

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Industrial



**ESTUDIO DE MEJORA PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO DE
REPROCESAMIENTO DE RECUPERADO
BOPET EN LA EMPRESA OPP FILM S.A.**

Trabajo de suficiencia profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero
Industrial

Diego Enrique Santiago Abarca

Código 20082526


Asesora

Doris Adriana Zaldívar Peña

Lima – Perú

Enero de 2020





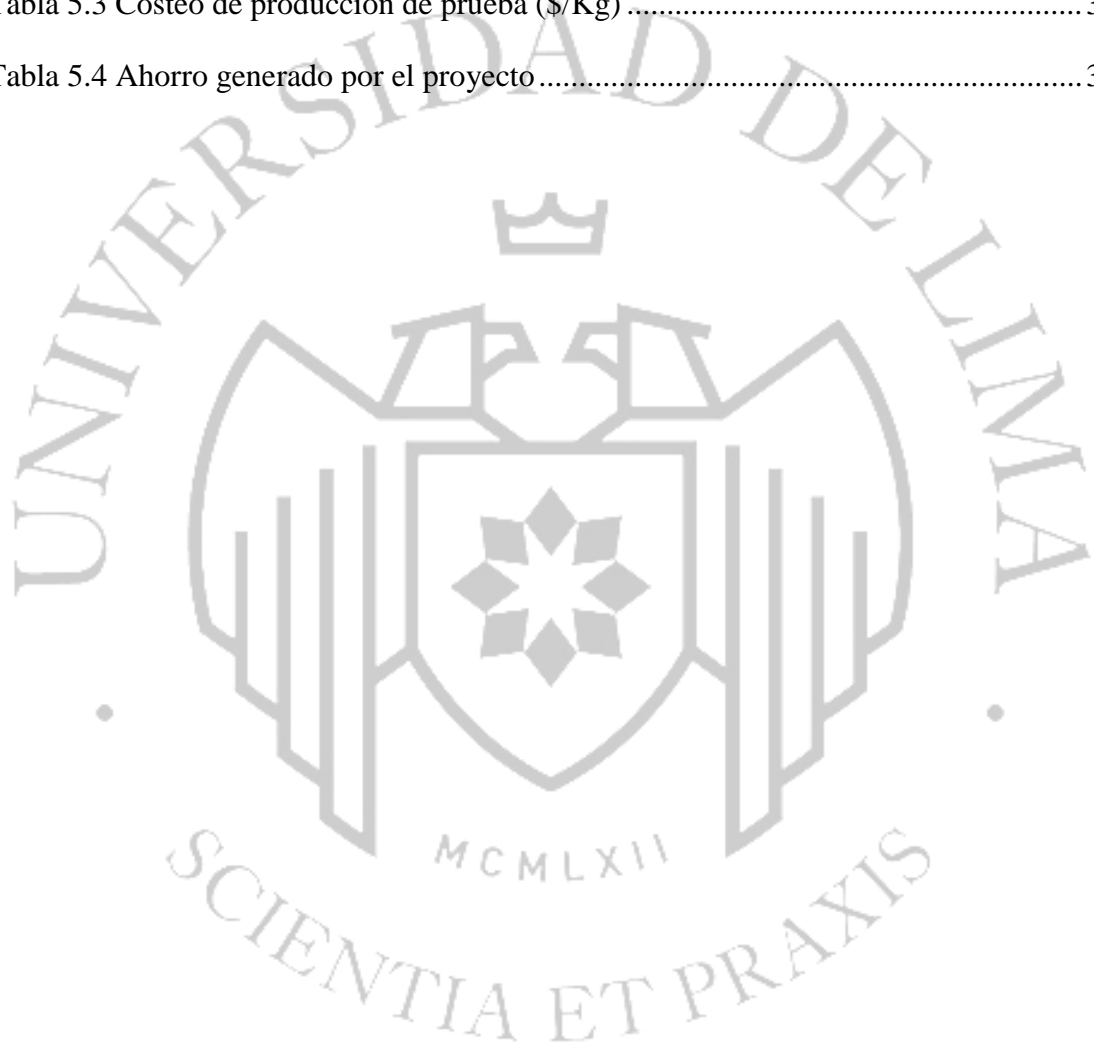
**IMPROVEMENT STUDY FOR THE
RECOVERED BOPET REPROCESSING
PROJECT IMPLEMENTATION IN THE OPP
FILM S.A. COMPANY**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	1
1.1 Descripción de la empresa.....	1
1.1.1 Misión.....	2
1.1.2 Visión.....	2
1.2 Descripción del sector	2
1.3 Descripción del problema.....	3
CAPÍTULO II: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.1 Objetivo general.....	10
2.2 Objetivos específicos	10
CAPÍTULO III: ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	11
3.1 Alcance	11
3.2 Limitaciones de la investigación.....	11
CAPÍTULO IV: JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	12
4.1 Justificación técnica.....	12
4.2 Justificación económica.....	12
4.3 Justificación ambiental	13
CAPÍTULO V: PROPUESTAS Y RESULTADOS.....	14
5.1 Propuesta	14
5.2 Resultados.....	16
5.2.1 Resultados de la evaluación técnica.....	16
5.2.2 Resultados de la evaluación económica.....	29
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36
REFERENCIAS.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Stock de recuperado BoPET	8
Tabla 5.1 Producción por espesores del 2018.....	29
Tabla 5.2 Costeo de producción estándar (\$/Kg)	30
Tabla 5.3 Costeo de producción de prueba (\$/Kg)	32
Tabla 5.4 Ahorro generado por el proyecto.....	33



