



Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica
a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Juan Manuel Aguiñaga Martínez

TUTORES:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Ing. Raúl Llamas Esparza

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

Pabellón de Arteaga, Ags., Octubre del 2020



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA REACCIÓN
POLIMÉRICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO
AUTOMATIZADO”**

Presenta:

Juan Manuel Aguiñaga Martínez

Dirigida por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Ing. Raúl Llamas Esparza

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

Pabellón de Arteaga, Ags., Octubre del 2020.

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas agradezco a todas aquellas personas que me han brindado grandes enseñanzas con las que he aprendido que la vida es como tú quieras que sea.

En primer lugar agradezco a aquellas personas más importantes de mi vida, por la que sin ellas no estuviera aquí escribiendo estas líneas, agradezco a mis padres quienes son mi pilar, quienes me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia, mi empeño, todo aquello que con amor y de manera desinteresada me han otorgado. A mis hermanos que aunque parece en ocasiones que estamos en una guerra sin cuartel, siempre estamos unidos para combatir las adversidades de la vida ya que no solamente nos une la sangre si no el amor y cariño que nos tenemos.

Al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga por haberme aceptado ser parte de ella como estudiante, por haberme dado la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería en Mecatrónica la cual me ha brindado unas de mis mejores dichas, así como mis formadores: personas de gran sabiduría quienes se han esforzado para forjarme como profesional y llegar a este punto en el que me encuentro.

De manera notable Agradezco al Dr. José Alonso Dena Aguilar por haberme por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo, quien ha sido una guía valiosa durante el periodo de realización del proyecto, gracias por el tiempo de dedicación y paciencia que me ha brindado en la elaboración del proyecto.

A mis hermanos de corazón; a mis amigos quienes han sido mi mano derecha durante todo este tiempo; les agradezco por su desinteresada ayuda, por el conocimiento extra aportado, por haberme tendido la mano siempre cuando la he necesitado. Les Agradezco no solamente por la ayuda brindada, si no por los momentos en los que hemos convivido.

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma han formado la persona que soy, aportando grandes cosas en mi vida, ayudándome a encarar a la sociedad.

A todos ustedes ¡Muchas Gracias!



Pabellón de Arteaga, Ags., 2/octubre/2020

M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

PRESENTE

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada "CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA REACCIÓN POLIMÉRICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO AUTOMATIZADO" del estudiante JUAN MANUEL AGUIÑAGA MARTÍNEZ con numero de control 151050137 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizo los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®

DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

ING. RAÚL LIAMAS ESPARZA
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

M. en C. VÍCTOR MANUEL HERRERA AMBRIZ
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



Pabellón de Arteaga, Ags., 5/octubre/2020

JUAN MANUEL AGUIÑAGA MARTÍNEZ
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 151050137

PRESENTE

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: "CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA REACCIÓN POLIMÉRICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO AUTOMATIZADO", hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®


M. en C. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

RESUMEN

“CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UNA REACCIÓN POLIMÉRICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO AUTOMATIZADO”

Por: **JUAN MANUEL AGUIÑAGA MARTÍNEZ**

Las metodologías convencionales de síntesis de polímeros pueden ser llevadas a cabo mediante procedimientos de polimerización por radicales libres en solución bajo atmosferas oxidantes normales (en presencia de aire), utilizando iniciadores y empleando polímeros sintéticos y/o naturales. Entre otras variables de operación, la temperatura de reacción es muy significativa debido a que puede definir el peso molecular final del polímero sintetizado. Temperaturas altas de síntesis producen a menudo polímeros de bajo peso molecular y limitan la rapidez con que la reacción puede llevarse a cabo disminuyendo la eficiencia de la reacción. Aunado a lo anterior, las reacciones de polímeros llegan a ser exotérmicas por lo que se genera calor de formación que propicia un aumento más rápido de la temperatura de síntesis.

En el laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga se desarrollan proyectos relativos a la síntesis de copolímeros de poliacrilonitrilo para sus posibles aplicaciones en la industria textil. Dentro de este contexto, se contempla la síntesis de homopolímero de poliacrilonitrilo para la fabricación de fibras poliméricas de acabado textil.

Considerando lo anterior, se requiere de un sistema mecatrónico para el control de la temperatura de una reacción polimérica que permita monitorear y controlar esta variable y que de manera automática mantenga la síntesis dentro de un intervalo de temperatura determinado. Para este estudio se empleó la metodología de síntesis de copolímeros de poliacrilonitrilo reportado por Dena-Aguilar *et al.* como punto de partida para el diseño y construcción de una cámara de control de temperatura a través de un sistema de enfriamiento automatizado.

En este trabajo, se desarrolló una metodología para diseñar y construir una cámara de control de temperatura con dimensiones de 30 x 30 x 60 cm (ancho x profundo x alto) prevista de un (i) módulo de control para regular la posición vertical del reactor, velocidad de agitación de la reacción y monitoreo de la temperatura; (ii) un área de puesta de baño maría, (iii) una placa elevadiza porta-reactor para desplazar el reactor de una zona caliente a una zona fría conforme la temperatura de reacción, (iv) un sistema de enfriamiento a base de aire a presión, el cual es canalizado por un arreglo tuberías de policloruro de vinilo clorado de 1/2” (de tipo aspersor) y (v) un sistema de agitación.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

Se emplearon más de 270 piezas entre materiales de acero al carbón, electrónica modular compatible con hardware y software Arduino, agitador de tanque de montaje fijo hecho a la medida, comunicación serial y CNC robótica además de fabricar unidades de soporte mediante impresión 3D con material de poliácido láctico. Por mencionar algunos, se usó acero al carbón comercial de ángulo de 3/4", lamina de acero galvanizado y solera de 1/8", microcontroladores Arduino Nano y ATmega2560, motor DC con reductor JGA25-370, agitador vertical con un impulsor adaptado de tipo vortex hecho a la medida, sensor termopar tipo K, encoder rotatorio KY-040, controlador puente H L298N, *display* LCD y diversos conectores seriales, *switchs*, banda y polea dentadas, varilla lisa y roscada, cableado general de red Ethernet, coples, entre otros.

Todos los componentes modulares están controlados por un lenguaje programable en Arduino. Se obtuvieron los diagramas electrónicos del sistema embebido empleando software de acceso libre *Proteus* y *Fritzing*.

La propuesta de solución consistió en eliminar la manipulación manual de control de temperatura de una síntesis polimérica de poliacrilonitrilo a través de un sistema mecatrónico automatizado que permita mantener la temperatura de reacción en 60 ± 2 °C empleando un baño maría convencional (zona caliente) y un sistema de enfriamiento (zona fría) por aspersores de aire a presión.

Se logró el diseño y construcción de (i) una estructura de soporte con dimensiones 30 x 30 x 60 cm para colocar la fuente de suministro de calor a baño maría, un sistema de elevación y una zona enfriamiento por ventilación forzada, (ii) un sistema de sujeción del reactor y de agitación de reacción con un impulsor tipo vortex hecho a la medida, (iii) una plataforma elevadiza sobre el eje y para retirar el reactor del baño maría y llevarlo a la sección de enfriamiento de manera automatizada y conforme la temperatura de reacción y (iv) un arreglo de enfriamiento (tipo aspersor) hechos a la medida para suministro de aire frío al reactor.

Se desarrolló un programa de control en la plataforma electrónica de código abierto Arduino para la interacción con el sistema.

El presente estudio tiene como antecedentes la continuidad de un trabajo previo de desarrollo de un extrusor para hilatura en húmedo por lo que se requería establecer el módulo de proceso de síntesis polimérica para el control de la temperatura de reacción dentro de un intervalo definido.

Esta Tesis es una secuencia más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global de un sistema de hilatura integral que comprende etapas de síntesis, extrusión y estiramiento y bobinado de un filamento polimérico.

Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de síntesis enfocado al diseño, construcción, automatización y control de una cámara de control de temperatura de una reacción polimérica. Lo anterior bajo

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

Dirigido por:

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Ing. Raúl Llamas Esparza

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 HIPÓTESIS.....	5
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
II. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 POLÍMEROS.....	6
2.1.1 Características generales de un polímero.....	6
2.1.2 Mecanismos simples de polimerización, poliacrilonitrilo (PAN).....	6
2.2 REACCIONES EXOTÉRMICAS.....	7
2.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA.....	8
2.4 CÁMARAS CON SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	9
2.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AIRE FORZADO.....	10
2.6 SISTEMAS DE ELEVACIÓN.....	11
2.7 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	11
2.7.1 Microcontroladores.....	11
2.7.2 Driver de control de motores y potenciómetros.....	12
2.7.3 Componentes CNC Robótica.....	13
2.7.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE).....	16
2.7.4.1 Arduino.....	16
2.7.4.2 Proteus.....	17
2.7.4.3 Fritzing.....	18
2.8 Diseños de incubadoras, elevadores y estudios de control de temperatura: Antecedentes.....	19
III. METODOLOGÍA.....	21

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

	Pág
3.1 DISEÑOS DE LA CÁMARA Y SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.....	21
3.1.1 Diseños mecánicos.....	21
3.1.2 Diseños electrónicos.....	22
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA CON ENFRIAMIENTO AUTOMATIZADO.....	22
3.2.1 Construcción de piezas en impresión 3D.....	26
3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL.....	28
3.3.1 Cableado y terminales de conexión para protocolo de comunicación serial.....	29
3.3.2 Cableado y terminales de conexión de gabinete de distribución eléctrica o caja de poder.....	29
3.3.3 Cableado y terminales de conexión del gabinete de control del sistema embebido.....	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1 DISEÑOS DE LA CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA CON SISTEMA DE ENFRIAMIENTO INTEGRADO.....	31
4.1.1 Diseños mecánicos.....	31
4.1.2 Diseños electrónicos.....	44
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA & SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....	53
4.2.1 Fabricación de piezas en PLA.....	53
4.2.2 Fabricación de estructura de soporte, gabinetes, de control, sistema elevador vertical y sistema de enfriamiento.....	54
4.3 SISTEMA DE CONTROL.....	69
4.3.1 Comunicación serial y cableado.....	69
4.3.2 Código Arduino.....	69
V. CONCLUSIONES.....	70
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXO 1. Diseño y figuras complementarias.....	74
ANEXO 2. Código Arduino.....	79
ANEXO 3. Diagrama de flujo de funcionamiento.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Estructura en cadena del poliacrilonitrilo (copyright 123RF, autor Lebedev, A.).....	7
2 Representación de la polimerización por radicales libres del PAN.....	7
3 Reacción exotérmica: ilustración.....	8
4 Termopar tipo K (fuente: electrocrea.com).....	9
5 Termostato w1209 (fuente: arduino.com).....	9
6 Cámara microbiológica (aspecto frontal parte interna).....	10
7 Túneles de pre enfriamiento por aire forzado (fuente: mundohvacr.com.mx).....	11
8 Elevador con cuarto de máquinas.....	12
9 Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega 328 (fuente: electrocrea.com).....	13
10 Driver L298N puente H (fuente: electrocrea.com).....	13
11 Potenciómetro KY-040 Encoder Rotatorio (fuente: electrocrea.com).....	14
12 Varilla roscada 8mm x 5000mm (husillo).....	14
13 Varilla lisa 8mm x 600mm.....	14
14 Micro switch con palanca mouse touch.....	15
15 Cople rígido 5mm-8mm.....	15
16 Interruptor balancín negro XL601 125 6A.....	15
17 2GT 8mm 20 dientes polea dentada.....	16
18 Motorreductor 6v 130 RPM jGA25-370.....	16
19 IDE software Arduino.....	17
20 IDE software Proteus: motor de simulación de circuitos Electrónicos.....	18
21 IDE Fritzing: diagrama electrónico para encendido de un LED).....	18
22 Reacción polimérica de PAN: Control térmica manual reportado por Dena- Aguilar et al.....	21
23 Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro para todas las piezas (vista previa) 75g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 16h 23 min.....	26
24 Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro de Acoplador caja reductora-varilla de 8mm (vista previa): 3g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 29 minutos.....	27
25 Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro del Sujetador o base de soporte para el encoder (vista previa): 28g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 4 horas con 8 minutos.....	27

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

Figura	Pág.
26 Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro de Acoplador encoder-varilla de 8mm (vista previa): 3g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 26 minutos.....	27
27 Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro de la base del balero modelo 268 (vista previa): 17g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 2 horas con 27 minutos	28
28 Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica alzada.....	33
29 Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica 1.....	34
30 Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica lateral.....	35
31 Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica posterior.....	36
32 Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica posterior.....	37
33 Dimensiones generales del equipo completo.....	38
34 Rotulación de componentes del equipo completo: vista 1.....	39
35 Rotulación de componentes del equipo completo: vista 2.....	40
36 Sistema de enfriamiento.....	41
37 Placa porta-reactor: vista de planta.....	42
38 Base de balero de eje vertical.....	42
39 Base para encoder.....	43
40 Acoplador.....	43
41 Diagrama electrónico parte 1 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: Interfaz HDMI.....	48
42 Diagrama electrónica parte 2 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: pines de microcontrolador.....	49
43 Diagrama electrónico parte 3 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: on/off sistema.....	50
44 Diagrama electrónico parte 1 de 2 del sistema embebido de control y automatización en vista protoboart Fritzing.....	51
45 Diagrama electrónico parte 2 de 2 del sistema embebido de control y automatización en vista protoboart Fritzing.....	52
46 Piezas varias fabricada en PLA.....	54
47 Operaciones de manufactura de estructuras de soporte metálicas: corte de la lámina por choro de plasma.....	55

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Figura		Pág.
48	Ensamblado y perforado de piezas diversas.....	55
49	Ensamblado de los cortes de ángulo y los cortes de lámina.....	56
50	Ensamblado y puesta de la plataforma elevadiza.....	56
51	Ensamblado del sistema de aire forzado.....	57
52	Pre- ensamble final componentes.....	57
53	Vista frontal sistema de módulos completos: se observan panel de control, caja de poder, baño maría, sistema enfriamiento, reactor cuarto de máquinas, estructura de soporte.....	58
54	Vista posterior sistema de módulos completos: se observa la válvula de enfriamiento, torre de soporte principal, reactor, baño maría, sistema agitación del reactor.....	59
55	Vista lateral sistema de módulos completos: se observa la válvula del sistema de enfriamiento y ductos tipo aspersor.....	60
56	Vista lateral sistema de módulos completos: se observa gabinete de caja de poder, estructura de soporte y reactor en suspensión.....	61
57	Acercamiento 1 interior de zonas caliente y fría, y del reactor.....	62
58	Acercamiento 2 interior de zonas caliente y fría, y de reactor.....	62
59	Acercamiento parte superior de reactor: soporte de motor de agitación y entrada sensor de temperatura.....	63
60	Acercamiento parte inferior de reactor: agitador sensor.....	63
61	Acercamiento interior de reactor: agitador y sensor.....	64
62	Cuarto de máquinas: movimiento de elevador de porta-reactor.....	64
63	Parte inferior de la palanca pota-reactor.....	65
64	Baño maría (zona de calentamiento).....	65
65	Caja panel de control (Gabinete).....	66
66	Caja de poder (gabinete de distribución eléctrica).....	66
67	Parte superior de la placa porta-reactor.....	67
68	Válvula de control automatizado de enfriamiento.....	67
69	Ductos de entrada sistema de enfriamiento.....	68
70	Ductos internos de sistema de enfriamiento.....	68
71	Interior de gabinete de distribución eléctrica.....	74
72	Comunicación serial.....	74
73	Interior de gabinete de panel de control.....	75
74	Orificio de ductos- aspersores de enfriamiento.....	75
75	Acoplador Pla.....	76

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Figura	Pág.
76 Porta encoder PLA.....	76
77 Base para balero PLA.....	77
78 Base para porta motor de agitación de reactor PLA.....	77
79 Dimensiones cámara de control de temperatura.....	78
80 Gabinete de control (panel).....	78
81 Diagrama de funcionamiento 1 de 3.....	88
82 Diagrama de funcionamiento 2 de 3.....	89
83 Diagrama de funcionamiento 3 de 3.....	90

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Descripción completa de los elementos que integran la cámara de control.....	23
2	Interfaz de conexiones del sistema.....	44

NOMENCLATURA

PAN	Poliacrilonitrilo.
Baño	Baño maría.
IDE	Entorno de desarrollo integrado.
PLA	Poliácido láctico (material de impresión 3D).

I. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La síntesis de poliacrilonitrilo puede llevarse a cabo mediante el método de polimerización por radicales libres en solución debido a los altos porcentajes de conversión que se obtienen.¹ Sin embargo, si no se controla la temperatura de reacción polimérica (1) se obtienen a menudo polímeros de bajo peso molecular, (2) se limita la rapidez con que la reacción puede llevarse a cabo disminuyendo la eficiencia de la reacción y (3) se puede afectar el mecanismo de iniciación.²⁻⁴ Aunado a lo anterior, las reacciones de polímeros llegan a ser exotérmicas debido a que se genera calor de formación que propicia un aumento más rápido de la temperatura de síntesis y por tanto resultan ser más difíciles de controlar térmicamente.⁵ Dena-Aguilar *et al.* reportan condiciones de operación de síntesis de homopolímero de poliacrilonitrilo (PAN) y otros copolímeros de PAN empleando temperaturas de trabajo de 60 y 65 °C y donde emplearon un procedimiento manual para el control térmico mediante un baño maría y un baño maría inverso para el suministro de calor y frío respectivamente.⁶

En el laboratorio de Conversión de la Energía adscrito al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga se desarrollan proyectos relativos a la síntesis de copolímeros de poliacrilonitrilo para sus posibles aplicaciones en la industria textil. Dentro de este contexto, se contempla la síntesis de homopolímero de PAN para la fabricación de fibras poliméricas de acabado textil.

Considerando lo anterior, se plantea el presente trabajo de Tesis para poder diseñar y construir un sistema mecatrónico automatizado que permita suprimir el control manual y establecer un mejor control térmico de una síntesis polimérica de PAN conforme la temperatura de reacción.

La metodología general de síntesis y de control térmico empleado por Dena-Aguilar *et al.* consiste en: (i) se coloca agua (como medio de solución) en un reactor de 3 bocas de 1L y es precalentada por medio de baño maría hasta 50 °C, se establece una agitación constante y posteriormente se añaden los iniciadores; (ii) enseguida se agrega el monómero de acrilonitrilo; (iii) conforme avanza el crecimiento de cadenas poliméricas se va obteniendo un aumento de la masa de reacción y un polímero más viscoso y a su vez se va generando calor de formación que aumenta la temperatura de la reacción gradualmente; (iv) al superar la temperatura de trabajo, de 60 °C, en más de 5 grados, se aplica un baño maría inverso al reactor con agua fría para mitigar el incremento de calor; (iv) el control térmico se aplica durante todo el tiempo de reacción intercambiando los baños maría y baño maría inverso cuantas veces sea necesario.

Derivado de lo anterior, se han detectado las siguientes áreas de oportunidad:

1.- Control térmico de la reacción

- Intercambiar el manejo manual del control térmico por un manejo automatizado.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

- Suprimir el baño maría inverso por un sistema de enfriamiento de tipo aspensor que proporcione aire frío al reactor de síntesis.
- Establecer un entorno alrededor del reactor mediante una cámara para facilitar el montaje del sistema automatizado.

2. - Automatización y control

- Disponer de un equipo mecatrónico que mecánicamente sujete el reactor y lo traslade del baño maría al área de enfriamiento con velocidades y tiempos de residencia controlados.
- Desarrollar una cámara de control de temperatura automatizada para mantener la temperatura de reacción en 60 ± 2 °C durante todo el tiempo de reacción.
- Automatizar el suministro de aire frío, donde este activado el suministro cuando el reactor se encuentre en la zona fría y se desactive cuando retorne a la zona caliente durante todo el tiempo de reacción y tantas veces sea necesario.

La temperatura de ebullición del monómero de acrilonitrilo es de 77 °C por lo que un control automatizado de la temperatura de reacción permitirá mantener esta variable dentro del rango deseado y lograr obtener mejores porcentajes de eficiencia reportados en el trabajo de Dena-Aguilar *et al.*, los cuales fueron <90%.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue eliminar la manipulación manual del control térmico de una reacción polimérica de PAN a través de una cámara de control de temperatura que permita trasladar el reactor de un área de calentamiento (por baño maría) hacia una zona de enfriamiento (a base de ventilación forzada) para lograr mantener la temperatura de reacción constante en 60 ± 2 °C durante todo el tiempo de reacción (aproximadamente 240 minutos).

En particular se diseñó y construyó una cámara de control de temperatura con un sistema de enfriamiento automatizado y controlado por medio de un sistema embebido. La cámara está integrada por (i) una estructura de soporte rectangular de medidas 30 x 30 x 60 cm construida con acero al carbón comercial de 3/4" y con espacio suficiente para colocar un termoagitador sencillo (med. 15 x 20 x 12 cm) empleado para el baño maría; (ii) sistema de traslación del reactor por medio de una plataforma elevadiza (medidas 18 x 25 cm) accionada por un motor de engranajes de impresora convencional con sistema de sujeción (pinza sencilla para bureta adaptada); (iii) sistema de enfriamiento por aire a presión mediante un arreglo de tuberías de policloruro de vinilo clorado de 1/2" en forma de aspersores con 3 orificios superiores derechos (orificios con dirección de 315° sus líneas de acción), 4 orificios del lado izquierdo inferiores (orificios con dirección de 45° sus líneas de acción) y 4 orificios del lado izquierdos (orificios con dirección de 315° sus líneas de acción), (iv) un módulo de agitación mecánica para la reacción polimérica empleando un motor DC y un impulsor tipo vortex hecho a la medida y (v) gabinetes de control externas a la cámara donde se aloja el sistema embebido de interfaz.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

Por mencionar algunos materiales, se usó acero al carbón comercial de ángulo de 3/4", lamina de acero galvanizado y solera de 1/8", microcontroladores Arduino Nano y ATmega2560, motor DC con reductor JGA25-370, agitador vertical con un impulsor adaptado de tipo vortex hecho a la medida, sensor termopar tipo K, encoder rotatorio KY-040, controlador puente H L298N, *display* LCD y diversos conectores seriales, *switchs*, banda y polea dentadas, varilla lisa y roscada, cableado general de red Ethernet, coples, entre otros.

Todos los componentes modulares están controlados por un lenguaje programable en Arduino. para el control térmico mediante el traslado del reactor de una zona de suministro de calor hacia un área de enfriamiento para mantener la temperatura de reacción en 60 ± 2 °C.

Se obtuvieron los diagramas electrónicos del sistema embebido empleando software de acceso libre *Proteus* y *Fritzing*.

La presente propuesta de intercambiar la manipulación manual del control térmico por un sistema automatizado permitirá obtener porcentajes de eficiencia superiores al 90% y mantener la temperatura de reacción establecida de 60 ± 2 °C.

El presente trabajo tiene como antecedentes la metodología de síntesis reportado por Dena-Aguilar *et al.* (2011).⁶

Esta Tesis es una continuidad más extensiva y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue realizado de manera grupal. Por lo que se establecieron nuevas metas y objetivos más pertinentes para lograr conformar un proyecto de titulación integral a través de Tesis.

Este trabajo es parte de un proyecto global de un sistema de hilatura integral que comprende etapas de síntesis, extrusión y estiramiento y bobinado de un filamento polimérico. Por lo que este estudio se desarrolló de manera grupal por los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. Por tanto, los productos entregables de los participantes comparten las mismas secciones básicas del documento de Tesis con la diferencia de los resultados logrados en módulos de proceso diferentes.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de síntesis enfocado al diseño, construcción, automatización y control de una cámara de control de temperatura de una reacción polimérica. Lo anterior bajo autorización y aprobación de la Academia de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y construir una cámara de control de temperatura mediante un sistema mecatrónico automatizado para mantener la temperatura de una reacción polimérica exotérmica dentro de un rango de 60 ± 2 °C.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar mecánicamente la cámara de control de temperatura mediante software de diseño para definir dimensiones, componentes y funcionamiento del sistema.
- Construir la cámara de control de temperatura mediante el uso de materiales de fácil adquisición para la integración de componentes de control y automatización del sistema de control térmico.
- Diseñar los diagramas electrónicos mediante software de automatización de acceso libre *Proteus* y *Fritzing* para validar el funcionamiento del sistema embebido previo a su construcción.
- Construir el sistema embebido de *open source* en Arduino mediante la integración de elementos de hardware y electrónica modular para desarrollar el sistema de control (código de programación) de la cámara de control de temperatura.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la industria textil, las fibras acrílicas, como las de PAN, son fibras sintéticas que en forma de hilo son empleadas en un gran número de productos textiles como colchas, tapetes, guantes, entre otros. Por lo que se considera que estas fibras tienen posibilidades de aplicación en sistemas de fuentes alternas de energía debido a que su aspecto es similar a la lana natural, pero son de mayor suavidad y de mantenimiento más simple.

