos se obtuvo un criterio de evaluación en función de diversas características y se llegó a un empate en prestaciones de la termocupla y un sensor PT-100

Se procede a elegir la termocupla de tipo K, que es la que menor costo posee en el mercado de entre los 2 elementos. La elección es aplicable tanto para el sistema BPCS y el sistema SIS debido a que la temperatura de operación de ambos sistemas está dentro del rango de operación de la termocupla tipo K.

Instrumentación del sensor de temperatura

En base a los requerimientos del usuario final (Operarios de laboratorio de materiales compuestos FAE), la planta debe de trabajar desde 25°C como temperatura ambiente, hasta 260°C, ya que dicha planta puede elevar su temperatura hasta los 450°C, se encuentra instalado un agitador encargado de la circulación de aire dentro de la cámara, lo que permite un incremento gradual de la temperatura en función del tiempo, de esta forma llegando a obtener la temperatura deseada, uniforme y estable en el interior del horno, se busca un ajuste automático con un error máximo de hasta $\pm 3^{\circ}\text{C}$ en temperaturas superiores a los 150 °C durante la operación en base a una temperatura referencial o los programas de secado automáticos programados.

Debe de poseer características necesarias para el control de temperatura:

- Medición de temperatura en un rango determinado 25°C – 260°C
- Precisión en la medición
- 4 elementos de medición de temperatura (02 BPCS – 02 SIS)
- Robustez durante su operación
- Entregar un valor de Voltaje de 0 a 10 VDC ó de 4 a 20 mA

Integración sensor de temperatura-controlador

Para la integración del sensor de temperatura (termocupla tipo K), al proceso de curado y secado de materiales compuestos en el horno autoclave, se busca garantizar la fiabilidad de

los datos obtenidos por el sensor de temperatura, se procede a utilizar un módulo de expansión de la familia de los Siemens s7-1200, módulo SM1231 TC debido a que se usara un PLC S7-1200 donado por el Laboratorio de Materiales Compuestos, viable para trabajar en esta aplicación, con la finalidad de garantizar la fiabilidad de la información del sensor y que de esta manera no produzcan fallos al enviarse los datos de temperatura sensados, también se busca instaurar los datos de forma más segura al controlador, evitando fallos que se puedan generar por instrumentación, fallas de calibración en resistencias de precisión o distorsiones en la información tanto el en sistema BPCS y sistema SIS. El módulo a instalar se ve reflejado en las circunstancias de realizar un proceso de toma de datos seguro, robusto, compacto y apegado a las normas industriales.

Figura 59

SM 1231 TC



Los termopares (termocuplas) se forman por la unión de dos metales diferentes que se conectan eléctricamente, produciendo una tensión, dicha tensión es proporcional a la temperatura en unión, la misma que es captada por el módulo SM1231 TC AI 4 X 16 bits, y luego ser enviada al controlador esta información procesada.

Tabla 30*Descripción AI SM1231*

Modelo	SM 1231 AI 4 x 16 bits TC	SM 1231 AI 8 x 16 bits TC
Referencia	6ES7231-5QD32-0XB0	6ES7231-5QF32-0XB0
Dimensiones A x A x P (mm)	45 x 100 x 75	
Peso	180 gramos	190 gramos
Disipación de potencia	1,5 W	
Consumo de corriente (bus SM)	80 mA	
Consumo de corriente (24 V DC) ¹	40 mA	

¹ De 20,4 a 28,8 V DC (clase 2, potencia limitada o alimentación de sensor por PLC)

Nota: Obtenido de (Siemens, 2008)

Al conectar termopar al módulo, los 2 hilos generan una tensión, esta tensión expresara en grados multiplicado por 10, como valor de lectura. Por ejemplo, si el sensor conectado al módulo SM1231TC percibe 30,5° C se expresará como 305 en decimales, con una tensión de valor máximo de rango nominal de 27648 decimales.

Para la selección del termopar, se debe de considerar la Tabla 31 de selección del termopar, donde se detallan las diferentes características en los diferentes termopares que permite el SM1231 TC

Tabla 31*Rangos de Operación SM1231*

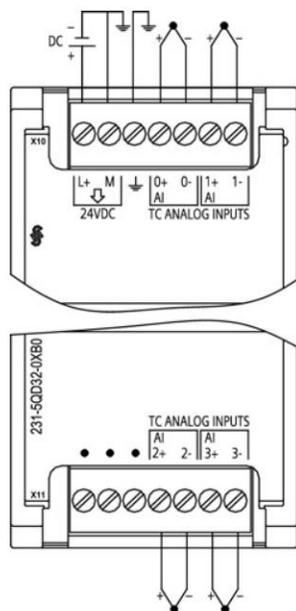
Tipo	Rango de saturación mínimo ¹	Rango nominal límite inferior	Rango nominal límite superior	Rango de saturación máximo ²	Precisión en rango normal ^{3,4} a 25 °C	Precisión de rango normal ^{1,2} de -20 °C a 60 °C
J	-210,0 °C	-150,0 °C	1200,0 °C	1450,0 °C	±0,3 °C	±0,6 °C
	-346,0 °F	-238,0 °F	2192,0 °F	2642,0 °F	±0,5 °F	±1,1 °F
K	-270,0 °C	-200,0 °C	1372,0 °C	1622,0 °C	±0,4 °C	±1,0 °C
	-454,0 °F	-328,0 °F	2501,6 °F	2951,6 °F	±0,7 °F	±1,8 °F
T	-270,0 °C	-200,0 °C	400,0 °C	540,0 °C	±0,5 °C	±1,0 °C
	-454,0 °F	-328,0 °F	752,0 °F	1004,0 °F	±0,9 °F	±1,8 °F
E	-270,0 °C	-200,0 °C	1000,0 °C	1200,0 °C	±0,3 °C	±0,6 °C
	-454,0 °F	-328,0 °F	1832,0 °F	2192,0 °F	±0,5 °F	±1,1 °F
R & S	-50,0 °C	100,0 °C	1768,0 °C	2019,0 °C	±1,0 °C	±2,5 °C
	-58,0 °C	212,0 °F	3214,4 °F	3276,6 °F ⁵	±1,8 °F	±4,5 °F
B	0,0 °C	200,0 °C	800,0 °C	--	±2,0 °C	±2,5 °C
	32,0 °F	392,0 °F	1472,0 °F	--	±3,6 °F	±4,5 °F
	--	800,0 °C	1820,0 °C	1820,0 °C	±1,0 °C	±2,3 °C
	--	1472,0 °F	3276,6 °F ⁵	3276,6 °F ⁵	±1,8 °F	±4,1 °F
N	-270,0 °C	-200,0 °C	1300,0 °C	1550,0 °C	±1,0 °C	±1,6 °C
	-454,0 °F	-328,0 °F	2372,0 °F	2822,0 °F	±1,8 °F	±2,9 °F
C	0,0 °C	100,0 °C	2315,0 °C	2500,0 °C	±0,7 °C	±2,7 °C
	32,0 °F	212,0 °F	3276,6 °F ⁵	3276,6 °F ⁵	±1,3 °F	±4,9 °F
TXK/XK(L)	-200,0 °C	-150,0 °C	800,0 °C	1050,0 °C	±0,6 °C	±1,2 °C
	-328,0 °F	302,0 °F	1472,0 °F	1922,0 °F	±1,1 °F	±2,2 °F
Tensión	-32512	-27648 -80mV	27648 80mV	32511	±0,05%	±0,1%

Nota: Obtenido de (Siemens, 2008)

Cada canal de módulo de señales termopar puede configurarse con un tipo de termopar diferente, es seleccionable en el software durante la configuración del módulo. En función de esta aplicación se procede al uso de dos termocuplas tipo K (BPCS) y dos termocuplas tipo K (SIS), ya que se encuentra dentro de nuestros parámetros de trabajo normal.

Figura 60

Diagrama de Cableado SM1231 TC



Este módulo permite hasta 4 entradas TC, con las características de cada módulo Tabla 32.

Tabla 32

Características SM1231 AI 4X16

Modelo		SM 1231 AI 4 x 16 bits TC	SM 1231 AI 8 x 16 bits TC
Número de entradas		4	8
Rango		Véase la tabla de selección de termopares (Página 1518).	
Rango nominal (palabra de datos)			
Rango de saturación máximo/mínimo (palabra de datos)			
Rebase por exceso/defecto (palabra de datos)			
Resolución	Temperatura	0,1 °C/0,1 °F	
	Tensión	Signo más (+) de 15 bits	
Tensión soportada máxima		± 35 V	
Supresión de ruido		85 dB para el ajuste de filtro seleccionado (10 Hz, 50 Hz, 60 Hz o 400 Hz)	
Rechazo en modo común		> 120 dB a 120 V AC	
Impedancia		≥ 10 MΩ	
Aislamiento	De campo a lógica	707 V DC (ensayo de tipo)	
	De campo a 24 V DC	707 V DC (ensayo de tipo)	
	De 24 V DC a lógica	707 V DC (ensayo de tipo)	
Entre canales		120 V AC	
Precisión		Véase la tabla de selección de termopares (Página 1518).	
Repetitividad		±0,05% FS	
Principio de medición		Integrador	
Tiempo de actualización del módulo		Véase la tabla de selección de reducción de ruido (Página 1518).	
Error de unión fría		±1,5 °C	
Longitud de cable (metros)		100 metros hasta el sensor (máx.)	
Resistencia del cable		100 Ω máx.	

Nota: Obtenido de (SIMATIC, 2021)

Elemento calefactor

En base a la temperatura de operación establecida por el usuario que está entre 25°C y 260°C, se establece un máximo de temperatura de 300°C para el diseño y que dicho sistema eléctrico posee una conexión de 220 Vac, dado que la resistencia térmica se encarga de transformar la energía eléctrica que se le suministra en energía calorífica, conocido como el efecto Joules.

$$P = R * I^2 = \frac{V^2}{R}$$

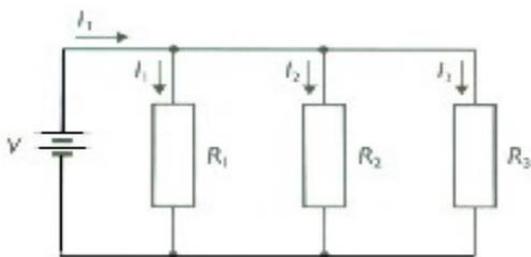
El cálculo máximo de la potencia de consumo del horno, considerando pérdidas en las paredes del horno y de tal forma que se obtenga una distribución uniforme de hasta 300°C dentro de la cámara, se procedió a utilizar un arreglo de 3 niquelinas de 2000W cada una, para la instalación

Dichas niquelinas pueden proporcionar temperatura de hasta 700°C que se puede controlar en función de las necesidades de la estructura mecánica, así también en base de las especificaciones de la matriz polimérica que se necesita secar y o curar en el proceso de elaboración de materiales compuestos.

Por lo cual se las interconectara en circuito paralelo, de tal forma que siempre estén alimentadas con 220VAC y en el caso de que llegase a fallar alguna, el resto de niquelinas sigan en operación .

Figura 61

Circuito Paralelo



$$V_{\text{generador}} = V_1 = V_2 = V_3 \quad 32$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad 33$$

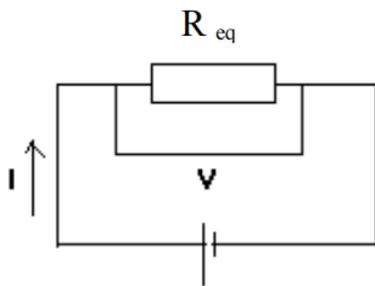
La suma de las potencias parciales de un circuito paralelo es igual a la potencia total que suministra el generador.

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3$$

34

Figura 62

Circuito Equivalente



Considerando los requerimientos del operario para el horno autoclave, es necesario cumplir con la variación de 30°C a 250°C en función de los programas de secado, para la cual se busca implementar una fuente calorífica que sobrepasé ese rango de operación

La termorresistencia, como elemento emisor de calor es una estructura que, en base a una carga eléctrica genera calor, este elemento tiene un principio de funcionamiento mediante la circulación de corriente eléctrica por su estructura, la misma que convierte la energía eléctrica en energía calorífica

La emisión de calor es irradiada en todas las direcciones como fuente emisora de calor, pero toda esta energía es distribuida dentro de la cámara del horno y se transfiere el calor de forma convencional

Las resistencias presentes en el mercado ofrecen diversas alternativas, en base al diseño electrónico a definir, se busca obtener el control de dicha fuente calorífica, a través de los actuadores para la activación y desactivación de la misma mediante un sistema controlado o programas de automatización

Donde:

$$P_{requerida} = \text{potencia para las resistencias (W)}$$

$$P_{termica} = \text{potencia termica requerida del horno (W)}$$

$$n = \text{coeficiente de resistencia electrica}$$

La necesidad energética del horno se la calculara en función de las resistencias instaladas, pero por defecto el coeficiente de las resistencias debido a los efectos de pérdidas, varían entre el 70 y 80%, conservando el criterio del diseñador, a su efecto se trabajará con un 75% para coeficiente de eficiencia.

$$P_{termica} = P_{requerida} * n \quad 35$$

$$P_{total\ instalada} = P_{resistencia\ 1} + P_{resistencia\ 2} + P_{resistencia\ 3}$$

$$P_{total} = 6000\ w = P_{requerida}$$

$$P_{termica} = 6000 * 0.75 = 4500w$$

Por lo tanto, para cubrir la necesidad del horno, se toma en cuenta las pérdidas del mismo, es necesario satisfacer los 4500W que se empleara dentro de la cámara

Ahora en función de la ley de Ohm:

$$Potencia = Voltaje * Intensidad \quad 36$$

Se realiza un cambio de variable en la ecuación (27) donde se obtiene en (28)

$$Voltaje = Resistencia * Intensidad \quad 37$$

$$P = \frac{V * V}{R} \quad 38$$

Despejando los valores se encuentra el valor de resistencia reemplazando en la ecuación (29)

$$R = 220 * \frac{220}{6000}$$

$$R = 8 \text{ ohms}$$

La resistencia eléctrica que se debe de emplear, debe de tener una resistencia de 8 Ohms en su estructura

La que mejor se adaptaron a las necesidades de esta configuración, es una de tipo M, generalmente son fabricadas de materiales de níquel-cromo, las mismas que trabajan hasta en un máximo de 750°C, poseen una muy buena flexibilidad.

Figura 63

Termorresistencia Tipo M

**Indicadores (luz piloto)**

Estos indicadores luminosos (luz piloto), de baja potencia o bajo consumo tiene el propósito de alertar de forma visual diferentes etapas de un proceso de automatización, mientras que un equipo se encuentra funcionando el indicador (luz piloto) se encuentra encendida. Sirve para controlar y en algunos casos dividir circuitos o procesos de una instalación eléctrica.

Se define 4 procesos para estas luces piloto, Figura 64.

Figura 64

Luces Piloto Proceso Horno Autoclave



- Luz piloto roja. Se activa cuando se encuentra en un paro de emergencia (detenido o paralizado), el proceso se ha detenido o no inició
- Luz piloto amarilla. Esta se enciende en un estado de reposo, en el ingreso de información previo a iniciar el proceso del horno autoclave.
- Luz piloto verde. El proceso está en normal funcionamiento, el proceso se encuentra en estado activo y de forma correcta.
- Luz piloto roja intermitente. Se activa y desactiva cuando el proceso del horno autoclave entra en modo de ejecución SIS, al presentarse alguna anomalía en el proceso, esta luz genera el indicar visual y posteriormente la desconexión del suministro de energía al proceso.

Elementos de maniobra

Paro de emergencia

El pulsador de paro de emergencia sirve para prevenir y cortar situaciones que puedan generar peligro durante el proceso a los operadores y los componentes físicos del horno autoclave. Al accionar dicho pulsador se corta la energía que se suministra a los equipos de control y de potencia.

Figura 65*Pulsador Paro de Emergencia***Selector**

Dispositivo de maniobra, permite la conmutación de dos posiciones estable, similar a los interruptores en cuanto al funcionamiento, se los presenta en NA (normalmente abierto) y NC (normalmente cerrado), considerando su posición inicial

Para la aplicación en el horno autoclave se lo incorpora para el accionar o energización del circuito de control (PLC, fuente DC, HMI)

Figura 66*Selector 2 Posiciones NA*

Elementos de protección

Encargados de proteger a los diferentes componentes eléctricos y electrónicos que puedan sufrir daños por sobre tensiones o descargas eléctricas no controladas conectados al circuito eléctrico del horno autoclave, estos elementos son empleados a la par tanto para el sistema BPCS y sistema SIS.

Fusibles y porta fusibles

El fusible es un componente de seguridad utilizado para prevenir daños por exceso de corriente eléctrica en un circuito eléctrico, o para la protección general de equipos eléctricos o electrónicos y redes industriales.

Se procede a implementar fusibles eléctricos para proteger a los circuitos y componentes electrónicos (PLC, Fuente DC)

El valor de máxima corriente de soporte del fusible se lo obtiene en base a :

$$P_{total} = \sum potencias = P_{PLC} + P_{Fuente} \quad 39$$

$$P_{total} = V * I_{PLC} + V * I_{Fuente} \quad 40$$

$$P_{total} = 110 * 1.5 + 24 * 2.5$$

$$P_{total} = 165 + 60 = 225 \text{ w}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{225}{110} = 2,05 \text{ amperios}$$

En base al consumo de corriente, se procede a implementar 2 fusibles de 6 A de corriente máxima para el circuito de control disponible en el mercado, mismo que se encargara

de suministrar energía eléctrica a los componentes electrónicos utilizados (PLC, SM1231, SM 1222, HMI)

Figura 67

Fusible de 6 Amperios.



Mismo fusible será integrado mediante un porta fusible con la particularidad que sea aplicable para riel tipo DIN

Figura 68

Porta fusible para Riel DIN



Disyuntor

Un disyuntor, interruptor automático, breaker o pastilla es un aparato capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que por él

circula excede de un determinado valor o, en el que se ha producido un cortocircuito, con el objetivo de no causar daños a los equipos interconectados.

Considerando la máxima potencia consumida por el horno autoclave se define el valor del disyuntor en base a:

$$P = V * I$$

Se considera un valor del 10% para sobre consumo en las termorresistencias.

$$I = \frac{P * 1,1}{V} = \frac{6000 * 1.1}{220} = 30 A$$

Se selección un disyuntor de 3 polos de 40A a 400V ac, sobredimensionando las características del disyuntor para proporcionar seguridad en la ejecución del proceso de curado y secado de materiales compuestos.

Figura 69

Disyuntor 3 Polos, 40 Amperios.



Termostato

Es un instrumento que detecta la temperatura de un fluido, aire o gas y se ajusta en base a requerimientos específicos. Estos dispositivos se usan para evitar sobrecalentamientos de termorresistencias a fin de evitar daños en la estructura física

Técnicamente son compuestos por un interruptor de encendido/apagado que se activa cuando el sensor interno particular detecta un cambio de temperatura fuera de parámetros o de la tolerancia del elemento

Dentro de las capacidades máximas del horno autoclave está la de temperatura máxima de operación 300 °C, se implementa un termostato bimetálico de 300°C NC, optando por la opción para la regulación de fuera de corte o desconexión al exceso de temperatura como parte del sistema SIS en temperaturas altas.

Figura 70

Termostato 300°C NC



La ventaja de utilizar el termostato de 300°C es de que protege directamente a la planta, no solo de un sobrecalentamiento, sino también de una sobretensión o descargas estáticas y de un corto circuito ya que posee rangos eléctricos nominales para su operación (250 Vac / 25 A), contribuyendo al sistema de seguridad (SIS) durante operación de la planta.

Elementos de accionamiento

Contactor electromagnético

Este contactor tripolar para riel DIN o tornillo montable, permite la activación y desactivación del motor bifásico incorporado para cumplir con la función de agitador dentro de la cámara interna del horno autoclave

La bobina electromagnética se activa con 220 Vac, soporta hasta 22 A para la conmutación de los contactos

Este contactor es adecuado para conmutar, proteger y arrancar motores y plantas, posee como objetivo el ahorro de espacio, flexibilidad, conveniencia y fácil cableado, instalación a través de varios accesorios. Trabaja a la par con el sistema SIS, ya que en el caso de presentarse fallos donde llegue a intervenir dicho sistema, se corta el suministro de energía eléctrica en los actuadores y elementos receptores.

Figura 71

Contactor Electromagnético 220Vac, 22 Amperios.



Relé electromagnético

Dispositivo electrónico, intercalada en un circuito, genera determinadas acciones generalmente de apertura o cierre entre sus contactos.

El relé electromagnético se acondiciona a la salida digital del módulo SM1222 de 24Vdc, el relé electromagnético este encargado de activar y desactivar el paso para la bomba de vaciado en función del voltaje que se aplique a su bobina que está diseñada 24 Vdc.

Se utiliza un relé que soporte 220 VAC con paso de corriente de hasta 5 A

Figura 72

Relé Electromagnético 220Vac 5A



Relacionado directamente con el sistema SIS, ya que en el caso de presentarse fallos donde llegue a intervenir dicho sistema, se corta el suministro de energía eléctrica para los actuadores y elementos receptores.

Relé de estado sólido (SSR)

El SSR por la prestación de conmutación rápida se conecta a la salida digital del módulo SM1222 en conjunto con la programación generada por el control del S7-1200, ya que se utiliza una salida de tipo onda PWM generada por bloques timers, para variar el voltaje de suministro a las termorresistencias a controlar mediante el controlador PID.

Se aprovecha la conmutación sin la intervención de partes mecánicas mejorando el tiempo de respuesta del circuito de potencia, generando un control adecuado en la temperatura del horno autoclave.

