

## ***Apéndice C. Sistema de enfriamiento, enrollado de filamento y peletizado***

Valentina Angel Romero, Carlos José Barrios Álvarez, Brayan Yesid Parada Martínez y Héctor  
Hernando Quintero Peláez\*

2023

En este capítulo se encontrará la caracterización, el informe funcional, la propuesta de diseño, las actividades de intervención y la implementación de la línea de peletizado.

### ***Tabla de Contenido***

1.	Caracterización.....	3
2.	Informe del análisis funcional.....	4
3.	Propuesta de Diseño .....	5
3.1	Enfriamiento.....	6
3.2	Enrollado .....	13
3.3	Peletizado.....	15
3.4	Ficha Técnica.....	18
4.	Actividades de intervención .....	20
4.1	General .....	20
4.2	Implementación Peletizado.....	23
4.2.1	Boquilla para pellets.....	23

---

\* Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander

4.2.2	Sistema de temperatura y control de la extrusión para el peletizado .....	25
4.2.3	Sistema de peletizado .....	26
4.2.4	Resultados .....	32
Referencias Bibliográficas .....		35

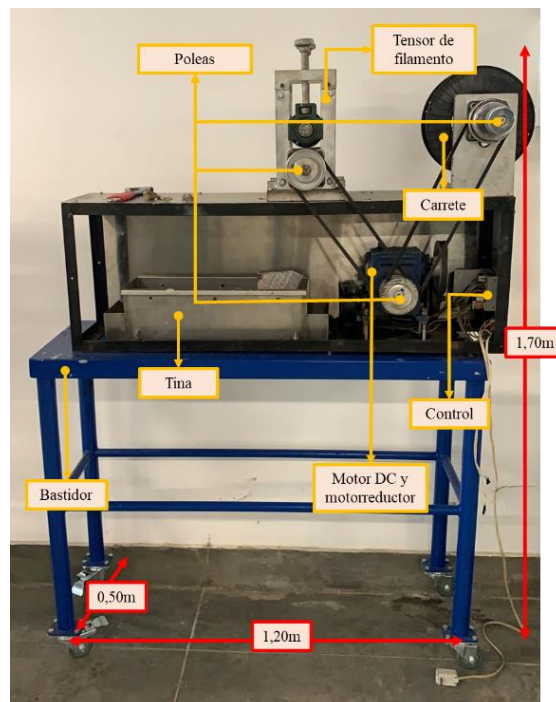
## 1. Caracterización

Inicialmente este módulo de la planta se compone únicamente del proceso de enrollado. El banco cuenta con un motor DC acoplado a un motorreductor que hacen girar el carrete y un par de rodillos, estos últimos se encargan de dar el diámetro adecuado al filamento a la vez que ejercen tensión y empujan el filamento hacia el carrete. La máquina cuenta con un sistema de sujeción que permite acoplar carretes de diferentes anchos y diámetros. Por último, está el sistema eléctrico que cuenta con un control para las revoluciones del enrollado.

De acuerdo con la información acerca de la adquisición del equipo, en este módulo estaba incluido un sistema de enfriamiento, pero no hay un proceso concreto, solo se presenta una tina con agujeros. Los componentes se observan en la Figura 1.

**Figura 1.**

*Componentes de la enrolladora.*



## 2. Informe del análisis funcional

A partir de la caracterización de la maquina y su funcionamiento se realizó una análisis de sus componentes. En primer lugar, se estudió la enrolladora y se obtuvo que:

- El sistema para enrollado es capaz de satisfacer las diferentes velocidades de salida del filamento ya que cuenta con un control que permite un amplio rango de variación para las revoluciones del motor.
- La transmisión de potencia del motor hacia el carrete es por poleas, se encuentra está expuesta al no contar con una protección de seguridad para el operario. Se examinó la posibilidad de cambiar de posición los elementos, pero se encontró que el motor esta fijo a la estructura mediante soldadura. ver en la **Figura 2**

**Figura 2.**

*Motor DC de la enrolladora del laboratorio*



Con respecto a la parte eléctrica se encontró un deterioro de los cables que energizan la máquina, así como los interruptores. Incluso hay un juego de interruptor de codo con cables que no energizan ningún sistema. Se observa en la **Figura 3**.

**Figura 3.**

*Sistema eléctrico de la enrolladora del laboratorio*



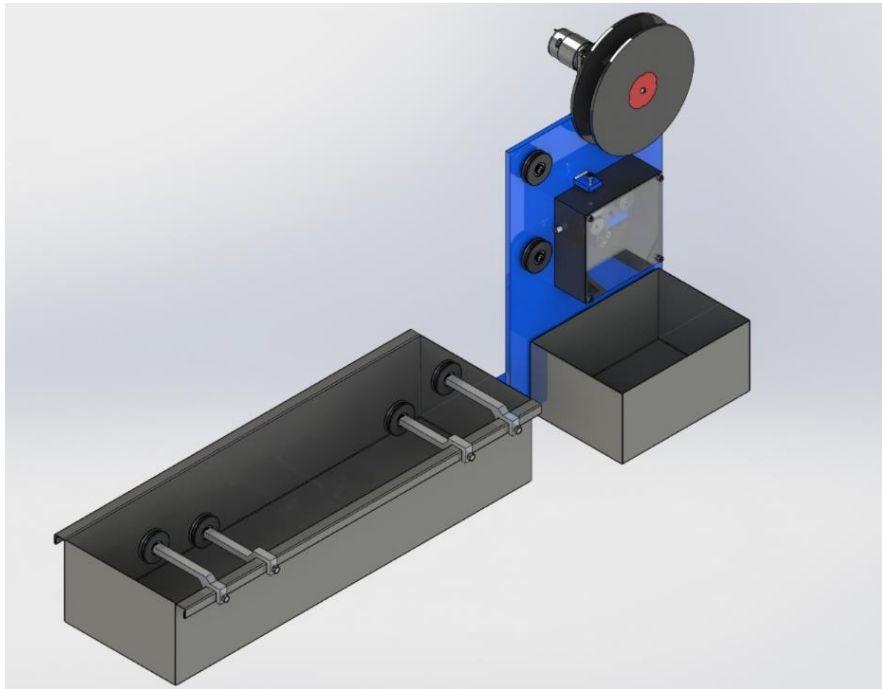
Finalmente, se analiza la estructura donde se encuentra la máquina y se encuentra el espacio suficiente para implementar las líneas de enfriamiento y peletizado.

### **3. Propuesta de Diseño**

Este subsistema se diseñó en base a los flujos masicos de trabajo de la extrusora y se dispuso de tal manera que la tina de enfriamiento y las poleas que guían el material sean comunes a ambos procesos, lo que permite menos costos y un menor requerimiento de espacio. A su vez el sistema de enrollado se ubicó sobre el sistema de pellets para aprovechar la misma base y hacer más sencillo el montaje. Algunos componentes fueron pensados y diseñados para ser manufacturados mediante nuevas técnicas como la impresión 3D y el sistema de corte permite realizar grandes variaciones en el largo de los pellets, como también permite el montaje de un rotor con diferente cantidad de filos. Se muestra en la **Figura 4**.

**Figura 4.**

*Ensamblaje enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto*



### 3.1 Enfriamiento

La eliminación del calor para mantener las dimensiones del filamento es tan importante para un proceso como agregar el calor durante la extrusión para hacer que el polímero fluya (Frankland, 2015). El filamento producido por la extrusora debe mantener su forma y dimensión luego de salir por la boquilla, donde ha estado bajo un rango de temperaturas de trabajo que oscila entre los 30°C y los 250°C, aproximadamente a 220°C. Para tal fin se examina las posibilidades de enfriamiento donde se contempla convección forzada por medio de ventiladores y una convección combinada por medio de una tina con agua, donde interactúa el hilo circulante con el agua por convección forzada y con el aire ambiente por una convección natural. Al final, se selecciona la opción con agua debido a la alta capacidad calorífica que tiene el fluido, de modo que se puede instalar un sistema estacionario, sencillo, eficiente y que sea económico.

