

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Programación de un horno convencional para  
realizar recocido a los polímeros de ingeniería**

Trabajo de graduación presentado por George Anthony  
Bandi Abu Gosh para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,  
2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Programación de un horno convencional para  
realizar recocido a los polímeros de ingeniería**

Trabajo de graduación presentado por George Anthony  
Bandi Abu Gosh para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,  
2022



Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Andrés Rodrigo Vianu Najarro

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Andrés Rodrigo Vianu Najarro

  
(f) \_\_\_\_\_  
Gustavo Adolfo Barrera Noriega

  
(f) \_\_\_\_\_  
Laura Maria Roldan Reyes

Fecha de aprobación: Guatemala, 05 de enero de 2022.



<b>Lista de figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>IX</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>3. Objetivos</b>	<b>5</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	5
3.2. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>4. Marco teórico</b>	<b>7</b>
4.1. Estructura y clasificación de los polímeros . . . . .	7
4.1.1. Polímeros de ingeniería . . . . .	8
4.1.2. Recocido en polímeros . . . . .	8
4.1.3. Ciclos de recocido para polímeros en Guatemala . . . . .	11
4.1.4. Pruebas para verificar el recocido . . . . .	11
4.2. Funcionamiento de los hornos eléctricos . . . . .	13
4.2.1. Componentes del horno eléctrico . . . . .	13
4.2.2. Hornos especializados para recocido . . . . .	15
4.3. Mecanismos de transferencia de calor . . . . .	16
4.3.1. Aislantes térmicos . . . . .	17
4.3.2. Tipos de aislantes . . . . .	17
4.4. Sistemas de control . . . . .	18

<b>5. Metodología</b>	<b>21</b>
5.1. Descripción de metodología	21
5.2. Identificación de necesidades	22
5.3. Definición de requisitos	23
5.4. Diseño y cálculos	23
5.4.1. Selección del horno y sus componentes	23
5.4.2. Diseño del circuito eléctrico	25
5.4.3. Elaboración del programa	26
5.5. Fabricación	29
5.6. Pruebas	31
<b>6. Resultados</b>	<b>33</b>
<b>7. Discusión</b>	<b>43</b>
<b>8. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>49</b>
<b>10. Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>53</b>

---

## Lista de figuras

---

1. Módulo elástico en función de la temperatura . . . . .	10
2. Durómetro . . . . .	12
3. Escalas Shore . . . . .	12
4. Temporizador . . . . .	14
5. Termostato . . . . .	14
6. Relé . . . . .	15
7. Flujos de aire . . . . .	16
8. Gráfica de control encendido y apagado . . . . .	19
9. Esquema de conexión del horno . . . . .	26
10. Esquema de conexión del horno . . . . .	26
11. Diagrama de flujo del programa de Arduino . . . . .	28
12. Horno tostador sin carcasa . . . . .	29
13. Adición del aislante térmico . . . . .	30
14. Imagen final del horno . . . . .	30
15. Prueba acrílico . . . . .	31
16. Gráfica temperatura vs tiempo del ciclo teórico . . . . .	35
17. Gráfica temperatura vs tiempo . . . . .	36
18. Gráfica temperatura vs tiempo . . . . .	37
19. Gráfica temperatura vs tiempo . . . . .	38
20. Gráfica temperatura vs tiempo . . . . .	39
21. Gráfica temperatura vs tiempo . . . . .	40
22. Prueba Policarbonato . . . . .	41
23. Manual de uso del horno . . . . .	53
24. Programa parte 1 . . . . .	54
25. Programa parte 2 . . . . .	55
26. Programa parte 3 . . . . .	56
27. Programa parte 4 . . . . .	57
28. Programa parte 5 . . . . .	58

29. Documento prueba recocido parte 1	59
30. Documento prueba recocido parte 2	60
31. Documento prueba recocido parte 3	61
32. Documento prueba recocido parte 4	62
33. Documento prueba recocido parte 5	63

---

## Lista de cuadros

---

1. Ciclos de recocido . . . . .	11
2. Requisitos de resultados . . . . .	23
3. Requisitos de seguridad . . . . .	23
4. Requisitos de operación . . . . .	23
5. Requisitos de materiales . . . . .	23
6. Variables ingresadas por el usuario . . . . .	27
7. características de recocido de los polímeros locales . . . . .	33
8. Especificaciones del horno tostador seleccionado . . . . .	34
9. Listado de materiales y precio . . . . .	34
10. Prueba 1 antes vs después de recocer el acrílico . . . . .	35
11. Prueba 2 antes vs después de recocer el acrílico . . . . .	36
12. Prueba 3 antes vs después de recocer el acrílico . . . . .	37
13. Prueba 4 antes vs después de recocer polipropileno . . . . .	38
14. Prueba 5 antes vs después de recocer Vekton . . . . .	39
15. Resultado de requisitos . . . . .	42
16. Consumo eléctrico . . . . .	42



En la Universidad del Valle de Guatemala actualmente no existe ningún horno que permita realizar tratamientos térmicos para polímeros ingeniería, lo cual limita su capacidad de maquinabilidad y aumenta los costos en ciertos proyectos ya que se debe recurrir a otra entidad para poder realizar el recocido del material. El proyecto constó en reprogramar un horno convencional que cuente con sistema de convección para que sea capaz de recocer polímeros de ingeniería que se distribuyen en el mercado local. Para esto se realizó un programa en Arduino que sea capaz de simular los ciclos de recocido de los polímeros utilizando los parámetros que ingresa el usuario. Para poder controlar la temperatura del horno se utilizó un sistema de control de encendido y apagado utilizando un termopar tipo K, Arduino uno y un relé de estado sólido. Se logró realizar el programa que regule el ciclo de recocido de los polímeros establecidos utilizando el sistema de control de encendido y apagado. Los resultados que se obtuvieron del cambio de dureza del polímero fueron satisfactorios ya que todos presentaron una disminución en su dureza lo cual indica que si se cumplió el propósito tratamiento térmico. Se recomienda utilizar un horno industrial con convección y un microcontrolador más especializado para poder tener un horno de recocido que sea capaz de recocer una alta cantidad de polímeros e incluso ciertos metales.



---

## Abstract

---

At the Universidad del Valle de Guatemala there is currently no furnace that allows heat treatments for engineering polymers, which limits its machinability and increases costs in certain projects since outside services must be used to be able to anneal the material. The project consisted on reprogramming a conventional oven with convection system so that it is capable of annealing engineering polymers that are distributed in the local market. For this, a program was made in Arduino that is capable of simulating the annealing cycles of polymers using the parameters entered by the user. In order to control the temperature of the oven, an on and off control system was used using a type K thermocouple, Arduino uno and a solid state relay. It was possible to carry out the program that regulates the annealing cycle of the established polymers using the on and off control system. The results obtained from the change in hardness of the polymer were satisfactory since all presented a decrease in hardness, which indicates that if the heat treatment purpose was fulfilled. It is recommended to use an industrial convection oven and a more specialized microcontroller in order to have an annealing oven that is capable of annealing a higher amount of polymers and even certain metals.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

En la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) en el 2020 se realizó un proyecto utilizando un polímero de ingeniería llamado PSU (*Polysulfone*). El proveedor de dicho polímero sugirió un tratamiento térmico de recocido para evitar fracturas durante el maquinado debido a la alta tensión interna y dureza del material. El recocido es un proceso que se encarga de eliminar la tensión interna del material, por ende, se reduce la dureza lo cual permite maquinarlo con mayor facilidad. Dicho proceso se realizó en Estados Unidos, en la Universidad de Colorado en Boulder, debido a que en Guatemala no se encuentra una empresa que cuente con un equipo especializado para realizar recocidos en polímeros de ingeniería.

La Universidad de Colorado en Boulder realiza los tratamientos térmicos con un horno convencional reprogramado utilizando un microcontrolador, por lo tanto, se tomó la idea de realizar el mismo proyecto en la UVG. El desarrollo del proyecto se basó en delimitar los polímeros de ingeniería encontrados en el mercado local con sus respectivos ciclos de recocido y en la reprogramación y modificación del horno convencional para que sea capaz de simular los ciclos de recocido del polímero que se desea recocer.

Este proyecto tiene como fin ampliar la capacidad de maquinabilidad y de tratamientos térmicos que se pueden realizar en la UVG. Para cumplir con dicho objetivo se determinó los ciclos de recocido de los polímeros de ingeniería distribuidos en el mercado local. Con base en dichos datos, se seleccionó y reprogramo un horno convencional que sea capaz de simular los ciclos de recocido. Por último, se realizó pruebas de dureza utilizando el estándar ISO 868 para verificar si el horno cumple su función.



## CAPÍTULO 2

---

### Justificación

---

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la UVG tiene capacidad para realizar varios procesos de maquinado en distintos materiales para fines didácticos y/o investigación. Para facilitar el maquinado de polímeros, obtener mejor precisión con repetibilidad se debe recocer el material para reducir su dureza, ablandarlo y eliminar las tensiones internas que se generan al modificar el material de su estado natural. Por lo tanto, el Departamento de Ingeniería Mecánica está interesado en tener la disponibilidad de un horno de recocido para polímeros de ingeniería.

La realización del horno permitiría realizar los recocidos a un menor costo y más rápido, eliminando la tercerización del servicio. Este proyecto también servirá como apoyo para los estudiantes en los temas de tratamientos térmicos debido a que les permitirá tener un aprendizaje más completo y práctico en los procesos de manufactura.

Para este fin, se reutilizará un horno de convección para transformarlo en un horno capaz de recocer. También se incorporará una interfaz a la cual se le puedan ingresar los datos del material que se desea recocer y que este realice un ciclo de recocido para el material deseado.



### 3.1. Objetivo general

- Adaptar y programar un horno de convección para recocer polímeros de ingeniería.

### 3.2. Objetivos específicos

- Establecer las características de recocido de los polímeros de ingeniería mayormente distribuidos en el mercado local.
- Seleccionar un horno de convección que tenga las características necesarias para recocer los polímeros de ingeniería.
- Elaborar un programa que sea capaz de regular los ciclos de recocido según el polímero y/o parámetros determinados por el usuario.
- Llevar a cabo pruebas de recocido utilizando un polímero de ingeniería con el horno de convección reprogramado.
- Realizar un instructivo de cómo utilizar el programa que controla el horno de convección.



### 4.1. Estructura y clasificación de los polímeros

Los polímeros se forman mediante la unión de moléculas de bajo peso molecular llamadas monómeros, Estos se caracterizan por tener una baja densidad, bajo punto de fusión y poca conductividad térmica o eléctrica. Los polímeros se pueden clasificar según distintas características como su estructura, origen, comportamiento térmico o la unión de sus monómeros (Benavente, 2014).

Los polímeros se pueden dividir en tres grupos básicos los cuales son: elastómeros, termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos son un grupo de polímeros que se caracteriza porque se vuelve deformable a temperaturas relativamente altas y se puede moldear, al dejar enfriar este material se endurece. Este tipo de polímero se utiliza generalmente para productos de consumo y productos médicos (Benavente, 2014).

Los elastómeros son un tipo de material el cual se caracteriza porque puede restaurar su estado original después de estar sometido a una fuerza externa, estos se deforman por medio de una tensión que se puede restaurar. Cabe mencionar que no necesariamente todos los materiales elásticos son considerados elastómeros, ya que debe poder regresar a su estado original. Generalmente este tipo de polímeros se utiliza para llantas de carros y gomas naturales (Benavente, 2014).

Los termoestables son polímeros que se forman mediante aditivos, plástico y resina endurecible. Este líquido que se forma por la combinación de estos productos es insoluble e infusible y no se puede volver a fundir para remodelar. Se caracterizan por tener una alta resistencia a los impactos, permeabilidad y resistente a temperaturas relativamente altas. Los plásticos termoestables comunes son el epoxi, plásticos

fenólicos y poliéster.

También se pueden categorizar según como está formada su estructura interna, éstos se clasifican en cristalinos, semi cristalinos o amorfos. Los polímeros cristalinos se identifican por tener las moléculas ordenadas en las tres dimensiones. Los polímeros amorfos son irregulares ya que no cuentan con una distribución de sus moléculas ordenadas lo cual no le permite ser cristalino y los polímeros semi cristalinos están compuestos por una fracción másica cristalina y el resto es un estado amorfo (Benavente, 2014).

#### 4.1.1. Polímeros de ingeniería

Los polímeros de ingeniería son considerados materiales que pueden ser utilizados en aplicaciones de ingeniería y cuentan con características o funcionamiento similar a los metales. Cuentan con la gran ventaja que son más fáciles de procesar y son más económicos para las aplicaciones de ingeniería. Estos materiales generalmente cuentan con las siguientes características: resistencia a temperaturas altas, excelente maquinabilidad, resistencia química y resistencia al desgaste.

Las propiedades mecánicas y físicas de los polímeros están estrechamente relacionadas con la estructura y la composición química del material. Los polímeros cuentan con diferentes propiedades mecánicas que son influenciadas por su proceso de producción. Para poder modificar dichas propiedades se pueden realizar distintos tratamientos térmicos los cuales se encargan de modificar la composición interna y química del material. Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos como el recocido, revenido o normalización.

#### 4.1.2. Recocido en polímeros

El recocido es un tratamiento térmico el cual consiste en calentar el material a la mitad de la temperatura de fusión o temperatura de transición vítrea por un tiempo moderado y luego se enfría de manera controlada hasta que el polímero llegue a la temperatura del ambiente. Tiene la finalidad de ablandar el material mediante una alteración de las propiedades físicas, esto lo realiza mediante la recuperación de la estructura interna o la eliminación de tensiones internas del material (Di Vona, 2016).

El proceso de recocido consta de tres etapas las cuales son la recuperación, recristalización y el crecimiento del grano. La recuperación es la que le otorga el ablandamiento al material por medio de la eliminación de defectos como dislocaciones o tensiones internas, esta etapa ocurre en la temperatura más baja del proceso y los granos no tienen cambio físico. En la etapa de recristalización los granos libres se nuclean y aumentan su tamaño para reemplazar los granos deformados por las tensiones

internas. Por último, si se permite la continuación del recocido ocurre la tercera etapa en la cual los granos crecen a su límite y la microestructura del material comienza a endurecerse lo que causa que el material pierda su resistencia. (Di Vona, 2016)

El recocido se encarga de modificar la estructura morfológica de los polímeros, esta estructura morfológica generalmente no se encuentra en un estado de equilibrio. Al realizar el tratamiento térmico de recocido se aprovecha a reorganizar esta estructura en un orden con poca energía libre. Pueden ocurrir dos tipos de cambio de estructura: irreversible y cuasi-reversible, estos tipos de cambios dependen del tiempo de recocido y la temperatura a la que es sometido el polímero, entre más alta la temperatura y mayor el tiempo es más probable que los cambios en el polímero sean irreversibles debido al gran crecimiento de la estructura cristalina (Aly, 2015).

