



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Remanufactura de una
máquina peletizadora dual
en el marco de la economía
circular**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Hugo Zamora Ruiz

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Magdalena Trujillo Barragán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y hermana, por darme su apoyo durante mis años de formación y brindarme las herramientas necesarias para lograr mis objetivos.

A Ana, mi compañera de vida, que desde que éramos niños me acompaña, aconseja y cuida en este camino y que me permite compartir nuestro tiempo y amor.

A mis compañeros y compañeras del Área de Procesamiento de Plásticos que contribuyeron con su tiempo y trabajo en la realización de este proyecto, en especial a Julio y Alberto con quienes siempre conté para comentar mis ideas y pedir consejos.

A la Dra. Magdalena por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto bajo su tutela y con una máquina también desarrollada por alumnos suyos.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por mi formación como Ingeniero y brindarme un espacio seguro para mi aprendizaje.

A la Dra. Magdalena Trujillo Barragán por su tutela y consejos durante la realización de este trabajo.

Al M. I. Julio César González Sánchez quien fungió como co asesor del proyecto y quien aportó a mi conocimiento el concepto de remanufactura, pieza clave de la estructuración de este trabajo.

Al personal de área de manufactura convencional de la Facultad de Ingeniería por permitirme utilizar los equipos y el espacio que requerí durante la fabricación de componentes.

Introducción

El consumo de productos de plástico forma gran parte de la economía global desde hace algunas décadas y debido a esto el estudio de estos materiales y su procesamiento sigue siendo un campo importante dentro de la ciencia e ingeniería ya que por medio de estas se busca mejorar las características de nuevos materiales y la eficiencia de los procesos por los cuales se manufacturan dichos productos. Dentro de éstos, por mencionar algunos, destacan la inyección, extrusión, soplado y rotomoldeo.

Pero, sin importar las diferencias entre procesos, la forma en la que por lo general la materia prima se presenta es en pequeñas porciones de plástico con forma regular llamadas *pellets* en el idioma inglés, los cuales son preferentemente utilizados debido a las ventajas que aportan al momento de alimentar la maquinaria utilizada.

Las máquinas con las que se fabrican los pellets de plástico son llamadas peletizadoras y principalmente se clasifican en dos grupos según el proceso de peletizado con el que funcionen ya sea en frío o en caliente. En el área de procesamiento de plásticos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en 2013 se diseñó y fabricó una peletizadora que combina en un solo equipo los dos tipos de peletizado. Esta máquina llegó al fin de su vida útil en años recientes por lo cual se decidió llevar a cabo un proceso de remanufactura para recuperar y mejorar su funcionalidad.

El concepto de remanufactura utilizado se tomó de los procesos de recuperación descritos en el marco de lo que propone la economía circular, y que, en palabras cortas, consiste en la recuperación de un producto que ha llegado al fin de su vida útil restaurando, reparando y reemplazando partes críticas con el objetivo de devolver y mejorar su funcionalidad original, esto llevándose a cabo en un procedimiento estructurado que incluye alrededor de 6 etapas.

Se inició con una etapa de familiarización con la peletizadora, en la que se estudió su construcción, funcionamiento y se detectaron modificaciones hechas a lo largo de su vida útil. Posteriormente se llevó a cabo una etapa de inspección en donde se puso en funcionamiento el equipo con el objetivo de detectar problemas que llevaron a su desuso. Luego de esto se desarmó la maquina y se limpió cada una de sus piezas para proseguir con una inspección individual en ellas.

Una vez hecha la fase de inspección, se detectaron oportunidades de mejora en los sistemas de:

- Regulación de altura
- Recolección y descarga de material de peletizado en frío
- Descarga de material de peletizado en caliente
- Alimentación de peletizado en frío

Se utilizó una metodología propuesta por los autores Ulrinch & Eppinger para llevar cabo el diseño de modificaciones en los sistemas mencionados, la cual fue seleccionada de acuerdo a las características del equipo y del proceso de remanufactura. Una vez hechos los diseños de modificaciones se realizó su fabricación e implementación en la máquina peletizadora. Adicionalmente se hicieron trabajos de reacondicionamiento en componentes del equipo que requerían ser restaurados o remanufacturados.

Se comprobó la funcionalidad de la máquina peletizadora remanufacturada realizando pruebas separadas para el peletizado en frío y en caliente. En cuanto al primero, los resultados fueron satisfactorios, recuperando la funcionalidad original y comprobando que las modificaciones en este modo de peletizado cumplieron con su objetivo de mejorar el proceso. Por otro lado, las pruebas del peletizado en caliente resultaron no concluyentes ya que, debido a fallas en el equipo de extrusión utilizado, estas no se llevaron a cabo satisfactoriamente.

Por último, se realizó una evaluación de sustentabilidad del proceso de remanufactura aplicado en la maquina peletizadora, calculando el ahorro de recursos en tres rubros: materiales procesados, energía y conocimiento. Se utilizaron datos propuestos por la Plataforma Francesa de Remanufactura para comparar lo obtenido en el proceso realizado. Los resultados de esta evaluación determinaron que en el primer rubro se superaron las expectativas, sin embargo, en los dos restantes el ahorro fue menor al esperado.

Objetivo

Mediante las herramientas fundamentales de diseño se realizaron las modificaciones necesarias en una máquina peletizadora que permitan recuperar su funcionalidad considerando sus elementos críticos. Así mismo, se usarán técnicas de remanufactura para la obtención de la máquina peletizadora mejorada.

Hipótesis

Se recuperará y superará la funcionalidad de una máquina peletizadora dual en el diseño original si las partes de mayor desempeño son restauradas y/o modificadas

Alcances

- Solucionar los problemas identificados que se suscitaron durante la manufactura del equipo y su uso prolongado.
- Verificar la función de las partes restauradas y/o modificadas mediante pruebas de laboratorio hasta visualizar un mínimo error de funcionamiento.
- Evaluar las mejoras de la máquina bajo el marco de economía circular.

Índice temático

- Introducción
- Objetivo
- Hipótesis
- Alcances

1	Antecedentes	1
1.1	Remanufactura en la economía circular	1
1.1.1	Economía circular.....	1
1.1.2	Fases del proceso de remanufactura	4
1.1.3	Organización del proceso	8
1.2	Peletizado de plásticos.....	9
1.2.1	Pellet vs plástico molido.....	9
1.2.2	Pellet reciclado vs plástico virgen	10
1.2.3	Peletizado en frío.....	11
1.2.4	Peletizado en caliente	12
1.2.5	Peletizadora dual (Diseño realizado en la FI de la UNAM).....	14
1.2.6	Problemas comunes en el peletizado	15
1.3	Metodología de diseño	19
1.3.1	Definición de metodología de diseño	19
1.3.2	Metodología de D.G. Ullman	20
1.3.3	Metodología de Ulrich & Eppinger.....	21
1.3.4	Metodología VDI 2221.....	22
1.3.5	Selección de metodología.....	23
2	Planteamiento del problema	24
2.1	Diagnóstico inicial.....	24
2.1.1	Origen de la máquina.....	24
2.1.2	Construcción, estructura y funcionamiento original.....	24
2.1.3	Modificaciones durante su vida útil [25].....	27
2.1.4	Problemáticas identificadas	29
2.2	Inspección.....	32
3	Propuesta de solución.....	37

3.1	Diseño de modificaciones.....	37
3.1.1	Regulación de altura.....	37
3.1.2	Sistema de recolección y descarga de material	47
3.1.3	Sistema de descarga del peletizado en caliente	60
3.1.4	Sistema de alimentación	66
3.2	Trabajos de reacondicionamiento.....	78
3.2.1	Estructura unidad fija	78
3.2.2	Estructura unidad móvil	80
3.2.3	Panel de control	81
3.2.4	Cortadores de peletizado en frío.....	82
3.2.5	Cortador del peletizado en caliente	85
3.2.6	Base del sistema motriz	86
3.2.7	Sistema motriz.....	87
4	Puesta en marcha de la máquina y evaluación	89
4.1	Modo de peletizado en frío.....	89
4.2	Modo de peletizado en caliente	95
4.3	Evaluación en torno a la economía circular.....	99
5	Conclusiones	104
6	Trabajos a futuro	106
7	Referencias	107
8	Anexos.....	110

1 Antecedentes

1.1 Remanufactura en la economía circular

De acuerdo con la *European Remanufacturing Network* [1] el concepto de remanufactura consiste en un “proceso de manufactura que involucra dismantelar un producto, restaurarlo y remplazar componentes, probar las partes individuales y el producto entero de acuerdo con sus especificaciones originales de diseño”. En el ámbito industrial se utilizan varios conceptos que bien podrían asociarse con esta definición como pueden ser: reconstruir, reacondicionar, restaurar o refabricar. Sin embargo, el concepto de remanufactura es el único que, por consenso, se acepta y reconoce internacionalmente para englobar los conceptos mencionados.

Si bien en esta definición se habla de llevar el producto que está al final de su vida útil a las especificaciones originales de diseño, algunos otros autores [2] coinciden en que la remanufactura puede tener el alcance de mejorar la calidad y el desempeño que especifica el diseño original, con lo que por supuesto se incrementa el valor económico del producto. Y para hacer más eficiente el proceso incluso algunos ven necesario el uso de insumos y materiales procedentes de partes o componentes recuperados de otros productos usados [3].

1.1.1 Economía circular

En la actualidad, la remanufactura forma parte importante de los procesos que trata de impulsar la economía circular, la cual se trata de una propuesta alternativa sostenible al sistema económico lineal que se sigue manejando en la actualidad y que consiste en producir, consumir y tirar. Esta idea surge a principio de la década de los 2000's en la que se abre un serio debate acerca de la sostenibilidad del sistema económico actual debido a varios factores que comenzaron a ganar notoriedad como lo son [4]:

- Aumento de la población
- Aumento en la demanda de recursos y energía
- Problemas en la gestión de residuos
- Aumento prolongado de los precios de los recursos
- Alta inestabilidad en los precios de los recursos

En un mundo finito como en el que vivimos es necesario optar por sistemas económicos y de producción que se adapten a esa característica, en lugar de solo desechar los productos que han cumplido con su ciclo de vida. La economía circular propone utilizar estos desechos para volver a darles valor de diferentes maneras. Entre los muchos procesos que pretende impulsar este modelo algunos de ellos se muestran enumerados en la figura 1.1.

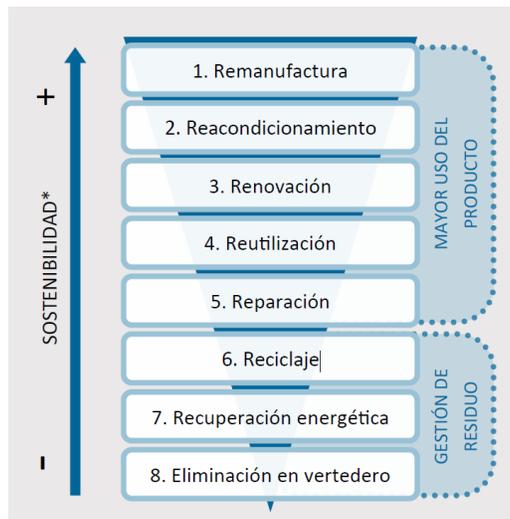


Figura 1.1 Procesos de recuperación en la remanufactura. [4]

El orden en el que se enumeran estos procesos es una jerarquía de acuerdo con la sostenibilidad de cada uno de ellos, esto teniendo en cuenta factores como el uso de energía, transporte e infraestructura necesaria para llevar a cabo cada proceso, además de la ocupación de terreno emisiones contaminantes y capital necesario para realizar la inversión.

Como se puede observar, la remanufactura se posiciona como el proceso más sostenible de todos y por lo tanto el que se debe priorizar al momento de escoger el futuro de un producto desechado. Una de las razones principales de esto es que un producto remanufacturado se comercializa en el mercado principal, es decir, es comercializado por los fabricantes originales ya que su valor y garantía por lo menos equivalen al de sus homólogos y en muchos casos los superan debido a la fase de actualización que puede incluirse en el proceso de remanufactura. Mientras que productos resultantes de otros procesos son comercializados en mercados secundarios por vendedores que no aseguran las mismas garantías que los originales.

Con el fin de tener más claras las ventajas de la remanufactura frente a los otros procesos que propone la economía circular a continuación se presenta una breve explicación de cada uno de ellos definida por *Basque Ecodesing Center* [4].

- **Reacondicionamiento**
El objetivo de este proceso es la reparación de componentes estropeados del producto para devolverlo a un estado lo más cerca posible al original, sin embargo, la calidad del producto final puede ser inferior a la del original por lo que la garantía siempre es menor y están destinados a comercializarse en mercados secundarios.
- **Renovación**
A diferencia del reacondicionamiento que pretende devolver el producto a su estado original, la renovación únicamente hace esto con la estética del producto mediante su limpieza, pulido, pintado y otros métodos que impacten en la estética. En ocasiones se pueden realizar reparaciones de componentes críticos, pero este no es el objetivo.

- **Reutilización**
Este proceso solamente pretende volver a utilizar el producto sin hacer algún cambio o con algunas reparaciones pequeñas, solo en el caso en el que entre en un mercado secundario para cambiar de dueño.
- **Reparación**
Supone la intervención en algún componente del producto para subsanar una falla, constituye un proceso único bajo una misma propiedad o en otro caso como una etapa de otros procesos como los ya mencionados.
- **Reciclaje**
En este proceso se extraen las materias primas y materiales que resultan útiles de un producto desechado para la producción de nuevos productos que pueden no estar relacionados con la utilidad del original.
- **Recuperación energética**
Consiste en la conversión de materiales desechados en energía que se utilizará para crear nuevos productos.
- **Eliminación en vertedero**
Se trata de desechar residuos al enterrarlos en un espacio físico y con unas condiciones controladas para iniciar un proceso de biodegradabilidad.

Cabe destacar que si bien la remanufactura gana prioridad frente a los otros procesos de recuperación, no siempre es la mejor opción para todos los casos y esto depende de desgaste que presente el producto y de los recursos disponibles [5].

En la creación de un nuevo producto se pueden identificar 3 tipos de recursos necesarios [6]: materiales procesados, energía y conocimiento. La remanufactura permite recuperar gran parte del valor en términos de estos recursos, como se puede observar en la figura 1.2. En primer lugar, los materiales procesados son aquellos que se utilizan en aplicaciones específicas del producto. Luego, la energía en términos de combustibles fósiles y la consumida por los recursos humanos para llevar a cabo los procesos. Por último, el conocimiento y experiencia recabados durante todo el proceso de creación del producto.

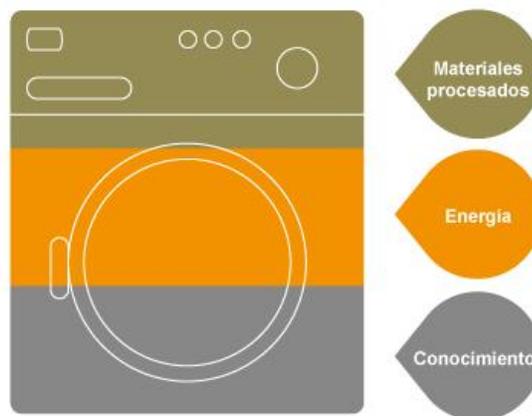


Figura 1.2 Recursos necesarios para la creación de un producto. [6]

Se puede comparar directamente la remanufactura con otro de los procesos de recuperación propuestos por la economía circular como el reciclaje el cual ha ganado una gran popularidad en los últimos años. En la figura 1.3 se muestra esta comparativa en términos de ahorro de los recursos anteriormente mencionados.



Figura 1.3 Comparativa reciclaje contra remanufactura. [6]

El reciclaje permite reutilizar una parte de los materiales desechados para generar energía o para reutilizarlos con una eficacia relativamente baja. Mientras que la remanufactura, al evitar pasar nuevamente por las fases industriales para la fabricación de un producto nuevo, además de utilizar en su mayoría materiales de reuso, baja necesidad de energía en el proceso y aportar conocimiento al proceso original, resulta en un gran ahorro de recursos y por ello la opción preferida al momento de elegir un proceso de recuperación.

1.1.2 Fases del proceso de remanufactura

Como ya se mencionó, la remanufactura es el proceso de recuperación más estudiado y por lo tanto el mejor estructurado y riguroso. La mayoría de los autores describen el proceso en 6 o 7 etapas dependiendo si las pruebas finales se incluyen dentro de ellas o como una etapa posterior a la remanufactura. En muchos casos las etapas del proceso son similares, aunque les asignen diferentes nombres. En la figura 1.4 se muestra un esquema del proceso de remanufactura propuesto por Planificación Territorial y Vivienda Gobierno Vasco [7].

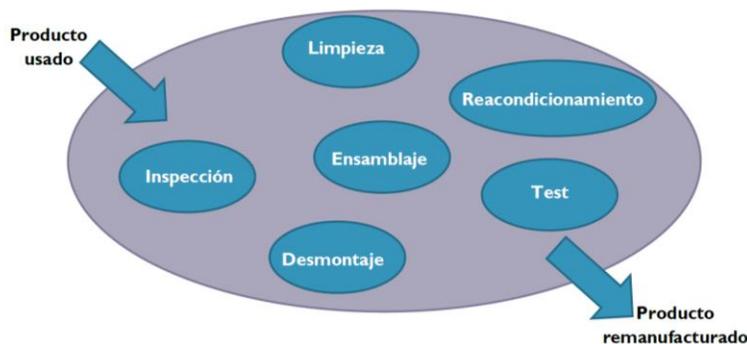


Figura 1.4 Etapas del proceso de remanufactura. [7]

Aunque se dijo con anterioridad que el proceso de remanufactura es el más estructurado y riguroso, lo cierto es que para la generalidad no lo es tanto, ya que depende de cada producto con el que se trabaje dado que todos ellos tienen características diferentes que requieren ordenar las fases del proceso de forma distinta o en ocasiones omitir o incluir algunas. Es por ello que resulta conveniente esquematizar de manera general la remanufactura como se muestra en la figura 1.4.

Aun así, si se quiere observar el proceso como una sucesión de etapas se puede utilizar el esquema de la figura 1.5, el cual es el más común del proceso de remanufactura. Dicho esquema no pretende ser seguido rigurosamente, sino ser utilizado como una plantilla modificable de la cual se tomarán las etapas que sean necesarias para cada paso en particular. Esto se hace evidente al observar que la limpieza aparece en repetidas ocasiones a lo largo del proceso, pero esto no quiere decir que se tenga que repetir todas esas veces, sino que algunos productos necesitan de limpieza antes o después de ciertos procesos.

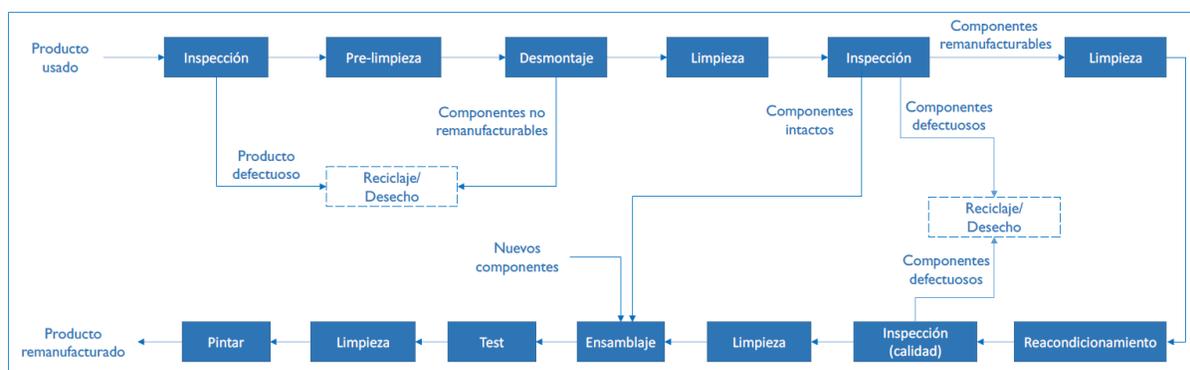


Figura 1.5 Estructura general del proceso de remanufactura. [7]

Cada producto, según el sector a la que pertenezca, puede tener un orden diferente en el que llevar a las etapas o incluso se pueden omitir o incluir algunas.

- Inspección

Comúnmente como primera fase se realiza un proceso de inspección del producto desechado. Esto permite identificar el estado de cada componente y sistema del producto, así como definir qué tipo de trabajo se tiene que realizar en cada uno de estos según sea el nivel de desgaste que presente, llegando a ser tan severo que no queda otra opción que desechar el componente. En algunas ocasiones, al llevar a cabo esta fase es necesario realizar una recolección de componentes del equipo, tal sea el caso en el que no todos ellos se encuentren reunidos en un mismo sitio [7].

En caso de ser posible resulta conveniente realizar pruebas operativas del producto con el objetivo de identificar fallas en los sistemas eléctricos y electrónicos. Esto se puede hacer como parte de una primera fase de inspección, donde, al igual que la limpieza, se puede realizar más de una vez y en diferentes momentos del proceso. Por ejemplo, se realiza una primera fase de inspección antes de o después de una limpieza y posteriormente otra fase de inspección más detallada a cada componente luego de desmontar el equipo.

Dependiendo del componente se pueden realizar diferentes tipos de inspección ya sean superficial/volumétrica, dimensional o pruebas eléctricas. Todas ellas mediante ensayos no destructivos para evitar dañar el componente.

❖ Inspección superficial/volumétrica

Permite identificar defectos superficiales o internos como lo son grietas o poros. Estas son algunas de las técnicas de inspección superficial o volumétrica utilizadas.

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Inspección mediante partículas magnéticas
- Inspección por ultrasonido
- Métodos acústicos
- Radiografía
- Inspección mediante corrientes parásitas
- Inspección térmica

❖ Inspección dimensional

Consiste en comprobar las dimensiones de los componentes comparándolas con lo descrito en su diseño y corroborando si ha habido alguna alteración durante su uso.

- Medición manual
- Medición por laser
- Medición mediante escáner 3D
- Medición por contacto

❖ Pruebas eléctricas

Analiza si los componentes eléctricos o electrónicos cumplen con su función o si presentan algún daño o alteración.

- Prueba funcional
- Multímetro
- Cama de clavos
- Sonda de vuelo

• Limpieza

En esta fase el objetivo es eliminar toda la suciedad que haya acumulado el equipo durante su tiempo de vida, o a causa de otras fases del proceso. Esto con el objetivo tener los componentes libres de suciedad para la siguiente fase y asegurar la eficiencia de esta, además de determinar la calidad del producto final. Como se muestra en la figura 1.5, la limpieza se puede realizar hasta 5 veces durante todo el proceso de remanufactura, dependiendo de qué técnicas se utilicen en otras fases [7].

Las fases de limpieza suelen contar con más de una técnica, ya que las suciedades que se pueden presentar son diferentes entre sí y cada una requiere de una técnica en específico.

❖ Limpieza manual

Es el método más simple y no necesita equipo especializado, pero dependiendo del agente limpiador se expone al trabajador a riesgo químico.

❖ Limpieza por CO₂

Consiste en utilizar dióxido de carbono en sus diferentes fases para retirar suciedad. Tiene la ventaja de no dejar residuos y no se requiere la producción de CO₂ gas que es perjudicial para el medio ambiente.

- CO₂ en polvo
- CO₂ pellet
- CO₂ supercrítico

❖ Limpieza por ultrasonido

Utiliza ondas sonoras a alta frecuencia para agitar una solución de limpieza en donde se sumerge el componente a limpiar. Es útil para limpiar zonas difíciles de alcanzar con otras técnicas, pero según el material puede causar abrasión en este. Por lo que no es recomendable en materiales blandos.

❖ Limpieza por láser

Se utiliza un láser de alta energía para irradiar una superficie y con ello eliminar suciedad, óxido o pintura de ella. Es conveniente en superficies blandas ya que no utiliza partículas, el ser una tecnología en desarrollo aumenta su costo.

❖ Limpieza térmica

Eleva a altas temperaturas el componente para evaporar o descomponer contaminantes como grasas, aceites y polvo. Sin embargo, suele necesitar complementarse con una técnica de limpieza física.

❖ Limpieza con agua a alta presión

Se utiliza este método para eliminar suciedad de superficies aprovechando la energía cinética del agua. Tiene la gran ventaja del bajo costo.

❖ Limpieza abrasiva

Se impacta la pieza con partículas de un material abrasivo con ayuda un compresor. Es útil para eliminar pintura, óxido o incrustaciones.

- Desmontaje

Esta fase consiste en separar los componentes o piezas del producto con el objetivo de trabajar individualmente en ellos. Suele ser de las primeras fases del proceso. Se identifican 3 tipos de desmontaje [7].

❖ Desmontaje no destructivo

Ninguno de los componentes sufre daño alguno, por lo que es el idóneo para el proceso de reparación y remanufactura. Sin embargo, no todos los métodos de unión permiten este tipo de desmontaje.

❖ Desmontaje semi-destructivo

Permite desmontar los componentes destruyendo únicamente los elementos de unión. Esto lo vuelve un proceso más práctico.

❖ Desmontaje destructivo

Se desmonta la pieza causando daño a los componentes. Se consigue un desmontaje rápido y se utiliza en el caso de recuperar alguna pieza de mayor valor entre otras desechables.

- Reacondicionamiento

Es la fase en la que se reparan, sustituyen, fabrican o modifican los elementos dañados del producto. El objetivo es solventar las fallas detectadas durante su vida útil y que determinaron el final de esta. Las tecnologías a utilizar varían según el componente y el trabajo que se tiene que realizar, pero en general son todas aquellas que se utilizan en el proceso de manufactura de un producto como lo pueden ser: procesos de mecanizado, acabado, fundición, formado y moldeado, transformación de chapa, procesado de polímeros y procesos de unión [7].

- Test

En esta última fase se comprueba la funcionalidad del producto esperando que iguale o supere las prestaciones del original. Las tecnologías utilizadas en esta fase dependen del propósito del equipo y deben de ser similares a las que se utilizaron para probar el producto original [7].

1.1.3 Organización del proceso

La European Remanufacturing Network [8] propone diferentes organizaciones del proceso según diferentes sectores específicos, los cuales son:

- 1 Aeroespacial
- 2 Automotriz
- 3 Bienes consumibles y productos electrónicos
- 4 Mueblería
- 5 Equipamiento de uso rudo y todo terreno
- 6 Maquinaria
- 7 Industria marítima
- 8 Equipo médico
- 9 Industria ferroviaria

El sector al que pertenece una peletizadora de plástico, (objeto de estudio de este trabajo), considerándola a ésta una máquina-herramienta, es el de maquinaria, ya que este sector comprende productos tales como: bombas, compresores, máquinas-herramienta y robots. Por lo tanto, se utilizará esta recomendación (figura 1.6) en el orden de proceso para el presente proyecto.



Figura 1.6 Proceso de remanufactura para maquinaria. [8]

La línea del proceso de remanufactura que se propone para maquinaria es de las formas más sintetizadas y básicas para llevar el proceso, esto con las fases apareciendo una sola vez en la secuencia y en el orden en que muchos autores definen la remanufactura. Esto probablemente se deba a que en un inicio el proceso fue pensado para aplicarse en maquinaria que quedaba obsoleta en plantas de producción y que luego lo adaptaron a otros sectores específicos con necesidades diferentes.

1.2 Peletizado de plásticos

La forma más común de procesar polímeros termoplásticos es a partir de la utilización de pellets [9], los cuales son pequeñas porciones de material con una forma y tamaño constantes. Estos se obtienen por medio de un proceso de reducción de tamaño llamado peletizado, el cual comúnmente consiste en pasar el material en forma de trozos por un proceso de extrusión a través de un dado para luego usar diferentes técnicas de corte para lograr la obtención de los pellets [10].

1.2.1 Pellet vs plástico molido

El proceso de peletizado está íntimamente relacionado con el reciclaje de plástico ya que es el favorito para transformar el desperdicio triturado en pellets de una forma y dimensiones homogéneas [11]. Ya que las máquinas de moldeo de plásticos también pueden utilizar directamente el plástico molido para la obtención de productos en ocasiones los moldeadores que trabajan con plástico reciclado prefieren evitar el paso del peletizado para ahorrar tiempo y dinero. Sin embargo, a la larga se complican los procesos y provoca pérdida de calidad en los productos.

Para que quede más claro, el plástico molido es el que se obtiene del desperdicio de una máquina de procesamiento de plástico. Las piezas rechazadas o el material proveniente de purgas son triturados en molinos especializados de los que se obtiene un producto en trozos pequeños e irregulares, además de una gran cantidad de polvos y partículas finas.



Figura 1.7 Plástico triturado. [12]

En primer lugar, el material en forma de pellet tiene una gran ventaja sobre el material triturado al introducirse en la maquinaria, ya que el plástico molido puede contener trozos grandes de material los cuales corren el riesgo de atascarse en la tolva de entrada, teniendo que parar la producción para solucionar el problema, cosa que con el pellet no sucede [11]. Además, en sistemas de alimentación por succión pueden presentarse pérdidas al utilizar plástico molido, ya que a estos sistemas les cuesta succionar el polvo y las partículas muy pequeñas teniendo así que descartar este sobrante de material. Y, por otro lado, en caso de que estas partículas pequeñas se introduzcan a la máquina pueden llevar a la generación de material degradado [13].

La variación de tamaño de los trozos en el plástico molido es un inconveniente que puede causar problemas de flujo de material fundido. Lo recomendable es tener porciones de material lo más homogéneas posibles en forma y tamaño para que así se fundan uniformemente a la temperatura adecuada [13]. Además, esta variación de tamaño facilita la introducción de aire al proceso potencialmente generando burbujas en el material fundido con lo que se obtiene un producto con defectos.

1.2.2 Pellet reciclado vs plástico virgen

Si bien ya se demostró que el pellet reciclado supera las prestaciones del plástico molido, ahora es el turno de averiguar cómo se posiciona utilizar un plástico reciclado en forma de pellet contra un material virgen.

El término “plástico virgen” se refiere a aquel que es obtenido en la industria petroquímica a partir de un proceso de polimerización, aunque posteriormente pase por un proceso de peletizado [14]. En primer lugar, un material virgen por lo regular presenta mejores propiedades mecánicas y químicas en comparación con su homólogo reciclado y estas propiedades disminuyen conforme el polímero pasa por ciclos de procesamiento [15]. Esto de entrada genera incertidumbre en los productores al desconocer con precisión las características del material con el que trabajan, sabiendo que el producto final tendrá una calidad inferior si se trabaja con plástico reciclado.

Otro inconveniente que presenta un polímero reciclado es la presencia de contaminantes en forma de partículas extrañas que se mezclan con el material durante su procesamiento y reciclado. Estos contaminantes también provocan una calidad inferior de las piezas fabricadas con este tipo de material.

Para solventar las desventajas que se presentan al trabajar con plástico reciclado se han desarrollado técnicas que mejoran la calidad del material. Por ejemplo, la incorporación de aditivos al polímero reciclado para mejorar sus propiedades y estas que sean equiparables con las que posee un material virgen. Por otro lado, un control riguroso en el proceso de reciclado evita los contaminantes dentro del material.

Aun así, no es estrictamente necesario que un plástico reciclado tenga las mismas características que uno virgen ya que en algunos casos la variación de propiedades en el material es incluso benéfica para producir cierto tipo de productos y en otros la alta calidad que ofrece un plástico virgen no es necesaria para la aplicación del mismo.

En la actualidad la tendencia es disminuir el uso de plástico virgen debido a la poca sostenibilidad y la huella ambiental que ello conlleva. Estrategias como el mezclar cierto porcentaje de material virgen con otro de reciclado se están volviendo comunes, pero esto solo son soluciones parciales y el objetivo es utilizar únicamente plástico reciclado ya que es posible obtener productos de una calidad igual o suficientemente buena con respecto al material virgen.

Se pueden diferenciar dos tipos principales de peletizado, en el primero de ellos el material extruido pasa primero por la fase de enfriamiento para luego ser cortado, en tal caso se le llama peletizado en frío o de filamento. La segunda opción es cortar en material aún fundido para posteriormente enfriarlo, a esto se le llama peletizado en caliente o die-face. En ambos casos el pellet resultante debe pasar por un proceso de secado.