El proceso que se propone contempla que después de que el filamento salga por la boquilla se sumerge en un recipiente con agua entregándole calor y a su vez la superficie del agua le suministra calor al ambiente. Cabe destacar que las condiciones iniciales se basan en los parámetros del modelado teórico realizado a la extrusora del laboratorio de mantenimiento. En la **Tabla 1**, se muestran los datos necesarios para el diseño de la tina de enfriamiento.

**Tabla 1.**

*Condiciones iniciales para cálculo y propiedades ambientales de Bucaramanga.*

<b>Condiciones iniciales para cálculo y ambientales de Bucaramanga</b>	
Flujo másico de la extrusora $\dot{m}$	2.42 [kg/h]
Temperatura de salida de la extrusora $T_1$	230°C
Presión a la altura de Bucaramanga $P_{atm}$	90.322 [KPa] <sup>a</sup>
Temperatura máxima diaria aproximada $T_{amb}$	27°C <sup>b</sup>
<b>Propiedades del aire <math>P_{atm}</math> y <math>T_{amb}</math> de Bucaramanga</b>	
Calor específico $C_p$	1.006 [J * K/kg]
Número de Prandtl $P_r$	0.7071
Densidad $\rho_\infty$	1.048 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosidad dinámica $\mu$	0.00001854 [N * S/m <sup>2</sup> ]
Viscosidad cinemática $\nu$	0.00001769 [m <sup>2</sup> /s]
Conductividad Térmica $K$	0,02587 [ $\frac{J}{s * K * m}$ ]

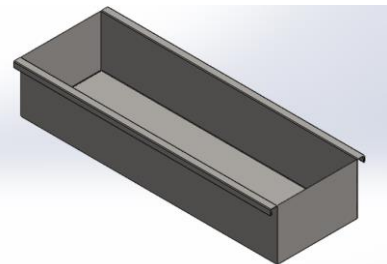
*Nota: Recopilado de <sup>a</sup> este dato se calculó a partir de la altura de la ciudad <sup>b</sup> (Weather Spark, s.f.)*

Según la metodología de (Cengel & Ghajar, 2011) y considerando un sistema concentrado en condiciones estacionarias de operación a presión atmosférica y temperatura máxima diaria de Bucaramanga, se determinan en la **Tabla 2** las dimensiones de la tina.

**Tabla 2.**

*Dimensiones de la tina de enfriamiento.*

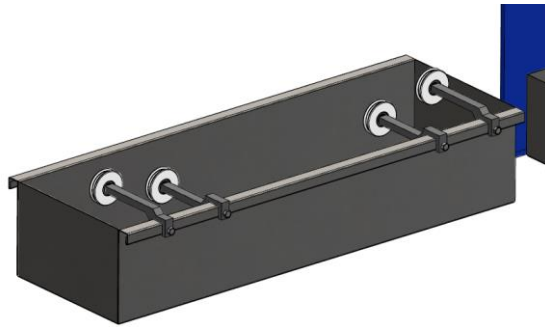
<b>Dimensiones de la tina</b>	
<b>Altura</b>	141 mm
<b>Ancho</b>	258 mm
<b>Largo</b>	696 mm



El rango de temperaturas que opera la tina es de 41-71°C. A través de ella circula flujo constante de material, cuenta con sistema de poleas ver **Figura 5**, dispuesto de manera que el filamento para enrolado y la para pellets se transporta continuamente y se sumerge lo necesario para que el agua absorba en calor y la temperatura del plástico a la salida sea menor.

**Figura 5.**

*Sistema de poleas para el enfriamiento de la propuesta de diseño*



Como el diámetro del material es muy pequeño, la transferencia de calor entre este y el agua se realiza mediante un análisis de sistemas concentrados ( $Biot < 0.1$ ), con ello se supone que la temperatura entre la superficie del material y el centro es aproximadamente la misma. La finalidad del análisis es determinar el tiempo por el cual el material debe estar en el agua y que tan larga debe ser la tina con agua para que el filamento llegue a una temperatura de embobinado, es decir que no presente deformaciones, en el caso del PETG según (SKChemicals, 2012), la temperatura límite antes de que empiece la deformación es de 83°C.

A continuación, se presentan las ecuaciones que definen la transferencia de calor de acuerdo con la teoría de (Cengel & Ghajar, 2011). Con las variables se determina un sistema de ecuaciones para establecer la energía en forma de calor que se disipa y la temperatura de salida del filamento.



- **Cálculo del número de Biot y la ecuación para sistemas concentrados:**

Número de Biot

Para sistemas concentrados

$$B_i = \frac{h_{agua} * L_c}{K_{agua}}$$

$$\frac{T_2 - T_{agua}}{T_1 - T_{agua}} = e^{-bt}$$

Donde:

$$b = \frac{h_{agua}}{\rho_{agua} * C p_{agua} * L_c}$$

$T_1$  la temperatura del filamento a la salida de la extrusora (230°C)

$T_2$  la temperatura del filamento después del proceso de enfriamiento.

$L_c$  la longitud característica del filamento.

A continuación, se definen las ecuaciones de las variables del número de Biot y la relación para sistemas concentrados:

- *Cálculo de la longitud característica del filamento:*

$$L_c = \frac{\forall}{A_{sup,fil}}$$

Donde:

$\forall$  es el volumen superficial del filamento pasando por la tina y es:

$$\forall = \frac{\pi}{4} * D^2 * largo_{tina}$$

$A_{sup,fil}$  es el área superficial del filamento:  $A_{sup,fil} = \pi * largo_{tina} * D$

Se define la longitud característica del filamento:  $L_c = \frac{\frac{\pi}{4} * 0.00175^2 * 0.696}{\pi * 0.696 * 0.00175} = 0.00048[m]$

- *Cálculo del coeficiente de convección para el agua:* En primer lugar, se calcula el Reynolds, de acuerdo con la velocidad con la que sale el filamento de la extrusora  $Vel$ .

$$Re = \rho_{agua} * Vel * \frac{D}{\mu_{agua}} \quad Vel = \frac{\dot{m}}{\rho_{pet} * A_{trans}}$$

$$Vel = \frac{2.5/3600}{0,00135 * 100^3 * \pi * \left(\frac{0.00175}{2}\right)^2} = 0.214[m/s]$$

Las propiedades del agua se hallan a la temperatura superficial del agua  $T_{agua} = T_{sup}$  y presión atmosférica de Bucaramanga. Se encuentra la relación con el Número de Nusselt para convección forzada externa con sección transversal circular y Reynolds entre 40-4000:

$$Nu = 0,683 * Re^{0,466} * Pr_{agua}^{1/3}$$

$$Nu = \frac{h_{agua} * D}{K_{agua}}$$

- ***Balance de energía para el sistema de enfriamiento:***

$$Q_{pet} = Q_{agua} = Q_{conv\_aire-agua} + Q_{conv\_aire-metal}$$

$$Q_{pet} = \dot{m} * Cp_{pet} * (T_2 - T_1)$$

$$Q_{conv\_aire-agua} = h_1 * A_{s1} * (T_{sup} - T_{amb})$$

$$Q_{conv\_aire-metal} = h_2 * A_{s2} * (T_{sup} - T_{amb})$$

Siendo:

$h_1$  es el coeficiente de convección que hay entre el aire y el agua.

$h_2$  es el coeficiente de convección que hay entre el aire y el metal de la tina.

$A_{s1}$  es el área superficial de agua en contacto con el aire.

$A_{s2}$  es el área superficial del metal en contacto con el aire.