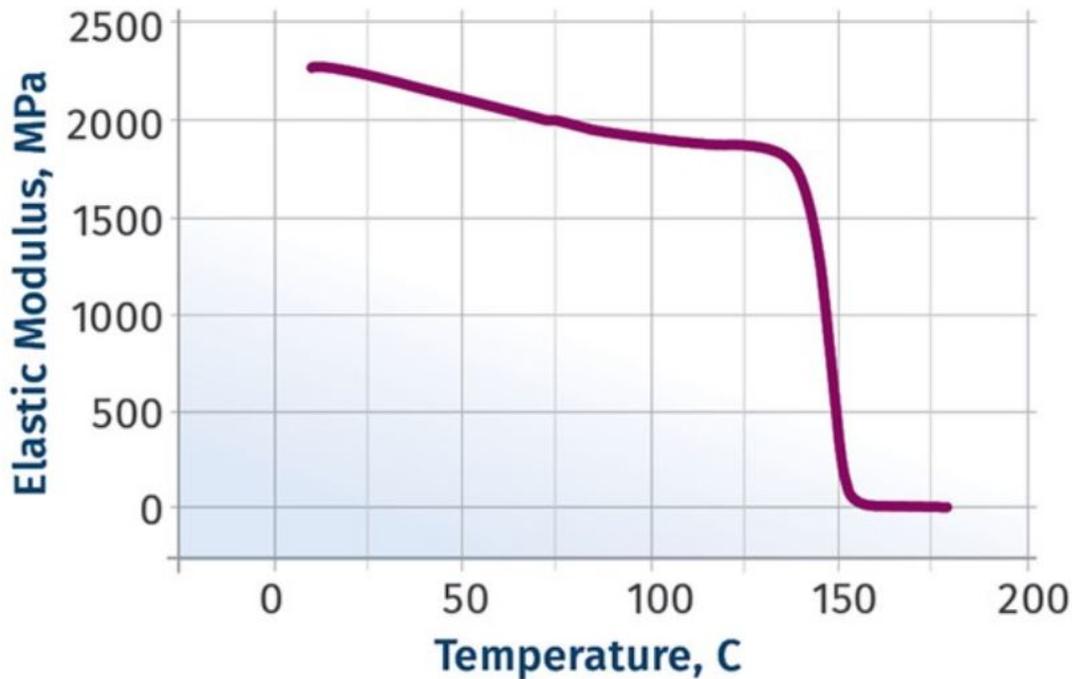
En el proceso de recocido es muy importante tomar en cuenta variables como el espesor de la pieza, la razón de calentamiento, el tiempo que se sostiene el polímero en la temperatura de recocido y la razón de enfriamiento del polímero, ya que se ha comprobado que las propiedades mecánicas del polímero varían significativamente dependiendo de estos parámetros. Un claro ejemplo es que cuando la razón de enfriamiento se disminuye la dureza del polímero aumenta y el coeficiente de fricción se reduce (Aly, 2015).

Las variables mencionadas en el párrafo anterior afectan seriamente el resultado del recocido. El espesor de la pieza influye en el tiempo que se debe recocer el polímero debido a que estos son materiales cuentan con poca conducción térmica por lo que es necesario considerar el espesor para poder asegurar que la pieza llegue a la temperatura de recocido de forma manera uniforme. Generalmente se considera que por cada 6 mm (0.25 in) se le agregue 30 min al tiempo de recocido (Sepe, 2020a).

Otro aspecto que se tiene que tomar en cuenta es la tasa de cambio de temperatura, es recomendable no aumentar mas de 90 grados Fahrenheit por hora el polímero. Sin embargo, el proceso que más influye en el resultado es la tasa de enfriamiento, generalmente los procesos de recocido fallan porque el proceso de enfriamiento se realiza muy rápido impidiendo que el polímero se puede reestructurar internamente de manera correcta. Para este proceso se recomienda no utilizar un gradiente de enfriamiento mayor a 50 grados Fahrenheit por hora (Sepe, 2020a).

El recocido, dependiendo de la estructura del polímero y grado de cristalización puede tener diferentes objetivos. En los polímeros amorfos, el recocido tiene como objetivo reducir el estrés interno de la pieza para obtener un nivel de cristalinidad que no se puede alcanzar en el proceso de moldeo (Sepe, 2020c). En los polímeros semi cristalinos, el fin es establecer un nivel de cristalinidad que no se puede obtener con el proceso de manufactura del polímero, dicho nivel de cristalinidad depende de la estructura química del material. Los niveles óptimos de cristalinidad mejoran la resistencia a la fluencia, dureza, resistencia a la fatiga, módulo de elasticidad y la estabilidad dimensional de la pieza (Sepe, 2020d).

Figura 1: Módulo elástico en función de la temperatura



(Sepe, 2020c)

Los polímeros entrecruzados se caracterizan por estar unidos por medio de enlaces covalentes los cuales impiden el plegamiento de las cadenas, por lo tanto, no forman cristales. El recocido en este tipo de polímero se enfoca en obtener cierto nivel de entrecruzamiento en los termoestables que no es posible alcanzar en su fabricación. Los polímeros entrecruzados que cuentan con un mayor nivel de entrecruzamiento tienen características similares a los polímeros cristalinos. En los termoplásticos, el objetivo del recocido es similar al de los entrecruzados, se encarga de aumentar la cristalinidad del polímero por medio de un aumento en el nivel de entrecruzado del polímero (Sepe, 2020b).

El recocido otorga muchos beneficios en la estructura mecánica del material, es importante realizar el tratamiento térmico, ya que se encarga de remover el estrés interno (tensión) que se produce en la pieza a la hora de ser fabricada. Al realizar el recocido a la pieza el material se ablanda, reduce su dureza y elimina la acritud que se produce en los trabajos en frío. Esto beneficia al material, ya que facilita el mecanizado de la pieza y la convierte menos propensa a roturas. Este tratamiento térmico aumenta la ductilidad del material, la plasticidad, tenacidad y el alargamiento a la rotura.

La ventaja principal del recocido, especialmente en aplicaciones de ingeniería, es que permite aumentar las aplicaciones de un material. Esto se logra debido a que el recocido es un tratamiento térmico en el cual se puede modificar las variables del proceso para obtener las propiedades mecánicas que requiere la aplicación que se le

desea otorgar al material (Aly, 2015).

### 4.1.3. Ciclos de recocido para polímeros en Guatemala

Cuadro 1: Ciclos de recocido

Polímero	Calentar	Sostener temperatura	Enfriamiento
Nylon 6	4 horas a 300 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Teflón (PTFE)	3 horas 525 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acrílico	2 horas 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Policarbonato	4 horas 275 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Peek (Polieteretercetona)	2 horas 300 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Ultem (Polyetherimide)	4 horas a 390 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Udel (Polisulfone)	4 horas a 330 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polipropileno	2 horas a 185 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
ABS	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acetal	2 horas a 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polietileno (alta densidad)	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
Polietileno (baja densidad)	2 horas a 175 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
PET (Ertalyte)	4 horas a 350 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora

(Boedeker, 2019)

### 4.1.4. Pruebas para verificar el recocido

Para verificar si el proceso de recocido fue efectivo se debe medir la dureza del material antes y después del tratamiento térmico. La dureza del material debe ser menor posterior al recocido, ya que el objetivo del recocido es reducir la dureza del material para poder maquinarlo con mayor facilidad (Recreus, 2021).

El durómetro es una herramienta de medición que se utiliza para medir la dureza de los materiales. Los durómetros funcionan mediante la aplicación de una carga en la superficie del material, la carga y el elemento que se encarga de penetrar la superficie se escoge dependiendo del tipo de material. Luego, al aplicar la carga, el elemento penetrador deja una huella en la superficie del material. Para calcular la dureza del material se mide la profundidad de la huella y se utiliza la escala Shore D para determinar el valor de la dureza (Recreus, 2021).

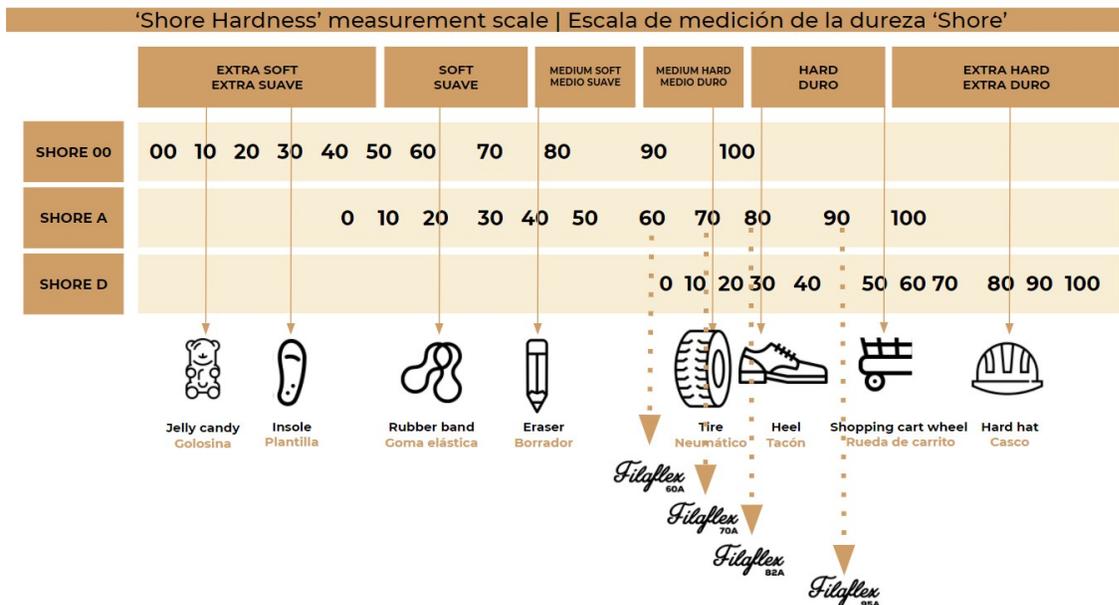
Figura 2: Durómetro



(Amazon,S.f)

La dureza shore es una medida de la dureza elástica de los materiales que se determina mediante la reacción elástica del material cuando se deja caer un objeto. Existen diferentes escalas de dureza shore, la escala Shore A se utiliza para los elastómeros más blandos o con poca dureza y la escala Shore D se utiliza para medir la dureza de los elastómeros más duros o rígidos. Cuando el durómetro Shore A marca un valor superior a los 90 HA es recomendable utilizar la escala Shore D para obtener una mayor precisión en el resultado.

Figura 3: Escalas Shore



(Recreus, 2021)

La norma ISO 868 es un método para la determinación de la dureza de indentación por medio de un por las normas establecidas por el estándar ISO 868. Para la prueba se debe utilizar un durómetro con la escala Shore A o D. El procedimiento consta en colocar el material en una posición horizontal sobre una superficie dura que sea totalmente plana. Luego, se debe colocar la punta penetradora del durómetro en una posición vertical a una distancia de 10 mm del borde de la pieza y se aplicará presión de manera rápida asegurando un contacto eficiente entre la pieza y el durómetro. Por último, se debe repetir 5 veces todo el proceso en diferentes puntos del material para poder obtener el valor promedio de dureza. (ISO, 2003)

## 4.2. Funcionamiento de los hornos eléctricos

Los hornos eléctricos funcionan por medio de resistencias que convierten la energía suministrada en calor, esto se da mediante el efecto Joule, el cual consiste en producir calor mediante el choque de electrones. Este proceso es constante cuando se encuentra conectado debido a que los átomos y electrones se mueven de manera muy desordenada. La potencia de los hornos se mide dependiendo de la cantidad de kW de corriente eléctrica que consumen y esta potencia es directamente proporcional a la cantidad de calor que emiten. (Quiminet, 2019).

Los hornos eléctricos de convección cuentan con un ventilador y un área de escape que benefician la circulación del aire, por lo tanto, el aire se reparte más uniforme dentro del horno. Estos son los hornos eléctricos más eficientes ya que debido a su sistema para circular el aire la comida o el objeto requiere menos tiempo para llegar al objetivo (Quiminet, 2019).

### 4.2.1. Componentes del horno eléctrico

#### Temporizadores

Los temporizadores son dispositivos electrónicos o mecánicos (analógico) que se utilizan para controlar la conexión o desconexión de un circuito, estos dispositivos tienen la capacidad de medir el tiempo. Los temporizadores mecánicos están constituidos por un juego de engranes y resortes, mientras que los electrónicos están conformados por resistencias, circuitos integrados y capacitores lo cual lo convierten en un dispositivo mucho más preciso y pequeño que el mecánico. El temporizador electrónico tiene la capacidad de realizar ciclos de conexión y desconexión por lo que lo es más eficiente que utilizar el mecánico para la realización de ciclos (CUEVA, 2018).

Figura 4: Temporizador

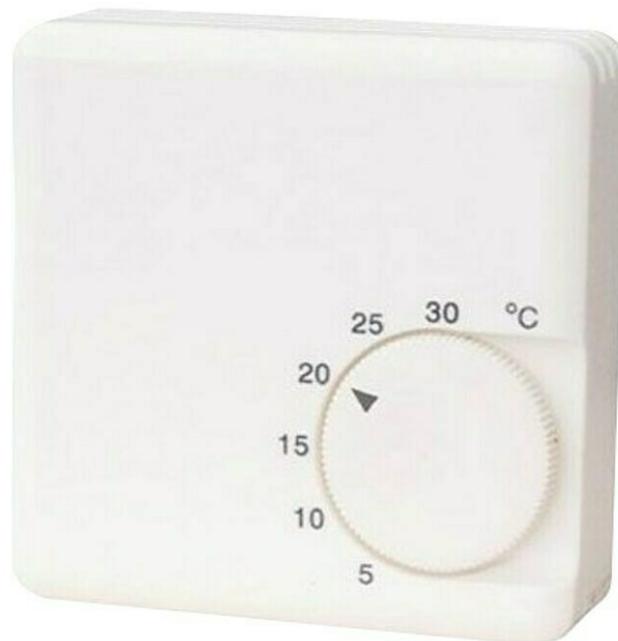


(CUEVA, 2018)

## Termostatos

Los termostatos son componentes que tienen como finalidad proporcionar un sistema de control que abre o cierra un circuito eléctrico dependiendo de la temperatura. En el caso de los hornos eléctricos los termostatos funcionan como llaves de paso las cuales limitan el paso de la corriente eléctrica cuando el horno llega a cierta temperatura. Cuando la temperatura del horno disminuye el termostato libera el paso de corriente para poder reponer la temperatura perdida.