La fabricación de fibras de PAN inicia con la etapa de síntesis que puede realizarse empleando un método de polimerización en solución por radicales libres que se caracteriza por tener un crecimiento de la masa y viscosidad del polímero conforme se genera calor de formación que provoca que la temperatura de reacción se incremente de tal forma que reduce el porcentaje de eficiencia de la misma.

Una metodología de síntesis reportada en trabajos de referencia consiste en utilizar un reactor que se sumerge parcialmente en un baño maría que permite suministrar el calor inicial para propiciar el inicio de la síntesis. Conforme se incrementa la viscosidad o un aumento de la masa de reacción del polímero se va generando calor de formación que provoca que la temperatura se incremente súbitamente provocando una reducción de la eficiencia de reacción debido a que se alcanzan valores térmicos de ebullición del monómero. Para lograr mitigar el aumento de la temperatura se sumerge el reactor en un baño maría inverso de agua fría. Esta operación de traslado del reactor de un baño maría a un baño de agua fría se realiza de manera manual durante todo el tiempo de reacción.

Debido a que el control térmico manual es altamente dependiente de la asistencia del operador se requiere de un sistema de control de temperatura automatizado que realice la función de trasladar el reactor de un área de suministro de calor por baño maría hacia una zona de enfriamiento por aire forzado durante todo el tiempo de reacción y así evitar que la temperatura determinada no difiera de un rango de valor de 60 ± 2 °C.

Por lo que resulta necesario el poder implementar acciones de control de temperatura a través de mecanismos automatizados mecatrónicos para realizar el traslado del reactor de una zona caliente hacia un área fría para evitar la dependencia de la asistencia del operador.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

En este proyecto se contempla, como una de estas acciones, el diseño y construcción de una cámara de control de temperatura controlada por medio de un sistema embebido integrado por módulos de suministro de calor, traslación vertical del reactor, suministro de aire frío, agitación mecánica de reacción e interfaz de control. Todos los elementos fueron controlados por software y hardware de acceso libre Arduino. El estudio se prevé para su aplicación en una operación de síntesis polimérica de PAN, sin embargo, las pruebas preliminares de funcionalidad se realizaron empleando agua en pre-ebullición como “blanco” de control.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible diseñar y construir una cámara de control de temperatura automatizada para mantener la temperatura de reacción en un valor de 60 ± 2 °C durante todo el tiempo de reacción de una síntesis polimérica de PAN.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

El alcance del proyecto solo abarca el diseño y construcción de la cámara de control de temperatura prevista de una estructura de soporte, área de suministro de calor, área de enfriamiento y sistema de traslado.

La cámara de control de temperatura tendrá un sistema de control (a base de software embebido Arduino) para trasladar el reactor de un área caliente a una zona fría, y viceversa, durante todo el tiempo de reacción conforme la temperatura de la reacción.

Esta fuera de alcance del proyecto la validación de la cámara construida con respecto a la cantidad de polímero obtenido de una síntesis polimérica.

Esta fuera de alcance desarrollar pruebas experimentales robustas con la síntesis de PAN.

Las pruebas de funcionalidad solo se basaron en la respuesta de la cámara para controlar la temperatura de agua en pre-ebullición.

Ninguna transferencia de tecnología es promovida.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

Los polímeros son considerados macromoléculas debido a que son de gran tamaño y están constituidos por grandes cadenas de moléculas enlazados como eslabones. Los polímeros se obtienen de moléculas más sencillas llamadas monómeros, los cuales están unidos mediante enlaces covalentes. Los polímeros tienen una matriz formada por átomos de carbono y pueden contener enlazados a ellos grupos funcionales laterales o radicales con uno o más átomos de otros elementos. Los polímeros constituyen los materiales plásticos de uso habitual.⁷

2.1.1 Características generales de un polímero

Entre otras características, podemos mencionar su capacidad de poder ser procesados en diferentes formas por su bajo punto de fusión, son ligeros por su baja densidad, permiten ser empleados como aislantes por su pobre conductividad eléctrica, algunos son termoestables o termoplásticos por sus respuestas diferentes a la acción de la temperatura y tienen poca reactividad una vez en su estado final.⁸

2.1.2 Mecanismos simples de polimerización y poliacrilonitrilo (PAN)

Los métodos de polimerización más comunes pueden ser por adición, condensación o por radicales libres en solución.^{7,9} La polimerización por adición se presenta cuando el monómero forma parte de la cadena del polímero sin pérdida de átomos donde no se generan subproductos. La polimerización por condensación ocurre cuando el monómero pierde átomos al formar parte de la cadena principal del polímero y por tanto se generan subproductos. La polimerización por radicales libre se presenta cuando un radical obtiene una actividad iniciadora que permite que moléculas de monómeros se vayan adicionando a la cadena principal. Al momento de perder esta actividad radical se detiene el crecimiento de la cadena.

En particular, el poliacrilonitrilo (PAN), ha sido sintetizado por métodos de polimerización por radicales libres.¹⁰ Siendo el PAN de especial interés dentro de la industria textil por sus capacidades de conformarse en fibras textiles o ser componente de varios copolímeros de importancia como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) que es ampliamente en la industria de la impresión en 3D. El PAN durante su síntesis, se conforma por la unión de varias cadenas de su monómero de acrilonitrilo.¹¹ En la Figura 1, se presenta un esquema del PAN donde las moléculas más pequeñas representan los átomos de hidrogeno (H), las de tamaño mediano con ligadura sencilla (color gris) representan los átomos de carbono (C) y las moléculas con triple ligadura (color azul) los átomos de nitrógeno (N). En la Figura 2, se muestra el proceso de polimerización del PAN donde el monómero se polimeriza por radicales libres para dar paso a la formación del polímero.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

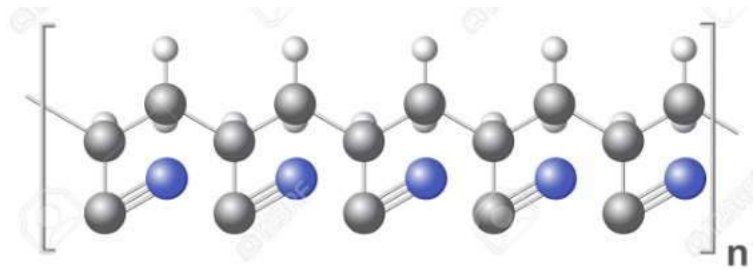


Figura 1. Estructura en cadena del poliacrilonitrilo (copyright 123RF, autor Lebedev, A.).



Figura 2. Representación de la polimerización por radicales libres del PAN.⁸

2.2 REACCIONES EXOTÉRMICAS

Una reacción química exotérmica se caracteriza por la liberación de calor durante su desarrollo pudiendo ser de tal grado que ocasione una pérdida del control del proceso y en ciertos casos puede acarrear a situaciones peligrosas dependiendo de la velocidad de la reacción, la cantidad de calor generada, la capacidad del equipo para eliminar el calor y la posible generación de gases. Este proceso se le conoce como un descontrol térmico de reacción caracterizado por un aumento de la temperatura que puede provocar un aumento de la velocidad de la reacción. Típicamente este aumento de temperatura exotérmica puede ser controlado por un adecuado sistema de refrigeración.¹²

En una reacción polimérica provoca obtener polímeros de bajo peso molecular, disminuir la eficiencia de la reacción o afectar el mecanismo de iniciación.²⁻⁴

En la Figura 3, se ilustra un esquema representativo de una reacción exotérmica convencional.



Figura 3. Reacción exotérmica: ilustración.¹³

2.3 CONTROLADORES DE TEMPERATURA

Son instrumentos que permiten controlar la temperatura de un sistema sin intervención intensa de un operador. Para su funcionamiento requieren el empleo de un sensor de temperatura que proporciona valores de entrada al controlador para después emitir una señal de salida hacia un elemento de salida de regulación de temperatura. Su principio de funcionamiento es muy simple, pues únicamente compara los valores reales de entrada contra los valores de ajuste programados y envía señales de ajuste a los elementos de control. Entre los elementos de entrada se emplean comúnmente los termopares, ver Figura 4. Entre los elementos de salida se pueden mencionar calentadores o ventiladores.¹⁴

Se reconocen diferentes tipos de controladores de temperatura: (1) encendido-apagado (on-off), (2) proporcional y (3) PID (Proporcional con Integral y Derivada). Los primeros son los más simples pues encienden o apagan el elemento de salida según la temperatura de ajuste programada; los segundos eliminan el proceso on/off debido a que únicamente disminuyen la potencia de entrada hasta acercarse al valor de ajuste sin llegar al mismo para mantener una temperatura estable; los últimos son los más precisos y estables ya que trabajan con algoritmos para determinar el error entre un valor medido y uno deseado, lo que lo hace muy útil para sistemas de masa relativamente pequeña o los que reaccionan rápidamente con el cambio de temperatura.¹⁴ Un termostato es un instrumento de detección de temperatura compuesto por un simple interruptor on/off, el cual se adapta a una resistencia para evitar su sobrecalentamiento, ver Figura 5.¹⁵

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado



Figura 4. Termopar tipo K (fuente: electrocrea.com).



Figura 5. Termostato W1209 (fuente: arduinove.com).

2.4 CÁMARAS CON SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

Son equipos de diferente tipo que crean un ambiente de temperatura o humedad controlada para un fin específico. Entre las más conocidas podemos citar las cámaras neonatales, las cuales regulan la temperatura dentro de su cabina para mantener calientes a recién nacidos que requieren cuidados intensivos.¹⁶ Las cámaras microbiológicas son equipos cerrados y herméticos con dispositivos integrados capaces de regular la temperatura y otras condiciones para el desarrollo de cultivos microbiológicos y pueden ser de medidas diferentes. Las de nivel laboratorio son cámaras previstas con una puerta de cristal para su operación, ver Figura 6.¹⁷ Las cámaras incubadoras comerciales son las de mayor volumen por sus aplicaciones en la producción comercial de alimentos como huevos o la cría de aves.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

La característica común de los diferentes tipos de incubadoras es que son equipos que permiten un control automatizado y continuo de temperatura y otras condiciones mediante termostatos, temporizadores y sistemas de circulación de aire forzada.¹⁸



Figura 6. Cámara microbiológica (aspecto frontal parte interna).

2.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR AIRE FORZADO

Es un método que necesita crear un gradiente de presión para hacer pasar el flujo de aire a través de los conductos de ventilación y ocasionar un contacto directo entre el aire el aire frío y el producto caliente provocando un enfriamiento rápido y uniforme. Este proceso rápidamente enfría productos calientes debido a la alta transferencia de calor que ocurre. El enfriamiento por aire forzado se emplea para una amplia gama de enfriamiento de mercancías como los alimentos. El tamaño del sistema de enfriamiento por aire forzado es dependiente del caudal volumétrico de aire frío requerido y el diámetro del producto.¹⁹ En la Figura 7 se muestran túneles de pre enfriamiento por aire forzado.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado



Figura 7. Túneles de pre enfriamiento por aire forzado (fuente: mundohvacr.com.mx).

2.6 SISTEMAS DE ELEVACIÓN

Un sistema de elevación de tipo ascensor (elevador) son dispositivos que permiten el movimiento vertical (generalmente) de personas u objetos dentro de un eje ubicado en un edificio de varios niveles (pisos) de altura. Se reconoce de tipo hidráulico, de tracción con cuarto de máquinas y de tracción sin cuarto de máquinas. En particular, los elevadores con cuarto de máquinas se caracterizan por tener el motor de elevación en la parte superior del elevador ofreciendo ventajas de mantenimiento sin detener el servicio prestado. En la Figura 8, se observa un esquema de un elevador con cuarto de máquinas.²⁰

2.7 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Diversos elementos de electrónica modular se pueden integrar a una cámara de control de temperatura para lograr un movimiento vertical de una plataforma elevadiza que permita el traslado de un reactor de síntesis polimérica de una zona caliente a una zona fría. Siendo importante el desarrollo o uso de una interfaz o un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permita controlar y comunicar los diversos elementos de control y automatización.

Dentro de estos elementos podemos mencionar:

2.7.1 Microcontroladores

Son dispositivos controladores que permiten controlar multitudes de elementos periféricos. Entre los más comunes encontramos los microcontroladores Arduino y Raspberry Pi, ambos se distinguen por ser plataformas de código abierto basados en hardware y software modular. De acuerdo al tipo de producto microcontrolador será el IDE que se emplea para poder programar las instrucciones que permitan dar movilidad al sistema robótico. En

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

particular, los microcontroladores pueden controlar los elementos modulares electrónicos que dan movimiento al sistema de elevación.²² En la Figura 9, se presenta una vista de una placa Arduino.

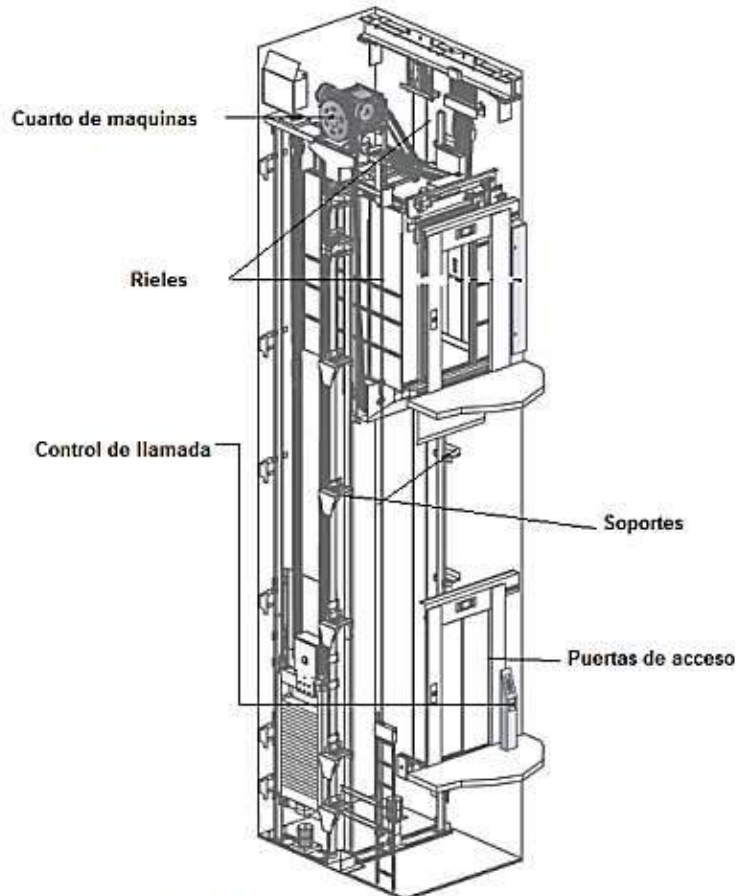


Figura 8. Elevador con cuarto de máquinas.²¹

2.7.2 Driver de control de motores y potenciómetros

Los drivers de control de motores permiten controlar la velocidad y sentido de giro de los motores, esto es, girar a en sentido horario o anti horario, así como reducir la velocidad máxima del motor. En la Figura 10, se presenta un driver L298N puente H para dos motores.

Los potenciómetros tienen la función de limitar el paso de una corriente eléctrica creando una caída de tensión que permitirá variar una señal de respuesta. Se caracterizan por ser ajustables manualmente siendo los más comunes los de tipo rotativo que permiten convertir la posición angular del potenciómetro en un valor digital o por pulsos como por ejemplo la velocidad de giro de un motor.²² En la Figura 11, se aprecia un potenciómetro KY-040 Encoder rotatorio.



Figura 9. Arduino UNO R3: microcontrolador ATmega328 (fuente: electrocrea.com).



Figura 10. Driver L298N puente H (fuente: electrocrea.com).

2.7.3 Componentes CNC Robótica

Para lograr el ensamble y dar movilidad a los múltiples componentes de un robot cartesiano o un brazo robótico se emplean componentes CNC de robótica que permiten otorgar el control de movilidad del sistema. Entre otros elementos podemos mencionar piezas como: varilla roscada que permite convertir movimiento de rotación en movimiento lineal, motores a paso o motoreductores que proporcionan fuerza y control de tracción rotatoria (giro), banda dentada para impulsión sincrónica, poleas dentadas para asegurar una transmisión constante de impulsión, *switch* de interruptor de límite de corriente, *gripper* para brazo robótico para acciones de agarre y sujeción, así como diversos elementos de unión o acople como coples, chumaceras, tuercas husillo, entre otros. De la Figura 12 a la 18 se presentan esquemas de algunos de los componentes antes descritos donde todas las imágenes fueron tomadas de *electrocrea.com*.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 11. Potenciómetro KY-040 Encoder Rotatorio (fuente: electrocrea.com).



Figura 12. Varilla roscada 8mm x 500mm (husillo).



Figura 13. Varilla lisa 8mm x 600mm.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 14. Micro switch con palanca mouse touch.



Figura 15. Cople rígido 5mm-8mm.



Figura 16. Interruptor balancín negro XL601 125v 6A.



Figura 17. 2GT 8mm 20 dientes polea dentada.



Figura 18. Motorreductor 6v 130 RPM JGA25-370.

2.7.4 Entorno de desarrollo integrado (IDE)

Un entorno de desarrollo integrado (IDE) es un entorno (ambiente) de programación de aplicación que consiste en un editor de código (lenguaje) de programación, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica. Los IDE pueden ser compatibles con las ya existentes o trabajar por si sola.²³

Existen IDE de automatización como la plataforma Arduino.

2.7.4.1 Arduino

Arduino es una compañía que cuenta con su propia plataforma de código abierto para emplear hardware y software de electrónica modular de manera simple. Arduino es capaz de gobernar dispositivos mediante

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

instrucciones a través de placas de microcontroladores. Arduino crea y utiliza su propio lenguaje de programación basado en lenguaje Wiring.²⁴ En la Figura 19, se observa una captura de pantalla propia al abrir el IDE de Arduino.

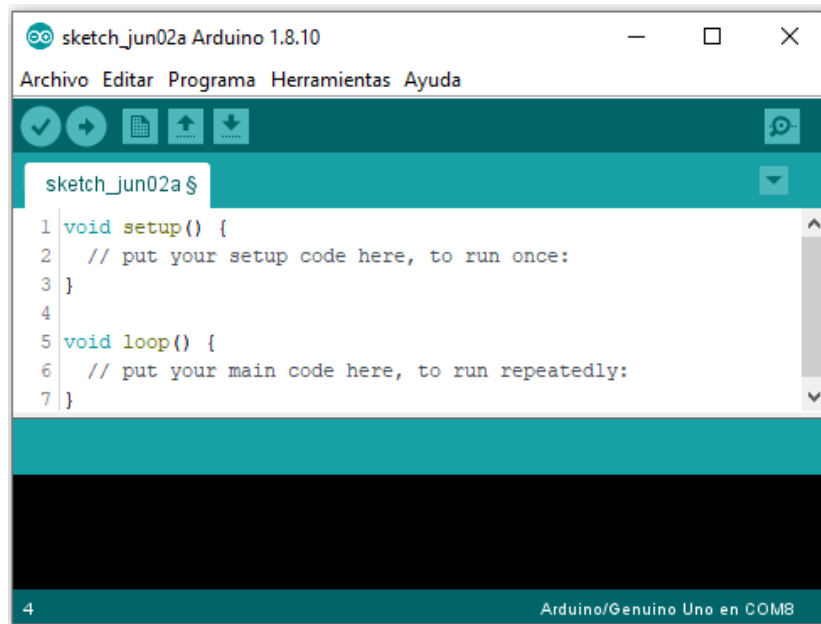


Figura 19. IDE software Arduino.

2.7.4.2 Proteus

Proteus es un IDE que libre acceso empleado para el desarrollo de esquemas electrónicos, construcción de la placa de circuito impreso, simulación de todo el conjunto, depuración de errores, documentación y construcción. Adicionalmente y, a la par de la realización de los diseños y esquemas electrónicos, se pueden realizar simulaciones para validar el correcto funcionamiento del sistema creado.²⁵ En la Figura 20, se muestra una captura de pantalla propia del IDE de *Proteus* con un esquema eléctrico y una simulación cargada para observar el comportamiento del circuito y cómo reaccionarían las señales digitales por medio de un osciloscopio.

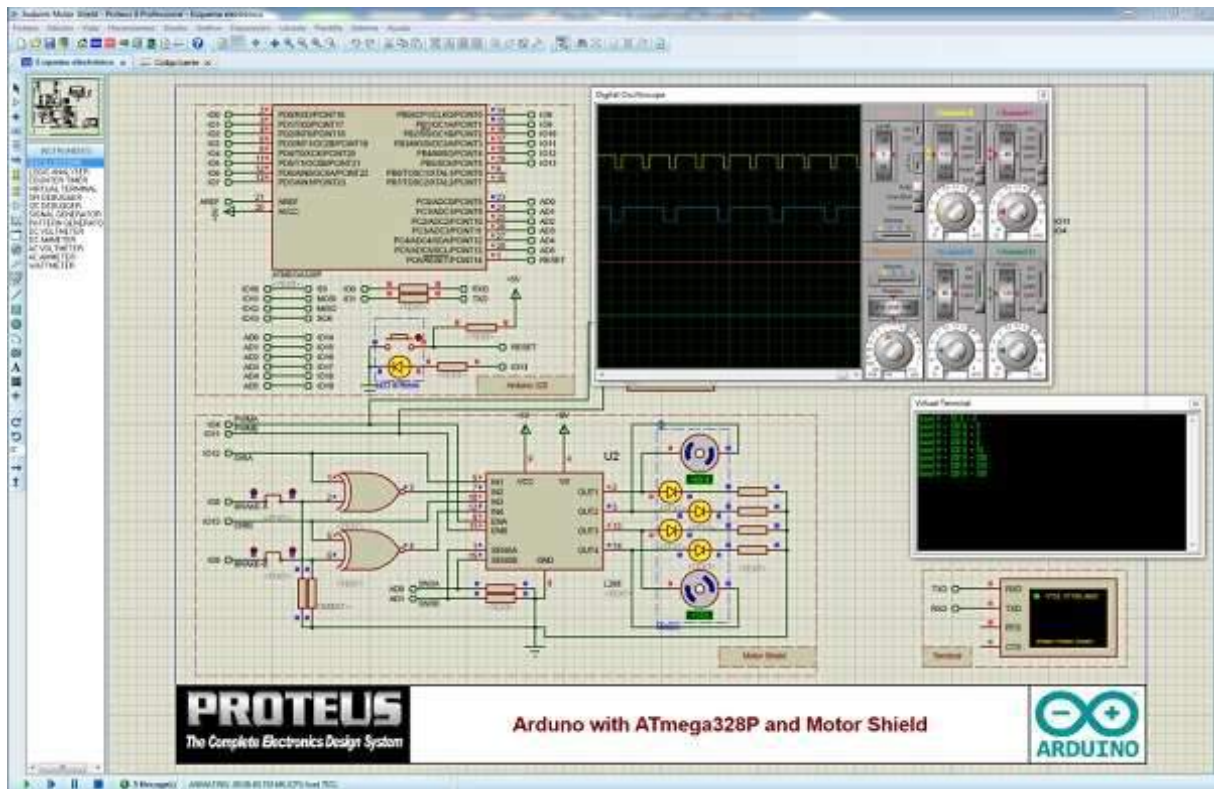


Figura 20. IDE software Proteus: motor de simulación de circuitos electrónicos.

2.7.4.3 Fritzing

Es un IDE de libre acceso de automatización para diseño electrónico. Puede configurarse con la plataforma Arduino o Raspberry Pi para crear entornos electrónicos y validar su funcionamiento previo a su ensamble real.²⁶ En la Figura 21, se muestra un diagrama electrónico de encendido de un Led obtenido por Fritzing.