- *Cálculo del largo de la tina:*

$$L_{tina} = Vel * t$$

Siendo t el tiempo que se demora un diferencial de filamento en pasar la tina. Cabe resaltar que los valores de  $ancho_{tina}$  y  $alto_{tina}$  para el cálculo de áreas corresponden al ancho y alto del agua, y son diferentes a las dimensiones de la tina debido a que el elemento no se llena completamente y el ancho corresponde al interno de la tina.

$$A_{s1} = largo_{tina} * ancho_{tina} = 0.696 * 0.22 = 0.153[m^2]$$

$$A_{s2} = largo_{tina} * ancho_{tina} + 2 * largo_{tina} * alto_{tina} + 2 * alto_{tina} * ancho_{tina}$$

$$A_{s2} = 0.696 * 0.22 + 2 * 0.696 * 0.123 + 2 * 0.123 * 0.22 = 0.3785[m^2]$$

- *Cálculo de los coeficientes de convección  $h_1$  y  $h_2$ :*

*Coeficiente de expansión volumétrica:*

$$\beta = -\frac{\rho_{\infty} - \rho}{\rho(T_{\infty} - T_{sup})}$$

Siendo:

$\rho_{\infty}$  es la densidad del aire en Bucaramanga.

$\rho$  es la densidad del aire en la superficie.

$T_{\infty}$  es la temperatura del aire en Bucaramanga.

*Coeficiente de convección  $h_1$  para hallar el calor entregado del agua al ambiente:*

Cálculo del número de Rayleigh, a partir del  $G_{r1}$  el número de Grashof y  $P_r$  el número de

Prandtl:

$$R_{a1} = G_{r1} * P_r$$

Siendo:

$$G_{r1} = \frac{(g * \beta * (T_{sup} - T_{\infty}) * L_{c1}^3 * P_r)}{\nu^2}$$

Donde:

$$L_{c1} = \frac{A_{s1}}{2 * largo_{tina} + 2 * alto_{tina}} = 0.093[m]$$

Para el número de Nusselt por convección natural sobre superficies externas para superficie horizontal y número de Rayleigh entre  $10^4$ - $10^7$ :

$$Nu_1 = 0,54 * R_{a1}^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_1 = \frac{h_1 * L_{c1}}{K}$$

- *Coeficiente de convección  $h_2$  para hallar el calor entregado del metal de la tina al ambiente:*

Cálculo del número de Rayleigh, a partir de  $G_{r2}$  Número de Grashof y  $P_r$  Número de Prandtl.

$$R_{a2} = G_{r2} * P_r$$

Siendo:

$$G_{r2} = \frac{(g * \beta * (T_{sup} - T_{\infty}) * L_{c2}^3 * P_r)}{\nu^2}$$

$$L_{c2} = ancho_{tina} = 0.22[m]$$

Para el número de Nusselt por convección natural sobre superficies externas para superficie vertical y número de Rayleigh entre  $10^4$ - $10^9$ :

$$Nu_2 = 0,59 * R_{a2}^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_2 = \frac{h_2 * L_{c2}}{K}$$

- **Resultados de la transferencia de calor:** Definidas las ecuaciones se introducen los datos en el software EES para encontrar la temperatura superficial y las energías en forma de calor, los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Resultados de la transferencia de calor del enfriamiento*

Parámetros	Valor
Calor extraído del filamento, $Q_{pet}$	131.8 [W]
Calor del agua al aire, $Q_{conv\ aire-agua}$	41.46 [W]
Calor del metal de la tina al aire, $Q_{conv\ aire-metal}$	90.4 [W]
Temperatura de salida del filamento, $T_2$	71.8[°C]

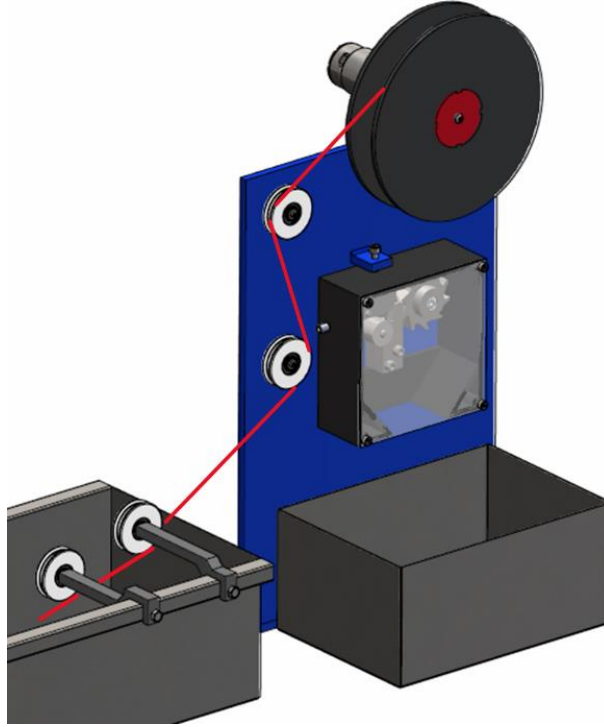
Se evidencia que la temperatura del PETG a la salida de la tina de enfriamiento es de aproximadamente 72°C, es decir está 10° debajo de la temperatura de transición vítrea, indicando que el filamento está en un estado sólido y no deformable apto para los procesos de peletizado o enrollado.

### 3.2 Enrollado

Las poleas que guían el filamento se ubicaron estratégicamente para que mantenga la tensión a transporte, en la Figura 6 se puede ver el camino que sigue el filamento para enrollado.

Figura 6.

Configuración del módulo para enrollado.



Su cálculo fundamental son las revoluciones necesarias del carrete para la producción que arroja la extrusora, de ahí se selecciona el motor. Se calcula a partir del flujo másico en relación con la velocidad de salida de filamento y de allí la velocidad angular del carrete:

$$\dot{m}_f = \rho * A_{\text{filamento}} * V_{\text{filamento}}$$

$$\dot{m}_f = \rho * \pi * \left( \frac{D_{\text{filamento}}}{2 * 1000} \right)^2 * V_{\text{filamento}}$$

$$\frac{2.515 \text{ [kg/h]}}{3600} = 0.00135 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right] * 100^3 * \pi * \left( \frac{1.75}{2 * 1000} \right)^2 * V_{\text{filamento}}$$

$$V_{\text{filamento}} = 0.2151 \text{ [m/s]}$$

Donde:

$\dot{m}_f$  es el flujo másico de producción de filamento

$\rho$  es la densidad del PET

$A_{filamento}$  es el área del transversal del filamento

$D_{filamento}$  es el diámetro del filamento (1.75 mm)

$V_{filamento}$  es la velocidad de salida del filamento

Definida la velocidad del filamento se encuentra la velocidad angular  $\omega$  y se realiza la conversión de  $rad/s$  a  $rpm$ .

$$V_{filamento} = \frac{D_{carrete}}{2} * \omega$$

$$0.2151[m/s] = \frac{0.08[m]}{2} * \omega$$

$$\omega = 5.379[rad/s]$$

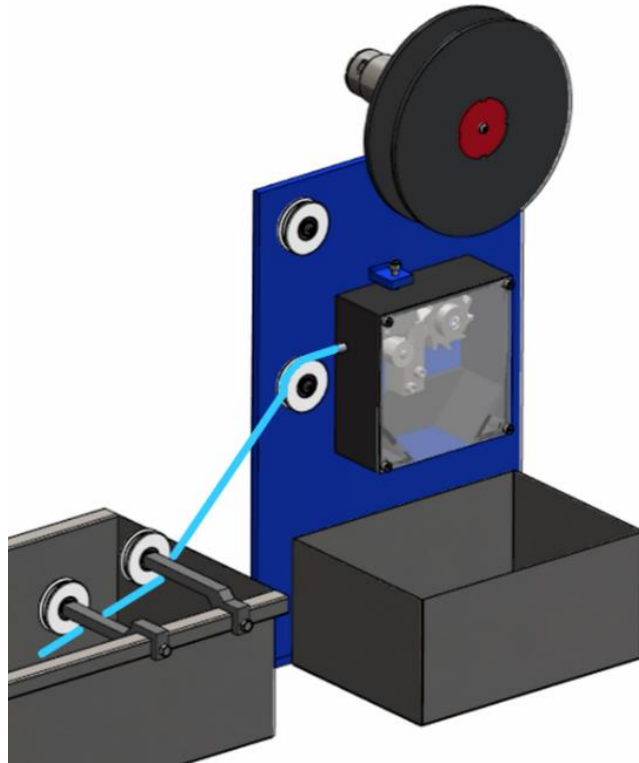
$$RPM_{carrete} = \frac{\omega * 60}{2\pi}$$

$$RPM_{carrete} = \frac{5.379[rad/s] * 60}{2\pi}$$

$$RPM_{carrete} = 51.36[rev/min]$$

### 3.3 Peletizado

En la Figura 7 se puede ver el camino que sigue el filamento para la producción de pellets. Los componentes que forman el sistema de producción de pellets se encuentran en una caja de PLA que funciona como una protección para el operario y brinda visibilidad del proceso. Además, cuenta con un recipiente para el almacenamiento de los pellets.