Se procede a utilizar un SSR de 24 VDC de alimentación y que soporte hasta 40 Amperios en corriente alterna suministro 220 Vac

Figura 73

SSR 40 amperios ac



Relacionado directamente con el sistema SIS, ya que en el caso de presentarse fallos donde llegue a intervenir dicho sistema, se corta el suministro de energía eléctrica para los actuadores y elementos receptores.

Módulos PLC s7-1200

Fuente de poder 24 Vdc Logo.

La fuente de poder logo entrega a su salida 24V / 2.5 A dc, con una alimentación de 110-220 Vac, posee un diseño de módulo LOGO 8, ofrece muchas prestaciones en un mínimo espacio. Se destaca su eficacia energética en todo margen de carga y las reducidas pérdidas en régimen sin carga garantizando un funcionamiento eficiente.

Figura 74

Fuente de poder 24Vdc Logo 8



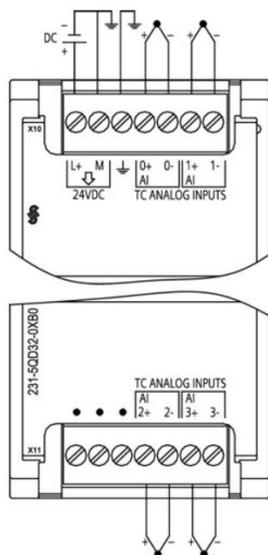
Se utiliza esta fuente de poder con la finalidad de suministrar de energía eléctrica a los módulos integrados al PLC 27-1200 para que pueda llevar a cabo el proceso de curado y secado de materiales compuestos del horno autoclave de la mejor forma posible sin caídas de tensión o fallos por suministro de energía en los módulos de expansión. Este módulo cumple la función de alimentación para equipos de 24 Vdc que son utilizados tanto para el sistema BPCS como el sistema SIS.

Módulo de entradas analógicas SM1231 TC 4X16 bits

El módulo de entradas analógicas SM 1231 AI4 X TC x 16 bits (thermocouple) mide el valor de la tensión conectada a la entrada del módulo. El valor puede ser tanto la temperatura de un termopar como voltios. Si se trata de voltios, el valor máximo del rango nominal serán 27648 decimal.

Figura 75

Diagrama de cableado SM 1231 TC



Se utiliza mencionado módulo, ya que se evita la instrumentación para el sensado de datos provenientes del sensor termocupla, de esta forma realizando una toma de datos confiable, robusta y de manera segura disminuyendo el margen de error por instrumentación o mala calibración de los elementos a utilizarse en una instrumentación para la interconexión de la información obtenida por los sensores hacia el PLC. Este módulo es empleado para las 4 termocuplas del sistema tanto BPCS (02 termocuplas tipo K) como del sistema SIS (02 termocuplas tipo K)

Módulo de salidas digitales SM1222

El módulo de expansión para salidas digitales SM 1222 16 X24 Vdc, flexible para diversas aplicaciones gracias a las variadas posibilidades de comunicación. Se adaptan los módulos de señales a la configuración de un SIMATIC S7-1200 (exceptuando la CPU 1211C). Se utiliza la prestación especial de salida transistorizada 0.5 A.

Figura 76

SM 1222 DQ 16 x 24 Vdc

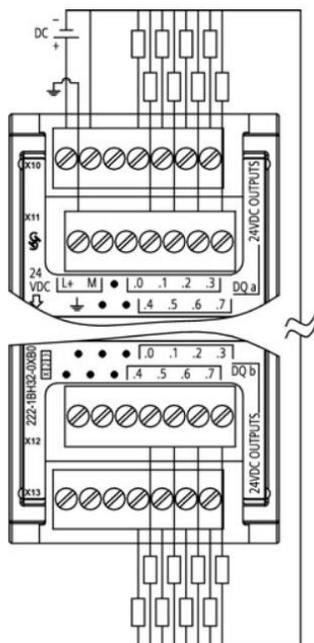


Figura 77

Módulo SM1222 DQ 16 X 24 Vdc



Se integra mencionado módulo debido a la necesidad de crear un canal de impulsos PWM para el sistema BPCS, se prepara la modulación de ancho de impulso necesaria para

controlar el suministro de energía eléctrica en las termorresistencias y de esta forma en base a las necesidades del horno autoclave realizar un incremento progresivo y controlado de la temperatura al interior de la cámara, ya sea a su máxima intensidad 100% PWM o su menos intensidad 0% PWM

Tablero de control

El tablero de control cuenta con todos los elementos eléctricos y electrónicos que necesita el horno autoclave para su correcto funcionamiento.

Se detallan en base al siguiente detalle:

- PLC S7-1200
- Módulo SM1231 AI4 x 16 bits TC
- Módulo SM1222 DQ 16 X 24 Vdc
- Fuente de poder 24 Vdc Logo 8
- Relé de estado sólido Input 4 a 32 Vdc salida 40 A
- Contactor electromagnético 3 polos
- Disyuntor 3 polos 40 A
- Relé electromagnético
- Luz piloto verde
- Luz piloto amarillo
- Luz piloto roja
- Pantalla HMI
- Fusible 6 A
- Porta fusible de 18 A

El tablero eléctrico a utilizar posee dimensiones de 30x40x20 cm, fabricado de tol galvanizado de 2mm de espesor, tipo armario, protección ip 65

Figura 78

Tablero tipo armario eléctrico 30x40x20 cm



- **Vista frontal externa instalada**

Figura 79

Vista Frontal Tablero OFF



Figura 80

Vista Frontal Tablero ON



- Vista frontal interna instalada

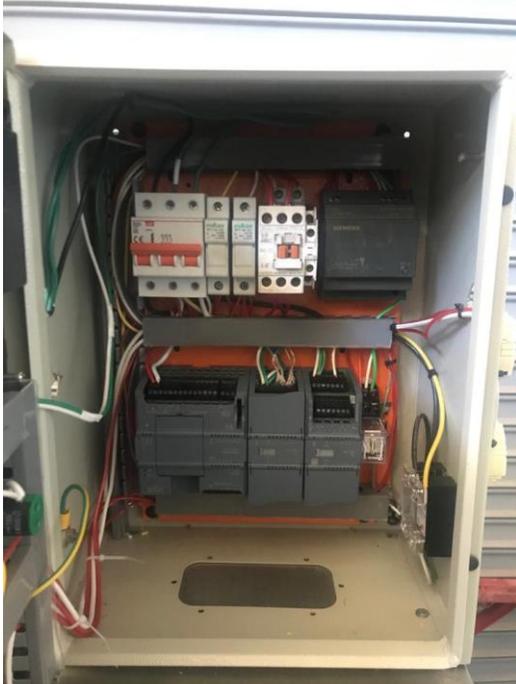
Figura 81

Vista Interna Tablero Eléctrico Trasera Panel HMI



Figura 82

Vista Interna Tablero Eléctrico



La conexión eléctrica realizada, está en base a los diagramas de control y de potencia, interviniendo los componentes eléctricos y electrónicos detallados y necesarios para que el proceso de curado y secado de materiales compuestos pueda desempeñarse de la mejor forma posible para cumplir el proceso. En La Figura 80, se puede observar el Horno encendido como parte del proceso inicial.

Diagrama eléctrico

Diagrama de control

Figura 83

Diagrama de Control Horno Autoclave

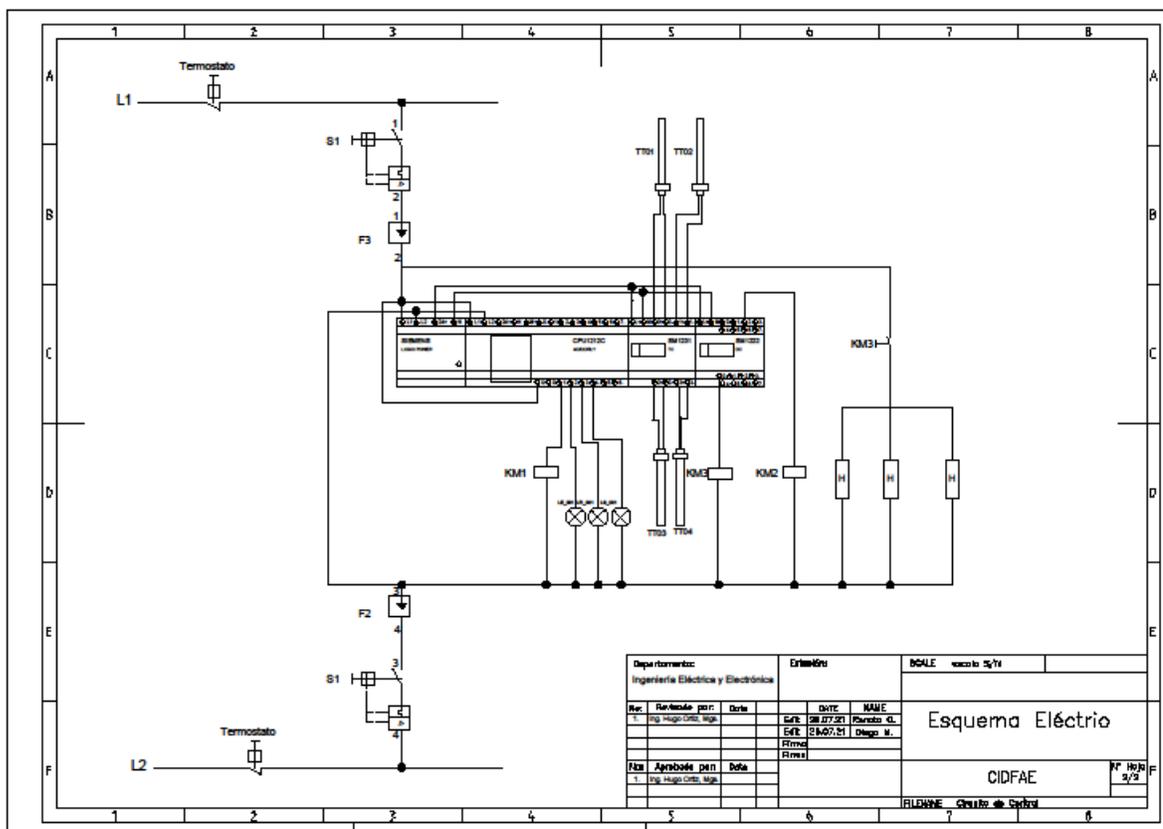
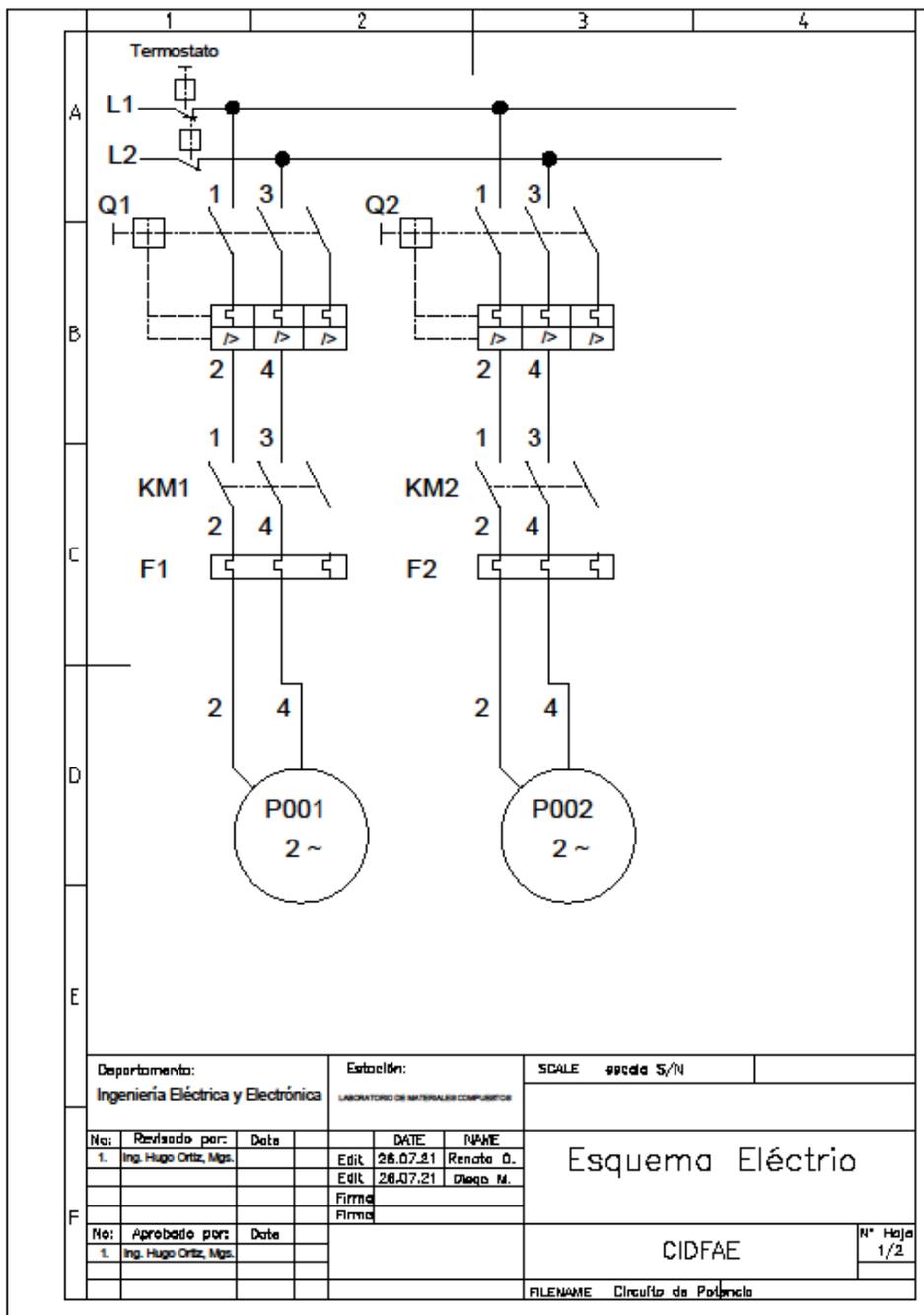


Diagrama de fuerza

Figura 84

Diagrama de Fuerza Horno Autoclave



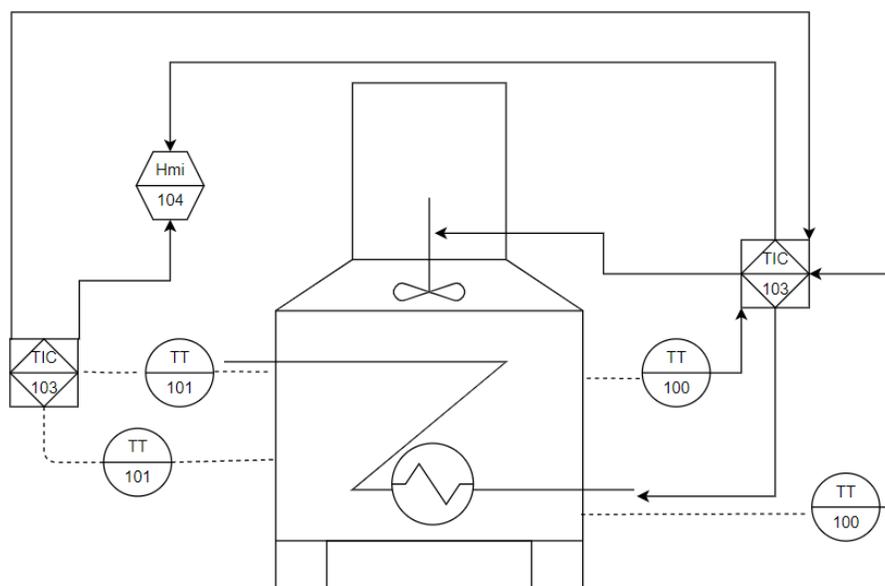
Departamento: Ingeniería Eléctrica y Electrónica		Estación: LABORATORIO DE MATERIALES COMPUTORIZ		SCALE	escala S/N
No:	Revisado por:	Date	DATE	NAME	Esquema Eléctrico
1.	Ing. Hugo Ortiz, Mgs.		28.07.21	Renato D.	
			28.07.21	Diego M.	
No:	Aprobado por:	Date			CIDFAE
1.	Ing. Hugo Ortiz, Mgs.				N° Hoja 1/2
FILENAME					Circuito de Potencia

Diagrama P&ID del horno autoclave

En la figura 85 se muestra el diagrama P&ID de la planta, donde se encuentra el lazo de control y un sistema auxiliar de protección, el cual funciona como maestro para controlar alguna anomalía durante la operación.

Figura 85

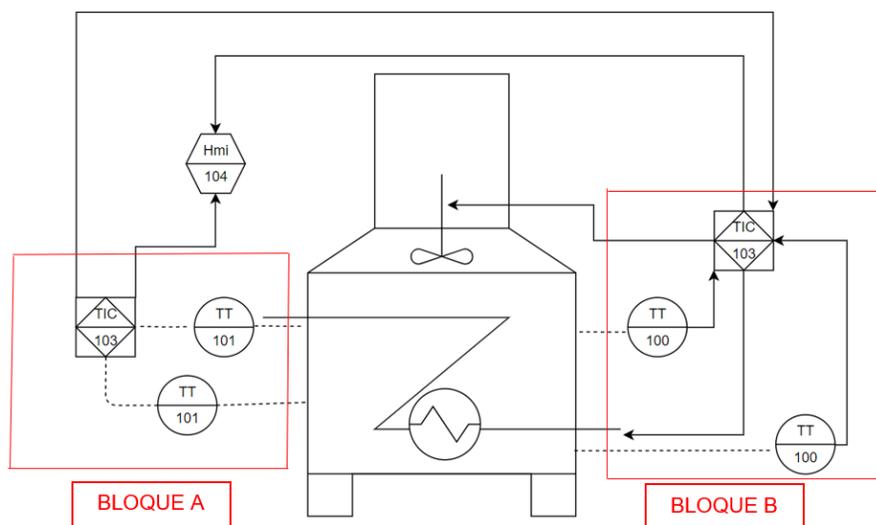
Diagrama P&ID Horno Autoclave



Dentro del diagrama P&ID de la Figura XX, se muestra el proceso de los sistemas BPCS y sistema SIS.

Figura 86

Diagrama P&ID Sistema BPCS y SIS

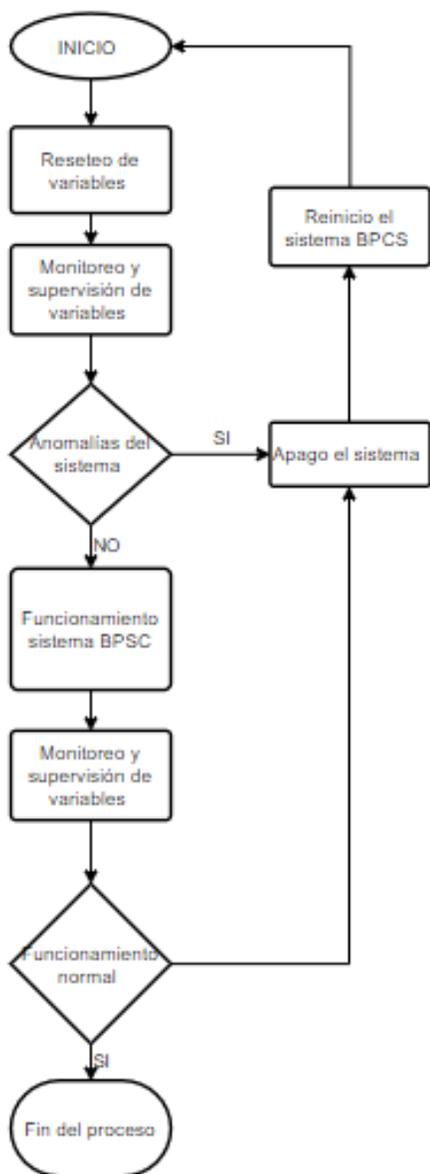


En la figura 86 se puede visualizar el funcionamiento de la planta mediante un diagrama P&ID, donde se detalla el sistema BPCS y el sistema SIS .

El bloque A muestra el sistema BPCS siendo el encargado del control y normal funcionamiento de la planta, mientras que el bloque B es el sistema SIS que entra en funcionamiento si y solo si existen lecturas superiores a las manifestadas en los requisitos del cliente durante operación de la planta. Actuando como un control maestro que efectúa la acción de corte y reinicio del sistema al tener valores excesivos de temperatura (fuera de parámetros) durante el funcionamiento del sistema.

Figura 87

Diagrama de Flujo Sistema SIS



En la Figura 87 se muestra el diagrama de flujo de funcionamiento del sistema SIS del horno autoclave para el curado y secado de materiales compuestos

- **Procedimientos de Operación y Mantenimiento del SIS.**

Se asegura que los procedimientos estén acordes para salvaguardar los equipos durante la operación en base a los requisitos de funcionamiento, cumpliendo con las alarmas (alto-alto, bajo-bajo) y los respectivos paros de emergencia, indicando las anomalías o errores

al operador mediante un HMI (interfaz hombre máquina) para que el operador conozca de los riesgos y estado del proceso, las consecuencias potenciales si las alarmas y los paros de suministro de energía eléctrica no se activan y demás riesgos que puedan suscitarse durante la operación.