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Porcentaje de producción mundial de empaques	3
Figura 1.2 Esquema de la olla de molido, extrusora y filtro.....	4
Figura 1.3 Esquema de la tina de enfriamiento	5
Figura 1.4 Esquema del ciclón	6
Figura 1.5 DOP del proceso de recuperado BoPET	7
Figura 5.1 Pareto del recuperado BoPET almacenado	14
Figura 5.2 Diagrama de Gantt.....	15
Figura 5.3 DOP del proceso de polimerización del recuperado BoPET	17
Figura 5.4 Película BoPET	18
Figura 5.5 Equipo de estiro longitudinal (MDO)	20
Figura 5.6 Equipo de estiro transversal (TDO).....	21
Figura 5.7 Tratador Corona	22
Figura 5.8 Equipo bobinador	23
Figura 5.9 Línea de producción de películas BoPET	24
Figura 5.10 DOP de la producción de películas BoPET.....	25
Figura 5.11 Comparativa del número de roturas	26
Figura 5.12 Cartas de control: Elongación dirección máquina (%).....	27
Figura 5.13 Cartas de control: Elongación dirección transversal (%)	27
Figura 5.14 Cartas de control: Tracción dirección máquina (N/mm ²)	28
Figura 5.15 Cartas de control: Tracción dirección transversal (N/mm ²).....	28

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto es evaluar la viabilidad técnica y económica del reprocesamiento del recuperado BoPET, para su reutilización como materia prima, para ello se cuenta con 5 capítulos los cuales se describirán a continuación.

La empresa Opp Film S.A., dedicada a la producción de películas de plástico, termoformado y resinas de ingeniería cuenta con dos plantas de producción en el distrito de Lurín. El rubro al cual pertenece la empresa es la de producción de empaques flexibles, estos pueden ser destinados como empaques de alimentos, bebidas, cuidado personal, cuidado del hogar y alimento para mascotas. Asimismo, mediante justificaciones técnicas, económicas y ambientales se determinó que es factible cumplir con el objetivo planteado en la investigación.

El proyecto desarrolla y plantea la existencia de un problema principal localizado en el elevado stock de recuperado BoPET, 2 331 toneladas. Esta al ser de naturaleza higroscópica absorbe agua lo que genera una rotura en sus cadenas de carbono afectando directamente las propiedades mecánicas del producto final así como la procesabilidad en su operación reflejada en las roturas de la película durante su producción. La investigación plantea la siguiente solución: El reprocesamiento del recuperado BoPET mediante polimerización. El resultado del reprocesamiento es la disminución del costo de formulación, incrementando la rentabilidad de la empresa.