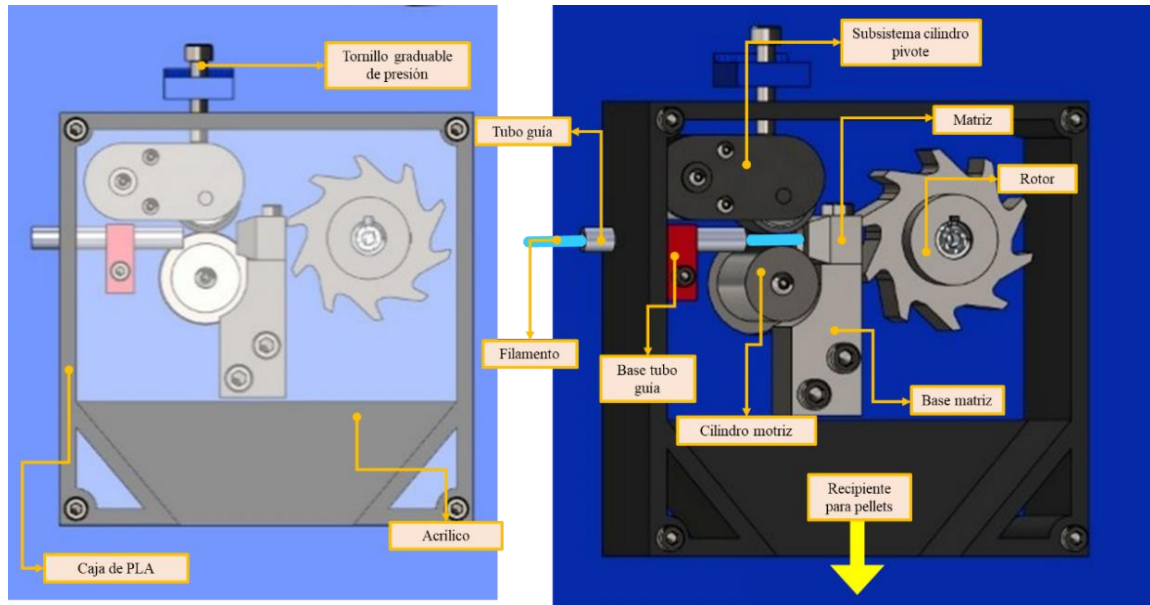
*Figura 7.**Configuración del módulo para peletizado.*

El sistema de peletizado consta de dos partes: sistema de rodillos, y sistema de corte de pellets. El sistema de rodillos está conformado por un cilindro motriz y un subsistema de cilindro pivote, donde este último es el encargado de mantener la compresión en el material para obtener un diámetro de filamento deseado y empujarlo hacia el sistema de corte de pellets, cabe destacar que la presión que ejerce el cilindro pivote es graduable mediante un tornillo (revisar Apéndice D). El sistema de corte de pellets está conformado por la base, la matriz que funciona como guía para que el filamento, y por el rotor que en su giro va cortando los pellets que caen a la zona de almacenamiento, se basó en la teoría de peletizado por rotor de (Morton-Jones, 1997). Los sistemas a detalle se observan en la Figura 8.



Figura 8.

Componentes del sistema de peletizado.



Para la selección del motor es necesario saber el torque requerido para romper el PET y las revoluciones para corte que depende de la velocidad del filamento. Para ello, con la propiedad de la energía de impacto del PET  $G_c$  se calcula la fuerza de corte a partir del diámetro del pellet  $D_{pellet} = 4mm$  y el  $N^\circ_{hilos}$  que en este caso es 1.

$$F_{corte} = G_c * D_{pellet} * N^\circ_{hilos} [N]$$

$$F_{corte} = 82000 \frac{J}{m} * \frac{4}{1000} m * 1 = 328 [N]$$

El torque se calcula teniendo en cuenta la distancia desde el eje del motor hasta el punto de aplicación de la fuerza,  $d_{corte} = 3[cm]$ . Se obtiene que  $Torque = 9.84 [N.m] = 100.3 [kg.cm]$ .

Ahora bien, para las revoluciones se toma en cuenta variables como el número de filos del rotor y el largo del pellet, siendo 10 y 3 [mm], respectivamente. A continuación, se calcula con las revoluciones del rotor:

$$Tiempo_{corte} = \frac{s}{Vel_{pellets}} = 0.073 [s]$$

$$\omega_{pellets} = \frac{2\pi}{Tiempo_{corte} * N^{\circ}_{filos}} = 15.33 [rad/s]$$

$$RPM_{rotor} = \omega_{pellets} * \frac{60}{2\pi} = 83 [revs/min]$$

El valor obtenido es: 83[rpm]. Con esta información, se selecciona la referencia de motorreductor M7-RS775-12 de la empresa (Zebra Gearbox, s.f.) sus características se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Selección del motor para peletizado.

Motorreductor DC	
Voltaje	12 V
Amperaje	10 A
Torque	281 kg.cm
Revoluciones	114 rpm

### 3.4 Ficha Técnica

En la Figura 9 se presenta la ficha técnica del diseño propuesto para el sistema de enfriamiento, enrollado y peletizado de la planta prototipo.

Figura 9.

Ficha técnica Enfriamiento, enrollado y peletizado diseño propuesto

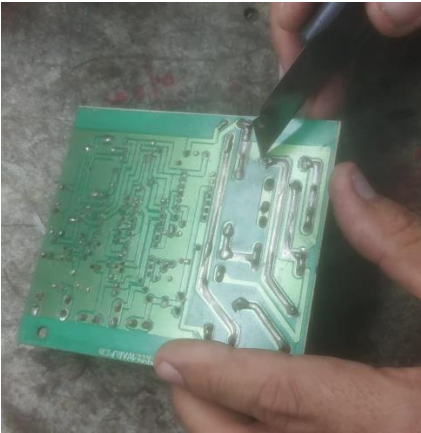
FICHA TÉCNICA		
ENFRIAMIENTO, ENROLLADO Y PELETIZADO		
<b>Proceso de producción</b>		Filamento y Pellets
<b>Tipo de enfriamiento</b>		Convección natural por agua
<b>Capacidad/Rendimiento</b>		2,42 kg/h
<b>N° de Operarios</b>		1
<b>Potencia</b>	<b>Motorreductor</b>	12V 10A 281kg/cm 114rpm DC
	<b>Tensor</b>	Sí, tipo prensa
<b>Enfriamiento</b>	<b>Elemento</b>	Tina 26057 cm <sup>3</sup>
	<b>Descripción</b>	Filamento circula a través de las poleas en la tina
<b>Filamento</b>	<b>Frecuencia</b>	Continuo, con poleas hasta carrete en giro
<b>Pellets</b>	<b>Frecuencia</b>	Continuo
	<b>Tipo de Corte</b>	Por rotor para corte en frío

4. Actividades de intervención

De acuerdo con el informe del análisis del funcional y el modelo teórico realizado para la propuesta de diseño, se identifican algunas actividades de intervención para mejorar el estado del equipo. Se presentan en la Tabla 5.