1.2.3 Peletizado en frío

En el peletizado (figura 1.8) en frío se extruye el polímero en forma de perfiles de sección circular, aunque se puede cambiar la forma de la salida del dado si se quieren obtener diferentes formas de pellet, luego este perfil pasa por una tina con agua para enfriar y solidificar el material y al salir es conducido hacia un cortador, usualmente giratorio, que lo troza quedando, así como producto final pellets en forma de cilindro o rectangulares alargados que normalmente tiene un largo de 2 a 4 [mm] [16].

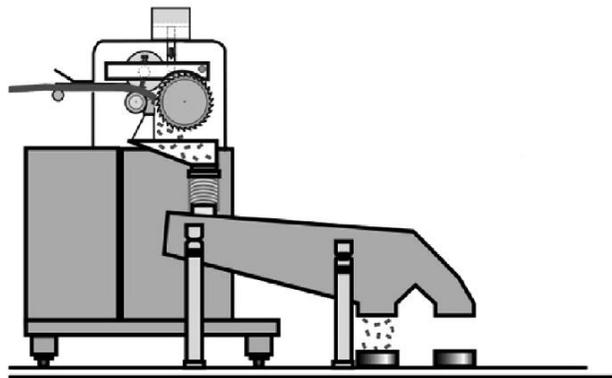


Figura 1.8 Máquina de peletizado de filamento. [10]

Anteriormente esta era la forma de peletizado más utilizado, pero en la actualidad la tendencia es utilizar el peletizado en caliente [10]. La razón de esto es que el peletizado de filamento suele tener inconvenientes como una alta tendencia a que el material se atasque en la salida y en la entrada de material debido a que las caras planas del pellet pueden pegarse entre sí [17]. Por otro lado, este proceso produce una gran cantidad de polvos y partículas finas que terminan representando un problema en la calidad de las piezas después producidas [12]. Agregado a esto, tiene poco margen de automatización y requiere más mano de obra.

Aunque ya no es tan utilizado, el peletizado en frío tiene varias ventajas, es un proceso relativamente barato y simple comparado con el método en caliente. Además, la facilidad de trabajar con una gran variedad de polímeros lo vuelve un proceso versátil. El peletizado en frío es particularmente apropiado para polímeros con punto de fusión alto, materiales compuestos y empresas que realizan tiradas cortas con cambio de material.

1.2.4 Peletizado en caliente

En este tipo de peletizado también se utilizan cortadores giratorios pero ubicados a la salida del dado de extrusión y así formar los pellets aún con el material fundido, para luego solidificarse y enfriarse por medio de aire, agua o ambas [10]. En general se identifican 3 tipos de máquinas que principalmente se utilizan para realizar el peletizado en caliente.

- Peletizadora con spray de agua

En este tipo de peletizadora el cortador es muy similar al utilizado en el corte en frío, con la diferencia que se posiciona cerca de la salida de material fundido, el cual se solidifica al contacto con el aire y con ayuda de aspersores que proporcionan un spray de agua sobre el cortador. En muchas ocasiones los pellets caen a un baño de agua para terminar de enfriarse [10]. La forma de los pellets que se obtienen en esta máquina es redondeada pero plana, parecido a una pastilla de medicamento. En la figura 1.9 se observa un esquema de este tipo de máquina.

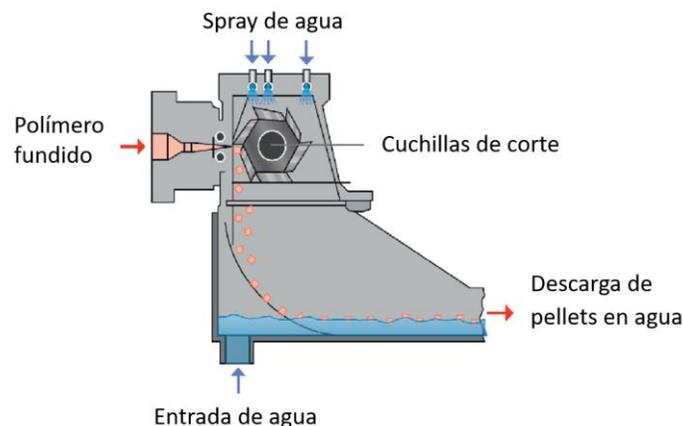


Figura 1.9 Máquina de peletizado con spray de agua. [9]

- Peletizadora de anillo de agua

En este caso el sistema de peletizado se encuentra dentro de una cámara cilíndrica en cuyas paredes corre un anillo rotatorio de agua de aproximadamente 2 [mm] de profundidad [10]. El material fundido sale a través de un dado con múltiples orificios mientras que el cortador gira concéntricamente y paralelo a la cara éste formado así los pellets, que luego son arrojados al anillo de agua para enfriarse [17]. Por último, los pellets son conducidos por una corriente de agua para ser secados. Al ser un proceso en que los pellets se enfrían por medio de aire y agua estos tienen la misma forma que se obtiene en el peletizado con spray de agua. Este tipo de peletizado se muestra en la figura 1.10.

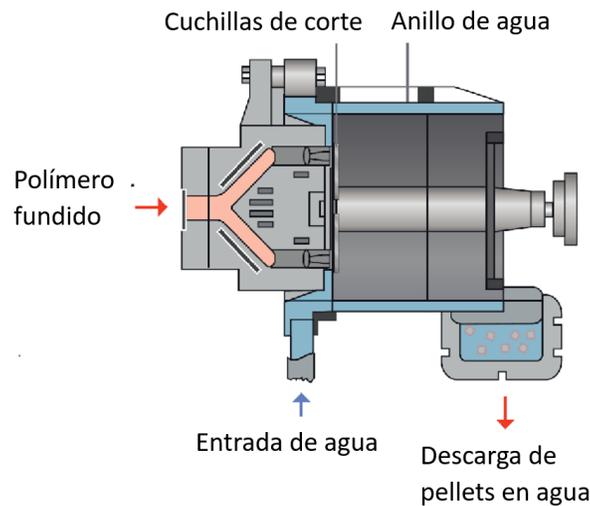


Figura 1.10 Máquina de peletizado de anillo de agua. [9]

Este es el más compacto de los tres tipos de peletizadoras en caliente y el grado de automatización logra que un solo operador controle el proceso al tener pocos parámetros que se tiene que ajustar. Además, las variaciones del proceso como la temperatura de masa fundida o la presión no tienen gran impacto al utilizar este tipo de peletizadoras. En cuestión de costos este tipo de máquinas se encuentra entre un nivel intermedio entre las tres opciones de peletizado en die-face.

Las limitaciones del sistema en anillo de agua son principalmente el tipo de materiales a los que se limita su uso ya que presenta inconvenientes al trabajar con polímeros pegajosos o de alta temperatura de fundido [17].

- Peletizadoras bajo agua

El sistema de corte de este tipo de máquina es muy similar al sistema con anillo de agua, con la diferencia crucial de que la cámara de corte está completamente sumergida en agua [16]. El agua que se utiliza en este proceso debe estar a una temperatura controlada que beneficie la solidificación del material. La característica de los pellets formados por este método es que son esféricos, debido a la presión que ejerce el agua sobre el polímero en todo momento desde que sale del dado de extrusión [17]. El esquema de la figura 1.11 representa este tipo de peletizado.

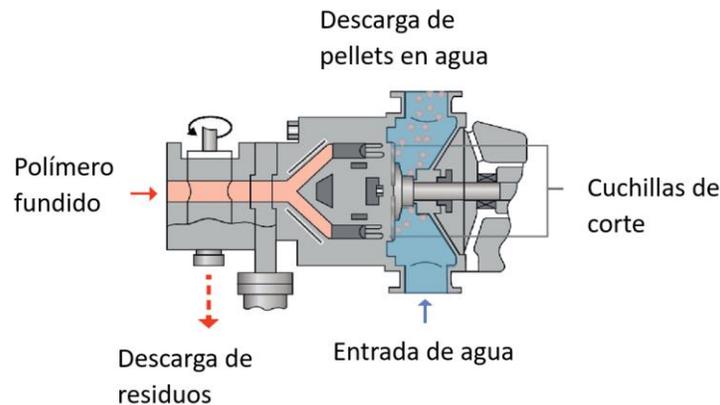


Figura 1.11 Máquina de peletizado bajo agua. [9]

El sistema de peletizado bajo agua es el más complejo y costoso de todos, pero las ventajas son considerables. En primer lugar, la automatización de la mayoría las características de la máquina son posibles mediante PLC. También, la capacidad de producción es superior comparado con otros sistemas y su capacidad de poder trabajar con prácticamente cualquier tipo de polímero lo hacen un método muy versátil. Por otro lado, ofrece un gran rango de diámetro en los pellets además de que la consistencia de geometría es muy precisa.

1.2.5 Peletizadora dual (Diseño realizado en la FI de la UNAM)

La máquina peletizadora con la que se trabajará en este proceso de remanufactura es una combinación de dos tipos de peletizado. Por un lado, el equipo trabaja con un sistema en frío de corte de filamento, el cual funciona dentro de una línea de trabajo junto con una máquina extrusora, una tina de enfriamiento y un carro de arrastre externo. El dado de extrusión que se utiliza para esta operación tiene tres salidas de material para producir los filamentos que son conducidos al mismo tiempo hacia la peletizadora para ser cortados. En la figura 1.12 se muestra el sistema de peletizado en frío.

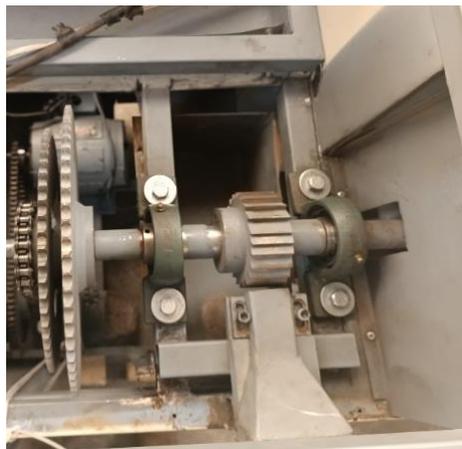


Figura 1.12 Módulo de peletizado en frío.

El otro modo de peletizado añadido al equipo es un sistema en caliente de spray y baño de agua similar al mostrado en la figura 1.13, con la diferencia de que el cortador es de giro paralelo a la cara del dado de extrusión y de manera excéntrica, es decir, que la salida de material se encuentra a un lado del centro de giro del cortador. El plástico llega desde una máquina extrusora a la cual se acopla la peletizadora para ser cortado en pellets y enfriado con el agua.



Figura 1.13 Módulo de peletizado en caliente.

1.2.6 Problemas comunes en el peletizado

Es necesario saber cuáles son los inconvenientes que se presentan normalmente en un proceso de peletizado de plástico y cómo resolverlos para poder identificarlos en el momento de realizar una inspección inicial en la máquina y también en las pruebas finales.

- Finos

Los finos son partículas pequeñas que aparecen principalmente en el peletizado en frío de corte de hebras cuando se trabaja con materiales cristalinos. Estas partículas pueden generar problemas al momento de procesar el plástico como degradarse prematuramente, alteran la densidad aparente del material y además presentan una dificultad para su transporte.

La principal razón por la que aparecen los finos es por una temperatura muy por debajo del punto óptimo al momento de cortar las tiras de plástico, lo que provoca que el material se quiebre con facilidad. Se recomienda que se tenga una temperatura lo más cercana al punto de reblandecimiento Vicat del material al momento de entrar al cortador, así entra lo más caliente posible y evita las fracturas [18].

La forma del cortador y su mantenimiento es también un factor importante para evitar la producción de finos. El rotor debe tener un ángulo de corte adecuado y es crucial mantener un borde bien afilado en las cuchillas para evitar el rompimiento del plástico.

- Colas

En la producción de pellets el corte debe ser limpio y en ángulo recto, cuando ocurre un corte inadecuado es posible notar la aparición de desgarros que se asemejan a una cola en la parte trasera del pellet figura 1.14. El problema, además de la calidad visual del producto, se produce ya que las colas pueden producir finos en materiales en los que comúnmente no se presentan [18].



Figura 1.14 colas en pellets. [18]

La causa principal de la aparición de colas radica en el corte, por lo que la solución consiste en mantener bien afilados tanto el rotor como la cuchilla fija. En otros casos el problema lo provoca un espaciado incorrecto entre los cortadores por lo que será necesario volver a ajustarlo conforme las especificaciones de la máquina.

- Largos

Los largos, como su nombre lo indica, son pellets con una longitud mayor a la deseada en los que se presenta un ángulo de corte diferente al recto, pero sin llegar a ser una cola. Este tipo de defecto es indicativo de una mala alimentación del filamento, ya que si se introduce la hebra a una velocidad mayor a la que la máquina lo corta se doblará hacia los lados y no entrará al punto de corte de forma perpendicular provocando cortes en ángulo [18].

Procurar una velocidad adecuada del filamento es en mayoría de los casos la solución a este problema, pero en ocasiones un sistema de alimentación en mal estado puede también provocarlo, ya que rodillos desgastados harán que la hebra se doble y se produzcan cortes en ángulo. Por esta razón es necesario un correcto mantenimiento del sistema de alimentación de filamento. Otra solución a los largos es no utilizar una velocidad excesiva de corte de acuerdo con el diámetro de la hebra, ya que esto también provoca serpenteo en el punto de corte.

Se le llama zona de empuje a la distancia entre el punto de alimentación y el de corte, y es recomendable que esta zona se reduzca a lo mínimo posible, pues un tramo más corto de filamento hará más difícil el que se presente serpenteo.

- Migración de hebras

La migración de hebras es la acumulación de estas es un lado de la mesa de alimentación, esta condición de corte puede provocar problemas como la producción de largos. Las causas principales incluyen que el plano de corte no sea paralelo a la mesa y una separación inconsistente en los rodillos del sistema de alimentación [18].

- Vacíos

Estos son pellets con un centro hueco que se producen a causa del encogimiento natural del polímero figura 1.15. Este problema se presenta cuando el filamento tiene en su centro una temperatura elevada y no se ha solidificado del todo, por lo que al cortarlo el plástico se contrae rápidamente [18].



Figura 1.15 vacíos en pellets. [18]

Con un enfriamiento adecuado, el filamento debe presentar una temperatura muy similar a lo largo de toda su sección transversal. Tener el agua del baño de enfriamiento a una temperatura muy caliente o muy fría para el polímero con el que se trabaja es la casusa más común de esta situación, pues se crea una corteza dura que atrapa el calor en el interior. Un enfriamiento demasiado corto es otra causa al no tener el tiempo suficiente de que el calor se transfiera desde el núcleo del filamento.

- Dobles/cremalleras

Los dobles o cremalleras son pellets de diferentes hebras que se unen por una delgada película de material. Esto ocurre cuando los filamentos entran en contacto cuando aún no se han solidificado [18].



Figura 1.16 dobles y cremalleras en pellets. [18]

La solución principal es mejorar el baño de agua a la salida de la extrusora, ya sea no dejando que el agua se caliente en exceso o dejando suficiente espacio entre estos dentro de la tina de enfriamiento. Otro causante sería que las hebras se expanden a la salida del dado con lo que estas terminan por unirse. En este caso la solución consiste en reemplazar el dado por uno que tenga menos salidas y mayor distancia entre ellas.

Los problemas que se han descrito hasta ahora son aquellos que se presentan principalmente en el peletizado en frío, sin embargo, también es posible encontrarlos cuando se trabaja con corte en caliente, pero a diferencia del primero, este no tiene tantas variables que afecten el proceso y la mayoría de los inconvenientes se solventan modificando la temperatura del dado o la presión del cortador sobre éste [19].

1.3 Metodología de diseño

Un punto importante del proceso de remanufactura que se realizará es el diseño para crear nuevos elementos y para modificar los que presentan deficiencias. Para ello resulta útil guiar dicho proceso de diseño conforme a una metodología bien establecida, lo que asegurará una mayor fiabilidad y lógica en los componentes a diseñar.

1.3.1 Definición de metodología de diseño

Una metodología se entiende como la manera de organizar un proceso, controlar sus resultados y presentar soluciones a un problema, cosa que involucra una toma de decisiones [20]. También establece una secuencia de acciones y procedimientos específicos que buscan sistematizar el proceso. En diseño mecánico una metodología es útil por tres razones [21]. En primer lugar, permite hacer explícito el proceso de toma de decisiones, teniendo así una mejor visión de las razones fundamentales por las que se toma la decisión. Segunda, actúa como lista de verificación de cada paso clave en el proceso de desarrollo, lo que asegura que no se olviden aspectos importantes. Y tercera, una metodología conlleva una auto documentación que resulta útil para futuros trabajos sobre el producto.

Es posible clasificar las metodologías de diseño en dos grandes categorías según su enfoque [22]:

- Metodologías descriptivas: tratan de responder la pregunta *¿qué hacer?*, se basan en describir la secuencia de fases que ocurren en el proceso de diseño. No dan una pauta sistemática sino aconsejan buenas prácticas para una solución correcta.
- Metodologías prescriptivas: responden la pregunta *¿cómo hacerlo?* Y sugieren una sistematización de actividades a realizar durante el proceso de diseño. Inciden en la identificación y comprensión total del problema de diseño.

Debido a que este proyecto requiere de una documentación precisa, es útil tener una sistematización y organización lo más constante posible para cada componente a diseñar y de así tener claridad en cada proceso. Por lo tanto, es más adecuado utilizar una metodología prescriptiva. De esta metodología hay dos tipos:

- Modelos de producto: se enfocan en cómo evolucionar la información hasta obtener el diseño final.
- Modelos de fases: estructuran el proceso de diseño en etapas y una secuencia recomendada. En este campo se encuentran las metodologías más comunes en diseño mecánico.

Por la misma razón por la que se eligió utilizar metodologías prescriptivas, se opta por preferir los modelos de fases de éstas al presentar una estructura mejor establecida. Dentro de los modelos de fases numerosos autores han propuesto sus metodologías, sin embargo, solo se mencionarán y considerarán 3 de las más comunes.

1.3.2 Metodología de D.G. Ullman

Metodología basada en seis etapas enfocada en el diseño de sistemas, subsistemas, ensamblajes y componentes [23]. El esquema de la figura 1.17 presenta las etapas del proceso y su secuencia.

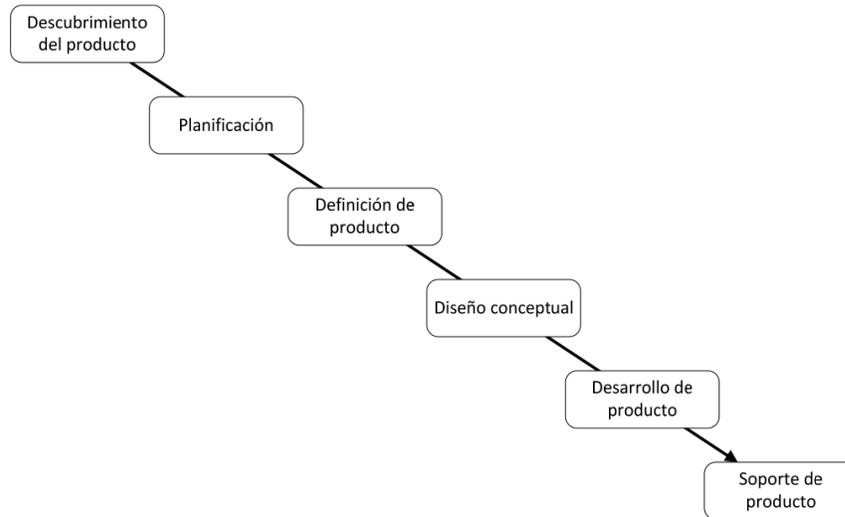


Figura 1.17 Estructura de la metodología de D.G Ullman. [20]

La primera etapa es la de descubrimiento del producto, en la cual se establece lo que se desarrollará. En la resolución de problemas es común tener varias propuestas a considerar, pero no se desarrollan todas por lo que es necesario seleccionar una de las opciones para trabajar en ella. Esta etapa puede realizarse previo a la planeación del proyecto, como lo muestra el esquema, o bien después de haber realizado el diseño conceptual de cada propuesta para tener una base comparativa mayor.

La segunda etapa es la planeación, destinada a distribuir y asignar recursos para el desarrollo del proyecto, lo que incluye dinero, personal y equipo. También se establece la secuencia específica de actividades a través de un cronograma. La planeación de un producto similar a uno existente resulta más sencilla al evitar hacer especulaciones de cosas desconocidas en las cuales se base esta etapa.

Como tercera etapa se tiene la definición del producto, en donde el objetivo es entender el problema para así definir los fundamentos para el resto del proyecto. Se identifica a los usuarios del producto, se generan sus requerimientos y las especificaciones ingenieriles. Un correcto planteamiento del problema servirá para descomponer el problema y simplificar el proceso de diseño.

En la cuarta etapa, llamada diseño conceptual, se generan ideas o conceptos que satisfacen los requerimientos y especificaciones planeados en la etapa anterior. Luego estos se evalúan, se refinan y por último se aprueban algunos de ellos. Se aconseja generar y evaluar la mayor cantidad de conceptos posibles para obtener más de una solución plausible luego de evaluarlas.

La quinta etapa corresponde al desarrollo del producto, en ella se refinan las mejores opciones seleccionadas en la fase anterior para convertirse en productos. Es común ver que se inicia el proceso de diseño en esta etapa, lo que resulta en un producto deficiente, de mala calidad, y que provoca pérdidas monetarias.

La sexta y última etapa es el soporte del producto, lo que involucra procesos de post producción como asistencia en la manufactura y el ensamble, así como soporte a los distribuidores del producto. Esta fase como último punto abarca el retiro del producto del mercado.

1.3.3 Metodología de Ulrich & Eppinger

Un proceso igualmente basado en seis etapas que en este caso pretenden asegurar la calidad del producto, planificar, solucionar problemas y encontrar áreas de oportunidad [22]. En la figura 1.18 se muestran las seis etapas de esta metodología de diseño.

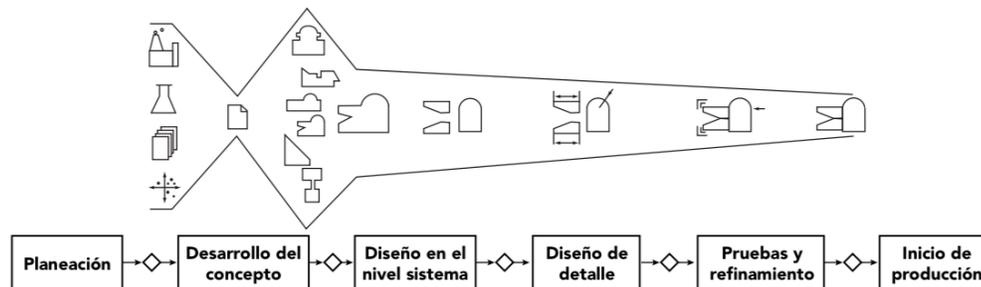


Figura 1.18 Estructura de la metodología de Ulrich & Eppinger. [20]

Similar a la metodología de Ullman, se tiene en un principio una etapa de planeación, también llamada fase cero ya que suele ser previa a la aprobación del proyecto. En este punto se identifican las oportunidades, se evalúan los avances tecnológicos y los objetivos de mercado. También se define la misión del proyecto.

Posteriormente se pasa a la etapa de desarrollo del concepto, donde se identifican las necesidades del mercado objetivo, se generan y evalúan conceptos de solución, de los cuales se selecciona uno o más conceptos para desarrollarlos y hacerles más pruebas.

En la tercera etapa, diseño en el nivel sistema, se define la arquitectura del producto y se descompone en subsistemas y componentes. Se establecen planes iniciales de producción y el esquema de ensamble final del producto. Al final de esta fase es recomendable tener diseño geométrico del producto, especificaciones funcionales de cada subsistema y un diagrama de flujo preliminar para el proceso de ensamble final.

Luego se tiene la etapa de diseño de detalle. Aquí se especifica la geometría, materiales y tolerancias de las partes únicas del producto y se identifican las partes a comprar. Se obtiene la “documentación de control” del producto, es decir, los archivos que describen la geometría de las piezas y su herramental de producción, los planes de proceso para la fabricación y las especificaciones de las partes compradas. En esta fase entran: la selección de materiales, el costo de producción y el desempeño robusto del producto.

La quinta etapa corresponde a las pruebas y refinamiento, en donde se contempla la construcción y evaluación de varios modelos de preproducción del producto. Los primeros prototipos se construyen con las piezas que van a utilizarse en la producción final del producto, pero no necesariamente con el proceso real. Se prueban para comprobar el adecuado funcionamiento del producto y la satisfacción de las necesidades de los usuarios. Los siguientes prototipos, son evaluados en forma interna y con los clientes en su ambiente de uso. Con estos últimos se pretende responder preguntas sobre la operación y confiabilidad, y así identificar cambios de ingeniería necesarios.

En la sexta y última etapa, inicio de producción, se hace el producto con el sistema de producción planteado anteriormente. Se capacita al personal y se resuelven problemas en el proceso.

1.3.4 Metodología VDI 2221

Esta es una metodología propuesta por la Asociación de Ingenieros Alemana y consta de una estructura de cuatro fases subdivididas en 7 etapas figura 1.19 [24].

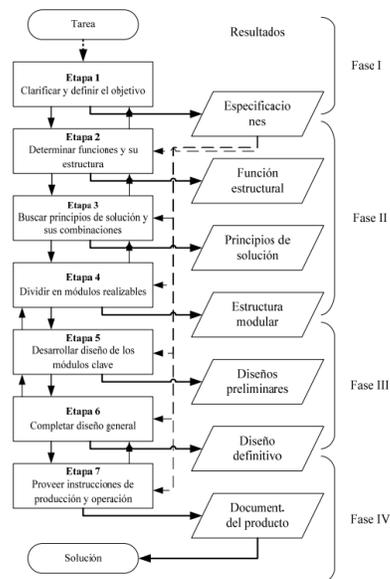


Figura 1.19 Estructura de la metodología VDI 2221. [20]

La primera etapa es de especificación en donde se recaba información importante y precisa para el desarrollo del producto. Es necesaria una investigación de las necesidades que el producto pretende satisfacer.

La segunda etapa consiste en definir una estructura funcional, en donde se determina la función principal y las subfunciones que debe cumplir el producto a diseñar. La clasificación y combinación de dichas funciones generan una base para la búsqueda de soluciones. Estas se presentan en forma de diagramas y bocetos formales, pero en algunos casos descripciones sencillas son suficientes.

En la tercera etapa se terminan de definir las propuestas de solución para todas las subfunciones y se combinan para generar una solución principal que representa la mejor opción para cumplir con la estructura de la función. Puede ser documentado como un esbozo, un diagrama, un circuito o, incluso, una descripción.

La cuarta etapa consiste en estructurar la solución en módulos a partir de la descomposición de sus grupos realizables y de esta manera definir las especificaciones antes de hacer bosquejos específicos del producto.

En la siguiente etapa se realizan diseños preliminares de los módulos principales del producto. Se describe la geometría, los materiales y otros detalles importantes, pero solo a un nivel que permita el diseño óptimo para seleccionar estos aspectos. El resultado de esta etapa se presenta en forma de dibujos a escala y diagramas de circuito principalmente.

Luego en la sexta etapa se desarrollan los diseños definitivos adicionando información a los realizados en la etapa anterior. Se debe presentar toda la configuración esencial para realizar el producto. Las formas de presentación son dibujos a escala, listas de piezas, diagramas de flujo de instrumentación, cálculos y simulaciones.

Como última etapa se recopila la documentación del producto, es decir las instrucciones de funcionamiento. El resultado de esta etapa se presenta en forma de dibujos a detalle y montaje, lista de piezas, producción, montaje pruebas transporte y manual de instrucciones.

1.3.5 Selección de metodología

Teniendo que elegir entre una de estas metodologías para guiar los procesos de diseño que se llevarán a cabo dentro de la remanufactura se optó por utilizar el modelo propuesto por Ulrich & Eppinger [21]. La razón de esto es que esta metodología centra sus etapas principalmente en el desarrollo del diseño mecánico utilizando herramientas de comparación y ponderación sencillas basadas en los requerimientos del producto a diseñar. Sin embargo, no únicamente es aplicable en productos o equipos completos, sino también en sub sistemas o componentes de éstos, lo cual es el objetivo dentro del proceso de remanufactura.

Si bien se optó por utilizar una sola metodología, ésta solo es una forma de guiar el proceso y no requiere un uso estricto. En caso de ser necesario es posible emplear elementos de otros métodos para complementar el proceso de diseño de algún componente a diseñar en específico.

2 Planteamiento del problema

2.1 Diagnóstico inicial

En la primera fase del proceso de remanufactura que corresponde al diagnóstico inicial el objetivo será conocer el equipo desde sus orígenes, su funcionamiento y construcción, hasta detectar modificaciones realizadas durante su uso y por último cuales fueron las causas que determinaron el fin de su vida útil.

2.1.1 Origen de la máquina

En el Área de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se encuentra una máquina peletizadora la cual fue diseñada y fabricada por alumnos de licenciatura en el año 2013. Este equipo es un sistema dual, es decir, cuenta con dos modos de peletizado, uno en frío y otro en caliente.

El peletizado en frío que incorpora esta máquina consiste en introducir un perfil circular a la peletizadora (previamente extruido) para que ésta lo corte en secciones iguales con ayuda de dos cortadores, uno fijo y otro giratorio. Por otro lado, el sistema de peletizado en caliente funciona en conjunto con la máquina extrusora, la cual se alinea con la peletizadora y utiliza un dado de extrusión de perfil circular con tres salidas. Al inicio, una cuchilla giratoria de dos filos corta el polímero aún fundido en pequeñas porciones, estas caen a una tina de enfriamiento que contiene agua en circulación para su solidificación (figura 2.1).

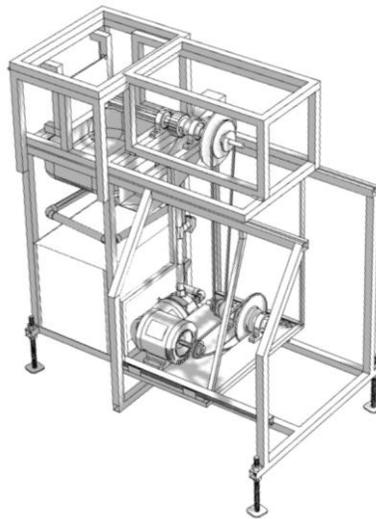


Figura 2.1 Estructura de la máquina peletizadora dual. [25]

2.1.2 Construcción, estructura y funcionamiento original

Se estudió el proyecto del diseño original para entender a profundidad el funcionamiento de la máquina peletizadora y su construcción tal como se planeó en un principio.

La estructura de la máquina se puede separar en 2 secciones para un mejor entendimiento de su construcción, las cuales son: unidad fija y unidad móvil. Estas partes tienen la peculiaridad de poderse separar y ensamblar entre sí de manera relativamente sencilla. La peletizadora tiene esta construcción con el objetivo de cambiar de un modo de peletizado al otro desplazando la unidad móvil para acoplar y desacoplar los cortadores de ambos modos.

La unidad fija se encuentra posada sobre el piso y es la que cuenta con la estructura necesaria para soportar los demás sistemas que componen a la máquina, hecha principalmente de perfil cuadrado de acero y cubierto por lámina de acero. En la parte inferior de esta estructura se encuentran patas reguladoras de altura y ruedas que facilitan su movilidad.

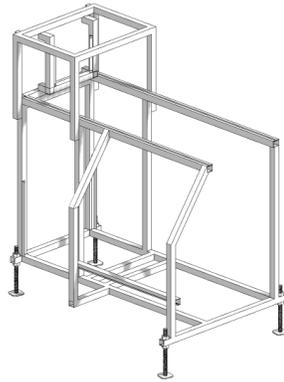


Figura 2.2 Estructura de la unidad fija. [25]

En la unidad fija se encuentra el panel de control, enmarcado en un recuadro azul en la figura 2.3, con el que se modifican variables como el encendido y apagado general del equipo, así como de una bomba de agua y de un motor de corriente alterna, de este último se puede controlar también el sentido de giro y velocidad. También en esta unidad se halla el sistema de descarga inferior del peletizado en frío, el cual tiene como función conducir el material cortado hacia el exterior de la máquina para su posterior almacenamiento como se muestra en la figura 2.3 enmarcado en un recuadro en rojo.