Graficet proceso de secado y curado de materiales compuestos

Este diagrama funcional describe los procesos a automatizar, tomando en cuenta las acciones por realizar, y los procesos intermedios que provocan dichas acciones

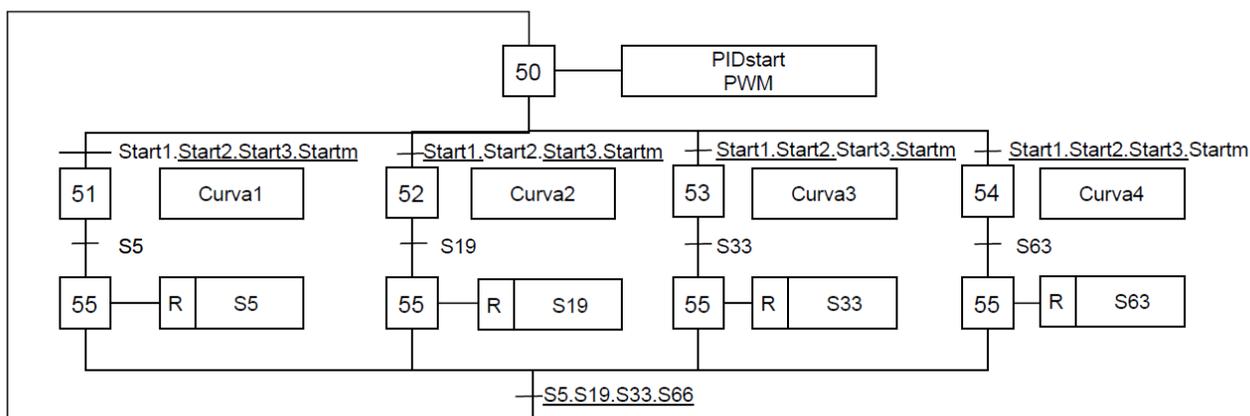
Se define las diversas etapas de control y se describe el funcionamiento en base a la programación del PLC

Principal

Figura 88

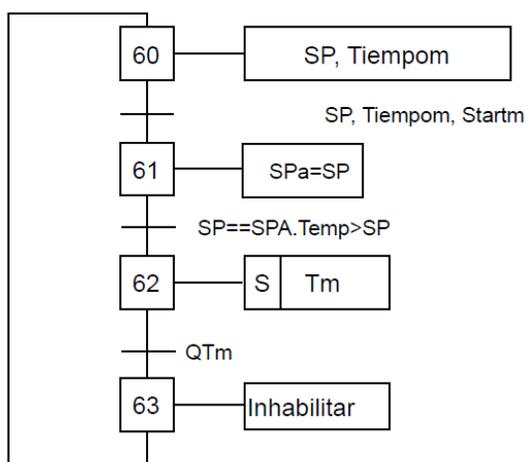
Graficet Principal

Principal

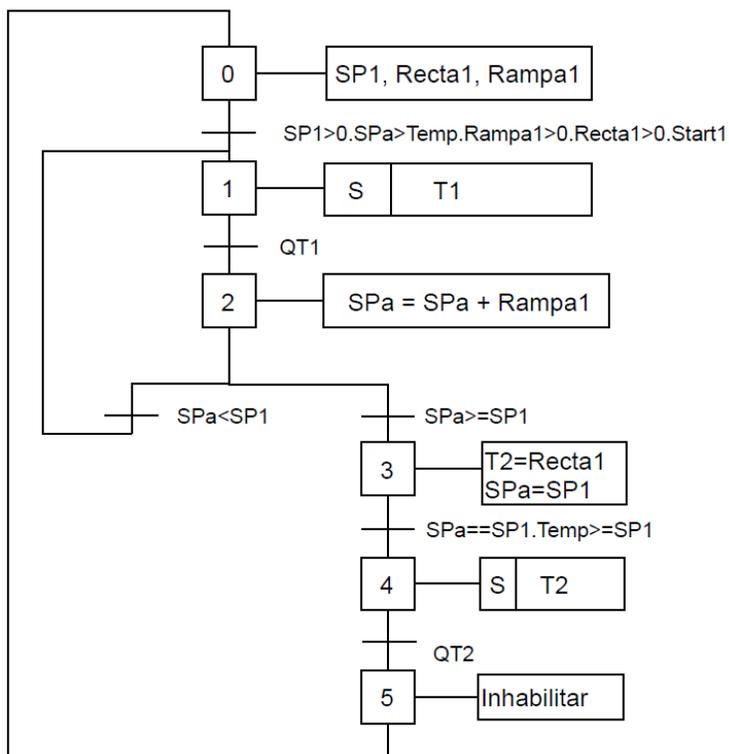


Modo manual**Figura 89***Grafcet Proceso Modo Manual*

Modo Manual

**Modo rampa simple****Figura 90***Grafcet Proceso Automático Rampa Simple*

Perfil de Temperatura 1

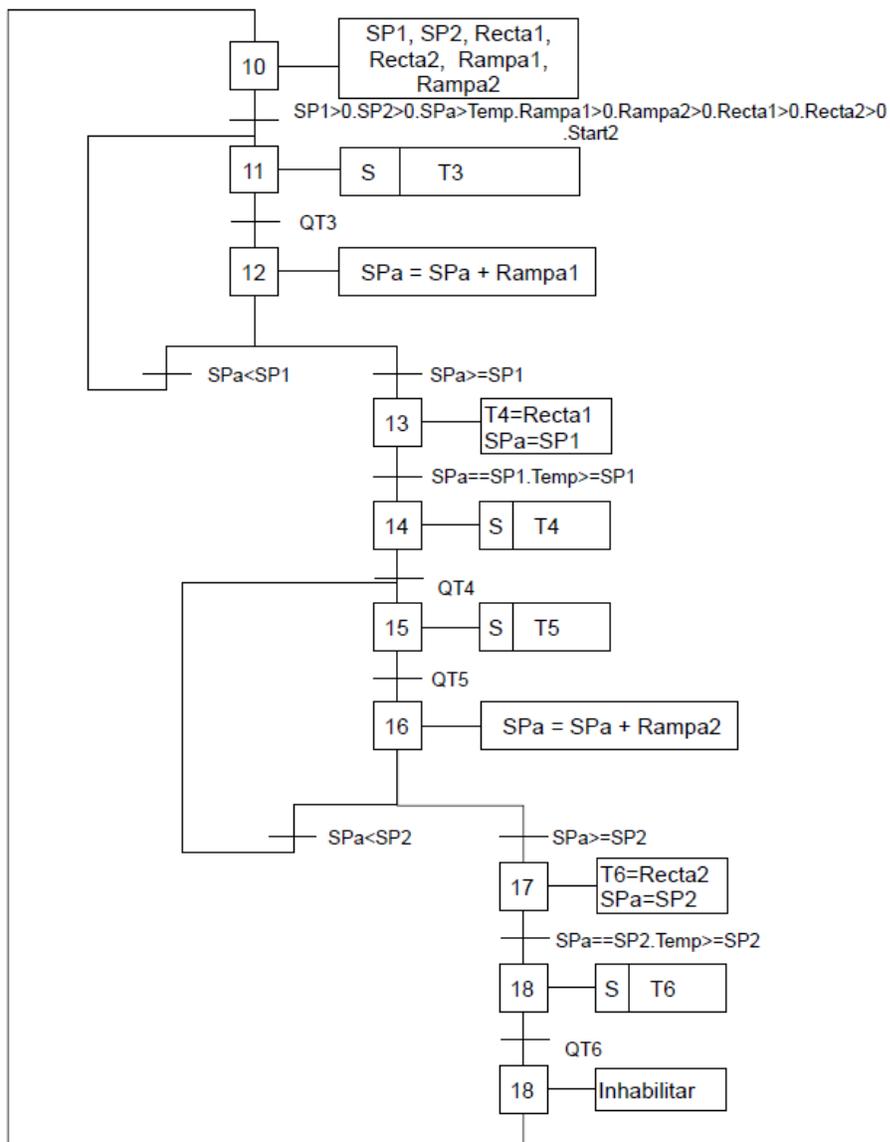


Modo rampa doble

Figura 91

Grafcet Proceso Automático Rampa Doble

Perfil de Temperatura 2

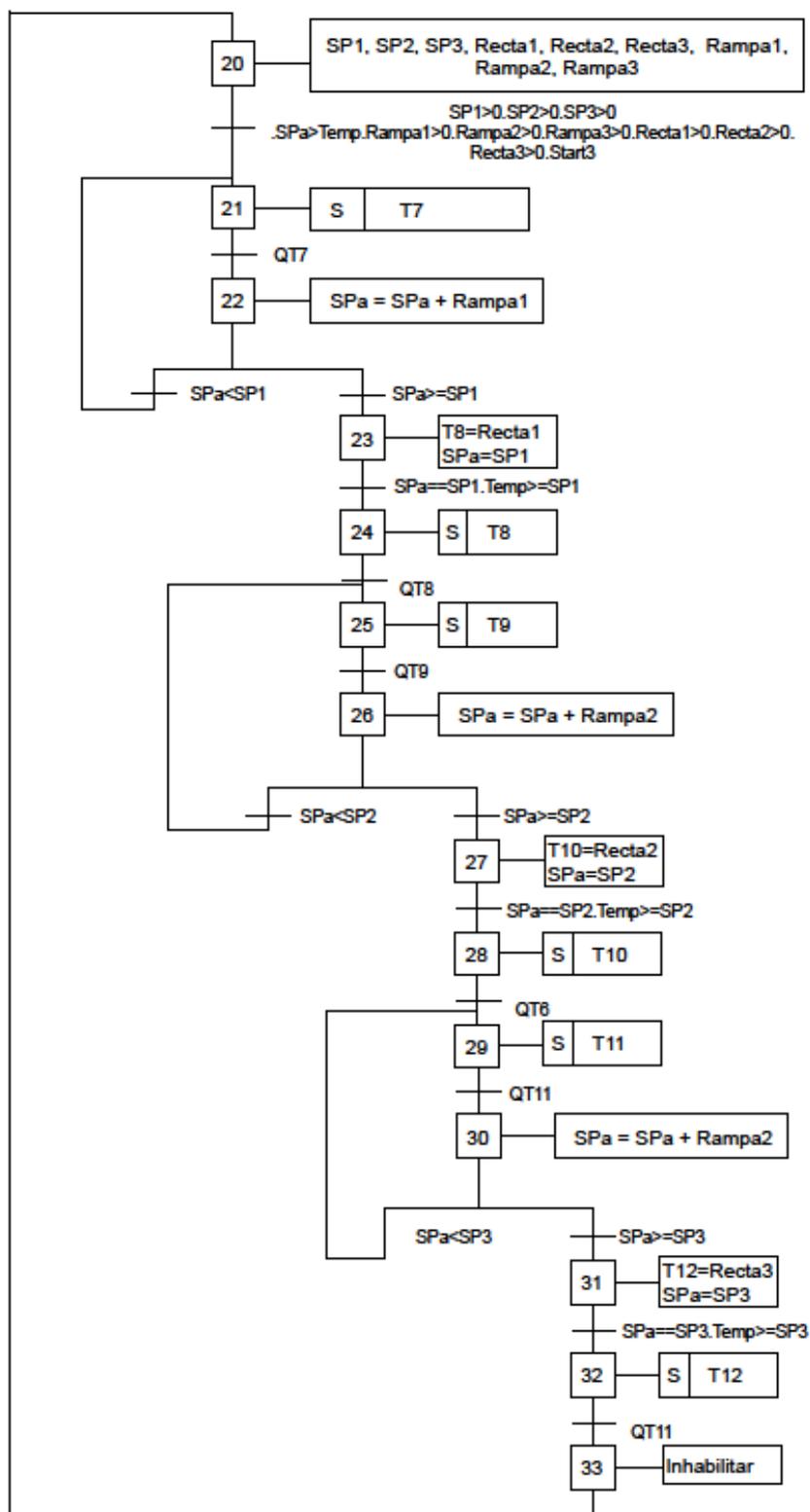


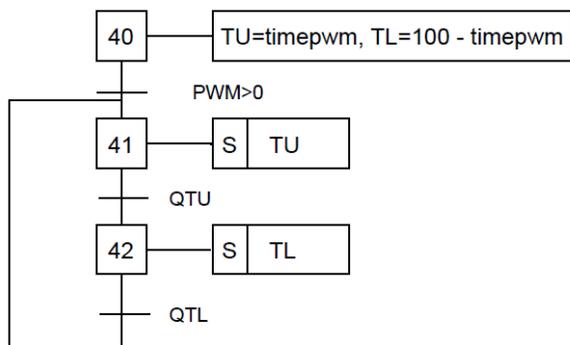
Modo rampa triple

Figura 92

Grafcet Proceso Automático Rampa Triple

Perfil de Temperatura 3



PWM**Figura 93***Grafcet Proceso Automático Bloque PWM***PWM*****Descripción nomenclatura utilizada en los Grafcet*****Tabla 33***Descripción y Nomenclatura Usado en los Grafcets*

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
Start1, Start2, Star3, Startm	Inicio de las curvas 1, 2 y 3, y el modo manual
S#	Estados de Ejecución

Controlador del sistema

El controlador que mejor se adapta a este tipo de circunstancias (controlador de temperatura), resulta ser un PID, ya que ofrece una combinación del proporcional con control integral y derivativo. Este controlador ayuda a la unidad automáticamente a compensar los cambios que se presentan en el sistema, los términos proporcional, integral y derivativo se deben ajustar de manera individual mediante el método de prueba y error.

La ley de control PID está dada por:

$$u(t) = Kp * e(t) + Kp * Td * \frac{d e(t)}{dt} + \left(\frac{Kp}{Ti}\right) \int e(t)d(t)$$

Donde:

- $u(t)$ es la señal de control
- $e(t)$ es el error (referencia menos señal controlada)
- K_p constante proporcional ganancia
- T_i constante de tiempo integral
- T_d constante de tiempo derivativo La función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d * s + \frac{1}{T_i * s} \right)$$

Donde:

- $K_i = 1/T_i$, constante integral
- $K_d = T_d$, constante derivativa

Entre las diversas propuestas y alternativas de controladores para realizar los procesos de automatización, y para el caso específico del control de temperatura para el curado y secado de materiales compuestos, destinados para el horno autoclave del Laboratorio de Materiales Compuestos del CIDFAE, se procede a utilizar el PLC S7-1200 1212 AC/DC/RELAY, debido a que las personas encargadas de administrar dicho laboratorio poseen en su custodia dicho PLC, este fue donado con el fin de que se use en la automatización de dicho proceso ya que únicamente lo realizaban de forma manual dependiendo totalmente de una persona que se encuentre supervisando todo el tiempo que se lleve a cabo dicha actividad en el proceso de fabricación de materiales compuestos.

PLC SIEMENS S7-1200

El controlador modular de siemens se encuentra en la línea para procesos automáticos elementales, donde requieren de precisión, potencia y flexibilidad para realizar un control de

una variedad de dispositivos que son necesarios para cumplir con los requerimientos de una automatización

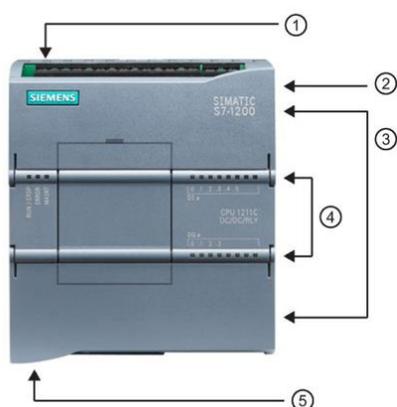
Características generales

La CPU combina ciertos elementos, además de otros, en una caja compacta para crear un potente controlador:

- Un microprocesador
- Capacidad de procesamiento hasta 64 bits
- Interfaz Ethernet/Profinet integrado
- Bloques de función para el control
- E/S de motion control rápidas
- Fuente de alimentación integrada

Figura 94

Descripción PLS Siemens SIMATIC S7-1200



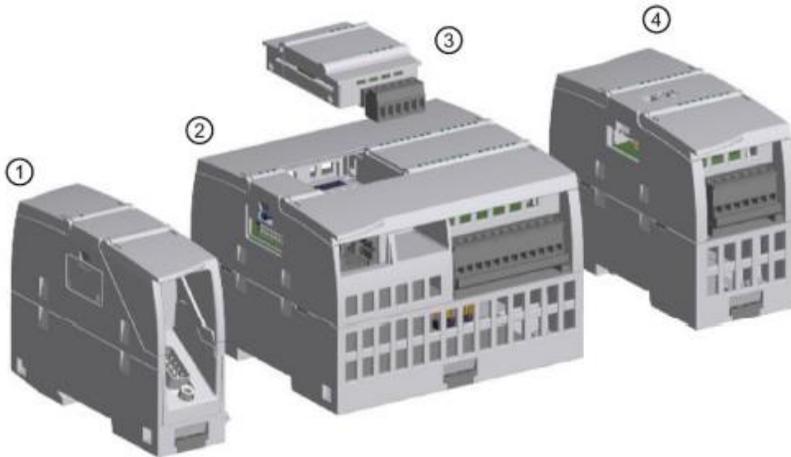
- ① Conector de corriente
- ② Ranura para Memory Card (debajo de la tapa superior)
- ③ Conectores extraíbles para el cableado de usuario (detrás de las tapas)
- ④ LEDs de estado para las E/S integradas
- ⑤ Conector PROFINET (en el lado inferior de la CPU)

La Capacidad de expansión de la CPU

La familia de los S7-1200 ofrece diversos módulos de expansión para ampliar las capacidades en base a E/S adicionales y otros protocolos de comunicaciones

Figura 95

SIMATIC S7-1200 Módulos de Expansión



- 1) Módulo de comunicación (CM) o procesador de comunicaciones (CP), agregan opciones de comunicación a la CPU, p. eje. Conectividad PROFIBUS o RS232/RS485 (PtP, Modbus o USS)
- 2) CPU (1211C-1212C-1214C-1215C-1217C)
- 3) Signal board (SB) (SB digital, SB analógica), proporciona E/S adicionales
- 4) Módulo de señales (SM) (SM digital, SM analógico, SM termopar, SM RTD), proporciona funciones a la CPU.

Fuente: (SIEMENS, 2021)

Este PLC dentro de sus prestaciones cumple con los requisitos que demanda el operario para la ejecución del curado y secado de materiales compuestos, ofrece un interfaz amigable y de fácil ejecución para el operario, siendo viable realizar el control de temperatura en función de

los programas de automatización o curvas definidas para los diferentes materiales que se fabrican, llegando a cumplir los diferentes requerimientos que son:

- Sensado de la planta de 2 posiciones diferentes, 2 o más sensores a su interconexión
- Entradas analógicas capaz de interpretar información proveniente de los sensores de temperatura a instalar
- Entradas digitales necesarias para funciones particulares
- Salidas digitales para el control de actuadores de tipo ON/OFF
- Salida de hasta 24 VDC, transistorizada
- Función HMI programable
- Prestaciones a fin de obtener un bloque PID

Ya que el laboratorio de materiales compuestos proporciono un PLC S7-1200 con CPU 1212C AC/DC/RELAY, se procede a utilizar el mismo que es suficiente para dicha aplicación.

Análisis

Dentro de las alternativas que existen para poder realizar el control automático de temperatura necesario para el curado y secado de materiales compuestos, uno de los principales requerimientos fue de que se posea una Pantalla HMI, donde se puedan ingresar los valores de rampa (setpoint-tiempo) para los curvas o programas de mantenimiento definidos, lo que genera la necesidad de inclinarse por un controlador capaz de implementar esta aplicación durante el proceso de curado y secado de materiales compuestos.

En las líneas de trabajos de automatización es menester cumplir con ciertos lineamientos y parámetros que garanticen en las operaciones seguridad, confiabilidad, calidad y eficiencia; por tal motivo el controlador donado a utilizar cumple con dichos parámetros y puede solventar problemas de mantenimiento

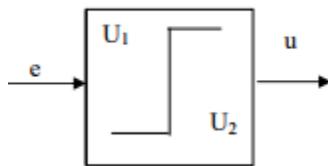
Para empezar con los trabajos de diseño electrónico, técnicas de control y definir qué elementos utilizar, es necesario obtener el modelo de la planta a controlar, la misma que será sometida a un impulso unitario, para diagnosticar el comportamiento y de esta manera procesar dicha información, donde se obtendrán los parámetros que mejor se ajusten al controlador y generen la mejor respuesta o comportamiento de la planta en operación de trabajo.

Sensado de la planta

Para sensar la planta, se procede a enviar un impulso al elemento actuador que posee dos posiciones, apagado y encendido.

Figura 96

Impulso Unitario al Sistema



La señal de salida del controlador $u(t)$ y una señal de entrada $e(t)$, la señal $u(t)$ permanece en un valor ya sea máximo o mínimo, dependiendo de si la señal de entrada es positiva, negativa o cero.

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

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

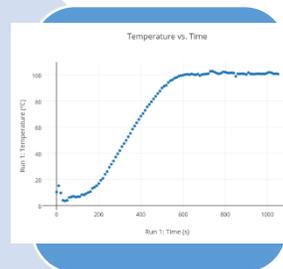
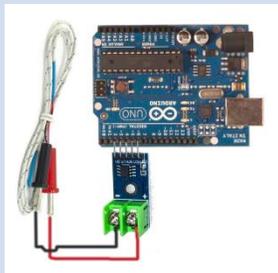
De esta manera se busca obtener una alimentación o una señal para $e(t)=1$, como un valor máximo de excitación, en este caso la alimentación a la red de 220 VAC para las niquelinas

Diagrama para el procesamiento y modelamiento de la planta

En base a las herramientas tecnológicas y procesos estudiados, se procede a definir las etapas necesarias, Figura 97 para poder modelar la planta y obtener los parámetros que mejor se ajusten para el controlador de temperatura.