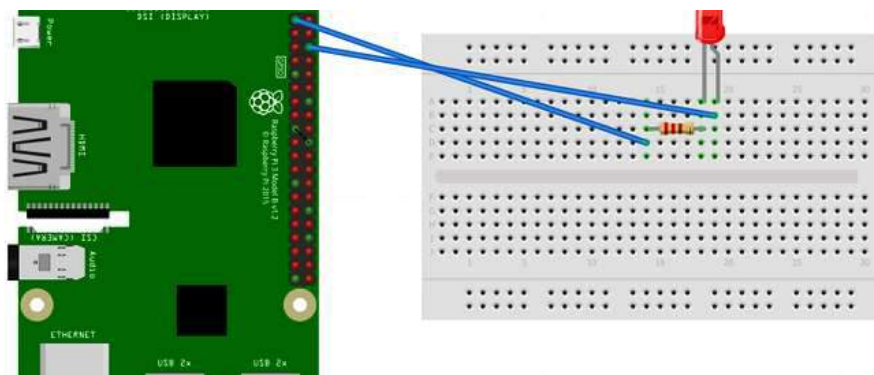


Figura 21. IDE Fritzing: diagrama electrónico para encendido de un led.

2.8 DISEÑOS DE INCUBADORAS, ELEVADORES Y ESTUDIOS DE CONTROL DE TEMPERATURA: ANTECEDENTES

Dentro del campo de los sistemas de elevadores verticales se puede mencionar que son empleados en edificios para el traslado de pasajeros u objetos entre los pisos del inmueble. Yoneda., K. *et al.* (1991) presentan una patente donde plantean resolver por medio de un desarrollo automatizado el poder disminuir el tiempo de espera del usuario para ser atendido. Entre los tiempos problema que detectaron son los tiempos de arribo al piso de origen (7 s), 2.5 g en abrir la puerta, de 2-12 s en ingreso y salida de pasajeros y 3 s en cerrar la puerta. Proponen un sistema de control que simplifique el control de los dispositivos del desplazamiento del elevador. El trabajo anterior, asemeja el control de un dispositivo por Arduino, el cual puede presentar también tiempos de espera del usuario para ejecutar sus instrucciones. Debido a lo anterior se visualiza que un sistema combinado de elevación y control de temperatura implique más de un microcontrolador para su control.²⁷

Por otro lado, dentro del área de las tecnologías de incubación, podemos mencionar los trabajos presentados por W.-Dryden. (1953) quien patenta el diseño de una incubadora con control automático de temperatura a través de termostatos de bulbo seco para mantener la temperatura del equipo entre 35.8 y 36.1 °C. Como medio de circulación de aire emplean un ventilador accionado por un termostato de bulbo húmedo.²⁸ El trabajo patentado por Swan *et al.* (1992) consiste en el diseño de una incubadora de laboratorio provista de un sensor de temperatura LM35C y una pantalla LED para visualizar la temperatura interna de la cámara.²⁹ Hugh (2003) patenta un controlador atmosférico de una incubadora para fines de cultivo de especímenes biológicos. Como sensor de temperatura emplea un dispositivo electrónico sensible a la temperatura (termistor) de ± 0.2 °C conectado a un microprocesador.³⁰ Sansomboonsuk *et al.* (2011) presentan un trabajo donde diseñan una incubadora de escala pequeña para la incubación de huevos donde la temperatura de trabajo se define en 37 ± 1 °C. Para el monitoreo de la temperatura emplean un sensor termopar tipo K. Para el enfriamiento utilizan un ventilador para evitar que la temperatura interna se eleve.³¹ Shittu *et al.* (2017) desarrollan una incubadora para huevos de pollo donde emplean un sensor DHT11 para monitorear la temperatura de trabajo en 37-38 °C y emplean un ventilador para mantener homogénea la temperatura en la cámara.³²

Dentro de este panorama y relativo a controles de temperatura, Lledo-Sánchez (2012) enseñan su trabajo de Tesis de un sistema de control de domótica empleando un sensor de temperatura DTH11 con Arduino para tomas de lecturas de temperatura en un espacio.³³ León-Arguello y Ramos-Bermeo (2015) presentan una Tesis donde desarrollan un sistema embebido a base de Arduino para la lectura de temperaturas en el interior de incubadoras de pollos. Emplean un sensor DHT22 para recabar datos en tiempo real y suprimir la toma manual realizada por el trabajador.³⁴ Caiza-Chimarro (2016) supervisan el control de temperatura en invernaderos de cultivos de alimentos empleando la placa Arduino con un sensor de temperatura DTH11.³⁵ Sami *et al.* (2017) reportan un trabajo de control de la velocidad de un ventilador basado en la temperatura de un espacio cerrado utilizando un microcontrolador Arduino Uno. Utilizan un sensor de temperatura LM 35 conectado al

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

microcontrolador para enviar las señales de velocidad que adoptara el ventilador.³⁶ Kaushik *et al.* (2018) muestran un estudio para controlar la velocidad de un ventilador usando sensores de temperatura y microcontrolador Arduino según el medio ambiente de alrededor. Emplean un sensor de temperatura DHT22.³⁷

III. METODOLOGÍA

3.1 DISEÑOS DE LA CÁMARA Y SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

El origen de la cámara, parte de resolver la problemática del control térmico manual reportado Dena-Aguilar *et al.*,⁶ durante la síntesis polimérica de PAN, ya que es una reacción química de naturaleza exotérmica que incidía en la pérdida de materia prima por evaporación y que requería un gran tiempo de inversión en la operación manual de asistir el control térmico. En la Figura 22 se muestra el control manual que Dena-Aguilar *et al.*⁶ llevaban a cabo: (1) baño maría inverso (agua fría), (2) termómetro-control de temperatura, (3) motor de agitación, (4) reactor de 3 bocas, (5) baño maría (agua caliente). Cada ocasión que la temperatura de reacción se incrementaba, el operador traslada todo el sistema del baño maría al baño maría inverso, y viceversa, durante todo el tiempo de reacción.



Figura 22. Reacción polimérica de PAN: control térmico manual reportado por Dena-Aguilar *et al.*

3.1.1 Diseños mecánicos

Todos los diseños elaborados para la cámara de control de temperatura y el sistema de enfriamiento integrado fueron elaborados empleando el software de diseño CAD 3D SolidWorks versión 2016.

La cámara se diseñó bajo un concepto de ascensor vertical, donde una estructura de soporte alberga todos los elementos de la cámara: (i) zona caliente a baño maría, (ii) zona fría por ventilación forzada, (iii) una placa elevadiza porta-reactor para desplazar el reactor de la zona caliente a la fría, (iv) sistema embebido (sensores,

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

actuadores, robótica CNC, otros) y (v) un sistema de agitación adjunto al reactor. Para el sistema de enfriamiento por aire forzado se diseñó un arreglo tipo aspersor. Los diseños incluyen el ensamblaje del sistema de enfriamiento en la cámara en sus estructuras de soporte de montaje y ensamble para el acople de los componentes. Los diseños permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento a través de sensores, actuadores y piezas de soporte a la medida.

3.1.2 Diseños electrónicos

Para el desarrollo del sistema embebido y de los esquemas electrónicos, previo a su construcción, se elaboraron los diseños electrónicos empleando los softwares de automatización de diseño electrónico *Proteus* y *Fritzing* en su versión libre. Con estas herramientas se generaron vistas de simulación de los sistemas embebidos para validar su funcionamiento.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA CON ENFRIAMIENTO AUTOMATIZADO

El sistema completo comprende de las siguientes secciones primarias:

- **Estructura de soporte (esqueleto).** Se construye a base de acero al carbón comercial de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada empleando diversos materiales.
- **Estructura de soporte (integración de movimiento y transmisión).** Se compone de un sistema de transmisión mecánica banda-polea que consta de una caja de reductiva y dos ensamblajes entre la barrilla roscada y la polea dentada: sistema de la plataforma elevadiza, que consta de cuatro rodamientos lineales y una placa porta-reactor de material acero al carbón; y una charola de material aluminio, donde se encuentran ductos eléctricos.
- **Sistema de aire forzado.** Consta de 19 piezas ensambladas y se construye empleando material policloruro de vinilo clorado (CPVC) de 1/2" para las tuberías y tapas: 7 tubos de diferentes longitudes, 3 tapas, 2 piezas tipo T y 1 conector macho. También se empleó 1 reducción tipo campana de 1/2" a 1/4" de acero galvanizado con entrada de conexión hembra y (f) 1 conector rápido del tipo "M" de 1/4" NPT de acero cromado.
- **Gabinete de distribución eléctrica o caja de poder.** Esta sección distribuye la energía eléctrica a todas las demás secciones. Consta de conexiones eléctricas para 5V y 12V, interruptor On-Off Negro, Mini Switch, conector serial de 25 puntos por el cual se puede dar el intercambio de las señales eléctricas y direccionamiento de estas, tipo de conector serial macho.
- **Gabinete de control del sistema embebido.** Contiene el sistema embebido diseñado y construido para la automatización y control y control de la cámara. Básicamente se compone de diversas piezas de

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

electrónica modular, procesamiento de señales e interpretación de las señales detectadas que constituyen la interfaz HMI hombre máquina.

- **Cable Extensión Serial.** Contiene un cable de comunicación serial de 25 hilos por donde se tramiten las señales entre la caja de poder y el panel de control, sus conexiones son del tipo hembra.

Para facilidad de comprensión en la Tabla 1 se presentan los componentes empleados para la construcción de cada sección del sistema. El sistema completo se integra de más de 270 componentes de electrónica modular, elementos CNC de soportería y movimiento, estructura de soporte, placa elevadiza y cableado completo. Especificando para cada sección los componentes empleados para la construcción del sistema.

Tabla 1. Descripción completa de los elementos que integran la cámara de control de temperatura.

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Estructura de soporte (esqueleto)	1	Angulo "3/4" x 60 cm, para dar forma y sujeción al esqueleto de la estructura de forma vertical	4	Acero al carbón (carb)
	2	Angulo "3/4" x 30 cm para dar forma y sujeción al esqueleto de la estructura de forma horizontal, con un corte en sus caras para su acoplamiento	4	carb
	3	Angulo "3/4" x 26 cm para dar sujeción estructural de forma horizontal.	4	carb
	4	Lamina con medidas 30 x 30 cm para la base de la estructura	1	Acero galvanizado (galv)
	5	Lamina con medidas 30 x 30 cm para la base superior de la estructura, con orificios para el paso de las barrillas y cableado	1	galv
	6	Lamina con medidas 30 x 15 cm, Frontales	4	galv
	7	Tubular cuadrado 3/4 in X 5/4 in de largo	4	carb soldable
	8	Tubular rectangular 1 3/4 in X 3/4 in x 1/4 m de largo	4	carb soldable
	9	Solera 1/8 con medidas 75 mm x 40 mm	2	Acero A-36
	10	Tubular cuadrado 1 in X 14.5 cm	2	Aluminio
	11	Lamina 1in x 28 cm	2	Aluminio
	12	Canal 635 x 3.05 Regular	2	Perfil acero para Tabla roca JE
	13	Manguera metálica Flexible/tubo 90 cm	1	galv
	14	Tornillo 1/8 x 1/2 in	12	galv
	15	Tornillo 1/8 x 1 in	4	galv
	16	Tornillo 1/8 x 1 1/2 in	2	galv
	17	Tornillo 1/8 x 2 in	24	galv

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 1. Continuación...

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Estructura de soporte (integración de movimiento y transmisión)	18	Motor reductor	1	Mixto
	19	Banda dentada modelo 2GT-6 , 54 cm de largo	1	Mixto
	20	Balero modelo 628	4	Acero
	21	Polea dentada 8mm diámetro interior, con combinación con la banda GT2	2	Aleación de aluminio
	22	Sujetador de encoder	1	PLA
	23	Acoplador encoder- varilla de 8 mm	1	PLA
	24	Acoplador caja reductora- varilla de 8 mm	1	PLA
	25	Base para balero	2	PLA
	26	KY-040 Encoder rotatorio	1	galv
	27	varilla roscada 8 mm x 60 cm	1	galv
	28	varilla roscada 8 mm x 70 cm	1	galv
	29	Varilla lisa	4	Aleación de acero inoxidable
	30	Canutillo o perfil 154 x 24 cm	2	carb soldable
	31	Canutillo o perfil 154 x 23 cm	1	carb soldable
	32	Bloque de rodamiento lineal 8mm SC8UU	4	Acero y aluminio
	33	Limit switch	2	Mixto
	34	Sensor termopar tipo K	1	galv
	35	Cable de red Ethernet LAN Rj45 categoría 6 diferentes tamaños de longitud	16	Mixto
	36	Material aislante térmico con grosor de 1"	1	Fibra de vidrio con aluminio
Sistema de aire forzado	37	Tira led azul 12 V	1	plástico
	38	Tubo 1/2 in diferentes medidas	7	CPVC
	39	Tapa de 1/2 in	3	CPVC
	40	TEE 1/2 in	2	CPVC
	41	Conector macho 1/2 in	1	CPVC
	42	Reducción tipo campana de media pulgada a un cuarto	1	galv
Gabinete de distribución eléctrica o caja de poder	43	Valvula solenoide 1/2"	1	PLA
	44	Conector rápido del tipo "M" de un cuarto de pulgada NPT	1	Acero cromado
	45	Conector hembra de presión 4 terminales	1	Plástico
	46	Cajón de lámina con medidas 87 mm X 125 mm X 145 mm	1	galv
	47	Conector serial D25 pines Hembra	1	Metal

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 1. Continuación...

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Gabinete de distribución eléctrica o caja de poder	48	Bisagras tipo libro 1 in x 1/2 in	2	Latón
	49	Protoboard medidas 8.2 x 5.5 x 0.85 cm	1	ABS
	50	Transistor Tip 41c	1	Material semiconductor
	51	Resistencia 47 Ohms	1	Cerámica
	52	Resistencia 220 Ohms	2	Cerámica
	53	Lámina 14.5 cm X 12.5 cm	1	Cobre
	54	Tornillo 1/8 in x 1/2 in	14	galv
	55	Capacitor electrolítico 33000 µF 25 V	1	Material aislante
	56	Cable red Ethernet LAN Rj45 categoría 6 diferentes tamaños de longitud	30	Cobre recubierto de aislante
Gabinete de control del sistema embebido	57	Protoboard medidas 8.2 x 5.5 x 0.85 cm	1	ABS
	58	L298N Puente H	2	Mixto
	59	Pantalla Azul LCD 20X4	1	Mixto
	60	Potenciómetro 10 K Ohms	2	Metal
	61	Interruptor push botón 2 pines 6x6x4.3mm	4	Plástico
	62	LED RGB Ánodo común	1	Plástico
	63	Arduino mega ATmega2560	1	Mixto
	64	Arduino Nano	1	Mixto
	65	Manija para estuche	1	Plástico
	66	Ventilador para PC 3 in de diámetro, 7 aspas, 12 V	1	Plástico
	67	Módulo MAX6675 para el sensor termopar	1	Mixto
	68	Resistencia de 220 Ohms	2	Cerámica
	69	Capacitor electrolítico 470 µF 10V	1	Material aislante
	70	Capacitor electrolítico 100 µF 10 V	1	Material aislante
	71	Capacitor electrolítico 100 µF 10 V	1	Material aislante
	72	Capacitor electrolítico 470 µF 16V	1	Material aislante
	73	Macocel, utilizado como material de sujeción de tarjetas electrónicas	1	Madera
	74	Cable red diferentes tamaño	39	Cobre recubierto de aislante eléctrico
	75	Placa fenólica perforada con pistas, de 7,5 cm x 4,5 cm	1	Aislante eléctrico, y cobre
	76	Interruptor push botón 2 pines 6x6x5mm	4	Plástico
	77	Protoboard med. 8.2 x 5.5 x 0.85 cm	1	ABS
	78	Cables jumper tipo macho-hembra	11	Cobre recubierto de aislante eléctrico

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 1. Continuación...

Posición	No.	Descripción	Cantidad	Material
Cable Extensión Serial.	79	Cable red Ethernet LAN Rj45 categoría 6 diferentes tamaños de longitud	1	Cobre recubierto de aislante eléctrico
TOTAL DE PIEZAS			277	

3.2.1 Construcción de piezas en impresión 3D

Se diseñaron e imprimieron piezas de soportería (bases, acopladores, sujeciones de varilla roscada y lisa, motores, switches, rodamientos y poleas) en impresora 3D. La geometría de las piezas es de diseño propio donde las dimensiones se definieron a partir de los componentes modulares CNC a utilizar. Se empleó dos tipos de impresora 3D: *Creality 3D Ender-3 Pro* y *MakerBot Replicator Z18*. Se seleccionó material de PLA por sus características de buena dureza y ligereza. De la Figura 23 a la 27 se presentan las simulaciones de las piezas diseñadas en el software propio de la impresora 3D *Creality 3D Ender-3 Pro* empleada donde se permite cuantificar la cantidad de material a emplear, el tiempo de producción y las posibles modificaciones de posición o ajuste de soportes a colocar en la pieza para dar mejor calidad a la misma.

Los diseños específicos – y sus dimensiones – de todas las piezas elaboradas en PLA se presentan en el Anexo 1. Los esquemas se presentan en vistas de dibujo técnico con cotas en unidades de milímetros.

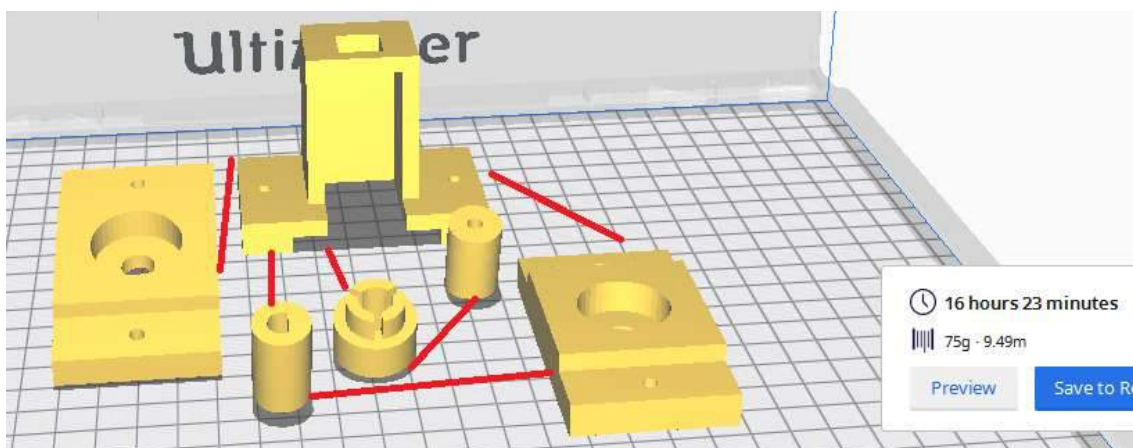


Figura 23. Simulación de la impresión 3D en *Creality 3D Ender-3 Pro* para todas las piezas (vista previa): 75 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de 16h 23 min.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

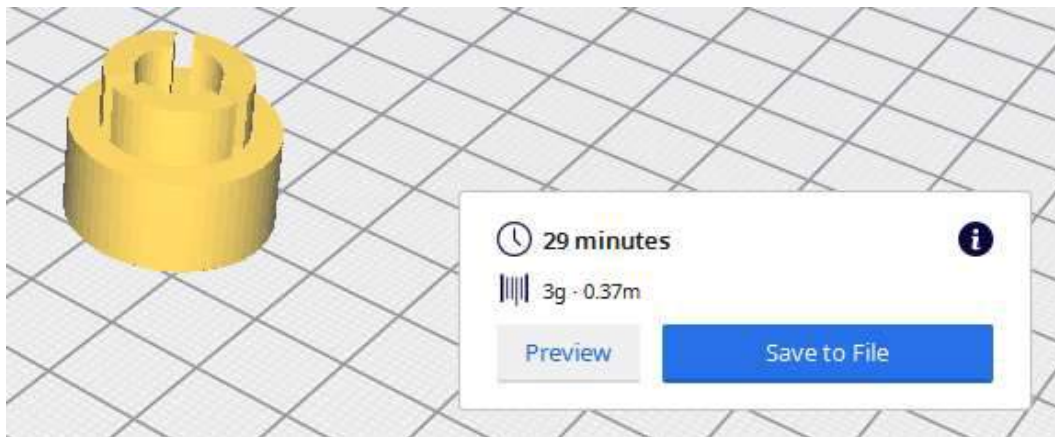


Figura 24. Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro de Acoplador caja reductora- varilla de 8 mm (vista previa): 3 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 29 minutos.

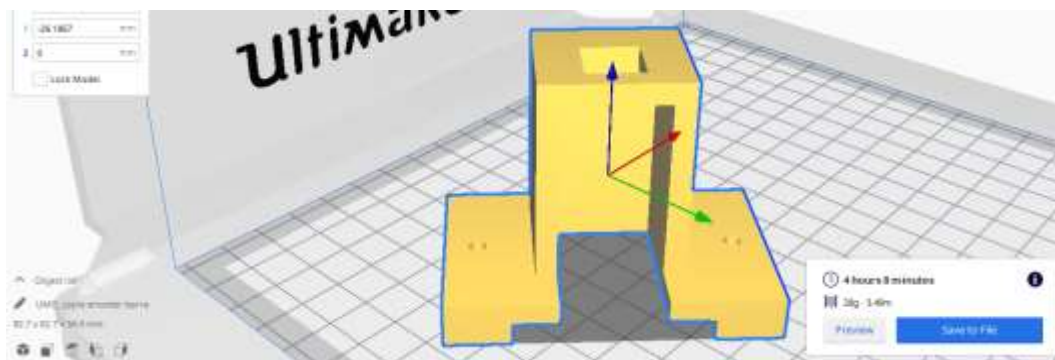


Figura 25. Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro del Sujetador o base de soporte para el encoder (vista previa): 28 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 4 horas con 8 minutos.

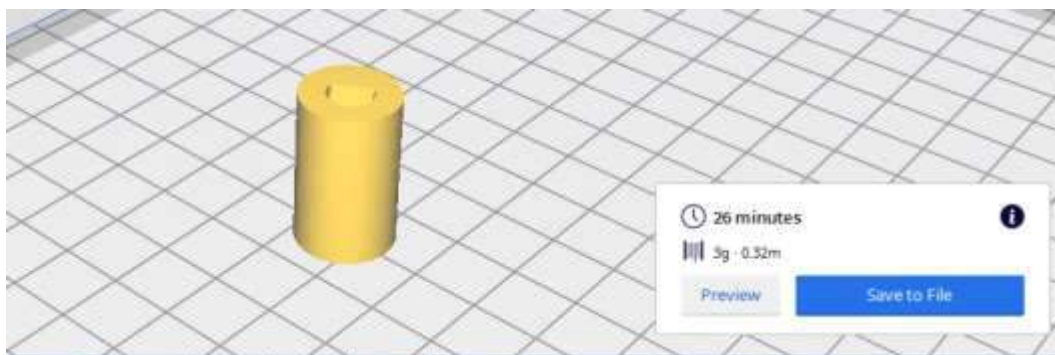


Figura 26. Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro del Acoplador encoder-varilla de 8 mm (vista previa): 3 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 26 minutos.

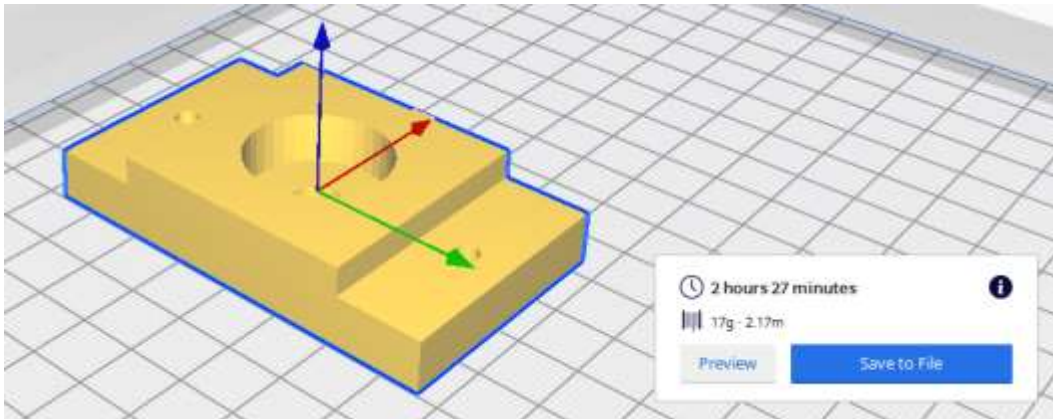


Figura 27. Simulación de la impresión 3D en Creality 3D Ender-3 Pro de la base del balero modelo 268 (vista previa): 17 g de material PLA requerido con un tiempo de manufactura de aproximado de 2 horas con 27 minutos.