Figura 5: Termostato

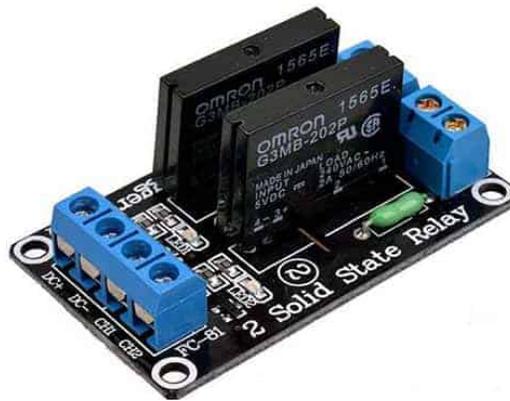


(BAUHAUS, 2021)

## Relés

Los relés son dispositivos que tienen como fin activar un circuito, básicamente su función es cerrar o abrir un circuito mediante un electroimán y una bobina. Los relés son interruptores que se accionan de manera electrónica y estos dispositivos tienen la gran ventaja que vienen en diferentes tamaños, potencia y forma. Existen diferentes tipos: relé electromecánico, relé de estado sólido, relé de corriente alterna, relé temporizador, relé de Arduino y relé térmico. Los relés producen una gran ventaja debido a que se pueden utilizar a distancia mediante pequeñas señales de control y este también puede manejar altos voltajes o diferencial de potencia.

Figura 6: Relé



(Unisalia, [2020](#))

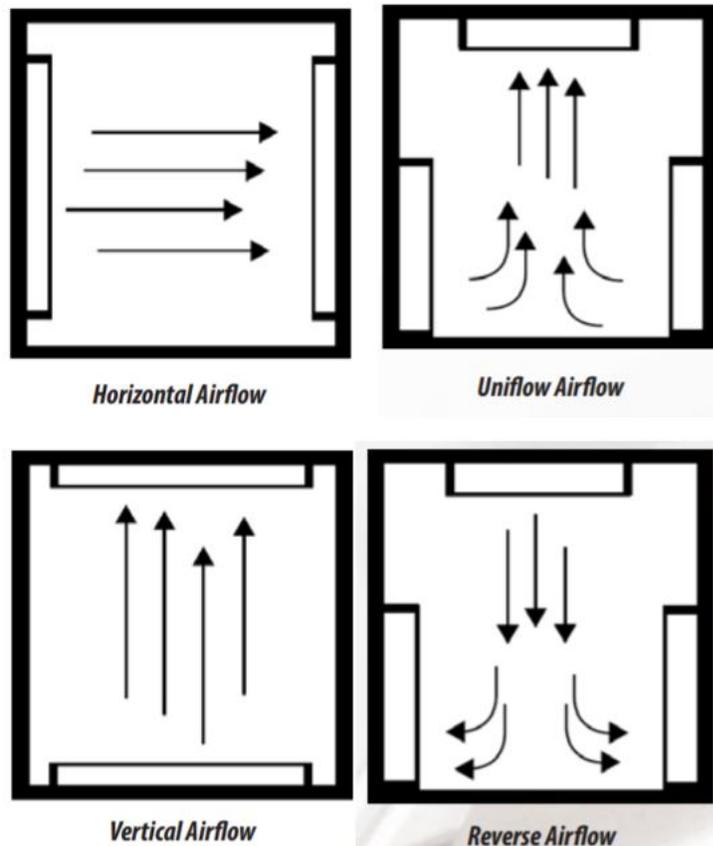
### 4.2.2. Hornos especializados para recocido

Existen diferentes tipos de hornos especializados para recocer materiales. Estos se pueden categorizar en horno discontinuo o continuo. Los hornos discontinuos son los más comunes y parecidos a los convencionales, estos se utilizan para calentar materiales o componentes mientras el material permanece en un estado estático. Los hornos continuos se caracterizan por tener bandas o equipo especializado para mover el material a lo largo del horno, estos se utilizan generalmente cuando se requiere una gran cantidad de producción en un corto tiempo. La ventaja de este horno continuo es que su aislamiento permite que la temperatura del horno sea uniforme durante todo el recorrido.

Los hornos especializados para recocido toman en cuenta características como las pérdidas de calor en las paredes del horno, la distribución del aire y el flujo del aire. Todo esto con el objetivo de aumentar la eficiencia del horno y realizar el tratamiento térmico de la manera más uniforme posible. Es importante tomar en cuenta que existen cuatro tipos de flujo de aire. Los cuales son: flujo de aire horizontal el cual

consiste en suministrar aire por un lado y dejarlo salir por el lado opuesto, el flujo de aire vertical el cual se basa en suministrar aire por debajo o por arriba del horno y dejarlo escapar por el lado opuesto, el flujo de aire uniforme el cual consiste en suministrar aire en ambas partes inferiores y se escapa el flujo por la parte superior y por último, el flujo de aire uniforme inverso el cual consiste en suministrar aire en la parte superior y se escapa por las partes inferiores del horno.

Figura 7: Flujos de aire



(«*High-Performance Annealing Ovens and Annealing Furnaces*», 2020)

### 4.3. Mecanismos de transferencia de calor

Existen diferentes formas en las que se puede dar la transferencia de calor, las cuales se clasifican en conducción, convección y radiación. El método de conducción consiste en transferir la energía que tiene un sólido, gas o líquido por medio de choques moleculares en el cual no existe un intercambio de materia. En esta se transfiere la energía del cuerpo con mayor energía al de menor energía, lo cual se traduce en un flujo de energía de las temperaturas más altas a las más bajas (Zohuri & Fathi, 2015).

La convección consiste en la transferencia de energía mediante el movimiento de masa que tiene un fluido que se encuentra en contacto con una superficie. Esta transferencia de calor ocurre únicamente si existe un diferencial de temperatura entre la superficie y el fluido. Cabe mencionar que conforme la velocidad del fluido es directamente proporcional a la transferencia de calor, lo cual quiere decir que entre mayor sea la tasa de transferencia de calor aumenta (Viskanta, 1966).

La transferencia de calor por convección se puede clasificar en forzada o natural. La convección forzada se produce cuando el fluido es obligado a desplazarse en determinada superficie mediante una fuerza externa como una bomba o un dispositivo de succión. El segundo caso, la convección natural, se da cuando el fluido se desplaza por fuerzas de empuje las cuales son inducidas por un diferencial de temperatura y densidad, básicamente ocurre por las condiciones del entorno que se encuentra dicho fluido (Viskanta, 1966).

Por otro lado, la radiación, la cual ocurre por la energía que se emite en forma de ondas electromagnéticas, estas ondas se generan por medio de los cambios en la configuración electrónica de los átomos. La transferencia de calor por medio de radiación no requiere de un mecanismo como una superficie o desplazamiento para que este presente. Cabe mencionar que cualquier cuerpo que tenga una temperatura mayor al cero absoluto emite radiación y este método de transferencia de calor es la más rápida ya que ocurre a la velocidad de la luz y está presente en ambientes al vacío (Viskanta, 1966).

### 4.3.1. Aislantes térmicos

El aislamiento térmico tiene como objetivo la reducción de la transferencia de calor entre objetos que están en contacto o en radiación. Estos están fabricados con materiales que cuentan con una baja capacidad de conducción térmica con el objetivo de reducir la cantidad de transferencia de calor en el sistema (Connor, 2019).

Los aislantes térmicos en los intercambiadores de calor se utilizan principalmente para reducir las pérdidas de energía en el sistema. Los aislantes térmicos proveen una barrera térmica entre la tubería y el ambiente lo que causa que la transferencia de calor aumente entre los fluidos de trabajo y por lo tanto genera una mayor eficiencia en el sistema. También se utilizan los aislantes térmicos para la protección del sistema y personas, ya que evita las condensaciones superficiales, cambios de temperatura en el ambiente y altas temperaturas en las superficies cercanas o de la tubería (Connor, 2019).

### 4.3.2. Tipos de aislantes

La manta de fibra cerámica es un material aislante para superficies con altas temperaturas. Este material se produce utilizando filamentos de sílice de alúmina combinados con fibras orgánicas y el proceso mediante el cual se produce el material es el

centrifugado y soplado. Generalmente se utilizan en aplicaciones que manejan temperaturas superiores a 500 grados Celsius, tales como: hornos industriales, protección contra el fuego, tuberías y equipos radiantes.

La lana de vidrio es una fibra mineral que está fabricada con filamentos de vidrio que son unidos mediante un aglutinante, este material aprovecha el aire que está atrapado entre sus fibras para reducir la transferencia de calor en el sistema. Este material se caracteriza por ser acústico, reduce la cantidad de sonido que produce el sistema y es fácil de manejar. La lana de vidrio generalmente se utiliza en aislamientos de techo, conductos de aire acondicionado, división de interiores y aislamiento acústico en suelos.

El poliestireno es un polímero que se obtiene mediante la polimerización del estireno monómero. Éste es un plástico versátil, duro, resistente al agua y sólido que cuenta con una baja capacidad de conductividad térmica. Los aislantes térmicos de poliestireno se utilizan generalmente en techos, paredes, refrigeradoras, neveras y en instalaciones industriales que tienen como objetivo retener el calor en un determinado espacio.

La lana de roca es un aislamiento mineral que se produce con roca volcánica y mineral coque. Se calienta a temperaturas superiores a 1500 grados Celsius hasta que la materia prima llegue a estado líquido y se deshile. Luego, se compactan estas fibras y se transforman a placas, rollos o granel. La lana de roca se utiliza para aislar pisos, paredes, techos, tuberías y equipo industrial. Tiene la gran ventaja que protege contra el fuego y al quemarse no produce humos tóxicos.

## 4.4. Sistemas de control

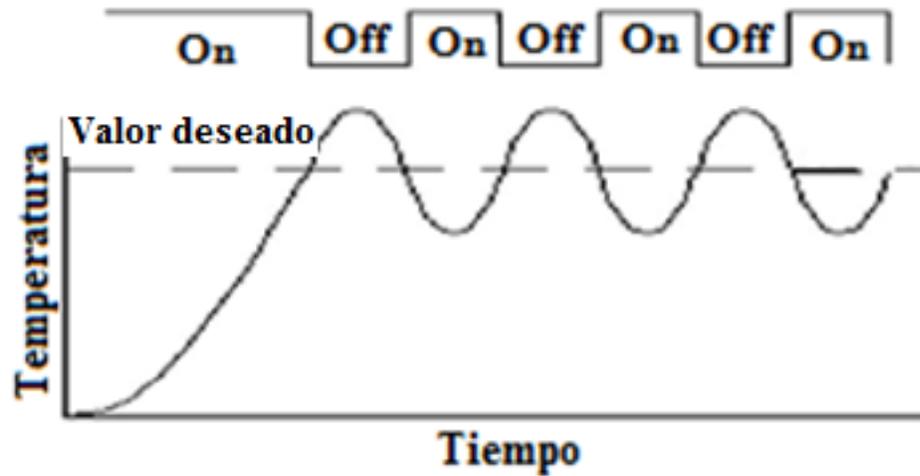
Un sistema de control es un dispositivo encargado de administrar, Ordenar, dirigir o regular otro sistema con el fin de obtener los resultados esperados o evitar fallos. Estos sistemas en la actualidad se utilizan a gran escala debido a la automatización que genera utilizar estos sistemas. Existen dos tipos de sistema de control: los de control automático, los cuales se encargan de realizar de forma automática procesos exactos, rápidos e independientes. Funcionan para medir variables y acompañar los datos a la salida. Los sistemas de control de lazo abierto se caracterizan por no depender de la salida de datos y son un control programado únicamente para realizar una función o tarea, un claro ejemplo es una lavadora que está programada solo para hacer el lavado, pero no se mide la calidad de dicho lavado (Sasir, 2020).

Los controladores de temperatura se encargan de facilitar la producción por medio de la automatización de los procesos y su fin es mantener la temperatura del sistema en los rangos deseables según el proceso que se está realizando. Para poder realizar un sistema de control de temperatura es necesario utilizar un sensor de temperatura para poder obtener las señales que se envían a los controladores para activar o desactivar las resistencias del sistema (Sasir, 2020).

El método más utilizado es el controlador de encendido y apagado, este método se base en crear un algoritmo que se encarga de mantener la temperatura en determinado

punto. Cuando la temperatura se encuentra por debajo del punto el sistema la salida del controlador esta encendida y cuando la temperatura es superior a la del punto la salida del controlador esta apagada (Sasir, 2020).

Figura 8: Gráfica de control encendido y apagado



(Bricio Barrios, 2015)



### 5.1. Descripción de metodología

La primera etapa constó en determinar los polímeros de ingeniería que se manejan en el mercado local. Para determinar dichos polímeros se investigó y se realizó contacto con empresas locales para obtener la información acerca de los polímeros que comercializan. Al tener determinados los polímeros, se investigó el ciclo de recocido de cada uno y se establecieron las características necesarias para poder llevar a cabo dicho ciclo.

Para la selección del horno de convección adecuado, se tomó como criterio el rango de temperatura que maneja y el volumen del horno. Para esto se investigaron los hornos tostadores con mayor capacidad en el mercado y que manejen temperaturas entre 50 a 230 grados Celsius. Se seleccionó el horno tostador Oster TSSTTV 0045 de 45 litros debido a que cumple con los parámetros establecidos anteriormente.

Para controlar el horno se utilizó un relé, un sensor de temperatura y un Arduino. Con estos instrumentos se realizó un programa en Arduino el cual permite controlar el horno utilizando un sistema de control de encendido y apagado. Este sistema de control apaga o enciende el horno dependiendo de la temperatura que indica el sensor de temperatura que se instaló. El programa se dividió en cuatro fases, la primera fase constó en crear el algoritmo para solicitar al usuario los datos de recocido e información de la pieza a trabajar. La segunda fase se basó en programar la rampa de calentamiento del polímero. La tercera fase constó en programar el horno para que sea capaz de sostener la temperatura de recocido dependiendo del tiempo que el

usuario ingreso y las dimensiones de la pieza. Por último, la cuarta fase constó en programar la rampa de enfriamiento, la cual depende de la tasa de enfriamiento que ingresa el usuario.