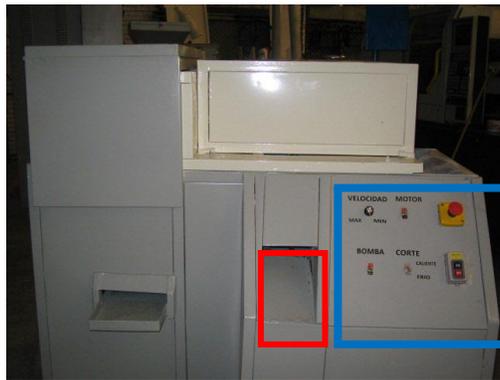


Figura 2.3 Panel de control (azul) y descarga de material (rojo). [25]

La unidad fija cuenta con dos sistemas que son parte del peletizado en caliente, el primero es el acoplamiento con la extrusora, el cual consta de una placa metálica con un maquinado en su centro que embona con el dado de extrusión diseñado para la operación. Esta placa se puede quitar y poner con ayuda de tornillos de sujeción. En la parte inferior se encuentra el sistema de enfriamiento, que consta de una tarja de acero inoxidable sobre la cual caen los pellets recién cortados y que son conducidos por una corriente de agua hacia un sistema de tubería que los enfría y posteriormente caen en una coladera metálica de la cual son extraídos para su almacenamiento. La corriente de agua es impulsada por una bomba.

La unidad móvil consta principalmente de una estructura igualmente construida de perfil cuadrado de acero y lámina (figura 2.4). El nombre de esta unidad se debe a que se acopla con el resto de la máquina por medio de un sistema de carretillas que corren por dentro de canaletas situadas en la parte superior de la estructura de la unidad fija. Sobre esta estructura se montan varios sistemas del peletizado en frío. Uno de ellos es la zona de alimentación, la cual consiste en una tolva que sirve para conducir el perfil extruido hacia la zona de corte que se encuentra al final de la tolva. El sistema de corte está formado por dos cortadores, uno fijo y otro giratorio, el primero de ellos se encuentra ensamblado sobre una placa metálica en la cual también se monta el sistema de alimentación. El cortador rotatorio está montado sobre un eje que se fija a la estructura por medio de dos chumaceras. Todos estos sistemas se observan en la figura 2.4 b).

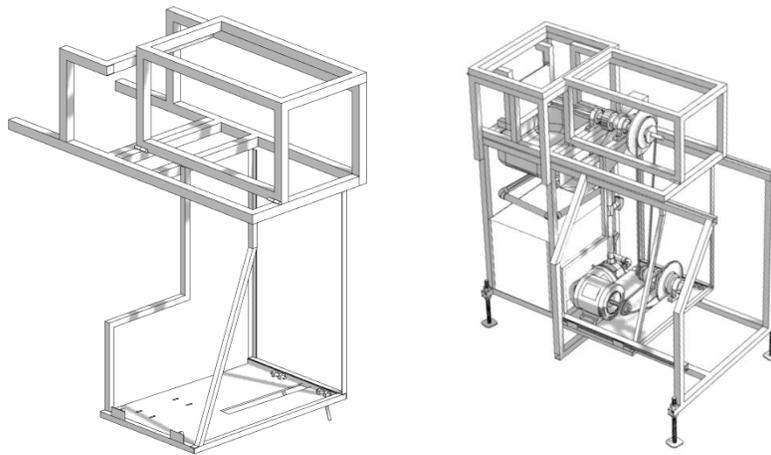


Figura 2.4 a) Estructura de la unidad móvil. b) Sistemas de la unidad móvil. [25]

Debajo de la zona de corte se encuentra el sistema de descarga superior figura 2.5, que consta de una rampa que recolecta el material cortado y lo conduce hacia el sistema de descarga inferior. Los sistemas de descarga no están acoplados debido a que cada uno se encuentra en una de las unidades de la máquina, por lo que sería complicado desplazar la unidad móvil si estuvieran unidos.

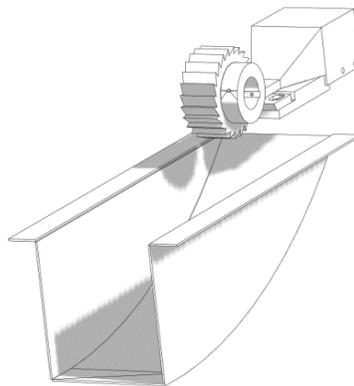


Figura 2.5 Corte en frío, sistema de alimentación y sistema de descarga superior. [25]

Al final del mismo eje principal sobre el que se monta el cortador giratorio del peletizado en frío, se encuentra el cortador del peletizado en caliente, el cual consta de dos filos que, con ayuda del desplazamiento de la unidad móvil, se acerca y se aleja de la zona de acoplamiento con la extrusora para permitirle cortar lo más cerca posible del dado las porciones de plástico fundido.

Soldada debajo de la estructura principal de la unidad móvil figura 2.6, se encuentra otra que consiste en una placa metálica puesta de manera horizontal sobre la que se montan los elementos del sistema motriz, que son el motor de corriente alterna y un eje secundario de reducción. La potencia se transmite del motor al eje secundario y luego de este al eje principal por medio de un sistema de catarinas y cadenas. Existen tres reducciones diferentes entre los dos ejes, uno para cada modo de peletizado y otro extra para ampliar el rango de velocidad de ambos modos.

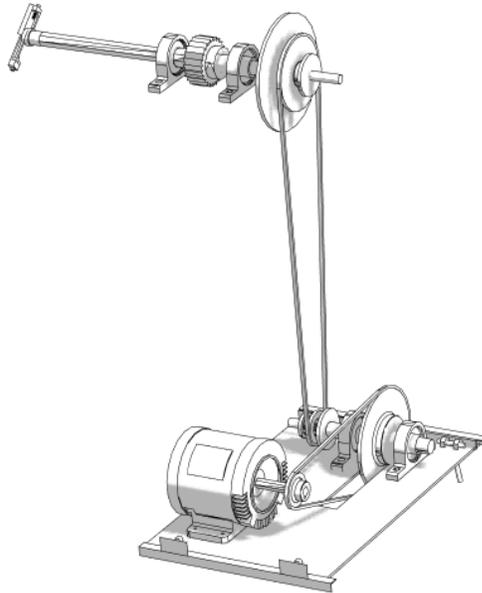


Figura 2.6 Sistema motriz. [25]

2.1.3 Modificaciones durante su vida útil [25]

Hay piezas que no se mencionan en el reporte del diseño original por lo que se intuye que se tratan de modificaciones posteriores durante sus años de funcionamiento.

La primera de ellas es la adición de una tubería con orificios en la zona de peletizado en caliente que posiblemente se utilizaba para enfriar el plástico fundido al momento en que se corta (figura 2.7). Sin embargo, se desconoce la causa por la que fue incluida, si era necesario por algún problema de funcionamiento o si se añadió para mejorar la efectividad del proceso.



Figura 2.7 Modificación en el sistema de enfriamiento.

También en el sistema de enfriamiento se identificó otra modificación y es que en el diseño original aparece un tramo de tubería saliendo de la parte de debajo de la tarja, esta tubería debería tener forma de espiral que tiene el propósito de mantener sumergidos por más tiempo los pellets. Además, terminando esta sección de tubería el material debería caer a un colador metálico que lo separa del agua para su secado. En lugar de ello la tarja solamente cuenta con una salida directa hacia una malla de tela que hace la función de colador (figura 2.8).



Figura 2.8 Modificación en el sistema de descarga.

También se encontraron algunas diferencias de diseño con respecto a lo que se documentó en el reporte del proyecto original. La primera es que los dientes de algunas catarinas utilizadas en el sistema de transmisión no coinciden con lo que reporta en diseño, por lo tanto, la velocidad con la que se pretende trabajar en la máquina tendría pequeñas variaciones respecto a los cálculos realizados. Por otro lado, se identificó un posible error de manufactura en el cortador giratorio del sistema de peletizado en frío, ya que a simple vista se nota que los dientes no están distribuidos uniformemente en la circunferencia de la herramienta, por lo que hay diferencia de tamaño entre unos dientes y otros. Este aspecto no se menciona en el reporte, aunque

si fue calculado, y en todo momento las imágenes indican que los dientes deben de estar distribuidos uniformemente.

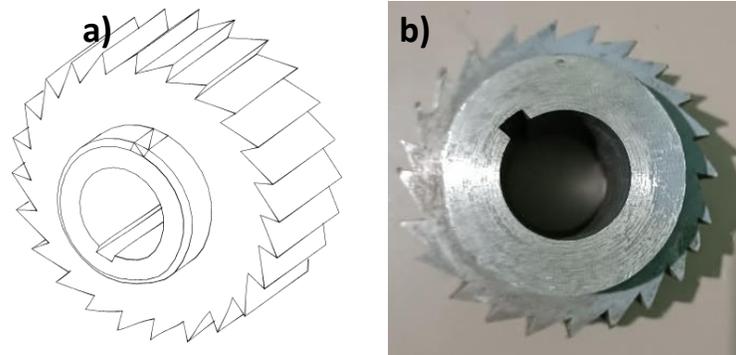


Figura 2.9 a) Diseño documentado del cortador b) cortador manufacturado con errores.

2.1.4 Problemáticas identificadas

Anteriormente se realizó un estudio de la máquina con el propósito de identificar fallas en el funcionamiento del equipo y poder solucionarlas, pero en este proceso se desarmó la máquina y dicho proyecto no tuvo seguimiento. Este estudio fue documentado y gracias a esto se conocieron cuáles eran las problemáticas que presentaba la máquina en el momento en que aún era funcional.

Se sabe que la peletizadora tenía perdidas de material en varias zonas de la máquina, principalmente cuando se utilizaba el peletizado en frio. En primer lugar, el sistema de descarga superior (figura 2.10) no cumplía su función de recolectar todo el material obtenido en la zona de corte, ya que algunos pellets al ser cortados salen disparados hacia arriba y terminan cayendo al suelo.

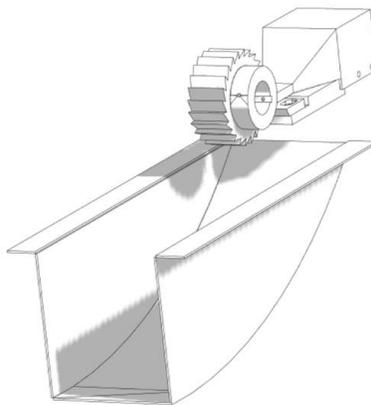


Figura 2.10 Zona de corte. [25]

Posteriormente, en la unión de los dos sistemas de descarga se presentaba la mayor pérdida de material debido al acoplamiento no fijo entre ambas, (recuadros blanco y rojo figura 2.11) que dejaba huecos por donde los pellets no siempre pasan de una rampa a otra y caían al suelo (circulo azul figura 2.11). Estos problemas se solventaban utilizando cajas de cartón para tapar la zona de corte y el espacio entre las dos rampas.



Figura 2.11 Pérdida de material en el sistema de descarga.

Por último, en la zona de descarga de material su recolección se dificultaba, ya que se tenía que pegar un costal con cinta adhesiva a la máquina para empaquetar los pellets. Esto generaba pérdida de material al no poder dirigir los pellets efectivamente hacia el costal. Además, muchas veces se despegaba la cinta con la que se sujetaba el costal debido a las partículas de plástico que se generan en el proceso figura 2.12.

Otro problema con el sistema de descarga inferior era que el material se quedaba atorado en la rampa de salida, pues esta no tiene un ángulo muy inclinado que ayude a que los pellets resbalen correctamente.



Figura 2.12 Descarga de material ineficiente.

En la zona de alimentación del peletizado en frío hay un componente cuya función es dirigir el perfil extruido hacia la zona de corte (figura 2.13), pero este era ineficiente y presentaba fallas y desgaste, por lo que en algunas ocasiones no se cortaba bien el perfil debido a que se desviaba hacia un lado del cortador. Agregando que es necesario un operador alimentando manualmente la máquina y asegurándose de que el perfil no se atore en esa zona.

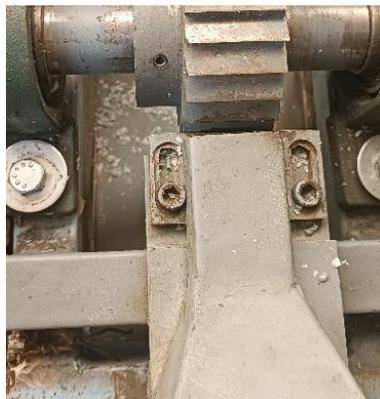


Figura 2.13 Sistema de alimentación.

El modo de peletizado en caliente no se solía utilizar debido a que el realizar la alineación con la extrusora presentaba muchos inconvenientes además de necesitar al menos tres operadores. Además, el soporte del sistema motriz se desprendió de la unidad móvil, como se muestra en la figura 2.14, y por ello se trabajaba atando con unos lazos este elemento a la unidad fija. A causa de esto la unidad móvil no podía desplazarse para acoplar el sistema de peletizado en caliente.

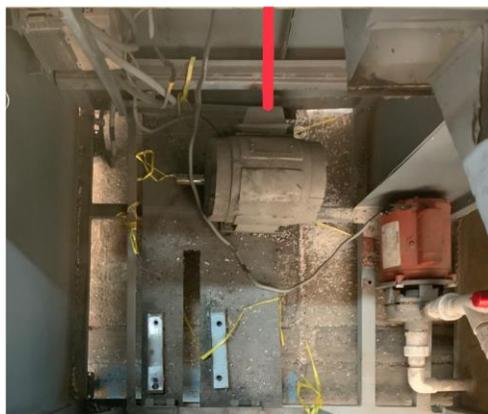


Figura 2.14 Soporte del sistema motriz desprendido.

Uno de los problemas de alineación con la extrusora es la regulación de la altura, la cual debería poder modificarse por medio de las patas de la máquina que tienen tornillos, pero estos ya están trabados y además resultaba difícil nivelar las cuatro patas a la misma altura figura 2.15.



Figura 2.15 Patas reguladoras de altura.

2.2 Inspección

Al iniciar este proyecto se encontró la máquina desarmada casi en su totalidad, la mayoría de las piezas estaban apartadas en un mismo lugar, sin embargo, algunas otras estaban guardadas en otros lugares del laboratorio y se tuvo que hacer una búsqueda para recolectarlas. Por esta razón, la fase de desensamble descrita en el proceso de remanufactura no fue necesaria y se continuó directamente con la inspección individual de los componentes de la máquina con el objetivo de determinar los trabajos de reacondicionamiento que se debían realizar.

La estructura principal de la unidad móvil presentaba abolladuras en la lámina de los costados, y en otros lados esta lámina se encontraba despegada de la estructura figura 2.16 a). Además, el cortador fijo y las carretillas que hacen posible su movilidad estaban desmontadas. En cuanto a estos componentes, el cortador fijo estaba desafilado y presentaba muescas en el filo figura 2.16 b). Por otro lado, las carretillas se encontraron en buen estado, pero es difícil girar las ruedas, por lo que necesitaron limpieza y lubricación figura 2.16 c).

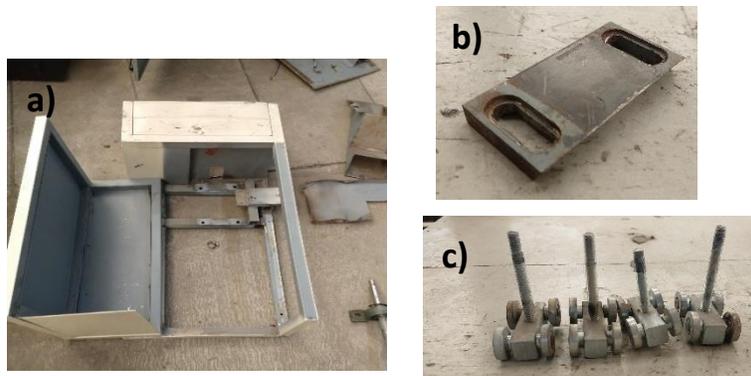


Figura 2.16 a) estructura de la unidad móvil. b) cortador fijo. c) carretillas de la unidad móvil.

En la zona de corte la rampa del sistema de descarga superior se encontró desacoplada de la unidad móvil y presentaba algunos daños en la lámina como oxidación. Por otro lado, en la zona de entrada de material, la tolva de alimentación también presentaba daños en los elementos que tienen la función de dirigir el material.



Figura 2.17 Sistema de descarga superior y sistema de alimentación.

La estructura flotante que soporta al sistema motriz estaba separada de la unidad móvil, ya que las uniones de la base con la estructura principal fallaron e incluso le faltaban dos de los cuatro soportes que debería tener. También cuenta con unas bisagras que ayudan a tensar las cadenas de transmisión, sin embargo, estas estaban atoradas por el óxido y suciedad figura 2.18.



Figura 2.18 Base del sistema motriz.

Todo el sistema motriz debería estar acoplado a la unidad móvil, pero se encontró desarmado. En cuanto al eje principal una de las chumaceras estaba floja y fuera de lugar, además que el cortador para el pelletizado en caliente se halló desacoplado y presentaba muchos daños. El otro cortador posiblemente tenía defectos de manufactura. El eje secundario también tenía una chumacera fuera de posición y a la catarina más grande le hacía falta su cuña.

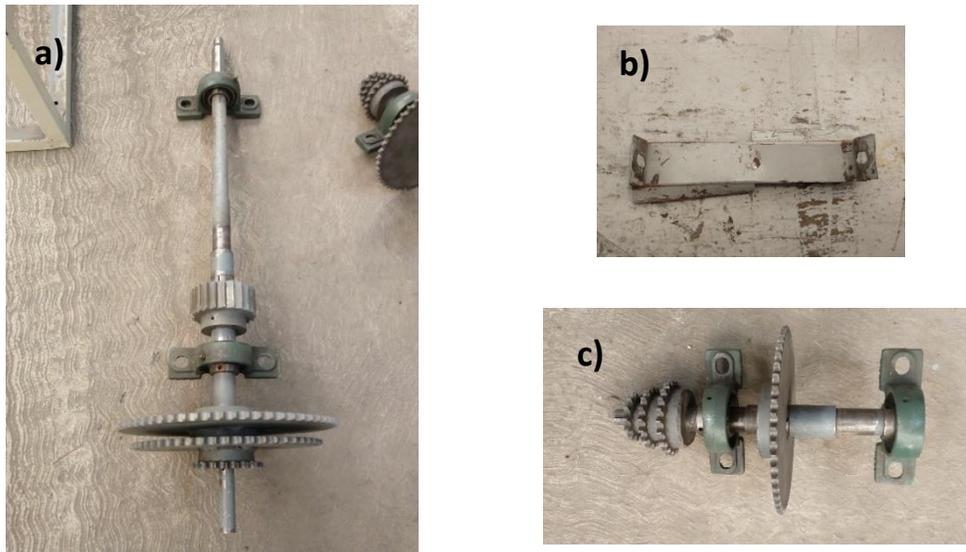


Figura 2.19 a) Eje principal. b) Cortador del pelletizado en caliente. c) Eje secundario.

El motor parecía estar en buen estado, sin embargo, le falta el piñón en el eje. Las cadenas de transmisión parecían estar en buen estado, pero igualmente estaban desacopladas.



Figura 2.20 a) motor del sistema motriz. b) cadenas motrices.

En cuanto a la unidad fija, empezando por el lado de la entrada de material del sistema de pelletizado en frío, solo presentó zonas oxidadas figura 2.21 a). En la entrada de material de pelletizado en caliente, le faltaba una placa de metal que se encontraba desacoplada y la lámina estaba dañada en esa zona figura 2.21 b). En el lado posterior de la máquina se encuentra la zona de salida de material, la cual se estaba desprendiendo de la carcasa, además el panel de control estaba desacoplado y le faltaban la mayoría de los botones figura 2.21 c).



Figura 2.21 a) Lado de la máquina del peletizado en frío. b) Lado de la máquina de peletizado en caliente. c) Descarga de material y panel de control.

El sistema de enfriamiento no parecía tener grandes problemas además de las modificaciones que se le realizaron. La bomba de agua se puso en funcionamiento y se comprobó que trabajaba sin problemas. Las tuberías no presentaron obstrucciones, pero la válvula que las abre y cierra no giraba figura 2.22 a). La tina que recolecta el agua para la recirculación, no parecía estar dañada. Sin embargo, carecía de un sistema de descarga de material eficiente, al ser prácticamente manual esta tarea figura 2.22 c).



Figura 2.22 Sistema de enfriamiento. a) boba de agua. b) sistema de spray. c) sistema de descarga

Como último paso en la fase de inspección, se realizó un armado provisional del equipo a un estado lo más cercano posible antes de que fuera desensamblada. Esto con el objetivo de comprobar su funcionamiento y las deficiencias detectadas con anterioridad. Al finalizar el proceso de inspección se elaboró la tabla 2.1 a modo de resumen del estado de cada componente de la máquina, el trabajo de reacondicionamiento que se necesita hacer a cada uno y algunas observaciones a tomar en cuenta para realizar dicho trabajo.

Tabla 2.1 Resumen de la fase de inspección.

<i>Componente</i>	<i>Estado</i>	<i>Trabajo a realizar</i>	<i>Observaciones</i>
Estructura unidad fija	Dañado	Reacondicionamiento	Lámina dañada Falta una rueda
Estructura unidad móvil	Dañado	Reacondicionamiento	Falta una cara Lámina dañada
Panel de control	Dañado	Reacondicionamiento	Botones desarmados Conexiones faltantes
Soportes reguladores	En buen estado	Rediseño / sustitución	Optimizar la variación de altura
Sistema de descarga inferior	Dañado	Reacondicionamiento / modificación	Unión con la estructura rota Mejorar la descarga de material Mejorar el almacenamiento de material
Sistema de descarga superior	En buen estado	Modificación	Mejorar la unión con el sistema de descarga inferior
Acoplamiento con extrusora	En buen estado	Modificación	Facilitar el acoplamiento con la extrusora
Sistema de enfriamiento	Dañado	Reacondicionamiento / modificación	Tubería dañada o faltante Mejorar el sistema de descarga
Sistema de alimentación	Dañado	Reacondicionamiento / modificación	Tolva de entrada dañada Incorporar alimentación automática
Cortador fijo	Dañado	Reacondicionamiento	Cortador desafilado
Cortador giratorio	Dañado	Remanufactura	Corregir fallas en la manufactura
Cortador en caliente	Dañado	Remanufactura	No apto para mantenimiento
Base de sistema motriz	Dañado	Reacondicionamiento	Reponer soportes
Motor AC	En buen estado		Falta catarina en el eje
Eje secundario	Dañado	Reacondicionamiento	Chumaceras y catarinas sueltas
Eje principal	Dañado	Reacondicionamiento	Chumaceras y catarinas sueltas
Cadenas de transmisión	Dañado	Reacondicionamiento	Faltan candados

3 Propuesta de solución

3.1 Diseño de modificaciones

3.1.1 Regulación de altura

Se requieren modificar los soportes reguladores de altura que tiene la peletizadora para mejorar la eficiencia de la tarea que cumplen. Los soportes actuales regulan la altura por medio de tornillos que se desplazan al enroscarse en tuercas montadas a la estructura de la máquina (figura 2.14). Este mecanismo tiene la ventaja de poder modificar la altura de forma continua a causa del tornillo, lo que es necesario para realizar el acoplamiento de la peletizadora con la extrusora, siendo esta tarea la causante de que se requiera regular la altura de toda la máquina. Sin embargo, la desventaja son las complicaciones al utilizar el sistema ya existente, ya que para modificar la altura de los cuatro soportes es necesario tener elevada sobre el nivel del piso a toda la máquina algunos centímetros y posteriormente medir el largo de cada soporte para asegurar que la máquina esté correctamente nivelada. Por otro lado, en la inspección se observó que factores como la suciedad, pintura y óxido son un problema dificultando girar el tornillo dentro de la tuerca y por lo tanto es necesaria una herramienta adicional para regular la altura.

De acuerdo con las necesidades antes descritas se elaboró la tabla 3.1 en donde se enumeran los requerimientos del componente a diseñar y se le asigna un valor de prioridad siendo 1 menor importancia y 5 mayor importancia.

Tabla 3.1 Requerimientos para la regulación de altura.

Núm.	Requerimiento	Importancia
1	Permite la regulación continua de la altura	5
2	Ajusta la altura sin necesidad de equipo adicional	1
3	Ajusta la altura sin necesidad de herramienta	1
4	Permite la fácil nivelación de la máquina con respecto al piso	4
5	Es de fácil mantenimiento y limpieza	2
6	Sostiene el peso de la máquina	5
7	Permite modificar la altura en un corto periodo de tiempo	3
8	Es fácil de manufacturar	2
9	Tiene un funcionamiento intuitivo	2
10	Permite estabilidad en la máquina	3

De acuerdo con la metodología de Ulrich & Eppinger [21] se aconseja establecer métricas para cada necesidad o requerimiento, sin embargo, en este caso la mayoría de las que se definieron no requieren una métrica precisa o esta resulta subjetiva.

Para complementar los requerimientos al momento de seleccionar un concepto de solución es útil presentar una lista de restricciones a considerar dadas las condiciones de trabajo y el objetivo del proyecto.

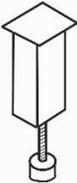
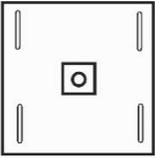
Tabla 3.2 Restricciones para la regulación de altura.

Núm.	Restricción
1	Se adapta a la estructura ya existente de la máquina
2	Permite la movilidad de la máquina con las ruedas ya instaladas
3	Su fabricación se puede realizar con materiales de reúso.
4	Se puede fabricar con manufactura convencional

Las restricciones 1 y 2 responden a una correcta adaptación del nuevo componente a la estructura y diseño actual de la máquina y de esta manera no entorpecer su funcionalidad. La restricción 3 corresponde al objetivo de la remanufactura en la que algunos autores [7][8] recomiendan utilizar material de reúso o reciclados para aumentar el ahorro de recursos. Por último, la restricción número 4 se debe a las condiciones de trabajo y el equipo disponible para la fabricación del componente.

Para la generación de conceptos se elaboran bocetos tomando en cuenta los requerimientos descritos en la tabla 3.1. A continuación, en la tabla 3.3 se muestran estos bocetos acompañados de una descripción de cada concepto propuesto.

Tabla 3.3 Propuestas de conceptos para regulación de altura.

Núm.	Boceto	Descripción
1		Se mantiene la idea de las patas originales al utilizar un sistema tuerca-tornillo para regular la altura, pero se reduce su largo para elevar solo lo necesario para acoplar la extrusora. El sistema se monta dentro de una estructura rectangular para mejorar la estabilidad.
2		Esta propuesta ataca el problema de origen modificando la placa de acoplamiento con la extrusora al cambiar los orificios que tiene para montarse en la estructura por ranuras, lo que permite variar su posición verticalmente lo suficiente para acoplar el dado.
3		Este elevador de altura consta de dos tubos cuadrados uno a dentro de otro. El del interior tiene orificios cada cierta distancia y el del exterior solamente cuenta con uno. El largo de la pata se modifica deslizando el tubo de adentro y se fija la posición con un perno que atraviesa el orificio exterior, así como el que se elija del interior.
4		Propuesta similar a la anterior con la diferencia de que el tubo interior cuenta con una ranura en todo su largo lo que permite una variación de altura continua. Para fijar la posición de la pata se utiliza un sistema de sujeción entre los dos tubos por medio de un tornillo.

Luego de la propuesta de conceptos toca la selección del que se desarrollará, para lo cual es útil utilizar herramientas como una matriz de selección como la de la tabla 3.4. En ella se evalúa cada propuesta comparando contra ciertos criterios de selección que representan a cada uno de los requerimientos a los cuales se les asigna un porcentaje de ponderación de acuerdo con la importancia establecida en la tabla 3.1. De la matriz de selección se obtiene una calificación para cada propuesta, lo cual tendrá un peso importante en la selección final de concepto.

Tabla 3.4 Matriz de selección para regulación de altura.

		Concepto							
		1		2		3		4	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada						
1	18%	4	0.72	3	0.54	1	0.18	4	0.72
2	5%	1	0.05	4	0.20	3	0.15	1	0.05
3	5%	3	0.15	1	0.05	4	0.20	3	0.15
4	10%	2	0.20	2	0.20	4	0.40	3	0.30
5	10%	2	0.20	3	0.30	3	0.30	2	0.20
6	18%	3	0.54	1	0.18	5	0.9	2	0.36
7	8%	2	0.16	4	0.32	3	0.24	3	0.24
8	8%	3	0.24	4	0.32	2	0.16	2	0.16
9	8%	3	0.24	3	0.24	3	0.24	2	0.16
10	10%	2	0.20	1	0.10	3	0.30	3	0.30
Total		2.7		2.45		2.94		2.64	

De acuerdo con la matriz de selección realizada, la mejor opción para regular la altura de la máquina es la propuesta 3 que supone utilizar un sistema que fije el largo de las patas con ayuda de un perno. Sin embargo, el inconveniente de esta propuesta es la limitación de solo poder fijar la altura de las patas a distancias establecidas. La segunda mejor opción es la número 1 que es muy similar al sistema con el que ya cuenta la máquina, pero no resuelve la mayoría de los problemas detectados, solamente aumenta la estabilidad y rigidez. El concepto número 4 queda en tercer lugar debido a que a causa del modo en que se fija la altura de las patas corren el riesgo de deslizarse por el peso de la máquina y desnivelarla. Por último, el concepto número 2 que propone solucionar directamente el problema de acoplamiento con la extrusora queda en último lugar principalmente debido a que no permite regular la altura de toda la máquina si en algún caso es necesario, además es la única que requiere de una herramienta para funcionar ya que se fija con tornillos a la estructura.

Un aspecto importante que se tiene que considerar para la selección de concepto es que, en caso de ser posible, las propuestas se pueden combinar para crear una solución más eficiente [21]. Posiblemente este sea uno de estos casos, ya que la propuesta número 2 se enfoca en modificar un componente diferente a las demás por lo que es posible aplicar esta propuesta junto con alguna de las otras tres que se enfocan en modificar los soportes de la máquina y siendo el concepto número 3 el mejor calificado por la matriz de selección, sería este el seleccionado para combinarse con la modificación de la placa de acoplamiento con la extrusora, y así resolver dos problemáticas al mismo tiempo.

Al combinar estas dos soluciones se tiene el resultado de fijar con seguridad la máquina en varias alturas definidas según se requiera y al implementar ranuras en la placa de acoplamiento se permite la variación continua de este elemento en un rango mayor a lo que se puede variar la altura del equipo completo.

El siguiente paso es el diseño a nivel de sistema o en este caso a nivel de concepto. A continuación, se definirá la forma final de los componentes y sus medidas aproximadas. En la figura 3.1 se muestra el modelo sólido de uno de los soportes reguladores de altura con el concepto seleccionado anteriormente, en donde se aprecia la forma que tendrá.

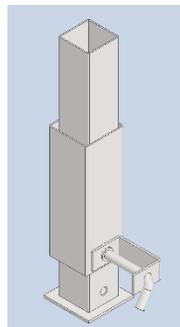


Figura 3.1 Modelo sólido de soporte regulador de altura.

El componente consiste en dos PTR (perfil tubular rectangular) de aproximadamente una pulgada de ancho introducidos uno dentro de otro, es importante mencionar que uno de ellos debe de ser ligeramente más ancho para permitir el deslizamiento entre los dos. El PTR del interior cuenta con 4 orificios separados por 2 cm cada uno comenzando a 1 cm de la base, en la que hay un elemento plano que aporta estabilidad al soporte. El PTR exterior cuenta con solamente 1 orificio a 1 cm de la parte inferior el cual coincide con el orificio más bajo del perfil interior. En la cara del PTR exterior que tiene el orificio se encuentra alineada una estructura en forma de herradura rectangular que cumple el propósito de alojar y dirigir el perno que fija la posición relativa entre los dos perfiles. El largo de los perfiles se determinará para que se tenga una variación de altura de 15 cm entre la posición más baja y la más alta.

Se contempla la posibilidad de incluir un resorte alrededor del perno en la sección que está dentro del elemento en forma de herradura, con el propósito de facilitar la introducción de este elemento dentro de los orificios de ambos perfiles.

La figura 3.2 muestra la manera en que se debe ensamblar cada elevador de altura.