Finalmente se determinó que el proyecto es viable, pues se logrará obtener los resultados deseados durante el proceso de producción y se obtendrá un ahorro de 2 659 807.33 dólares durante 1 año de producción de películas de espesores iguales o mayores a 12 micras.

Palabras clave: Recuperado BoPET, proyecto de reprocesamiento, proceso, implementación.

ABSTRACT

The Objective of this project is to evaluate the technical and economic feasibility of the recovered BoPET reprocessing, for reuse as a raw material and for this there are 5 chapters which will be described below.

The Opp Film S.A. Company is dedicated to the production of plastics films, thermoforming and engineering resins, it has two production plants in the district of Lurin. The business market to which the company belongs is the flexible packaging production; these can be used as packaging to food, beverages, personal care, home care and pet food products. Also, through technical, economic and environmental justifications it was determined that it is feasible to meet the objective set in the investigation.

The project develop and raises the existence of a main problem located in the high stock of recovered BoPET, 2 331 tons. Being hygroscopic in nature, it absorbs water, which generates a break in its carbon chains, directly affecting the mechanical properties of the final product as well as the processability in its operation reflected in the film breaks during its production. The investigation proposes the following possible solution: The reprocessing of the recovered BoPET by polimerization. The result of the reprocessing is the decrease in the formulation cost, increasing the profitability of the company.

Finally, it was determined that the project is viable, since the desired results will be obtained during the production process and a saving of \$ 2 659 807.33 will be obtained during 1 years of production of films of thicknesses equal to or greater than 12 microns.

Keyword: Recovered BoPET, reprocessing project, process, implementation.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

1.1 Descripción de la empresa

La empresa elegida para el trabajo es Opp Film S.A. empresa perteneciente a la corporación Oben Holding Group, cuenta con 28 años de experiencia en el rubro de la producción de películas de plástico, termoformado y resinas de ingeniería. Opp Film S.A. está especializada en la ingeniería, desarrollo y fabricación de láminas para empaques flexibles.

Oben Holding group fue fundada en 1991, su primera planta fue instalada en Ecuador, en la cual su principal producto eran las películas de polipropileno biorientado más conocidas como películas BoPP por sus siglas en inglés, se denomina películas biorientadas aquellas que se producen mediante el estiro en sentido longitudinal como transversal de la película. No fue hasta el 2003 que Oben Holding Group incrementa su capacidad instalada una planta en Perú y en el 2008 una tercera y cuarta planta en Argentina y Colombia respectivamente. Es aquí que además de incrementar su capacidad de producción empieza con la diversificación de sus productos implementando líneas de producción para películas de polipropileno coextruido (CPP) y en el 2013 con las películas de polietileno biorientadas (BoPET).

En el 2014 se instalan tres líneas de metalizado, específicamente en la planta de Perú, este proceso es un proceso subsiguiente a los de extrusión de las películas BoPP, CPP y BoPET. En la actualidad se viene implementando su primera línea de poliamida biorientada (BoPA), demostrando un crecimiento y diversificación sostenida a través del tiempo.

Para tener una idea más clara de los productos comentados se señala lo siguiente: El prefijo Bo señala que son productos biorientados, tanto en sentido longitudinal como transversal, en caso el prefijo sea C significa que no ha tenido ninguna orientación. Las letras posteriores corresponden a la abreviación de la materia prima. Por ejemplo:

- PP: Polipropileno
- PET: Polietileno
- PA: Poliamida

1.1.1 Misión

Desarrollar, producir y comercializar películas plásticas para empaques flexibles y productos complementarios, con compromiso, calidad y eficiencia.

1.1.2 Visión

Ser líder mundial en la producción de películas plásticas para empaques flexibles.