Para verificar que el horno cumpliera su función se realizaron pruebas de recocido con distintos polímeros utilizando los parámetros previamente investigados. La prueba de recocido se rigió por las normas establecidas por el estándar ISO 868. Para esto se utilizó un durómetro con la escala Shore D. El procedimiento constó en colocar el material en una posición horizontal sobre una superficie dura que sea totalmente plana. Luego, se colocó la punta penetradora del durómetro en una posición vertical a una distancia de 10 mm del borde de la pieza y se aplicó presión de manera rápida asegurando un contacto eficiente entre la pieza y el durómetro. Se repitió cinco veces todo el proceso de medición en diferentes puntos del material para obtener el valor promedio de dureza.

Por último, se realizó un instructivo de cómo se debe utilizar el horno de recocido. Para realizar el instructivo se enlistaron todas las variables o parámetros que el usuario debe ingresar al programa, con el fin de crear una tabla de valores sugeridos para el usuario. También en el instructivo se colocó información de cómo utilizar correctamente la interfaz del usuario y como extraer los datos del programa.

## 5.2. Identificación de necesidades

Guatemala actualmente cuenta con varios procesos de tratamientos térmicos, pero estos generalmente son especializados para metales, esto se da debido a que se cuenta solamente con una empresa de recocido llamada Austenit, la cual solo realizará tratamientos térmicos para metales. Por el momento en el país no existe alguna empresa o entidad que ofrezca los servicios de recocido especializado en polímeros. Por lo tanto, la implementación de esta tecnología sería muy útil para la industria de los polímeros e ingeniería en Guatemala. Cabe mencionar que las entidades o personas interesadas en estos tratamientos térmicos deben buscar proveedores de este servicio internacionalmente lo cual lo vuelve sumamente costoso debido al transporte, pago de impuestos y generalmente los precios del servicio de recocido son más elevados, por lo tanto, la implementación del horno de recocido para polímeros utilizando un horno tostador sería una solución económicamente viable.

## 5.3. Definición de requisitos

Cuadro 2: Requisitos de resultados

Submódulo	Código	Requisito
Resultados	R01	El horno debe ser capaz de recocer polímeros de ingeniería distribuidos en el mercado local.
	R02	El programa que controla el horno debe calcular y realizar el ciclo de recocido con los datos del polímero ingresado por el usuario.
	R03	El equipo deberá tener un instructivo de cómo utilizar el horno.
	R04	El programa debe mostrar la temperatura del horno durante todo el ciclo.

Fuente: elaboración propia

Cuadro 3: Requisitos de seguridad

Submódulo	Código	Requisito
Seguridad	S01	El horno debe contar con un sistema de apagado.

Fuente: elaboración propia

Cuadro 4: Requisitos de operación

Submódulo	Código	Requisito
Operación	O01	El horno debe ser de convección para obtener una mejor circulación del aire y también debe ser eléctrico.
	O02	El horno debe operar en un rango de 100 a 450 grados Fahrenheit (37 a 230°C)
	O03	El horno debe ser controlado por medio de un Arduino UNO R3.

Fuente: elaboración propia

Cuadro 5: Requisitos de materiales

Submódulo	Código	Requisito
Materiales	M01	Se debe utilizar un relé para controlar el circuito eléctrico del horno.
	MO2	Se requiere de un sensor de temperatura para poder medir y controlar la temperatura real del horno.

Fuente: elaboración propia

## 5.4. Diseño y cálculos

### 5.4.1. Selección del horno y sus componentes

La primera parte del diseño consistió en establecer los polímeros de ingeniería que se comercializan en el mercado local. Para esto se realizó una investigación en la cual se contactó con distribuidoras de polímeros de ingeniería y se establecieron cuáles eran los que se distribuían más ampliamente según la demanda del mercado local. Al tener establecidos dichos polímeros se procedió a seleccionar el horno tostador con

convección y enlistar los componentes necesarios para poder controlar el horno con un Arduino. Se seleccionó el horno tostador Oster TSSTTV0045 de 45 litros debido a que es capaz de manejar temperaturas hasta 230 grados Celsius, lo cual permite recocer la mayor cantidad de polímeros que se establecieron y también es el modelo de horno tostador con mayor capacidad volumétrica disponible en el mercado local en agosto del 2021. Cabe mencionar que se optó por un horno con sistema de convección para mejorar la circulación del aire y tener una distribución de calor más uniforme en el interior del horno.

Figura No.10 horno Oster TSSTTV0045.



Fuente: Oster Latinoamérica

El segundo paso se basó en escoger los componentes necesarios para poder controlar el horno. Se seleccionó un Arduino UNO R3 como microcontrolador debido a que tiene un software libre y abierto lo que permite utilizar una gran cantidad de componentes electrónicos. Como sensor de temperatura se seleccionó un termopar tipo K debido a que es capaz de medir el rango de temperatura en la cual trabaja el horno. Los termopares tipo K pueden medir temperaturas de  $-200$  a  $1200$  °C y cuentan con una precisión de medición de  $\pm 1.5$  °C. También su voltaje de funcionamiento es de 5V lo cual asegura su compatibilidad al Arduino. Para poder conectar el Arduino con el termopar es necesario utilizar convertidor analógico a digital como el módulo *MAX6675* el cual permite conectar el sensor de temperatura a cualquier microcontrolador.

Para controlar el paso de corriente en el horno se seleccionó un relé de 25 amperios. Este dispositivo cuenta con una entrada de 3 a 32 voltios lo cual está en el rango

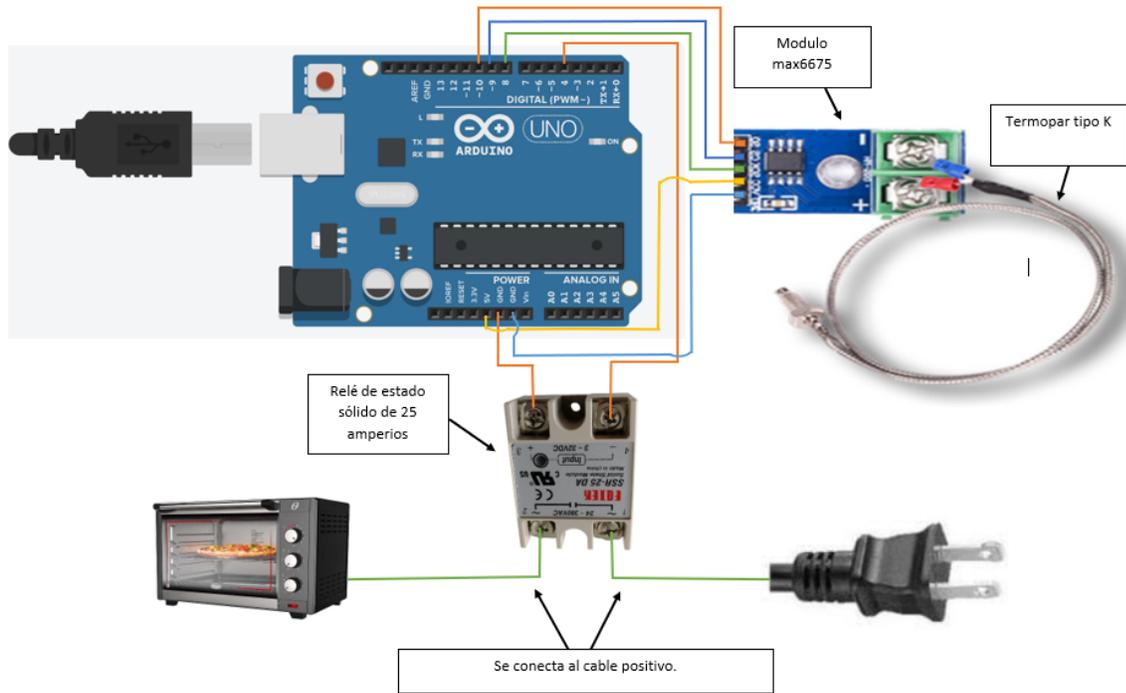
que puede manejar el Arduino y tiene una salida de 24 a 380 voltios lo cual está dentro del rango de voltaje que trabaja el horno (127 voltios). Por lo tanto, podemos asegurar que el horno puede trabajar a su máxima potencia (1600 W) utilizando el relé seleccionado.

Luego, se agregó fibra de vidrio, este material se seleccionó debido a que es resistente a temperaturas superiores a los 1000 °C, es flexible, y no requiere mantenimiento. Éste se colocó en la carcasa del horno para poder reducir las pérdidas de calor. También se colocó el Arduino uno y el relé en una caja externa fuera del horno para evitar que el Arduino y el relé se dañen debido al calor que libera el horno. Por último, se le abrió un agujero en la parte derecha superior del horno utilizando un taladro con una broca de 6 milímetros para poder colocar termopar. Este componente se fijó en el agujero utilizando con silicón de alta temperatura (resiste hasta 333 °C).

#### 5.4.2. Diseño del circuito eléctrico

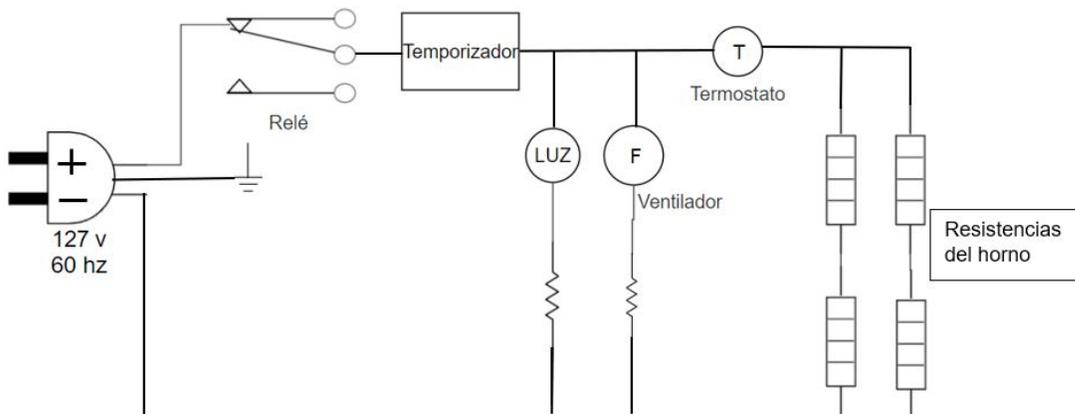
El diseño del circuito eléctrico se basó en establecer las conexiones correspondientes del Arduino para poder controlar el horno con los datos de temperatura recibidos por el termopar tipo k. Primero se conecta el módulo *MAX6675* a los pines análogos correspondientes del Arduino y se conectan los cables del termopar a su polaridad correspondiente. Luego, se conecta el horno con el relé, para esto se debe cortar el cable con polaridad positiva de poder del horno y conectar las puntas en las entradas uno y dos del relé. Por último, se conecta el relé con el Arduino, la entrada número negativa se debe conectar a tierra (GND) y la entrada positiva se debe conectar al pin análogo establecido (pin 4).

Figura 9: Esquema de conexión del horno



Fuente: elaboración propia

Figura 10: Esquema de conexión del horno



Fuente: elaboración propia

### 5.4.3. Elaboración del programa

Para la elaboración del algoritmo de Arduino como primer paso se establecieron todas las variables que el usuario debe ingresar y que debe utilizar el programa para

poder realizar el ciclo de recocido. Dichas variables dependen de las dimensiones y material de la pieza a trabajar.

Cuadro 6: Variables ingresadas por el usuario

Variable	Entrada esperada
Espesor	El usuario ingresa el espesor de la pieza en pulgadas.
Temperatura de recocido	El usuario ingresa la temperatura de recocido deseada del polímero en Fahrenheit.
Gradiente de enfriamiento	El usuario ingresa el gradiente de enfriamiento en Fahrenheit por hora.
Tiempo de calentamiento	El usuario ingresa la cantidad de tiempo que se debe tomar en llegar a la temperatura de recocido.
Tiempo según el espesor	El usuario ingresa la cantidad de minutos que se debe sostener en la temperatura de recocido por cada 0.25 pulgadas de espesor.

Fuente: elaboración propia

El programa debe ser capaz de simular el ciclo de recocido utilizando las variables que el usuario ingrese. Utilizando esos datos el programa calcula el gradiente de calentamiento, el tiempo que se debe sostener el polímero en la etapa de recocido, el tiempo de enfriamiento y la tasa de enfriamiento.

Cabe mencionar que el programa se dividió en cuatro etapas. La primera etapa consiste en solicitar al usuario la información sobre la pieza a trabajar. La segunda etapa del programa se encarga de realizar la rampa de calentamiento del ciclo. La tercera etapa se encarga de mantener el polímero en la temperatura de recocido deseada por el usuario. Por último, la cuarta parte se encarga de calcular la rampa de enfriamiento del ciclo.

La segunda etapa se encarga de generar la rampa de calentamiento del polímero. Para poder generar dicha rampa de calentamiento se debe calcular el gradiente de calentamiento utilizando la temperatura de recocido, la temperatura del ambiente y el tiempo de calentamiento que desea el usuario.

$$GradienteDeCalentamiento = \frac{TemperaturaDeRecocido - Tambiente}{MinutosCalentamiento} \quad (1)$$

Al tener el gradiente de calentamiento el algoritmo es capaz de subir de manera controlada la temperatura del horno en el tiempo que indica el usuario. Luego, al transcurrir el tiempo de calentamiento, comienza la etapa de recocido en la cual se debe calcular el tiempo que se debe sostener la pieza en la temperatura de recocido. Para calcular dicha variable es necesario utilizar las variables ingresadas por el usuario, las cuales son el espesor de la pieza y el tiempo que se debe sostener por cada 0.25 pulgadas de espesor. Este tiempo de sostener según el espesor se encuentra en el cuadro 1 de ciclos de recocido. El tiempo que se debe sostener se encuentran por cada 0.25 pulgadas, por lo tanto, para poder generalizar este dato para cualquier polímero se encontró el tiempo que se debe sostener por 1 pulgada de espesor.

$$TiempoDeRecocido = 4 * Espesor * TiempoSegunEspesor \quad (2)$$

Por último, se realizó la etapa de enfriamiento, Para esto se encontró el tiempo que tomará llegar a la temperatura del ambiente utilizando el gradiente de enfriamiento que ingreso el usuario.