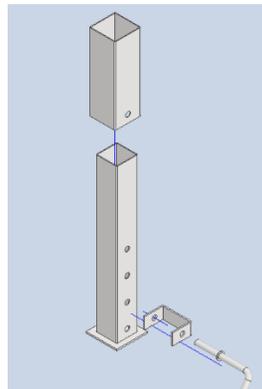


Figura 3.2 Ensamble del soporte regulador de altura.

Continuando con el otro componente de la solución seleccionada, que corresponde a la placa de acoplamiento con la extrusora. El concepto original propuesto en la tabla 3.3 se modificó ahora siendo los soportes de este elemento en la estructura de la máquina a los que se les incluirán ranuras en lugar de orificios. Este cambio se da debido a la facilidad de trabajar con los soportes al ser de un material aparentemente más blando y de mejor maquinabilidad que la placa, además de tener un espesor de pared más delgado. El largo de las ranuras se debe determinar para asegurar una variación de altura continua en conjunto con los soportes reguladores.

- Cálculo del tamaño de los perfiles tubulares cuadrados

Es necesario determinar el tamaño de los perfiles tubulares para que tengan un correcto deslizamiento entre ellos y que no quede mucho espacio entre las paredes de ambos. Para ello se puede proponer que el PTR interior y más largo tenga un ancho exterior por lado de 1 [in] o 25.4 [mm], medida recurrente en estructuras de metal y por ello resulta fácil encontrarlos en almacenes de desecho industrial.

El PTR comercial inmediato más grande que el de 1 [in] que se puede encontrar es el de 1 ¼ [in] por lado. Calculando la diferencia entre las medias exteriores

$$d = 31.75[mm] - 25.4 [mm] = 6.35 [mm]$$

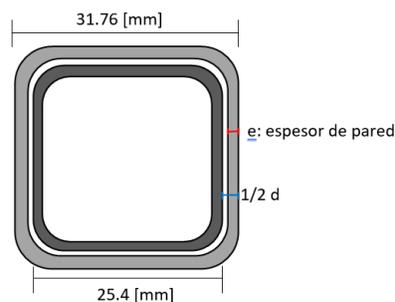


Figura 3.3 Diagrama del espacio entre perfiles tubulares.

Como se puede ver en la figura 3.3, para introducir el PTR interior en el exterior el espesor de pared del último debe ser menor a la mitad de la distancia entre las medidas exteriores de ambos perfiles, es decir 3.17 [mm].

Las medidas comerciales de espesor de pared para PTR de 1 ¼ [in] se mide en calibres y existen 5 disponibles que se muestran en la tabla 3.5 y donde todos los espesores de pared disponibles cumplen el requisito para permitir que el perfil interior se introduzca en el exterior.

Tabla 3.5 Medias de espesor de pared para PTR 1 ¼ [in]. [26]

Calibre	Medida en [mm]
20	0.914
18	1.231
16	1.524
14	1.905
12	2.667

De acuerdo con la norma ISO 286 que determina ajustes y tolerancias para elementos ensamblados, el ajuste para un par de componentes que deben montarse sin enfuerzo y requieren deslizamiento para su funcionamiento es de H8 para eje único, es decir cuando se toma el diámetro máximo de eje como línea cero. Por lo tanto, la especificación del tamaño del agujero para este caso es 25.4H8.

Para obtener la medida del agujero con la especificación antes descrita se utiliza la tabla 3.6 que determina las tolerancias con respecto a un diámetro nominal que en este caso es de 25.4[mm] con una calidad H8 para el tipo de ajuste necesario.

Tabla 3.6 Diferencias superior e inferior para agujeros. [27]

Diámetro nominal en mm	6ª calidad						7ª calidad							8ª calidad							9ª calidad			10ª calidad						
	G6	H6	J6	K6	M6	N6	E7	F7	G7	H7	J7	K7	M7	N7	P7	D8	E8	F8	H8	J8	K8	M8	N8	D9	E9	H9	J9	D10	H10	J10
hasta 3	+3	0	-4		-7	-11	+14	+7	3	0	-6		-9	-13	-16	+20	+14	+7	0	-7			-15	+20	+14	0	-13	+20	0	-20
más de 3 hasta 6	+10	-7	-3		0	-4	+23	+6	+12	+9	+3		0	-4	-7	+34	+28	+21	+14	+7			-1	+45	+39	+25	+12	+60	+40	+20
más de 6 hasta 10	+5	0	-4	-7	-12	-16	+25	+13	+5	0	-7	-10	-15	-19	-24	+40	+25	+13	0	-10	-16	-21	-25	+40	+25	0	-18	+40	0	-29
más de 10 hasta 18	+14	+9	+5	+2	-3	-7	+40	+28	+20	+15	+8	+5	0	-4	-9	+62	+47	+35	+22	+12	+6	+1	-3	+76	+61	+36	+18	+96	+53	+29
más de 18 hasta 30	+6	0	-5	-9	-15	-20	+32	+16	+6	0	-8	-12	-16	-23	-29	+50	+32	+16	0	-12	-19	-25	-30	+50	+32	0	-2	+50	0	-35
más de 30 hasta 50	+17	+11	+6	+2	-4	-9	+50	+34	+24	+18	+10	+6	0	-5	-11	+77	+59	+43	+27	+15	+8	+2	-3	+93	+75	+43	+21	+120	+79	+35
más de 50 hasta 80	+7	0	-5	-11	-17	-24	+40	+20	+7	0	-9	-15	-21	-28	-35	+65	+40	+20	0	-13	-23	-29	36	+65	+40	0	-26	65	0	-42
más de 80 hasta 120	+20	+13	+8	+2	-4	-11	+61	+41	+28	+21	+12	+6	0	-7	-14	+98	+73	+53	+33	+20	+10	+4	-3	+117	+82	+52	+26	+140	+84	+42
más de 120 hasta 180	+9	0	-6	-13	-20	-28	+50	+25	+9	0	-11	-18	-25	-33	-42	+80	+50	+25	0	-15	-27	-34	-42	+80	+50	0	-31	+80	0	-50
más de 180 hasta 250	+25	+16	+10	+3	-4	-12	+75	+50	+34	+25	+14	+7	0	-8	-17	+119	+89	+64	+39	+24	+12	+5	-3	+142	+112	+62	+31	+160	+100	+50
más de 250 hasta 360	+10	0	-6	-15	-24	-33	+60	+30	+10	0	-12	-21	-30	-39	-51	+100	+60	+30	0	-18	-32	-41	-50	+100	+60	0	-37	+100	0	-60
más de 360 hasta 500	+29	+19	+13	+4	-5	-14	+90	+60	+40	+30	+18	+9	0	-9	-21	+146	+106	+76	+46	+28	+14	+5	-4	+207	+159	+87	+43	+260	+140	+70
más de 500 hasta 720	+12	0	-6	-18	-28	-38	+72	+36	+12	0	-13	-25	-35	-46	-59	+120	+72	+36	0	-20	-38	-48	-58	+120	+72	0	-44	+120	0	-70
más de 720 hasta 1000	+34	+22	+15	+4	-6	-16	+107	+71	+47	+35	+22	+10	0	-10	-24	+174	+126	+90	+54	+34	+16	+6	-4	+207	+159	+87	+43	+260	+140	+70
más de 1000 hasta 1400	+14	0	7	-21	-33	-45	+85	+43	+14	0	-14	-26	-40	-52	-68	+145	+95	+43	0	-22	-43	-55	-67	+145	+95	0	-50	+145	0	-80
más de 1400 hasta 1800	+39	+25	+18	+4	-8	-20	+125	+83	+51	+40	+25	+12	0	-12	-28	+208	+148	+105	+63	+41	+20	+8	+4	+240	+185	+100	+50	+305	+160	+80

Para un grupo de diámetros entre 18 y 30 [mm] y una calidad de H8, el valor de la diferencia es de 0.033 [mm]. Por lo que el diámetro del agujero para el tipo de ajuste requerido sería de 25.43 [mm].

Teniendo en cuenta los espesores comerciales mostrados en la tabla 3.5 el tamaño de agujero mínimo que se podría conseguir es el siguiente

$$31.75 [mm] - 2(2.667[mm]) = 26.41[mm]$$

Este valor es casi un milímetro mayor que lo recomendado para el tipo de ajuste, por lo que la holgura entre los perfiles tubulares tendrá un juego mayor al esperado con un valor de 0.508 [mm] por lado. Sin embargo, al no ser un aspecto crítico para su funcionamiento, esta holgura podría no presentar ningún inconveniente.

- Cálculo del perno de fijación

El perno que atraviesa ambos perfiles es el elemento crítico de este componente al ser el que soporta el peso de la máquina, por lo tanto, se debe asegurar que este tenga la resistencia necesaria. La figura 3.4 muestra un diagrama de las cargas a las que será sometido el perno de fijación de uno de los soportes. Las cargas mostradas en color rojo representan los perfiles tubulares que aprisionan el perno aplicando fuerzas contrarias en dos puntos de su longitud.

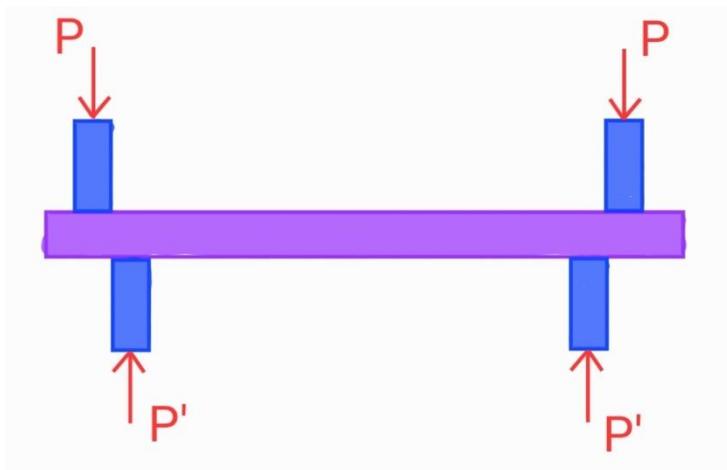


Figura 3.4 Diagrama de fuerzas que actúan sobre el perno de fijación.

De acuerdo con este diagrama, se deduce que el perno de fijación está sometido a una condición de esfuerzo cortante simple en dos puntos a lo largo de su longitud. La manera de calcular el esfuerzo cortante promedio para dicha condición de cargas se realiza utilizando la siguiente ecuación [28].

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A}$$

Siendo A el área transversal del perno y P la carga aplicada. Esta última se determina a partir del peso total de la máquina, el cual a partir de un cálculo aproximado se encontró que es de 214 [Kg] o bien 2099.34 [N].

Siendo 4 soportes los que sostiene el peso de la máquina y considerando que éste se distribuye uniformemente, cada uno de ellos recibe una carga de 524.83 [N]. Por lo tanto, al ser dos puntos en los que se aplica esta carga a lo largo del perno, a cada uno de ellos le corresponde 262.42[N].

El área de la sección transversal cuyo radio es de 1/8 [in] se calcula de la siguiente manera.

$$A = \pi r^2$$

$$r = \frac{1}{8} [in] = 3.175 \times 10^{-3} [m]$$

$$A = \pi(3.175 \times 10^{-3} [m])^2 = 3.166 \times 10^{-5} [m^2]$$

Una vez obtenidos los datos se calcula el esfuerzo promedio.

$$\tau_{prom} = \frac{262.42 [N]}{3.166 \times 10^{-5} [m^2]}$$

$$\tau_{prom} = 8.29 [MPa]$$

Al no conocer con exactitud el material de los pernos de fijación, se hace la suposición de que se trata de un acero al carbono 1018 es uno de los aceros comerciales con menor resistencia. Tomando el esfuerzo a la fluencia del material como referente se puede determinar si los pernos elegidos resisten a cualquier deformación plástica. El esfuerzo de fluencia del acero 1018 es típicamente de 4500 [Kg/cm²] [29] o bien 372 [MPa].

Haciendo una comparación directa entre el esfuerzo de fluencia del material y el que soportan los pernos, se observa que el primero es considerablemente mayor, obteniendo un factor de seguridad de 44.8.

Si bien se podrían utilizar pernos de menor diámetro, se debe considerar la comodidad en la operación de regulación de altura y por lo tanto utilizar varilla de ¼ de pulgada es una opción adecuada.

Para la fabricación de los soportes reguladores de altura se utilizó perfil tubular rectangular de acero en dos tamaños, 1 [in] para el interior y 1 ¼ [in] para el exterior. Los orificios que incluyen cada uno de ellos se barrenaron con ayuda de una fresadora vertical para mejorar la precisión del maquinado (figura 3.5 a)).

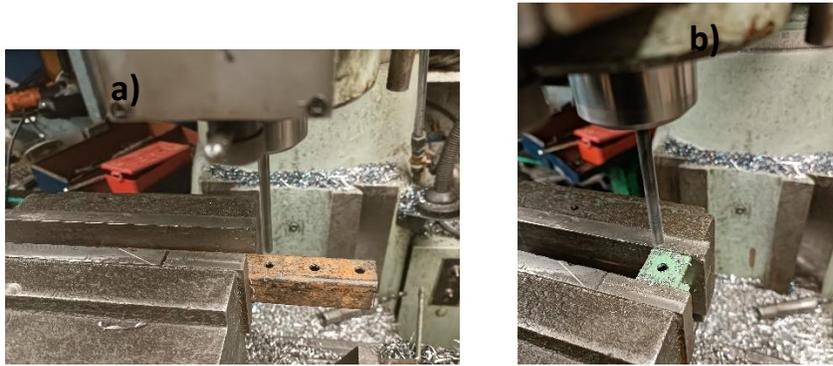


Figura 3.5 fabricación de soportes reguladores de altura. a) maquinado de PTR exterior. b) maquinado de soporte de perno.

La estructura en forma de herradura que soporta y guía el perno de fijación se fabricó a partir de lámina de acero de 1 [mm] de espesor, la cual se dobló para obtener la forma deseada y al igual que con los perfiles tubulares se barrenó con ayuda de una fresadora (figura 3.5 b)). Por otro lado, el perno de fijación se fabricó con una varilla de acero de $\frac{1}{4}$ de pulgada, a este elemento se le dio una forma de L doblando la varilla para restringir su movimiento. En la figura 3.6 se muestran los elementos unidos y ensamblados.



Figura 3.6 Soporte regulador de altura ensamblado.

Por último, se agregó una base más amplia a la parte inferior del perfil interior soldando una placa cuadrada de solera de acero que aporta estabilidad al soporte.

Una vez terminada la fabricación de los soportes montaron en la máquina por medio de soldadura tal como se muestra en la figura 3.7 a) Finalmente, se pintaron junto con toda la máquina y su estado final se muestra en la figura 3.7 b).



Figura 3.7 a) Soporte regulador de altura montado en la máquina. b) Estado final de soporte regulador de altura.

La modificación del sistema de acoplamiento se realizó sobre los soportes de la placa encerrados en rojo de la figura 3.8 a), en donde se aprecia que cuenta solamente con orificios para el ensamble. Estos soportes se retiraron de la estructura para montarlos en una fresadora vertical en donde se les realizó el maquinado de las ranuras. Luego de eso se volvieron a soldar a la estructura de la unidad fija para tener como resultado lo que se muestra en la figura 3.8 b).

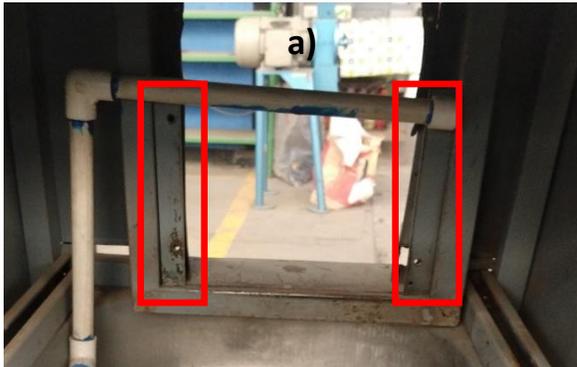


Figura 3.8 8 Modificación del acoplamiento con la extrusora. a) previo a modificarse. b) después de modificarse.

3.1.2 Sistema de recolección y descarga de material

El sistema de descarga, tanto superior como inferior del modo de peletizado en frío tienen deficiencias que se necesitan resolver para mejorar el proceso de descarga y almacenamiento de material. En primer lugar, en la zona de corte se identificó un problema de pérdida de material, ya que, al realizar el corte de los filamentos, los pellets no siempre caen hacia abajo, sino que en ocasiones son disparados hacia arriba o al frente donde chocan con la cubierta de la máquina y caen al suelo. El siguiente problema se encuentra en la unión del sistema de descarga superior y el inferior, en donde un mal acoplamiento produce que algunos de los pellets salgan por huecos entre las dos rampas y terminen en el suelo. Siguiendo con el sistema de descarga inferior, este tiene dos deficiencias, la primera es que los pellets no resbalan correctamente hacia el exterior de la máquina, dado que hay un cambio de ángulo entre las rampas que los frena. El segundo problema es que la salida de material es poco eficiente para almacenar los pellets ya que requiere pegar un costal con cinta a la máquina lo que en ocasiones genera pérdidas de material.

Un aspecto importante a considerar es que el objetivo es únicamente modificar este sistema para resolver sus deficiencias, en ningún caso se contempla volver a fabricarlo con una configuración diferente. Por otro lado, hay que recordar que el sistema de descarga superior se encuentra ensamblado en la unidad móvil, mientras que el sistema de descarga inferior está en la unidad fija. La unidad móvil debe conservar su cualidad de desplazamiento a lo largo de la máquina.

De acuerdo con las necesidades descritas se desarrolla la tabla 3.7 que enumera los requerimientos que deben cumplir las modificaciones del sistema de recolección y descarga.

Tabla 3.7 Requerimientos para el sistema de recolección y descarga.

Núm.	Requerimiento	Importancia
1	Evita la pérdida de material al momento del corte	5
2	Conduce el material correctamente de una rampa a otra	5
3	Permite la salida de material sin interrupciones en la rampa inferior	5
4	Almacena el material sin pérdidas en la salida	5
5	Es sencillo de manufacturar	2
6	Es de funcionamiento intuitivo	2
7	No requiere intervención del operador para su funcionamiento durante el proceso	3
8	No interfiere con la función de ningún componente de la máquina.	4

Adicional a los requerimientos se deben de considerar las siguientes restricciones de diseño mostradas en la tabla 3.8.

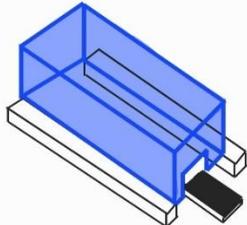
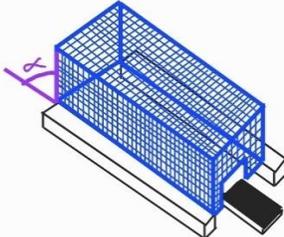
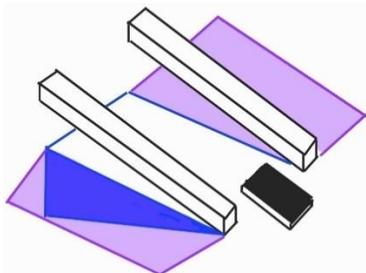
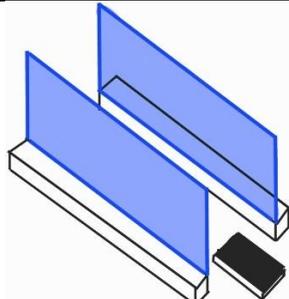
Tabla 3.8 Restricciones para el sistema de recolección y descarga.

Núm.	Restricción
1	La resolución de los problemas es compatible entre ellas
2	Se asegurar el desplazamiento de la unidad móvil
3	Los materiales para su fabricación son reciclados
4	Se fabrica con manufactura convencional

Con el objetivo de tener una mejor atención en los detalles y facilitar la elección de los conceptos que se desarrollarán para resolver los problemas de este sistema se hará una división en cuatro subsistemas en el que cada uno será destinado a resolver los cuatro primeros requerimientos de la tabla 3.7. Se harán una serie de propuestas de concepto para cada subsistema que pasarán por un proceso de selección y al final se combinarán para resolver las problemáticas de todo el sistema.

Iniciando con el primer subsistema, el cual resuelve el primer requerimiento, en la tabla 3.9 se muestran las propuestas de concepto con un boceto y su explicación para resolver el problema de la pérdida de material en la zona de corte.

Tabla 3.9 Propuestas de concepto para la recolección de material.

Núm.	Boceto	Descripción
1		Este concepto propone una cubierta de material sólido alrededor de la zona de corte. El material puede ser de lámina metálica o acrílico transparente para visualizar el interior. Esta cubierta se ensambla en los soportes alrededor de la zona de corte.
2		Concepto similar al anterior con el cambio de que la cubierta está de un armazón metálico recubierto con una malla metálica o plástica. En este caso la cubierta se ensambla en la tapa de la unidad móvil con el objetivo de que al abrirla la cubierta gire un cuarto de vuelta y deje expuesta la zona de corte.
3		En este caso se realiza una modificación al sistema de descarga superior que consiste en extender la rampa lateralmente para recolectar los pellets que salgan disparados y dirigirlos hacia la salida.
4		Este concepto propone instalar paredes a los lados de la zona de corte que se extienden hacia arriba hasta la tapa de la unidad móvil y así evitar las pérdidas con pocos recursos.

Luego de la propuesta de conceptos se hará una selección de la solución a desarrollar en cada subsistema. En la tabla 3.10 se encuentra la matriz de selección que será el principal determinante para seleccionar el concepto a desarrollar para la recolección de material. El número que aparece en la columna *Criterio de selección* indica el número de requerimiento correspondiente en la tabla 3.7 es por ello que, en la matriz de selección de cada subsistema solo aparecerá el requerimiento que le corresponda entre los cuatro primeros, en este caso el número 1. Este proceso se realizará de igual manera para cada uno de los subsistemas.

Tabla 3.10 Matiz de selección para la recolección de material.

		Concepto							
		1		2		3		4	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada						
1	40%	4	1.6	4	1.6	3	1.2	3	1.2
5	10%	3	0.30	4	0.40	3	0.30	4	0.40
6	10%	2	0.20	2	0.20	2	0.20	2	0.20
7	15%	4	0.60	4	0.60	4	0.60	4	0.60
8	25%	2	0.50	3	0.75	1	0.25	2	0.50
	Total	3.2		3.55		2.55		2.9	

Los resultados de la matriz de selección en la tabla 3.10 demuestran que la propuesta de solución número 2 es la que mejor satisface los requerimientos para el problema de pérdida de material en la recolección, por lo tanto, esta será la opción a desarrollar.

En la figura 3.9 se muestra el diseño de concepto para la cubierta de la zona de corte, esta será una estructura metálica fabricada con solera de acero de 0.5 [in] de ancho y 0.125 [in] de grosor. La forma de esta estructura se adapta a los elementos que conforman la zona de corte, ya que en la parte de atrás tiene un escalón que embona con la estructura de la tapa de la unidad móvil, lugar donde se ensamblará. En la parte delantera la cubierta cuenta con una ventana en la que se situará el sistema de alimentación. Por último, en los laterales se encuentra una ventana en cada lado para permitir una correcta interacción con el eje principal del sistema motriz. Esta estructura metálica se recubrirá con una malla de polietileno que será la que impida el paso de los pellets hacia el exterior. Se eligió este tipo de malla para la cubierta por su bajo costo y fácil implementación para el uso que se le dará.

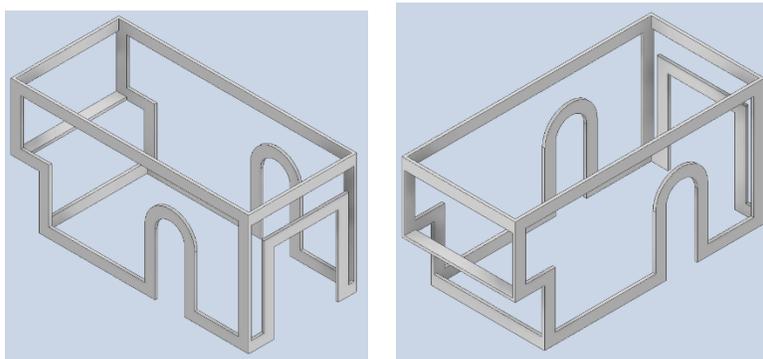


Figura 3.9 Modelo sólido 3D de la cubierta de la zona de corte.

La fabricación de la cubierta, como se mencionó anteriormente, se realizó con solera de acero de la cual se cortó cada tramo individual para luego ser unidos por medio de soldadura eléctrica y así formar la estructura de la cubierta figura 3.10 a) y b). Posteriormente se montó a la estructura de la tapa de la unidad móvil con ayuda de remaches en frío figura 3.10 c) y, por último, una vez que se repintó la máquina se colocó el recubrimiento de malla de polietileno alrededor de la estructura metálica figura 3.10 d).



Figura 3.10 a), b) fabricación de la cubierta. c) cubierta montada en la unidad móvil. d) apariencia final de la cubierta.

El siguiente subsistema corresponde a la resolución de fuga de material en la unión entre los dos sistemas de descarga. La tabla 3.11 enumera los conceptos propuestos para resolver esta problemática.

Tabla 3.11 Propuesta de concepto para la unión entre sistemas de descarga.

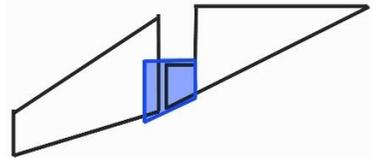
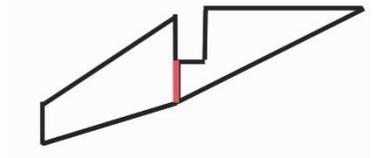
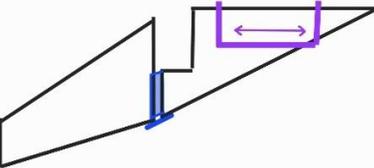
Núm.	Boceto	Descripción
1		Esta solución consiste en un elemento removible que cubre la zona de la unión entre los dos sistemas de descarga. De esta manera los pellets no tienen posibilidad de salir entre los huecos de la unión. La cubierta es removible para conservar el desplazamiento de la unidad móvil.
2		En este caso se considera unir permanentemente los dos sistemas de descarga para evitar la fuga de material. Para conservar el desplazamiento de la unidad móvil se debe desacoplar de ésta el sistema de descarga superior.
3		En esta propuesta se añaden aditamentos a los lados y en la base la unión en una de las rampas para tapar los huecos. Estos aditamentos no son removibles por lo que para conservar el desplazamiento de la unidad móvil se añade movilidad en la rampa superior en la dirección que indican las flechas moradas y así desacoplar los dos sistemas de descarga.

Tabla 3.12 Matriz de selección para la unión entre sistemas de descarga.

		Concepto						
		1		2		3		
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	
2	40%	2	0.8	4	1.6	4	1.6	
5	10%	4	0.40	3	0.30	3	0.30	
6	10%	2	0.30	4	0.40	3	0.30	
7	15%	3	0.30	4	0.60	3	0.45	
8	25%	4	1.0	0	0	4	1.0	
	Total		2.8		2.9		3.15	

La propuesta número 2 por sí sola sería una solución competitiva, sin embargo, su incorporación interfiere con el movimiento de las catarinas del sistema de motriz y con el desplazamiento de la unidad móvil. Por lo tanto, la solución seleccionada es el concepto número 3.

Las modificaciones en los dos sistemas de descarga para implementar el concepto seleccionado se muestran en la figura 3.11. En el sistema de descarga inferior se incluyeron un par de láminas de 2 [cm] de ancho en cada lado de la entrada de material figura 3.11 a), estos aditamentos son suficientes para cubrir los huecos que se forman entre las dos rampas de descarga. Por otro lado, en el sistema de descarga superior de la figura 3.11 b) también se colocó una lámina de 2 [cm] en la base de la rampa para una correcta transición y que además sirva como guía al momento de acoplar ambos sistemas de descarga.

El desplazamiento planeado para el sistema de descarga superior se logra removiendo la unión fija que tiene éste con la estructura de la unidad móvil e implementando un par de soportes a cada lado de la rampa que hacen la función de rieles al tener ranuras, estos se ensamblaron con la estructura de la máquina y su interacción con el sistema de descarga superior es por medio tornillos, lo cuales se atornillan a la rampa en las tuercas que se observan en la figura 3.11 b) y que deslizarán a través de las ranuras de los rieles de la figura 3.11 c). De esta manera esta parte del sistema de descarga tendrá una movilidad suficiente para desacoplarse de la otra parte y así poder desplazar la unidad móvil.

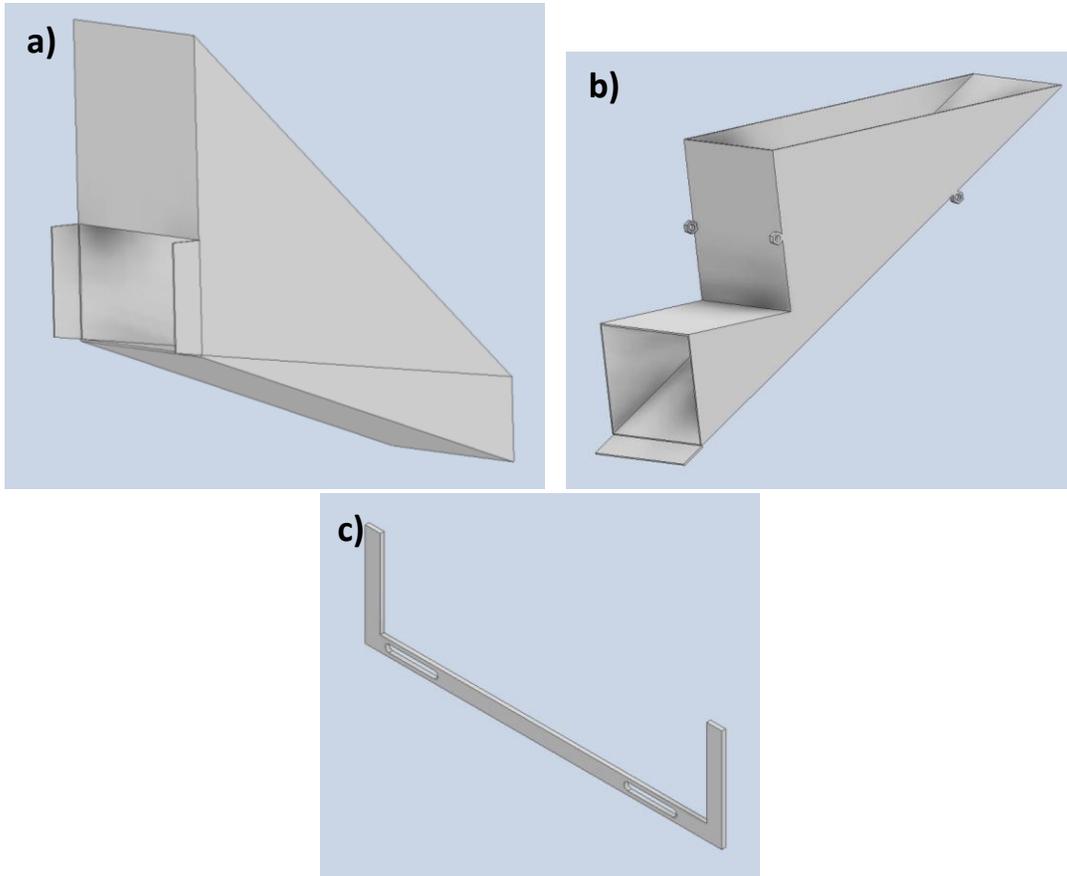


Figura 3.11 Modelos sólidos 3D para la solución de fuga de material. a) modificación del sistema de descarga inferior. b) modificación para el sistema de descarga superior. c) rieles para movilidad del sistema de descarga superior.

Las modificaciones realizadas en la unión de los sistemas de descarga se fabricaron con lámina de acero calibre 20, la misma utilizada para la fabricación original de los componentes. Los trozos de lámina se soldaron a las rampas en la configuración mostrada en la figura 3.11 a) y b), para finalmente tener el resultado mostrado en la figura 3.12 a) y b).