4.1 General

Tabla 5.  
*Actividades de intervención al módulo de enfriamiento y enrollado del laboratorio*

SITUACIÓN	ACTIVIDAD	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
El motor para embobinado de filamento no funciona correctamente ya que en ocasiones no enciende, el carrete de filamento tiene un giro intermitente, lo que no permite una continuidad en el enrollado.	Se analiza la PCB que controla las revoluciones del motor DC, encontrando un componente que no tiene buena transferencia de calor a través de su disipador, provocando deterioro en una conexión de estaño entre dos componentes por lo que se repara la soldadura permitiendo mejor paso de corriente. Además, se cambia la pasta térmica que une el disipador con el componente que desprende energía en forma de calor.		El motor no presenta discontinuidad en su funcionamiento, y el carrete gira normalmente según el cambio de revoluciones que se ajuste con el potenciómetro.

La configuración con la que está hecha la tina de agua no permite un buen manejo del filamento. La tina cuenta con agujeros para el ingreso de filamento sin embargo se dificulta el manejo de material.

Se diseña un sistema de poleas para que guíe el filamento dentro del agua y tapones para obtener un mayor nivel de agua en la tina, y así retirar gran parte del calor con el que sale el producto.



Se facilita la manipulación del filamento y hay menos tolerancia en el diámetro debido a que tiene un mejor enfriamiento, mejorando la producción tanto de pellets como de filamento para impresión 3D.

El cable que energiza el sistema de embobinado de filamento está en deterioro por lo que hay riesgo de sobrecargas o electrocuciones en el peor de los casos.

Se adquiere cable calibre 12 y una clavija para conectar el sistema de embobinado a la fuente de corriente.



Se logró mejorar las conexiones eléctricas y la seguridad en el uso de la máquina.

Hay un interruptor dañado que además no tiene ninguna función en la sección de control de la máquina por lo que ocupa espacio que se puede utilizar para otros fines.

Se instala un interruptor de codo con el fin de encender o apagar los dos ventiladores instalados en la sección de enfriamiento de pellets, se añade también etiquetas para identificar cada elemento.



Se aprovechó un espacio desperdiciado por el elemento dañado, y ahora cada interruptor se identifica mejor respecto al elemento que controla o energiza.



## 4.2 Implementación Peletizado

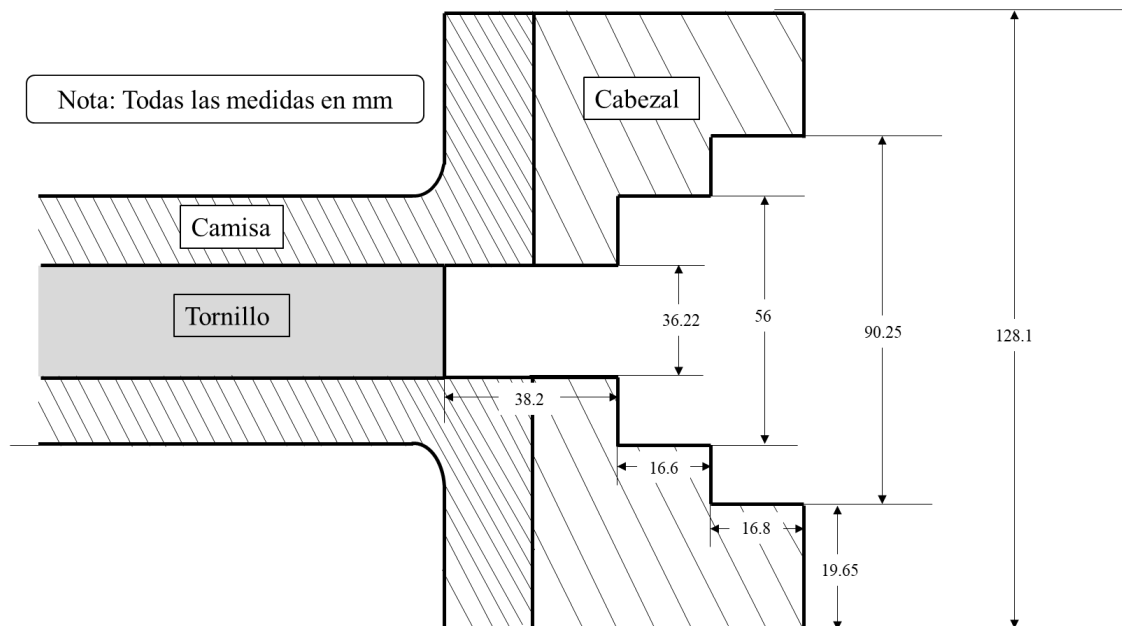
Para añadir una línea de producción de pellets en la planta del laboratorio se realizó un diseño aprovechando los espacios disponibles y tomando en consideración las variables de funcionamiento de las máquinas.

### 4.2.1 Boquilla para pellets

En la Figura 10 se observa la geometría del cabezal que se tuvo en cuenta para dimensionar la boquilla, de igual manera que los agujeros de los tornillos de acople del sistema.

Figura 10.

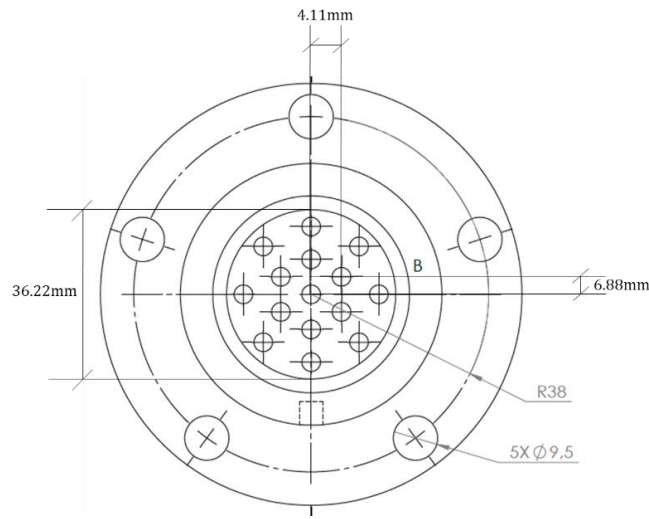
Dimensiones del cabezal de la extrusora de la EIM.



El patrón de agujeros para la boquilla sigue la misma metodología de cálculo utilizada para el plato rompedor de la extrusora consignado en la sección 8.4.4 del libro, teniendo en cuenta un  $D_{int} = 36.22 [mm]$ . Las medidas se muestran en la Figura 11.

Figura 11.

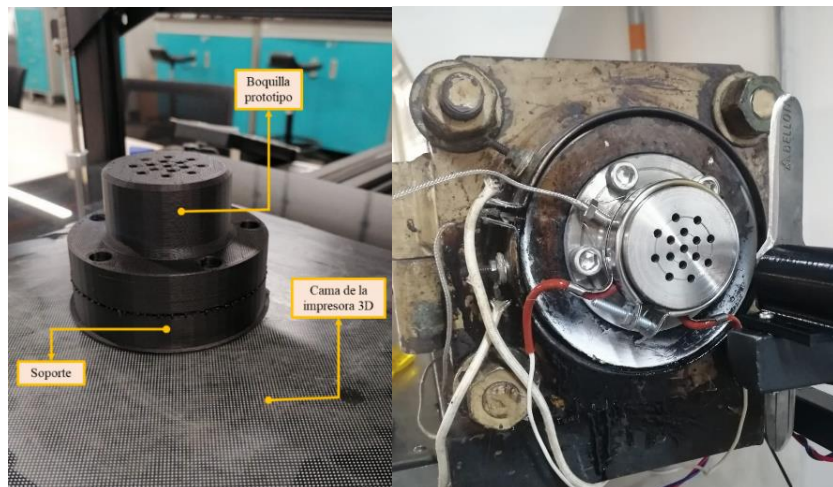
Resultados de la geometría de la boquilla para pellets



Una vez terminado el diseño, se realizaron los planos para la fabricación de la boquilla, consignados en el Apéndice E. La fase de construcción se realizó en dos etapas: una primera de prototipado en impresión 3D para verificar que se acoplara adecuadamente al cabezal de la extrusora (izq.Figura 12). Y una segunda etapa de manufactura, donde bajo las especificaciones de los planos se mandó a fabricar la boquilla en un taller de mecanizado en acero AISI 4140 (der. Figura 12)

Figura 12.