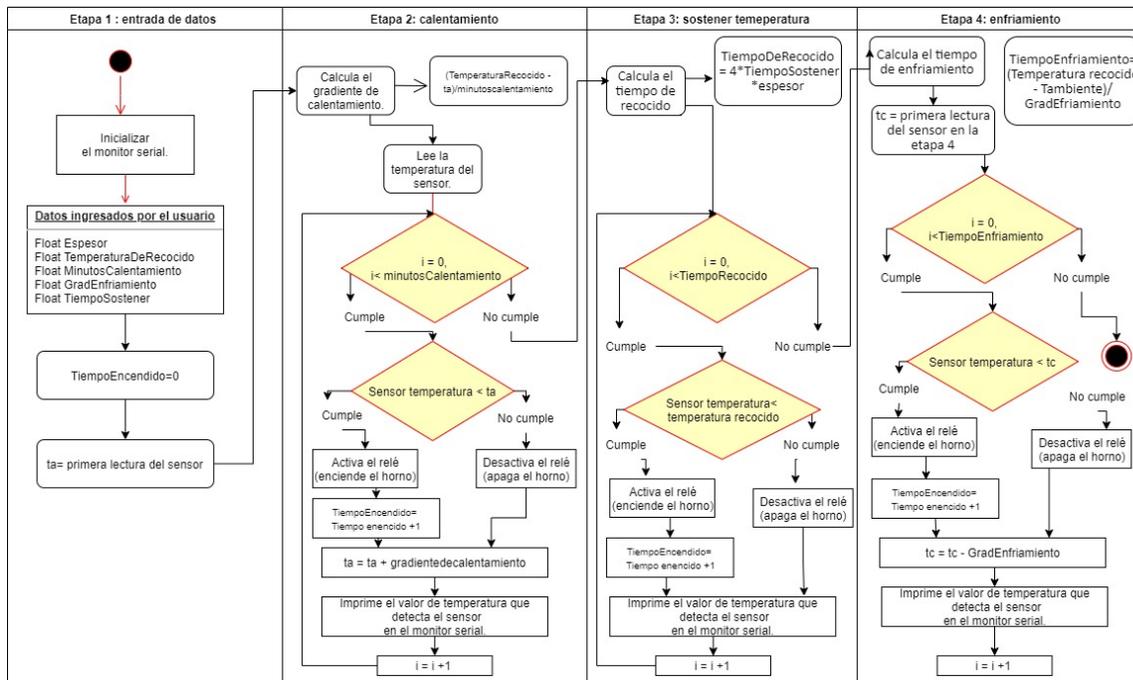
$$TiempoEnfriamiento = \frac{TemperaturaDeRecocido - Tambiente}{GradEnfriamiento} \quad (3)$$

Al tener establecidas las cuatro etapas se realizó el cálculo del consumo eléctrico. Para esto se creó una variable llamada TiempoEncendido la cual cuenta la cantidad de tiempo que se mantiene encendido el relé de estado sólido durante todo el ciclo de recocido. Con esta variable se puede calcular el consumo del horno.

$$Consumo = TiempoEncendido * Costo(kWh) * potencia(horno) \quad (4)$$

Cabe mencionar que dentro del código de Arduino que se puede observar en la Figura 24 que todas las variables de tiempo mencionadas previamente se convirtieron a segundos. Esto con el fin de tener una mayor cantidad de iteraciones y precisión en el programa ya que como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 11 cada iteración del programa depende de este tiempo establecido y en cada una de estas iteraciones se imprime un valor de temperatura.

Figura 11: Diagrama de flujo del programa de Arduino



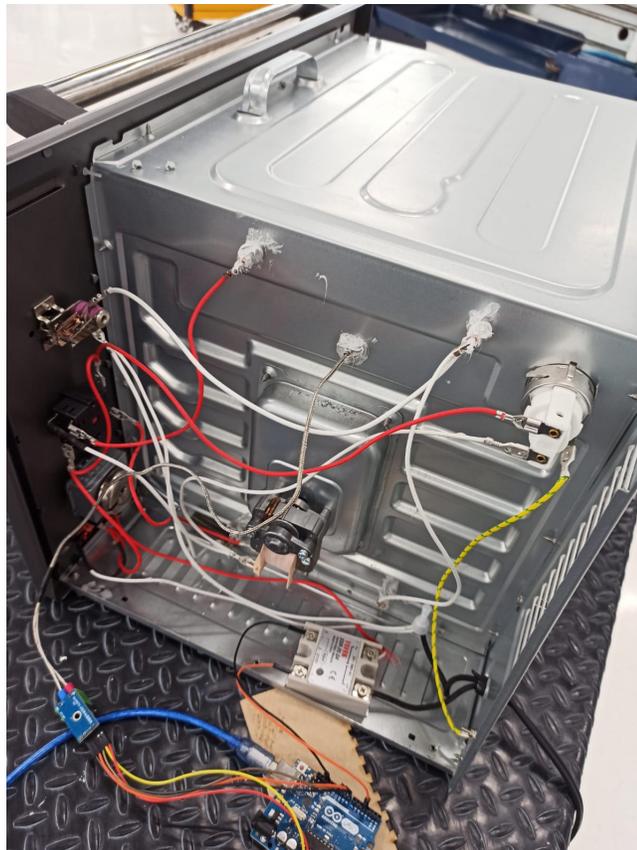
Fuente: elaboración propia

Por último, Se realizó un instructivo de cómo utilizar el horno de recocido, este instructivo se puede observar en el anexo 23. Para esto se establecieron todos los pasos que debe seguir el usuario para poder utilizar de manera correcta el horno. Este instructivo se imprimió y se colocó en la parte superior del horno.

## 5.5. Fabricación

La primera etapa de la fabricación del horno consistió en remover la carcasa superior para poder realizar las conexiones de los componentes establecidos en la Figura 9. Al horno se le realizó un agujero en la parte superior derecha para poder colocar el termopar tipo k. Para realizar el agujero se utilizó un taladro con una broca de 6mm y luego se le colocó silicón de alta temperatura para fijarlo, esto se puede observar en la Figura 12.

Figura 12: Horno tostador sin carcasa



Fuente: elaboración propia

Luego, se colocó el aislante térmico encima de la carcasa interna del horno. Esta

se colocó únicamente sobre la carcasa sin utilizar pegamento o generar algún tipo de presión sobre la fibra de vidrio.

Figura 13: Adición del aislante térmico



Fuente: elaboración propia

El siguiente paso consistió en abrir la parte derecha de la carcasa externa para poder sacar el relé y el Arduino de la parte interna del horno y evitar que este se dañen los componentes debido al calor. Por último, se cerró el horno tostador y se colocaron los componentes que se extrajeron dentro de dos cajas metálicas.

Figura 14: Imagen final del horno



Fuente: elaboración propia

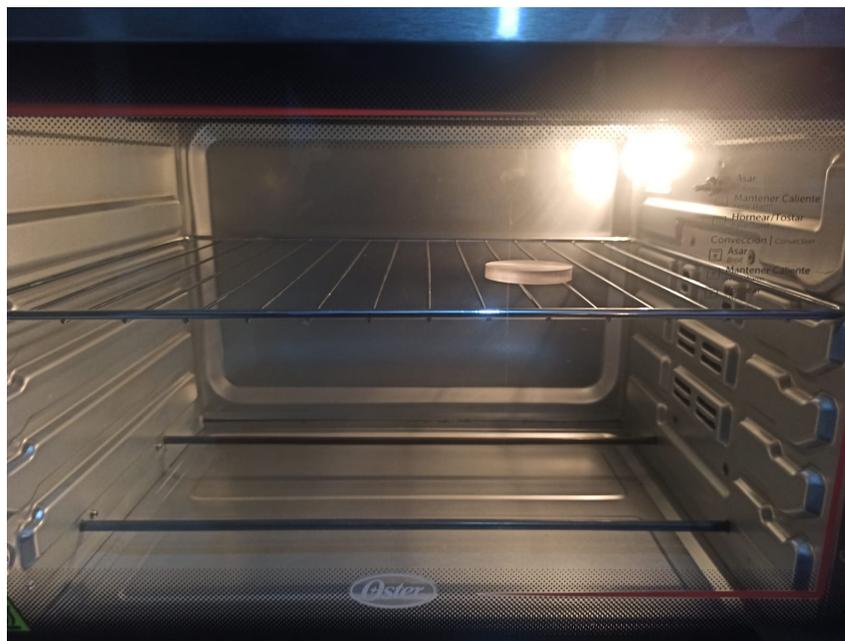
## 5.6. Pruebas

La primera prueba consistió en verificar que el programa de Arduino y el horno funcionaran de manera correcta. Para esto se realizaron pruebas de recocido sin material solo para confirmar que el algoritmo funcione y que sea capaz de realizar las cuatro etapas mencionadas previamente. Para realizar esta prueba únicamente se utilizó el monitor serial de Arduino. Se observaron los valores de temperatura que estaba imprimiendo dicho monitor y se verificó el cambio de etapa del programa.

La segunda prueba se basó en recocer distintos polímeros de ingeniería para verificar que el horno sea capaz de recocer los materiales establecidos. Para determinar si el horno cumple su función se le realizaron pruebas de dureza antes y después de recocer utilizando la norma ISO 868. Para medir la dureza de los materiales se utilizó un durómetro escala *Shore D*. El reporte de la prueba con el procedimiento se puede observar en la sección de anexos figuras [29](#), [30](#), [31](#), [32](#) y [33](#)

El primer paso constó en medir la dureza del material sobre una superficie plana y rígida, este proceso se repitió en cinco puntos distintos para obtener un valor promedio de dureza. Luego, se recoció el polímero utilizando los datos establecidos en la Tabla [1](#) y se extrajeron todas las temperaturas que imprimió el monitor serial de Arduino para poder realizar la gráfica del ciclo real de recocido. Cabe mencionar que los cálculos del programa se realizaron en segundos, por lo tanto, el monitor serial imprime un valor de temperatura cada segundo. Por último, se repitió el mismo proceso de medición de dureza con el material recocido.

Figura 15: Prueba acrílico



Fuente: elaboración propia



## CAPÍTULO 6

### Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ciclos de recocido de los polímeros que se comercializan mayormente en el mercado local.

Cuadro 7: características de recocido de los polímeros locales

Polímero	Calentar	Sostener temperatura	Enfriamiento
Nylon 6	4 horas a 300 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Teflón (PTFE)	3 horas 525 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acrílico	2 horas 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Policarbonato	4 horas 275 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Peek (Polieteretercetona)	2 horas 300 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Ultem (Polyetherimide)	4 horas a 390 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Udel (Polisulfone)	4 horas a 330 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polipropileno	2 horas a 185 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
ABS	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acetal	2 horas a 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polietileno (alta densidad)	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
Polietileno (baja densidad)	2 horas a 175 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
PET (Ertalyte)	4 horas a 350 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora

(Boedeker, 2019)

En el Cuadro 8 se puede observar las características del horno seleccionado.

Cuadro 8: Especificaciones del horno tostador seleccionado

Modelo	Oster TSSTTV0045-014
Voltaje	127 V
Frecuencia	60 Hz
Dimensión	41 x 62 x 60 cm
Consumo	1600 Watts
Convección	Si
Rango de temperatura	100 - 230 °C
Volumen	45 litros

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta el listado y precio de los materiales que se utilizó para el desarrollo del proyecto.

Cuadro 9: Listado de materiales y precio

Material	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Relé	1	Q69.00	Q69.00
Arduino UNO R3	1	Q125.00	Q125.00
Horno Oster TSSTTV0045-14	1	Q1250.00	Q1,250.00
Fibra de vidrio	1	Q110.00	Q110.00
Silicón de alta temperatura	1	Q33.00	Q33.00
Termo par tipo K con módulo MAX6675	1	Q55.00	Q55.00
Cable jumper macho-macho (10 unidades)	2	Q8.50	Q17.00
Cable jumper macho-hembra (10 unidades)	1	Q8.50	Q8.50
Caja metálica para guardar los componentes	2	Q25.00	Q50.00
Total			Q1,717.50

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ciclo de recocido simulado en el programa creado en Arduino. Cabe mencionar que los valores de temperatura que se utilizaron para realizar dicha gráfica fueron los teóricos.

Figura 16: Gráfica temperatura vs tiempo del ciclo teórico



Fuente: elaboración propia

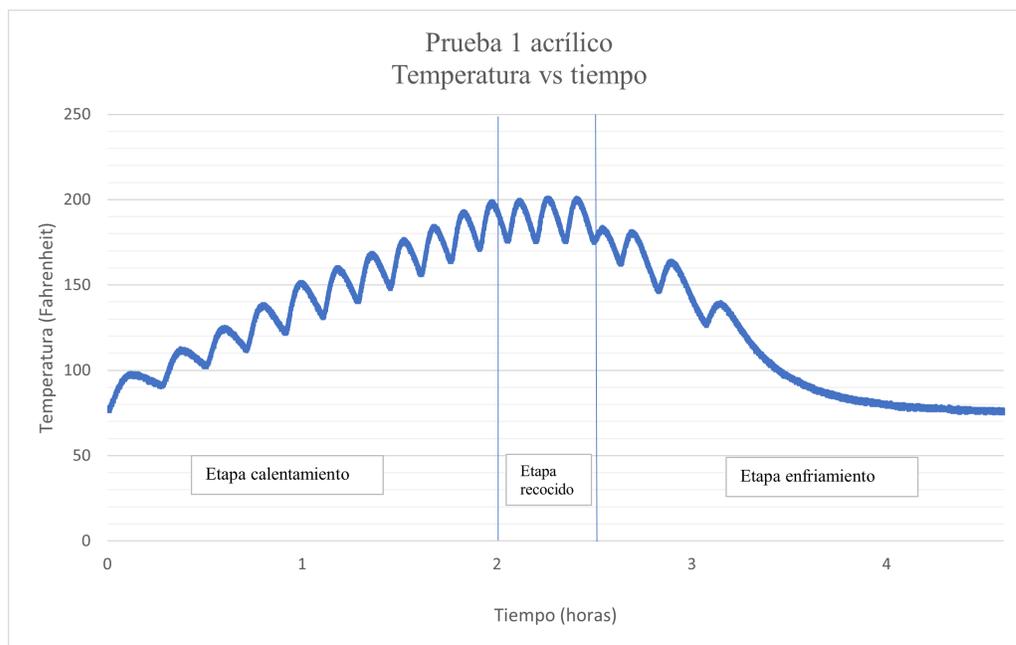
En el siguiente cuadro se presentará la dureza antes y después del proceso de recocido para la prueba 1, en la cual se utilizó una pieza de acrílico con espesor de 0.25 pulgadas (6.35 mm).