Figura 97

Diagrama de Bloques Modelamiento de la Planta



Termocupla tipo K

Mediante el sensor de temperatura termocupla tipo K, se procede obtener los datos de calor de la planta (horno autoclave), y esta información poder ser procesada de forma matemática-analítica, por software o herramientas tecnológicas que modelen el comportamiento de la planta, a fin de obtener los parámetros idóneos del controlador a implementar.

Figura 98

Termocupla Tipo K



Módulo serial MAX6675

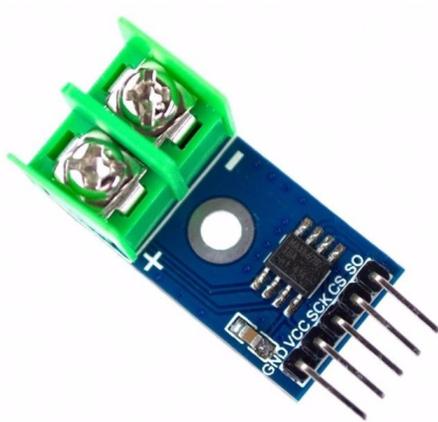
El MAX6675 realiza la compensación de unión en frío y digitaliza la señal de un termopar tipo K. Los datos se emiten en un formato de solo lectura, compatible con SPI y resolución de 12 bits. Este convertidor resuelve temperaturas a 0.25 °C, permite lecturas tan altas como +1024 °C y exhibe una precisión de termopar de 8 LSB “Byte Menos Significativo” (Least Significant Byte), para temperaturas que van desde 0 °C a +700 °C.

Al interconectar a un módulo el termopar, se evita la instrumentación y fallos en la toma de datos, de esta forma obteniendo los valores de temperatura de la planta de una forma más fiable, compacta y robusta

El módulo a emplear debe de soportar las temperaturas a las que se somete dicho horno, para tal efecto se procede a elegir un módulo de conexión serial (MAX6675) en reemplazo de la instrumentación.

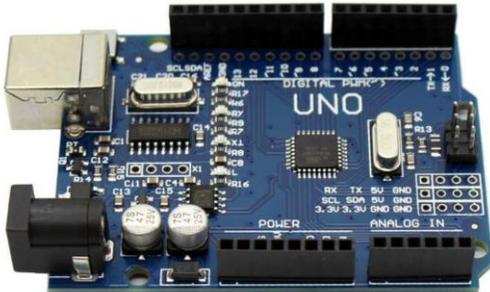
Figura 99

Módulo MAX6675



Controlador Arduino Uno

En base a la comunicación serial que ofrece el módulo para termocupla tipo K, MAX6675, se procede a conectar al controlador Arduino, mismo que se encarga de procesar la información enviada por el módulo y que es receptada por el sensor de temperatura, de tal forma que mediante el código de programación se transmita y almacene los caracteres sensados por la termocupla en una función del software Matlab.

Figura 100*Arduino Uno*

Se genera un código de Arduino, mismo se encarga de enviar a la plataforma Matlab para que sea procesada la información proveniente de la termocupla, de tal forma que pueda llevar acabo un modelamiento y sintonización del comportamiento de la planta por la herramienta informática Matlab

Código de programación Arduino (MAX6675)

- **Código Arduino**

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#define MAX6675_SO 5
#define MAX6675_CS 6
#define MAX6675_SCK 7
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  float temperatura = leer_termopar();
  Serial.println(temperatura);
  delay(500);
}
double leer_termopar()
{
```

```

uint16_t v;
pinMode(MAX6675_CS, OUTPUT);
pinMode(MAX6675_SO, INPUT);
pinMode(MAX6675_SCK, OUTPUT);
digitalWrite(MAX6675_CS, LOW);
delay(1);
v = shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);
v <<= 8;
v |= shiftIn(MAX6675_SO, MAX6675_SCK, MSBFIRST);

digitalWrite(MAX6675_CS, HIGH);
if (v & 0x4)
{
return NAN;
}
v >>= 3;
return v * 0.25;
}

```

Este código de programación en Arduino, permite sensor los datos de la planta, con intervalos de hasta 100 microsegundos, debido a que la frecuencia máxima de muestreo es de 10 KHz mediante el controlador Arduino, por tal virtud y en función del resto de componentes se define un tiempo de muestreo de 500 ms que a su vez son 2 muestras por un segundo.

Código de programación (Matlab)

Matlab conocido también como el lenguaje de cálculo técnico, es un ambiente de programación con el objetivo de desarrollar algoritmos, analizar datos y visualizarnos, además del cálculo numérico (Mathworks, 2018).

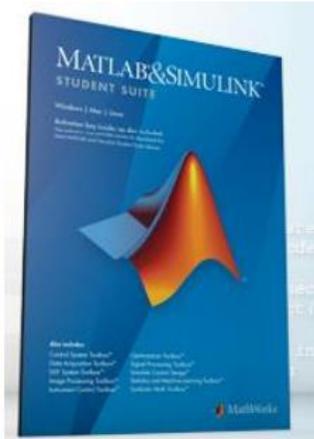
Las funciones y aplicaciones más destacadas de Matlab son:

- Matemática y cálculo
- Modelado, simulación y prototipado
- Gráficos científicos y de ingeniería
- Desarrollo de aplicaciones
- Desarrollo de algoritmos

- Adquisición de datos

Figura 101

Matlab y Simulink (Mathworks, 2018)



Mediante Matlab, se ingresa los datos captados por medio del sensor, el módulo MAX6675 y la tarjeta Arduino para posterior procesar estos datos y de igual forma almacenarlos en matrices y poder realizar el modelamiento de la planta.

- **Mediante código de Matlab**

```
clear all;
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);

% parámetros de medidas
tmax =2000; % tiempo de captura en s
rate =1; % resultado experimental (comprobar)

% preparar la figura
f = figure('Name','Captura');
a1= axes('XLim',[0 2000],'YLim',[0 200]);
l1 = line(nan,nan,'Color','r','LineWidth',2);
xlabel('Tiempo (ms)')
```

```

ylabel('temperatura (°C)')
title('Captura de voltaje en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on
% inicializar
v1 = zeros(1,tmax);
i = 1;
% ejecutar bucle cronometrado
t=0;
while t<tmax
t = t+1;
% leer del puerto serie
a1 = fscanf(s,'%f');
v1(i)=a1(1);

% dibujar en la figura
x = linspace(0,i/rate,i);
set(l1,'YData',v1(1:i),'XData',x);
drawnow
% seguir
i = i+1;
end
%se guarda el vector en la entrada V1
save('Temp.mat','t','v1');
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);
fclose(s);
delete(s);
clear s;

```

Respuesta del sistema (Temperatura Vs Tiempo)

Se define frecuencia de muestreo de medio segundo por cada muestra, para 3000 muestras, en el código de Arduino y Matlab, donde se aprecia la curva de crecimiento de la planta y en función de la misma poder llegar a ejecutar un análisis de los valores, posterior generar los parámetros para un control adecuado y poder manipular la variable física mediante actuadores a nuestra conveniencia. Figura 102.

Se presentan los datos tomados en una gráfica de tiempo vs temperatura, al finalizar el proceso de sensado de la planta.

Figura 102

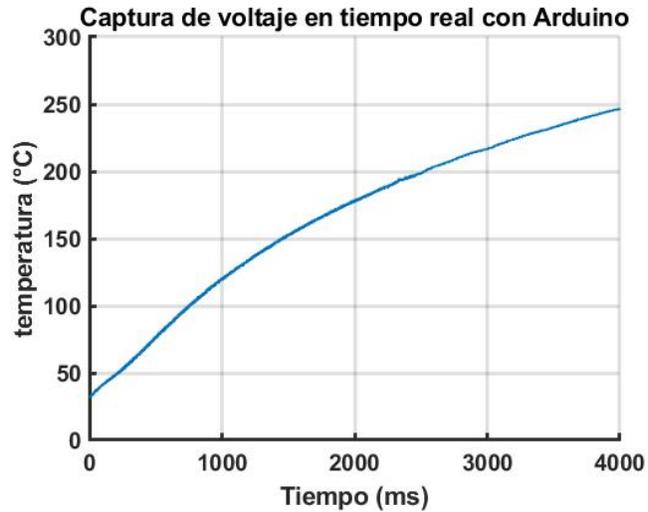
Respuesta de la planta a 3000 muestras



Para 4000 muestras, Figura 103, con la consideración de que cada muestra se la realiza con una frecuencia de medio segundo, se aprecia como la temperatura llega a alcanzar un techo de 250°C, que es el valor máximo referencial que se propone durante operación, ya que dicha planta trabaja en condiciones seguras hasta 450°C sobre la marcha.

Figura 103

Respuesta de la planta a 4000 muestras



Modelamiento de la planta

El objetivo de modelar un sistema, es de llegar a caracterizarlo matemáticamente, describirlo de forma completa, exacta y sencilla, para posteriormente analizar estos datos y llegar a utilizar un controlador acorde.

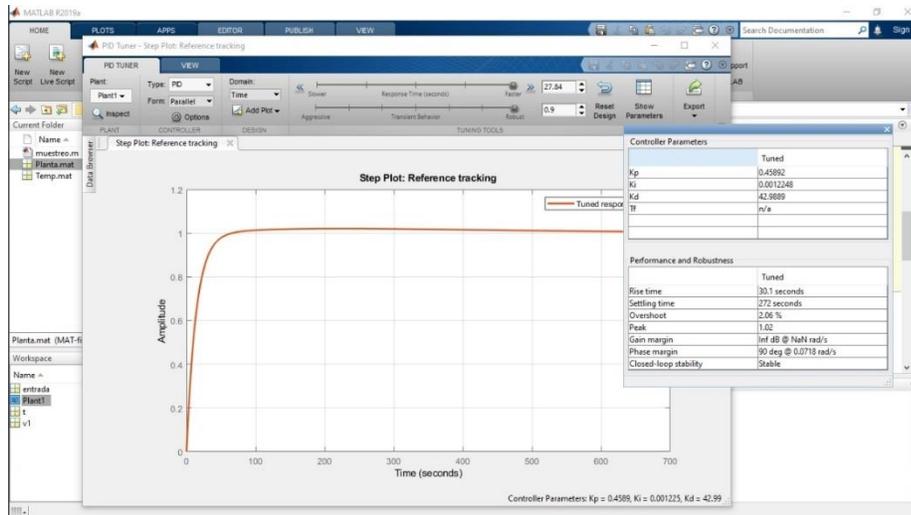
Se procede a hallar las características dinámicas del sistema en base a teoría matemática, desarrollo experimental en base a software, considerando aproximaciones en base a simulaciones interactivas de las respuestas que del modelo teórico con respecto a la del sistema real. De este proceso se define el controlador a utilizar, el mismo que tendrá éxito según la exactitud del modelamiento utilizado.

Maltab

Una vez que se obtiene los datos de cómo se comporta la planta ante un estímulo o impulso, se procede a utilizar los datos sensados en función del periodo de muestro, las herramientas a utilizar pueden ser a través del system identification (ident) o mediante el PID Tuner

Figura 104

Curva PID Tuner



La aplicación PID Tuner ajusta automáticamente las ganancias de un controlador PID para una planta SISO (una entra y una salida) para lograr un equilibrio entre el rendimiento y la robustez. Puede especificar el tipo de controlador, como PI, PID con filtro derivado o controladores PID de dos grados de libertad (2 DOF).

Las gráficas de análisis permiten examinar el rendimiento del controlador en los dominios de tiempo y frecuencia. Puede refinar interactivamente el rendimiento del controlador para ajustar el ancho de banda del bucle y el margen de fase, o para favorecer el seguimiento del punto de consigna o el rechazo de perturbaciones

Una vez realizado el muestreo y con los parámetros arrojados mediante la función PID tuner se obtiene lo siguiente.

Los parámetros que arroja dicha herramienta informática, dan una guía de los valores que se dice utilizar en función de la curva, obteniendo nuestra curva de transferencia para un primer caso (Figura 105) y modelando para un segundo caso (Figura 106).

Figura 105*Parámetros P,I,D, PID Tunner 1*

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.024394
Ki	1.0405e-05
Kd	13.3177
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	909 seconds
Settling time	4.04e+03 seconds
Overshoot	2.87 %
Peak	1.03
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90 deg @ 0.00227 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 106*Parámetros P,I,D, PID Tunner 2*

Controller Parameters	
	Tuned
Kp	0.16117
Ki	7.7006e-05
Kd	84.3326
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	146 seconds
Settling time	254 seconds
Overshoot	0.725 %
Peak	1.01
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	90 deg @ 0.015 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Obteniendo un resultado mediante el software con las siguientes especificaciones, Figura 107.

Figura 107*Resultado planta*