Boquilla prototipo y boquilla montada con acero AISI 4140





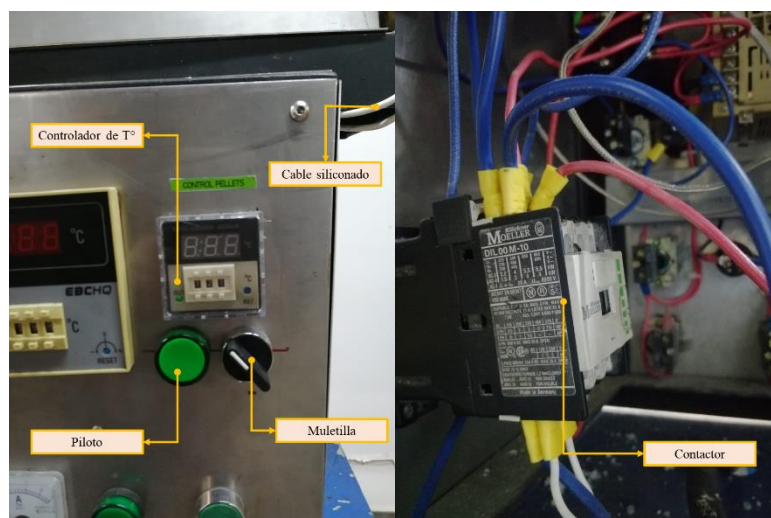
#### 4.2.2 Sistema de temperatura y control de la extrusión para el peletizado

Teniendo en cuenta las dimensiones del cabezal de la extrusora se hace necesario implementar una resistencia en la boquilla, incluyendo su sistema de control eléctrico, para garantizar unas mejores condiciones de salida del filamento para peletizado. Debido al calor acumulado con el que cuenta el material en las etapas del tornillo no se hace necesario aplicar demasiada potencia eléctrica para ejercer un control sobre la temperatura de salida del filamento. Para la boquilla se manda a elaborar una resistencia de 56 mm de diámetro interno y 20 mm de ancho a 150W a 220V y 2 A por recomendación de los fabricantes.

Para el sistema de control eléctrico de la resistencia se hizo necesario adquirir de los siguientes elementos ver Figura 13: un controlador, que establece el set point de la resistencia a cierta temperatura; el contactor, encargado de enviar corriente a la resistencia; una muletilla, para accionar la resistencia, un piloto o testigo, que indica que el control está en operación, y cable siliconado para conectar la resistencia con el contactor y dicho cable resista las altas temperaturas.

Figura 13.

Parte frontal y posterior del sistema montado para el control de  $T^\circ$  de la resistencia eléctrica.



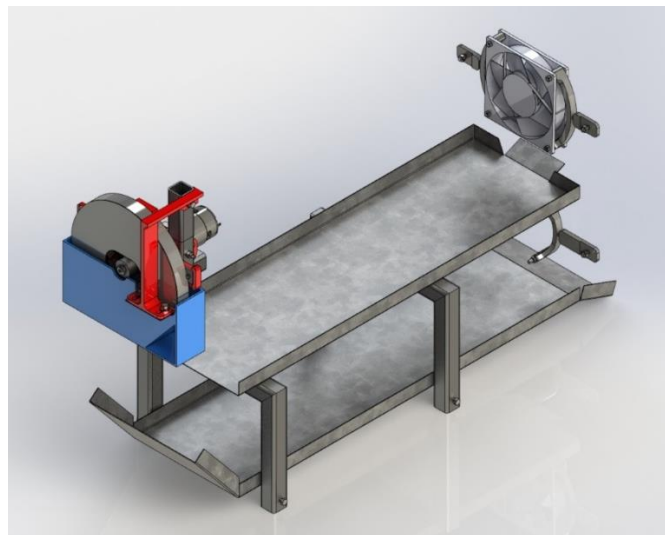
Para su instalación en la máquina extrusora del laboratorio se hizo necesario taladrar la lámina de acero inoxidable del sistema de control de las demás resistencias, así como la ubicación de los elementos de protección eléctrica en la parte posterior de la máquina.

#### 4.2.3 Sistema de peletizado

Para diseño del sistema de peletizado se tuvo en cuenta el espacio disponible y se ubicó después del sistema de rodillos con el objetivo de realizar variaciones del diámetro de filamento. Para la fabricación de este sistema se hizo uso de diversos materiales con el fin de reducir los costos; entre los que se pueden encontrar: la tubería estructural, la impresión 3D (PLA), acero templado para las cuchillas, y láminas de acero galvanizado para la zona de enfriamiento. Las piezas que se construyeron en impresión 3D fueron diseñadas específicamente para este tipo de manufactura evitando las superficies o áreas en voladizo con la finalidad de reducir los tiempos de impresión y la cantidad de material. También es importante mencionar que la configuración de las impresiones se realizó buscando la más alta resistencia de las piezas. En la Figura 14 se observa el CAD del diseño a implementar.

Figura 14.

Render del sistema de peletizado implementado en el laboratorio.

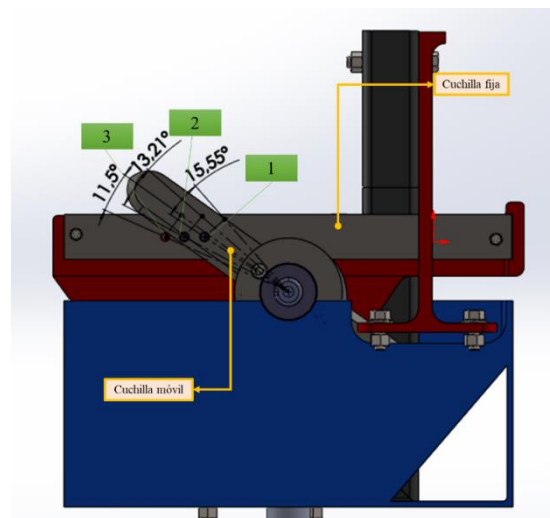


El torque necesario para el proceso de los pellets relaciona la fuerza de corte del filamento  $F_{corte} = 328 \text{ N}$ , obtenida de los cálculos realizados en la sección 9.3., con la distancia de corte de  $d_{corte} = 4.31[\text{cm}]$  para la distribución geométrica establecida. En el diseño se propone que la cuchilla fija, presentado en la Figura 15, se realizó con 3 agujeros buscando una distribución donde la cuchilla móvil cortara en un solo giro 3 hilos de filamento haciendo un corte a la vez, a partir del mismo torque. Para el cálculo, se obtiene que

$$\text{Torque} = F_{corte} * d_{corte} = 328 * \frac{4.11}{100} = 13.48 [\text{N.m}] = 144.1 [\text{kg.cm}]$$

Figura 15.

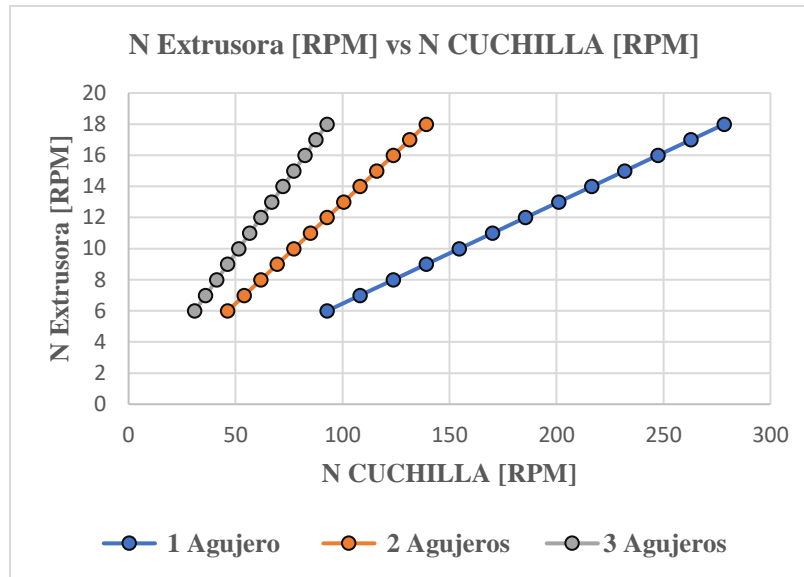
CAD del sistema de peletizado implementado en el laboratorio de mantenimiento.