Cuadro 10: Prueba 1 antes vs después de recocer el acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
Punto 1	70.0	63.5
Punto 2	72.0	62.0
Punto 3	69.5	63.3
Punto 4	71.5	66.0
Punto 5	71.8	64.5
Promedio	70.96	63.86
Cambio de dureza		10.01 %

Fuente: elaboración propia

Figura 17: Gráfica temperatura vs tiempo



Fuente: elaboración propia

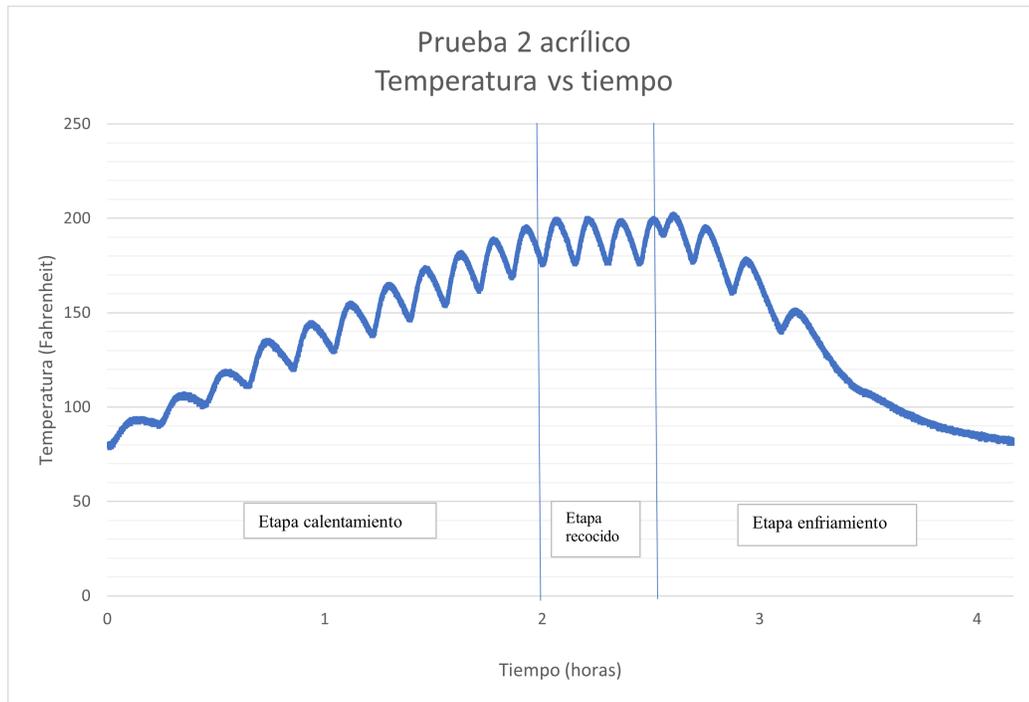
En el siguiente cuadro se presentará la dureza antes y después del proceso de recocido para la prueba 2, en la cual se utilizó una pieza de acrílico con espesor de 0.25 pulgadas (6.35 mm).

Cuadro 11: Prueba 2 antes vs después de recocer el acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
Punto 1	66.5	61.0
Punto 2	70.5	59.0
Punto 3	72.4	60.5
Punto 4	69.5	56.0
Punto 5	67.8	58.0
Promedio	69.34	58.9
Cambio de dureza		15.06 %

Fuente: elaboración propia

Figura 18: Gráfica temperatura vs tiempo



Fuente: elaboración propia

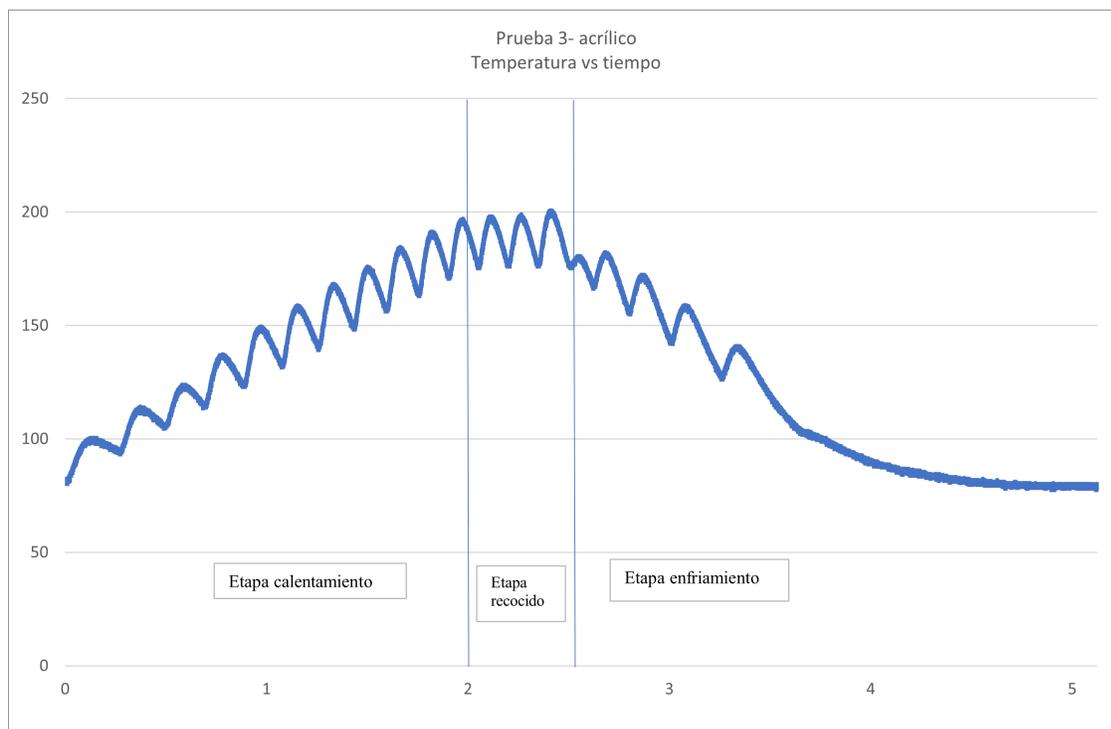
En el siguiente cuadro se presentará la dureza antes y después del proceso de recocido para la prueba 3, en la cual se utilizó una pieza de acrílico con espesor de 0.25 pulgadas (6.35 mm).

Cuadro 12: Prueba 3 antes vs después de recocer el acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
Punto 1	75.0	71.5
Punto 2	77.5	69.5
Punto 3	75.4	68.5
Punto 4	80.3	68.0
Punto 5	77.5	64.0
Promedio	77.14	68.3
Cambio de dureza		11.46 %

Fuente: elaboración propia

Figura 19: Gráfica temperatura vs tiempo



Fuente: elaboración propia

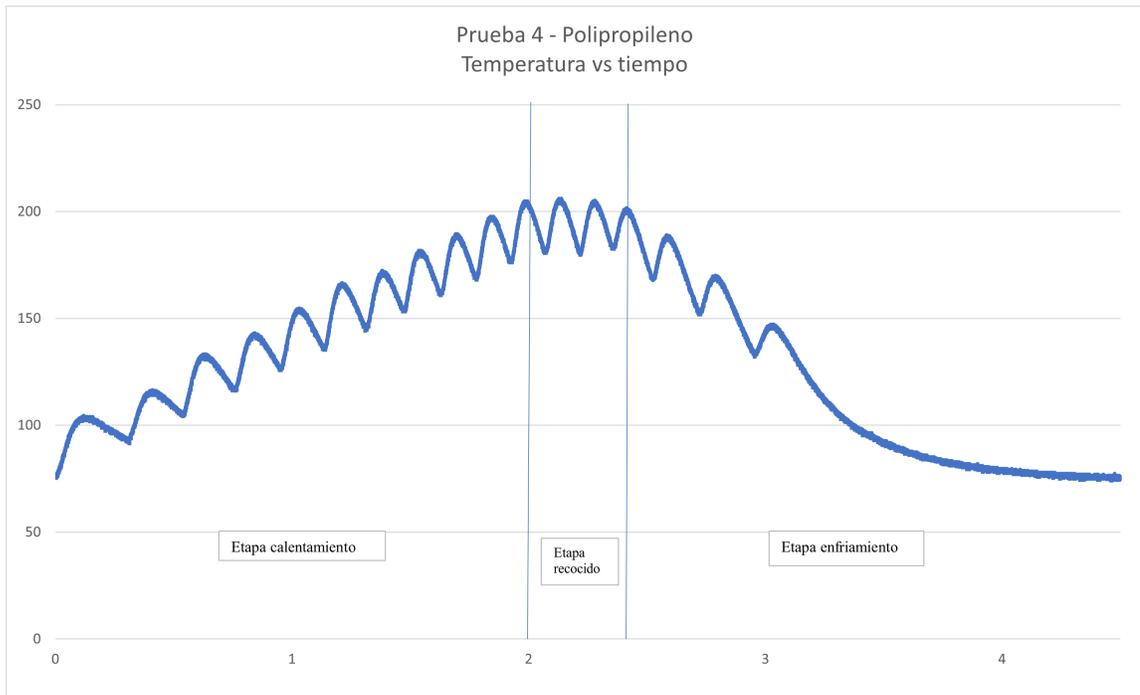
En el siguiente cuadro se presentará la dureza antes y después del proceso de recocido para la prueba 4, en la cual se utilizó una pieza de polipropileno con espesor de 0.18 pulgadas (4.57 mm).

Cuadro 13: Prueba 4 antes vs después de recocer polipropileno

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	68.5	61
punto 2	66	55
punto 3	69.5	58.5
punto 4	65	61
punto 5	70.5	62.3
Promedio	67.9	59.56
Cambio de dureza		12.28 %

Fuente: elaboración propia

Figura 20: Gráfica temperatura vs tiempo



Fuente: elaboración propia

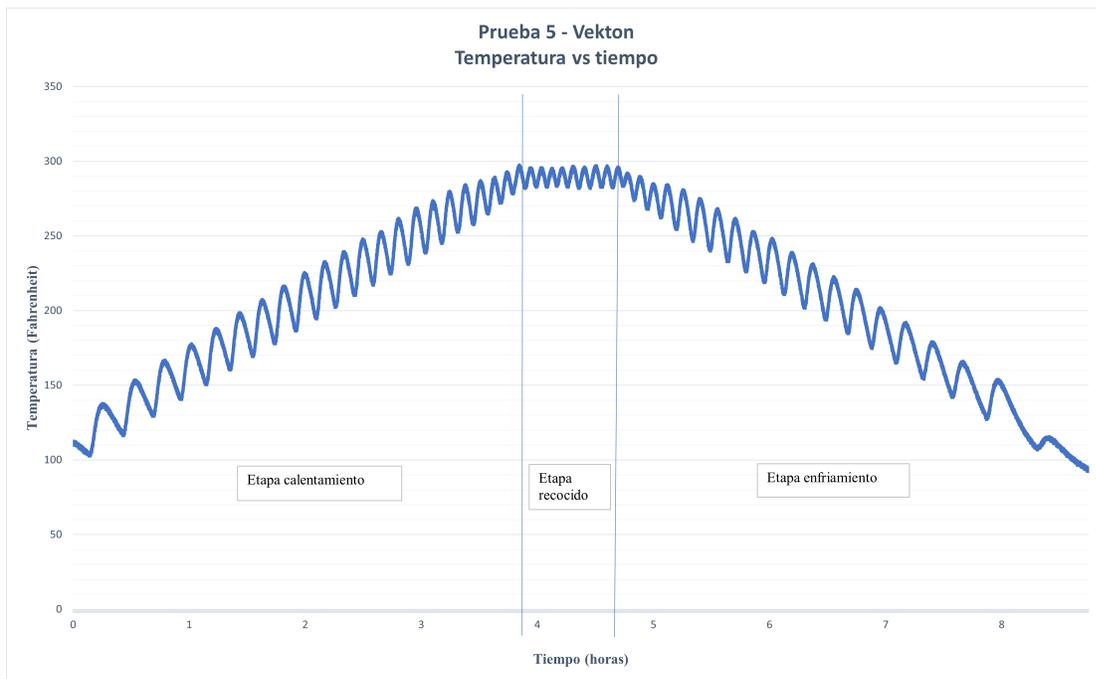
En el siguiente cuadro se presentará la dureza antes y después del proceso de recocido para la prueba 5, en la cual se utilizó una pieza de Vekton (nylon 6) con espesor de 0.45 pulgadas (11.43 mm).

Cuadro 14: Prueba 5 antes vs después de recocer Vekton

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	62.5	54
punto 2	64.3	55
punto 3	65.5	58.5
punto 4	62.5	61.3
punto 5	64	57
Promedio	63.76	57.16
Cambio de dureza		10.35 %

Fuente: elaboración propia

Figura 21: Gráfica temperatura vs tiempo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 22: Prueba Policarbonato



Fuente: elaboración propia

Cuadro 15: Resultado de requisitos

Requisito	Se cumplió	Especificación
R01	Sí	El horno es capaz de recocer los polímeros dentro de su rango de operación.
R02	Sí	El horno es capaz de simular los ciclos de recocido ingresados por el usuario.
R03	Sí	Se realizó un instructivo que le indica al usuario como utilizarlo.
R04	Sí	El programa muestra un valor de temperatura por segundo.
S01	Sí	Se puede apagar desconectando el cable USB del Arduino.
O01	Sí	El horno seleccionado cuenta con sistema de convección.
O02	Sí	Opera hasta 230 grados Celsius (446 Fahrenheit).
O03	Sí	El horno se controla con un Arduino UNO R3.
M01	Sí	Se utilizó un relé de estado sólido de 25 amperios.
M02	Sí	Se utilizó un termopar tipo K para medir y controlar la temperatura.

Fuente: elaboración propia

Los resultados del instructivo que se realizó con indicaciones de cómo utilizar el horno se puede observar en anexos Figura [23](#).

A continuación, se presenta el resultado de dos pruebas de recocido del ciclo de acrílico con su respectivo consumo eléctrico, asumiendo una pieza con espesor de 0.25 pulgadas (6.35 mm). El consumo eléctrico se determinó según lo detallado en la sección de metodología (5.4.3). Se utilizó como referencia una tarifa eléctrica de Q1.23/kWh proporcionada por la empresa EEGSA cuya fuente fue consultada el día 01 de noviembre del 2021.