```

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

      Kp = 303.41
      Tp1 = 2613.4
      Tp2 = 653.04

```

Por tal efecto de buscar adaptar un equipo electrónico que cumpla dicha función y este dentro de sus prestaciones poder ofrecer un interfaz amigable y de fácil ejecución para el operario.

PID_COMPACT S7-1200

El objeto tecnológico PID_COMPACT ofrece un regulador PID continuo con optimización integrada, posee la capacidad de configurar un regulador de impulsos, y permite elegir un modo manual y el automático. Registra de forma continua el valor real medido dentro de un lazo de regulación, esta instrucción calcula los parámetros P, I y D para su sistema regulado de forma autónoma, para el sistema de control durante la pre sintonización. Los parámetros pueden utilizarse aún más a través de una optimización fina. No es necesario determinar los parámetros (SIMATIC, 2021).

Se procede a utilizar la herramienta integrada en el S7-1200, la cual se encargó de arrojar los parámetros a utilizarse en el controlador, Figura 108.

Figura 108

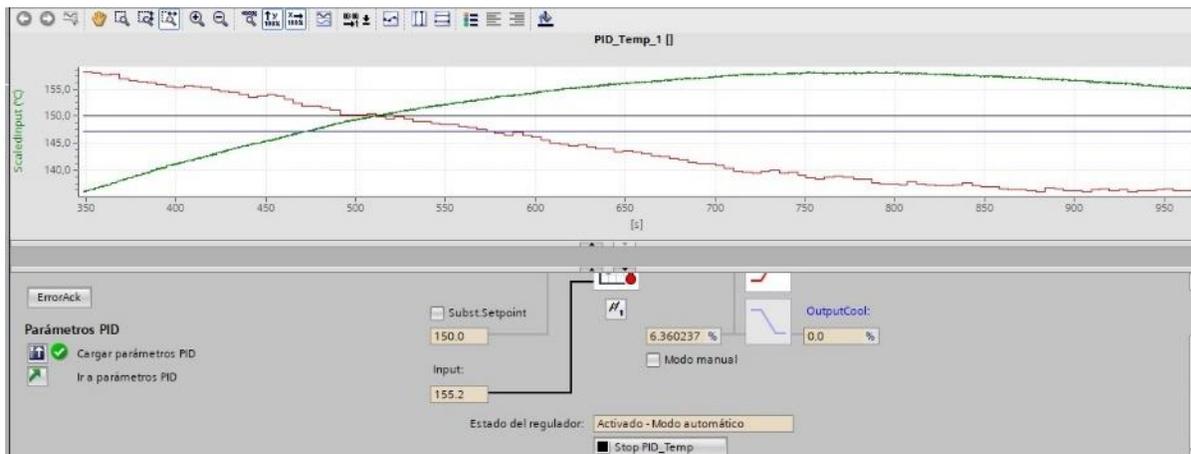
Parámetros P,I,D PID_COMPACT



Se realiza una prueba para un setpoint de 150 °C con los parámetros arrojados de la herramienta PID_COMPACT, donde llega a alcanzar la temperatura referencial, llegando a ser regulado el sistema de forma autónoma, Figura 109.

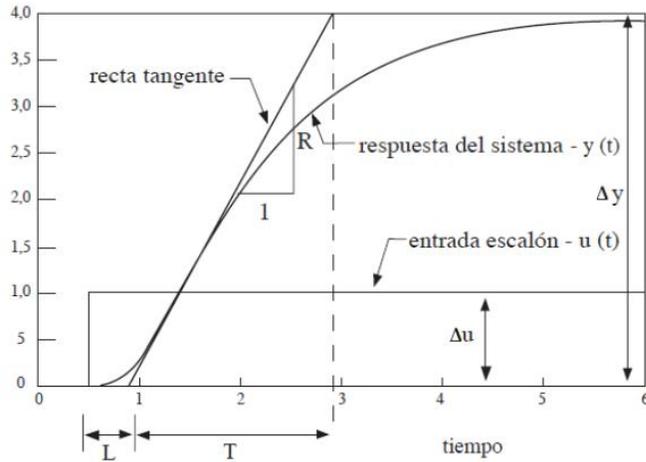
Figura 109

Prueba de parámetros PID_COMPACT a 150°C



Modelamiento matemático (Ziegler-Nichols)

Se procede a realizar la sintonización matemática, utilizando el método de Ziegler-Nichols para encontrar los parámetros P,I y D del controlador a utilizar.

Figura 110*Método Ziegler Nichols*

Según la siguiente fórmula:

$$k_o = \frac{du * T}{dy * L}$$

Donde:

L: tiempo que el sistema tarda en generar una respuesta al escalón

T: tiempo que se tarda el sistema en determinar el punto tangente de corte del valor con el que inicia y el que puede alcanzar la máxima temperatura del horno.

du: señal de control suministrada al sistema

dy: temperatura máxima en la que se estabiliza el sistema

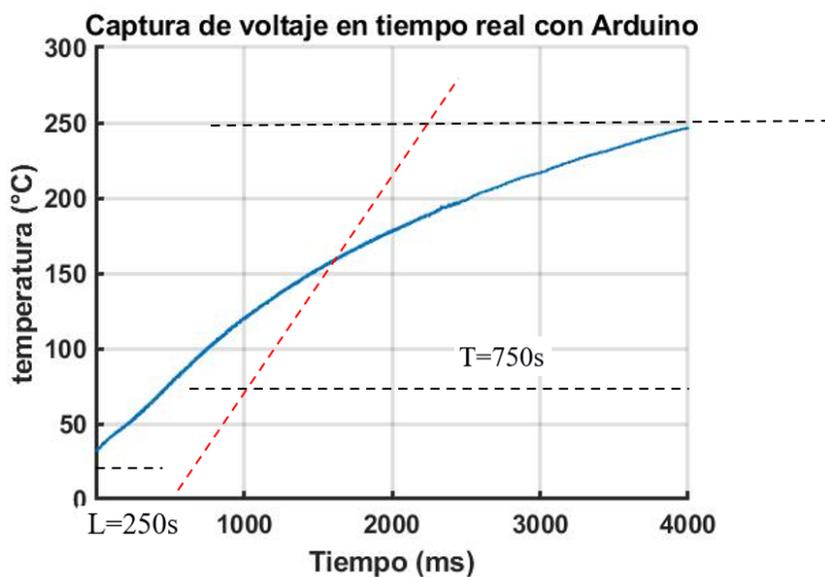
Tabla 34*Formulas para Controlador Método Ziegler Nichols*

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

La Figura 111 muestra la respuesta del sistema a 4000 muestras, con una frecuencia de 2 muestras por cada segundo.

Figura 111

Sintonización Ziegler-Nichols Horno Autoclave



Obteniendo:

$$-dy=250 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$-dx= 220 \text{ V}$$

$$-L= 250 \text{ s}$$

$$-T= 750 \text{ s}$$

- Cálculo de K_p

$$k_p = 1.2 * \frac{T}{L}$$

$$k_p = 3.6$$

- Cálculo de T_i

$$T_i = 2 * L$$

$$T_i = 500 \text{ s}$$

- Cálculo de T_d

$$T_d = 0.5 * L$$

$$T_d = 125 \text{ s}$$

Con lo cual se obtiene los parámetros para el controlador según la Formula XX

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d * s + \frac{1}{T_i * s} \right)$$

Selección de parámetros P, I y D

En función de los parámetros obtenidos de los diferentes métodos de sintonización implementados para el sensado de la planta, se procede a elegir el de los parámetros arrojados por la herramienta PID_COMPACT, función integrada dentro de las prestaciones del autómata SIEMENS S7-1200, ya que es el que mejor respuesta al sistema genera en base a los parámetros obtenidos. Encargado de calcular los parámetros para el control durante la optimización inicial y optimización final, realizando el ajuste de las constantes proporcional, integrativo y derivativo del controlador según el modelo de la planta (horno autoclave)

Figura 112

Parámetros P, I, D.

Parámetros PID

	Calentar	Refrigeración
<input checked="" type="checkbox"/> Activar entrada manual		
Ganancia proporcional:	12.69264	1.0
Tiempo de integración:	282.3 s	20.0 s
Tiempo derivativo:	71.38453 s	0.0 s
Coefficiente retardo derivativo:	0.1	0.2
Ponderación de la acción P:	2.585209E-1	1.0
Ponderación de la acción D:	0.0	1.0
Tiempo muestreo algoritmo PID:	1.0 s	1.0 s
Ancho zona muerta:	0.0 °C	0.0 °C
Ancho de la zona de regulación:	2.0 °C	3.402822E+38 °C
Regla para la optimización		
Estructura del regulador:	PID (temperatur	PID (temperatur

Para modificar los parámetros P, I o D, se los ingresa de forma manual a fin de buscar un mejor ajuste en el caso que se desee modificarlos.

Cálculo y dimensionamiento del conductor

Calibre del conductor para las termorresistencias

- **Tipo de material del conductor**

Cobre: se utiliza este material puesto que es el idóneo para residencias en zonas no húmedas, es el material estándar que se utiliza para la fabricación de cables convencionales

- **Tipo de aislamiento del conductor**

Se utilizará compuesto de cloruro de polivinilo PVC puesto que soporta las peores condiciones detrás de la pared de una edificación (como la exposición a los cambios de temperatura y la humedad) para una mayor vida útil en las instalaciones, cuyo uso es común para aplicaciones residenciales y comerciales resistente hasta 90 grados

estipulado en la catalogo THHN-FLEX característica que es un mono conductor de cobre blando extra flexible, aislación de PVC y cubierta de nylon. 600 V.

- **Cálculo de corriente**

Donde

N1= Niquelina 1

I =Corriente

P = Potencia (2000 [W])

V = Voltaje (220 [V])

Fp = Factor de potencia ([0.95] como lo estipula la EEQ)

$$N1 = 2000 [W]$$

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

$$I = \frac{2000 [W]}{220 [V] * 0.95}$$

$$I = 9.56 [A]$$

Considerando el 25% de reserva lo que significa multiplicar por un factor de 1.25 a la corriente obtenida.

$$I = 9.56 [A] \cdot 1.25$$

$$I = 11,95 [A]$$

- **Selección del conductor**

Tipo: THHN

Temperatura máxima en el conductor: 90°C

Voltaje de operación: 600V

Distribuidor: Cablec

Figura 113

Hoja Técnica THHN-FLEX

Calibre AWG/kcmil	Sección nominal mm ²	Diámetro del conductor aprox. mm	Espesor aislación mm	Diámetro exterior aprox. mm	Peso total aprox. kg/km	Resistencia máx. a 20 °C CC Ω/km	Radio de curvatura mm	Capacidad de corriente A	
								Grupo A	Grupo B
14	2,08	1,9	0,38	3,0	26	8,61	9	25	35
12	3,31	2,4	0,38	3,5	38	5,43	10	30	40
10	5,26	2,7	0,51	4,0	61	3,41	12	40	55
8	8,37	3,3	0,76	5,3	99	2,14	16	55	80
6	13,3	4,2	0,76	6,2	147	1,38	18	75	105
4	21,2	5,2	1,02	7,8	236	0,865	23	95	140

Grupo A: Hasta tres conductores en ducto. La norma chilena NCh 4/2003 prohíbe que estos cables sean utilizados en instalaciones enterradas, ya sea de forma directa o en ductos (puntos 8.2.15.5 y 8.2.15.)

Grupo B: Conductor simple al aire libre. Para aplicar esta capacidad, en caso de conductores que corran paralelamente, debe existir entre ellos una separación mínima equivalente a un diámetro del conductor.

No obstante lo indicado en las tablas, las protecciones de cortocircuito de los conductores de 14 AWG, 12 AWG y 10 AWG no deberán exceder de 16, 20 y 32 A, respectivamente.

- Cable a utilizar
Cable de cobre tipo THW calibre 14 AWG hasta 30 metros.
- Observación
La protección del circuito debe ser de 15 o 20 amperios por cada niquelina, por lo tanto, como son 3 niquelinas de características semejantes se debe utilizar 3 protectores de 15 [A] cada una.

Cálculo para obtener el calibre del conductor del ventilador.

- **Tipo de material**

Cobre: se utiliza este material puesto que es el idóneo para residencias en zonas no húmedas, es el material estándar que se utiliza para la fabricación de cables convencionales

- Tipo de aislamiento

Se utilizará compuesto de cloruro de polivinilo PVC puesto que soporta las peores condiciones detrás de la pared de una edificación (como la exposición a los cambios de temperatura y la humedad) para una mayor vida útil en las instalaciones, cuyo uso es común para aplicaciones residenciales y comerciales resistente hasta 90 grados estipulado en la catalogo THHN-FLEX característica que es un Mono conductor de cobre blando extra flexible, aislación de PVC y cubierta de nylon. 600 V.

- **Cálculo de corriente**

Donde

V1= Ventilador 1

I =Corriente

P = Potencia (160 [W])

V = Voltaje (220 [V])

Fp = Factor de potencia ([0.95] como lo estipula la EEQ)

$$V1 = 160 [W]$$

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

$$I = \frac{160 [W]}{220 [V] * 0.95}$$

$$I = 0.7655 [A]$$

Considerando el 25% de reserva lo que significa multiplicar por un factor de 1.25 a la corriente obtenida.

$$I = 0.7655 [A] \cdot 1.25$$

$$I = 0,957 [A]$$

- Selección del conductor

Tipo: THW

Temperatura máxima en el conductor: 90°C

Voltaje de operación: 600V

Distribuidor: Cablec

Figura 114

Hoja Técnica THHN-FLEX

Calibre AWG/kcmil	Sección nominal mm ²	Diámetro del conductor aprox. mm	Espesor aislación mm	Diámetro exterior aprox. mm	Peso total aprox. kg/km	Resistencia máx. a 20 °C CC Ω/km	Radio de curvatura mm	Capacidad de corriente A	
								Grupo A	Grupo B
14	2,08	1,9	0,38	3,0	26	8,61	9	25	35
12	3,31	2,4	0,38	3,5	38	5,43	10	30	40
10	5,26	2,7	0,51	4,0	61	3,41	12	40	55
8	8,37	3,3	0,76	5,3	99	2,14	16	55	80
6	13,3	4,2	0,76	6,2	147	1,38	18	75	105
4	21,2	5,2	1,02	7,8	236	0,865	23	95	140

Grupo A: Hasta tres conductores en ducto. La norma chilena NCh 4/2003 prohíbe que estos cables sean utilizados en instalaciones enterradas, ya sea de forma directa o en ductos (puntos 8.2.15.5 y 8.2.15.)

Grupo B: Conductor simple al aire libre. Para aplicar esta capacidad, en caso de conductores que corran paralelamente, debe existir entre ellos una separación mínima equivalente a un diámetro del conductor.

No obstante lo indicado en las tablas, las protecciones de cortocircuito de los conductores de 14 AWG, 12 AWG y 10 AWG no deberán exceder de 16, 20 y 32 A, respectivamente.

- Cable a utilizar
Cable de cobre tipo THW calibre 14 AWG hasta 30 metros.
- Observación
Se maneja el mismo tipo de cable para todas las instalaciones debido a las prestaciones y características que se obtiene de mencionada marca.

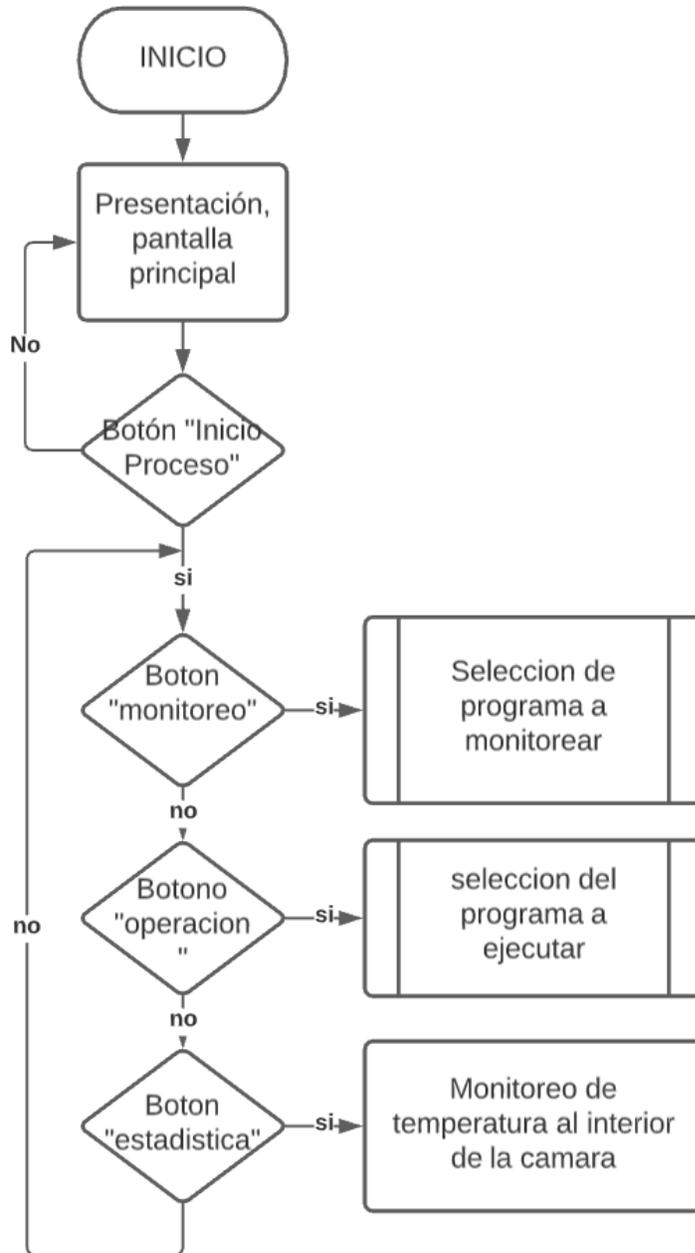
Desarrollo de interfaz HMI

Diseño HMI

En la Figura 115, se define el diagrama de flujo del funcionamiento general para la interfaz HMI durante el proceso de curado y secado de materiales compuestos en el horno autoclave.

Figura 115

Diagrama de Flujo HMI Principal



Dentro de los subprocesos que se ejecutan, de los cuales son el de monitoreo y el de operación, poseen diversas opciones en base a los 4 procesos o modos de operación que se ejecutan (Rampa simple, doble, triple y modo manual)

Figura 116

Diagrama de Flujo HMI Monitoreo Proceso

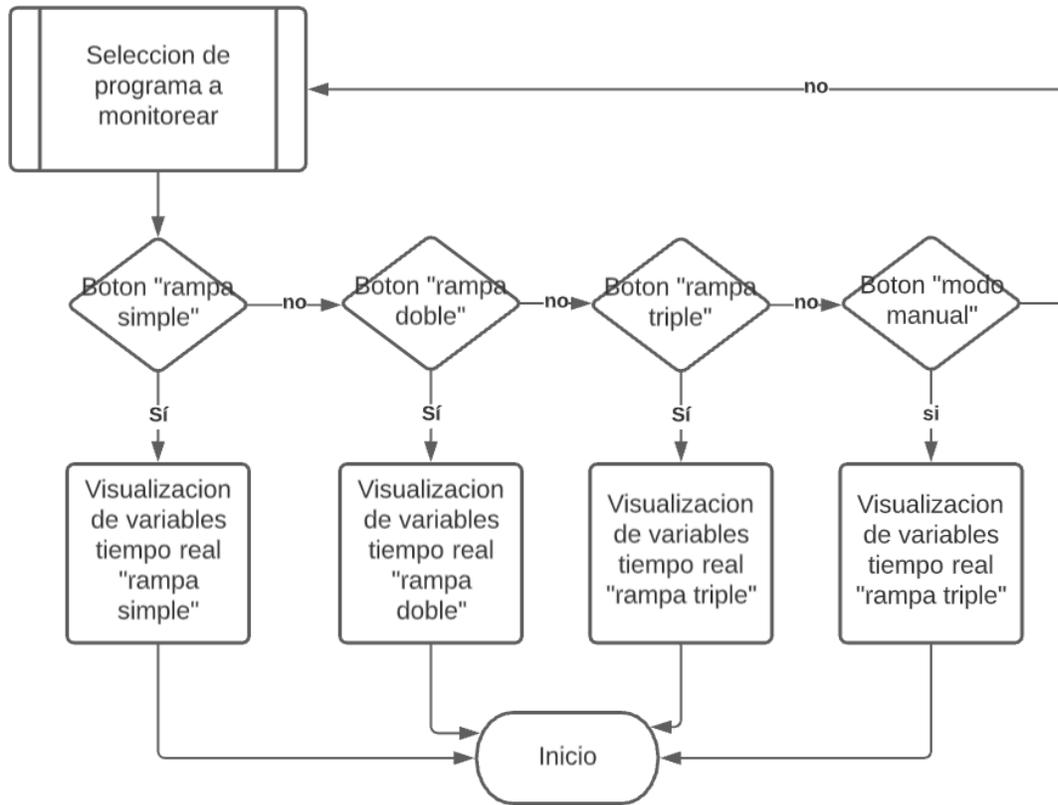
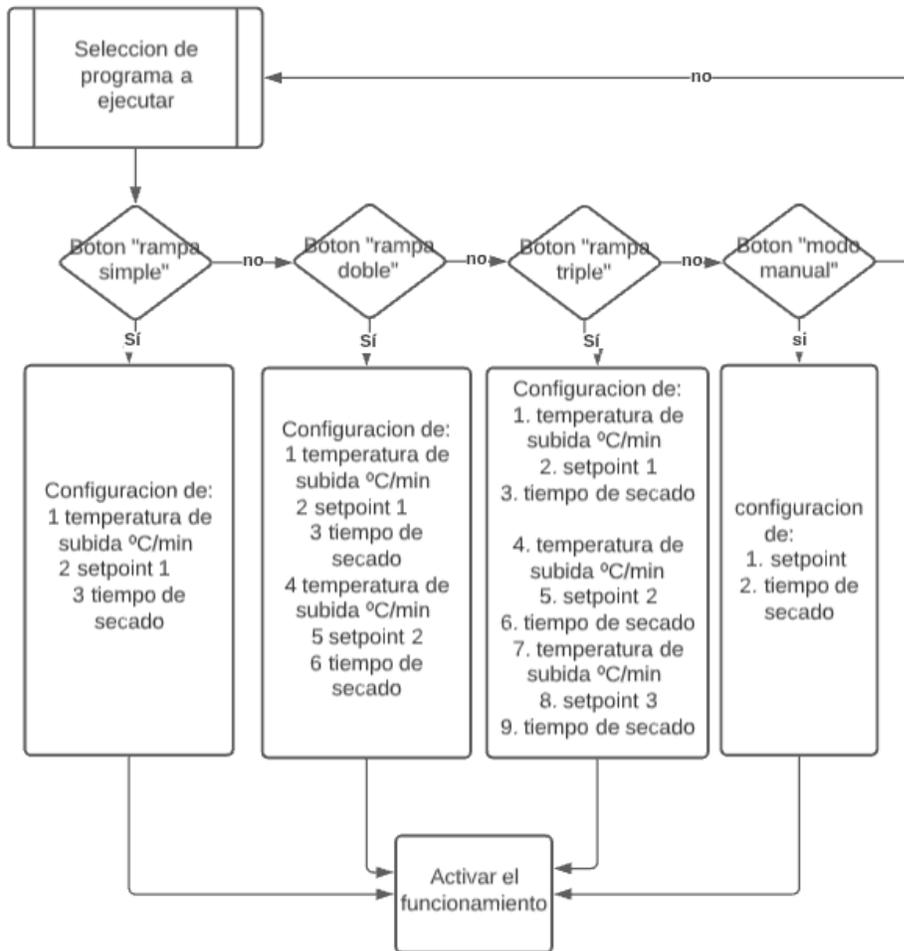
**Figura 117**

Diagrama de Flujo HMI Modo Operación



Pantalla HMI

La pantalla HMI (human – machine interface), hace referencia al panel que permite al usuario comunicarse con una máquina, software o sistema. Técnicamente se refiere a cualquier pantalla que se use para interactuar con un equipo, normalmente utilizado esta aplicación para entornos industriales, que permite monitorear y controlar procesos industriales.

En los requerimientos para el horno autoclave se presenta la necesidad del uso de una pantalla HMI para monitoreo y control del proceso de curado y secado de materiales compuestos sin ninguna especificación puntual como tal (tamaño, resolución, marca, costo). Para el efecto se procede a seleccionar una pantalla HMI que permita realizar la conexión con el PLC S7-1200, que pueda ser instalado dentro del gabinete eléctrico (30x40x20 cm), luz tipo led a fin de poder

llevar una visualización de la pantalla en cualquier dirección, alimentación de 24 VDC, 110Vac o 220Vac y que sea de un costo accesible.

En base a estas características planteadas, se procede a utilizar la pantalla HMI marca KINCO GREEN series modelo GL070E, que se adapta a las condiciones del resto de equipos eléctricos y electrónicos a instalarse para el horno autoclave, Figura 118.

Figura 118

HMI Kinco GL070E



Entorno de programación

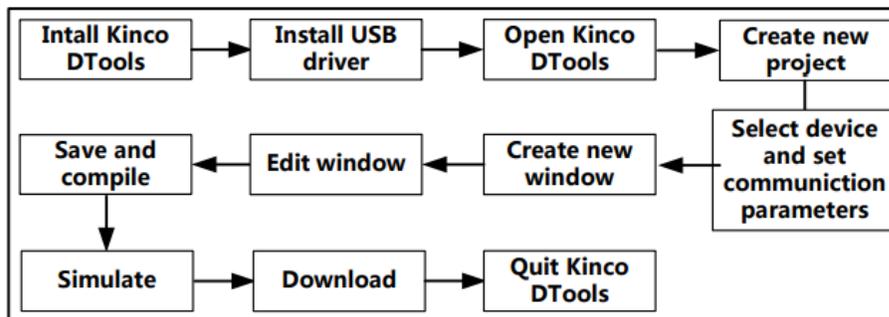