Definido el torque necesario, se debe establecer la relación entre las revoluciones de la extrusora con el flujo masico del filamento para pellet que produce. En la **Figura 16** se presenta la variación de las revoluciones de la cuchilla de acuerdo con el número de filamentos que pasan por los agujeros de la cuchilla fija. Este diagrama se realiza con el supuesto que las revoluciones de trabajo de la extrusora son 18rpm máximas, sección 8.3 del capítulo de Sistema de Extrusora.

**Figura 16.**

Variación de las revoluciones de la cuchilla dependiendo el número de filamentos a cortar.



Se evidencia en la **Figura 16** que a medida que disminuye el número hilos por los agujeros se incrementa las revoluciones necesarias del motor de la cuchilla para suplir la demanda de producción de la extrusora. Teniendo en cuenta ese principio, se concluye que el motor necesita 93 rpm para suplir 2.2 kg/h usando 3 agujeros. Se selecciona un motorreductor DC de marca (Zebra Gearbox, s.f.), sus características se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

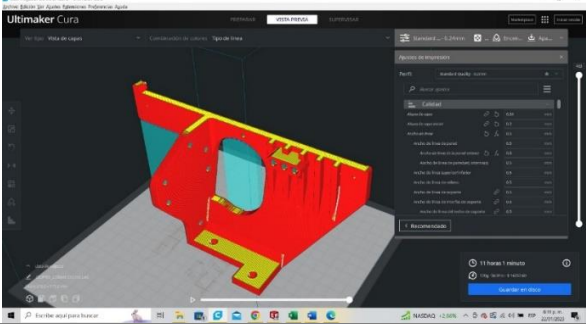
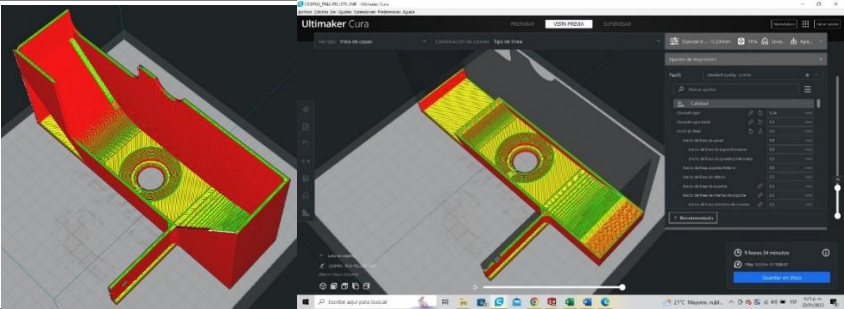
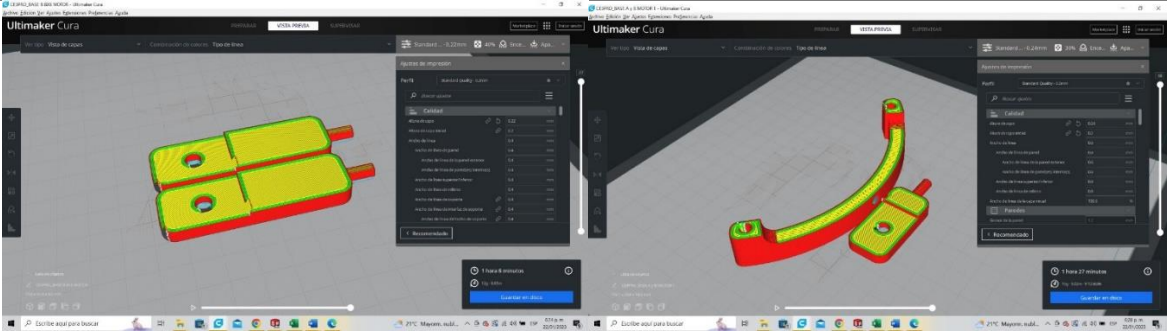
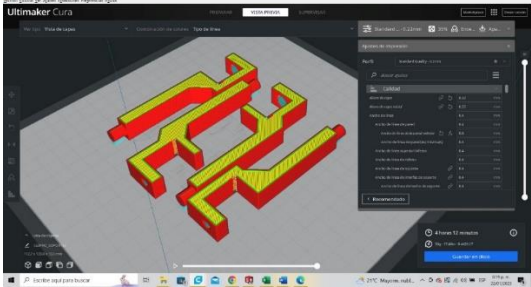
Selección del motor para peletizado del laboratorio

Motorreductor DC		
<b>Voltaje</b>	12 v	
<b>Amperaje</b>	10 A	
<b>Torque</b>	281 kg.cm	
<b>Revoluciones</b>	114rpm	

Nota: Adaptado de (Zebra Gearbox, s.f.).

Para la estructura que sostiene el sistema de corte de los pellets y su almacenamiento, se plantearon modelos CAD para fabricación por impresión 3D. Los archivos STL con los parámetros ingresados para la optimización de material y el tiempo de impresión, se exponen en la Tabla 7 .

Tabla 7.  
Impresión de los componentes en PLA

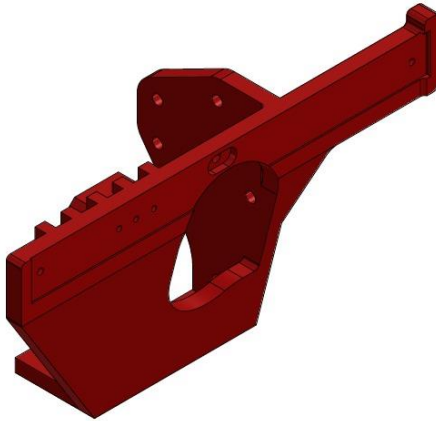
Configuración de parámetros de impresión 3D en Ultimaker Cura
Base de las cuchillas

Tina Pellets

Soporte de los ventiladores

Soporte de las poleas para guía de filamento en la tina de agua

Poleas para guía de filamento en la tina de agua



El elemento principal de la estructura es la base las cuchillas, mostrado en la Figura 17 que articula al anclaje del sistema al módulo del enfriamiento y enrollado, dispone la cuchilla fija con la cuchilla móvil, sostiene el motor, y tiene las entradas de los 3 hilos para el corte. Al ser diseñado para impresión 3D en PLA, es un elemento que acepta muchas geométricas y tiene versatilidad en los refuerzos necesarios para cumplir su función de articular los componentes del sistema de peletizado.

*Figura 17.*

*Base de las cuchillas implementación peletizado*



Ahora bien, el diseño de las cuchillas fue planeado para que la cuchilla fija y la móvil aplicaran una fuerza de cizalla en el material. Para su manufactura se reutilizaron herramientas de corte de acero templado que fueron mecanizadas a partir de los planos consignados en el

Apéndice E. Además, a la cuchilla móvil se atornilló a un cubo para acoplarla con el motor mientras que a la cuchilla fija se le realizó un proceso de taladrado para los tres hilos de corte. Estas dos piezas se muestran en Figura 18.