Cuadro 16: Consumo eléctrico

Tiempo encendido (min)	Consumo eléctrico
32.4	Q 1.06
31.4	Q 1.03

Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO 7

---

### Discusión

---

El primer objetivo de este proyecto consistió en establecer los ciclos de recocido de los polímeros de ingeniería que se encuentran en el mercado local. Se realizó una tabla con los polímeros mayormente comercializados en el mercado junto con todas las características necesarias para poder efectuar el ciclo de recocido. En la actualidad la información acerca de los ciclos de recocido en polímeros de ingeniería es limitada, por lo tanto, la información y la idea de la realización del horno fue proporcionada por Universidad de Colorado en Boulder. Cabe mencionar que los valores que se establecieron son parámetros recomendados para el usuario, pero estos pueden ser modificados según el criterio del usuario.

El segundo objetivo se basó en determinar el horno de convección que tenga la capacidad de recocer los polímeros de ingeniería. El horno Oster TSSTTV0045-014 que se eligió cuenta con la capacidad de recocer todos los polímeros de ingeniería establecidos exceptuando al PTFE (Teflón) debido a que la temperatura de recocido de dicho material es de 275 °C (575°F). El horno que se seleccionó no es capaz de trabajar a estas temperaturas y en el mercado local tampoco se encuentra un horno convencional que maneje dichas temperaturas. Por lo tanto, para poder recocer el teflón es necesario la utilizar un horno industrial.

El tercer objetivo constó en elaborar el programa que sea capaz de simular el ciclo de recocido de los polímeros de ingeniería. El programa que se realizó en *Arduino* cumple con el objetivo por medio de las cuatro etapas que se realizaron. El algoritmo funciona adecuadamente ya que realiza el ciclo teórico de recocido del polímero que el usuario ingresa. Esta gráfica teórica se puede observar en la Figura 16 en la sección de resultados. En esta gráfica se visualiza claramente que el programa es capaz de

generar las tres etapas que necesita el ciclo de recocido en los tiempos adecuados según la tabla de ciclos de recocido que se estableció.

En cuanto al programa que se utilizó se obtuvo un inconveniente con la capacidad de graficar del programa Arduino. Esto debido a que no permite utilizar el monitor de serie y la trazadora en serie al mismo tiempo. Por lo tanto, no se logró graficar en tiempo real el ciclo de recocido. Otra problema que se obtuvo se debió a que el programa de Arduino solamente es capaz de graficar 500 puntos en una gráfica, por lo tanto, no se pudo realizar en este programa. Este problema se solucionó extrayendo los datos de Arduino a Excel manualmente, para así poder graficar los resultados obtenidos en el ciclo de recocido. Por lo tanto, es recomendable utilizar un software con una mayor capacidad de programación tales como MATLAB o Python para poder obtener los resultados de manera más simple y eficiente. En cuanto a la selección de Arduino como microcontrolador, presentó buenos resultados debido a que es un dispositivo muy versátil que permite la conexión con una alta cantidad de componentes, tales como el módulo MAX6675 y el relé de estado sólido.

El cuarto objetivo se basó en realizar pruebas de recocido utilizando el horno reprogramado. Con base en los resultados obtenidos se puede observar en las gráficas de los ciclos reales que la temperatura fluctúa por encima o por debajo de la temperatura teórica del ciclo. Esto se debe a la naturaleza del comportamiento de los controladores de encendido y apagado, debido a que el algoritmo desconecta la corriente del horno cuando esta llega a la temperatura objetivo. Sin embargo, las resistencias del horno no dejan de producir calor en el instante que se desactiva la corriente, lo cual explica porqué se tienen valores por encima de la temperatura teórica. En cuanto a las temperaturas que se encuentran debajo de la teórica se da debido al tiempo de respuesta que existe en el dispositivo, esto básicamente se refiere al tiempo que le toma a la resistencia volver producir el calor necesario para estar en la temperatura deseada, por lo tanto, en este tiempo el horno disminuye su temperatura a causa de que no se está emitiendo el suficiente calor por parte de las resistencias para mantener la temperatura en el punto deseado.

En cuanto a los resultados obtenidos de dureza se puede observar que en todos los materiales que se completó efectivamente el ciclo de recocido se obtuvo una disminución de la dureza del polímero. Este cambio indica que el recocido que se realizó si cumplió con el propósito del tratamiento térmico de reducir la dureza superficial de la pieza para posteriormente ser maquinado con una mayor facilidad. En cuanto a la prueba de policarbonato (Figura 22) presentó fallas al llegar a los 261 °F. Esto pudo ocurrir debido a que el material pasó por un proceso de fundición por diclorometano. En este proceso las dos planchas de policarbonato se unieron y posiblemente durante el proceso quedaron atrapadas moléculas de aire las cuales durante el proceso de recocido intentaron expandirse y moverse hacia la parte superior del material deformándolo.

En los resultados del consumo eléctrico (Figura 16) se puede observar que el horno pasa encendido un periodo de tiempo corto respecto al tiempo total del ciclo (260.4 min). Por lo tanto, esto se ve reflejado en el bajo consumo eléctrico que obtiene el dispositivo. Esto es debido a que los sistemas de control de encendido y apagado cuentan con un nivel de precisión bajo, por lo tanto, se genera un mayor *overshoot*. Dicho *overshoot* se da debido al tiempo de respuesta de las resistencias. Por lo anterior, para mejorar el tiempo de respuesta del horno y reducir el *overshoot* se podría implementar un sistema de control PID, cuya función es reducir el tiempo de respuesta de las resistencias por un método predictivo que calcula la desviación medida respecto al valor real. Otra gran ventaja de utilizar un sistema de control PID es que alarga más la vida del dispositivo, ya que es más preciso, el horno se apaga y se enciende una menor cantidad de veces durante todo el ciclo. La desventaja de instalar dicho sistema de control es que aumentaría el consumo, ya que la temperatura del horno permanecerá siempre cercana a la temperatura requerida en el proceso, por lo tanto, el horno se mantendrá encendido un mayor tiempo.



---

### Conclusiones

---

1. Se logró establecer las características de recocido de los polímeros de ingeniería comercializados en el mercado local los cuales se presentan en el Cuadro [7](#).
2. Se seleccionó un horno Oster TSSTTV045-14 el cual tiene la capacidad recocer los polímeros de ingeniería establecidos debido a que trabaja en un rango de temperaturas de 210 °F a 450°F.
3. Se logró realizar un programa que simula el ciclo de recocido de polímeros de ingeniería basado en datos ingresados por el usuario.
4. En las pruebas realizadas con los polímeros de ingeniería se logró obtener una disminución de dureza que se establecen en los cuadros [10](#), [11](#), [12](#) y [13](#).
5. Se realizó un sistema de control de encendido y apagado para poder control la temperatura del ciclo utilizando un sensor de temperatura, relé de estado sólido y un Arduino UNO R3.
6. Se realizó un instructivo para que el usuario pueda utilizar correctamente el horno de recocido.



---

### Recomendaciones

---

1. Se recomienda la implementación un sistema de control PID para comparar los resultados con los obtenidos con el control de encendido y apagado.
2. Realizar un horno de recocido utilizando un horno industrial para poder abarcar un rango de temperaturas más amplio, por ende, lograr realizar tratamientos térmicos a más polímeros e incluso ciertos tipos de metales.
3. Se recomienda utilizar otra interfaz de programación que permita graficar una mayor cantidad de datos y/o facilitar la extracción de los datos. Esto debido a que Arduino no permite utilizar el monitor serial al mismo tiempo que la trazadora en serie y únicamente imprime un máximo de 500 puntos.
4. Se recomienda realizar una prueba con variaciones en la rampa de enfriamiento para poder relacionarlo con las propiedades de dureza final.
5. Realizar pruebas para verificar la relación entre el porcentaje de cristalización y la dureza después del tratamiento térmico.
6. Determinar si las propiedades mecánicas del polímero cambian después del recocido.



- Aly, A. (2015). *Heat Treatment of Polymers: A Review*.
- BAUHAUS. (2021). Regulador de temperatura BAUHAUS. Consultado el 5 de octubre de 2021, desde <https://www.bauhaus.es/programadores/coati-termostato-manual/p/23971459>
- Benavente, R. (2014). *Polímeros amorfos, semicristalinos, polímeros cristalinos líquidos y orientación*. <https://core.ac.uk/download/pdf/61905301.pdf>
- Boedeker, p. (2019). *Annealing Guidelines for Plastic Stock Shapes / Boedeker*. <https://www.boedeker.com/Technical-Resources/Technical-Library/Plastic-Annealing-Guidelines>
- Bricio Barrios, E. (2015). *IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS NUMÉRICAS ESTOCÁSTICAS DE OPTIMIZACIÓN GLOBAL SOBRE ESQUEMAS DE CONTROL DE PROCESO*.
- Connor, N. (2019). *What is Thermal Insulation - Thermal Insulator - Definition*. <https://www.thermal-engineering.org/what-is-thermal-insulation-thermal-insulator-definition/>
- CUEVA, J. (2018). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN TEMPORIZADOR PARA UN SISTEMA EN CHIP (SOC) EN LENGUAJE VERILOG* (Tesis doctoral). UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO. [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10493/Cueva\\_Mamani\\_Jose\\_Luis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10493/Cueva_Mamani_Jose_Luis.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Di Vona, M. L. (2016). *Annealing of Polymer Membranes*. En E. Drioli & L. Giorno (Eds.), *Encyclopedia of Membranes* (pp. 1-2). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4\\_627-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4_627-1)
- High-Performance Annealing Ovens and Annealing Furnaces*. (2020). <https://www.despatch.com/industrial-annealing-ovens-and-furnaces.html>
- ISO. (2003). *Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)*. [http://driso.ir/standards/iso/ISO\\_868\\_2003\\_,\\_Plastics\\_and\\_Ebonite.pdf](http://driso.ir/standards/iso/ISO_868_2003_,_Plastics_and_Ebonite.pdf)

- Quiminet. (2019). *¿Cómo funcionan los hornos eléctricos?* Consultado el 1 de junio de 2021, desde <https://www.quiminet.com/articulos/como-funcionan-los-hornos-electricos-2566072.htm>
- Recreus. (2021). *¿Qué es la dureza Shore?* <https://recreus.com/es/noticias/aprende-con-recreus/que-es-la-dureza-shore->
- Sasir. (2020). *Industriasgsl.com / Venta de Suministros Industriales.* <https://www.industriasgsl.com/>
- Sepe, M. (2020a). *Materials Part 1: What Annealing Can Do for Your Process.* <https://www.ptonline.com/blog/post/materials-part-1-what-annealing-can-do-for-your-process>
- Sepe, M. (2020b). *Materials Part 5: Annealing Tips for Crosslinked Polymers.* <https://www.ptonline.com/blog/post/materials-part-5-annealing-tips-for-crosslinked-polymers>
- Sepe, M. (2020c). *Materials: Annealing Tips for Amorphous Polymers, Part 2.* <https://www.ptonline.com/blog/post/materials-annealing-tips-for-amorphous-polymers-part-2>
- Sepe, M. (2020d). *Part 3 Materials: Annealing Tips for Semicrystalline Polymers.* <https://www.ptonline.com/blog/post/part-3-materials-annealing-tips-for-semicrystalline-polymers>
- Unisalia. (2020). *Que es un relé de estado sólido, Usos, Tipos Y Función.* <https://unisalia.com/rele-de-estado-solido-usos-tipos/>
- Viskanta, R. (1966). *Radiation Transfer and Interaction of Convection with Radiation Heat Transfer.* En T. F. Irvine & J. P. Hartnett (Eds.), *Advances in Heat Transfer* (pp. 175-251). Elsevier.
- Zohuri, B. & Fathi, N. (2015). *Conduction Heat Transfer.* [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17434-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17434-1_8)

Figura 23: Manual de uso del horno

### Manual de utilización del horno

1. Identificar el polímero que se desea recocer y tomar las medidas del espesor de la pieza en pulgadas.
2. Consultar el ciclo de recocido que corresponde al polímero seleccionado en la siguiente tabla:

Polímero	Calentar	Sostener temperatura	Enfriamiento
Nylon 6	4 horas a 300 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Teflón (PTFE)	3 horas a 525 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acrílico	2 horas a 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Policarbonato	4 horas a 275 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Peek (Polieterecetona)	2 horas a 300 ° F	60 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Ultem (Polyetherimide)	4 horas a 390 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Udel (Polisulfone)	4 horas a 330 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polipropileno	2 horas a 185 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
ABS	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Acetal	2 horas a 180 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora
Polietileno (alta densidad)	2 horas a 200 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
Polietileno (baja densidad)	2 horas a 175 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	10 ° F por hora
PET (Ertalyle)	4 horas a 350 ° F	30 min por cada $\frac{1}{4}$ " de espesor	50 ° F por hora

3. Asegurarse que la perilla del horno se encuentre al máximo en la temperatura, el termostato se encuentre en la función de encendido sin tiempo y asegurarse que el modo de convección este activo.



4. Conectar el ordenador al Arduino y colocarlo en el mismo puerto serial.
5. Carga el programa al Arduino y abrir el monitor serial.
6. Ingresar los datos que solicita el programa (inciso 2).
7. Esperar a que se complete el ciclo de recocido.
8. Desconectar el Arduino y apagar desconectar el horno.

Fuente: elaboración propia.