3.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CÓDIGO E INTERFAZ DE CONTROL

El diseño del sistema de control se realizó con los softwares *Proteus* y *Fritzing* en su versión libre. Ambos softwares y junto a la librería de Arduino permitieron simular como funcionaria el circuito y la reacción que tendrían los componentes permitiendo analizar el funcionamiento previo a su construcción para un mejor comportamiento de respuesta de la cámara de control de temperatura.

El sistema embebido se desarrolló el software *Proteus* y *Fritzing* en la incrustación de componentes electrónicos con su respectiva conexión eléctrica, además se empleó la plataforma de *open source* en Arduino por lo que se emplearon como base las librerías de Arduino disponibles libremente en la web, pero adaptándolas bajo una estructura y sintaxis de diseño propio.

El código programado permite registrar las señales de: desplazamiento eje a través del actuador, sensado de temperatura, control de velocidad por medio de unidades modulares, cambio de modos de operación. Básicamente el programa ejecuta las instrucciones dadas por el código del programa, en cada modo de operación del sistema, interpretación de señales y direccionamiento acciones de acuerdo a la sentencia o condicionales del programa.

El código de control fue estructurado mediante la consulta de diferentes fuentes de librerías y códigos Arduino de dominio público disponibles en la web, los cuales fueron adaptados a las necesidades del sistema tales como los elementos usados, pines disponibles y material disponible.

Se consultó diversos códigos públicos disponibles en la red para programar acciones, sensado de señales físicas e interpretación permitiendo la elaboración de la interfaz hombre-máquina.

Enseguida se enuncian las fuentes de información electrónicas consultadas:

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

- <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/rotary-encoder-works-use-arduino/>
- <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/termopar-tipo-k-max6675-alarma/>
- <https://www.luisllamas.es/salidas-analogicas-pwm-en-arduino/>
- <https://www.prometec.net/interrupciones/>
- <http://placaarduino.blogspot.com/2017/03/contador-de-pulsos.html>
- <https://www.luisllamas.es/que-son-y-como-usar-interrupciones-en-arduino/>
- <http://juandgallego.blogspot.com/2017/04/compuertas-logicas-en-arduino.html>
- <https://creatividadcodificada.com/arduino/tipos-de-datos-y-operadores-en-arduino/>

3.3.1 Cableado y terminales de conexión para protocolo de comunicación serial

Se estableció una comunicación serial entre el gabinete de control del sistema embebido y el gabinete de distribución eléctrica o caja de poder empleando un sistema de cableado y conectores (terminales de conexión) adaptados para asegurar contar con los pines disponibles y los necesarios para el proyecto.

Se empleó 1 conector tipo D25 pines Macho y Hembra con el que se logró un control externo del equipo. Se decidió mantener ambos gabinetes de manera externa y a 0.5 m de distancia de la cámara por tema de seguridad de operación.

3.3.2 Cableado y terminales de conexión del gabinete de distribución eléctrica o caja de poder

El conjunto de cables de los motoredutores, encoder rotatorio KY-040, limits switch, sensor termopar tipo K y el motor del agitador fueron conducidos dentro de mangueras de metal retráctil para protección. En el gabinete de distribución eléctrica se realizaron conexiones de índole eléctrica integrada por el (a) transistor NPN, el cual sirve como interruptor de la fuente de energía de 12v, (b) interruptores balancines que permiten interrumpir la energía brindada a la tira LED, y el flujo de energía de 5v, (c) resistencias de valores 47 y 220 que reducen la corriente de los limits switch y el transistor, (d) un capacitor de 33000 μ F a 25v, el cual sirve como reserva de energía eléctrica, suavizando la alza del consumo de corriente de los motores a causa del PWM y otras señales que los controlan y (e) un protoboard grande estándar 830p, en el cual se encuentra el circuito eléctrico.

3.3.3 Cableado y terminales de conexión del gabinete de control del sistema embebido

En el panel de control se integró por: (i) un led RGB y la Pantalla LCD 20x4 como indicadores visuales, (ii) 2 piezas L298N puente H, los cuales amplifican la señal brindada por el microcontrolador Arduino Mega, (iii) una placa fenólica perforada con pistas, de 7.5 cm x 4.5 cm que sirve como punto de soporte y conexión de los push botón, (iv) 4 push button que sirven como botonera, para el control de los modos de función de la cámara, (v) Arduino Mega como principal microcontrolador de la cámara, (vi) Arduino Nano como segundo microcontrolador

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

encargado de la lectura de posicionamiento de la plataforma elevadiza, (vii) módulo de control para el termopar MAX6675, (viii) un protoboard med. 8.2 x 5.5 x 0.85 cm en el cual se encuentra el circuito principal, (ix) un protoboard med. 48 x 35 x 9 mm en el cual se encuentra el incrustado el Arduino Nano y sus conexiones y (x) cable Ethernet que permitió las conexiones entre los componentes eléctricos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DISEÑOS DE LA CÁMARA DE CONTROL DE TEMPERATURA CON SISTEMA DE ENFRIAMIENTO INTEGRADO

4.1.1 Diseños mecánicos

Para facilidad de comprensión de los diseños creados y observar una mejor nitidez de diseño, se presentan mediante acercamientos, giros y especificando la función que cumple. Los diseños de la cámara de control de temperatura y del sistema de enfriamiento permitieron su construcción sin contratiempos.

De la Figura 28 a la 32 se presentan vistas isométricas del equipo completo (cámara & enfriamiento). En cada diseño se puede apreciar, de manera general, los componentes empleados para su montaje. En la Tabla 1 se especifica un listado general de las piezas que componen cada sección.

De la Figura 33 a la 37 se muestran dibujos técnicos del equipo (cotas expresadas en unidades de mm) donde se aprecian de una forma más específica, los módulos (de las secciones primarias) que integran al sistema completo:

- **Caja de control 1 (*GABINETE DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA O CAJA DE PODER*) (*CABLE EXTENSIÓN SERIAL*) (adjunto a la estructura de soporte).** Permite el suministro de corriente de alimentación hacia todos los componentes del sistema. Consta de conexiones para 5V y 12V, un dispositivo de interrupción de corriente además de comunicación serial.
- **Caja de control 2 (*GABINETE DE CONTROL DEL SISTEMA EMBEBIDO*) (panel de control).** Es el panel de control que contiene el sistema embebido del sistema. Constituye la interfaz HMI del equipo.
- **Estructura de soporte (*ESQUELETO*).** Soportería, montaje y ensamble de todos los elementos estructurales, CNC robótica y hardware del sistema.
- **Baño maría (parilla de calentamiento).** Suministro de calor para iniciación de reacciones poliméricas.
- **Sistema de enfriamiento (válvula solenoide de automatización de entrada de aire).** Control de ingreso de aire frío al reactor cuando se encuentre en la zona superior del equipo.
- **Sistema de enfriamiento (*SISTEMA DE AIRE FORZADO*) (ductos de aspersores).** Conducción de aire frío hacia el reactor mediante orificios orientados a 45° o 315° con respecto al eje +x.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

- **Elevador vertical (*INTEGRACIÓN DE MOVIMIENTO Y TRANSMISIÓN*) (placa porta-reactor).** Sistema de elevación vertical para traslado del reactor de una zona caliente a una zona fría. Incluye sistema de sujeción de reactor.
- **Agitador mecánico (reactor).** Motor de agitación DC con agitador de impulsor tipo vortex. Proporcionar la agitación requerida a la reacción polimérica.
- **Sensor de temperatura (reactor).** Elemento medular del equipo que proporciona la señal para activar el sistema de elevación y de enfriamiento automatizado.
- **Cuarto de máquinas (*INTEGRACIÓN DE MOVIMIENTO Y TRANSMISIÓN*) (elevador vertical).** Sistema de motores de potencia para accionar el desplazamiento vertical de la placa porta-reactor.

De la Figura 38 a la 40 se presentan algunos diseños de piezas de soportería para impresión en PLA. Piezas que son empleados para soporte de motores, ejes u otros.

En el Anexo 1 se presentan demás diseños de piezas del equipo (cotas expresadas en unidades de milímetros).

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

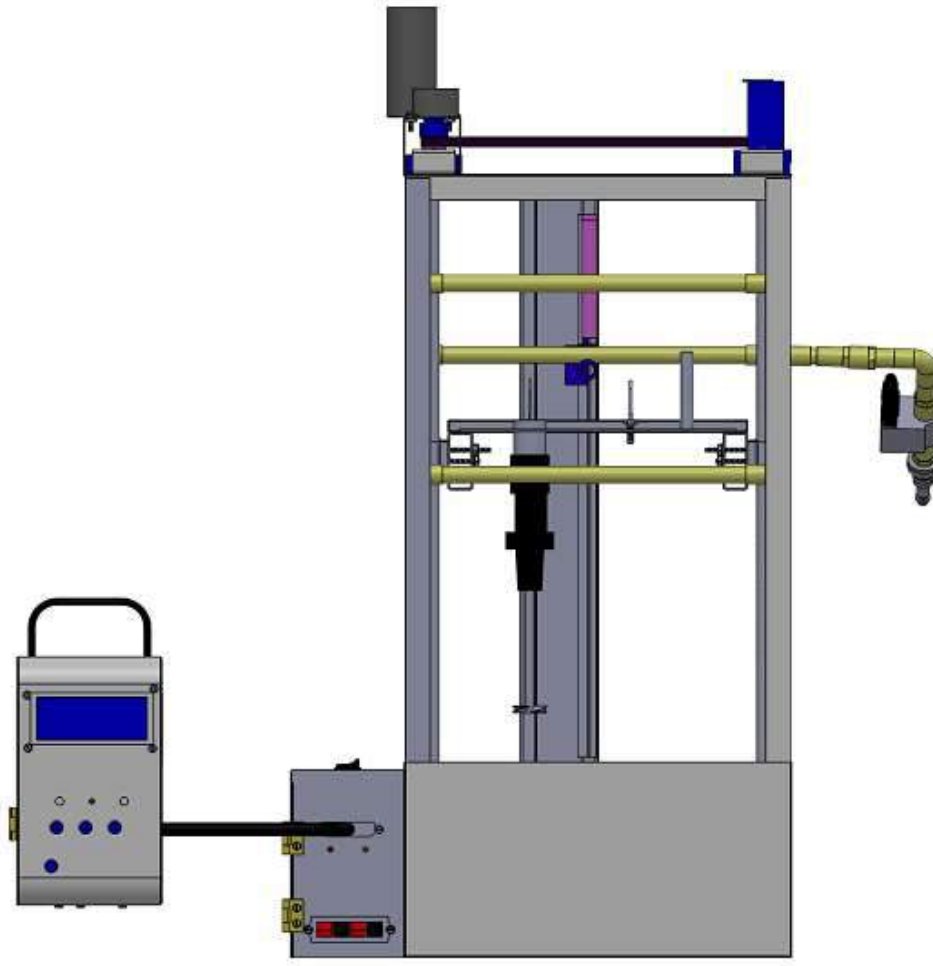


Figura 28. Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica alzada.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

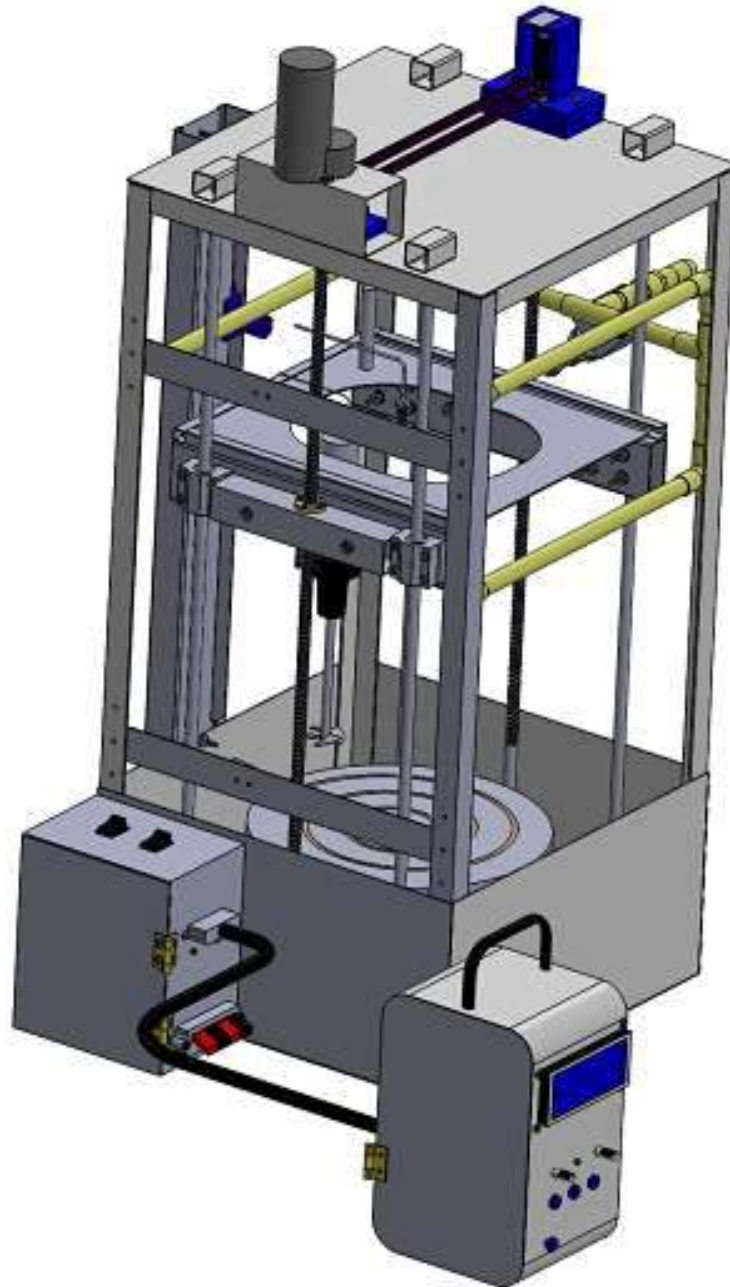


Figura 29. *Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica 1.*

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

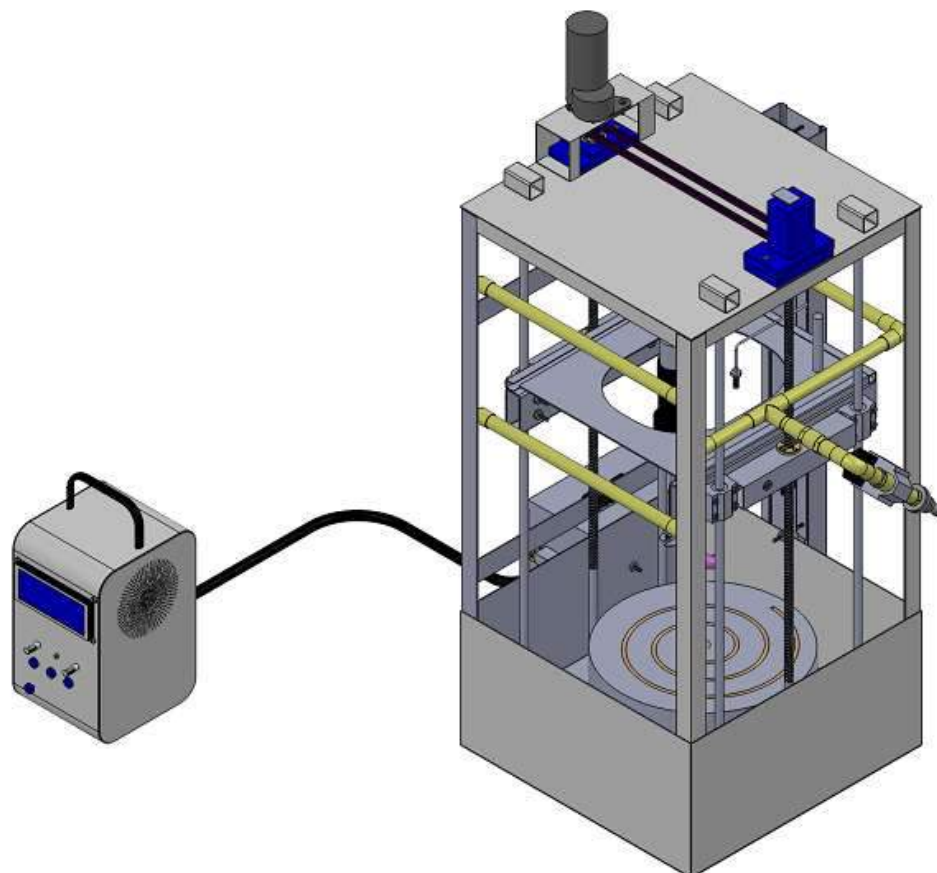


Figura 30. *Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica lateral.*

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

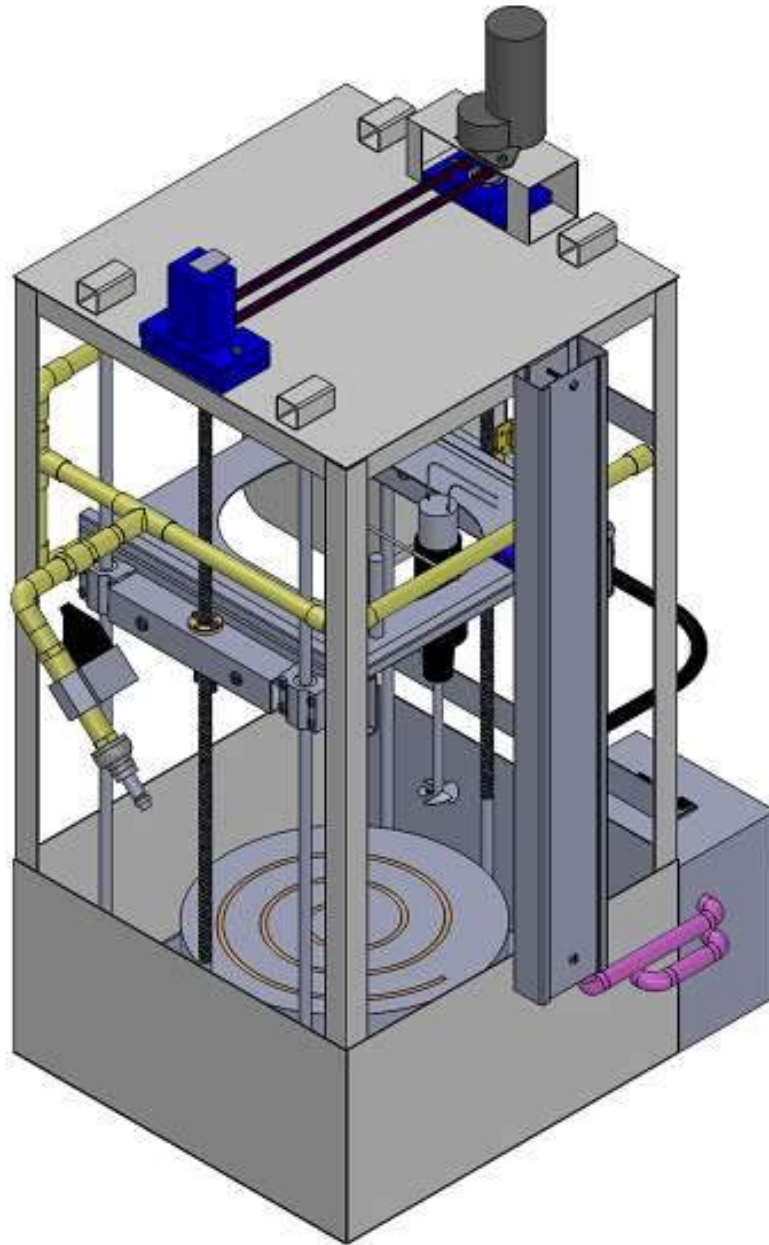


Figura 31. *Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica posterior.*

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

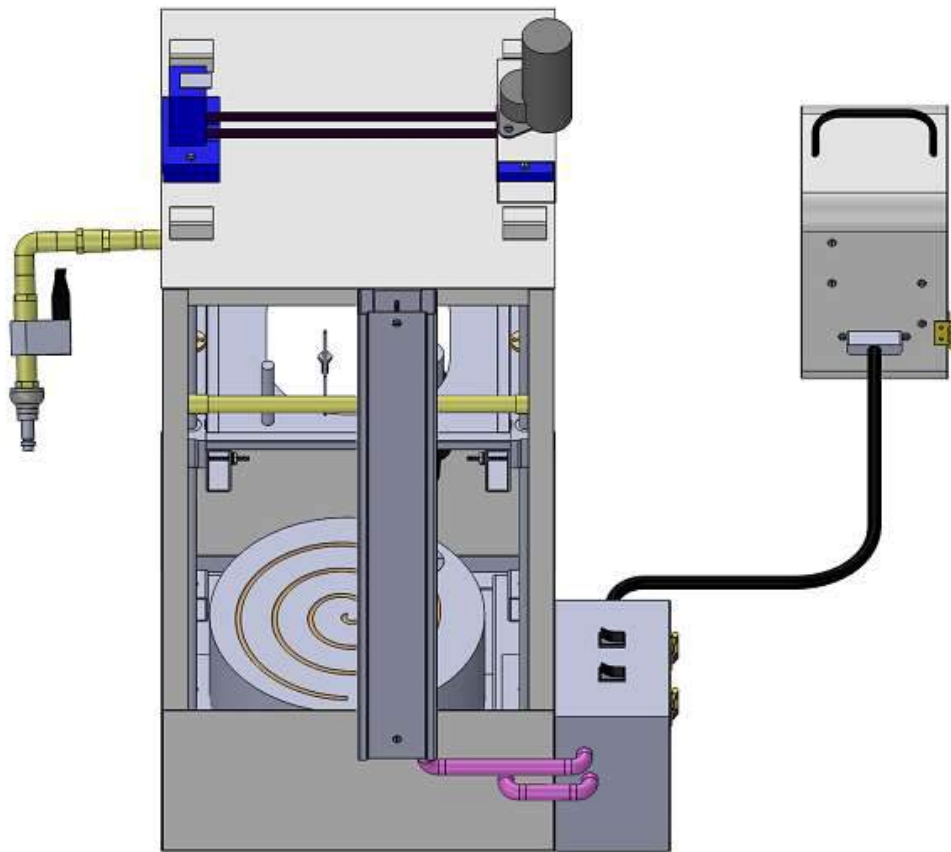


Figura 32. *Ensamble completo cámara & enfriamiento: vista isométrica planta posterior.*

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

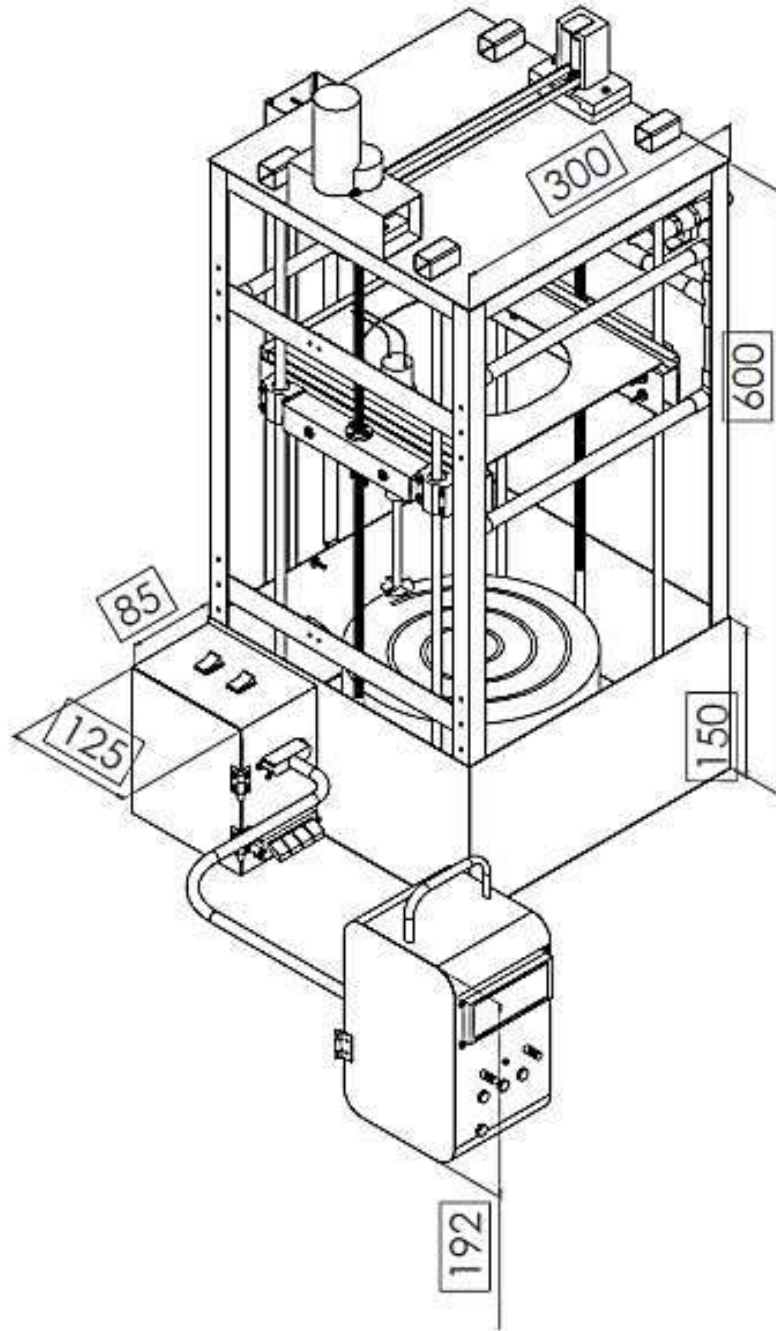
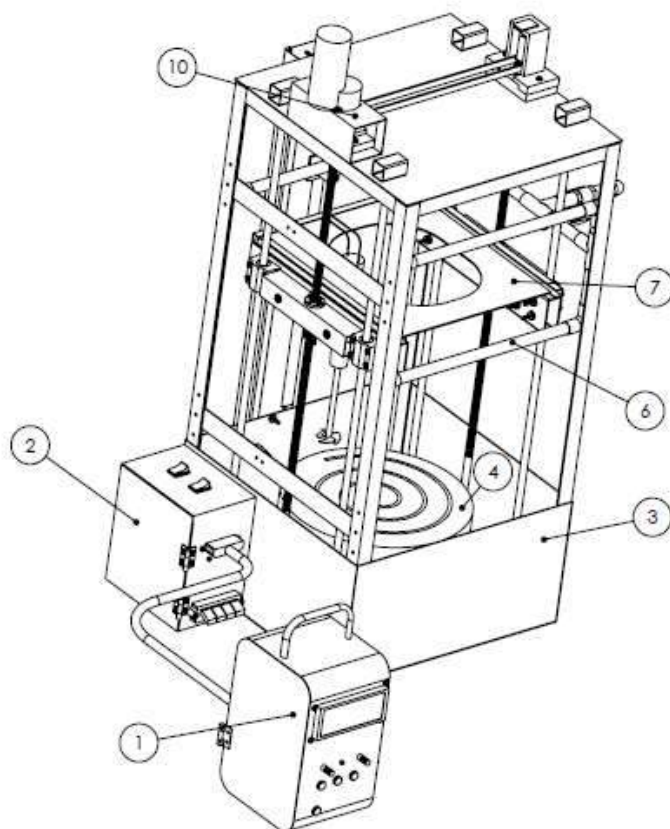


Figura 33. Dimensiones generales del equipo completo.