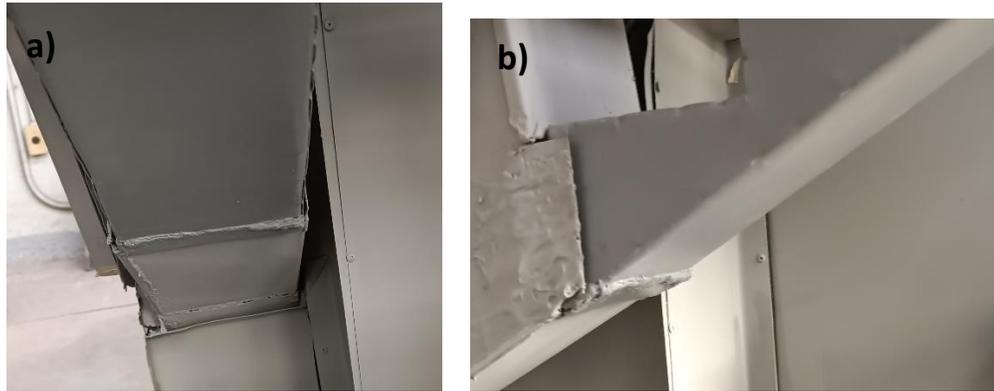


Figura 3.12 Modificaciones en la unión de rampas. a) Rampa superior. b) Rampa inferior.

Los rieles para la movilidad del sistema de descarga superior se fabricaron con solera de acero de 0.5 [in] de ancho por 0.125 [in] de grosor y con ayuda de una fresadora vertical se maquinaron las ranuras. En la figura 3.13 se muestran estas estructuras montadas debajo de la zona de corte.



Figura 3.13 Rieles montados debajo de la zona de corte.

Por último, en la figura 3.14 a) se muestra el ensamble del modelo realizado en modelado 3D con la configuración final y en la figura 3.14 b) el resultado final una vez realizadas las modificaciones.

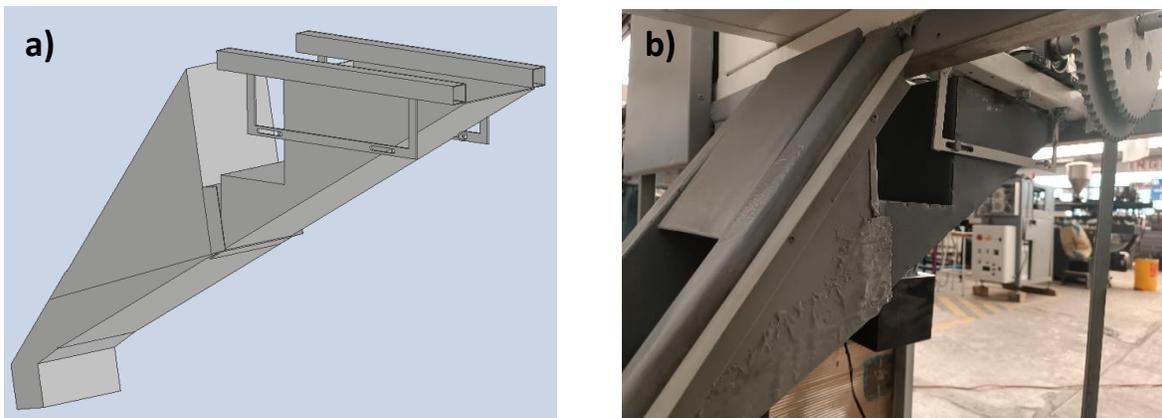


Figura 3.14 a) Ensamble del modelo sólido 3D de la solución de fuga de material. b) modificaciones realizadas en la máquina.

El requerimiento de hacer deslizar los pellets de manera continua y sin obstrucciones en la rampa del sistema de descarga inferior define el tercer subsistema. Las opciones de selección para esta modificación se ilustran y describen en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 Propuestas de concepto para el deslizamiento de material.

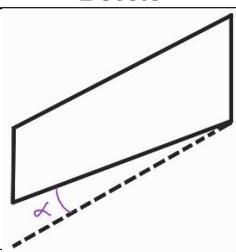
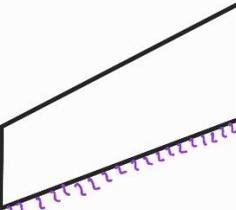
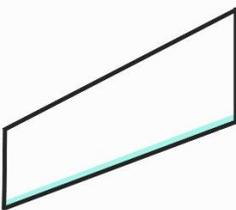
Núm.	Boceto	Descripción
1		Esta solución consiste en aumentar el ángulo de la rampa del sistema de descarga inferior para igualarlo con el que tiene la descarga superior. De esta manera se tiene una rampa continua para que los pellets no se detengan al llegar a la segunda rampa.
2		Se implementa un mecanismo de vibración en el sistema de descarga inferior para promover el movimiento de los pellets a lo largo de ella hacia la salida.
3		En esta propuesta se recubre la rampa de ambos sistemas de descarga con un recubrimiento que promueva el deslizamiento de los pellets. Este recubrimiento puede ser alguna resina, pintura o pulido.

Tabla 3.14 Matriz de selección para el deslizamiento de material.

			Concepto					
			1		2		3	
Criterio de selección	Peso		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
3	40%		3	1.2	4	1.6	2	0.8
5	10%		4	0.40	1	0.10	4	0.40
6	10%		4	0.40	2	0.20	5	0.50
7	15%		4	0.60	2	0.30	5	0.75
8	25%		4	1.0	4	1.0	4	1.0
	Total			3.6		3.2		3.45

De la matriz de selección en la tabla 3.14 se obtiene que la propuesta número 1 es la más adecuada para cumplir los requerimientos, aun así, el concepto número 3 obtuvo una calificación total parecida. Por lo tanto, se considera combinar estas dos propuestas ya que son compatibles para aplicarse al mismo tiempo y de esta se mejora la efectividad de la tarea que cumplen por separado.

La modificación del sistema de descarga inferior para este subsistema consiste en aumentar el ángulo de la rampa con respecto al plano horizontal hasta igualarlo con el de la rampa del sistema de descarga superior y de esta manera obtener una rampa continua hasta la salida para no frenar la caída de pellets. En la figura 3.15 se muestra un modelo sólido 3D que ilustra el cambio de ángulo en este componente, siendo la zona resaltada en azul el tramo de material que se tiene que agregar.

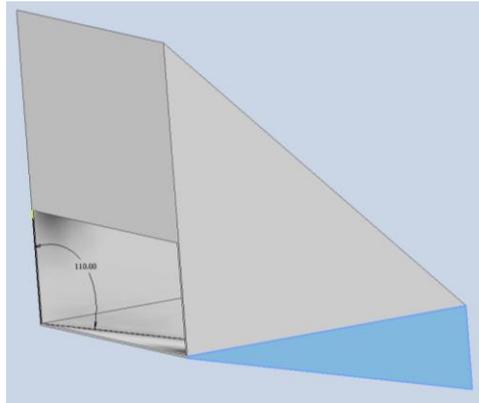


Figura 3.15 Modelo sólido 3D de cambio de ángulo en el sistema de descarga inferior.

La rampa del sistema de descarga superior tiene un ángulo de 30° con respecto al plano horizontal mientras que el del sistema superior cuenta con un ángulo de apenas 8.3° , sin embargo, al momento de montar este componente en la máquina tiene una inclinación de aproximadamente 10° , por lo que en realidad el ángulo de la rampa es de 18.3° . Lo que significa que aumento en la inclinación debe de ser de 11.7° . En la figura 3.16 se muestra un esquema del trozo de material que se debe agregar en los laterales del componente para lograr la inclinación deseada.

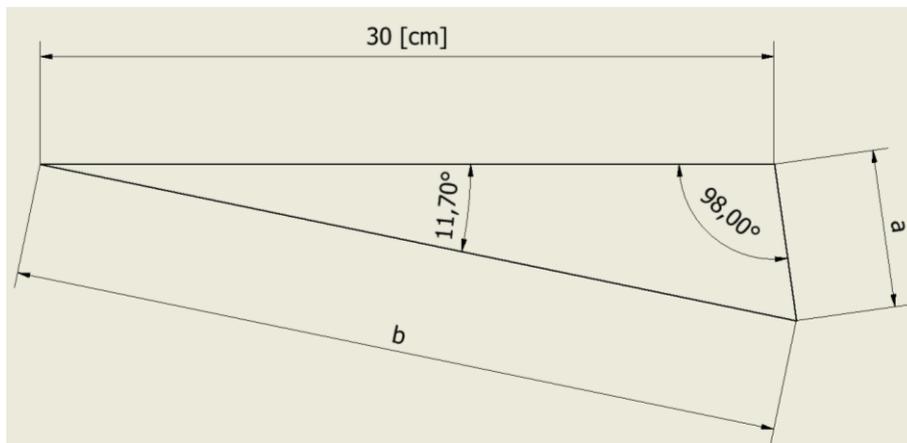


Figura 3.16 Esquema del material necesario para el cambio de ángulo.

El ángulo 98° mostrado es el necesario para que el lado más pequeño del triángulo coincida con el plano vertical. Con ello se conocen dos ángulos internos del triángulo por lo que el tercero se calculó de la siguiente manera.

$$C = 180 - (11.7 + 98)$$

$$C = 70.3^\circ$$

Con esto es posible utilizar ley de senos para calcular los lados restantes del triángulo.

$$a = \sin 11.7^\circ \left(\frac{30[cm]}{\sin 70.3^\circ} \right)$$

$$a = 6.46 [cm]$$

$$b = \sin 98^\circ \left(\frac{30[cm]}{\sin 70.3^\circ} \right)$$

$$b = 31.55 [cm]$$

Para fabricar esta modificación se tuvo que desprender la rampa del sistema de descarga inferior como se muestra en la figura 3.17 a) para luego volver a soldarla junto con la extensión de los laterales de tal manera resultando lo que se muestra en la figura 3.17 b). Por último, al aplicar una capa de pintura acrílica en la base de las rampas se obtiene una superficie con baja fricción que contribuye el deslizamiento de los pellets.



Figura 3.17 Fabricación del cambio de ángulo en la rampa inferior. a) base de la rampa desmontada. b) resultado del cambio de ángulo.

El último subsistema corresponde a la salida y almacenamiento de material, en donde se debe asegurar que los pellets se dirijan a la bolsa, costal o caja donde se debe almacenar con la menor pérdida posible. En la tabla 3.15 se muestran las cuatro propuestas de solución para este subsistema.

Tabla 3.15 Propuestas de concepto para almacenamiento de material.

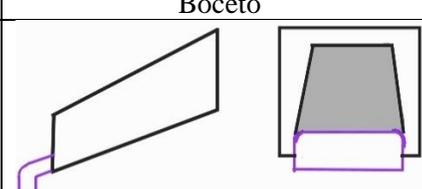
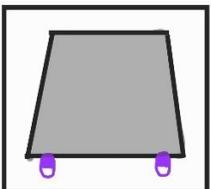
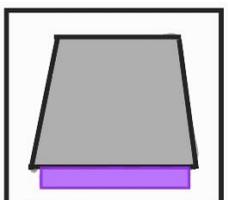
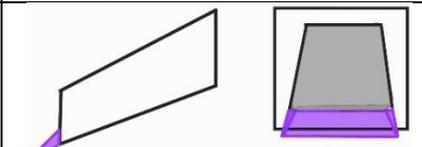
Núm.	Boceto	Descripción
1		Se añade una extensión cerrada al final de la rampa de salida que dirige los pellets verticalmente hacia abajo para caer en la bolsa, costal o caja donde se almacenarán.
2		En este caso se incluyen únicamente pinzas en la salida de material para sujetar la bolsa o costal donde se almacenará el material.
3		Similar a la propuesta anterior con la diferencia de que el sujetador es alargado y asegura el costal en un tramo más largo sin dejar huecos por donde se puede caer el material.
4		Esta propuesta supone extender la rampa de salida para que los pellets caigan hacia el centro de una bolsa, costal o caja situado debajo de esta rampa.

Tabla 3.16 Matriz de selección para el almacenamiento de material.

		Concepto							
		1		2		3		4	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada						
4	40%	4	1.6	2	0.80	2	0.80	3	1.2
5	10%	2	0.20	5	0.50	4	0.40	3	0.30
6	10%	3	0.30	3	0.30	3	0.30	3	0.30
7	15%	4	0.60	2	0.30	2	0.30	2	0.30
8	25%	4	1.0	4	1.0	4	1.0	4	1.0
	Total		3.7		2.9		2.8		3.1

De los conceptos mostrados en la tabla 3.15 el 1 y 4 son compatibles para combinarse con el 2 y 3, por lo que el objetivo de la matriz de selección en la tabla 3.16 es hacer una comparativa entre estas parejas de conceptos y así determinar cuál es la mejor combinación para asegurar un almacenamiento de material sin pérdidas. Entre las propuestas 1 y 4 la mejor calificada fue la primera por lo que este será en concepto de ampliación de la rampa a desarrollar. Por otro lado, la propuesta número 2 obtuvo una mayor calificación que la número 3, por lo tanto, es seleccionada para combinarse con el concepto número 1.

La modificación del concepto elegido para extender la rampa de salida de material se planea hacer de tal manera que forme un solo elemento con todo el sistema de descarga inferior y será una salida cerrada que guíe los pellets directamente hacia abajo pero con cierta separación de la pared de la máquina como se muestra en la figura 3.18, para ello, la extensión de la rampa debe de diseñarse de tal manera que exista una separación de 4 [cm] con el inicio de la rampa original y a partir de ahí tener una caída vertical de 6 [cm].

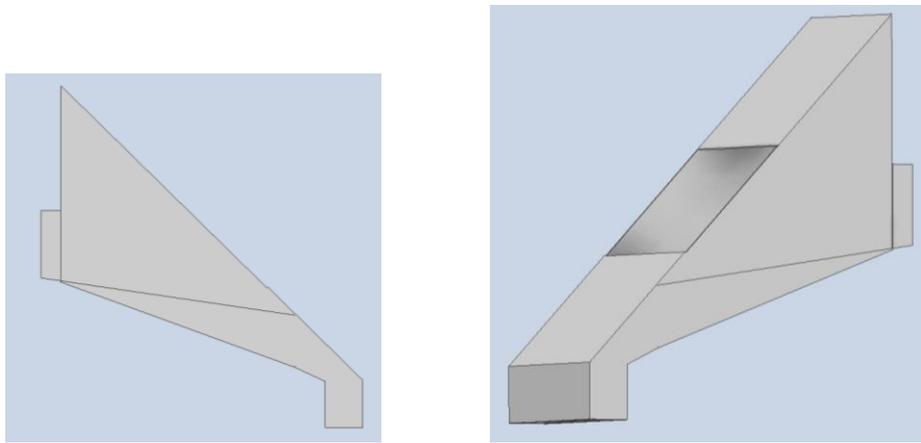


Figura 3.18 Modelo sólido 3D de extensión de la rampa de salida de material.

Además de la extensión de la rampa antes descrita, se seleccionó el concepto número 2 que consiste en colocar pinzas para sujetar la bolsa o costal que se utilice para almacenar el material. Se contemplan dos pinzas por delante figura 3.19 a) y dos por detrás de la caída vertical figura 3.19 b).

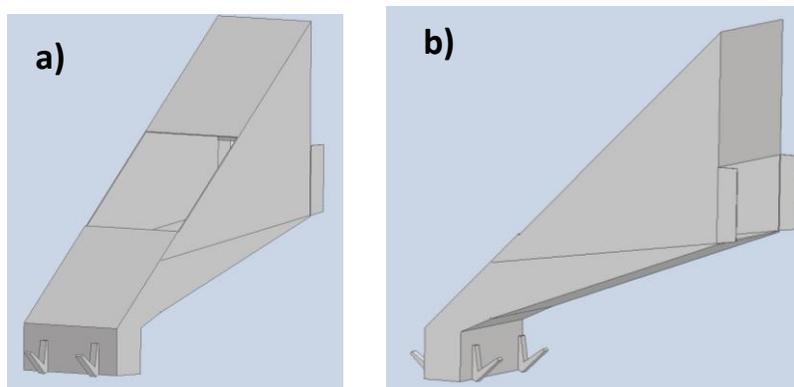


Figura 3.19 Modelo sólido 3D de sujeción en la salida de material.

Para fabricar la extensión de la rampa se utilizó lámina de acero calibre 20, la misma utilizada en la fabricación original de la máquina y utilizando técnicas de trabajo en lámina se le dio forma para fabricar este elemento. En la figura 3.20 se muestran imágenes del resultado de la extensión en la salida del sistema de descarga inferior.



Figura 3.20 Sistema de descarga inferior con salida de material modificada.

En las siguientes imágenes se muestra el modelo completo con las modificaciones propuestas (figura 3.21 a) y b)), mientras que en la figura 3.21 c) se encuentra un explosivo del sistema que muestra la manera de ensamblar todos sus componentes.

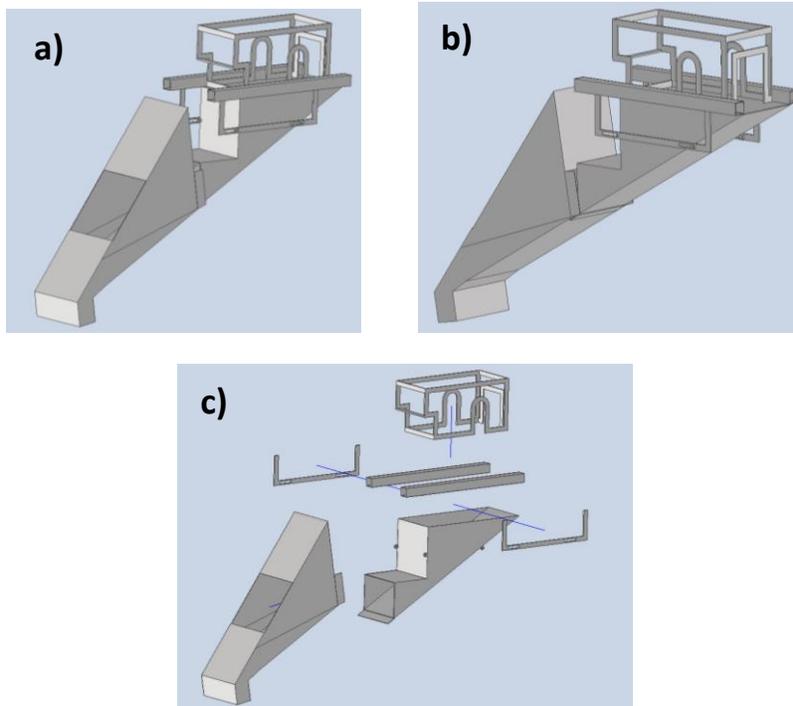


Figura 3.21 Modificaciones al sistema de recolección y descarga. a), b) sistema ensamblado. c) sistema desensamblado.

Por último, en la figura 3.22 se muestra el resultado final de todas las modificaciones realizadas al sistema de recolección y descarga.



Figura 3.22 Modificaciones al sistema de recolección y descarga. a) Sistema de recolección. b) Unión entre sistemas de descarga. c) Sistema de descarga inferior. d) Salida de material.

3.1.3 Sistema de descarga del peletizado en caliente

La descarga de material del modo de peletizado en caliente fue, desde la construcción de la máquina, uno de los sistemas más desaprovechados y con más oportunidad de mejora. En un inicio se utilizó una lámina perforada como colador en donde se descargaban los pellets junto con el agua de enfriamiento y de esta manera se retiraba el exceso de agua para luego sacar el material del colador manualmente. Posteriormente este sistema fue modificado ampliando el colador y sustituyéndolo por una malla de plástico atada en un marco metálico que tenía la característica de removerse de la máquina. Sin embargo, este método seguía requiriendo intervención por parte del operador y además limitaba la producción continua al tener que detener el proceso si se quería remover el material del colador.

El objetivo es implementar una modificación a este sistema de descarga para que trabaje de tal manera que los pellets salgan del proceso directo a un medio de almacenamiento, el cual puede ser un costal, una caja u otro recipiente. Este proceso debe funcionar sin la intervención del operador y sin la necesidad de interrumpir la producción. Además, se desea que los pellets sean almacenados con la menor cantidad de agua posible. Todo esto se debe adecuar a las características ya existentes del sistema de enfriamiento e implementarse en el espacio de 40 x 50 [cm] por encima del depósito de agua, procurando que ningún elemento del sistema sobresalga de la estructura de la máquina más allá de lo necesario para asegurar un correcto almacenamiento, tal como sucedió en la modificación del sistema de descarga inferior del modo de peletizado en frío. A continuación, en la tabla 3.17 se resumen las necesidades descritas anteriormente en forma de requerimientos de diseño.

Tabla 3.17 Requerimientos para el sistema de descarga del peletizado en caliente.

Núm.	Requerimiento	Importancia
1	Conduce el material directamente al recipiente de almacenamiento	5
2	Retira la mayor cantidad de agua posible del material	4
3	No necesita la intervención del operador durante el proceso	3
4	No interrumpe la producción para retirar el material	3
5	Se adapta al sistema de enfriamiento existente	4
6	Es sencillo de fabricar	3

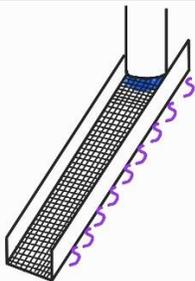
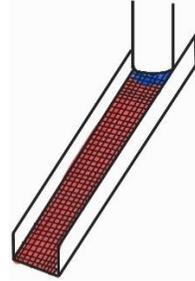
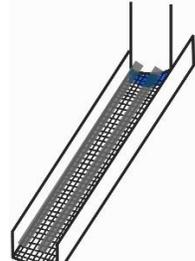
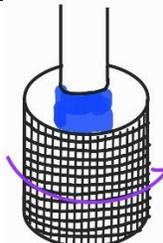
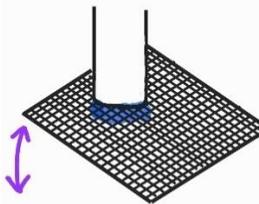
Adicionalmente se deben de tomar en cuenta las siguientes restricciones de diseño en la tabla 3.18 al momento de proponer soluciones.

Tabla 3.18 Restricciones para el sistema de descarga del peletizado en caliente.

Núm.	Restricción
1	Los componentes se fabrican con la menor cantidad de material nuevo
2	El nuevo sistema no rebasa los límites de la estructura de la máquina más allá de lo suficiente para guiar el material al exterior
3	Los pellets se solidifican correctamente en su camino hacia la salida

A partir de los requerimientos descritos y tomando en cuenta las restricciones a cumplir, se propusieron los conceptos de solución que se muestran en la tabla 3.19.

Tabla 3.19 Propuestas de concepto para el sistema de descarga del peletizado en caliente.

Núm.	Boceto	Descripción
1		<p>Esta propuesta consta de una salida inclinada cuya base está hecha de una malla metálica o plástica que filtrará el agua dejando únicamente los pellets sobre la rampa para luego deslizarse hacia el exterior. Adicionalmente se incluye un sistema de vibración con el propósito de ayudar a separar el agua de los pellets y además propiciar el deslizamiento de estos hacia la salida.</p>
2		<p>En este caso se sustituye el sistema de vibración de la propuesta número 1 por un sistema de calefacción con ayuda de resistencias eléctricas que calientan la malla y de esta manera secando los pellets en todo el recorrido.</p>
3		<p>Con una base similar a las propuestas 1 y 2, este concepto implementa sopladores de aire sobre todo el camino de salida en la rampa de malla, lo que ayuda a desprender el agua de los pellets y al mismo tiempo con la fuerza de la corriente empujándolos hacia la parte más baja de la rampa.</p>
4		<p>Este concepto supone implementar un sistema de secado centrífugo, en donde los pellets y el agua caerían en un recipiente giratorio con paredes de malla con lo cual se retira el agua del material para después almacenarlo.</p>
5		<p>Esta propuesta consiste en un colador de malla que se sitúa de manera horizontal debajo de la salida de agua. Este colador tendría un movimiento angular como lo indican las flechas moradas, esto para empujar los pellets hacia un lado de la malla, en donde se dejan secar por un tiempo antes de ser conducidos fuera del colador con el mismo movimiento angular.</p>

La selección del concepto a desarrollar se hará tomando como principal indicador una matriz de selección en la que cada propuesta se evaluará respecto a los requerimientos enumerados en la tabla 3.18. La calificación final de cada concepto se tomará en cuenta junto con otros aspectos para tomar la decisión definitiva.

Tabla 3.20 Matriz de selección para el sistema de descarga del peletizado en caliente.

		Concepto									
		1		2		3		4		5	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada								
1	25%	5	1.25	3	0.75	4	1	2	0.5	4	1
2	18%	3	0.54	4	0.72	4	0.72	3	0.54	3	0.54
3	13%	3	0.39	2	0.26	3	0.39	2	0.26	2	0.26
4	13%	4	0.52	4	0.52	4	0.52	2	0.26	4	0.52
5	18%	4	0.72	4	0.72	4	0.72	4	0.72	4	0.72
6	13%	2	0.26	2	0.26	3	0.39	2	0.26	3	0.39
	Total	3.68		3.23		3.74		2.54		3.43	

Las propuestas de solución 1 y 3 obtuvieron las mayores calificaciones en la matriz de selección siendo la última la de mayor calificación y por lo tanto la opción principal a considerar. Siendo los conceptos muy similares lo único que los distingue es la forma en que cada uno cumple los objetivos de secar los pellets y conducirlos al final. La propuesta del concepto número 1 tiene la desventaja de necesitar un mecanismo completo para el sistema de vibración, lo que implica mayor trabajo en el diseño y una fabricación más compleja y costosa, además de correrse el riesgo de que las vibraciones conduzcan también parte del agua hacia la salida, sin embargo, es la opción que asegura que los pellets se deslizarán correctamente. Por otro lado, en la propuesta número 3 la desventaja es no asegurar un correcto deslizamiento hacia la salida al no tener claro que la fuerza de la corriente de aire sea suficiente para empujar los pellets. A pesar de esto, la ventaja de este sistema de soplado es la probabilidad de retirar la mayor cantidad de agua de los pellets, además, la manufactura de este sería sencilla ya que se propone utilizar el mismo sistema de soplado que se emplea para la extrusión de películas en el laboratorio.

Considerando los resultados de la matriz de selección y los aspectos mencionados anteriormente, se decide desarrollar el concepto número 3 para implementar la descarga de material en el modo de peletizado en caliente.

El espacio disponible entre la salida de agua y pellets y el tanque de almacenamiento de agua es limitado y por ello permite como máximo una rampa de salida con una inclinación de 50° y un largo de 45 [cm] de los cuales los 10 [cm] finales se encontrarían fuera del límite de la estructura de la máquina. Este elemento sería fabricado con lámina galvanizada para evitar la corrosión al estar constantemente en contacto con agua.

Los primeros 35 centímetros de la rampa tendrían un suelo de malla para filtrar el agua de los pellets, mientras que el último tramo contaría con un piso de lámina sólida. El ancho de la rampa debe ser lo suficiente para que el tubo de salida de agua no tenga obstrucciones, el cual tienen un diámetro de 5 [cm] por lo cual se optó por un ancho de la rampa de 6 [cm] dejando un margen de medio centímetro de cada lado al tubo. La forma de la rampa de descarga de material y filtrado se muestra en la figura 3.23.

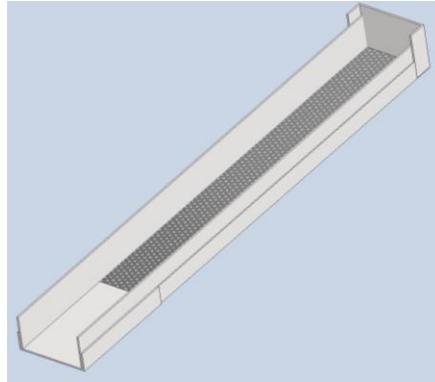


Figura 3.23 Modelo sólido 3D de la rampa de descarga del peletizado en caliente.

A la estructura principal de la rampa se le agregan soportes para colocar los dos tubos sopladores, estos constan de un par de láminas con un par de orificios como se muestra en la figura 3.24. Estos soportes se montan a la rampa con una distancia suficiente para que cubran la longitud de los tubos, pero sin obstruir la caída de agua o la salida de material.

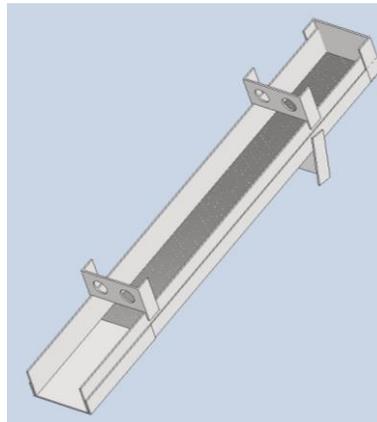


Figura 3.24 Aditamentos a la rampa de descarga del peletizado en caliente.

Por otro lado, en la misma figura 3.24 se observa que hay un aditamento colocado en la parte inferior de la rampa, esta es una lámina cuyo propósito es dirigir el flujo de agua hacia abajo, ya que al hacer pruebas con un sistema similar se observó que el flujo se adhiere a la superficie de la malla a causa de la tensión superficial del agua, lo que provocaría que los sopladores no puedan realizar su función correctamente.

La fabricación de este sistema se realizó, como se describió anteriormente, con lámina galvanizada y una malla metálica del mismo material para evitar la corrosión, de tal manera que se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 3.25.



Figura 3.25 Rampa del sistema de descargar del peletizado en caliente.

Posteriormente se montó la rampa en la estructura de la máquina sobre una base metálica incorporada sobre el tanque de almacenamiento de agua para quedar finalmente como se observa en la figura 3.26 a) y en la figura 3.26 b) se muestra el sistema completo con los sopladores montados.



Figura 3.26 a) Sistema de descarga de peletizado en caliente montado. b) Sopladores en el sistema de descarga.

3.1.4 Sistema de alimentación

En la zona de alimentación del modo de peletizado en frío existe una oportunidad de mejora, ya que el sistema utilizado en la actualidad supone ingresar los filamentos de plástico manualmente en un dispositivo parecido a una tolva que los dirige hacia la zona de corte reduciendo el área transversal por el que pasan. Este sistema, si bien es sencillo, supone inconvenientes tales como necesitar un operador adicional cuyo único trabajo es este y, además, el hecho de realizar esta operación manualmente no permite tener un ingreso de material consistente, lo que resulta en pellets cortados en diferentes medidas, estos problemas se intensifican agregado que esta operación debe realizarse con por lo menos 3 filamentos que ingresan a la máquina. Por otro lado, la tolva que se tiene actualmente presenta daños en su interior, lo que provoca que los filamentos se atasquen en su camino o se desvíen llegando a la zona de corte.

El objetivo de esta modificación es que el sistema de alimentación resultante conduzca de manera efectiva y constante al menos 3 líneas de filamento al mismo tiempo, sin la necesidad de que un operador realice el trabajo manualmente o en su defecto facilitando la tarea. Todo esto debe adaptarse para ser implementado en el área disponible dentro de la máquina que está destinado al sistema de alimentación actual. Conforme a las necesidades descritas, en la tabla 3.21 se enumeran los requerimientos para la modificación a diseñar junto con el nivel de importancia que se decidió asignar a cada uno.

Tabla 3.21 Requerimientos para el sistema de alimentación.

Núm.	Requerimiento	Importancia
1	Conduce por lo menos 3 filamentos hacia la zona de corte	3
2	No atasca los filamentos en su camino hacia la zona de corte	5
3	No necesita de un operador para la alimentación de material	3
4	Permite diferentes tamaños de filamento	2
5	Conduce los filamentos con una velocidad constante	3
6	Se adapta al espacio disponible en la zona de alimentación	4
7	Es sencillo de fabricar	3

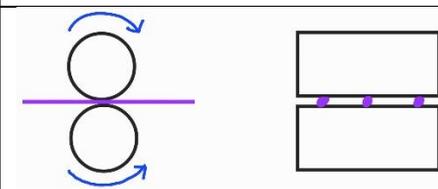
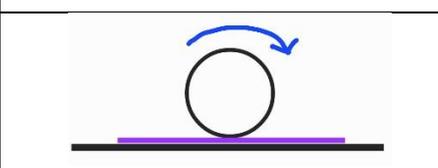
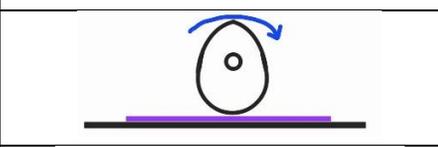
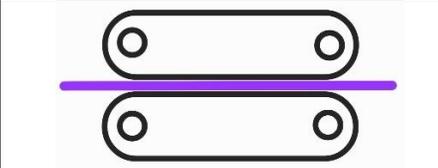
Como agregado a los requerimientos anteriores, en la tabla 3.22 se establecen restricciones a tomar en cuenta para el diseño del sistema de alimentación.