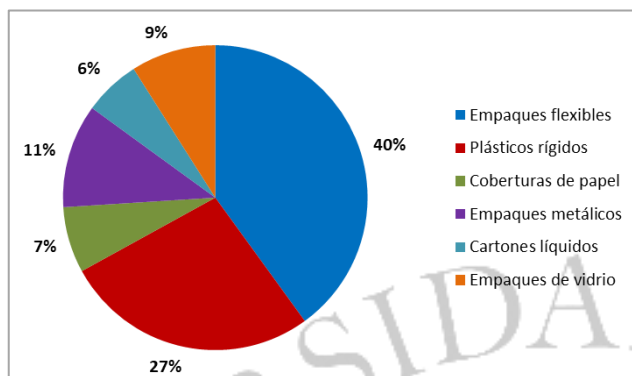
1.2 Descripción del sector

El sector al cual pertenece Opp Film es el de producción de empaques, el cual está diferenciado tanto por su fin como pueden ser alimentos, bebidas, cuidado personal, cuidados del hogar y alimentos para mascotas. A su vez estos pueden ser de diferentes materiales como lo son los empaques metálicos, de plástico rígido, de vidrio, cartones líquidos, contenedores de papel, empaques flexibles y otros.

El principal producto de Opp Film son las películas de empaque, las cuales son denominadas como empaques flexibles. Específicamente este es el producto con mayor porcentaje de producción mundial por unidades en cuanto a empaques se refiere. Ver figura 1.1

Figura 1.1

Porcentajes de producción mundial de empaques



Fuente: Aimcal (2018)
Elaboración propia

El principal mercado tanto para Opp Film como para la industria de empaques flexibles en general va dirigido a los empaques de comida principalmente en sus diferentes materias como lo son las películas BoPP, CPP, BoPA y BopET que pueden ser utilizados como empaque final o como insumo para la elaboración de empaques.

1.3 Descripción del problema

Durante el proceso de producción de películas biorientadas pueden ocurrir roturas generando scrap, que pasa por un proceso para poder recuperarlo. El proceso se explica a continuación:

- **Triturar**

El scrap generado por las roturas de la película en el proceso de producción es llevado a una trituradora que tiene como función reducir el tamaño del scrap a pequeños retazos de película. Estos son almacenados en un silo hasta tener material suficiente para procesarlo de manera continua.

- **Moler**

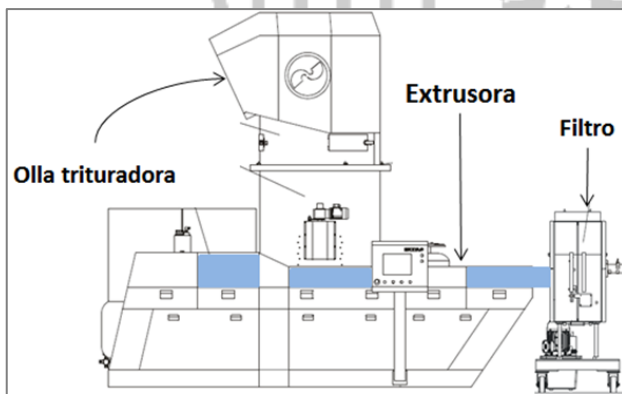
Al haber obtenido la cantidad necesaria para poder procesar el scrap de manera continua este es llevado por un tornillo sin fin a una faja transportadora que lleva el material a una olla que contienen platos con cuchillas en su interior que muelen el scrap triturado generando como efecto secundario un incremento en la temperatura en el scrap molido. En esta actividad se controla las RPM del giro de los platos y la temperatura interior que llega hasta 165°C.

- **Extruir**

Una vez molido el scrap ingresa a la extrusora que es calentada mediante resistencias hasta llegar a una temperatura interna de 275 °C, en esta etapa el material se funde pasando de estado sólido a líquido, cabe mencionar que la temperatura de fusión del PET es de 265°C. Ver figura 1.2.

Figura 1.2

Esquema de la olla, extrusora y filtro



Fuente: Erema (2019)
Elaboración propia

- **Filtrar**

Debido a que el scrap ha tenido contacto con el piso, este puede llevar restos de suciedad que al fundirse se carbonizan y podrían afectar el proceso de producción, es por esto que después de la extrusión pasa por un filtro que retiene todas las impurezas que pueda tener

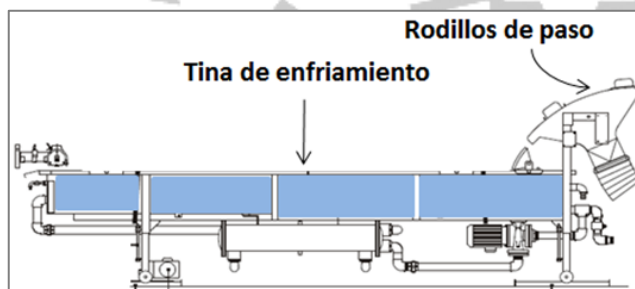
el PET fundido. En esta actividad la presión máxima de trabajo es de 100 bares aproximadamente, lo cual indica que el filtro se encuentra saturado y que necesita ser reemplazado.