Ingeniería Mecatrónica

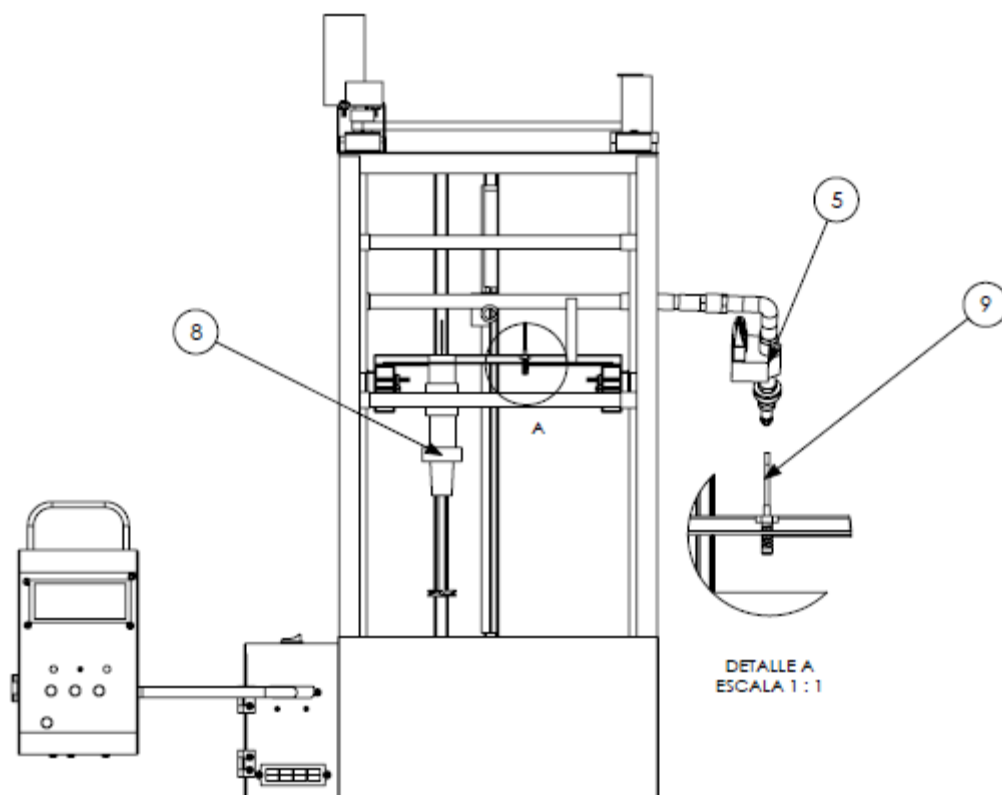
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Caja control 1	1
2	Caja control 2	1
3	Estructura de soporte	1
4	Baño maría (parrilla de calentamiento)	1
5	Sistema de enfriamiento (válvula de entrada)	1
6	Sistema de enfriamiento (ductos de aspersores)	1
7	Elevador vertical (placa porta reactor)	1
8	Agitador mecánico (reactor)	1
9	Sensor de temperatura (reactor)	1
10	Cuarto de máquinas (elevador vertical)	1

Figura 34. Rotulación de componentes del equipo completo: vista 1.

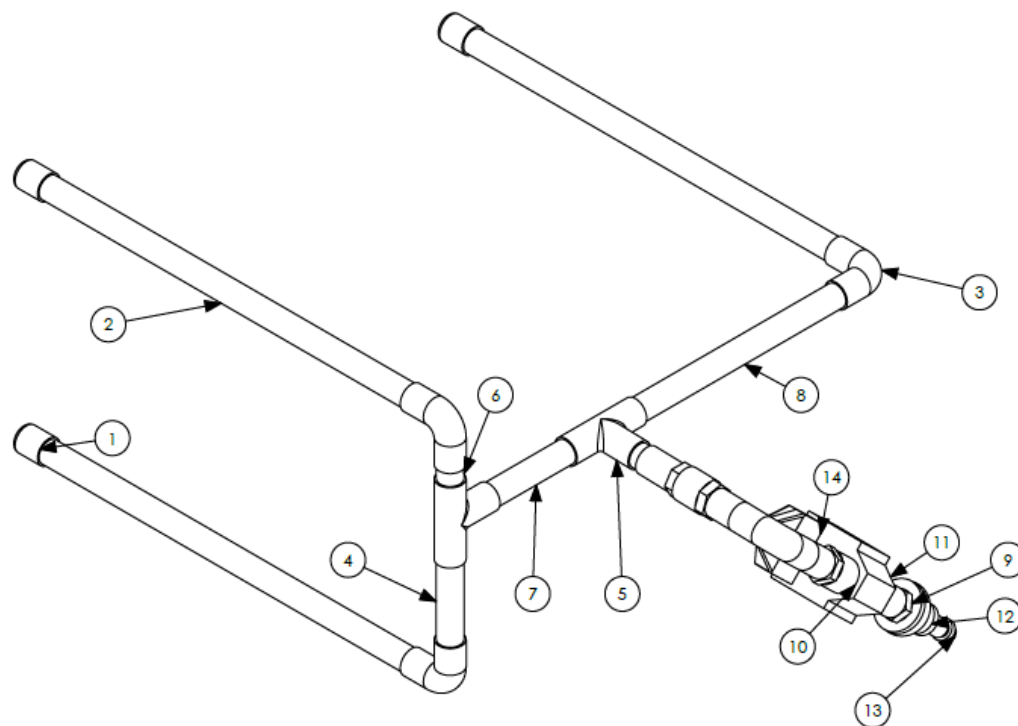
Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Caja control 1	1
2	Caja control 2	1
3	Estructura de soporte	1
4	Baño maría (parilla de calentamiento)	1
5	Sistema de enfriamiento (válvula de entrada)	1
6	Sistema de enfriamiento (ductos de aspersores)	1
7	Elevador vertical (placa porta reactor)	1
8	Agitador mecánico (reactor)	1
9	Sensor de temperatura (reactor)	1
10	Cuarto de máquinas (elevador vertical)	1

Figura 35. Rotulación de componentes del equipo completo: vista 2.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tapon de 1/2 in	3
2	Tubo CPVC 1/2 in x 25cm	3
3	Codo CPVC 1/2	4
4	Tubo cpvc 1/2 x 6 cm	1
5	T CPVC 1/2	2
6	Tubo cpvc 1/2 x 4 cm	2
7	Tubo CPVC 1/2 in 8cm	1
8	Tubo CPVC 1/2 in 15 cm	1
9	Conector CPVC 1/2 macho	2
10	Conector 1/2 in hembra	2
11	Valvula selenoide	1
12	Reduccion media a un cuarto	1
13	Conector compresor	1
14	Guarda	1

Figura 36. Sistema de enfriamiento.

Ingeniería Mecatrónica
 Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
 Automatizado

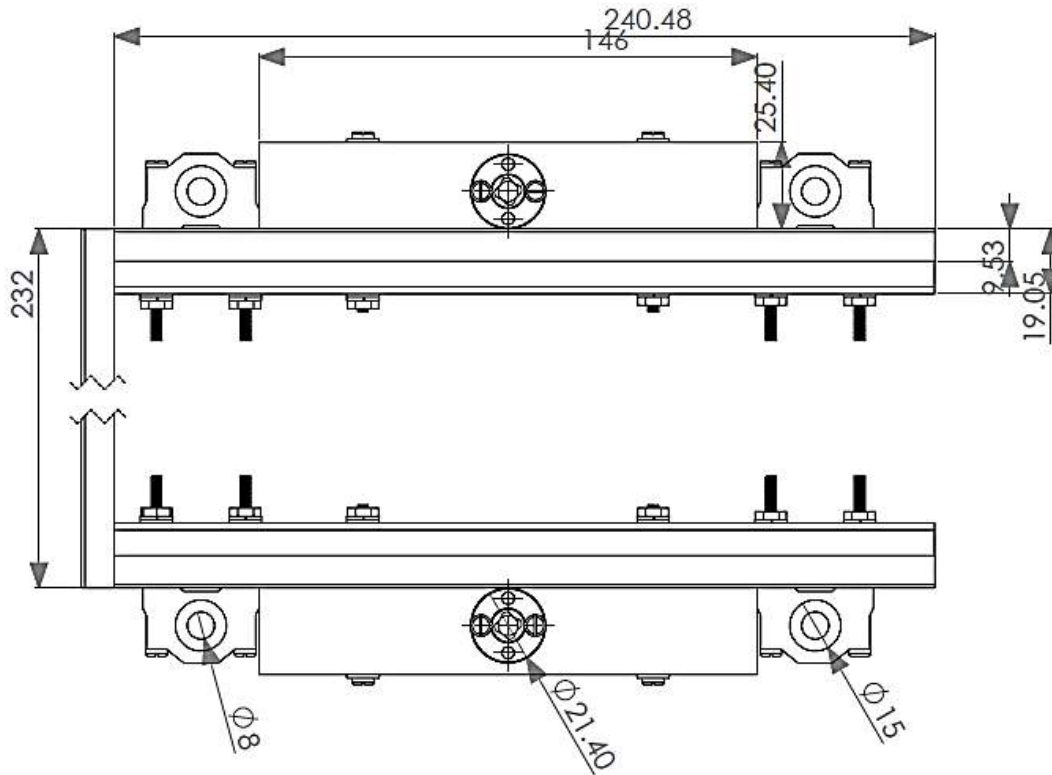


Figura 37. Placa porta-reactor: vista de planta.

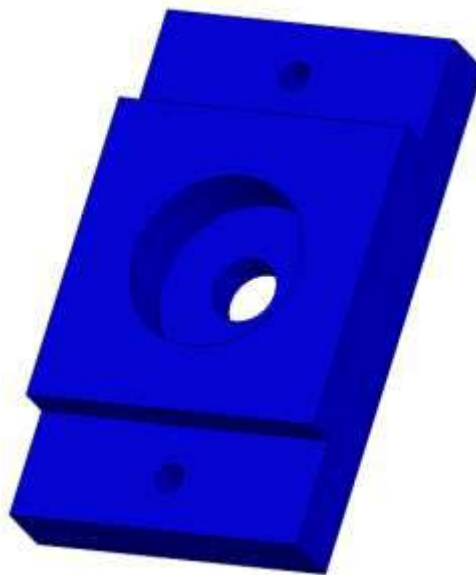


Figura 38. Base de balero de eje vertical.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

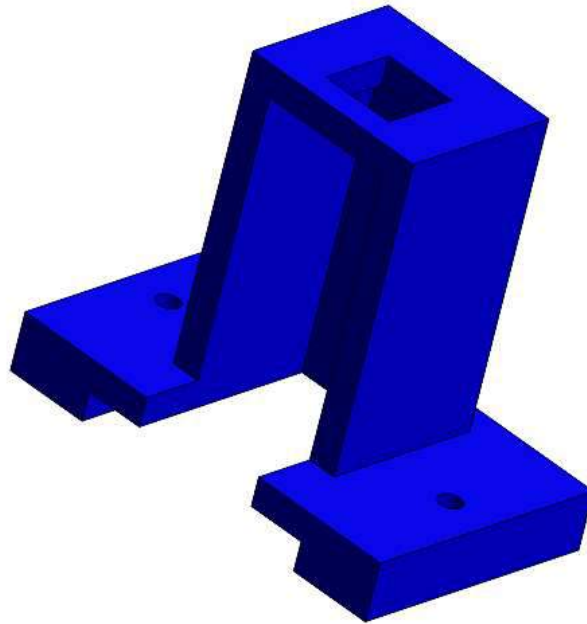


Figura 39. Base para encoder.



Figura 40. Acoplador.

4.1.2 Diseños electrónicos

El sistema embebido se diseñó en base a electrónica modular para Arduino y todo el sistema de control y automatización se fija en el panel de control. En la Tabla 1 se describen los elementos que componen el sistema embebido. En la Tabla 2 se presenta una lista de los componentes con sus respectivas conexiones (pines disponibles y pines requeridos) de los periféricos de acople de señales. Se establecen los pines de comunicación del relevador, conector hembra, motor de agitación, pantalla LCD, conexión LED RGB, reguladores de velocidad y temperatura, encoder, alimentación Arduino Mega, iluminación LED zona enfriamiento, alimentación Arduino Nano, interruptor switch de final de carrera del elevador vertical, termopar, indicadores LED de alimentación y comunicación serial D25.

Tabla 2. Interfaz de conexiones del sistema embebido.

CONEXIÓN DEL RELEVADOR COMO INTERRUPTOR					CONEXIÓN DE SEÑALES ENTRE LOS ARDUINOS		
Componente	Interruptor 1	Relevador 5v	Resistencias	Alimentación 12 V	Componente	Arduino Mega	Arduino Nano
Conexión	5V	Pin1 bobina			Conexión	40	D4
		Pin intermedio		Positivo		41	D5
		Pin2 bobina				42	D6
		Pin normalmente abierto				43	D7
CONEXIÓN CONECTOR HEMBRA DE PRESIÓN 4 TERMINALES							
Componente	Alimentación 5 V	Alimentación 12V	Conector hembra	Capacitor 33000 µF 25 V			
Conexión	Positivo		1				
	Común		2				
		Positivo	3	Positivo			
		Común	4	Común			
CONEXIÓN MOTOR AGITADOR							
Componente	Motor	Alimentación 12V	L298N Puente H	Arduino MEGA			
Conexión	Terminal 1		OUT 1				
	Terminal 2		OUT 2				
		Positivo		12V			
		Común		GND			
			INT 1	34			
			INT 2	35			

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 2. Continuación...

CONEXIÓN PANTALLA LCD							
Compon ente	LCD	Arduino Mega	Alimentació n 5v	Resistencia 220 homs	Diodo RL 101	CAPACITOR 330µF 10 V	POTENCIOM E-TRO 10K
Conexi ón	VS		Común			Positivo	Pin 1
	VDD		Positivo		Conexión directa	Común	Pin 3
	RS	25					
	RW						Pin 2
	E	26					
	D4	27					
	D5	28					
	D6	29					
	D7	30					
	A		Positivo	Conexión en serie			
	K		Común				
CONEXIÓN LED RGB							
Compon ente	L298N Puente H	Arduino Mega	Alimentació n 5 V	LED RGB	Resistencia 1K hom	Resistencia 100 homs	Resistencia 100 homs
Conexi ón	5 V		Positivo				
	GND		Común				
	INT 1	31					
	INT 2	32					
	INT 3	33					
	OUT 1			PIN R	Conexión en serie		
	OUT 2			PIN G		Conexión en serie	
	OUT 3			PIN B			Conexión en serie
CONEXIÓN REGULADORES DE LAS VARIABLES VELOCIDAD Y TEMPERATURA DESEADA							
Compon ente	potenció metro 10K 1	potenciometr o 10k 2	Arduino mega	Alimentación 5 V	Capacitor 330µF 10 V		
Conexi ón	Pin 1			Positivo	Pin positivo		
	Pin 2		A15				
	Pin 3			Común	Pin Común		
		Pin 1		Positivo	Pin positivo		
		Pin 2	A14				
		Pin 3		Común	Pin Común		

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 2. Continuación...

CONEXIÓN ENCODER ROTATIVO KY-040				ALIMENTACIÓN DE ARDUINO MEGA			
Compon ente	Alimentació n 5 V	Arduino Nano	Encoder KY-040	Componente	Diodo RL 101	Alimentación 12 v	Arduino Mega
Conexi ón	Común			Conexión	Conexión directa	Positivo	Vin
	Positivo					Común	GND
		D2	SLK				
		D3	DT				
CONEXIÓN TIRA LED					ALIMENTACIÓN DE ARDUINO NANO		
Compon ente	Tira LED	Alimentación	Interruptor 2	Capacitor 33000 µF 25 V	Componente	Arduino Mega	Arduino Nano
Conexi ón	+	Positivo	0	Positivo	Conexión	5 V	5 V
	-	Común	1	Común		GND	GND
LIMIT SWITCH							
Compon ente	Limit switch 1	Limit switch 2	Resistencia s 220 Ohm	Alimentació n 5V	Arduino Mega		
Conexi ón	Común			Positivo			
		Común		Positivo			
	NA		GND		2,36		
		NA	GND	Común	3,37		
CONEXIÓN TERMOPAR TIPO K							
Compon ente	controlador MAX6675	Arduino MEGA	Alimentaci ón 5V				
Conexi ón	GND		Común				
	+		Positivo				
	CLK	22					
	CS	23					
	SO	24					
CONEXIÓN LEDS INDICADORES DE ALIMENTACIÓN							
Compon ente	LED difuso rojo	LED difuso amarillo	Alimentaci ón 5V	Alimentació n 12V	Resistencia 100 Ohms	Resistencia 520 Ohms	
Conexi ón	Ánodo		Positivo		Conexión en serie		
	Cátodo		Común				
		Ánodo		Positivo		Conexión en serie	
		Cátodo		Común			

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

Tabla 2. Continuación...

CONEXIÓN DE LOS PINES DEL PUERTO SERIAL DE 25 PINES			
	NO. DE PIN	COMPONENTE DEL SISTEMA CÁMARA	COMPONENTE DE PANEL DE CONTROL
CONEXIÓN	1	Terminal 1 motorreductor principal	OUT 1
	2	Terminal 2 motorreductor principal	OUT 2
	3	Terminal 1 motorreductor (agitador)	OUT 3
	4	Terminal válvula de paso	OUT4
	5	Terminal positiva encoder KY-040	Terminal de alimentación 5V
	6	GND del encoder KY-040	línea común de alimentación
	7	Terminal DT encoder KY-040	D2 Arduino Nano
	8	Terminal SLK encoder KY-040	D3 Arduino Nano
	9	Terminal positiva del termopar	Terminal positiva del Módulo MAX 6675
	10	Terminal negativa del termopar	Terminal negativa del Módulo MAX 6675
	11	Terminal positiva de alimentación 12 V	Terminal positiva ventilador
	12	Terminal colector TIP 41C	Terminal común de alimentación 12 V
	13	línea positiva de alimentación de 5 V	línea positiva de alimentación de 5 V
	14	línea común de alimentación de 5 V	línea común de alimentación de 5 V
	15	línea positiva de alimentación de 12 V	línea positiva de alimentación de 12 V
	16	línea común de alimentación de 12 V	línea común de alimentación de 12V
	17	Limit Switch superior	pin 3, 38 Arduino Mega
	18	Limit Switch inferior	pin 2, 39 Arduino Mega
	19	Sin conexión	Sin conexión
	20	Sin conexión	Sin conexión
	21	Sin conexión	Sin conexión
	22	Sin conexión	Sin conexión
	23	Sin conexión	Sin conexión
	24	Sin conexión	Sin conexión
	25	Sin conexión	Sin conexión

De la Figura 41 a la 43, se presentan vistas del diagrama electrónico del sistema elaborado en software *Proteus* en vista esquema ampliada. El circuito electrónico funciona como una interfaz entre la computadora con la que se carga el programa previamente elaborado en la placa Arduino. Esto a su vez nos permitirá controlar los diferentes actuadores (motores, switch, encoder) y sensores para dar paso a la movilidad del sistema mecánico-eléctrico. Los diagramas hacen referencia a la Tabla 2 para un mejor entendimiento de interfaz y conexiones.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

Las Figuras 44 y 45, muestran el diagrama esquemático del sistema embebido en vista protoboard elaborado en software de acceso libre *Fritzing*. Se observa la forma en que los elementos modulares se empotran en la placa de inserción y se comunican con el microcontrolador. El diagrama hace referencia a la Tabla 2 para una mejor apreciación de los componentes con sus respectivas conexiones (pines) de los periféricos de acople de señales.