El entorno de programación para la implementación de la pantalla Kinco GL070E del horno autoclave es el "Kinco Dtools V3.3", en función de los siguientes criterios y prestaciones:

- Ofrece entorno amigable con el operario (técnicos del laboratorio de materiales compuestos)
- Múltiples opciones para la elaboración del interfaz HMI
- Software de fácil instalación para programar

- Compatible con PLC S7-1200
- Compatible con Kinco GL070E GREN series HMI
- Compatible desde Windows 7
- Amigable entorno de programación
- Conexión RS232C para comunicación entre HMI y PLC

Figura 119

Proceso de Uso Kinco DTools



Comunicación

La comunicación entre el HMI y el PLC es de forma directa física mediante el puerto RS232 (Ethernet), Figura 120. No necesita de un servidor para la conexión, el programa se descarga directamente en el HMI, lo que ahorra tiempo y esfuerzo al trabajar en posibles entornos o servidores para la interconexión de los equipos (Archestra, KEPserver, entre otros)

Figura 120

Conexión HMI Kinco-PPLC S7-1200



Análisis HMI

El diseño de la pantalla HMI basado en la normativa ISA 101 para el diseño de interfaces humano máquina, define los modelos de la terminología y el desarrollo de un HMI y los procesos de trabajo recomendadas para mantener con eficacia a lo largo de su ciclo de vida. Esta norma pretende proporcionar la orientación para el diseño, construcción y operación de HMI que resulten efectivas, seguras, eficaces y eficientes Enel control de procesos en todas las condiciones posibles a presentarse.

Figura 121

Interacción Operario-HMI



Para el proceso de curado y secado de materiales compuestos del horno autoclave, la norma ISA 101 establece algunas directrices a desarrollar como:

- El diseño de la HMI debe de ser compatible con las tareas principales de los usuarios de monitoreo
- EL HMI debe basarse en los requisitos de la tarea y necesidades del operador
- Proporciona información o controles apropiados para la tarea
- Terminología utilizada en las pantallas HMI debe de ser coherente con las descripciones comunes del usuario y del proceso
- Debe de tener una apariencia coherente con conceptos de diseño coherente para la visualización de la información e iteración con el usuario

Figura 122

Norma ISA 101 para el diseño de HMI



Variables a monitorear

Dentro del proceso de curado y secado de materiales compuestos del horno autoclave, se procede a realizar el control y monitoreo de las variables que se proyectaran en la HMI, según la Tabla 35.

Tabla 35*Variables de Control y Monitoreo HMI*

Variables	
Variable a monitorear	Temperatura del horno autoclave
	Tiempo de operación del horno
	Tiempo de operación bomba de vaciado
Variable a controlar	Temperatura del horno autoclave
	Tiempo de operación del horno
	Tiempo de operación bomba de vaciado

Diseño de consola

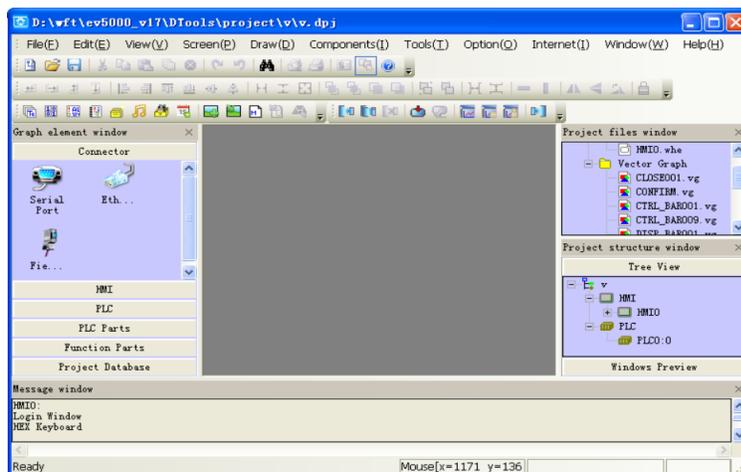
El monitoreo y control de las variables físicas a tratar eléctricas y no eléctricas se verán observadas en la Pantalla HMI Kinco, programada mediante su software de programación Kinco DTools V3.3, misma que se encuentra instalada en el tablero o gabinete eléctrico del horno autoclave.

I. Caracterización del hardware

Se cuenta con una pantalla HMI física GREN series Kinco GL070E, touch para el ingreso de datos interconectada para soportar la capacidad de comunicación con el PLC.

II. Caracterización del Software

Para la programación y desarrollo de la interfaz, se cuenta con Kinco DTools V3., que permite realizar la implementación y desarrollar la interfaz que será manejada por el operario.

Figura 123*Software Kinco DTools***Figura 124***Pantalla Start Kinco DTools***Diseño sistema HMI**

Aplicando la normativa ISA101 para la elaboración de interfaz HMI para procesos industriales y de automatización, la efectividad y rendimiento de la interfaz HMI radica en la aceptación por parte del operador del horno autoclave (técnicos del laboratorio de

materiales compuestos), la visualización del proceso o de sus variables y sobre todo de los componentes amigables con que los operadores puedan entender o estén acostumbrados a manejar.

La función principal de la interfaz HMI es la de controlar y monitorear el proceso del horno autoclave, en base a directrices y requisitos que presenta el operario para un correcto manejo y funcionamiento del mismo.

Directrices

- Presentación de información clara y legible
- Proporcionar el control del proceso al operario
- Sistema amigable y consistente

Requisitos principales HMI

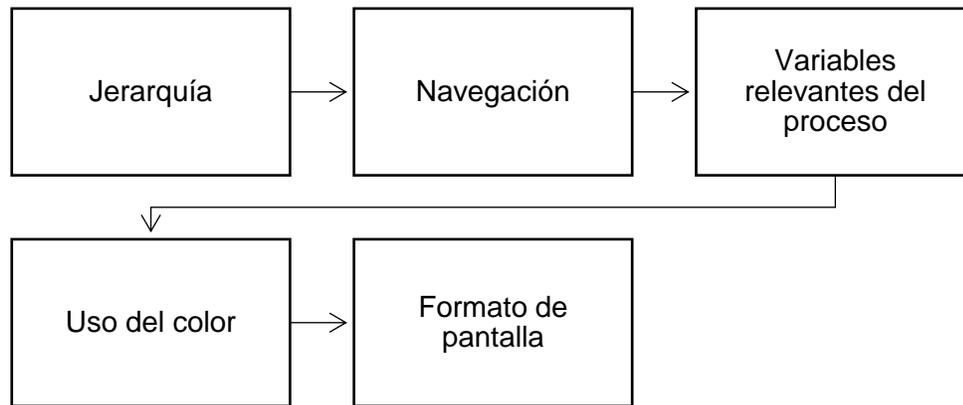
- Permitir la configuración de las variables físicas a obtener (tiempo, temperatura)
- Configuración de tipo de curva para la operación del horno
- Presentación de la información de forma clara y legible
- Presentar una interfaz amigable y entendible para el operario
- Fácil ejecución del proceso y fácil salida del mismo

Para el diseño y elaboración de las diferentes pantallas necesarias en el proceso del horno autoclave, se debe de estandarizar o priorizar las pantallas, utilizando la pericia y experiencia en el trabajo durante el desarrollo del horno autoclave.

En base a la pericia y en función de los requerimientos del operario se obtiene una interfaz funcional y adaptada.

Figura 125

Proceso Para el Diseño HMI



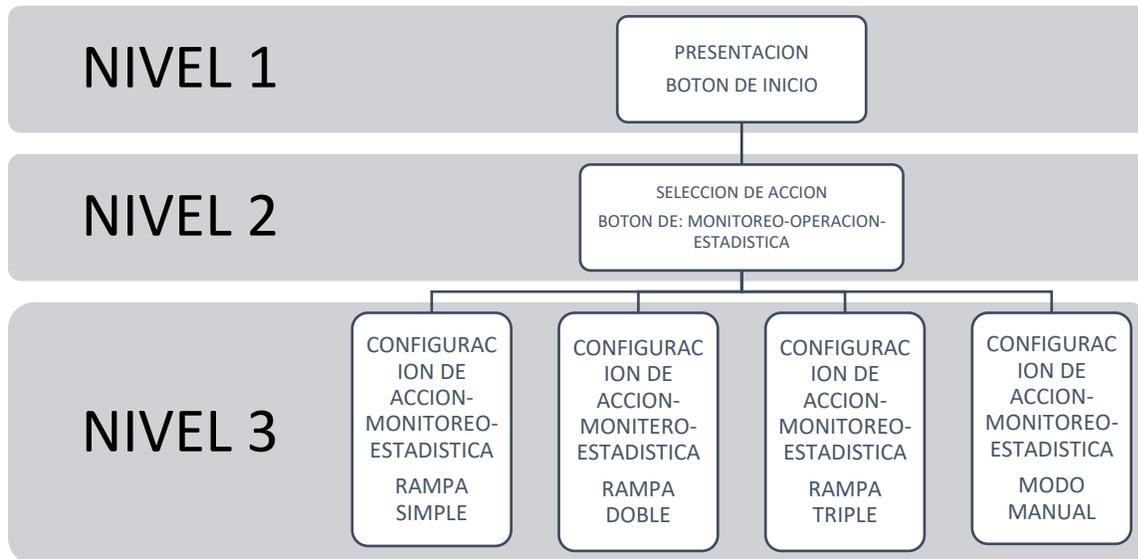
Proceso del diseño

Jerarquía de pantallas

Para definir la jerarquía de las pantallas HMI, se definen las acciones a realizar en base a los niveles de ingreso u operación, Figura 126.

Figura 126

Jerarquía niveles pantalla HMI

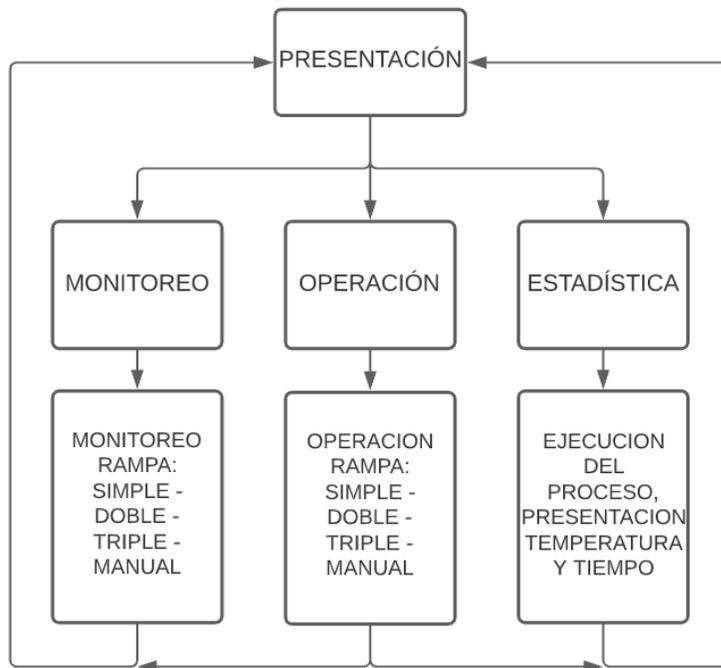


Navegación entre pantallas HMI

Es importante establecer el flujo de comunicación y la interacción entre las diferentes pantallas HMI que conforman el proceso definido del horno autoclave.

Figura 127

Navegación pantallas HMI



Se navega de forma horizontal entre los diferentes niveles de jerarquía definidos, así también se va solventando los requisitos planteados que es la de una presentación cómoda e intuitiva para la navegación dentro del sistema, así como también una fácil salida o movimiento en el mismo sistema.

Variables relevantes del proceso.

Para garantizar el correcto funcionamiento del horno autoclave se consideran 2 variables relevantes:

- Temperatura durante la operación del horno autoclave
- Tiempo de programación de funcionamiento

El monitoreo, supervisión y control de estas 2 variables por medio de la pantalla HMI es de gran importancia, ya que de estas depende el correcto funcionamiento del horno.

Uso del color en eventos del HMI

Se busca definir un llamado de atención de forma visual en base a los colores instaurados en el HMI hacia el operario, presentando el estado del equipo o el estado del proceso, estos se ven reflejados antes, durante y después de la ejecución del proceso, se detallan en la Tabla 36.

Tabla 36

Tabla de Colores HMI

Colores para el HMI Horno Autoclave		
Color	Significado	Estado
Verde	Proceso en ejecución normal, modo seguro	El horno se encuentra en estado operacional activo o puesta en marcha de forma adecuado
Amarillo	Configuración del sistema previo al normal funcionamiento	En pausa, ingresando los valores por consola para el uso posterior del sistema
Rojo	Emergencia o paro forzado del funcionamiento del proceso	El horno se encuentra en falla, error o no se encuentra en condiciones óptimas para su puesta en marcha

Estos colores están relacionados directamente con las luces piloto instaladas físicamente, misma que indican el estado de funcionamiento del horno.

Formato de pantalla

En base a la guía de estilo, define que las pantallas deben de tener colores de fono neutros, de tal forma que se evite el resplandor así cuidando la salud visual de los operarios.

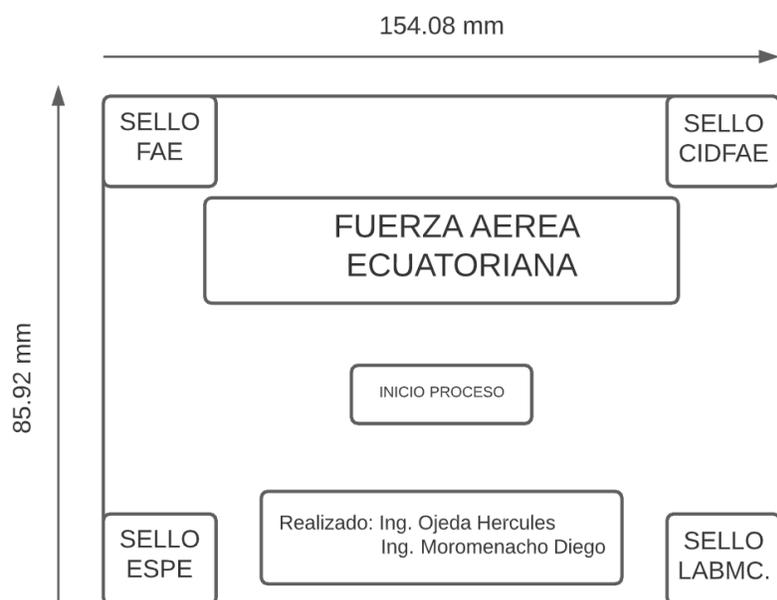
Según la norma ISA 101 establece que, se establezca un color neutro de fondo que define como un color de saturación muy bajo, en el caso de la implementación para todas las pantallas se utilizará un color de fondo celeste oscuro, a fin de cumplir con esta normativa y buscar una uniformidad en el proceso.

a) Pantalla de inicio presentación

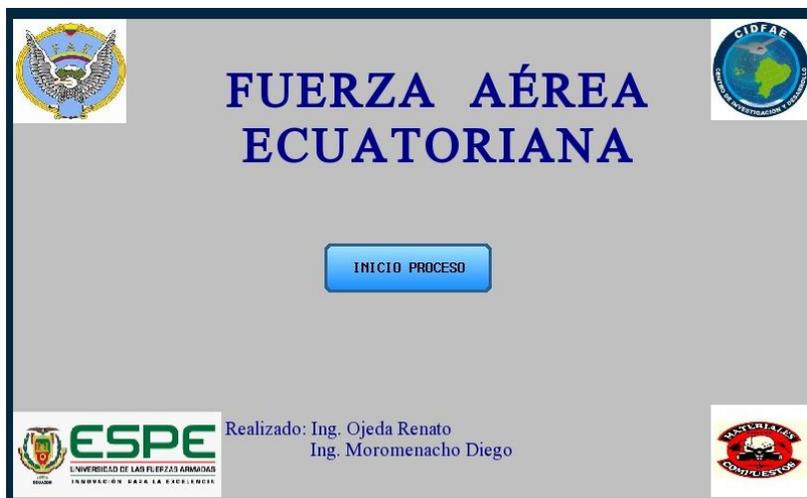
EL formato de la pantalla de inicio se muestra en la Figura 128, donde se detalla los componentes y botones de navegación en el proceso

Figura 128

Formato de Pantalla Presentación Inicio

**Figura 129**

Formato de Pantalla Presentación Inicio Programada



b) Pantalla de menú

Figura 130

Formato de Pantalla de Menú

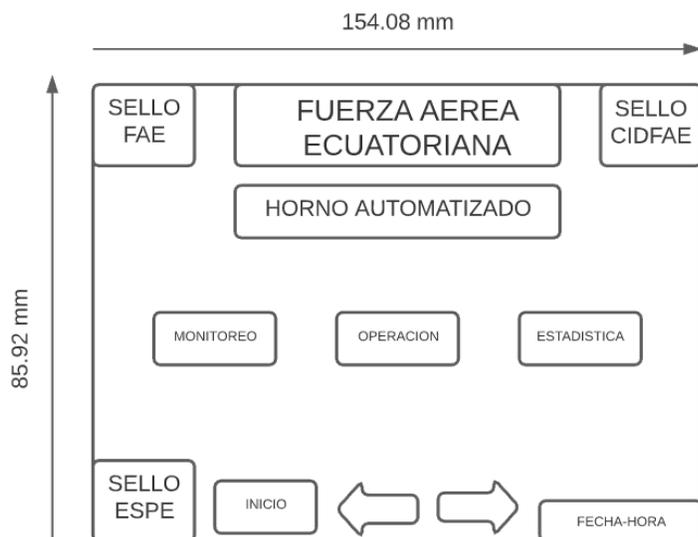


Figura 131

Formato de Pantalla de Menú Programada



c) Monitoreo de proceso

Figura 132

Formato de Pantalla de Monitoreo de Proceso

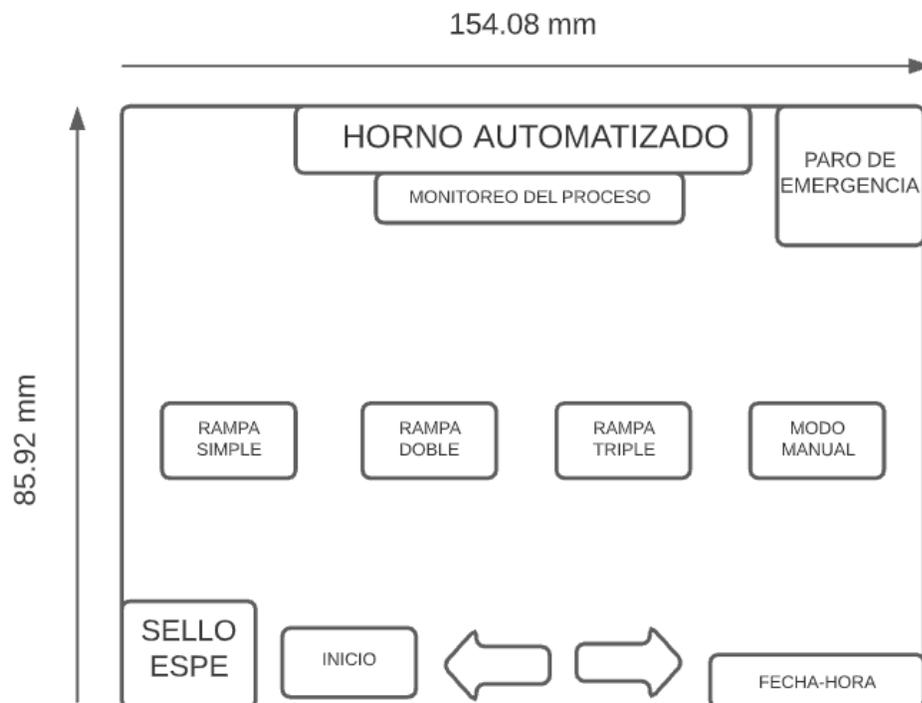


Figura 133

Formato de Pantalla de Monitoreo del Proceso Programada



d) Operación de proceso

Figura 134

Formato de Pantalla de Operación de Proceso

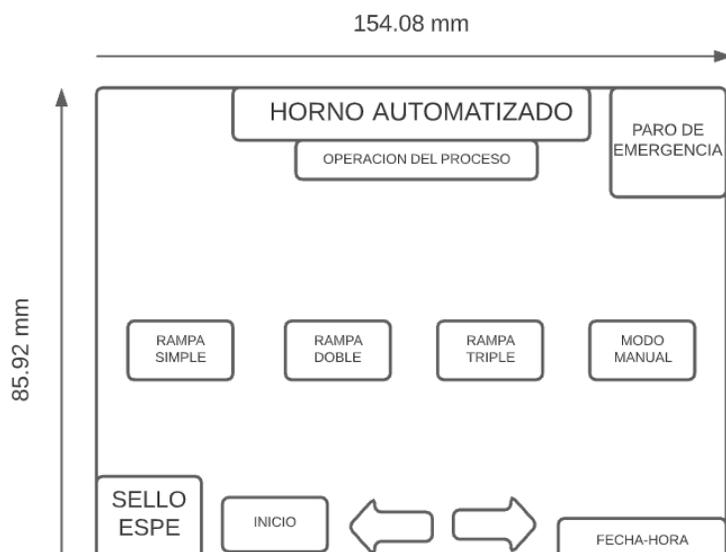


Figura 135

Formato de Pantalla de Operación de Proceso Programada



e) Estadística del proceso

Figura 136

Formato de Pantalla de Estado o Visualización del Proceso

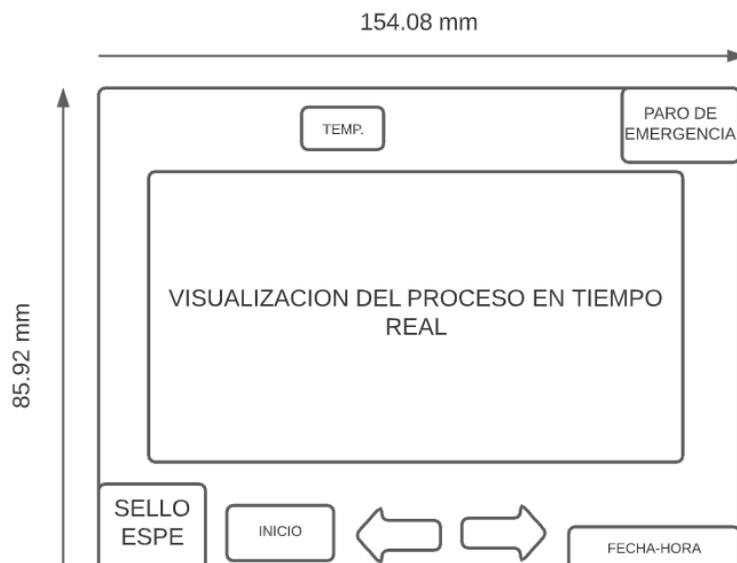
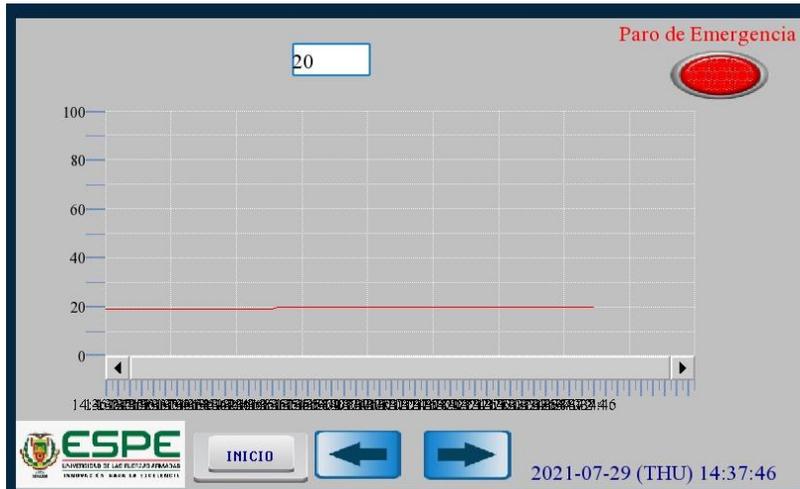


Figura 137

Formato de Pantalla de Estado o Visualización del Proceso Programada



f) Monitoreo y operación en rampa simple

Figura 138

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Simple

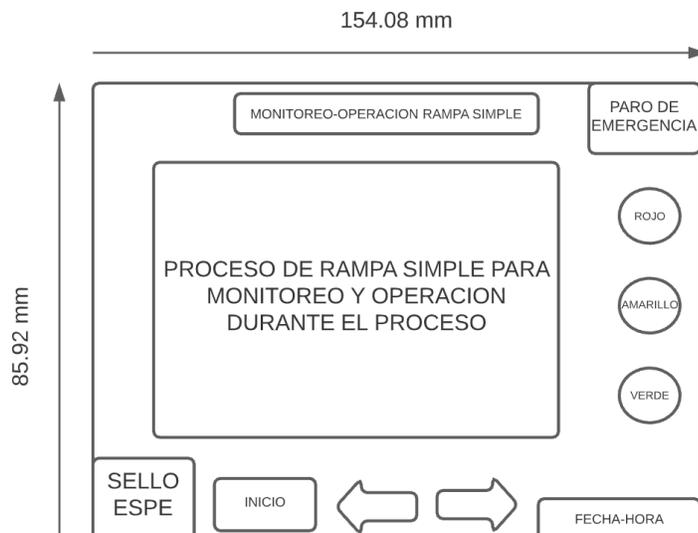
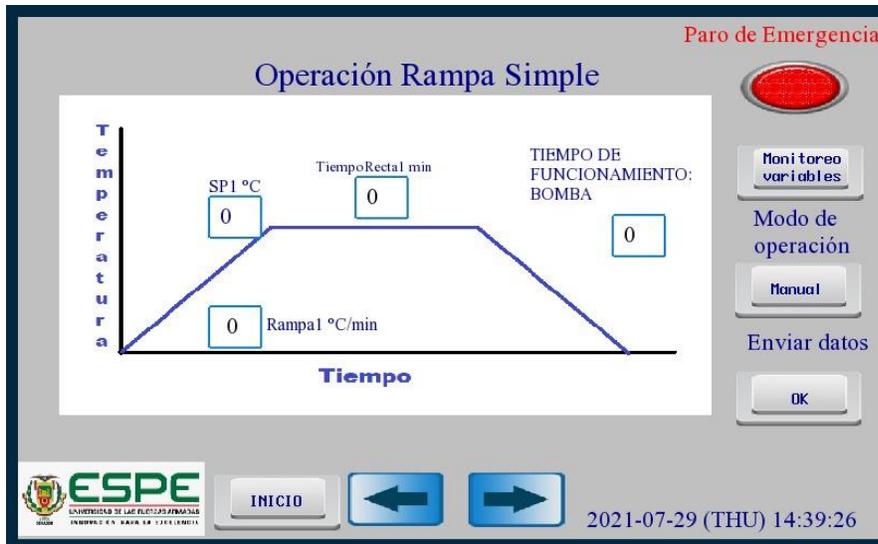


Figura 139

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Simple Programado



g) Monitoreo y operación en rampa doble

Figura 140

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Doble

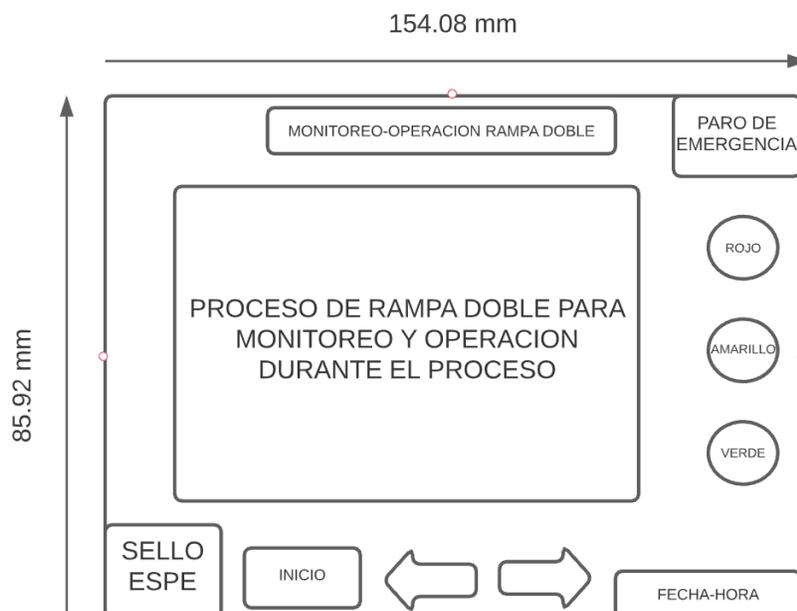
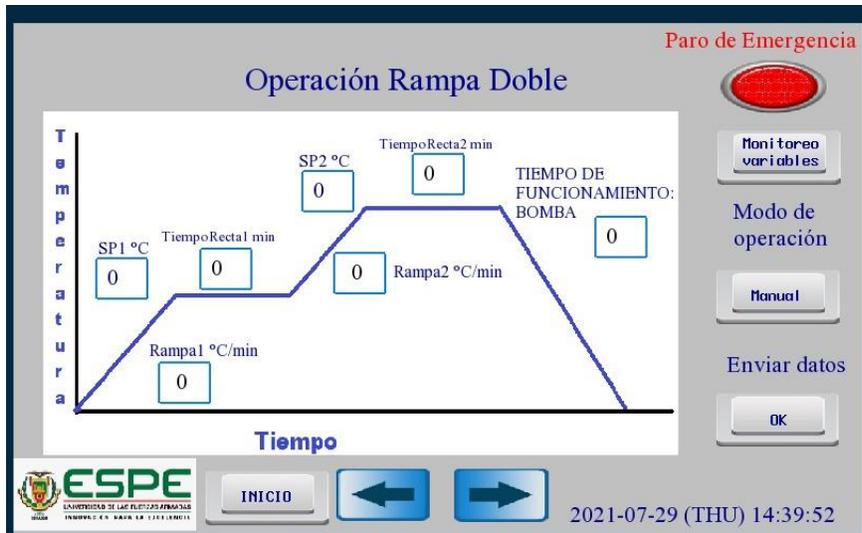


Figura 141

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Doble Programado



h) Monitoreo y operación en rampa triple

Figura 142

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Triple

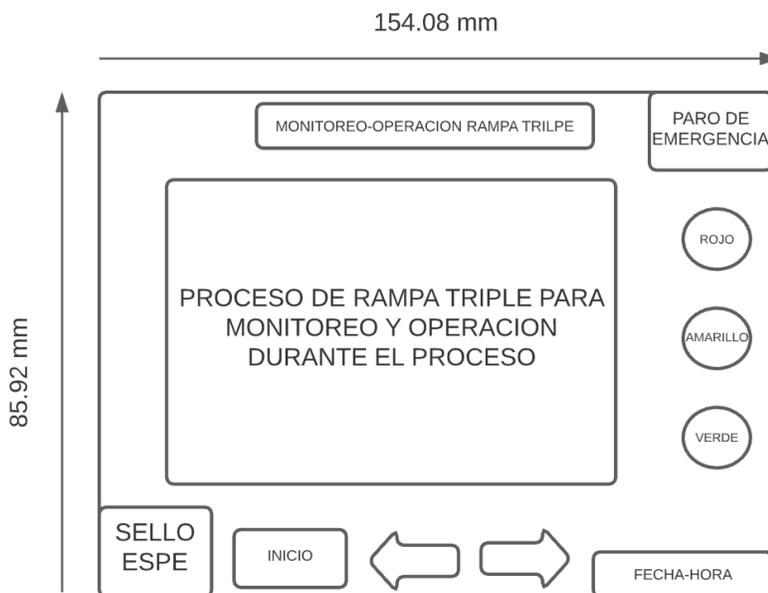


Figura 143

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Rampa Triple Programado



i) Monitoreo y operación en modo manual

Figura 144

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Modo Manual

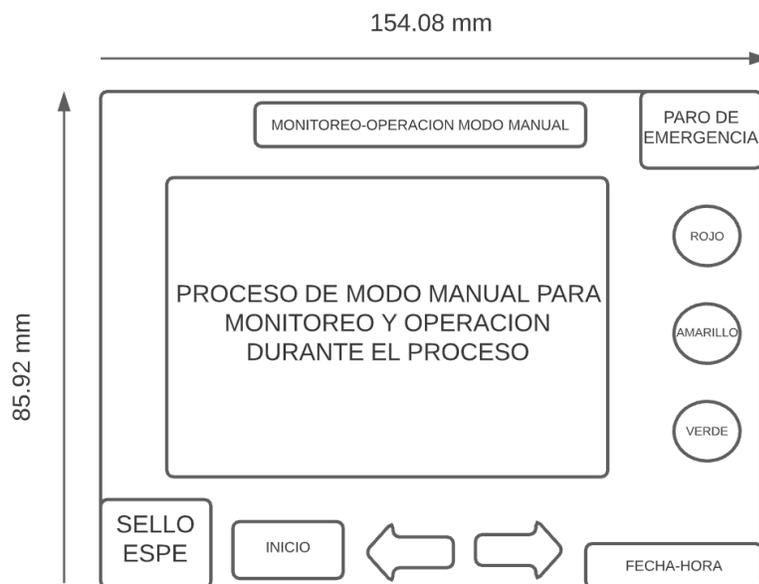
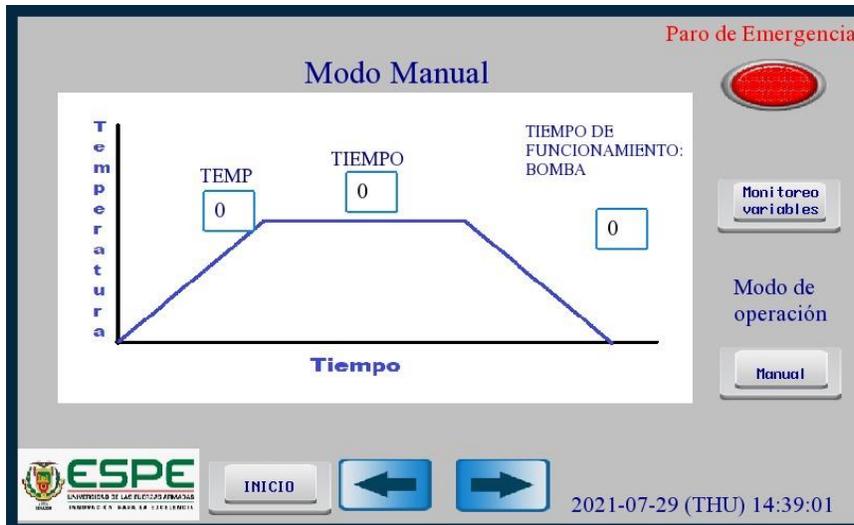


Figura 145

Formato de Pantalla de Monitoreo y Operación en Modo Manual Programado



Resultados de requerimientos funcionales

El diseño presentado garantiza que el proceso de curado y secado de materiales compuestos se lleve de forma correcta interactuando los operarios del laboratorio de materiales compuestos con el horno autoclave. La información que se presenta en el HMI, en sus diversas pantallas y niveles es practica y sencilla de entender por el operario, así como también para el ingreso de información en la configuración de los tipos de los tipos de programas a seleccionar y su trabajo a realizar, no presenta problemas y es muy amigable con el operador dicha interfaz HMI.

Capítulo IV: Pruebas Y Resultados

Pruebas y resultados

Se implementó la configuración y puesta en marcha de los módulos y el PLC (Controlador Lógico Programable), para el funcionamiento de la planta con una óptima condición, también se estudiará el comportamiento del horno a diferentes temperaturas con el control del sistema que se implementó a fin de obtener datos reales de la planta y obtener una automatización confiable y segura.

Estudio del comportamiento térmico

En vista que el PLC dispone de la capacidad de expandirse mediante módulos, se optó por la integración del módulo de temperatura SM 1231 TC especificado para termocuplas, que se configura en base a la Figura 146, debido a que es un dispositivo de carácter industrial, la confiabilidad de las lecturas de datos provenientes de la termocupla utilizada será de alta confiabilidad.

Figura 146

Configuración del módulo SM1231 TC

CanalIO

Dirección de canal: IW96

Tipo de medición: Termopar

Termopar: Tipo J

Escala de temperatura: Celsius

Filtrado: Fuerte (32 ciclos)

Origen temperatura de referencia: Referencia interna