Tabla 3.22 Restricciones para el sistema de alimentación.

Núm.	Restricción
1	No interfiere con ningún otro sistema o componente del equipo
2	Los materiales de fabricación son en su mayoría reciclados
3	No deforma de ninguna manera los filamentos

A partir de los requerimientos y las restricciones descritas en las tablas 3.21 y 3.22 respectivamente, se proponen conceptos de solución que satisfagan las necesidades de la máquina. En la tabla 3.23 se muestran bocetos de los conceptos propuestos junto con una breve descripción de su principio de funcionamiento.

Tabla 3.23 Propuestas de concepto para el sistema de alimentación.

Núm.	Boceto	Descripción
1		Esta propuesta supone modificar la tolva del sistema de alimentación de tal forma que cada filamento tenga su propia entrada con una reducción al final. Esto logra que no haya obstrucciones entre filamentos y que cada uno se conduzca de manera precisa hasta un solo punto de la zona de corte. Esta modificación aprovecharía el carro de arrastre externo que se utiliza para operar la extrusora.
2		En este caso, se implementa un sistema de arrastre por medio de dos rodillos, uno de ellos impulsado para alimentar automáticamente los filamentos. Este sistema sería adaptado para que se pueda aprovechar la tolva de entrada con la que cuenta actualmente la máquina.
3		Este concepto retira el rodillo no impulsado del sistema para ahorrar recursos y facilitar la manufactura. El filamento correría sobre una placa metálica con la que ya cuenta el actual sistema de alimentación.
4		Se modifica la propuesta anterior cambiando el rodillo por una leva excéntrica, la cual arrastra el filamento en intervalos y distancias que coinciden con los cortes que se realizan más adelante.
5		Este concepto cambia los rodillos de la propuesta número 2 por bandas impulsadas, lo que permite un control del filamento en una distancia mayor y así evitar atascos.

Una vez conocidas las opciones para el concepto de solución, realizó una selección en la que influyen varios aspectos de los cuales la matriz de selección de la tabla 2.24 es el principal indicativo para tomar una decisión.

Tabla 3.24 Matriz de selección para el sistema de alimentación.

		Concepto									
		1		2		3		4		5	
Criterio de selección	Peso	Calificación	Evaluación ponderada								
1	13%	3	0.39	4	0.52	4	0.52	4	0.52	4	0.52
2	22%	3	0.66	3	0.66	2	0.44	2	0.44	3	0.66
3	13%	2	0.26	4	0.52	4	0.52	3	0.39	4	0.52
4	9%	2	0.18	4	0.36	4	0.36	4	0.36	4	0.36
5	13%	2	0.26	4	0.52	4	0.52	1	0.13	4	0.52
6	17%	4	0.68	3	0.51	3	0.51	3	0.51	2	0.34
7	13%	4	0.52	3	0.39	4	0.52	3	0.39	2	0.26
	Total		2.95		3.48		3.39		2.74		3.18

Los resultados de la matriz de selección indican que la mejor propuesta de solución se encuentra con el concepto número 2, que corresponde al sistema de dos rodillos que ingresan impulsan el filamento. En cuanto a la propuesta número 3, si bien tiene ventajas frente a la anterior como la facilidad de manufactura, corre el riesgo de tener más atascos y además el par aplicado en el rodillo debería ser mayor para contrarrestar en todo momento la fricción con la superficie plana. La propuesta número 4, además de tener las mismas desventajas del número 3, representa un problema al tener que sincronizar correctamente el avance del perfil con el giro del cortador, ya que de otra manera se obtendrían pellets de tamaño irregular. Además, el diseño y fabricación de la leva excéntrica no resulta sencillo.

En cuanto a las propuestas 1 y 5, estas incluyen de diferente manera un carro de arrastre con bandas, los cuales impulsan por más tiempo a los filamentos, pero se ha observado que en el trayecto dentro de las bandas puede haber desviaciones del filamento que resultan difíciles de controlar, y al ingresar más de uno se corre el riesgo de que choquen entre ellos y provoquen atascos.

Por lo tanto, de acuerdo con los resultados de la matriz de selección y con las observaciones hechas, el concepto seleccionado para desarrollarse es el número 2.

Una vez seleccionado el concepto a desarrollar se define la forma final del componente con un mayor detalle. En la figura 2.37 se muestra la configuración propuesta para el sistema de alimentación con rodillos.

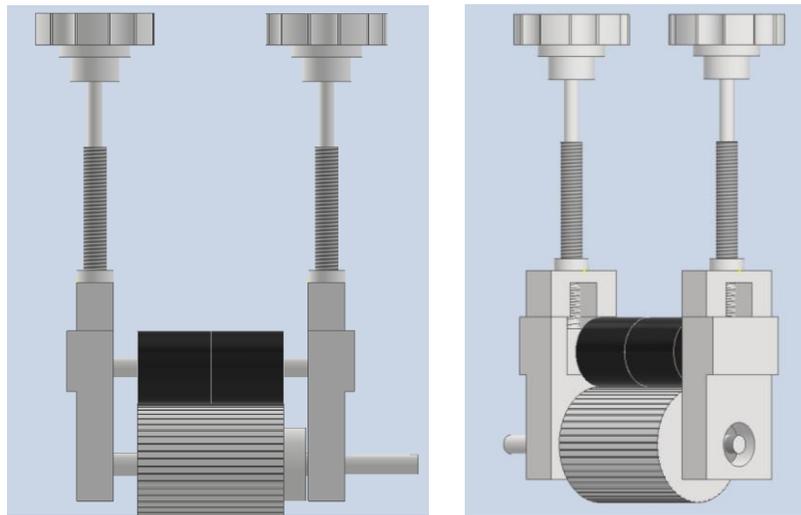


Figura 3.27 Diseño de concepto para el sistema de alimentación.

Este sistema tiene como soportes un par de placas laterales las cuales se sujetarán a la estructura de la máquina, a través de ellas pasará el eje que soporta el rodillo inferior y además será impulsado en uno de sus lados el cual sobresale de una de las placas. Este eje girará con respecto a las placas soporte con ayuda de rodamientos sujetos a presión uno en cada placa. El rodillo inferior cuenta con estrías paralelas que aumentarán la tracción de este con los filamentos y así evitar que este deslice. Además, este rodillo debe tener un tamaño específico para facilitar la igualación de velocidad con el cortador giratorio.

El rodillo superior gira libremente y su función es regular el espacio que hay entre ambos rodillos y así trabajar con diferentes tamaños de filamento. Para lograr esto se diseñó un sistema de elevación inspirado en componentes que realizan el mismo trabajo, el cual consiste en colocar una guía a cada lado del eje que sostiene el rodillo superior, que correrá en un espacio dentro de cada placa soporte para obtener una movilidad únicamente vertical. En la parte superior de las guías se ensambla un resorte y seguido de este se coloca un tornillo el cual al girar cambia su altura y por lo tanto el del rodillo. El resorte funciona como la unión entre la guía y el tornillo, pero además cumple la función de ejercer una presión del rodillo superior sobre el filamento, pero al mismo tiempo permitiendo que este pase entre los ambos rodillos sin sufrir deformaciones. Además, los resortes disminuyen un problema observado en este tipo de mecanismos que regulan la altura cada lado por separado, en el que al no nivelar correctamente el rodillo el perfil arrastrado tiende a desviarse hacia el lado con mayor separación entre los rodillos.

En la figura 3.28 se presenta un ensamble del sistema de alimentación que ayuda a comprender su construcción y funcionamiento.

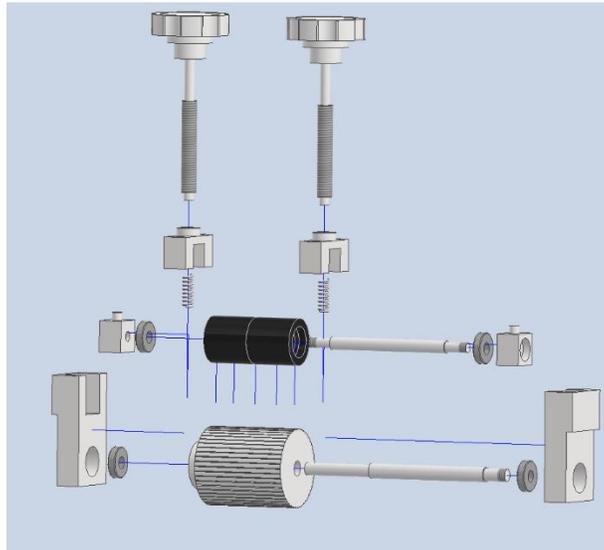


Figura 3.28 Explosivo del modelo del sistema de alimentación.

En cuanto a la forma de impulsar el rodillo inferior se propusieron dos opciones, la primera consiste en transmitir el giro del eje principal de la máquina hacia el eje del rodillo por medio de bandas y poleas y al mismo tiempo aumentar la velocidad de giro para igualar la velocidad tangencial del cortador y del rodillo. Esta opción es la más sencilla de ejecutar y se controlaría la velocidad de ambos giros al mismo tiempo. Sin embargo, al implementar esta alternativa se aplica una carga extra al motor principal y cabe la posibilidad de que este no tenga el par necesario para hacer funcionar ambos sistemas.

La otra opción consiste en utilizar un motor independiente para impulsar solamente el sistema de alimentación. Esta alternativa tiene la ventaja de permitir un control del giro del rodillo independiente con lo cual se abre la posibilidad de modificar el largo de los pellets. En este caso se calcularía el par necesario para hacer funcionar el sistema de alimentación y a partir de ello seleccionar un motor adecuado.

Con base en las ventajas y desventajas antes descritas para cada una de las propuestas, se decidió seleccionar la alternativa que consiste en utilizar un motor independiente para el sistema de alimentación.

La forma de acoplamiento entre los ejes del motor y del rodillo se hizo con engranes como se muestra en la figura 3.29.

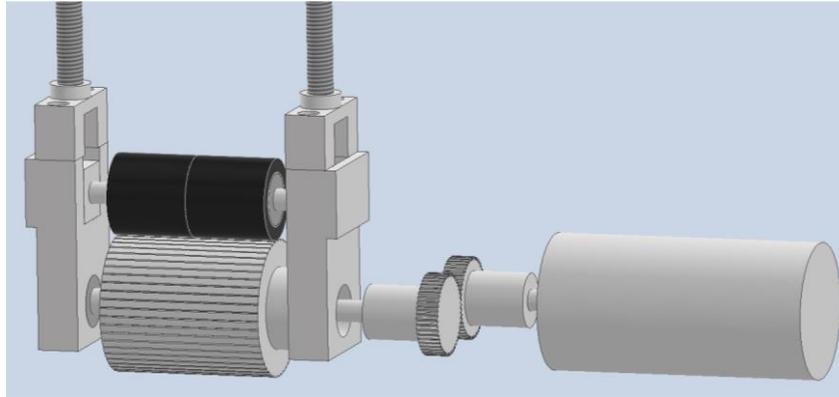


Figura 3.29 Diseño del modo de impulsión del sistema de alimentación.

El rodillo impulsor se hace girar a una velocidad del doble que el cortador, ya que su diámetro es la mitad de éste. De acuerdo con el diseño original de la máquina, el cortador en frío debe trabajar a una velocidad de 269.6 [rpm], por lo tanto, el sistema de alimentación necesita girar a 539.2 [rpm] para que las velocidades lineales de ambos sean la misma y el corte de pellet se produzca en su mayor tamaño.

El otro parámetro para seleccionar el motor es la potencia, ya que debe ser la necesaria para mover el mecanismo. Para ello primero se calculó la carga en términos de par que se debe vencer. Entre los factores que contribuyen a esta carga se encuentran dos de mayor peso, la resistencia a la rodadura entre los rodillos y su momento de inercia. En cuanto al primero de ellos se puede utilizar la siguiente ecuación para obtener el momento de rodadura [30].

$$M_p = \rho_p N$$

Siendo M_p el momento de rodadura, ρ_p el coeficiente de resistencia a la rodadura y N la fuerza normal aplicada.

ρ_p depende del radio de giro de la rueda y de un coeficiente de rodadura adimensional, tal como se muestra en la siguiente ecuación [30].

$$\rho_p = RC_{rr}$$

C_{rr} se obtiene normalmente de forma experimental, ya que depende de las superficies involucradas, sin embargo, se tomaron los datos de un estudio sobre la ciencia del ciclismo [31] en donde realizaron experimentaciones con diferentes superficies y en donde se obtuvo que, con materiales similares a los utilizados en los rodillos, C_{rr} es aproximadamente 0.005. Por lo que el coeficiente de resistencia a la rodadura utilizando el radio de los rodillos de goma es

$$\rho_p = (30[mm])(0.005)$$

$$\rho_p = 0.15[mm]$$

La fuerza normal N que se aplica a los rodillos es igual a la fuerza que producen los dos resortes del sistema de alimentación. Siendo

$$N = 2F_r$$

La fuerza de los resortes es posible calcularla por medio de la deflexión de trabajo del resorte f , el módulo de elasticidad del material en cortante G y algunas medidas del resorte como el número de espiras activas N_a , el diámetro del alambre D_w y el diámetro medio del resorte D_m . [32]

$$F_r = \frac{fGD_w^4}{8D_m^3N_a}$$

$$F_r = \frac{(10.7 \times 10^{-3} [m])(69 \times 10^9 [Pa])(1 \times 10^{-3} [m])^4}{8(7.40 \times 10^{-3} [m])^3(7)}$$

$$F_r = 32.53[N]$$

Por lo tanto, la fuerza normal y la resistencia a la rodadura quedan de la siguiente manera.

$$N = 2F_r$$

$$N = 65.06[N]$$

$$M_p = \rho_p N$$

$$M_p = (0.15 \times 10^{-3} [m])(65.06 [N])$$

$$M_p = 9.75 \times 10^{-3} [N m]$$

El momento de inercia de los rodillos se obtuvo con ayuda de los modelos 3D, a los cuales se les asignó la masa de los componentes reales. El software de modelado 3D arrojó los siguientes resultados de momentos de inercia con respecto al eje de giro seleccionado.

$$\text{Rodillo de aluminio: } 100.46 [\text{Kg mm}^2] = 100.46 \times 10^{-6} [\text{Kg m}^2]$$

$$\text{Rodillo de goma: } 4.99 [\text{Kg mm}^2] = 4.99 \times 10^{-6} [\text{Kg m}^2]$$

Para obtener la resistencia que estos momentos de inercia producen en términos de par se definió una aceleración angular en la que los rodillos pasan de 0 [rpm] a 539.2 [rpm]. En este caso se asume que el incremento de velocidad ocurre en 2 segundos.

$$539.2[\text{rpm}] = 56.46 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$\alpha = 28.23 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$$

Por lo tanto, el par necesario para acelerar los rodillos es

$$M_{ra} = I_{ra} \alpha$$

$$M_{ra} = (100.46 \times 10^{-6} [\text{Kg m}^2]) \left(28.23 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \right)$$

$$M_{rg} = 2.83 \times 10^{-3} [\text{Nm}]$$

$$M_{rg} = I_{rg} \alpha$$

$$M_{rg} = (4.99 \times 10^{-6} [\text{Kg m}^2]) \left(28.23 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \right)$$

$$M_{rg} = 0.14 \times 10^{-3} [\text{N m}]$$

Sumando M_p , M_{ra} y M_{rg}

$$M = 12.73 \times 10^{-3} [\text{N m}]$$

Finalmente, la potencia requerida del motor es

$$P = M\omega$$

$$P = (12.73 \times 10^{-3} [\text{N m}]) \left(56.46 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \right)$$

$$P = 0.71 [\text{W}]$$

Se obtuvo un motor utilizado en un proyecto anterior, el cual cuenta con una potencia de 10 [W] y una velocidad de trabajo de 1750 [rpm]. En cuanto a la potencia, ésta supera con holgura los requerimientos, sin embargo, la velocidad de giro es elevada para las 539.2 [rpm] que el rodillo debe tener para el tamaño máximo de pellets. Por lo cual, se optó por utilizar una reducción de velocidad 2:1 entre el motor y el sistema de alimentación con lo que el tamaño máximo de pellet se alcanzará a 61.6% de la velocidad máxima del motor.

Para accionar el sistema de alimentación se seleccionó una fuente de voltaje de 12 [V] con alimentación por clavija lo cual facilita su instalación. También se incluyó un variador de frecuencia PWM para tener la opción de controlar la velocidad del motor y así obtener pellets de diferente tamaño. Por último, se añadió un botón de paro de emergencia que al mismo tiempo sirve como botón de encendido para el motor. La conexión entre estos componentes se muestra en el diagrama de la figura 3.30.

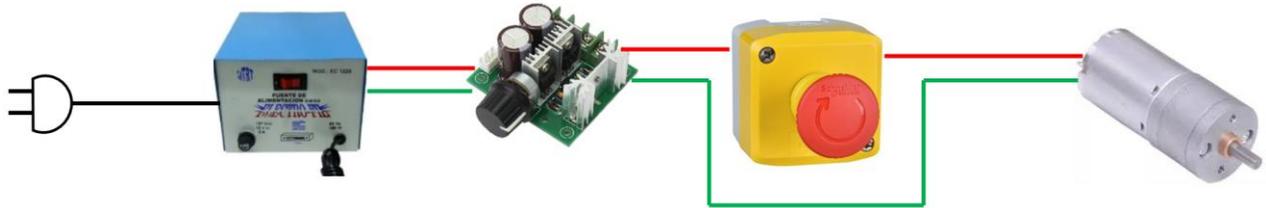


Figura 3.30 Diagrama de conexiones del sistema de alimentación.

En cuanto a la manufactura del sistema de alimentación, esta se realizó de tal manera que los materiales utilizados en su mayoría fueran reciclados. En primer lugar, las placas laterales, así como las tapas de éstas se fabricaron a partir de bloques de aluminio que eran parte de un pequeño medidor de flujo. Estas placas se maquinaron en una fresadora para obtener las formas requeridas. Las guías del eje superior también se obtuvieron del mismo material.



Figura 3.31 Fabricación de bases del sistema de alimentación.

Ambos ejes se fabricaron a partir de varillas de acero de 5/8 de pulgada, este material se tenía disponible ya que con él se fabrican diferentes componentes. Por lo tanto, el gasto realizado se contabiliza solamente con los tramos de varilla utilizados. Para darle la forma deseada a los ejes se maquinó la varilla en un torno como se aprecia en la figura 3.32.



Figura 3.32 Fabricación de ejes del sistema de alimentación.

En cuanto al rodillo inferior, este se fabricó con un bloque cilíndrico de aluminio que se encontró en material de pedacería y por lo tanto tuvo un costo reducido. El tocho de aluminio se maquinó en un torno para obtener el diámetro requerido y ahí mismo se barrenó el centro para el eje inferior. Una vez torneado se montó el rodillo en el cabezal giratorio de una fresadora para maquinar las estrías que mejorarán su tracción. Para ello se utilizó un buril con punta en 60° montado en la fresadora.



Figura 3.33 Fabricación del rodillo inferior.

Los tornillos elevadores se recuperaron de una pequeña mesa de móvil de 2 ejes que se encontró en material de desperdicio, de la que también se utilizaron un par de insertos de latón con cuerda interior y que funcionaban para mover girar los tornillos. Estos insertos mostrados en la figura 3.34 se maquinaron de tal manera que pudieran colocarse en las tapas de las placas laterales.



Figura 3.34 Insertos de latón.

El rodillo superior fue la única pieza que se adquirió nueva y consta de dos rodillos de poliuretano que incluyen rodamientos en su interior. En la figura 3.35 se muestran las piezas antes descritas en un estado previo al ensamble del sistema.



Figura 3.35 Piezas del sistema de alimentación.

En la figura 3.36 se muestra el resultado después de ensamblar los componentes.

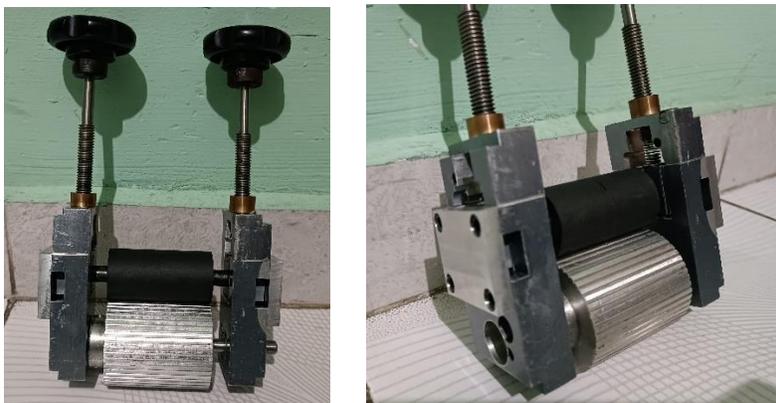


Figura 3.36 Sistema de alimentación ensamblado.

Una vez fabricado el sistema de alimentación, montó en la máquina, para ello se retiró de esta la placa metálica sobre la que estaba el anterior sistema de alimentación y se maquinó de tal manera que el rodillo inferior pudiera insertarse en ella como lo muestra la figura 3.37.



Figura 3.37 Modificación de la base del sistema de alimentación.

La tolva de entrada que era parte del anterior sistema de alimentación se modificó para acoplarse al sistema de rodillos, y así cumplir la función que ya realizaba antes de dirigir los filamentos hacia la zona de corte. Una vez montados todos los elementos, el sistema de alimentación resultó en lo que se muestra en la figura 3.38.



Figura 3.38 Sistema de alimentación montado en la máquina.

Todos los componentes de impulsión y control para el sistema de alimentación se obtuvieron de segunda mano. Tanto el motor como los engranes para hacer la reducción de velocidad hacia los rodillos eran parte de un motorreductor el cual se desarmó y cuyos engranes se adaptaron para acoplar con el sistema de alimentación como se muestra en la figura 3.39 a). También se fabricó una base para montar el motor en la máquina, la cual se muestra en la figura 3.39 b)

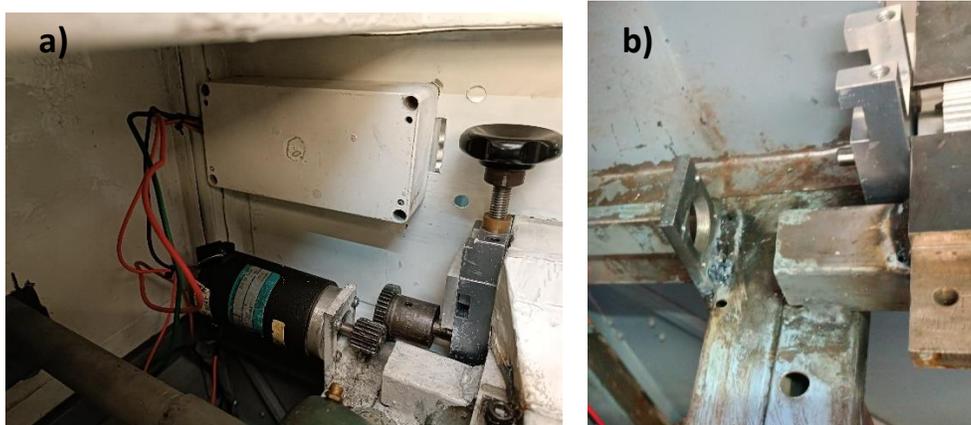


Figura 3.39 a) Motor y reducción de engranes. b) Base del motor.

Se utilizó una fuente de voltaje de 12 [v] para alimentar el motor con la potencia para suministrar el máximo par que puede entregar. Esta fuente de alimentación se montó en la parte inferior de la máquina como se muestra en la figura 3.40.



Figura 3.40 Fuente de voltaje para el sistema de alimentación.

Para controlar la velocidad del motor se utilizó el circuito variador de frecuencia de la figura 3.41 a), el cual se montó en una caja botonera junto con un botón de paro de emergencia para colocar todo a un lado de la entrada de material como se observa en la figura 3.41 b).



Figura 3.41 a) Circuito variador de frecuencia PWM. b) Botonera de control para el sistema de alimentación.

3.2 Trabajos de reacondicionamiento

3.2.1 Estructura unidad fija

Los trabajos de reacondicionamiento en la estructura de la unidad fija consistieron principalmente en recuperar la forma original de la lámina que cubre la estructura de PTR. Esto incluye reparar las abolladuras generadas con el paso del tiempo y reemplazar el rellenedor plástico que se utilizó para cubrir imperfecciones y huecos en la carcasa. También se hizo una revisión de los remaches que unen a la lámina con la estructura de PTR para detectar aquellos faltantes o que se encontraban en mal estado y poder reemplazarlos.

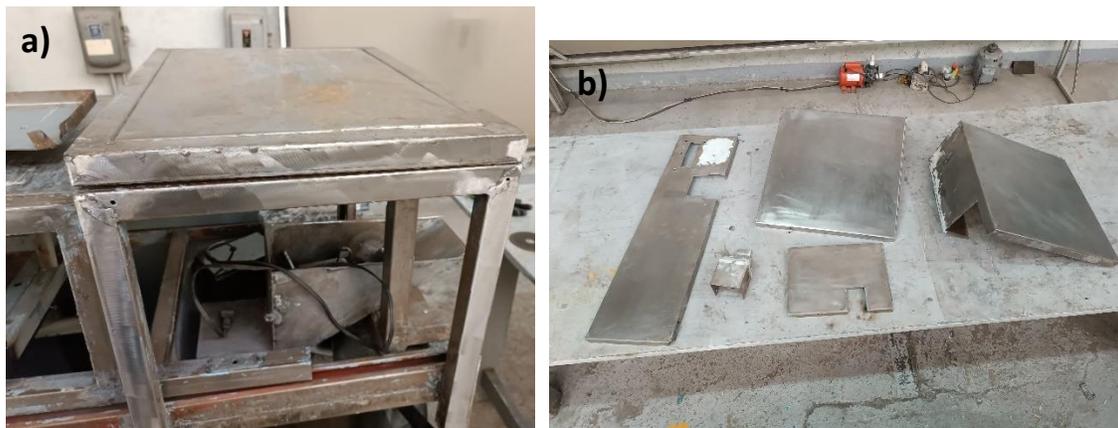


Figura 3.42 a) Estructura fija reparada y despintada. b) Piezas de lámina retiradas de la estructura fija para su reparación individual.

Las ruedas con las que la máquina se desplazaba sobre el suelo presentaban mucho desgaste y faltaba una de ellas, por lo que se reemplazaron por otras destinadas a uso rudo, lo que mejora la durabilidad.

En los trabajos de reacondicionamiento también se pueden incluir los realizados en el sistema de descarga inferior, que además de haberse realizado las modificaciones descritas en la sección 3.1.2, se repararon abolladuras y uniones entre la lámina.



Figura 3.43 Trabajos de reacondicionamiento en el sistema de descarga inferior.

La estructura se despintó completamente y se repararon las zonas que presentaban óxido, para luego repintarla aplicando primero una capa de pintura primaria para mejorar la adhesión de la pintura acrílica y proveer una mejor protección contra la corrosión.



Figura 3.44 Trabajo de pintado en la estructura fija. a) Capa de pintura primaria. b) Capa de pintura acrílica.

3.2.2 Estructura unidad móvil

En la unidad móvil se realizaron trabajos similares a los descritos para la unidad fija, lo que incluye reparar la lámina de abolladuras y resanar con rellenable plástico, así como sustituir o reponer remaches dañados o faltantes.



Figura 3.45 Piezas de la unidad móvil reparadas.

En la unidad móvil se llevaron a cabo los trabajos de modificación del sistema de alimentación que también incluyeron restauración de la zona de la entrada de material y su modificación para adaptar el nuevo sistema de alimentación. Además, se colocó una tapa de lámina para aislar los componentes de este sistema dado que se encuentran cercanos al sistema de peletizado en caliente el cual trabaja con agua que puede causar daños en el motor o los circuitos utilizados.

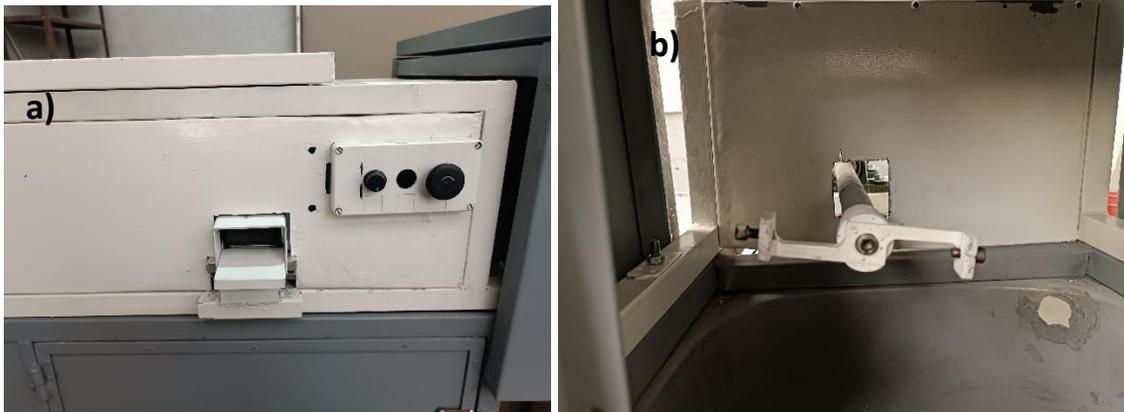


Figura 3.46 a) Modificación de la tapa frontal de la unidad móvil. b) Tapa aislante entre los dos sistemas de peletizado.

Se despintó completamente la unidad móvil para realizar todos los trabajos de reacondicionamiento para luego pintarla de nuevo con una capa de pintura primaria y un acabado final con pintura acrílica.

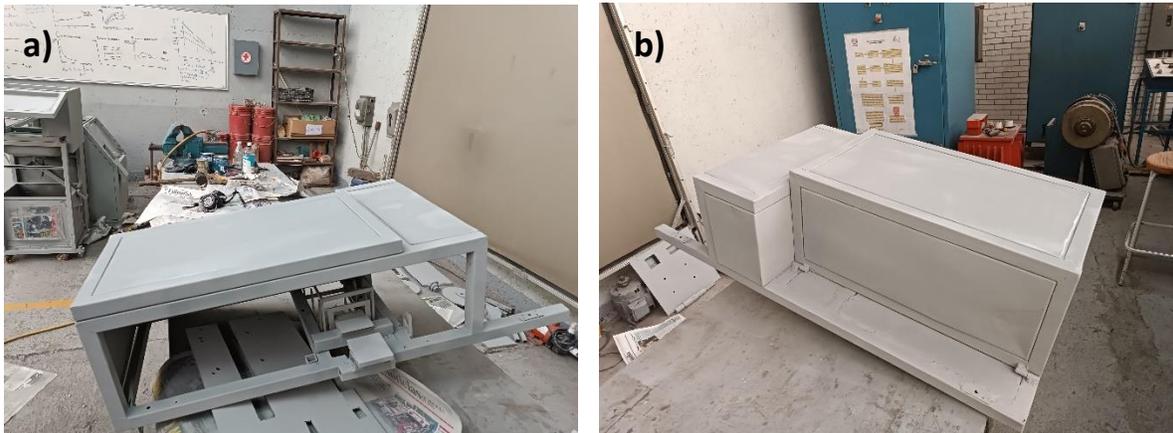


Figura 3.47 Trabajo de pintado en la estructura de la unidad móvil. a) Capa de pintura primaria. b) Capa de pintura acrílica.

3.2.3 Panel de control

El reacondicionamiento del panel de control consistió en reponer los botones, interruptores y potenciómetros que hacían falta al momento de hacer la inspección para completar todos los elementos que este sistema debe de contener, lo cuales se enumeran en la siguiente lista que se relaciona con la figura 3.48 en donde se observa una vista frontal del panel de control.

1. Interruptor principal: alimenta con energía eléctrica todos los sistemas de la máquina.
2. Interruptor de selección de corte: cambia el sentido del giro del motor para trabajar con los dos diferentes modos de peletizado.
3. Interruptor de la bomba de agua: enciende y apaga la bomba de agua del sistema de enfriamiento.
4. Interruptor del motor: enciende y apaga el motor del sistema de motriz.
5. Controlador de velocidad del motor: potenciómetro que controla la velocidad de giro del motor.
6. Paro de emergencia: botón de seguridad que obstruye o permite el paso de corriente eléctrica hacia todos los demás componentes.