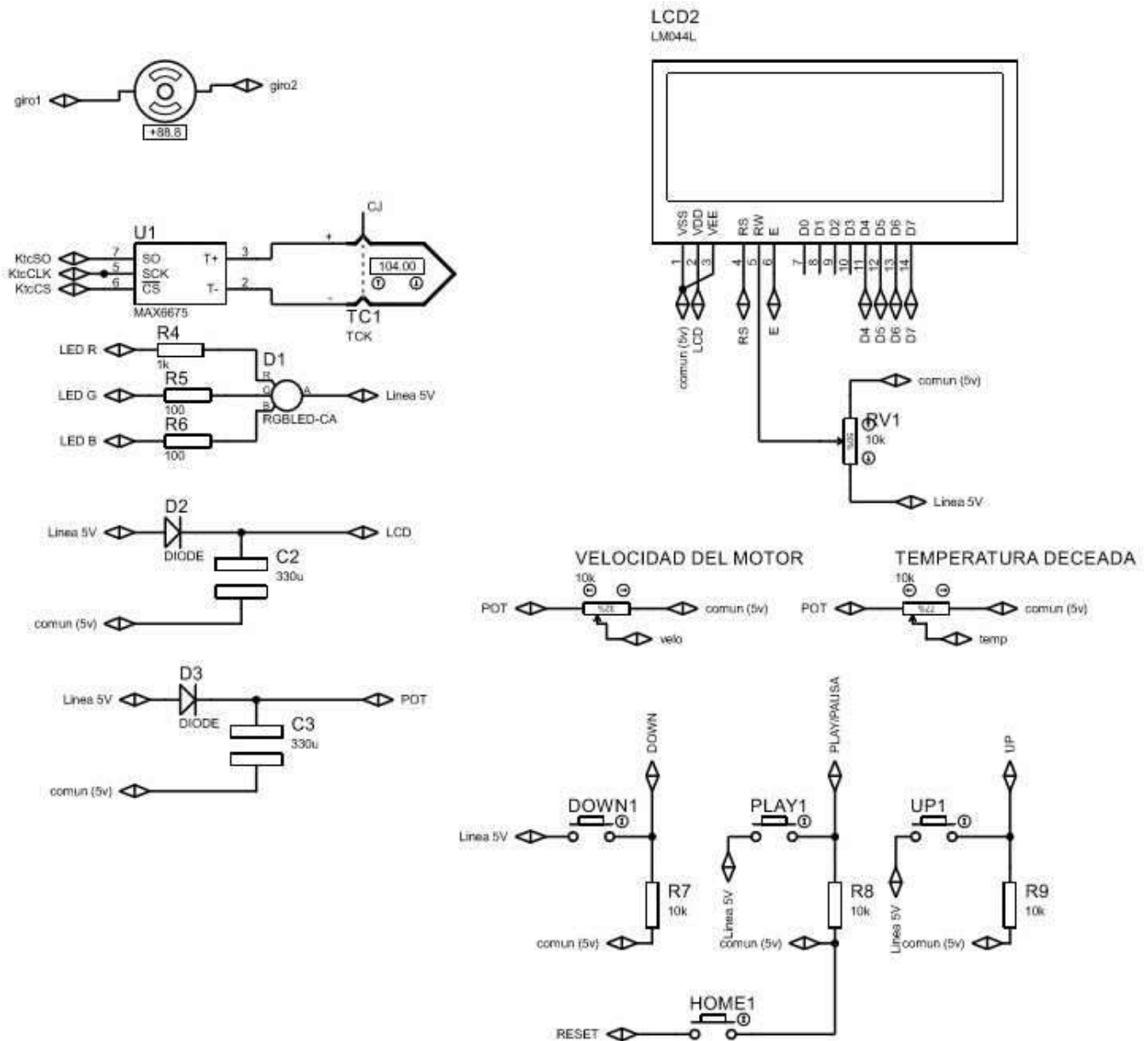


Figura 41. Diagrama electrónico parte 1 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: interfaz HMI.

Ingeniería Mecatrónica Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

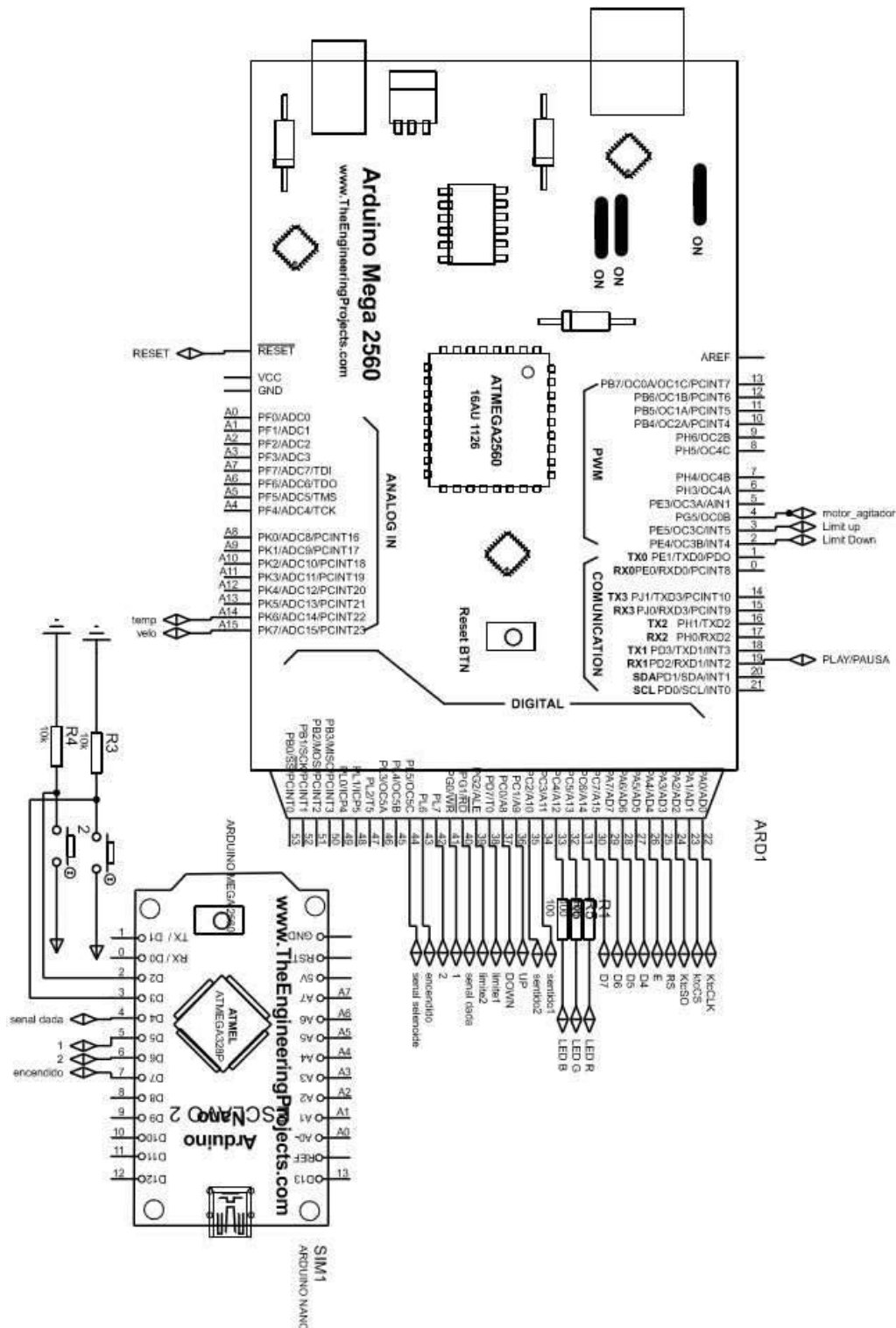


Figura 42. Diagrama electrónico parte 2 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: pines de microcontrolador.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

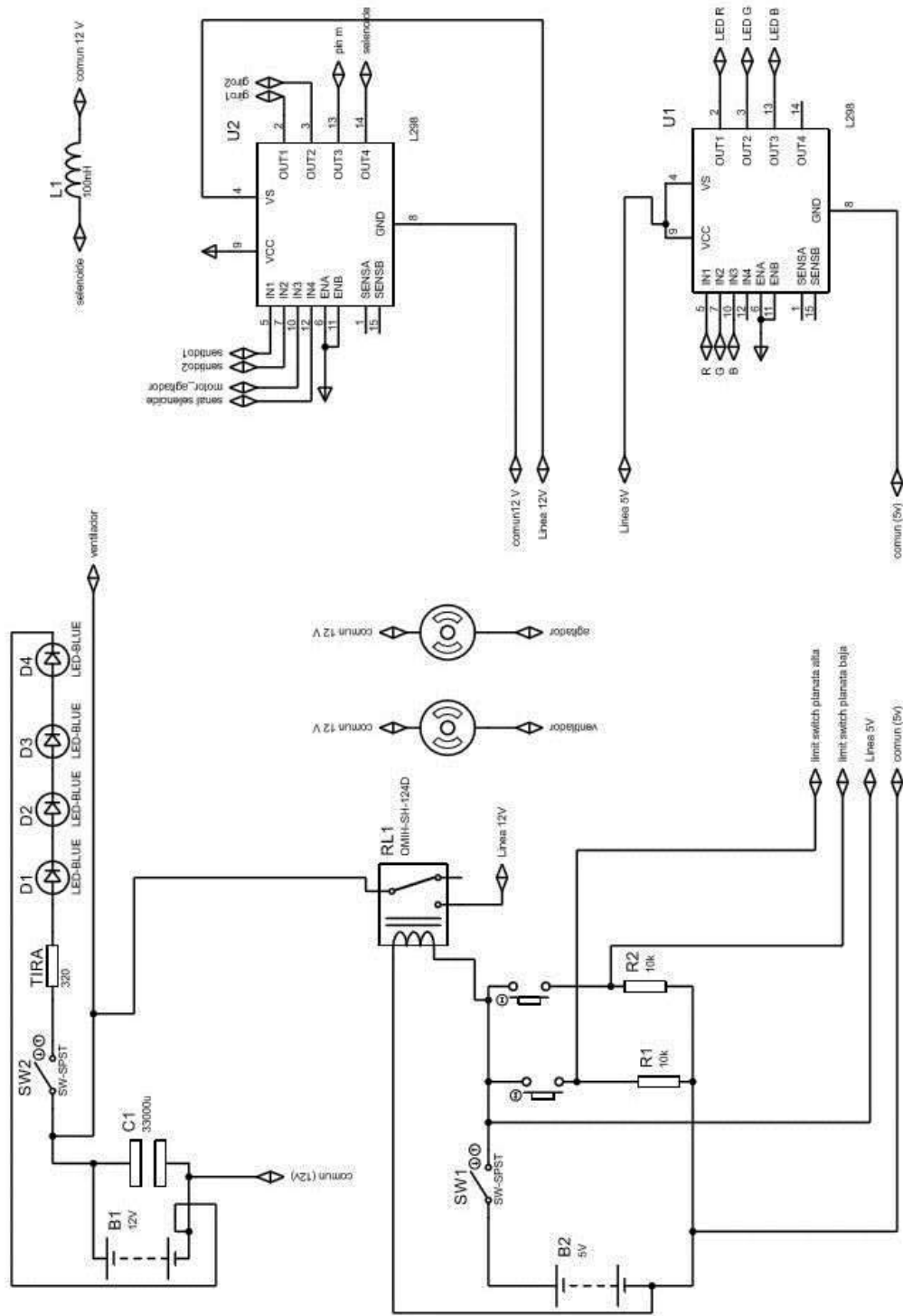


Figura 43. Diagrama electrónico parte 3 de 3 del sistema embebido de control y automatización en vista esquema Proteus: on/off sistema.

Ingeniería Mecatrónica

Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento Automatizado

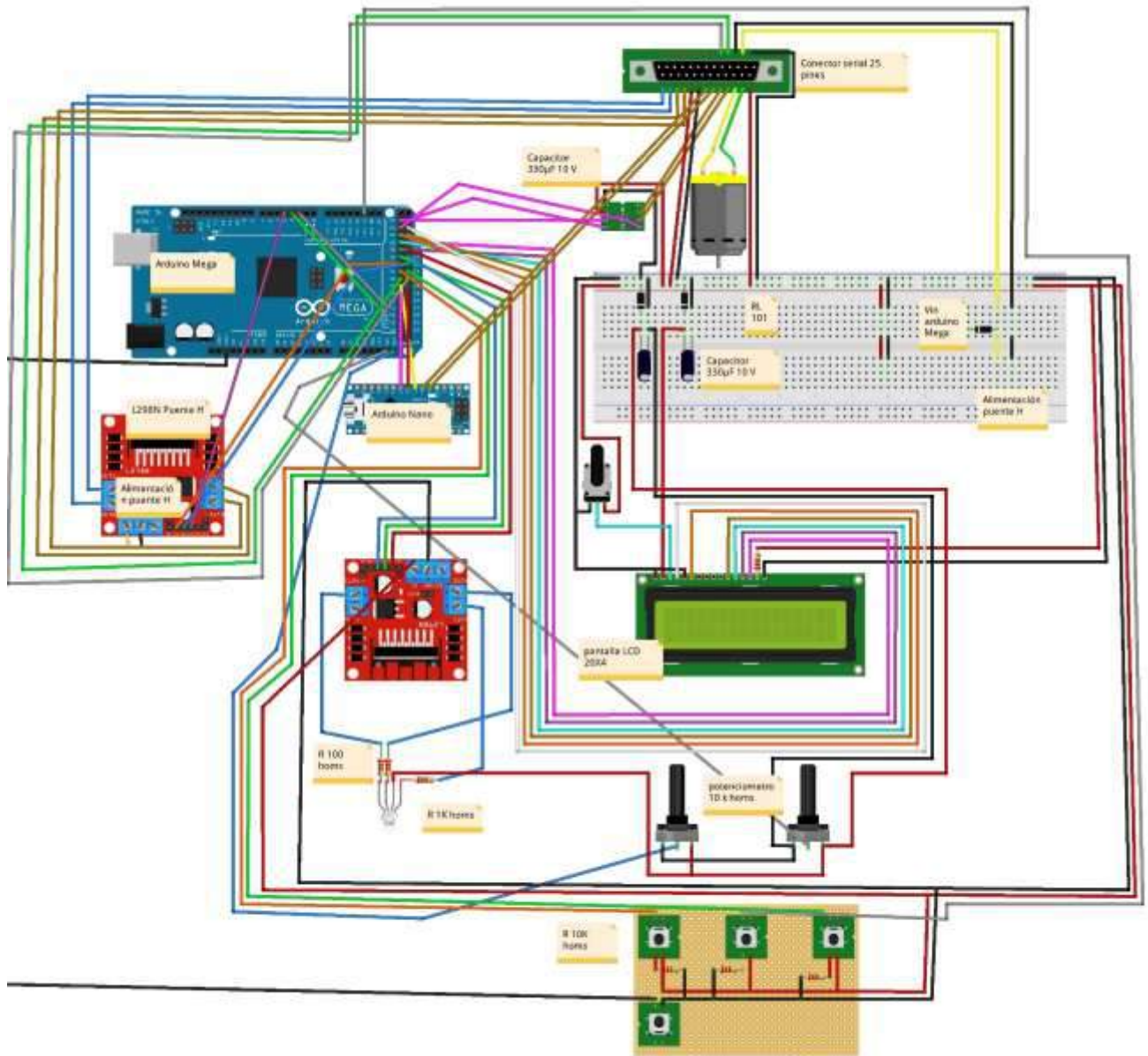


Figura 44. Diagrama electrónico parte 1 de 2 del sistema embebido de control y automatización en vista protoboard Fritzing.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

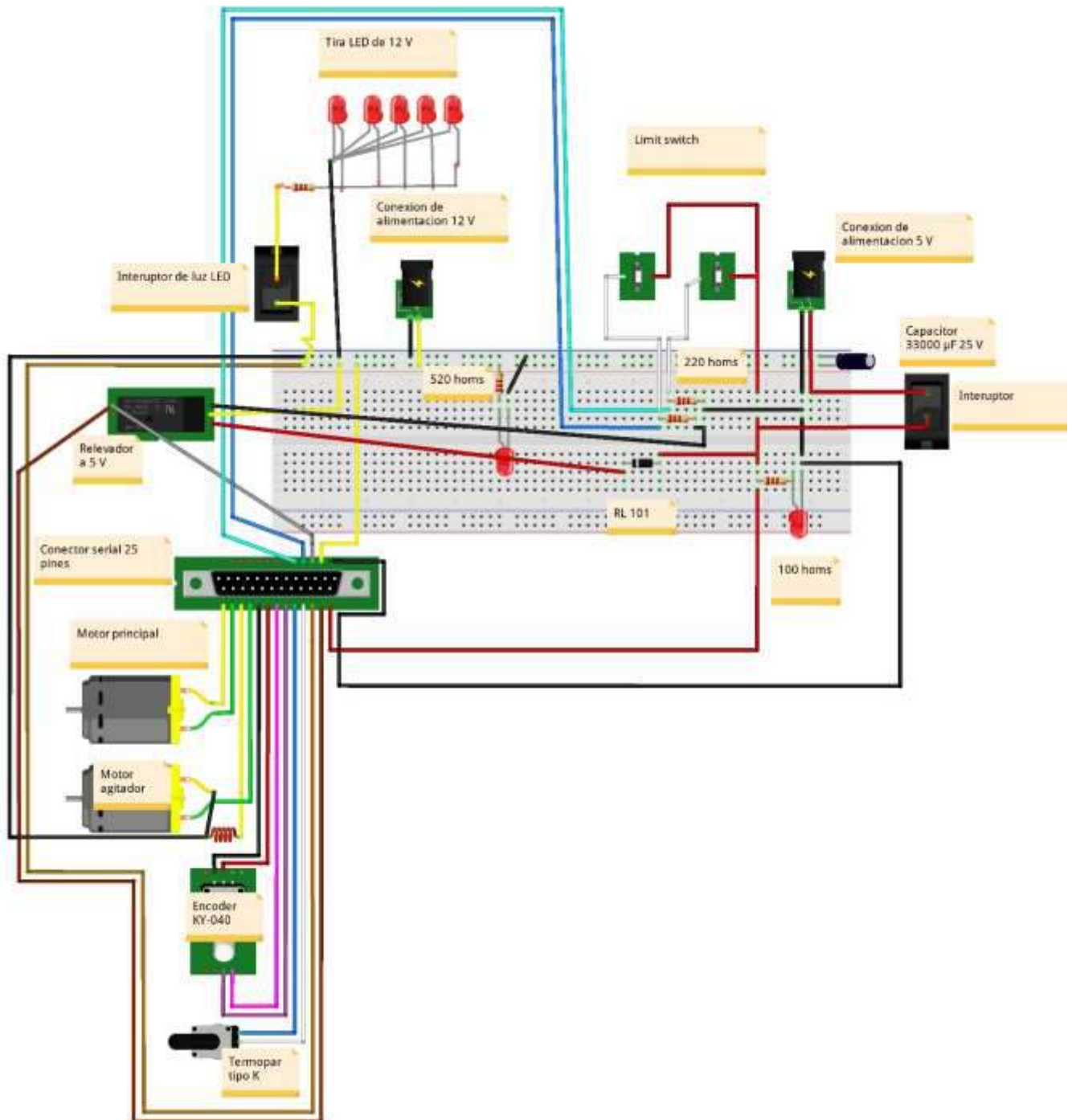


Figura 45. Diagrama electrónico parte 2 de 2 del sistema embebido de control y automatización en vista protoboard Fritzing.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE CONTROL & SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

La construcción del sistema de cámara de control de temperatura & sistema de enfriamiento permite cumplir con el objeto fin del proyecto de poder trasladar un reactor polimérico de una zona caliente a una zona fría en función de la temperatura de la reacción. Para propiciar una reacción polimérica de PAN, se suministra calor al reactor mediante un baño maría, sin embargo, al ser una reacción exotérmica se presenta una súbita elevación de la temperatura de reacción. Cuando el termopar integrado al reactor envía la señal respectiva ($T > 60 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$) propicia que la placa porta-reactor inicie un movimiento vertical ascendente hasta llegar a una zona fría por medio de aire frío conducido por ductos tipo aspersor. El reactor recibe el aire frío y una vez que estabiliza y baja la temperatura de reacción se retorna a la zona caliente. Este proceso se ejecuta tantas veces sea necesario durante todo el tiempo de reacción.

Todos los elementos de construcción para la estructura de soporte, sistema embebido de control y automatización, interfaz de comunicación (cableado), bases y piezas en PLA, actuadores y elementos generales se especifican en la Tabla 1.

En particular se logra lo siguiente:

- (a) El reactor logra desplazarse de una zona caliente a una zona fría tantas veces sea requerido durante todo el tiempo de reacción.
- (b) El suministro de aire frío se acciona únicamente cuando el reactor se encuentra en la parte superior del sistema. Una vez que el reactor desciende se apaga el suministro de aire.
- (c) El sistema de agitación es constante durante todo el tiempo de reacción y es independiente del movimiento vertical ascendente del reactor.
- (d) El diseño de la estructura de soporte, cableado, interfaz, placa porta-reactor y el sistema automatizado de enfriamiento logra un control de temperatura de $60 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2.1 Fabricación de piezas en PLA

En la Figura 46 se presenta una vista de algunas piezas del equipo fabricadas en PLA. La principal función de estas piezas es dar soporte a ejes, elementos modulares y CNC robótica.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 46. Piezas varias fabricada en PLA.

4.2.2 Fabricación de estructura de soporte, gabinetes de control, sistema elevador vertical y sistema de enfriamiento

La construcción de la estructura de soporte, gabinetes de control, sistema elevador vertical y sistema de enfriamiento consistió en el ensamble de piezas metálicas de solera, tubular, tornillería, baleros, placa de acero, sujeción, CPVC, entre otras. Se emplearon máquinas y herramientas convencionales para soldadura, corte y perforaciones. Por ejemplo, se empleó placa de acero para la base del equipo y ángulo de acero para el esqueleto de la estructura.

Para el elevador se optó por un sistema de ejes de varilla roscada con expansiones en varilla lisa para lograr la longitud determinada. El cuarto de máquinas del elevador se coloca en la parte superior de la cámara.

En la Figura 47 a la 52, se presentan varias imágenes del desarrollo de la construcción del equipo.

De la Figura 53 a la XX se presentan diferentes vistas y acercamientos de las secciones del sistema construido. Lo anterior como evidencia del logro del objeto fin del presente trabajo.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 47. Operaciones de manufactura de estructuras de soporte metálicas: corte de la lámina por choro de plasma.



Figura 48. Ensamblado y perforado de piezas diversas.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

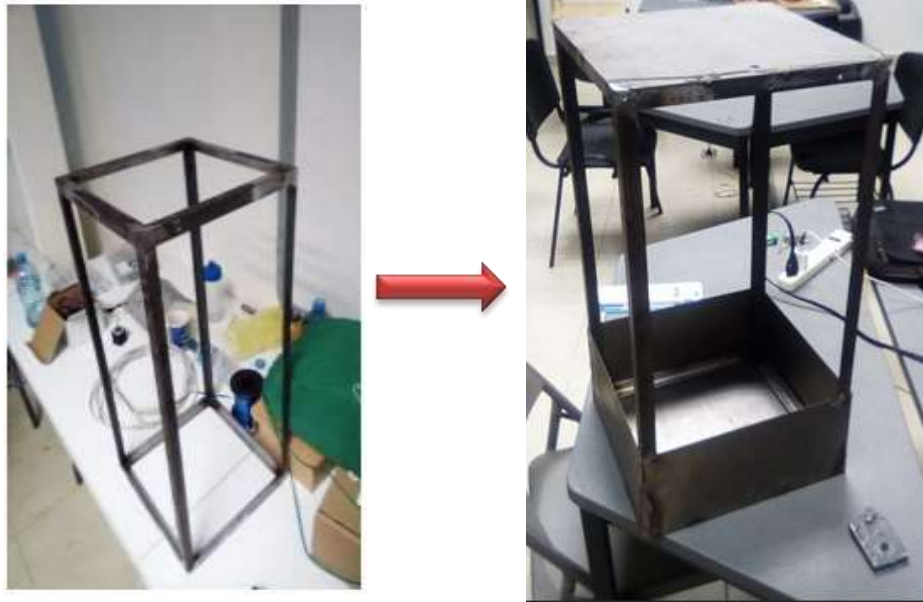


Figura 49. Ensamblado de los cortes de ángulo y los cortes de lámina.



Figura 50. Ensamblado y puesta de la plataforma elevadiza.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 51. Ensamblado del sistema de aire forzado.