- **Solidificar**

Después de ser filtrado el BoPET fundido sale en forma de hilos, los cuales se sumergen en una tina de enfriamiento temperada a 30°C donde se solidifica para después ser jalados por un rodillo de paso hacia el siguiente equipo. Ver figura 1.3

Figura 1.3

Esquema de la tina de enfriamiento



Fuente: Erema (2019)
Elaboración propia

- **Pelletizar**

Los hilos BoPET son jalados por un rodillo de paso hacia un rodillo dentado que corta el hilo formando los pellets, esta acción es denominada como pelletizar.

- **Cribar**

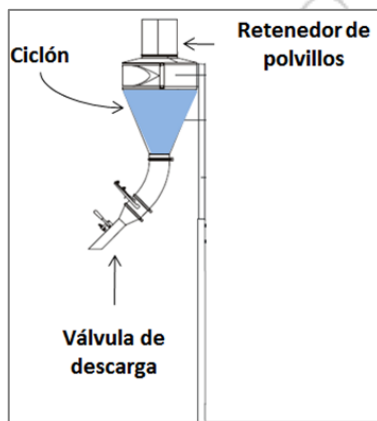
Después de pelletizar los hilos BoPET estos son cribados mediante una rendija metálica con orificios de 1 centímetro que retienen los pellets que tengan una longitud mayor al diámetro comentado, posterior a esto son transportados por un equipo soplador hacia el ciclón.

- **Centrifugar**

Los pellets son llevados mediante un equipo soplador al ciclón donde se centrifugan, separando las partículas en suspensión de los pellets que caen por la parte inferior del equipo. Ver figura 1.4

Figura 1.4

Esquema del ciclón



Fuente: Erema (2019)
Elaboración propia

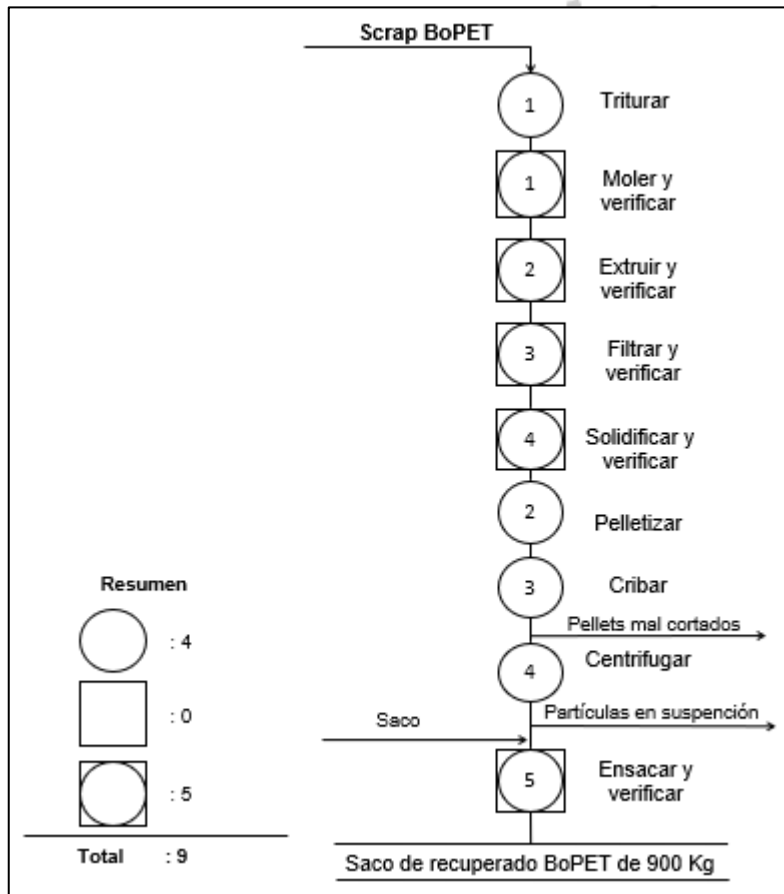
- **Ensacar**

Después de ser centrifugados, los pellets caen a un saco, cada saco tiene 900 kg de recuperado BoPET.