Figura 24: Programa parte 1



```
1 // Programa para recocer polímeros de ingeniería
2 // George Bandi 17324
3
4 // se incluye la librería para el termo par tipo k y su conector de arduino
5 #include "max6675.h"
6 // se declaran los pines donde seran conectados los pines del max6675
7 int ktcSO = 8;
8 int ktcCS = 9;
9 int ktcCLK = 10;
10 // se decalara el pin del relé de estado solido
11 int relayPin = 4;
12
13 MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);
14 // se declaran todas las variables a utilizar en el programa como float para que permita los decimales.
15 float Espesor;
16 float TemperaturaDeRecocido;
17 float MinutosCalentamiento;
18 float GradEnfriamiento;
19 float TiempoDeRecocido;
20 float TiempoSostener;
21 float Tambiente = ktc.readFahrenheit();
22 float TiempoEncendido= 7200 ;
23 float Consumo;
24 void setup() {
25 {
26 // se inicializa el puerto serial
27 Serial.begin(9600);
28 Serial.println("SSR encendido");
29 pinMode(relayPin, OUTPUT);
30 }
31 /* En el siguiente código se crea una solicitud para que el usuario ingrese los datos del material a recocer
32 * Cuando el usuario allá ingresado el valor la variable declarada anteriormente tomará ese valor.
33 */
```

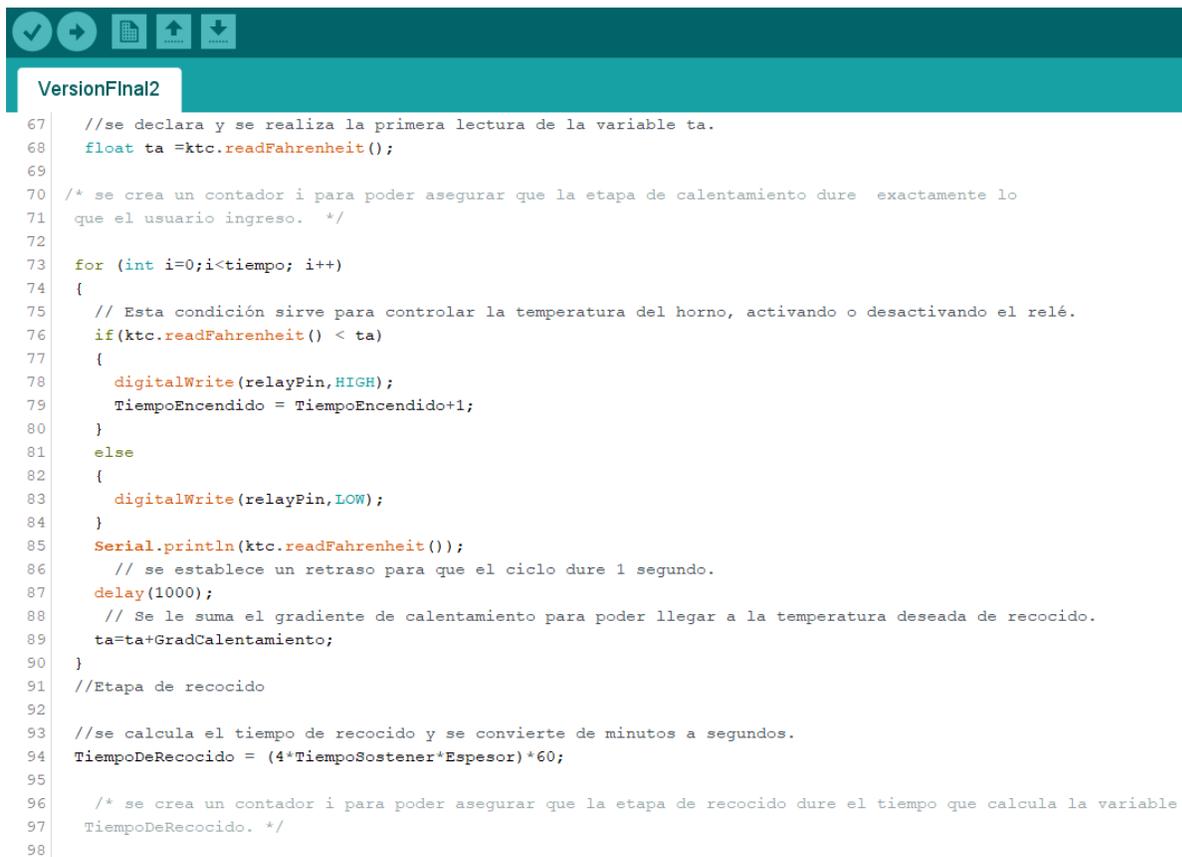
Fuente: elaboración propia.

Figura 25: Programa parte 2

```
✓ → 📄 ⬆️ ⬇️ Verificar
VersionFinal2
34 {
35 Serial.println("ingrese el espesor (pulgadas) :");
36 while (Serial.available()==0){}
37 Espesor = Serial.parseFloat();
38 }
39
40 { Serial.println("ingrese la temperatura de recocido (Fahrenheit):");
41 while (Serial.available()==0){}
42 TemperaturaDeRecocido = Serial.parseFloat();
43 }
44
45 { Serial.println("ingrese el tiempo de calentamiento (minutos):");
46 while (Serial.available()==0){}
47 MinutosCalentamiento = Serial.parseFloat();
48 }
49
50 { Serial.println("ingrese el gradiente de enfriamiento (Fahrenheit por hora):");
51 while (Serial.available()==0){}
52 GradEnfriamiento = Serial.parseFloat();
53 }
54
55 { Serial.println("Ingrese el tiempo que se debe sostener el recocido por cada 1/4 pulgada de espesor :");
56 while (Serial.available()==0){}
57 TiempoSostener = Serial.parseFloat();
58 }
59 }
60
61 void loop(){
62 //Etapa de Calentamiento
63 // se declara la variable tiempo y se hace una conversión del tiempo de minutos a segundos
64 float tiempo=MinutosCalentamiento*60;
65 //Se declara y calcula la variable de gradiente de calentamiento
66 float GradCalentamiento=(TemperaturaDeRecocido-Tambiente)/tiempo;
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 26: Programa parte 3



```
67 //se declara y se realiza la primera lectura de la variable ta.
68 float ta =ktc.readFahrenheit();
69
70 /* se crea un contador i para poder asegurar que la etapa de calentamiento dure exactamente lo
71 que el usuario ingreso. */
72
73 for (int i=0;i<tiempo; i++)
74 {
75 // Esta condición sirve para controlar la temperatura del horno, activando o desactivando el relé.
76 if(ktc.readFahrenheit() < ta)
77 {
78 digitalWrite(relayPin,HIGH);
79 TiempoEncendido = TiempoEncendido+1;
80 }
81 else
82 {
83 digitalWrite(relayPin,LOW);
84 }
85 Serial.println(ktc.readFahrenheit());
86 // se establece un retraso para que el ciclo dure 1 segundo.
87 delay(1000);
88 // Se le suma el gradiente de calentamiento para poder llegar a la temperatura deseada de recocado.
89 ta=ta+GradCalentamiento;
90 }
91 //Etapa de recocado
92
93 //se calcula el tiempo de recocado y se convierte de minutos a segundos.
94 TiempoDeRecocado = (4*TiempoSostener*Espesor)*60;
95
96 /* se crea un contador i para poder asegurar que la etapa de recocado dure el tiempo que calcula la variable
97 TiempoDeRecocado. */
98
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 27: Programa parte 4

```
VersionFinal2
99  for (int i=0;i<TiempoDeRecocido; i++)
100  {
101      //Esta condición se encarga de mantener la temperatura de recocido del horno.
102      if(ktc.readFahrenheit() < TemperaturaDeRecocido)
103      {
104          digitalWrite(relayPin,HIGH);
105          TiempoEncendido = TiempoEncendido+1;
106      }
107      else
108      {
109          digitalWrite(relayPin,LOW);
110      }
111      Serial.println(ktc.readFahrenheit());
112      // se establece un retraso para que el ciclo dure 1 segundo.
113      delay(1000);
114  }
115  //Etapa de enfriamiento
116  /* se calcula el tiempo de enfriamiento, se convierte de horas a segundos,
117  por lo tanto, se multiplica por 3600. */
118  float TiempoEnfriamiento = ((TemperaturaDeRecocido-Tambiente)/GradEnfriamiento)*3600;
119  float tc = ktc.readFahrenheit();
120
121  /* se convierte el GradEnfriamiento que ingresa el usuario de horas Fahrenheit a
122  segundos Fahrenheit. */
123
124  float GradEnfriamiento = (TemperaturaDeRecocido-Tambiente)/TiempoEnfriamiento;
125
126  /* se crea un contador i para poder asegurar que la etapa dure el tiempo que calcula la
127  variable TiempoEnfriamiento. */
128  for (int i=0;i<TiempoEnfriamiento; i++)
129  {
130      //Esta condición se encarga de bajar la temperatura de horno de manera controlada.
131      if(ktc.readFahrenheit() < tc)
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 28: Programa parte 5

```
VersionFinal2
124 float GradEnfriamiento = (TemperaturaDeRecocido-Tambiente)/TiempoEnfriamiento;
125
126 /* se crea un contador i para poder asegurar que la etapa dure el tiempo que calcula la
127 variable TiempoEnfriamiento. */
128 for (int i=0;i<TiempoEnfriamiento; i++)
129 {
130 //Esta condición se encarga de bajar la temperatura de horno de manera controlada.
131 if(ktc.readFahrenheit() < tc)
132 {
133 digitalWrite(relayPin,HIGH);
134 TiempoEncendido = TiempoEncendido+1;
135 }
136 else
137 {
138 digitalWrite(relayPin,LOW);
139 }
140 Serial.println(ktc.readFahrenheit());
141 // se establece un retraso para que el ciclo dure 1 segundo.
142 delay(1000);
143 tc=tc-GradEnfriamiento; }
144 /* se calcula el gasto electrico el horno consume 1.6 Kw y el precio
145 * de la energia es Q1.23.
146 */
147 delay(1000);
148 Consumo = ((TiempoEncendido/3600)*(1.6)*1.23);
149 delay(1000);
150 Serial.print("Consumo eléctrico (Quetzales):" );
151 delay(1000);
152 Serial.println(Consumo);
153 delay(1000);
154 // finaliza el programa.
155 exit(0);
156 }
```

Fuente: elaboración propia.

Figura 29: Documento prueba recocido parte 1

1



**Reporte de prueba para verificar recocido de polímeros  
de ingeniería utilizando la norma ISO-868 (2003).**

Noviembre 1, 2021

Fuente: elaboración propia.

### Alcance

Este documento tiene como fin ser una referencia del procedimiento que se realizó para medir la dureza de los polímeros de ingeniería en la Universidad del Valle de Guatemala. Este procedimiento se realizará con el fin de determinar si el horno de recocido es capaz de reducir la dureza de los polímeros que se sometieron al tratamiento térmico. El procedimiento de la prueba esta basado en la norma ISO-868:2003.]

### Antecedentes

Para la ejecución de la prueba se utiliza un durómetro *Shore D* portátil. Las pruebas se realizan con el fin de determinar el cambio de dureza que obtuvo el polímero de ingeniería antes y después de pasar por el horno de recocido.

### Abreviaciones

Tabla No.1 abreviaciones

Abreviación	significado
HA	Dureza de la escala shore A ( <i>Hardness A</i> )
HD	Dureza de la escala shore D ( <i>Hardness D</i> )

### Materiales y equipo

Tabla No.2 materiales y equipo

Cantidad	Descripción	Disponibilidad
1	Durómetro Shore D	Si
1	Horno de recocido	Si
3	Acrílico	Si
1	Polipropileno	Si

### Consideraciones

Para realizar una prueba de recocido efectiva hay que tomar en cuenta que la superficie de la pieza sea totalmente plana para que la punta del durómetro ingrese recta y no afecte el resultado. También hay que tomar en consideración que la pieza debe tener como mínimo 4 mm de espesor y las pruebas se tienen que hacer a una distancia de 9 mm entre si para obtener resultados mas certeros. En caso de que el durómetro *Shore D* de un resultado menor a 20HD es recomendable utilizar uno con escala *Shore A* y si el resultado del durómetro con escala *Shore A* es mayor a 90HA se recomienda utilizar un durómetro escala *Shore D*

Fuente: elaboración propia.

### Descripción del procedimiento

Tabla No.3 procedimiento

Paso	Descripción
1	Colocar la pieza a la que se le realizará la prueba en una superficie plana, horizontal y dura.
2	Detener el durómetro de manera horizontal y asegurarse que la punta del dispositivo este a una distancia de 9 mm de cualquier esquina de la pieza.
3	Aplicar presión a la pieza de manera rápida asegurando que la presión sea paralela a la punta penetradora.
4	Leer el resultado en el durómetro en $15 \pm 1$ segundos después del contacto.
5	Repetir el procedimiento en 5 puntos diferentes de la pieza distanciados a 6 mm como mínimo.

### Resultados

La prueba 1,2 y 3 se realizó utilizando una pieza de acrílico con un espesor de 6.35 mm y un diámetro de 50 mm.

Tabla No.4 prueba 1 acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	70	63.5
punto 2	72	62
punto 3	69.5	63.3
punto 4	71.5	66
punto 5	71.8	64.5
Promedio	70.96	63.86
Cambio de dureza		10.01%

Tabla No.5 Prueba 2 acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	66.5	61
punto 2	70.5	59
punto 3	72.4	60.5
punto 4	69.5	56
punto 5	67.8	58
Promedio	69.34	58.9
Cambio de dureza		15.06%

Fuente: elaboración propia.

Figura 32: Documento prueba recocido parte 4

4

Tabla No.6 Prueba 3 acrílico

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	75	71.5
punto 2	77.5	69.5
punto 3	75.4	68.5
punto 4	80.3	68
punto 5	77.5	64
Promedio	77.14	68.3
Cambio de dureza		11.46%

Para la prueba No.4 se utilizó una pieza de polipropileno que contaba con 4.32 mm de espesor y un diámetro de 40 mm

Tabla No.7 Prueba 4 polipropileno

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	68.5	61
punto 2	66	55
punto 3	69.5	58.5
punto 4	65	61
punto 5	70.5	62.3
Promedio	67.9	59.56
Cambio de dureza		12.28%

Para la prueba No.5 se utilizó una pieza de Vekton (Nylon 6) que contaba con 11.43 mm de espesor y un diámetro de 25 mm

Tabla No.8 Prueba 5 Vekton

	Dureza antes (HD)	Dureza después (HD)
punto 1	62.5	55
punto 2	64.3	54
punto 3	65.5	58.5
punto 4	62.5	57
punto 5	64	61.3
Promedio	63.76	57.16
Cambio de dureza		10.35%

Fuente: elaboración propia.

### **Conclusiones**

1. Se presentó una disminución de dureza en todas las piezas después de ser recocidas, esto indica que el recocido si cumplió con su propósito de reducir la dureza.
2. Se logró obtener la dureza promedio de todas las pruebas realizadas utilizando el durómetro con escala *Shore D*.

### **Referencias**

1. ISO 868 (2003). *Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)*. Extraído de:  
[http://driso.ir/standards/iso/ISO\\_868\\_2003\\_-\\_Plastics\\_and\\_Ebonite.pdf](http://driso.ir/standards/iso/ISO_868_2003_-_Plastics_and_Ebonite.pdf)

Fuente: elaboración propia.