**Figura 18.**

*Mecanismo de corte montado en el laboratorio.*



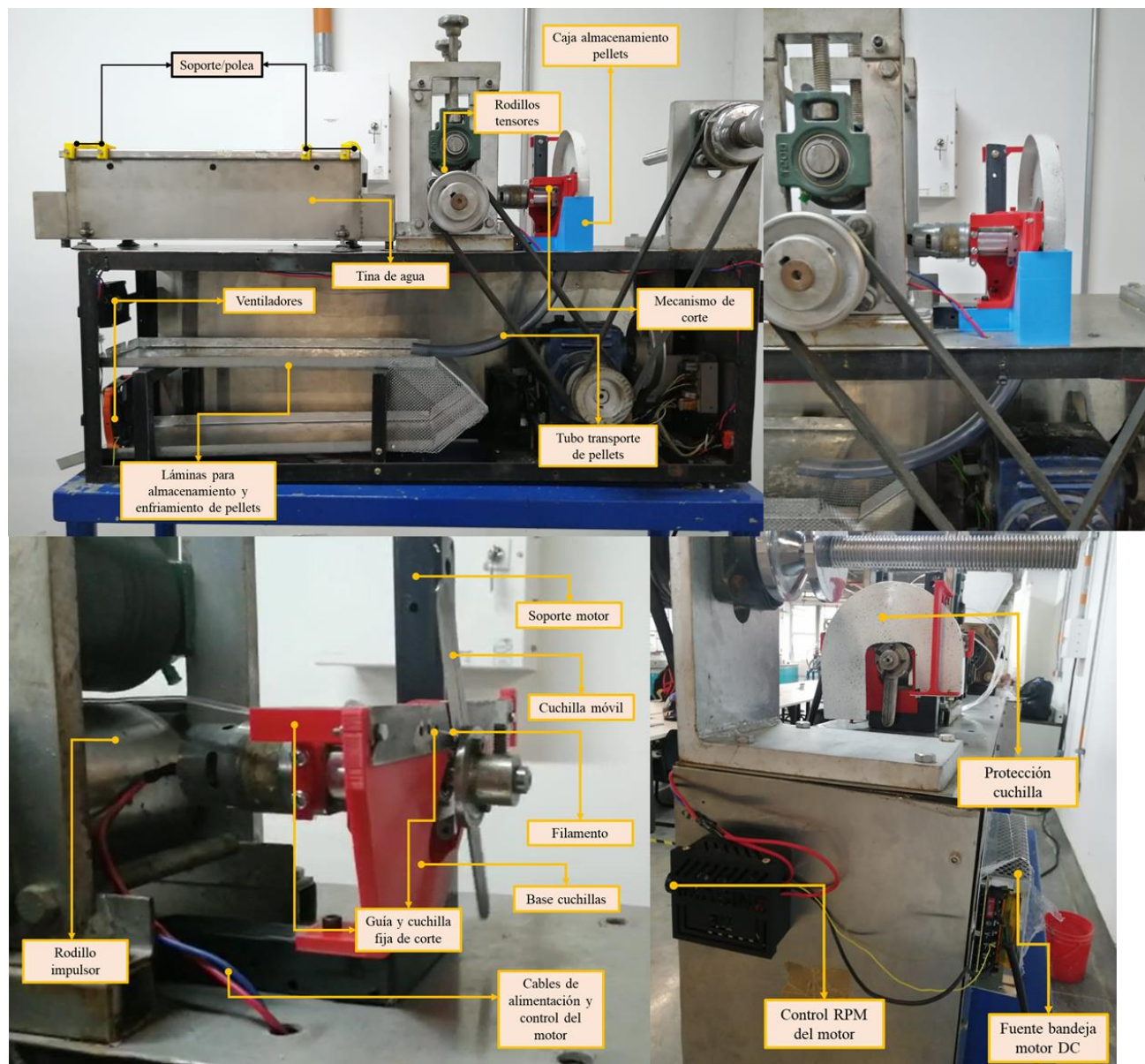
Una vez cortados los pellets pasan el sistema de almacenamiento, que se compone de una tina impresa en 3D que conecta con una manguera de 3/4'' que conduce los pellets hacia las láminas de enfriamiento, donde por medio de ventiladores los pellets terminarían de alcanzar la temperatura ambiente. La estructura de las láminas se fabricó en acero galvanizado por medio de corte por herramienta y soldadura, bajo los planos presentado en el Apéndice E.

Finalmente, la manufactura del sistema del peletizado se articulo por medio de tornillería de acuerdo con los planos del diseño en detalle al módulo de la planta del laboratorio de mantenimiento, su distribución se presenta en la Figura 19.



Figura 19.

Organización componentes del sistema de peletizado.



#### 4.2.4 Resultados

Se articuló el sistema de peletizado con los demás subsistemas de la planta además todos los componentes se lograron fabricar e instalar en la Figura 20 se presenta el resultado de las actividades.



**Figura 20.**

*Resultado final de las actividades de intervención en el banco de enrollado y peletizado*



El sistema de peletizado que se fabricó puede ser operado en continuidad con la extrusora o por separado. Si el sistema se usa por separado, el flujo másico es controlado por el operario; si el sistema se usa en continuidad con la extrusora, se debe tener en cuenta la recomendación hecha sobre el cambio de transmisión que permitiría una mejor operación trabajando con 2 o 3 hilos para obtener pellets. Si no se realiza el respectivo cambio de transmisión, el sistema de pellets es capaz de satisfacer la mitad de la producción máxima de la extrusora, sin embargo, se pudo observar que a bajas revoluciones la extrusora trabaja por un corto periodo de tiempo debido a que no es capaz de hacer fluir el material por la falta de torque.

En la Figura 21Figura 22 se muestran los pellets obtenidos con unas dimensiones de 3-4 mm de diámetro y un largo entre 3.5-8 mm, alcanzando las condiciones de salida deseadas.

Figura 21.

*Pellets extraídos del sistema implementado en la máquina extrusora de laboratorio de la EIM.*



Finalmente, se presenta la ficha técnica de la máquina en la en las condiciones luego de realizada la intervención general y la implementación de la línea de peletizado.

Figura 22.

*Ficha técnica enfriamiento, enrollado y peletizado del laboratorio*

FICHA TÉCNICA		
ENFRIAMIENTO, ENROLLADO Y PELETIZADO		
Proceso de producción		Filamento y Pellets
Tipo de enfriamiento		Convección Forzada
Capacidad/Rendimiento		1 kg/h
Altura Total		170 cm
Longitud Total		120 cm
Ancho Total		50 cm
N° de Operarios		1
Potencia	Motor	1HP 120v 1600rpm DC
	Tipo de Transmisión	Sistema de Poleas
	Relación Total	27 (Motor) : 1 (Carrete)
	Tensor	Sí, tipo prensa
Enfriamiento	Elemento	Tina con agua
	N° Poleas	4
Filamento	Frecuencia	Continuo
	Trabaja con	Ventiladores, tina, tensor y enrolladora
Pellets	Frecuencia	Continuo
	Tipo de Corte	Por cuchilla (fija y móvil)
	Motor	114 rpm 12v 5A Torque 281Kg*cm
	Trabaja con	Ventiladores, tina, tensor y S.Corte

### Referencias Bibliográficas

- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones* (Cuarta ed.). México, D.F.: Mc Graw Hill.
- Cifuentes, R. (2011). *Diseño de una maquina extrusora para la empresa PLASTIK de occidente*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Frankland, J. (2015). Sistemas de enfriamiento: en elemento crítico en extrusión. *Plastic Technology Mexico*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/columnas/sistemas-de-enfriamiento-en-elemento-crtico-en-extrusin>
- Morton-Jones. (1997). *Procesamiento de plásticos*. México: Limusina SA. doi:968-18-4434-3
- Piñeros, C., & Acosta, B. (2019). *Rediseño de una máquina extrusora para reciclaje de plástico producido en la facultad tecnológica de la UD*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- SKChemicals. (2012). *Product Data Sheet of SKYGREEN K2012*. Korea: R&D Center Polymer Division.
- Weather Spark. (s.f.). *El clima en Bucaramanga, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia)*. Obtenido de [es.weatherspark.com: https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año](https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-año)
- Zebra Gearbox. (s.f.). *Banebots*. Obtenido de Banebots site: <https://banebots.com/m7-rs775-12/>; <https://banebots.com/p6s-444-s/>