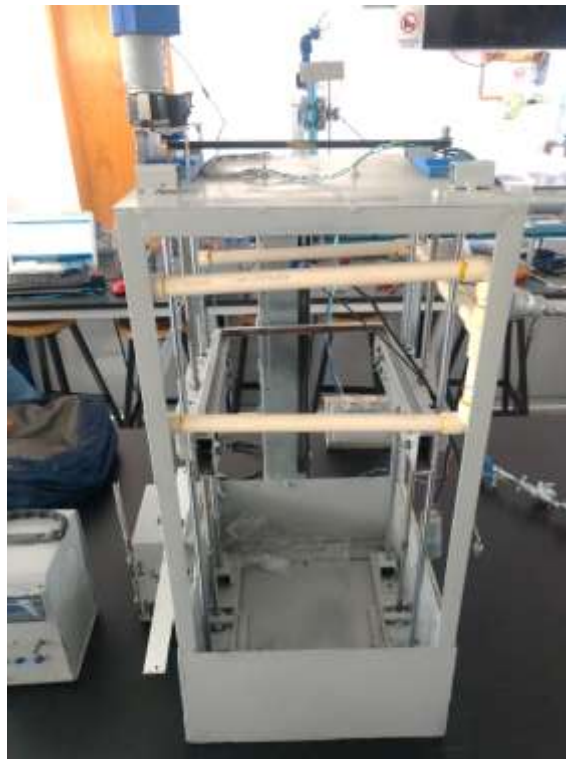


Figura 52. Pre-ensamble final componentes.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

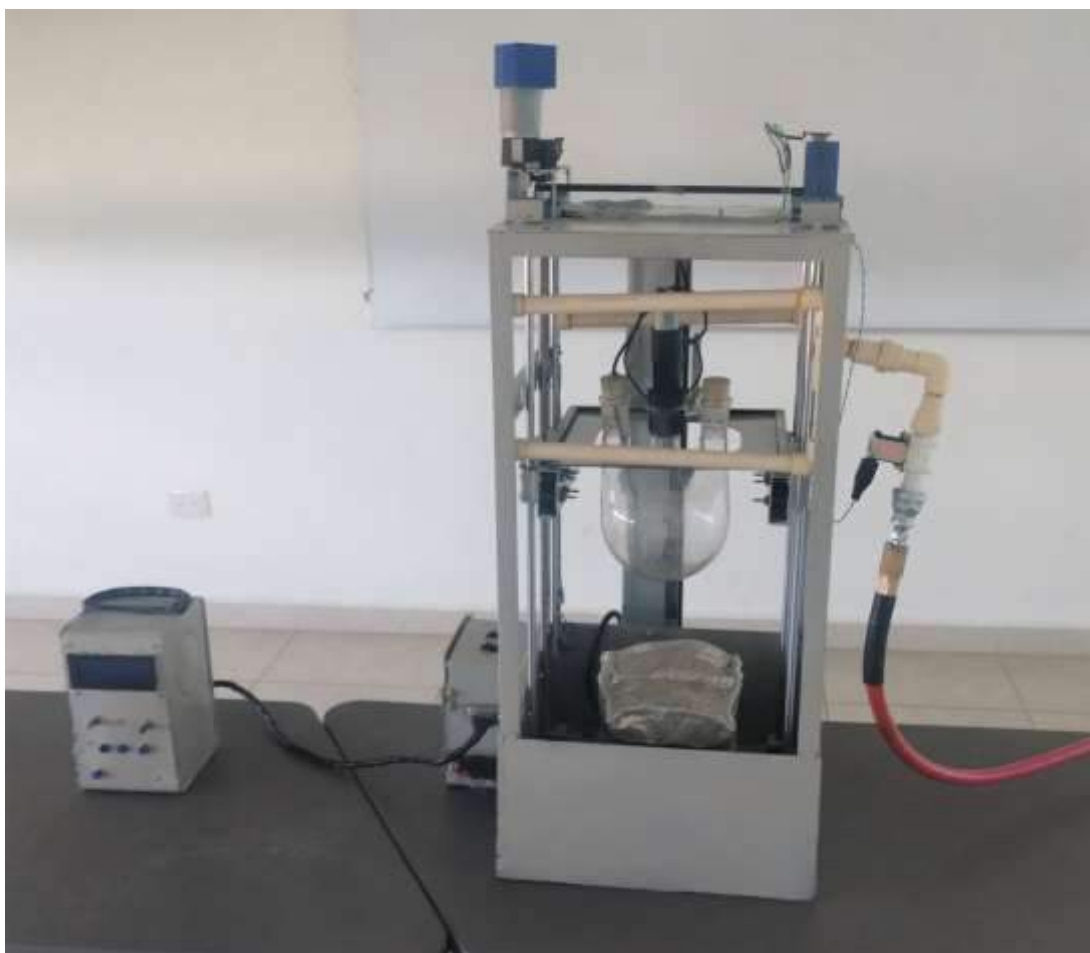


Figura 53. Vista frontal sistema de módulos completos: se observan panel de control, caja de poder, baño maría, sistema enfriamiento, reactor cuarto de máquinas, estructura de soporte.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 54. Vista posterior sistema de módulos completos: se observa la válvula de enfriamiento, torre de soporte principal, reactor, baño maría, sistema agitación del reactor.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 55. Vista lateral sistema de módulos completos: se observa la válvula del sistema de enfriamiento y ductos tipo aspersor.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 56. Vista lateral sistema de módulos completos: se observa gabinete de caja de poder, estructura de soporte y reactor en suspensión.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 57. Acercamiento 1 interior de zonas caliente y fría y de reactor.



Figura 58. Acercamiento 2 interior de zonas caliente y fría y de reactor.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 59. Acercamiento parte superior de reactor: soporte de motor de agitación y entrada sensor de temperatura.



Figura 60. Acercamiento parte inferior de reactor: agitador y sensor.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 61. Acercamiento interior de reactor: agitador y sensor

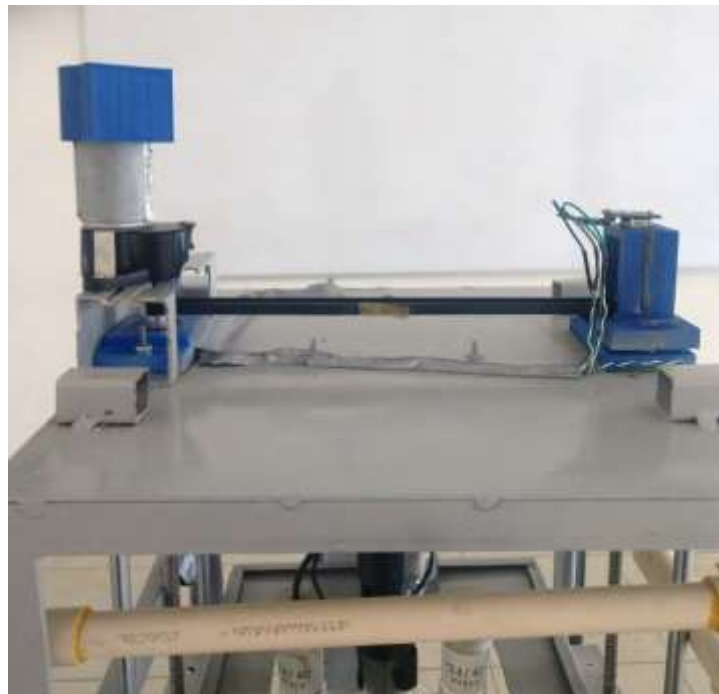


Figura 62. Cuarto de máquinas: movimiento de elevador de porta-reactor.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 63. Parte inferior de la placa porta-reactor.



Figura 64. Baño maría (zona de calentamiento).

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 65. Caja panel de control (Gabinete).



Figura 66. Caja de poder (gabinete de distribución eléctrica).

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 67. Parte superior de la placa porta-reactor.



Figura 68. Válvula de control automatizado de enfriamiento.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 69. Ductos de entrada sistema de enfriamiento.

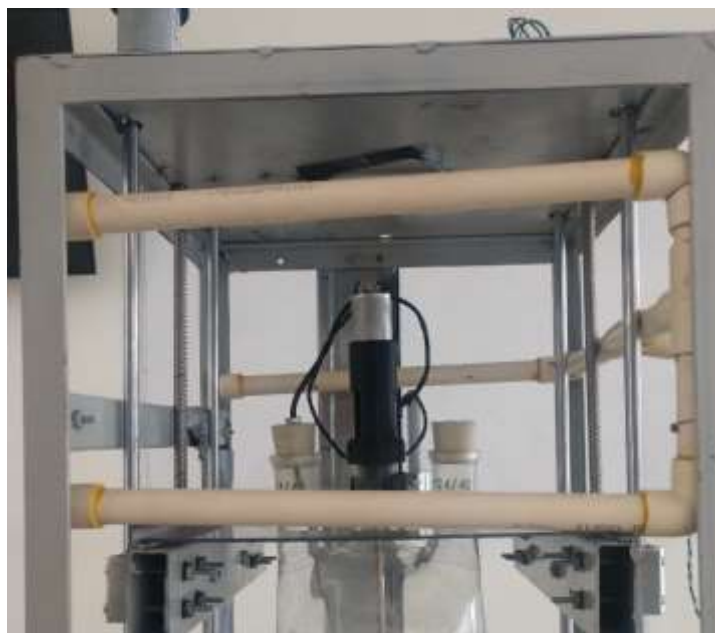


Figura 70. Ductos internos de sistema de enfriamiento.

4.3 SISTEMA DE CONTROL

4.3.1 Comunicación serial y cableado

Se estableció el diseño y construcción de una comunicación serial empleando un sistema de cableado de red de Ethernet, extensiones y cables jumper dupont así como un puerto serie D25 pines. En el Anexo 1 se aprecian los interiores de las cajas de control del sistema con las conexiones y terminales construidas.

4.3.2 Código Arduino

El código de control y automatización para el sistema embebido se desarrolló en lenguaje Arduino bajo una estructura de sintaxis textual de diseño propio. Se tomaron como guía varias fuentes de información electrónica (ver punto 3.3) disponibles en la red libremente, así como librerías integradas por default en el software de acceso libre.

En el Anexo 2 se presenta el código Arduino desarrollado para este trabajo.

En el Anexo 3 se muestran diagramas de flujo del funcionamiento del sistema completo. Se describen las secuencias de operación de las botoneras según el modo de operación.

V. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y construir una cámara de control de temperatura con sistema de enfriamiento automatizado donde se logra el movimiento automático de traslado de un reactor polimérico de una zona caliente a una zona de enfriamiento. Se emplearon poco más de 270 piezas entre materiales de acero al carbón, electrónica modular compatible con hardware y software Arduino, comunicación serial y CNC robótica, además de fabricar unidades de soporte mediante impresión 3D con material de políacido láctico.

La cámara y el enfriamiento fueron controlados y automatizados mediante códigos de programación de diseño propio empleando la plataforma electrónica de código abierto Arduino. Adicionalmente, se elaboró una interfaz manual para complemento de operación de movimientos de sube y baja del reactor.

El sistema embebido se construyó con base a los diagramas electrónicos elaborados en softwares *Proteus* y *Fritzing* con lo que se aseguró contar con correctas respuestas de señales entre todos los elementos de programación y electrónica modular empleados.

Se realizaron pruebas preliminares de respuesta del equipo de elevación desarrollado con agua y ya empleando el suministro constante de aire a presión como medio de enfriamiento, pero regulado su encendido a través de la señal de una válvula solenoide, la cual permitía el paso de aire si y solo si cuando el reactor se encontraba posicionado en la zona fría.

Las pruebas preliminares permitieron observar una correcta respuesta del sistema durante sus distintos desplazamientos verticales del reactor. El reactor retornaba de la zona superior a la inferior cuando el rango de temperatura se mantenía igual o menor a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ sin contratiempos.

Por lo que se puede sugerir que se logrará eliminar la manipulación manual del control térmico de una reacción polimérica sustituyendo la dependencia del operador en la supervisión del proceso de síntesis de PAN.

Como trabajo a futuro se contempla para otros proyectos – fuera del alcance del presente trabajo – optimizar la cámara de control de temperatura llevando a cabo un diseño experimental robusto y realizando pruebas de síntesis de polímeros. Así mismo se prevé alimentar aire frío mediante un simple sistema de aire acondicionado integrado a la cámara existente.

El presente trabajo permite establecer las bases para generar productos académicos y de desarrollo tecnológico más significantes y de alto valor agregado para considerar la transferencia de tecnología. Además de que fomenta demás trabajo futuro para nuevos posibles temas de investigación y de Tesis.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Morgan, P., (2005). Carbon Fibers and their Composites. Florida, USA: Taylor & Francis Group, LLC.
- (2) Ramis-Juan, X. (1993). *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos de iniciación del curado de resinas de poliéster insaturado* (Tesis de Doctorado). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/6686>
- (3) Guevara, J. L., Quijada, R., Saavedra, P., Palza, H. & Galland, G.-B. (2002). Estudio de la polimerización de propeno utilizando diferentes catalizadores metallocenos. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 47(2), 81-90. <https://dx.doi.org/10.4067/S0366-16442002000200003>
- (4) Mondragón-Aguilar, J. (2001). Polimerización (apuntes de Química Orgánica I). Recuperado de <http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/organica/directorio/jaime/Polimeros.pdf>
- (5) Mexpolímeros. (s.f.). Polimerización. Recuperado de <https://www.mexpolimeros.com/polimerizaci%C3%B3n.html>
- (6) Dena-Aguilar, J. A., Jáuregui-Rincón, J. & Bonilla-Petriciolet, A. (2011). Síntesis de un copolímero biodegradable para la remoción de Iones de Pb^{2+} , Cd^{2+} y Zn^{2+} en soluciones acuosas (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- (7) Hermida, É. (2011). Polimeros: guía didáctica. Ed. Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Argentina.
- (8) Cedron, J., Landa, V & J. Robles. (2011). Química General: Polimeros. Recuperado de <http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/82-polimeros.html>
- (9) Tecnología de los plásticos. (2013). Polimerización. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/07/polimerizacion.html>
- (10) Dena-Aguilar, J. A. (2011). Graft copolymerization of poly(acrylonitrile) and vinyl acetate on starch via free radical in solutions: synthesis and characterization. *Afinidad*, LXVIII, 553, 195-202.
- (11) Tecnología de los plásticos. (2011). Poliacrilonitrilo. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliacrilonitrilo.html>
- (12) Calvet-Márquez, S. (s. f.). NTP 527: Reacciones químicas exotérmicas (I): factores de riesgo y prevención (Nota Técnica de Prevención). Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España/Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- (13) Dreamstime turns 20. (s.f.). Reacciones endotérmicas y exotérmicas. Recuperado de <https://es.dreamstime.com/reacciones-endot%C3%A9rmicas-y-exot%C3%A9rmicas-image120571725>
- (14) Omega. (s. f.). Control de temperatura, equipos y controlador PID. Recuperado de <https://mx.omega.com/prodinfo/control-de-temperatura.html#learn>

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

- (15) TRE C (s. f.) Termostatos y reguladores de temperatura. Recuperado de <https://www.resistencias-electricas.com/productos/control-de-temperatura/thermostats-and-thermoregulators/>
- (16) EcuRed. (s. f.). Incubadora neonatal. Recuperado de https://www.ecured.cu/Incubadora_neonatal
- (17) Ellab (s.f.). Incubación. Recuperado de <https://es.ellab.com/aplicaciones/farma/incubacion>
- (18) Boletinagrario.com. (s.f.). Incubadora. Recuperado de <https://boletinagrario.com/ap-6,incubadora,484.html>
- (19) Elansari, A. (1998). Fast Cooling Technical Manual. DOI: 10.13140/RG.2.1.4543.8887
- (20) VILOBOX. (s. f.). Tipos de elevadores y como seleccionar el adecuado. Recuperado de https://vilobox.mx/libreria/recursos/eBook_Tipos_de_elevadores_V2.pdf
- (21) Elevadores. Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/556/A10.pdf?sequence=10>
- (22) Amat-Verdú, O. (2017). Diseño de un manipulador controlado con el microcontrolador Arduino. (Tesis de Ingeniería). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- (23) EcuRed. (2012). IDE de programacion. Recuperado de https://www.ecured.cu/IDE_de_Programaci%C3%B3n
- (24) Arduino. (2020). What is Arduino? Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- (25) Hubor-Proteus. (2015). ¿Cómo es el trabajo de Proteus?. Recuperado de http://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/230-como_trabajar_con_proteus.html
- (26) Fritzting. (2020). Fritzting. Recuperado de <https://fritzing.org/home/>
- (27) Yoneda, K, Yoshio, S., Hiroshi, M., Toshimitsu, T. & Seiji, Y. (1991). *Elevator Control System*. U. S. Patent No. 5042620.
- (28) W.-Dryden, H. (1953). *Incubator with automatic temperature and humidity control*. U. S. Patent No. 2646930. Modesto, Calif.: United States Patent Office.
- (29) Swan, A.-J. & A.-Trinh, T. (1992). *Incubator heating system*. U. S. Patent No. 5090617.
- (30) Hugh, M.-A. (2003). *Controlled atmosphere incubator*. U. S. Patent No. 6503751 B2.
- (31) Sansomboonsuk, S., Phonhan, C. & Phonhan, G. (2011). An automatic incubator. *Energy Research Journal*, 2(2), 51-56.
- (32) Shittu, S., S.-Muhammad, A. Jimoh, M., S.-Muhammad, A. & N.-Olasunkanm, J. (2017). *Development of an automatic bird-egg incubator*. *Research & Reviews: a journal of embedded system & applications*, 5, 1-10.
- (33) Llédó-Sánchez, E. (2012). *Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino* (Tesis de Ingeniería). Universitat Politècnica de València, Valencia, España.
- (34) León-Arguello, D. R. & Ramos-Bermeo, J. L. (2015). *Desarrollo de un prototipo de sistema WEB usando la placa Arduino para la lectura de sensores de temperatura y humedad de las máquinas de incubación de pollitos BB* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

- (35) Caiza-Chimarro, J. C. (2016). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema de control, supervisión de temperatura y humedad, para cultivos caseros bajo invernadero, utilizando el módulo Arduino en la ciudad de Cayambe* (Tesis de Ingeniería). Universidad Tecnológica Israel, Quito, Ecuador.
- (36) Sami, K., Lavanya, M., Arivalagan, M. & Sree-Hassha, Y. (2017). Temperature controlled based cooler pad using Arduino. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, Special Issue 5, 216-220.
- (37) Kaushik, S., Chouhan, Y.-S., Sharma, N., Singh, S. & Suganya, P. (2018). Automatic fan speed control using temperature and humidity sensor and Arduino. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 4(2), 453-457.

ANEXO 1

Diseños y figuras complementarias



Figura 71. Interior de gabinete de distribución eléctrica.



Figura 72. Comunicación serial.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado



Figura 73. Interior de gabinete de panel de control.

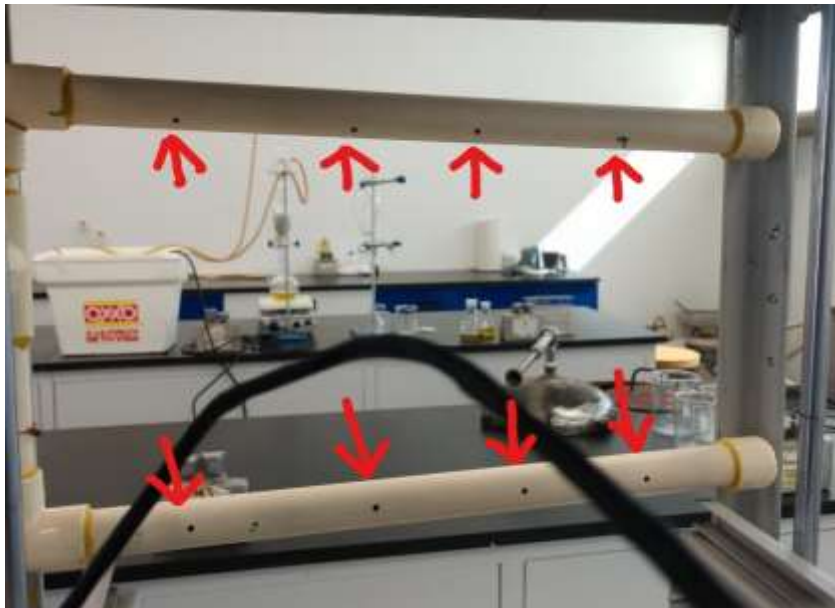


Figura 74. Orificio de ductos-aspersores de enfriamiento.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

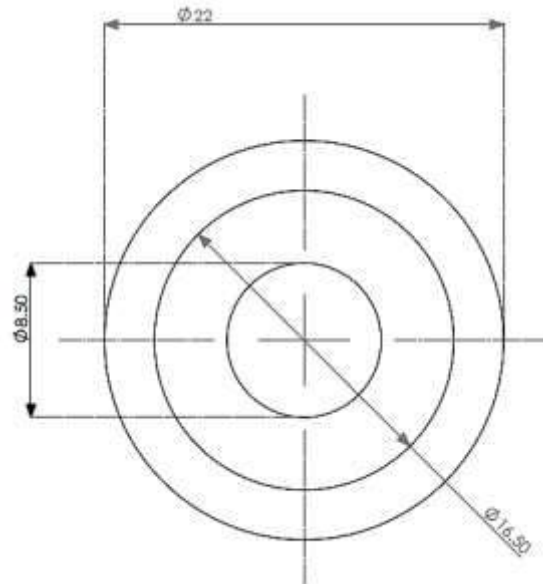


Figura 75. Acoplador PLA.

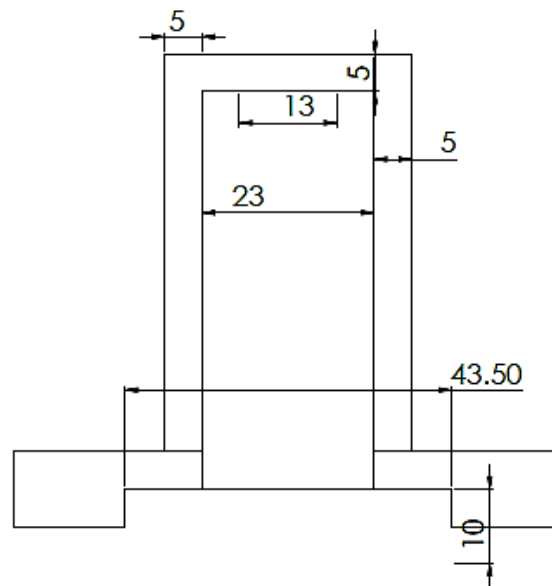


Figura 76. Porta encoder PLA.

Ingeniería Mecatrónica
 Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
 Automatizado

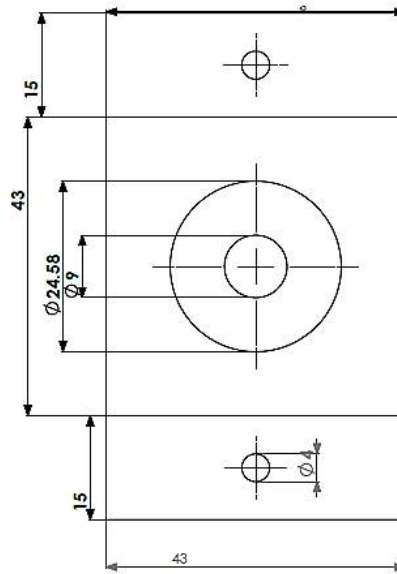


Figura 77. Base para balero PLA.

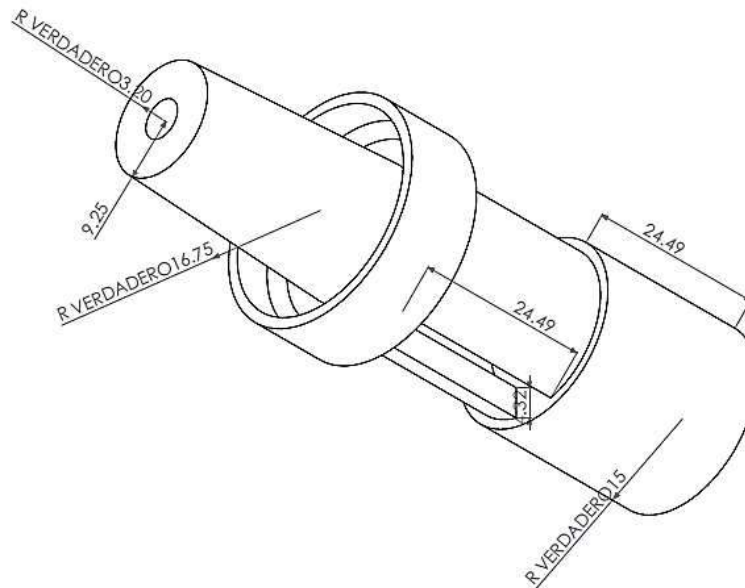


Figura 78. Base para porta motor de agitación de reactor PLA.