El control del motor se realiza por medio de un driver situado dentro de la máquina y detrás del panel de control.

En cuanto a la placa de lámina sobre la que se ensamblan todos los elementos, el frente no presentaba grandes daños, pero igualmente se decidió repintarla y colocar nuevamente los letreros de los botones. Por otro lado, la parte trasera tenía oxido en algunas partes, el cual se eliminó con una limpieza abrasiva y se pintó toda la cara posterior únicamente con una capa de pintura primaria.



Figura 3.48 Panel de control.

Las conexiones del panel de control se restauraron tratando de mantener un orden en el cableado, además se utilizó recubrimiento termofit para asegurar la duración de cada conexión.

3.2.4 Cortadores de peletizado en frío

Los problemas de diseño y manufactura presentes en el cortador giratorio, además del daño en el mismo provocado por años de uso, requirieron que este componente volviera a ser fabricado. Primeramente, se tomaron medidas del cortador, esto debido a que no existe algún plano de este elemento en la tesis del diseño original, con estas medidas se realizó un modelo 3D para posteriormente obtener sus planos, los cuales se encuentran en el Anexo 1 al final del documento.

Se decidió realizar una modificación al diseño original del cortador, la cual consiste en aplicar un radio en la parte interior de cada diente, este cambio tiene como objetivo reducir el riesgo de fractura en esa zona durante su uso o durante el tratamiento térmico, ya que al tener un ángulo se crean concentradores de esfuerzos [28]. En la figura 3.48 a) y b) se muestran imágenes del cortador original y el modificado. Actualmente en la mayoría de los cortadores o sierras de dientes rectos se presenta este tipo de maquinado al interior del cada diente, como el ejemplo mostrado en la figura 3.50.

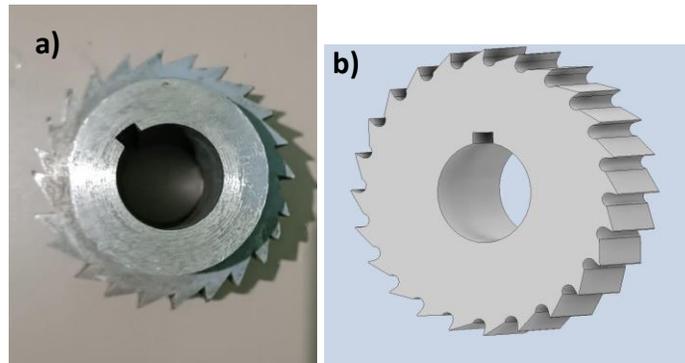


Figura 3.49 a) Cortador original. b) Modelo sólido 3D del cortador modificado.



Figura 3.50 Ejemplo de cortador con radios internos. [33]

Lo siguiente a determinar fue el material con el que se debe fabricar el cortador. El material que se utilizó para el primer cortador fue un acero al cromo 4140. Este material es utilizado principalmente para fabricar partes mecánicas de maquinaria, piezas de sacrificio, resortes y algunas herramientas [34]. En cuanto a sus propiedades, cuenta con una resistencia limitada a la corrosión, a la fatiga, al impacto y a la torsión. Esta última característica contribuye a que el acero 4140 sea comúnmente encontrado en flechas y ejes, sin embargo, su uso en la fabricación de herramientas de corte es limitado debido a la deformación que suele presentar durante el tratamiento térmico [35].

Debido a los motivos mencionados, se decidió cambiar el material del cortador a uno que se adapte mejor al trabajo que lleva a cabo. Lo más adecuado es elegir un acero del grupo de aceros herramentales o también llamados “indeformables” [34]. Se les asigna este nombre ya que los cambios volumétricos debido a los cambios de temperatura son muy bajos y reducen el riesgo de fractura durante un tratamiento térmico en piezas con geometrías complejas como lo pueden ser los cortadores.

Dentro de los aceros para herramienta existen diferentes grupos que en la norma SAE se clasifican por letras, de las cuales las que están destinadas a trabajo en frío son A, D y O. Dentro de las características que poseen estos grupos se pueden mencionar, alta tenacidad, resistencia a la abrasión, buena templeabilidad y de fácil maquinado. El grupo de aceros para herramienta de trabajo en frío que se recomienda para cortadores, especialmente que trabajen con papel, madera o plástico, es el grupo O y dentro de este el acero más comercial y el más económico es el O1[36]. Por lo tanto, el acero herramental O1 será el seleccionado para fabricar el cortador giratorio. La hoja de datos del material se encuentra en el Anexo 1.

La fabricación del cortador se inició con un tocho cilíndrico de 4 pulgadas de diámetro por 100 mm de longitud. Utilizando un torno y diferentes herramientas de corte se maquinó el material para obtener la forma de los dos diámetros exteriores y el orificio central. En la figura 3.51 se muestran diferentes etapas del maquinado en torno.



Figura 3.51 Maquinado en torno del cortador giratorio.

Posteriormente, para el maquinado de los dientes, se montó la pieza en un cabezal divisor sobre una fresadora. Para dar la forma final de los dientes se utilizaron varias etapas de maquinado, la primera consistió en cortes a 90° en las 24 posiciones en donde se ubican los dientes, luego se utilizó un cortador a 60° para obtener el ángulo adecuado en ellos y por último se utilizó un cortador con cabeza circular para maquinar el radio en el interior de cada diente.



Figura 3.52 Maquinado en fresadora del cortador giratorio.

El maquinado del cuñero al interior del cortador se realizó por medio de electroerosión, para lo cual se fabricó primero un electrodo de cobre electrolítico de forma rectangular para luego montar tanto este como el cortador en una máquina de electroerosión y formar el cuñero de una forma más precisa, rápida y sencilla comparado con otros métodos más convencionales como lo puede ser un cepillo.



Figura 3.53 Maquinado del cuñero por electroerosión.

Una vez terminado el maquinado del cortador circular se le aplicó un proceso de temple para aumentar su dureza hasta los 50 HRC. Como referencia, la dureza sin tratamiento térmico es de 23 HRC de acuerdo con el proveedor. En la figura 3.54 se muestra el estado final del cortador.



Figura 3.54 Estado final del cortador circular.

3.2.5 Cortador del peletizado en caliente

El cortador del peletizado en caliente fue fabricado originalmente con lámina calibre 20 (0.91 [mm]), por lo cual con el paso del tiempo perdió todo su filo y se deformó la estructura para ensamblarlo al eje principal. Debido a estos problemas que dificultan la restauración de este componente se decidió fabricar un cortador nuevo, el cual hizo a partir de una lámina de mayor espesor que la original, siendo de 2 mm el nuevo espesor. Sobre la nueva lámina se hicieron trabajos de doblado y soldadura para crear la forma del cortador. Por último, se afiló manualmente.

Se espera que el nuevo cortador tenga una mayor duración que el original y que el trabajo de afilado en un futuro se pueda realizar fácilmente varias veces hasta que se consuman las cuchillas. En la figura 3.55 a) se muestra una imagen del nuevo cortador ya afilado y con la estructura que le permite ensamblarse en el eje principal, mientras que en la figura 3.55 b) se encuentra el cortador montado en su posición de trabajo en la máquina.



Figura 3.55 a) Cortador del peletizado el caliente refabricado. b) Cortador del peletizado en caliente montado.

3.2.6 Base del sistema motriz

Los trabajos de reacondicionamiento en la base flotante que sostiene tanto el motor como el eje secundario se centraron en reparar las uniones dañadas y rotas de la estructura, y con esto restaurar la solidez y resistencia. Además, se repintaron con pintura primaria para prevenir la corrosión.

Durante la fase de inspección se detectó que los orificios en donde se monta el motor no eran del mismo tamaño ni estaban posicionados de forma simétrica, aspectos que dificultaban el correcto posicionamiento de este elemento, además de no permitir tensar la cadena de transmisión. Para solucionar esto se ampliaron todas las ranuras de tal manera que quedaran del mismo tamaño y que coincidieran con el motor. En la figura 3.56 se muestra el estado final de estos orificios.



Figura 3.56 Orificios para montar el motor modificados.

En el diseño original se muestra que la base contaba con cuatro soportes para sostenerse de la unidad móvil, de los cuales se encontraron únicamente dos, además, en uno de los lados de la base se tienen unas carretillas que se mueven a lo largo de una canaleta, la cual tiene la resistencia necesaria para sostener dicho lado de la base. Por lo que se decidió conservar los dos soportes de un lado y del otro apoyar la base en la canaleta, como se muestra en la figura 3.57.



Figura 3.57 Base del sistema motriz montado.

Los soportes de la base tendrían que soldarse a la estructura de la unidad móvil, pero esto causaría dificultades en el ensamblado al tener que montar los elementos del sistema motriz que sostiene la base en el espacio reducido dentro de la máquina, o de otra manera montarlos fuera de ella y luego introducir desde arriba toda unidad móvil incluyendo la base, lo que supone cargar un gran peso a una altura de más de un metro sobre el suelo. Por lo tanto, se decidió no restaurar la unión permanente entre la base y la unidad móvil y en su lugar implementar uniones temporales con las cuales fuera posible ensamblar y desensamblar las dos estructuras.

Para lograr esto se recurrió a montar la base a la unidad móvil con ayuda de tornillos, lo cuales se sujetan a un par de estructuras soldadas en la estructura de la unidad móvil, las cuales se observan en la figura 3.58 encerrados en círculos rojos. De esta manera, una vez montados los elementos del sistema motriz en la base, esta se puede introducir a la máquina fácilmente y luego ensamblarla a la unidad móvil.



Figura 3.58 Nuevas uniones de la base del sistema motriz.

3.2.7 Sistema motriz

En el sistema motriz los trabajos de reacondicionamiento se redujeron en la mayoría de los componentes a limpieza, repintado y lubricado. Tal fue el caso de los elementos que se ensamblan tanto el eje principal como en el secundario, lo que comprende tres juegos de catarinas y dos chumaceras en cada eje. Tanto las catarinas como los juegos de catarinas se despintaron y limpiaron de óxido para luego repintarse únicamente con pintura primaria para proteger de la corrosión. En la figura 3.59 a) se muestran estos elementos despintados mientras que en la figura 3.59 b) ya se encuentran repintados. Para montar los juegos de catarinas a los ejes se repusieron seguros tipo pasador que no se hallaron durante la fase de inspección.



Figura 3.59 Elementos del sistema motriz repintados.

En cuanto a las chumaceras para ambos ejes, se limpiaron de polvo y otras partículas y se lubricaron los rodamientos con grasa. Las cadenas del sistema motriz no estaban armadas, por lo que se repusieron los eslabones candado faltantes para obtener tres cadenas con las longitudes necesarias para transmitir la potencia del motor al eje secundario y de este al eje principal según sea el caso si se trabaja con el modo de peletizado en caliente o en frío, ya que se utiliza una relación de velocidades diferentes para cada una.

Por último, el motor funcionaba correctamente por lo que únicamente se ensambló el piñón que debe tener en su eje, para lo cual se fabricó una cuña y se repuso un seguro tipo pasador. En la figura 3.60 se muestra el resultado final del sistema motriz reacondicionado.



Figura 3.60 Resultado final del sistema motriz.

4 Puesta en marcha de la máquina y evaluación

La puesta en marcha de la máquina corresponde a la fase de *test* o pruebas del proceso de remanufactura, en la cual el objetivo es comprobar la funcionalidad del equipo comparado con sus características y prestaciones originales, para lo cual se realizan las mismas pruebas hechas en su fabricación [8]. Sin embargo, en la tesis de diseño original de la máquina peletizadora la descripción de estas pruebas es escasa y los resultados descritos se reducen a que ambos procesos de peletizado son funcionales y destacan algunas diferencias de trabajar con materiales más rígidos que otros [25].

Por esta razón se decidió diseñar nuevas pruebas que sirvan para comprobar la funcionalidad y detectar errores de la máquina peletizadora, así como de las modificaciones realizadas durante el proceso de remanufactura.

Para ambos procesos de peletizado se decidió comprobar el comportamiento con dos materiales, uno de ellos un polímero amorfo y el otro semi-cristalino, la diferencia principal entre estos dos tipos de polímeros es la rigidez y fragilidad que cada uno de ellos obtiene al solidificarse, además de sus propiedades reológicas en estado líquido [37]. De acuerdo con la disponibilidad de materiales en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos se optó por elegir al polietileno como polímero amorfo y bajo índice de fluidez mientras que al PLA como polímero semi-cristalino con alto índice de fluidez. La hoja de datos de los materiales se encuentra en los Anexos 2 y 3 al final del documento. El objetivo será observar diferencias notables en los procesos de peletizado al trabajar con estos dos polímeros tal como se registró en la tesis del diseño original.

Por último, cabe mencionar que se utilizaron diferentes dados para cada modo de peletizado. Para el peletizado en caliente se utilizó el dado que fue diseñado para este propósito en la fabricación de la máquina, este es un de perfil circular de tres salidas. Mientras que para el peletizado en frío se optó por utilizar un dado de una sola salida debido a la dificultad encontrada para producir filamentos con el de tres salidas.

4.1 Modo de peletizado en frío

Cada modo de peletizado de la máquina requiere una preparación previa diferente y un arreglo de la línea de producción particular. En el caso del peletizado en frío es posible utilizarlo de dos maneras, en la primera de ellas se necesitan en total cuatro equipos alineados para producir finalmente los pellets, ya que este proceso requiere que se produzca un filamento continuo el cual se introduzca en la peletizadora.

La configuración de la línea de producción se muestra en la figura 4.1 e inicia con una extrusora la cual transforma el material reciclado molido en un perfil continuo de sección transversal circular el cual inmediatamente pasa por una tina de enfriamiento que solidifica y enfría el polímero para luego ser conducido a través de una unidad de tiro que arrastra el filamento a una velocidad controlada y finalmente lo conduce hacia la zona de alimentación de la peletizadora para ser cortado y obtener como producto final los pellets.



Figura 4.1 Línea de producción de peletizado en frío.

La otra manera de utilizar el modo de peletizado en frío es primero realizar el proceso de extrusión de filamento de manera individual, esto con los primeros tres equipos mencionados en el procedimiento anterior, para luego almacenarlo y posteriormente peletizarlo.

Debido a la posibilidad de variar la velocidad tanto del cortador como del sistema de alimentación, es posible obtener diferentes tamaños de pellets dependiendo de dichos parámetros. Sin embargo, al probar la variación de velocidad del motor del cortador se observó que el potenciómetro es muy sensible, tanto que dificulta enormemente trabajar con una velocidad diferente a la máxima que permite el motor. Por lo que se decidió realizar experimentos con la velocidad de alimentación como única variable.

Se optó por trabajar con seis velocidades de alimentación, siendo estas a 30%, 40% 50%, 60%, 75% y 100% de la máxima, recordando que estos porcentajes son aproximados ya que no se cuenta con un indicador certero de la velocidad, siendo la única referencia el recorrido del potenciómetro del variador de frecuencia. La razón por la que se tomó el 30% como velocidad mínima es porque durante la puesta en marcha se observó que esta es la velocidad necesaria aproximada en la que el sistema de alimentación arrastra el filamento de forma continua sin complicaciones. Por otro lado, el cortador se trabajó al 100% de su velocidad en todo momento.

Tabla 4.1 Variación del tamaño de pellets.

Velocidad relativa	Tamaño de pellet [mm]
30%	4.25
40%	6.94
50%	8.58
60%	8.83
75%	9.66
100%	8.72

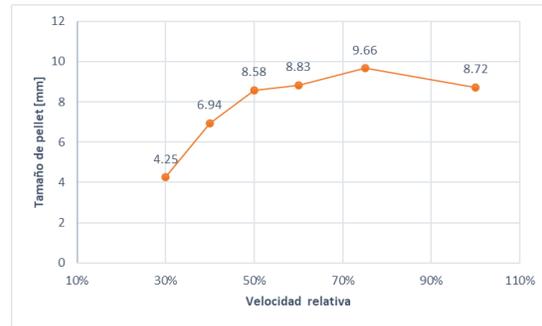


Figura 4.2 Variación del tamaño de pellets.

Para cada velocidad de alimentación propuesta se tomó la medida del largo de 50 muestras, con lo cual se calculó un tamaño promedio de pellet que se obtiene con dichas condiciones. En la tabla 4.1 y figura 4.2 se muestran los resultados de las mediciones.

Además de la diferencia de tamaño del pellet entre cada velocidad de alimentación se observaron otras peculiaridades en algunas de las pruebas. Empezando con la velocidad relativa de 30%, cuya muestra de pellets recuperada se muestra en la figura 4.3 a). Dependiendo del grosor del filamento, en ocasiones se detienen o ralentizan los rodillos, por esta razón en la figura 4.3 b) se aprecia que hay algunos pellets más chicos que el resto. A una velocidad relativa de 40% este efecto se disminuye considerablemente y los pellets aumentan de tamaño.



Figura 4.3 a) Muestra de pellets con velocidad relativa de 30%. b) Muestra de pellets con velocidad relativa de 40%

Con respecto a las muestras obtenidas al utilizar velocidad relativa de 50%, es notable el aumento de tamaño en los pellets mostrados en la figura 4.4 a) con respecto a la anterior como era de esperarse. Una particularidad de trabajar en este rango de velocidad es que se obtuvo la menor variación en la longitud de los pellets, además de obtener una medida cercana a la máxima determinada por el cortador. Si la velocidad se incrementa a 60% no hay una diferencia notable respecto a la anterior, pero según las mediciones, el tamaño de pellet incrementó aproximadamente 1 [mm].



Figura 4.4 a) Muestra de pellets con velocidad relativa de 50%. b) Muestra de pellets con velocidad relativa de 60%.

Al utilizar una velocidad relativa del 75% se obtuvieron las muestras mostradas en la figura 4.5, en éstas se observa un ligero aumento de tamaño con respecto a la velocidad anterior en la mayoría de los pellets obtenidos, sin embargo, lo más notable es la aparición de “largos”, defectos mencionados en la sección 1, llegando algunos a medir cerca de los 3 [cm]. Lo anterior podría deberse a que la velocidad lineal de los rodillos de alimentación supera a la del cortador y por lo tanto el filamento impacta el fondo de los dientes del cortador doblándose antes de ser cortado. Estos pellets podrían provocar obstrucciones e irregularidades al momento de alimentar una máquina con ellos, por lo tanto, es preferible evitarlos y debido a la cantidad en la que aparecen es inviable segregarlos de los que si tienen un tamaño adecuado. Por esta razón se aconseja no trabajar en este rango de velocidades de alimentación o superiores.



Figura 4.5 Muestra de pellets con velocidad relativa de 75%.

Por último, al trabajar a la máxima velocidad de alimentación se obtuvieron los pellets mostrados en la figura 4.6. En este caso se obtuvieron pellets con tamaño muy similar al máximo posible, pero se mantuvo la problemática mencionada al trabajar a una velocidad de 75%, agregando la aparición de defectos llamados cremalleras. Estos defectos son tramos de filamento cortados de forma parcial dejando una fina capa de plástico uniendo varios pellets.



Figura 4.6 Muestra de pellets con velocidad relativa de 100%.

De acuerdo con los resultados analizados se puede decir que el rango de velocidades en el que se recomienda trabajar es entre 30% y 60% para un correcto funcionamiento del peletizado evitando defectos importantes. Dentro de este rango es posible variar el tamaño del pellet en un rango de 4.25 [mm] a 8.83 [mm] en promedio. Sin embargo, se encontró que es posible obtener un tamaño de pellets más pequeño restringiendo manualmente el avance del filamento al mismo tiempo que los rodillos del sistema de alimentación lo impulsan. Utilizando esta técnica se obtuvieron las muestras de la figura 4.7, en donde se aprecian pellets de hasta aproximadamente 2 [mm] de largo, que, si bien es un tamaño reducido, no están claras las ventajas de utilizar dicha longitud, agregando que, al depender el proceso de la habilidad manual, la variación de tamaño de pellet es significativa.



Figura 4.7 Muestra de pellets con velocidad relativa restringida.

Si bien las pruebas que involucraron la variación de la velocidad de alimentación se hicieron únicamente con polietileno por ser el material más sencillo de extruir, también se trabajó con PLA, un polímero semi cristalino, para comparar entre ambos tipos de material. Las muestras obtenidas se observan en la figura 4.8.



Figura 4.8 Muestra de pellets de PLA.

La diferencia más significativa encontrada entre los dos polímeros es la facilidad de corte, ya que el PLA es un material frágil, lo que favorece este tipo de corte. Por otro lado, como se observa en la figura 4.8, la variación de tamaño de pellet es menor para este material.

Dentro del proceso hay algunas observaciones generales a mencionar. Primeramente, se observó la aparición de polvos, también llamados *finos*, como consecuencia del corte de filamento, los cuales se encontraron al momento de recolectar los pellets, pero también se hallaron polvos adheridos a uno de los rodillos del sistema de alimentación, aunque la cantidad encontrada no representa un inconveniente para el producto peletizado y la aparición de estos polvos es prácticamente inevitable en el proceso.



Figura 4.9 Finos o polvos en el sistema de alimentación.

Otro defecto fue detectado al peletizar con la línea de producción completa, consiste en que el filamento no logra enfriarse adecuadamente al pasar por la tina de agua, por lo que al llegar la peletizadora no tiene la rigidez suficiente para ser cortado, lo que provoca que la máquina únicamente lo estire en intervalos. Se logró evitar el problema dejando enfriar el filamento al menos 30 segundos luego de salir de la unidad de tiro para que logre solidificarse completamente. Este comportamiento se detectó con ambos materiales, aunque es más notable en el polietileno.

Dentro de las consideraciones a tomar en cuenta para un proceso adecuado de peletizado hay que mencionar que al utilizar filamento previamente extruido se debe evitar introducir en la parte final de éste, ya que existe una zona entre los rodillos de alimentación y el punto de corte que se llama *distancia de empuje* en la cual al pasar la última parte del filamento ya no es posible seguir conduciéndolo hasta el punto

de corte, por lo cual ese último tramo queda atascado dentro de la tolva. Los trozos de filamento mostrados en la figura 4.10 son aquellos sobrantes que no deben ser introducidos a la máquina al acabarse cada tramo.



Figura 4.10 Tramos sobrantes de filamento.

Un aspecto que hay que considerar para futuros trabajos sobre la máquina es la cantidad excesiva de vibraciones durante el proceso de peletizado en frío, en especial al trabajar con el material amorfo. Se observó que estas vibraciones son causadas en parte por el sistema de cadenas y catarinas de la transmisión, ya que las alineaciones no son adecuadas y las estructuras sobre las cuales se montan no tienen la rigidez necesaria para absorber estas vibraciones. Además, el cortador al ser de dientes rectos genera impacto al momento de cortar lo que aumenta este efecto.

Por último, se debe mencionar que las modificaciones hechas al sistema de recolección y descarga del peletizado en frío cumplieron su objetivo al no detectar pérdidas de material tanto en la zona de corte como en ambas rampas de salida, en las cuales, además, no se observaron detenciones de pellets en el recorrido hacia la salida, por lo que queda demostrado que el aumento del ángulo en la segunda rampa también dio los resultados esperados.

4.2 Modo de peletizado en caliente

El modo de peletizado en caliente únicamente utiliza para su funcionamiento a la máquina extrusora y a la misma peletizadora en una única configuración de línea de producción. La forma en la que quedan acoplados los dos equipos se muestra en la figura 4.11 a). El procedimiento para el acople se hace elevando la peletizadora hasta un punto cercano al dado de la extrusora y con ayuda de la placa blanca deslizante visible en la figura 4.11 b) se finaliza la operación introduciendo la parte final del dado en el orificio de ésta.



Figura 4.11 a) Línea de producción peletizado en caliente. b) Peletizadora acoplada con extrusora

Una vez acoplados los equipos se prepara la peletizadora para iniciar el proceso. Se comienza acercando el cortador hacia el dado de la extrusora con ayuda de la unidad móvil, dicho cortador debe de tocar ligeramente la placa blanca como se muestra en la figura 4.11 b). Una vez hecho esto se puede comenzar a extruir el material y cuando se tenga un flujo constante y una viscosidad adecuada de la masa fundida se enciende el sistema de refrigeración y se hace girar el cortador para iniciar proceso de peletizado.

Con el fin de comprobar la obtención de diferentes tamaños de pellets se diseñó un experimento que consiste en modificar la velocidad de extrusión del material, manteniendo constante la velocidad de giro del cortador de la peletizadora, con lo cual se esperaría que con un incremento en el primer parámetro aumente de igual manera la longitud de los pellets resultantes.

La máquina extrusora tiene como único indicador de velocidad la medición de frecuencia que muestra el controlador del motor, por lo que se optó por utilizar directamente esta frecuencia como variable. Debido a las limitaciones de la máquina y a la dificultad de controlar la velocidad del motor con precisión a velocidades elevadas, se determinó que el rango de trabajo sería de 10 [Hz] a 30 [Hz], mientras que los intervalos serían de 5 [Hz]. Las frecuencias de trabajo se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores para los experimentos de corte en caliente

Velocidad del cortador	Frecuencia en la extrusora [Hz]
100% 131 [rpm]	10
	15
	20
	25
	30

Durante las pruebas de funcionalidad previas a realizar el experimento descrito anteriormente surgieron inconvenientes con la máquina extrusora los cuales impidieron realizar el proceso de peletizado adecuadamente, lo que imposibilitó llevar a cabo dichos experimentos modificando la velocidad de extrusión.

Los fallos en la extrusora derivan a causa del desgaste en el enroscado interno de una pieza de la máquina a la que se montan los diferentes dados, lo cual provoca un sello deficiente entre estas piezas y por lo tanto una fuga de material en la unión de ellas, al mismo tiempo que se detiene la extrusión de plástico en la salida del dado, resultando lo mostrado en la figura 4.12.



Figura 4.12 Fuga de material en la extrusora.

Esta fuga de material se presentó únicamente en el modo de pelletizado en caliente debido a las condiciones de alta viscosidad requeridas en la salida del dado. Dichas condiciones son necesarias en el proceso ya que se pretende trabajar en un punto cercano a la temperatura de fusión del polímero para que éste solidifique rápidamente. De lo contrario sucede alguno de los casos mostrados en la figura 4.13, en la cual en la imagen a) el plástico se queda adherido a la placa blanca, mientras que en la imagen b) el material es arrastrado por el cortador sin poder caer en la tina de enfriamiento.



Figura 4.13 Defectos en el pelletizado en caliente.

Por lo tanto, las pruebas de funcionalidad no se concluyeron por lo que no es posible realizar un análisis completo del proceso. A pesar de esto se recolectaron algunas muestras de pellets que se generaron antes de presentarse los inconvenientes en la extrusora, estos se observan en la figura 4.14. Es notable la diferencia en la forma de estos pellets en comparación a los obtenidos en frío, donde se observan bordes más redondeados formando pellets más parecidos a una esfera aplanada que a un cilindro.



Figura 4.14 Muestras rescatadas del peletizado en caliente.

A pesar de no haber completado las pruebas en el modo de peletizado en caliente, se anotaron observaciones importantes acerca del funcionamiento de los componentes reacondicionados o modificados. La primera de ellas es acerca del sistema de descarga de material, el cual fue modificado como se muestra en la sección 3.1.3. Se observó una mejora considerable en la continuidad y automatización del proceso con respecto al sistema anterior, los pellets caen directamente a un recipiente sin la necesidad de recolectarlos manualmente, sin embargo, a pesar de que la mayoría del agua de enfriamiento se separa en el proceso, los pellets se descargan aún con una reducida porción de agua, por lo que es necesario un proceso posterior de secado.

Respecto al cortador, el cual fue refabricado, su forma podría afectar al corte de los pellets al obstruir la caída de estos hacia la tina de enfriamiento lo que sería una causa del defecto mostrado en la figura 4.13 b), por lo que se recomienda un rediseño de dicho cortador. Además, el material con el que fue fabricado no es anti oxidable, por lo que una capa de pintura primaria es solo una solución temporal.

En cuanto al sistema de enfriamiento, se observó que la generación del spray de agua es deficiente al ser los orificios en la tubería demasiado grandes, lo que genera un único flujo en lugar de una cortina de pequeñas gotas. La gran cantidad de agua que cae sobre la salida de material enfría en exceso la porción final del dado de extrusión lo que contribuye a la problemática de fuga de material en éste.

Por último, se considera que el proceso de acople entre la peletizadora y la extrusora se facilitó a gracias a las modificaciones que se realizaron tanto en la placa acopladora como en el sistema de variación de altura de la máquina. Aun así, sigue siendo tardado y hasta cierto punto peligroso, siendo necesaria la manipulación manual cerca del cabezal de la extrusora.

4.3 Evaluación en torno a la economía circular

Con el objetivo de comprobar la efectividad obtenida gracias al uso de la remanufactura en el caso específico de esta máquina peletizadora, se realizó una evaluación del proceso en términos de ahorro de recursos, inconvenientes particulares hallados y comparación con respecto a otros procesos de recuperación dentro de la economía circular. Además, se mencionarán algunas observaciones y recomendaciones generales a considerar cuando se trabaja basándose en la remanufactura.

Primeramente, se debe recordar que la remanufactura es un proceso de recuperación dentro del modelo de economía circular, lo cual pretende evitar desechar un equipo que ha llegado al final de su vida útil y manufacturar uno nuevo que lo sustituya. Siendo la remanufactura el primer proceso en la lista de sustentabilidad y manufacturar un nuevo producto el último lugar, se realizó una comparación entre las dos opciones en cuestión de precios con el objetivo de comprobar la diferencia entre ambos.

En la tabla 4.3 se muestra un resumen del presupuesto aproximado que costaría manufacturar una máquina peletizadora nueva. Los precios fueron obtenidos a partir de páginas web de proveedores, cotizaciones y en algunos casos se tomaron los costos obtenidos durante el proceso de reacondicionamiento.

Tabla 4.3 Presupuesto para una máquina peletizadora nueva.

Elementos	Precios aproximados
Estructura de la máquina	\$5,143.26
Panel de control	\$469.96
Soportes reguladores	\$228.82
Acoplamiento con la extrusora	\$431.10
Sistema de enfriamiento	\$3,046.40
Sistema de alimentación	\$298.70
Cortador fijo	\$51.50
Cortador giratorio	\$1,194.14
Cortador en caliente	\$120.00
Base del sistema motriz	\$1,764.36
Sistema motriz	\$13,069.90
Total	\$25,818.14

A continuación, se muestra un resumen de los costos contabilizados durante el proceso de remanufactura. Estos se dividen en dos secciones, al primera son aquellos gastos invertidos en las modificaciones y la segunda corresponde a los trabajos de reacondicionamiento.

Tabla 4.4 Costo del proceso de remanufactura.

Elementos	Precios contabilizados
Regulación de altura	\$117.00
Recolección y descara de material	\$160.00
Sistema de descarga caliente	\$70.00
Sistema de alimentación	\$320.00
Total modificaciones	\$667.00
Estructura de la máquina	\$1,344.90
Panel de control	\$128.00
Cortador giratorio	\$1,194.14
Cortador en caliente	\$65.00
Base del sistema motriz	\$82.00
Sistema motriz	\$137.00
Sistema de enfriamiento	\$280.00
Total reacondicionamiento	\$3,231.04
Total final	\$3,898.04

Los gastos finales en el proceso de remanufactura resultaron ser de \$3,898.04, lo que representa un 15.09% del costo estimado de manufacturar una nueva máquina peletizadora, lo cual sería de aproximadamente \$25,818.14. Por lo tanto, el ahorro en términos de materiales procesados al optar por la remanufactura fue de 84.9%.

De acuerdo con la Plataforma Francesa sobre la Remanufactura [5] el ahorro aproximado en el rubro de materiales procesados debería ser aproximadamente 70%, por lo que el valor obtenido en este proceso de remanufactura supera las expectativas. Lo anterior se debe probablemente a que uno de los objetivos durante todo el proceso fue utilizar la mayor cantidad de materiales de reúso posibles, los cuales fueron adquiridos en depósitos de desperdicio o bien siendo sobrante de proyectos anteriores, lo que redujo considerablemente los costos.