Temperatura de referencia: +/-

Activar diagnóstico de rotura de hilo

Activar diagnóstico de rebase por exceso

Activar diagnóstico de rebase por defecto

En la Figura 146, se configura el sensor de temperatura (termocupla), la escala de temperatura en grados Celsius con un filtrado de 32 ciclos los mismos que permite tener una confiabilidad muy alta durante la ejecución de lectura de datos y posteriormente el proceso de curado y secado de materiales compuestos.

Análisis técnico del horno

Antes de proceder a la puesta en marcha de la planta es importante conocer sus limitaciones, así como capacitancia, límites de la planta, y la inercia del horno a varias temperaturas para su análisis y resultados.

Capacitancia

La capacitancia de un proceso, es un factor primordialmente importante en un control automatizado de una planta, debido a que con ello se puede transferir o mantener una cantidad de energía o material con relación a una cantidad unitaria variable, por ello se puede concluir que entre más grande sea la capacitancia de la planta será mejor el rendimiento del controlador, en la presente investigación la capacitancia es lo suficientemente grande como para mantener constante la variable controlada, a pesar de las perturbaciones que puedan existir en la misma planta, esto se logró comprobar ya que la planta se mantiene constante durante 6 horas continuas de prueba y sometiéndola a diferentes perturbaciones durante el proceso.

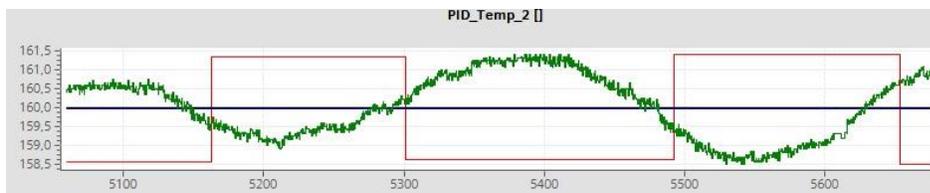
Límites de la planta

Definir como el límite de la planta la máxima temperatura con la que el horno fue diseñado, en un tiempo estimado para alcanzar la máxima temperatura, para el diseño del horno se lo realizó para una temperatura máxima de 300°C.

Se desarrolló la prueba para alcanzar la máxima temperatura con un tiempo estimado de 53 minutos para alcanzar la temperatura de 300°C , activadas las resistencias térmicas (Niquelinas) a su capacidad máxima, también se desarrolló la toma de datos de una temperatura de 160 grados durante tiempo de 6 horas continuas de uso, como se puede apreciar en la figura 147.

Figura 147

Límites de la planta

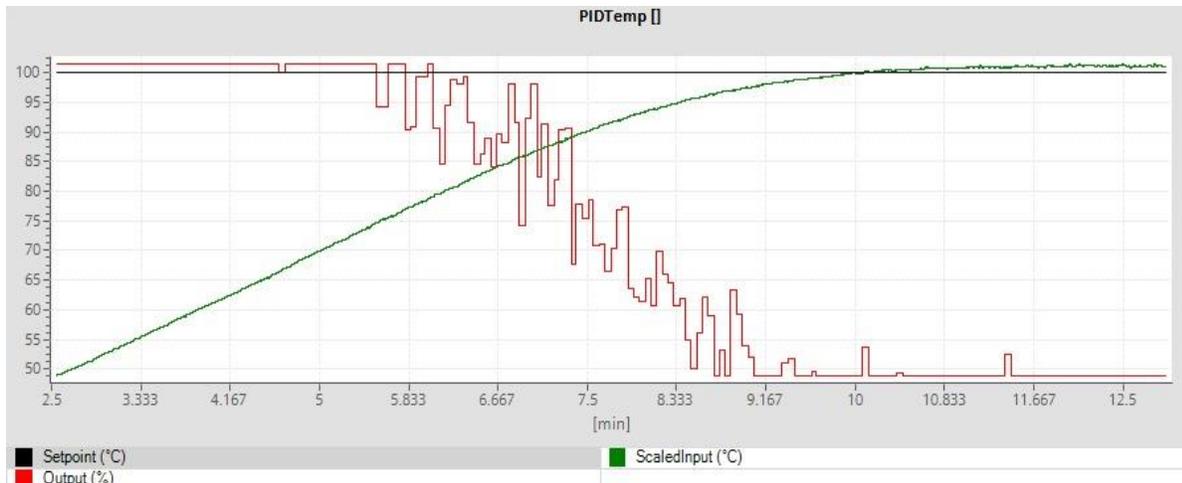


Pruebas de inercia del horno a 100°C , 120°C y 130°C

En la Figura 148, se muestra la curva de temperatura vs tiempo, de esta forma se realiza una prueba del control PID, con un set point definido (100°C), donde arrojan valores máximos fuera de rango en un máximo de 102°C y 98°C mínimo, que genera un margen de error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$

Figura 148

Curva de temperatura vs tiempo con un set point de 100°C

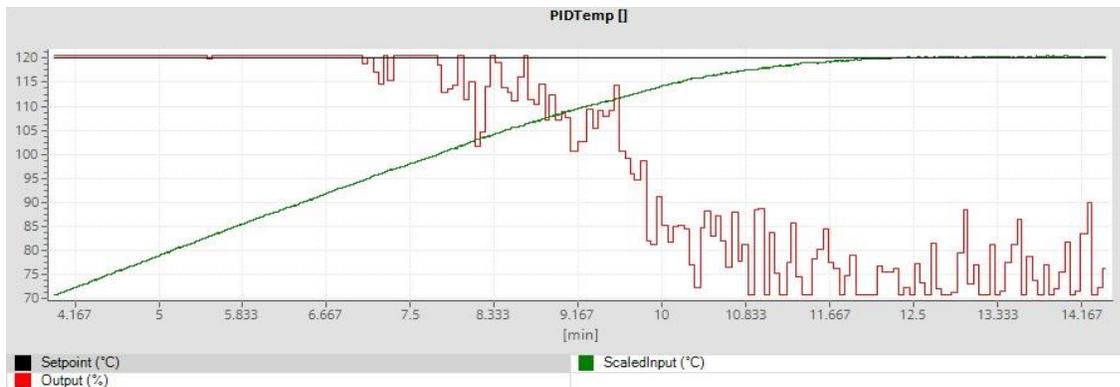


En la Figura 148 se puede visualizar que la temperatura máxima de subida fue de 102 °C como máximo, mientras que de bajada fue de 98°C, de igual forma se estabiliza en los 13 minutos de funcionamiento con un error menor de 3°C, en consecuencia, se aprecia que alcanza la temperatura deseada en 10 minutos, al igual que el control en la salida (PWM) su valor descende a partir del minuto 5 de funcionamiento.

Para la Figura 149 se instaura una curva de temperatura vs tiempo, realizando una prueba de control PID del set point establecido de 120 °C, donde se obtiene el resultado de 123°C como valor máximo y 118°C como mínimo durante la operación.

Figura 149

Curva de Temperatura vs Tiempo con un Setpoint de 120°C

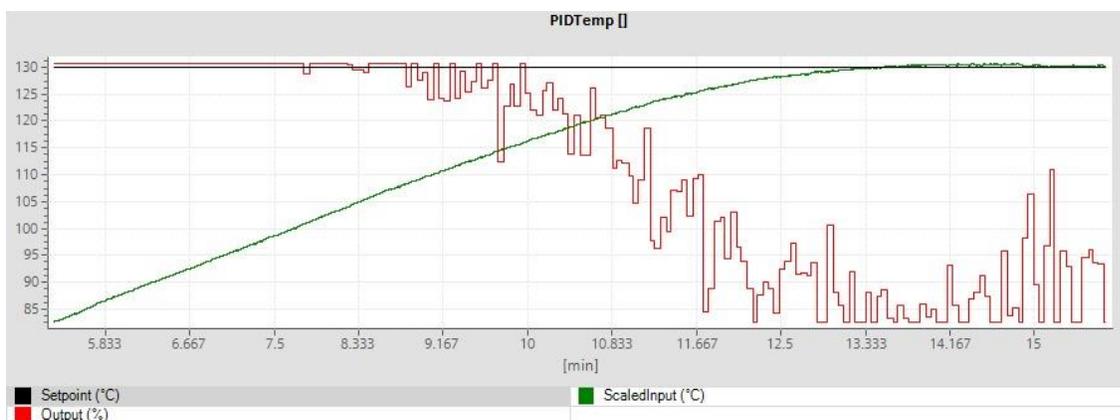


Refiriéndose a la Figura 149, en base a la relación temperatura vs tiempo, el set point establecido es de 120°C , se visualiza una temperatura de 122°C como máximo, mientras que el mínimo fue 118°C , y la estabilización ocurre en 14 minutos, se consigue alcanzar el set point en 12 minutos aproximadamente, mientras que la salida del PWM decrece a partir de los 6,30 minutos de funcionamiento de la planta

En la Figura 150, se realiza la prueba con un set point de 130°C en una curva de temperatura vs tiempo, mediante el control PID implementado en el control, dando valores de temperatura máxima 133°C y mínima de 129°C

Figura 150

Curva de temperatura vs tiempo con un set point de 130°C



En la figura 150 se aprecia que la temperatura sube a un máximo de 133°C y disminuye a un mínimo de 129°C con un tiempo de estabilización en 15 minutos, y alcanza la temperatura seteada a los 12,30 minutos, la salida PWM empieza a decrecer después de 8 minutos de capacidad máxima, de esta manera se llega a la conclusión que el error máximo es de el +-2% en el control PID implementado, la planta tendrá un funcionamiento en temperaturas desde los 30 grados hasta los 160 con más frecuencia de uso, dependiendo de las características del material compuesto a secar y su utilización.

Análisis de los sensores de la cámara del horno

Para comprobar el comportamiento de los sensores se optó por medir y comparar a la vez los sensores al interior de la cámara arrojando los siguientes resultados

Tabla 37

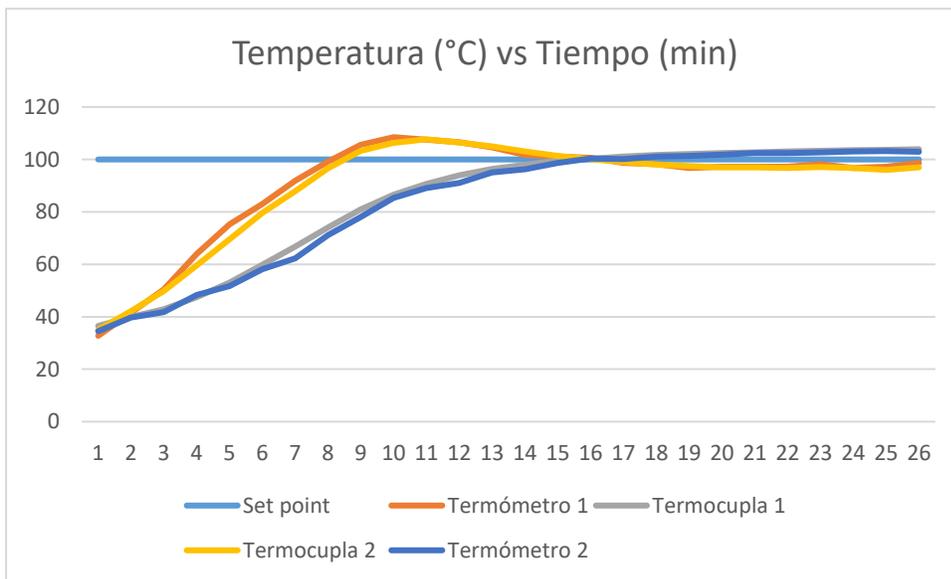
Toma de datos sensor físico y sensor de la cámara

Set point	Termómetro 1	Termómetro 2	Termocupla 1	Termocupla 2
100	32,75	34,5	36,5	35
100	41,54	39,7	40	42,1
100	50,34	41,8	42,9	49,8
100	64,03	48,3	47,5	59,6
100	75,27	51,7	53	69,6
100	83,09	58,1	59,8	79,6
100	91,89	62,3	66,8	87,9
100	99,22	71,1	74	96,6
100	105,57	78,1	81	103,3
100	108,5	85,3	86,6	106,3
100	107,53	89,1	90,7	107,7
100	106,55	91,1	94	106,5
100	104,59	95	96,4	105
100	101,66	96,3	98	103
100	101,17	98,7	99,7	101,4
100	100,68	100,4	100,3	100,1
100	98,73	100,2	101,1	99,1
100	98,24	101,1	101,7	98,1

100	96,77	101,3	102,1	97,5
100	97,26	101,8	102,5	97
100	97,26	102,4	102,7	97
100	97,26	102,5	103,1	96,7
100	98,24	102,7	103,3	97,1
100	96,77	103,1	103,6	96,7
100	97,26	103,2	103,7	96
100	98,73	102,9	103,9	97

Figura 151

Muestra de datos de los sensores



En la figura 151, se puede apreciar la relación de los sensores y comparación de los mismos entre la termocuplas y los termómetros la cual tiene una fluctuación mínima entre los dos sensores, de esta forma se aprecia que el termómetro 1 tiene similar curva a la termocupla 2, de igual manera para el termómetro 2 con la termocupla 1, las curvas son semejantes con mínimo error, razón de esto se decide trabajar con más exactitud debido al tamaño de la cámara, se optó por hacer un promedio entre los dos sensores instalados en la cámara, el cual da una temperatura más exacta en el interior mientras se estabiliza todo el sistema hasta que los dos sensores tengan una misma temperatura, en todas las pruebas que se han generado

se estabilizo la temperatura en toda la cámara, con un promedio de 10 a 15 minutos de funcionamiento del horno. Para ello se toma un dato al azar 80 °C, la cual refleja el valor de 74°C para la termocupla 1 mientras que para la termocupla 2 el valor 96,6°C el cual se precede a promediar los dos valores y se genera el valor real de temperatura de la cámara siendo 85,3°C

$$T_{real} = \frac{74^{\circ}C * 96,6^{\circ}C}{2}$$

$$T_{real} = 85,3^{\circ}C$$

Pruebas en base a requerimiento del cliente

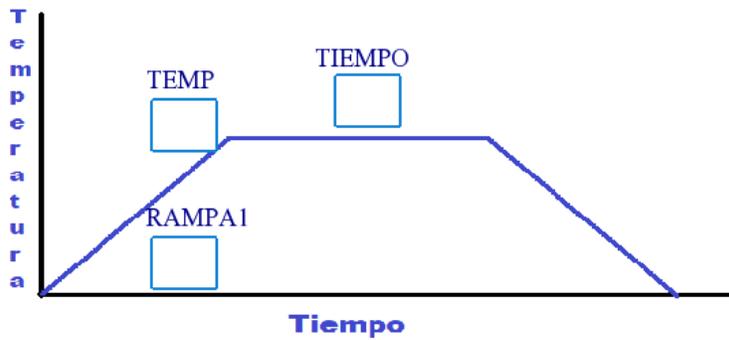
En base a los requerimientos del cliente el cual especifica tres criterios diferentes para su funcionamiento adicional se implementó un criterio más.

Rampa simple

Para el diseño de la rampa simple el cual se visualiza en la Figura 152, constituido por una rampa de acenso el cual tendrá un valor especificado por el usuario, es decir que el usuario pueda ingresar valores $1\frac{^{\circ}C}{min}$ a $10\frac{^{\circ}C}{min}$ según estipulado por el cliente y mediante las pruebas ejecutadas de funcionamiento, para una capacidad máxima de subida de temperatura que en este caso sería $10\frac{^{\circ}C}{min}$

Figura 152

Rampa simple



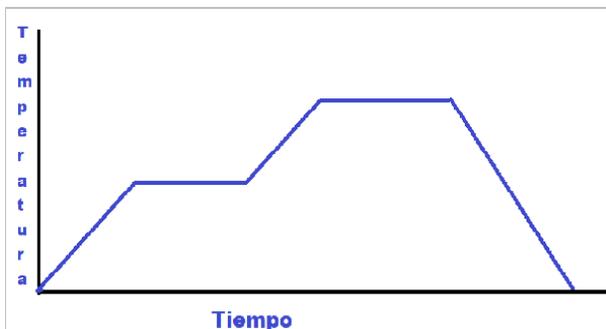
En la Figura 152, se puede apreciar la curva de salida y el tiempo que se encontrará estable la curva, para la curva de ascenso se ingresa los datos de $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ a $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ según el requerimiento del cliente y del material a secar, se colocará la temperatura deseada a la que se estabilice el proceso y por último se coloca el tiempo de funcionamiento en el cual se encontrará estable a la temperatura especificada.

Rampa doble

En este tipo de rampa se cumplen los mismos parámetros de la anterior rampa a diferencia que tendrá una pendiente y recta de estabilización más.

Figura 153

Rampa Doble



En la Figura 153 se concibe dos curvas diferentes de ascenso de temperatura la cual tendrá la capacidad de ingresar de forma independiente los datos de $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ a $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ para cada una de las curvas de igual forma para la temperatura a alcanzar y el tiempo que se mantendrá estable la temperatura del proceso de secado a realizar.

Rampa triple

Como se aprecia en la Figura 154 el principio de funcionamiento es el mismo que las anteriores rampas a diferencia que existen 3 rampas de ascenso y tres rectas de estabilización de la temperatura.

Figura 154

Rampa Triple



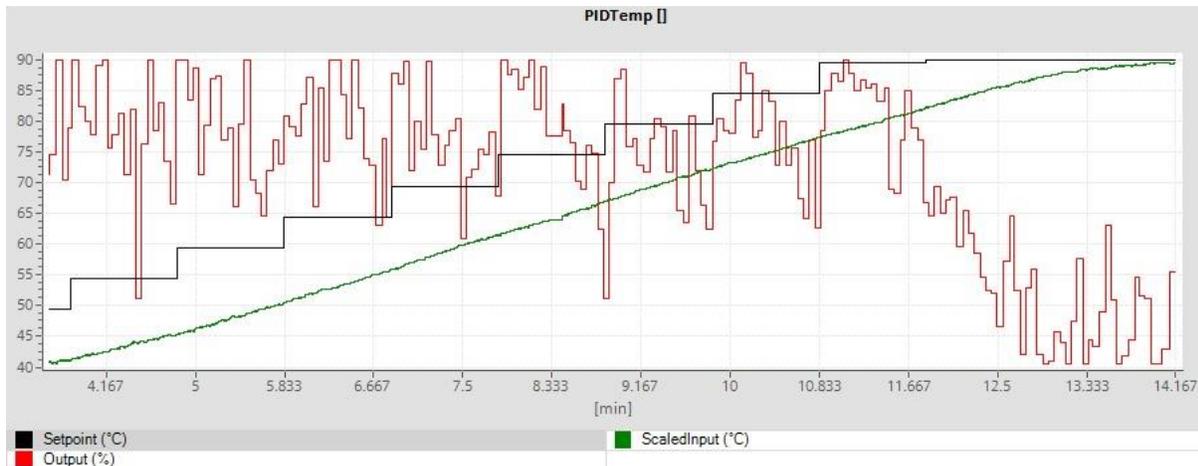
En la Figura 154 se representa 3 diferentes curvas de ascenso de temperatura, el funcionamiento será el mismo, se puede ingresar 3 diferentes características para cada curva el cual va $1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ a $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ según los requerimientos del cliente, de igual manera la temperatura a alcanzar serán 3 diferentes sets points, cabe mencionar que la temperatura menor será la de la primera rampa y las siguientes temperaturas siempre son mayores a la anterior. Los 3 diferentes tiempos que se mantendrá estable la temperatura del proceso de secado a realizar según lo estipulado por el cliente.

Para el funcionamiento de mencionadas características estipuladas por el usuario se podrá identificar en la Figura 155, donde se puede apreciar el comportamiento del PWM del

proceso, el ascenso de la curva de control y el ascenso en tiempo del set point ingresado por el usuario.

Figura 155

Funcionamiento de la curva de ascenso a $5(^{\circ}\text{C})/\text{min}$



En la Figura 155 se visualiza que el set point ingresado cambia en cuestión de tiempo para este caso específico se resalta que en cada minuto el ascenso es de $5\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$, para poder entender mejor el funcionamiento, el PWM generado por el controlador que en cada escalón o ascenso de temperatura la salida (PWM) se eleva para alcanzar la temperatura deseada en vista de eso, se tiene la curva que está controlada por 5°C a 10°C por debajo del set point ingresado, pero cumple con los requerimientos del cliente el cual es de $5\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.

Análisis de resultados

Una vez realizado las diversas simulaciones, diseño, construcción, puesta en marcha y corrección de fallas en la construcción del horno autoclave, se llega a determinar que el prototipo del horno autoclave es de factible funcionamiento, debido a que, en el diseño mecánico realizado, se encuentra una respuesta satisfactoria en referencia a la transferencia de calor, al existir pérdida de calor mínima desde su cámara hasta la parte exterior del mismo.

En cuanto al diseño estructural se determinó que las vigas y columnas implementadas están de una forma sobredimensionada para el peso que soportan, obteniendo así una estructura sumamente fuerte y duradera, mientras que en la implementación y construcción estructural se tuvo algunas dificultades debido a que se realizó una soldadura MIG, fue necesaria una capacitación en la misma para poder realizar este tipo de suelda, donde incurrió tiempo empleado para su capacitación. Realizando con éxito la construcción de la parte estructural