Ingeniería Mecatrónica
 Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
 Automatizado

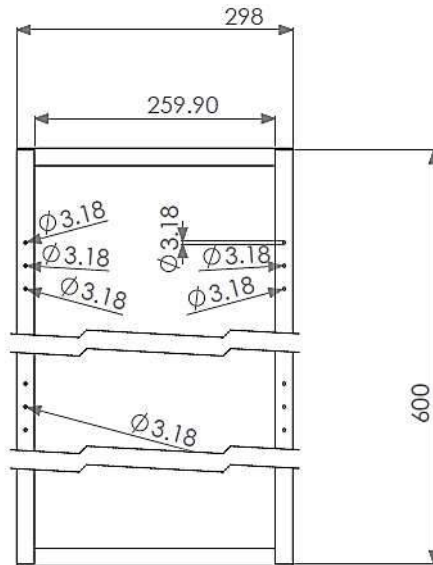


Figura 79. Dimensiones cámara de control de temperatura.

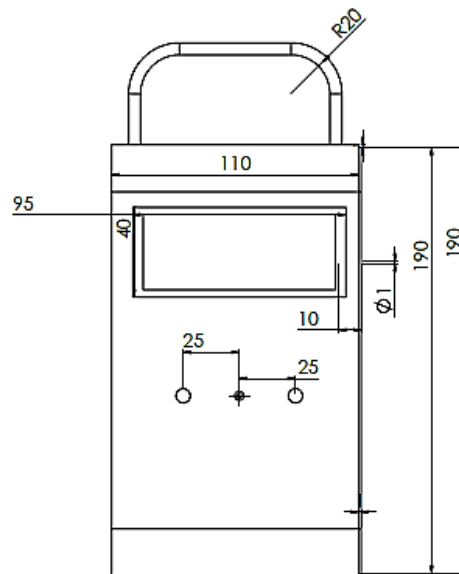


Figura 80. Gabinete de control (panel).

ANEXO 2

Código Arduino

1.- Código de implementación para el control principal de la cámara de control de una reacción exotérmica

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include "max6675.h"
LiquidCrystal Lcd(25,26,27,28,29,30);
int ktcSO = 24;
int ktcCS = 23;
int ktcCLK = 22;
int R=31,G =32,B=33;
int giro1=34;
int giro2=35;
int tempe;
const int m=A15;
const int t=A14;
int motorv=4;
int v;
int tdeceada;
int velo;
int tsistema;
volatile int H=2;
volatile int C=2;
volatile int funcion=0;
volatile int cambio=HIGH;
int direccion1=36;
int direccion2=37;
int limite1=38;
int limite2=39;
bool a,b,c,d,e,f,g;
int i=0;
int salida=40;
int entrada1=41;
int entrada2=42;
int entrada2=43;
int intencendido=44;
int valvula=45;
const int timeThreshold = 150;
int counter = 0;
long startTime = 0;
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
byte customChar[] = {
  B00110,
  B01001,
  B01001,
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
B00110,  
B00000,  
  B00000,  
B00000,  
B00000  
};  
byte sube[] = {  
  B00000,  
  B00000,  
  B00100,  
  B01010,  
  B10001,  
  B00000,  
  B00000,  
  B00000  
};  
byte aba[] = {  
  B00000,  
  B00000,  
  B00000,  
  B10001,  
  B01010,  
  B00100,  
  B00000,  
  B00000  
};  
byte intermedio[] = {  
  B00000,  
  B00000,  
  B00000,  
  B11111,  
  B11111,  
  B00000,  
  B00000,  
  B00000  
};  
byte fleyasube[] = {  
  B00100,  
  B01110,  
  B11011,  
  B10001,  
  B00100,  
  B00100,  
  B00100,  
  B00000  
};  
byte fleyabaja[] = {  
  B00000,  
  B00100,  
  B00100,  
  B00100,  
  B10001,
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
B11011,
B01110,
B00100
};
byte nada[] = {
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000,
B00000
};
void setup() {
attachInterrupt( 0, limitup,RISING);
attachInterrupt( 1, limitdown,RISING);
attachInterrupt( 4 , modo,RISING);
pinMode(R, OUTPUT);
pinMode(G, OUTPUT);
pinMode(B, OUTPUT);
pinMode(giro1, OUTPUT);
pinMode(giro2, OUTPUT);
pinMode(motorv,OUTPUT);
pinMode(salida,OUTPUT);
pinMode(direccion1,INPUT);
pinMode(direccion2,INPUT);
pinMode(limite1,INPUT);
pinMode(limite2,INPUT);
pinMode(entrada1,INPUT);
pinMode(entrada2,INPUT);
pinMode(intencendido,INPUT);
pinMode(valvula,OUTPUT);
Lcd.begin(20,4);
Lcd.createChar(0, customChar);
Lcd.createChar(1, sube);
Lcd.createChar(2, aba);
Lcd.createChar(3, intermedio);
Lcd.createChar(4, fleyasube);
Lcd.createChar(5, fleyabaja);
Lcd.createChar(6, nada);
inicio();
Lcd.clear();
}
void loop() {
if(i>0){
v = map(analogRead(m),0,1023,0,255);
analogWrite(motorv,v);
velo=((v*100)/255);
}
tdeceada=map(analogRead(t),0,1023,0,100);
tsistema=ktc.readCelsius();
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
delay(300);
tempe=round(tsistema);
a = digitalRead(direccion1);
b = digitalRead(direccion2);
c = digitalRead(limite1);
d = digitalRead(limite2);
g = digitalRead(intencendido);
if(!g){
e=false;
f=false;}
else{ e = digitalRead(entrada1);
f = digitalRead(entrada2);}
switch(i){
case 0:opcion0();
break;
case 1:opcion1();
break;
case 2:opcion2();
lcd();
break;
} }
void offup(){
motoroff();
}
void offdown(){
motoroff();
}
void opcion0(){
Lcd.setCursor(0,0);
Lcd.print("SISTEMA OPCION 0");
Lcd.setCursor(0,1);
Lcd.print("POSICION 0 MAQUINA");
if(!c){
Lcd.setCursor(19,3);
Lcd.write((byte)6);
Lcd.setCursor(19,1);
Lcd.write((byte)4);
digitalWrite(giro1,0);
digitalWrite(giro2,1);
Lcd.setCursor(8,3);
Lcd.print("... ");
}
else{ motoroff();
Lcd.setCursor(8,3);
Lcd.print("LISTO");
} }
void opcion1(){
Lcd.setCursor(0,0);
Lcd.print("SISTEMA OPCION 1");
lcd();
comparador1();
if(a or b){
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
pulsadores();
}
else {
motoroff();
Lcd.setCursor(19,3);
Lcd.write((byte)6);
Lcd.setCursor(19,1);
Lcd.write((byte)6);
}}
void opcion2(){
Lcd.setCursor(0,0);
Lcd.print("SISTEMA OPCION 2");
lcd();
digitalWrite(salida,0);
comparador();
}
void limitup(){
motoroff();
funcion=1;
if(i>1){
H=1;
C=0;
}}
void limitdown(){
motoroff();
funcion=1;
if(i>1){
H=0;
C=1;
}}
void modo(){
if (millis() - startTime > timeThreshold) {
startTime = millis();
i=i+1;
Lcd.clear();
motoroff();
if(i==2){
digitalWrite(salida1,1);}
if(i>=3)
i=1;}
}
void comparador(){
if(tempe<tdeceada){
baja();
if(H==1){ funcion=0;}
if(e or f){motoroff();}
else{
if(funcion==0){
digitalWrite(giro1,0);
digitalWrite(giro2,1);
digitalWrite(valvula,0);
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
}
else motoroff();
digitalWrite(valvula,0);
}}
if(tempe==tdeceada){
media();
motoroff();
}
if(tempe>tdeceada){
alta();
if((i==2 and !c)and !f){
digitalWrite(giro2,1);
digitalWrite(giro1,0);
digitalWrite(valvula,1);
}
else motoroff();
digitalWrite(valvula,1);
}}
void lcd(){
  Lcd.setCursor(0,1);
  Lcd.print("Te DECEADA");
  Lcd.setCursor(12,1);
  Lcd.print(tdeceada);
  Lcd.setCursor(0,2);
  Lcd.print("Te SISTEMA");
  Lcd.setCursor(12,2);
  Lcd.print(tempe);
  Lcd.setCursor(16,1);
  Lcd.write((byte)0);
  Lcd.setCursor(17,1);
  Lcd.print("C ");
  Lcd.setCursor(16,2);
  Lcd.write((byte)0);
  Lcd.setCursor(17,2);
  Lcd.print("C ");
  Lcd.setCursor(0,3);
  Lcd.print("Velocidad");
  if(tdeceada<10){
    Lcd.setCursor(13,1);
    Lcd.print(" ");
    Lcd.setCursor(12,2);
    Lcd.print(tempe);
  }
  if(tdeceada<100){
    Lcd.setCursor(14,1);
    Lcd.print(" ");
  }
  Lcd.setCursor(12,3);
  Lcd.print(velo);
  if(velo<10){
    Lcd.setCursor(13,3);
    Lcd.print(" ");
  }
}
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
}  
if(velo<100){  
  Lcd.setCursor(14,3);  
  Lcd.print(" ");  
}  
Lcd.setCursor(17,3);  
Lcd.print("%");  
}  
void baja(){  
  digitalWrite(R,1);  
  digitalWrite(G,1);  
  digitalWrite(B,0);  
  Lcd.setCursor(19,2);  
  Lcd.write((byte)2);  
}  
void media(){  
  digitalWrite(R,1);  
  digitalWrite(G,0);  
  digitalWrite(B,1);  
  Lcd.setCursor(19,2);  
  Lcd.write((byte)3);  
}  
void alta(){  
  digitalWrite(R,0);  
  digitalWrite(G,1);  
  digitalWrite(B,1);  
  Lcd.setCursor(19,2);  
  Lcd.write((byte)1);  
}  
void inicio(){  
  Lcd.setCursor(0,0);  
  Lcd.print(" INICIANDO DJJ-MACK");  
  Lcd.setCursor(0,1);  
  Lcd.print(" Camara de control");  
  Lcd.setCursor(0,2);  
  Lcd.print(" de una reaccio'n ");  
  Lcd.setCursor(4,3);  
  Lcd.print("Exotermica");  
  digitalWrite(R,0);  
  digitalWrite(G,1);  
  digitalWrite(B,1);  
  delay(2500);  
  digitalWrite(R,1);  
  digitalWrite(G,1);  
  digitalWrite(B,0);  
  delay(2500);  
  digitalWrite(R,1);  
  digitalWrite(G,0);  
  digitalWrite(B,1);  
  Lcd.clear();  
  delay(2500);  
}
```

```
void motoroff(){
digitalWrite(giro1,0);
digitalWrite(giro2,0);
}
void comparador1(){
if(tempe<tdeceada){
baja();
}
if(tempe==tdeceada){
media();
}
if(tempe>tdeceada){
alta();
}}
void pulsadores(){
if(a){
if(!c){
Lcd.setCursor(19,3);
Lcd.write((byte)6);
Lcd.setCursor(19,1);
Lcd.write((byte)4);
motoroff();if(e or f){motoroff();}else{
digitalWrite(giro1,0);
digitalWrite(giro2,1);
}}
else motoroff();
}
else
{
if(!d){
Lcd.setCursor(19,3);
Lcd.write((byte)5);
Lcd.setCursor(19,1);
Lcd.write((byte)6);
motoroff();
if(e or f){motoroff();}else{
digitalWrite(giro1,1);
digitalWrite(giro2,0);
}}
else motoroff();
}}
}}
```

2.- Código secundario de implementación para el conteo de pulsos del encoder para el control de posición

```
int CLK=2;
int DT=3;
int LED=5;
int inicio=4;
int off=6;
int anteriorCLK;
int valorCLK;
```

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

```
int valorDT;
long cont=1;
long dato=0;
bool a;
void setup(){
  Serial.begin (9600);
  pinMode(LED, OUTPUT);
  pinMode(inicio,INPUT);
  pinMode(CLK, INPUT);
  pinMode(DT, INPUT);
  pinMode(off, OUTPUT);
  digitalWrite(LED, LOW);
  digitalWrite(off, LOW);
  anteriorCLK=digitalRead(CLK);
  cont=0;
}
void loop(){
  a = digitalRead(inicio);
  if(a){
    dato=cont;
  }
  if((cont==dato)or(cont==0)){
    digitalWrite(LED,1);
  }
  else{digitalWrite(LED,0);}
  Serial.print(cont);
  valorCLK=digitalRead(CLK);
  if(valorCLK!=anteriorCLK){
    valorDT=digitalRead(DT);
    if(valorDT==valorCLK){ //derecha
      cont++;
    }else{ //izquierda
      cont--;
    }
    anteriorCLK=valorCLK;
  }}
}}
```

ANEXO 3

Diagramas de flujo de funcionamiento

Diagrama de funcionamiento general de la Camara de control de temperatura

Juan Manuel Aguñaga Martínez // Agosto 20, 2020

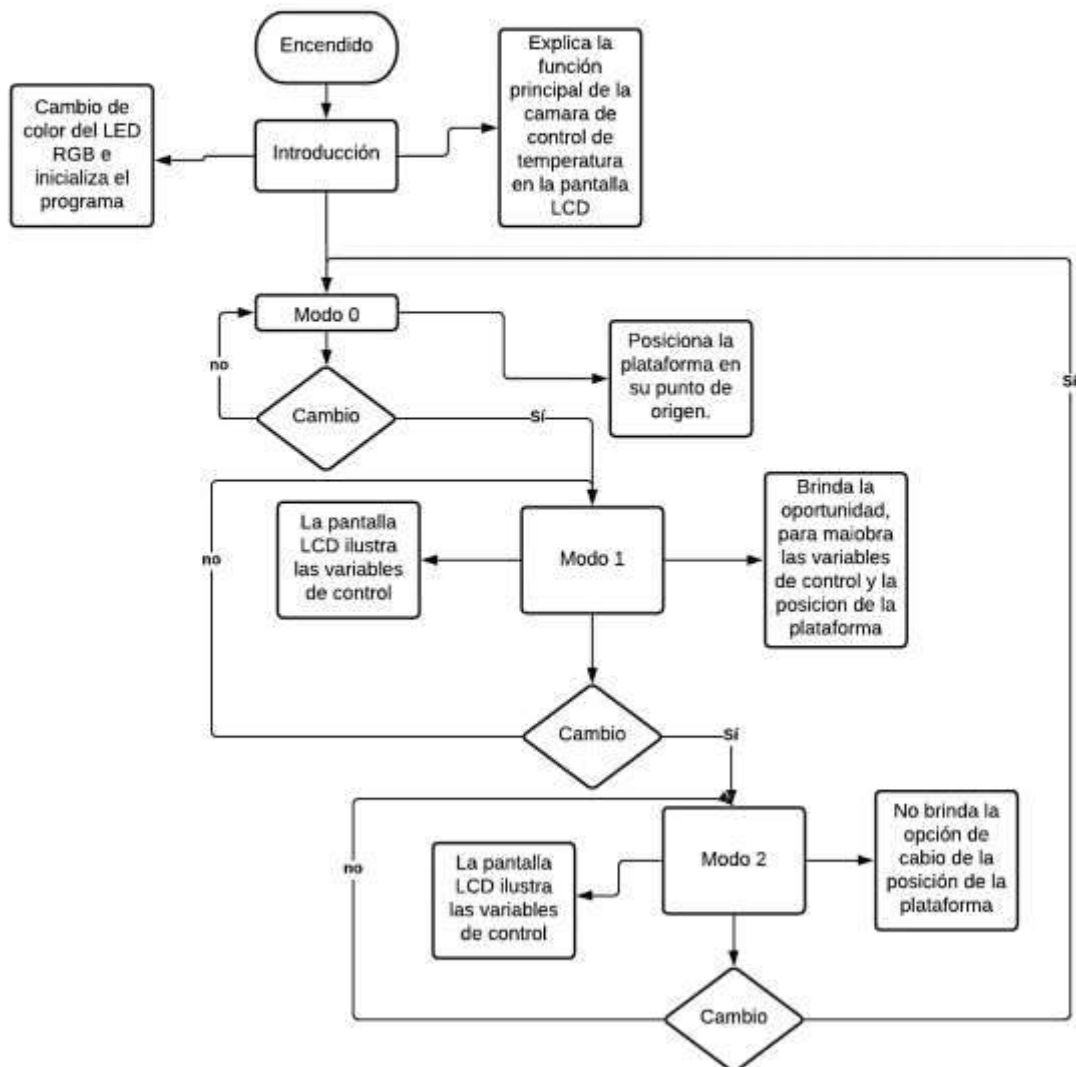


Figura 81. Diagrama de funcionamiento 1 de 3.

Ingeniería Mecatrónica
 Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
 Automatizado

**Diagrama de funcionamiento de la
 Cámara de control de temperatura**
 Juan Manuel Aguiñaga Martínez // Agosto 20, 2020

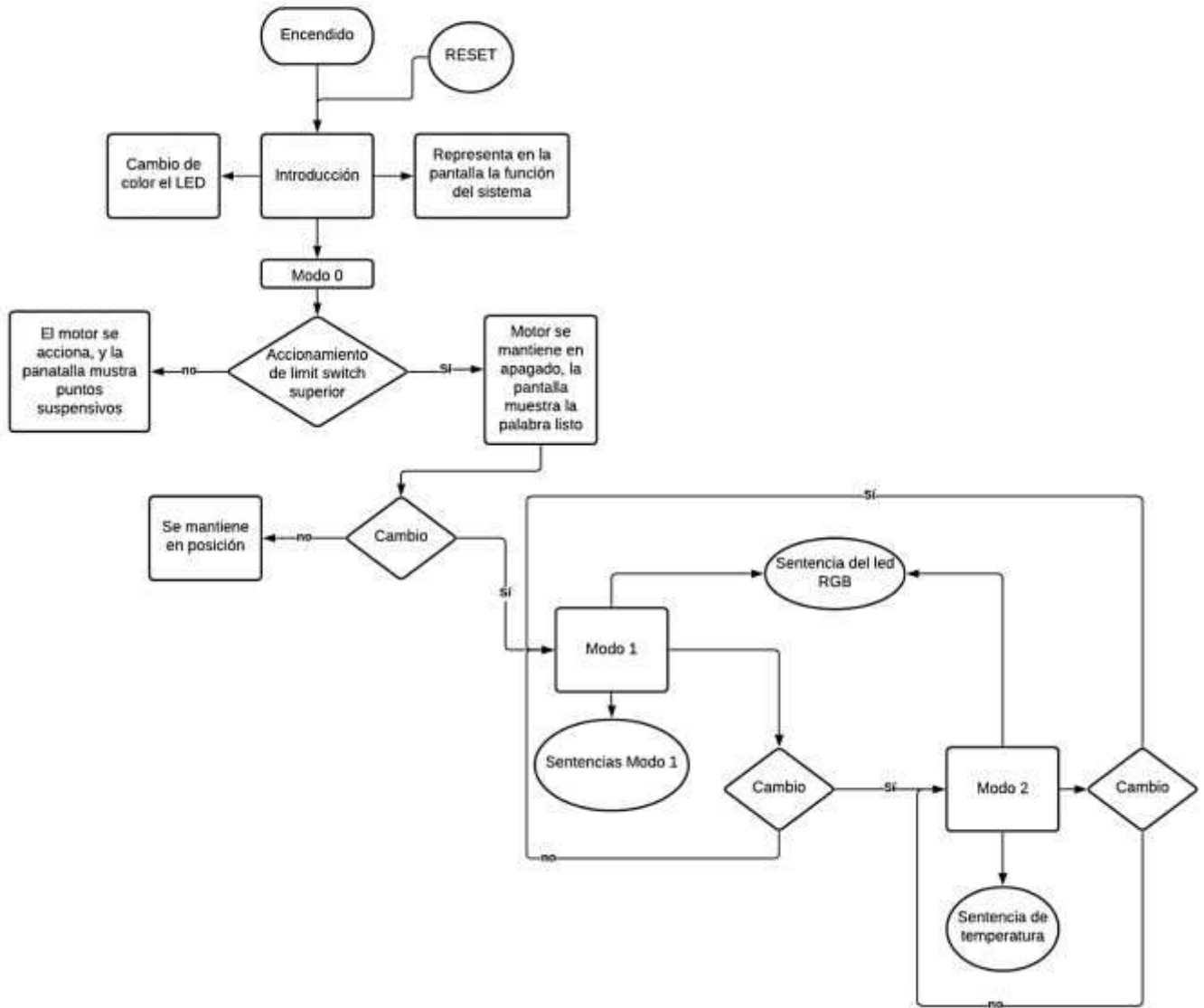


Figura 82. Diagrama de funcionamiento 2 de 3.

Ingeniería Mecatrónica
Cámara de Control de Temperatura de una Reacción Polimérica a través de un Sistema de Enfriamiento
Automatizado

**Diagrama de funcionamiento de la
Camara de control de temperatura**
Juan Manuel Aguñaga Martínez // Agosto 20, 2020

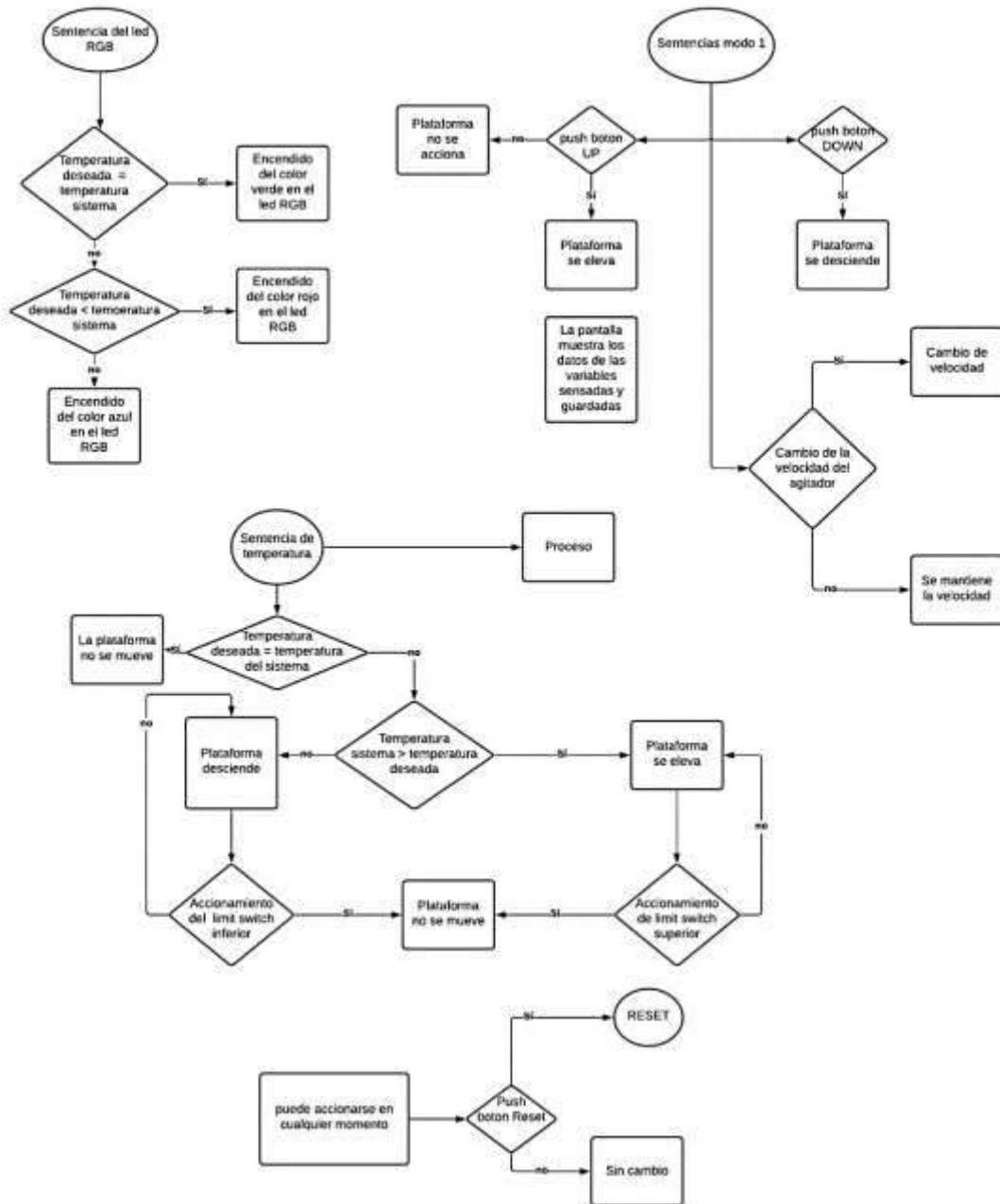


Figura 83. Diagrama de funcionamiento 3 de 3.