Para tener una idea más clara de las operaciones del proceso y de la línea de producción se realiza un diagrama de operaciones y un esquema de la línea de producción respectivamente. Ver figura 1.5.

Figura 1.5

DOP del proceso de recuperado BoPET



Elaboración propia

Opp Film S.A.C. posee un stock de 2 331 toneladas de recuperado BoPET, gran parte de este material está almacenado y data desde el 2014 hasta el 2018 absorbiendo humedad debido a la naturaleza higroscópica del PET, se denomina higroscópica a la capacidad de absorber agua, esta característica propia del material genera una reducción en el peso molecular afectando las propiedades mecánicas. En la tabla 1.1 se muestra el detalle del stock recuperado de BoPET por año.

Tabla 1.1

Stock de recuperado BoPET

Año	Recuperado BoPET (Tn)	Recuperado BoPET metalizado (Tn)	Recuperado BoPET mate (Tn)	Total (Tn)
2014	1 135	8		1 143
2015	178	23	3	204
2016	-		16	16
2017	554	169	14	737
2018	464	131	7	602
Total	2 331	331	40	2 702

Elaboración propia

Como se observa en el cuadro el recuperado BoPET es el material de mayor volumen almacenado, de las 2 702 toneladas específicamente 2 331 toneladas son de recuperado BoPET que representan el 86,27% de todo lo almacenado. Cabe mencionar que tanto el recuperado BoPET metalizado como mate son materiales que han pasado por procesos posteriores de recubrimiento o formulaciones especiales que no son reutilizables en las líneas de extrusión, por lo que el principal foco fue el recuperado BoPET cristal además de ser el de mayor volumen.

Inicialmente se realizaron pruebas extruyendo el material recuperado BoPET directamente en las líneas de extrusión y no se obtuvieron buenos resultados: Las líneas de producción tuvieron mayor inestabilidad que la usual, además de no cumplir con las especificaciones técnicas, específicamente en las propiedades mecánicas como elongación y resistencia.

Debido al gran stock que se tiene de recuperado BoPET y la dificultad de utilizarlo se planteó la posibilidad de procesar el material, específicamente que pase por un proceso de polimerización, reacción química en la que los monómeros se unen para formar una molécula de mayor peso molecular denominada polímero. El peso molecular está directamente relacionado con las propiedades físicas de los productos a extruir como tracción y elongación, se define como tracción a la propiedad mecánica a la cual un cuerpo está sometido a dos fuerzas en sentidos opuestos y elongación a la deformación porcentual de un cuerpo con respecto a su longitud inicial. Para esto se determinó evaluar tanto la viabilidad técnica en las líneas de extrusión BoPET y la viabilidad económica del proceso.