El diseño eléctrico, ya sea implementación, programación, construcción y dimensionamiento, se lo realizó a partir de lo aprendido en las aulas de clase mediante un PLC (Controlador Lógico Programable) como corazón del sistema, donde se implementó un bloque de control PID compact, en el cual se realizó el sensado de la planta durante aproximadamente 5 horas a un set point 160°C , donde se determinó los parámetros para el funcionamiento de mencionado bloque, así mismo para su control satisfactorio, obteniendo un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ en su control, logrando una respuesta óptima para el proceso de curado y secado en la fabricación de los materiales con los que se trabajarán en el prototipo del horno.

La programación se realizó de forma independiente para la función del PWM, debido a que el PLC que se instaló no tiene la capacidad de generar su propio PWM. en referencia a esto se optó por implementar un bloque PWM en base a bloques timers para la programación de las curvas requeridas por el usuario obteniendo una respuesta con mucha confiabilidad, la instrumentación de los sensores se realizó con un módulo SM 1231 TC permitiendo la lectura de las termocuplas con lecturas precisas y exactas, para que no existan discrepancias o fallos por instrumentación.

Se realizó un promedio entre los dos sensores instalados para una mayor exactitud en el proceso interno de la cámara hasta que se establezca la temperatura en las lecturas del

sensor, debido a que todo el diseño se lo realizó con equipos industriales los cuales están sobredimensionados para la aplicación creada en el prototipo del horno autoclave

Para el control se implementó un control PID el mismo que fue realizado en el bloque de PID Compact ya predefinido del PLC, en el cual se obtuvo los parámetros del control adecuado que anteriormente se menciona como se realizó el proceso, de esta forma se controla la modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM) , el cual transfiere esta información a una etapa de potencia que está definido por una aplicación de relé de estado sólido SSR de cruce por cero, encargado de controlar a las resistencias térmicas (niquelinas) instaladas en el horno, cabe mencionar que todos los dispositivos e instrumentación está sobre dimensionada para mencionada aplicación.

En el armado y direccionamiento de la instrumentación (cables, niquelinas, tablero de control), mediante lo aprendido en clases se desarrolló cálculos de cables, se define las niquelinas adecuadas y por último se realiza la distribución del tablero de control según las normas establecidas por la industria para el correcto armado.

En el sistema de supervisión se lo realizó mediante la norma ISA 101 en un diseño amigable y de fácil entendimiento para el usuario con todos los requerimientos y exigencias de un equipo industrial.

Por último, en las etapas de prueba se realizó un análisis exhaustivo de la planta con tiempos de trabajo de 6 horas seguidas de funcionamiento a distintas temperaturas, comprobando la histéresis entre la temperatura deseada y la que se obtiene en tiempo real, obteniendo resultados sumamente satisfactorios y confiables al interior de la cámara automatizada, las pruebas fueron tomadas con los criterios del usuario que las realizó con total confiabilidad.

En cuanto a diseño, tiempo de trabajo, facilidad de uso, requerimientos del usuario y ahorro energético, se llegó a optimizar cada uno de los recursos para obtener un prototipo del horno autoclave totalmente funcional, confiable, robusto y atractivo a la vista.

En el panorama de todas las cualidades de lo anteriormente expuesto se puede recomendar la confiabilidad del horno en el uso de secado de materiales compuestos, ya que cumple todas las exigencias de las hojas técnicas de los diversos materiales con los que se trabaja en el Laboratorio de Materiales Compuestos de la FAE , cabe mencionar que dicho prototipo se puede reproducir en serie con iguales o mayores dimensiones, ya sea para aplicaciones de la misma especie, o para diferentes sistemas de secado como puede ser madera, arroz, cerámica entre otros.

Capítulo V: Conclusiones Y Recomendaciones

Conclusiones

- Se diseñó el sistema BPCS y el sistema SIS para el control del horno autoclave, donde se implementó un controlador tipo PID que fue la técnica de control que mejor se ajustó al comportamiento de la planta, obteniendo una temperatura constante y estable durante el tiempo operación en base a los parámetros ingresados (programa de secado, tipo de rampa, temperatura SP, tiempo de operación) por parte del operador (técnico del Laboratorio de Materiales Compuestos).
- Se implementó el control del proceso de curado y secado de materiales compuestos, donde el operador del horno autoclave (técnicos del Laboratorio de Materiales Compuestos) interactúa directamente con la planta mediante la pantalla HMI, misma pantalla que cumple con los requerimientos de los operadores, es amigable y de fácil uso durante el proceso
- El sistema posee una interfaz amigable con el usuario, la misma que permite la visualización, supervisión, monitoreo y control de las variables físicas del proceso, donde se generan históricos y curvas de tendencia (temperatura vs tiempo) del proceso del horno autoclave.
- Se diseñó y construyó la estructura mecánica del horno autoclave en base a los requerimientos, dimensiones planteadas por el usuario final (técnicos del Laboratorio de Materiales compuestos) y las normativas técnicas industriales vigentes para la elaboración de hornos acorde a la aplicación que tendrá el horno autoclave.

- El calor dentro de la cámara del horno se distribuye de forma uniforme debido a la acción del agitador axial y gracias a que las termo resistencias (niquelinas) fueron ubicadas de forma estratégica en base a simulaciones, a fin de aprovechar al máximo la potencia que generan durante el proceso de curado y secado de materiales compuestos.
- La etapa de control esta programada para el funcionamiento óptimo y preciso de los actuadores encargados de obtener el rango de operación de 25°C hasta 260°C, con un error máximo de +/- 3 °C en temperaturas superiores a 150 °C y +/- 2 °C en temperaturas inferiores a 150 °C.

Recomendaciones

- Realizar un mantenimiento periódico, en base al manual de usuario, mismo que se facilita como anexo
- Durante el uso del prototipo, realizar pausas de hasta 40 minutos para utilizar el horno autoclave en un nuevo lote, a fin de que la temperatura dentro del horno baje y de esta forma resguardar la integridad física y funcional de la misma.
- Durante la operación trabajar con equipos de protección personal (EPP) a fin de evitar accidentes por quemaduras o cualquier otra índole.
- Considerar que, para una operación superior a 4 horas, la estructura externa del horno tiende a emitir calor, por lo tanto, mantener las precauciones del caso a fin de evitar accidentes con el personal que opera dicha planta.
- El controlador debe ser manipulado por una persona capacitada y autorizada, a fin de conservar la integridad física y funcional del horno autoclave

Capítulo VI: Referencias Bibliográficas

Adams, M. (1974). *Transmisión de calor 3ra Edición*. Mexico: Mc Graw Hill.

Aguirre, G. (2020). *Universidad Nacional de Misiones*. Obtenido de

[https://www.bing.com/search?q=\(Controladores+L%C3%B3gicos+Programables+\(PLCs\)+%2C+2020\).&cvid=1b8a11a15adf4c078875eb783c5a840e&aqs=edge..69i57.1122j0j1&pglt=2083&FORM=ANNTA1&PC=HCTS](https://www.bing.com/search?q=(Controladores+L%C3%B3gicos+Programables+(PLCs)+%2C+2020).&cvid=1b8a11a15adf4c078875eb783c5a840e&aqs=edge..69i57.1122j0j1&pglt=2083&FORM=ANNTA1&PC=HCTS)

AIMPLAS. (2020). *Tipos de materiales compuestos*. Obtenido de

<https://www.aimplas.es/blog/tipos-de-materiales-compuestos/>

Búa, M. T. (2020). Obtenido de

https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947843/contido/31_elementos_de_un_circuito_elctrico.html

Callister, W. D. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona:

Reverté.

Catalunya, U. P. (2021). *SISTEMAS DE CONTROL* . Obtenido de

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>

Catambria, U. d. (2021). *UNICAN*. Obtenido de

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1986/course/section/2310/1.%2520Accionamientos.pdf>

CNX. (2021). *The First Law of Thermodynamics*. Obtenido de

<https://cnx.org/contents/Ax2o07UI@9.4:-xG0g7hf@7/The-First-Law-of-Thermodynamics>

Creus, A. (2010). *Instrumentacion Industrial 8º edición*. Mexico: Alfaomega.

EcuRed. (2021). *Segunda Ley de Newton*. Obtenido de
https://www.ecured.cu/Segunda_Ley_de_Newton

ELECTRIN. (2020). *ELECTRIN*. Obtenido de
<https://electrinblog.wordpress.com/2016/04/26/post-4/>

Electroschematics. (2010). *LM35* . Obtenido de <https://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2010/02/LM35-DATASHEET.pdf>

Ferrer, R. (2019). *AERTEC*. Obtenido de <https://aertecsolutions.com/2019/04/22/evolucion-de-los-materiales-aeronauticos/>

García, L. (2018). *SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD SIS*. Madrid: Pecsén & Pecsén.

Griezmann, A. (2020). *SCRIDB*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/401554677/Ciclo-de-Funcionamiento-Del-PLC>

Hener, E. (2021). *Elementos de maniobra*. Obtenido de
<https://sites.google.com/site/electronicahenar/componentes-electronicos/elementos-de-maniobra>

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

IPOWER. (2020). Obtenido de <https://ipowerelectronics.com/sensores/2673-sensor-temperatura-termopar-pt100-rtd-50-a-400-c-termocople.html>

Kuo, B. (1996). *Sistema de Control Automático*. Mexico: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

Mathworks. (2018). *Información de la compañía Mathworks*. Obtenido de

<https://la.mathworks.com/company/aboutus.html>

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

Morilla, F. (2007). *Controladores PID*. Madrid: UNED.

Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Mexico: Pearson Educación.

PAC. (2020). *Lifelong Learning*. Obtenido de

http://www.ieec.uned.es/investigacion/dipseil/pac/archivos/informacion_de_referencia_is_e6_1_1.pdf

Pérez, A. (2012). Obtenido de [https://alberto-](https://alberto-perez.tumblr.com/post/23554188761/peque%C3%B1a-historia-de-los-materiales-compuestos)

[perez.tumblr.com/post/23554188761/peque%C3%B1a-historia-de-los-materiales-compuestos](https://alberto-perez.tumblr.com/post/23554188761/peque%C3%B1a-historia-de-los-materiales-compuestos)

SALAMARKESA. (2020). *Conservación de la masa* . Obtenido de

<https://www.salamarkesa.com/dinamica-fluidos-conservacion-masa/>

Sensores de Temperatura. (2019). Obtenido de

<https://inyeccionelectronicamotores.blogspot.com/2016/08/sensor-de-temperatura-del-refrigerante.html>

Siemens. (2008). *Siemens*. Obtenido de Siemens:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/826/43346826/att_46845/v1/S71200_SM_12_31_TC_product_info_en-US_en-US.pdf

SIEMENS. (2021). Obtenido de

https://media.automation24.com/manual/es/91696622_s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf

SIMATIC. (2021). Obtenido de

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_916495/v1/s71500_pid_control_function_manual_esES_es-ES.pdf

SISTEMAS INSTRUMENTADOS DE SEGURIDAD (SIS). (s.f.). Obtenido de Revista de

ingeniería DYNA: <https://www.revistadyna.com/busqueda/sistemas-instrumentados-de-seguridad-sis-ciclo-de-vida>

Stupenengo, F. (2011). *inet.edu.ar*. Obtenido de 1 Red conceptual de materiales compuestos

Tecnología y Robótica. (de 2018). Obtenido de <http://pws1802.blogspot.com/2017/10/ntc-ptc-y-receptor.html>

Tsai, S. W., & Antonio , M. (1988). *Diseño y Análisis de materiales compuestos*. Barcelona: Reverté S.A. .

UNET. (2020). *SENSORES*. Obtenido de <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/sensores.pdf>

Welty, J. (1995). *Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería*. Mexico: Noriega Editores.

Capítulo VII: Anexos

- Documentación técnica
- Planos eléctricos y electrónicos
- Diagramas de control, Graficets