En cuanto al gasto energético durante el proceso, éste se dividió en tres operaciones que representan el mayor consumo energético durante el proceso. Estas son: operaciones de maquinado, operaciones de soldadura, operaciones de pintado. En el maquinado se contabiliza el tiempo en horas de todas aquellas piezas las cuales fueron procesadas en una máquina herramienta, ya sea torno o fresadora. Las operaciones de soldadura se midieron en metros de cordón. Por último, en las operaciones de pintado se consideró el área total pintada en cada proceso. En la tabla 4.4 se muestra la contabilización del uso de las operaciones descritas tanto para el proceso de remanufactura llevado a cabo como la estimación en el proceso de manufactura de un equipo nuevo.

Tabla 4.5 Ahorro energético por proceso.

Proceso	Nuevo equipo		Remanufactura		Ahorro
	Componente	Tiempo de maquinado [h]	Componente	Tiempo de maquinado [h]	
Maquinado	Cortador giratorio	6.4	Cortador giratorio	6.4	32.3%
	Cortador fijo	2	Rodillo de aluminio	3	
	Eje principal	9.5	Base sist. alim.	6	
	Eje secundario	7.8	Ejes sist. alim.	2	
	Total	25.7	Total	17.4	
Soldadura	Método	Distancia soldada [m]	Método	Distancia soldada [m]	77.7%
	Con electrodo	2.7	Con electrodo	0.3	
	Con punteadora	0.9	Con punteadora	0.5	
	Total	3.6	Total	0.8	
Pintado		Área pintada [m ²]		Área pintada [m ²]	0%
		3.4		3.4	

Se obtuvo un porcentaje de ahorro de uso para cada uno de los 3 procesos seleccionados, estos se pueden observar en la columna de extrema derecha en la tabla 4.5. Al analizar los trabajos de maquinado la cifra fue de 32.3%, esto considerando, en el caso de una maquina nueva, los cuatro componentes que requirieron este proceso en la fabricación original, mientras que para el proceso de remanufactura se agregaron aquellas piezas fabricadas para las modificaciones. Los tiempos de maquinado se midieron, en el caso de los componentes fabricados, durante el proceso y para aquellos que no, se simuló el maquinado en un programa de manufactura asistida por computadora para estimar el tiempo necesario para su fabricación.

El proceso de soldadura obtuvo el mayor ahorro, siendo éste de 77.7%, en el que se consideró la distancia soldada mediante electrodo recubierto, como aquella en la que se utilizó la maquina punteadora. Estas distancias fueron medidas manualmente y sumadas para obtener el uso de este proceso. Por otro lado, el uso de compresora de aire utilizado en el pintado se midió a partir del área pintada, la cual se midió manualmente y al final se consideró que no había una diferencia significativa entre el proceso de remanufactura y la fabricación original, por lo tanto, el ahorro en el uso del equipo de pintado es finalmente 0%.

Para obtener el ahorro de energía total se hizo una ponderación entre los tres procesos dependiendo del nivel de consumo que utilizan los equipos necesarios, y de esta manera determinar el peso tiene cada proceso en el consumo total de energía. Para las operaciones de maquinado, se consultaron trabajos en los que determinan el consumo energético [38][39]. El consumo de los procesos de soldadura y pintado se determinó a partir de los manuales de funcionamiento de los equipos utilizados [40][41]. Una vez hecha la ponderación se calculó el ahorro energético de cada operación y por último sumarlos para obtener el ahorro del proceso de remanufactura.

Tabla 4.6 Ahorro energético total.

Proceso	Ahorro de uso por proceso	Consumo de energía [W]	Ponderación	Ahorro energético
Maquinado	32.3%	1,622.12	22%	7.1%
Soldadura	77.7%	4191	57%	44.3%
Pintado	0%	1524	21%	0%
			Total	51.43%

De acuerdo con la Plataforma Francesa sobre la Remanufactura, el ahorro energético esperado en un proceso de remanufactura debería estar alrededor del 80%, sin embargo, en el proceso realizado se obtuvo un estimado de 51.43% lo que representa casi un 30% de menor ahorro. Esta disminución se debe a que se consideraron procesos realizados en las modificaciones, los cuales son elementos con los cuales la máquina original no cuenta. Además, las operaciones de pintado no sumaron ningún ahorro, pero fue importante incluirlas ya que si tiene un peso considerable en el consumo de energía.

Contabilizar el conocimiento que se ahorra en el proceso de remanufactura es mucho más complicado que hacerlo con materiales procesados o energía, pues se refiere a todo el proceso de diseño e investigación mediante el cual se crea un producto, y que, al aplicar remanufactura sobre él en lugar de fabricar uno nuevo, se evita en su mayoría. En el caso particular del proceso realizado sobre la máquina peletizadora el trabajo de diseño e investigación para llevar a cabo los trabajos de reacondicionamiento fueron mínimos al resumirse en el diseño del nuevo cortador giratorio y en la reconexión del panel de control. Sin embargo, los trabajos de modificación si requirieron procesos de diseño más extensos de manera individual, por lo que se considera que el ahorro en cuestión de conocimiento es menor al esperado, que en el caso de la Plataforma Francesa sobre la Remanufactura [5] estiman cercano al 90%, siendo necesario un análisis más extenso y complejo para determinar una cifra aproximada de ahorro de conocimiento durante este proceso.

De acuerdo a los análisis anteriores, se determinó que el nivel de ahorro de recursos al realizar un proceso de remanufactura sobre la máquina peletizadora fue cercano al esperado los rubros de materiales procesados y en conocimiento, aunque con este último no se haya obtenido una cifra con la cual compara. Mientras tanto, el ahorro de energía se vio reducido en casi 30% al esperado debido a las modificaciones realizadas y a las operaciones de pintado. Estos resultados corresponden únicamente a este caso en particular, pero sirven como base de comparación en proyectos que se lleven a cabo en entornos similares.

Durante el proceso de remanufactura realizado se observaron algunos aspectos generales, los cuales sería útil mencionar. Lo primero a mencionar es el costo no contabilizado de la fase de inspección, que en este caso en particular únicamente se utilizaron técnicas de inspección visual y por comprobación de funcionamiento. Sin embargo, en la *Guía práctica de tecnologías para el proceso de remanufactura* [7] se aconsejan algunas otras técnicas de inspección a utilizar en proyectos de mayor calidad y presupuesto, y que representan un costo no mencionado en la mayoría de trabajos encontrados.

Un aspecto importante a considerar cuando se aplica un proceso de remanufactura es la gran cantidad de información del producto original necesaria, debido que el objetivo del proceso es obtener un producto “con las mismas prestaciones que el diseño original” [1]. Por lo tanto, para alcanzar dicho objetivo es indispensable contar con la mayor información posible recabada en el diseño original o de lo contrario realizar un análisis exhaustivo del equipo. Se podría decir que resulta más conveniente que la misma empresa que fabricó el producto originalmente sea la encargada de realizar el proceso de remanufactura, ya que de otra manera se necesita incluir una etapa de familiarización del equipo previa a la inspección.

Por otro lado, en este proyecto se aprovecharon algunas definiciones del concepto de remanufactura para realizar modificaciones sobre algunos sistemas de la peletizadora, ya que en algunas fuentes se menciona que el producto remanufacturado debe tener prestaciones iguales o mejores que el producto original. Sin embargo, revisando algunos ejemplos de trabajos con este proceso [42][43], se observó que es posible que el aspecto de mejorar las prestaciones del producto original se refiera a utilizar componentes de mejor calidad que los utilizados al momento de la fabricación del equipo y no a modificarlo para mejorar su funcionamiento.

Por último, si bien el proceso de la remanufactura es el más estudiado entre los procesos de recuperación de la economía circular, siendo el que más recursos, trabajos y herramientas se pueden encontrar, sigue siendo un concepto general y que necesita de mucha personalización para llevarse a cabo en cada proyecto individual. Por esta razón existen muchos manuales, herramientas digitales e incluso empresas que se dedican a prestar consultoría para llevar a cabo proyectos de remanufactura. Sin los conocimientos necesarios sobre el proceso o la asesoría adecuada, es posible no aprovechar la sustentabilidad que debería suponer la remanufactura.

5 Conclusiones

Se considera que el objetivo de devolver a la máquina peletizadora a su funcionalidad original y mejorarla por medio de las modificaciones se cumplió, por lo menos en cuanto al sistema de peletizado en frío, ya que en el sistema en caliente los resultados no son concluyentes. Si bien la remanufactura, en la mayoría de sus aplicaciones, solo contempla el primer aspecto, se aprovecharon algunas definiciones de este proceso para realizar modificaciones en diferentes sistemas con lo cual se solucionaron problemas de funcionamiento y operabilidad detectados previamente por los usuarios.

El proceso de remanufactura contempla recuperar las prestaciones y características originales del equipo, no así con su vida útil. Esto debido a que alguno de los componentes no reacondicionados pudiera tener daños por fatiga imperceptibles con las técnicas de inspección utilizadas. En el caso de la máquina peletizadora, la gran cantidad de vibraciones contribuye a la aparición de fallas a causa de estos factores y la estructura de la máquina o los elementos del sistema de transmisión podrían ser los más críticos.

El ahorro estimado de recursos utilizando el proceso de remanufactura con respecto a fabricar un nuevo equipo fue de 84.9% en materiales procesados, 51.4% en energía y algo menor al 90% esperado para el ahorro de conocimiento. Poniendo como comparativa las estimaciones hechas por la Plataforma Francesa sobre la Remanufactura, el ahorro de recursos obtenido durante este proceso supera lo esperado en términos de materiales procesados, pero en energía se queda casi 30% por debajo. En el caso del ahorro de conocimiento, al ser un rubro poco especificado y complicado de medir, únicamente se ha podido concluir que no se alcanza el 90% esperado.

Se detectaron algunas dificultades al trabajar basándose en el proceso de remanufactura. En primer lugar, es necesaria una base sólida de información respecto al equipo a remanufacturar o de otra manera realizar un análisis profundo de sus componentes críticos y funcionamiento, de lo contrario se dificultarán y limitará la eficiencia de cada fase del proceso. En segundo lugar, cada proyecto requiere una considerable personalización del proceso de remanufactura, por lo que es aconsejable estudiar éste a fondo o bien, recurrir a asesoría.

Respecto a la funcionalidad de la máquina peletizadora, se logró obtener un producto peletizado utilizable en otros procesos de transformación de plásticos, pero solo por medio del modo de peletizado en frío. En cuanto al modo de peletizado en caliente, se deben resolver primeramente las averías en la máquina extrusora para determinar la funcionalidad del proceso, así como la calidad del producto peletizado.

En cuanto a las modificaciones realizadas en diferentes sistemas de la máquina, el proceso de acoplamiento del modo de peletizado en caliente con la máquina extrusora logró mejorarse al modificar el sistema de regulación de altura y la misma placa acopladora, sin embargo, aún se necesita equipo adicional para llevar a cabo dicha operación.

Por otra parte, las diferentes modificaciones en el sistema de recolección y descarga de material del modo de peletizado en frío resultaron en la eliminación del problema de fuga de material durante su recorrido hasta su almacenamiento. Después, la efectividad en el cambio del sistema de descarga del modo de peletizado en caliente no pudo ser verificado en su totalidad, aun así, pruebas enfocadas en la descarga sugieren que la automatización y continuidad del proceso se mejoró, aunque el producto sigue necesitando un proceso de secado posterior. Por último, con el nuevo sistema de alimentación del modo de peletizado en frío se logró obtener una variedad de longitudes de pellets con una mayor igualdad entre ellos, yendo en promedio desde 4.25 [mm] hasta 8.83 [mm].

6 Trabajos a futuro

Una vez realizadas las reparaciones en la máquina extrusora se deberán terminar las pruebas del sistema de peletizado en caliente tal como se plantean en la sección 3.3.2. También, se recomienda revisar los siguientes aspectos de la máquina para su mejoramiento. En primer lugar, modificar la relación de engranes del sistema de alimentación para aprovechar todo el rango de velocidades que ofrece el motor y con ello también aumentar el par que llega a los rodillos para disminuir la velocidad mínima de operación. En segundo lugar, se considera que reducir el nivel de vibraciones puede contribuir a aumentar la vida útil del equipo, por lo que se recomienda reforzar la máquina, principalmente la base del sistema motriz, y colocar material amortiguador en puntos críticos. En tercer lugar, durante el proceso se consideraron soluciones más efectivas para el nuevo sistema de descarga de material en el peletizado en caliente, sin embargo, restricciones acerca del ahorro de recursos no permitieron que fueran opciones viables, pero considerarlas en un proyecto futuro aumentaría la calidad del proceso. Por último, se recomienda una revisión al diseño de ambos cortadores giratorios con el objetivo de mejorar la calidad y eficiencia del peletizado.

Viendo la calidad de resultados comparada con el ahorro de recursos al utilizar el proceso de remanufactura, se recomienda estudiar la posibilidad de aplicar este u otro proceso dentro de lo propuesto por la economía circular para la recuperación y extensión de la vida útil de otros equipos dentro del Área de Procesamiento de Plásticos.

7 Referencias

- [1] Prendeville, S. (2016). *Map of Remanufacturing Product Design Landscape*. European Remanufacturing Network
- [2] Eguren, J. A. (2018). *Opportunities and incentives for Remanufacturing in the Basque Country*. Conference on Industrial Product-Service Systems
- [3] BORG Automotive Reman (2022). *Reman, la alternativa verde*. Lucas. <https://www.lucasee.com/es/informaci%C3%B3n/remanufactura/> (consultado el 17 de febrero de 2023)
- [4] Basque Ecodesing Center. (2016). *Ecodiseño para una economía circular; claves para fomentar un modelo económico sostenible*. España. Ihobe S.A
- [5] Peña R. (2008). *Remanufactura, una nueva vida útil*. Expansión. <https://expansion.mx/manufactura/tendencias/remanufactura-una-nueva-vida-util> (consultado el 18 de febrero de 2023)
- [6] Dando R. (2020). *La última forma de reciclaje*. Plataforma Francesa sobre la Remanufactura. <http://www.remanufacturing.fr/es/paginas/principios-remanufactura.html> (consultado el 17 de febrero de 2023)
- [7] Planificación Territorial y Vivienda Gobierno Vasco. (2018). *Guía práctica de tecnologías para el proceso de remanufactura*. España. Ihobe S.A
- [8] Butzer, S. (2016). *Map of Remanufacturing Processes Landscape*. European Remanufacturing Network
- [9] Baur, E. (2019). *Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers* (5.a ed.). Hanser.
- [10] Drobny, J. G. (2014). *Handbook of Thermoplastic Elastomers* (2.a ed.). Elsevier.
- [11] Staff PCM (2021). *Plástico pelletizado vs plástico molido ¿Cuál me conviene?* PCM. <https://www.pcm.com.mx/learning-center/plastico-pelletizado-vs-plastico-molido-cual-me-conviene> (consultado 22 de febrero de 2023)
- [12] Martí E. (2020). *Producción de pellets ¿Cómo realizarlo correctamente y detectar defectuosidades?* Interempresas. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/266861-Produccion-de-pellets-Como-realizarlo-correctamente-y-detectar-defectuosiidades.html> (consultado 20 de febrero de 2023)
- [13] Méndez A. (2019). *Impacto del tamaño y geometría del pellet de plástico en la producción*. Plastic Technology México. [https://www.pt-mexico.com/articulos/la-geometria-y-el-tamano-del-pellet-importante-durante-el-procesamiento-del-pet\(2\)](https://www.pt-mexico.com/articulos/la-geometria-y-el-tamano-del-pellet-importante-durante-el-procesamiento-del-pet(2)) (consultado 22 de febrero de 2023)
- [14] Staff PCM. (2022). *Diferencias entre el plástico virgen y pellet reciclado*. PCM <https://www.pcm.com.mx/learning-center/diferencias-entre-el-plastico-virgen-y-pellet-reciclado> (consultado 23 de febrero de 2023)

- [15] Oceanworks (2019). *The performance of recycled vs virgin plastics*. Oceanworks The Blog. <https://es.oceanworks.co/blogs/ocean-plastic-news/the-performance-of-recycled-vs-virgin-plastics> (consultado 24 de febrero de 2023)
- [16] Gester (2020). *¿En qué consiste el proceso de Peletización del plástico?* Gester Blog. <https://gester.es/blog/en-que-consiste-el-proceso-de-peletizacion-del-plastico/> (consultado 20 de febrero de 2023)
- [17] Christian M. (2019). *Sistemas de peletizado para resina, compuestos y plásticos*. Plastic Technology México. <https://www.pt-mexico.com/articulos/pautas-para-seleccionar-el-sistema-correcto-de-peletizado> (consultado 20 de febrero de 2023)
- [18] Bell J. (2012). *Mejores prácticas para evitar problemas en el peletizado*. Plastic Technology México <https://www.pt-mexico.com/articulos/resuelva-siete-problemas-comunes-en-peletizado> (consultado 27 de febrero de 2023)
- [19] Martí E. (2020). *Producción de pellets ¿Cómo realizarlo correctamente y detectar defectuosidades?* Interempresas. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/266861-Produccion-de-pellets-Como-realizarlo-correctamente-y-detectar-defectuositades.html> (consultado 27 de febrero de 2023)
- [20] L. D. G. Mónica González Mothelet. Notas de clase: *Metodología del diseño*. Universidad de Londres.
- [21] Karl T. Ulrich, Steven D. Eppinger (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. 5ta edición, Ed. McGraw Hill.
- [22] Blanco M. E. (2015). Tesis: *Metodología de diseño de máquinas apropiadas para contextos de comunidades en desarrollo*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [23] David G. Ullman (2010). *The mechanical design process*. 4th edition, Ed. McGraw Hill
- [24] Arias K. (2018). *Estudio de las actividades relevantes en el diseño de productos: modelo VDI 2021 frente al modelo metodológico I+P+D3*. Espacios, Vol. 39, Pag 22.
- [25] Arcadia D. Guijosa J. (2013). Tesis: *Diseño y fabricación de una cortadora para plástico extruido*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [26] Fortacero. (2022). Catálogo: *Perfiles y estructurales*. Pag. 16
- [27] Organización Internacional de Normalización. (1988). *Tolerancias Dimensionales (ISO 286)*.
- [28] Beer, Jhonston (2010). *Mecánica de Materiales*. 5ta edición, Ed. McGraw Hill
- [29] R. R. Slymaker (1966). *Diseño y análisis de elementos de máquinas*. 1ra edición, Limusa-Wiley.
- [30] Resnik R. (1992). *Física Vol. I*. 4ta edición, Editorial Continental.
- [31] Gordon, David W. (2004) *Bicycling Science*. Cambridge Mass. MIT Press.

- [32] Mott R. (2006) *Diseño de elementos de máquinas*. 4ta edición, Pearson.
- [33] Tanner Herramientas (2022) *Catálogo TMX: Round Tooling*.
- [34] Lajtin Yu. M. (1973) *Metalografía y tratamiento térmico de los metales*. Editorial MIR
- [35] Instituto Técnico de la Estructura en Acero (2018). *Tomo 3: Metalurgia Aplicada*.
- [36] ThyssenKrupp Fortinox S.A. Catálogo: *Aceros para herramienta* Pag. 1
- [37] Fried J. R. (2014) *Polymer Science and Techbology*. 3ra edición, Prentice Hall.
- [38] Rajme E. A., Muñoz M. (2017) *Tesis: Estudio del Consumo de Energía y Acabado Superficial en Operaciones de Fresado CNC*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [39] Sarache L., Ramírez R. (2007) *Analisis Multifuncional Del Consumo Energético de un Proceso de Fresado Frontal*. Revista Información Tecnológica 18, Universidad de Los Andes.
- [40] TRUPER. Manual: *Inverter Welder SOIN-110/130*. Pag. 3
- [41] PRETUL. Manual: *Lubricated air compressor COMP-20LP*. Pag. 3
- [42] Jian Cao, Sisi Wu, S. K. (2023). *Recovering and remanufacturing to fulfill EPR regulation in the presence of secondary market*. *International Journal of Production Economics*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108933>.
- [43] C. Franke, B. Basdere, M. Ciupek, S. S. (2006). *Remanufacturing of mobile phones—capacity, program and facility adaptation planning*. *Omega*, 34(6). <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.016>.

8 Anexos

8.1 Ficha técnica Acero Herramienta O1.



FICHA TÉCNICA

Acero Herramienta

O1

PALMEXICO	O1
AISI, ASTM, NMX.	O01
UNS	T31501
COLOR	amarillo

Análisis químico según Norma Nacional NMX B-82 (% en peso):

C	Si	Mn	P máx.	S máx.	Cr	V máx.	W
0.85 - 1.00	1.10-0.50	1.00 - 1.40	0.030	0.030	0.40 - 0.60	0.30	0.40 - 0.60

Otros residuales, valor máximo: Cu = 0.25% Ni = 0.30 % Cu + Ni = 0.40% As + Sn + Sb = 0.040% + Sb = 0.040%

Tipo:	Acero para trabajo en frío, tipo temple al aceite.
Formas y acabados:	Redondo, cuadrado, solera, lámina, disco y anillo forjados, barra hueca y barra rectificada.
Características:	Este acero tiene buena resistencia al desgaste y buena tenacidad. Presenta dureza profunda en diámetros menores a 40 mm. En sección de 100 mm., la profundidad de dureza es de aprox. 10 mm., Excelente maquinabilidad y buen afilado.
Aplicaciones:	Se emplea en matrices para estampar, cortar y punzonar; así como en herramientas de corte a baja temperatura. También se utiliza en herramientas para filetear, instrumentos de precisión, calibres y matrices para plástico, entre otros.
Observaciones:	Durante el recocido, las herramientas deben rodearse de viruta de hierro fundido para evitar la decarburización. Dureza después de recocido: 170-210 Brinell. Limpiar la cáscara de forjado o rolado antes de temprar. Revenir inmediatamente. Siempre revenir por lo menos a 100 °C. Para obtener buenos resultados, es esencial igualar la temperatura en toda la herramienta. Revenir inmediatamente. Cuando la herramienta se va a someter a impactos, conviene hacer un segundo revenido a 500 °C . Para obtener buenos resultados es esencial igualar la temperatura en toda la pieza.

www.acerosdealtorendimiento.com

Tel. Ciudad de México: 01(55) 5729 0900; Interior de la república: 01 800 900 1800



Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C) :

FORJADO	NORMALIZADO PIEZAS FORJADAS	RECOCIDO			DUREZA BRINELL MÁXIMA BARRAS RECOCIDAS (1)
		TEMPERATURA	MEDIO DE ENF.	VEL. ENF.	
1050 - 1100 enfriar al aire (3)	820 - 880 enfriar al aire	720 - 730	enfriar en horno	11°C/hr Hasta horno negro y apagar.	228

Nota: (1) Dureza exigida por la norma NMX B - 82 (tabla 2).

(3) Para piezas mayores de 100 mm², enfriar en horno apagado.

Temple recomendado según NMX B-82 (tabla 3) (valores en °C):

Efecto de la temperatura de
revenido sobre la dureza (4)

PRECALENTAMIENTO	AUSTENIZACIÓN		TIEMPO A TEMP. AUSTENIZACIÓN	MEDIO DE ENFRIAMIENTO	REVENIDO	DUREZA Rc MÍNIMA (2)	TEMPERATURA REVENIDO	DUREZA Rc
	BAÑO DE SALES	ATM. CONTROLADA						
650	790	800	1 min/mm de esp.	aceite	205	60	90 150 180 190 200 260 320 370 430 480 540	63-65 63-64 62-63 61-62 60-61 58-59 54-55 50-51 47-48 43-44 33-37

Notas: (2).- La dureza se da en base a probetas hasta de 25mm. de sección.
(4).- Temple a 800 °C.



www.acerosdealtorendimiento.com

Tel. Ciudad de México: 01(55) 5729 0900; Interior de la república: 01 800 900 1800



Formosa Plastics®

Formolene® HDPE

Formolene® HB5502B

**High Density Polyethylene (HDPE) Resin
Designed for Blow Molding Applications**

Formolene® HB5502B is designed for applications requiring excellent stiffness and stress crack resistance properties. It may be used as a general-purpose blow molding resin or sheet extrusion thermoforming resin.

Formolene® HB5502B meets all requirements of the U.S. Food and Drug Administration as specified in 21 CFR 177.1520, covering safe use of polyolefin articles intended for direct food contact.

Suggested Applications:

Pharmaceutical Packaging
Bleach and Detergents

Personal Care Products
Industrial Chemicals & Parts

Nominal Physical Properties:

PROPERTY*	ASTM TEST METHOD	ENGLISH		SI	
		Unit	Value	Unit	Value
Density	D1505	g/cc	0.955	g/cc	0.955
Melt Index, Condition E, 190°C/2.16 kg	D1238	g/10 min.	0.35	g/10 min.	0.35
Environmental Stress Crack Resistance (ESCR) Condition B, F ₅₀ (100% Igepal)	D1693	h	35	h	35
Tensile Yield Strength, 2" (50 mm) per min.	D638 Type IV	psi.	4000	MPa	28
Ultimate Elongation, 2" (50 mm) per min.	D638 Type IV	%	>600	%	>600
Brittleness Temperature	D746	°F	<-180	°C	<-118
Flexural Modulus Tangent - 16:1 span: depth, 0.5 in/min	D790	psi.	200,000	MPa	1370

* Physical properties reported herein were determined on compression molded specimens prepared in accordance with Procedure C of ASTM D4703, Annex A1.

The nominal properties reported herein are typical of the product but do not reflect normal testing variance and therefore should not be used for specification purposes.

Published 6/01/01, Revised 07/20

Any inquiries regarding this data sheet should be addressed to: 9 Peach Tree Hill Road • Livingston, NJ 07039 • Phone: (888) FPCUSA3

The information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, reliable. Suggestions concerning uses or applications are only the opinion of FORMOSA PLASTICS CORPORATION, U.S.A. and users should perform their own tests to determine the suitability of these products for their own particular purposes. However because of numerous factors affecting results, FORMOSA PLASTICS CORPORATION, U.S.A. MAKES NO WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING THOSE OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, other than that the material conforms to the applicable current Standard Specifications. Statements herein, therefore, should not be construed as representations or warranties. Statements concerning the use of the products of formulations described herein are not to be construed as recommending the infringement of any patent and no liability for infringement arising out of any such use is assumed.

© Formosa Plastics Corporation, U.S.A.

Formolene® & Formolon® are registered trademarks of FPC USA

02/20



Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet

For Fresh Food Packaging and Food Serviceware

Ingeo biopolymer 2003D, a NatureWorks LLC product, is a thermoplastic resin derived from annually renewable resources and is specifically designed for use in fresh food packaging and food serviceware applications. Ingeo biopolymer 2003D is a transparent general purpose extrusion grade that is used naturally or as part of a formulated blend. This is a high molecular weight biopolymer grade that processes easily on conventional extrusion equipment. Extruded roll stock is readily thermoformable. See table at right for properties.

Applications

Potential applications for Ingeo biopolymer 2003D include:

- Dairy containers
- Food serviceware
- Transparent food containers
- Hinged-ware
- Cold drink cups

Processing Information

Ingeo biopolymer 2003D is easily processed on conventional extrusion equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. More detailed recommendations and processing requirements are found in the Ingeo biopolymer sheet extrusion processing guide, the purging technical data sheet, and the drying and crystallizing processing guide, all of which can be found at www.natureworksllc.com.

Machine Configuration

Ingeo biopolymer 2003D will process on conventional extrusion machinery with the following equipment: General purpose screw with L/D ratios from 24:1 to 32:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 2003D is not compatible with a wide variety of commodity resins, and special purging sequences should be followed:

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo 2003D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	6	D1238
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Strength @ Break, psi (MPa)	7,700 (53)	D882
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	8,700 (60)	D882
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	500 (3.5)	D882
Tensile Elongation, %	6.0	D882
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Shrinkage is similar to PET ⁽²⁾		
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

(2) Refer to Ingeo biopolymer Sheet Extrusion Processing Guide

Processing Temperature Profile ⁽¹⁾		
Melt Temperature	410°F	210°C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temperature	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	375°F	190°C
Screw Speed	20-100 rpm	

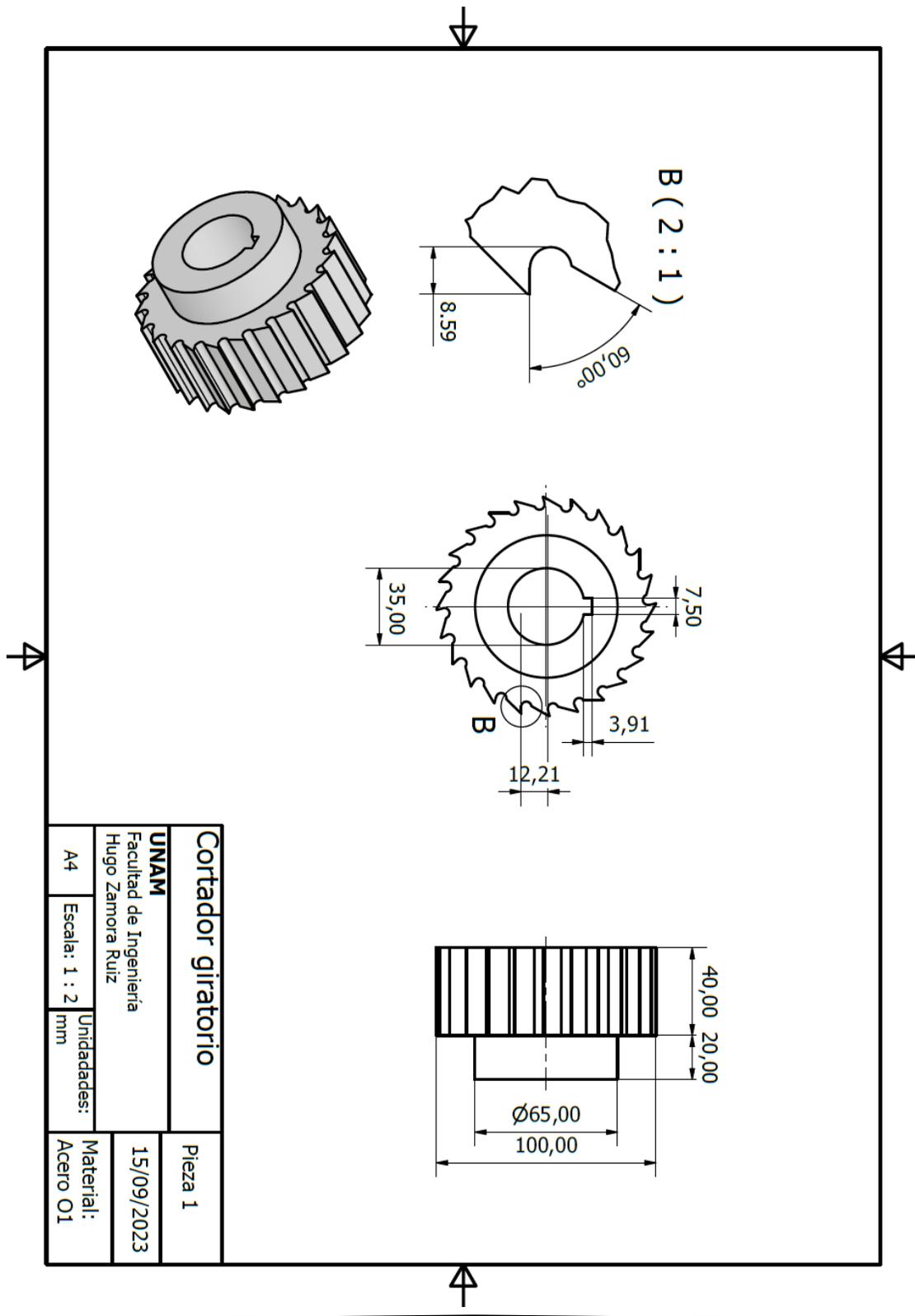
(1) These are starting points and may need to be optimized.

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymers into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying may be required. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions for crystallized granules are 2 hours at 195°F (90°C) or to a dew point of -40°F (-40°C), airflow rate of greater than 0.5 cfm/lbs per hour

8.4 Plano de cortador giratorio



Cortador giratorio		Pieza 1
UNAM		15/09/2023
Facultad de Ingeniería		
Hugo Zamora Ruiz		
A4	Escala: 1 : 2	Material: Acero O1
	Unidades: mm	