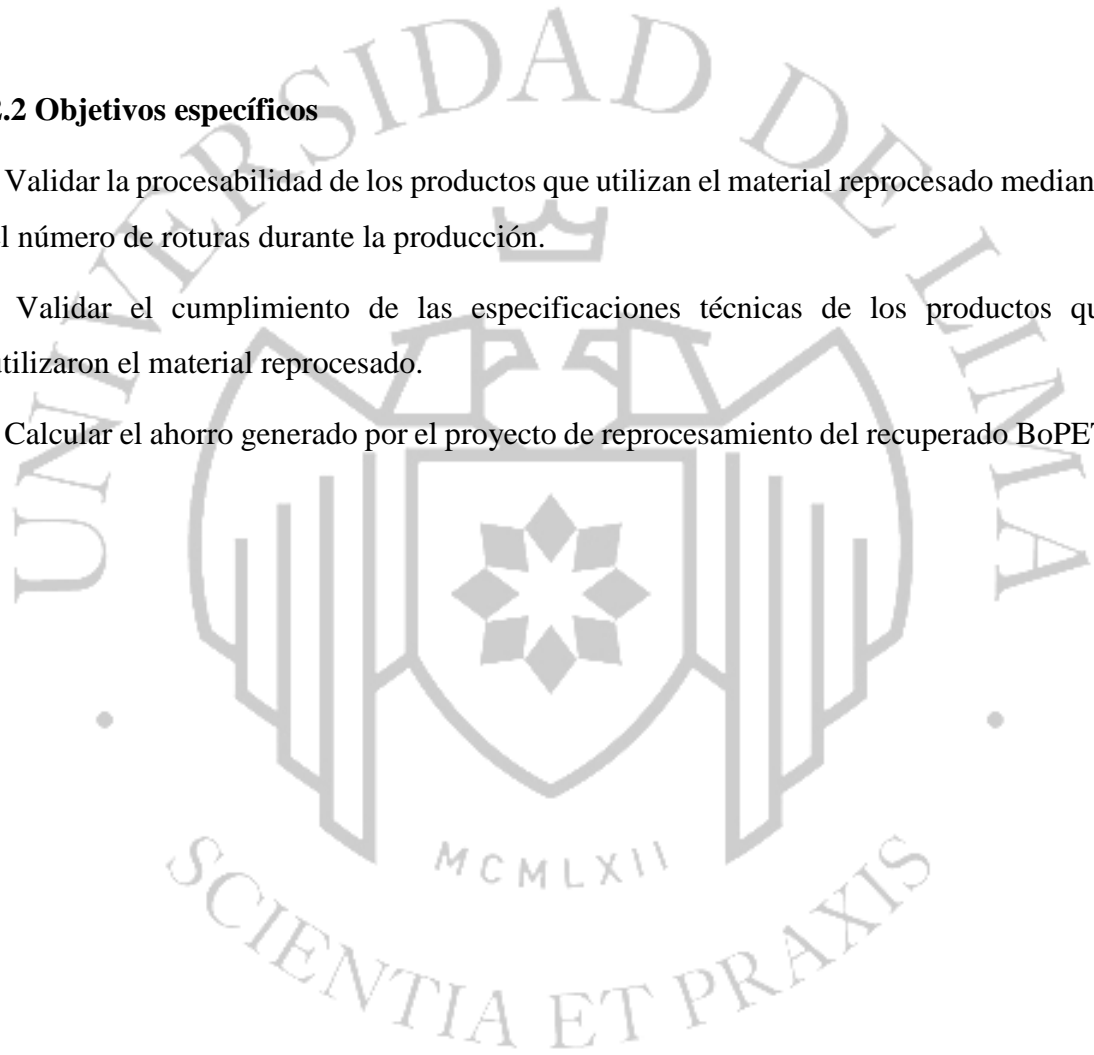
CAPÍTULO II: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica y económica del recuperado BoPET para su reutilización como materia prima.

2.2 Objetivos específicos

- Validar la procesabilidad de los productos que utilizan el material reprocesado mediante el número de roturas durante la producción.
- Validar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de los productos que utilizaron el material reprocesado.
- Calcular el ahorro generado por el proyecto de reprocesamiento del recuperado BoPET.



CAPÍTULO III: ALCANCE Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Alcance

Como se comentó en la descripción del problema, el elevado stock de recuperado BoPET cristal (Véase la tabla 1.1) era un tema urgente a tratar tanto para las área de producción, área técnica y la gerencia de planta encomendado por el mismo directorio de la empresa como prioridad. Para ello se implementará un proceso de polimerización que permita reutilizar el material como materia prima para el proceso de extrusión en las líneas BoPET, que cuyo producto cumpla con las especificaciones técnicas de calidad y que sea viable económicamente.

3.2 Limitaciones de la investigación

Debido a que la proyección de ventas es de carácter confidencial se realizarán los cálculos con base en lo producido el año 2018. Así mismo se tomó como referencia el costo de recuperado BoPET como costo inicial agregándole los costos de procesamiento de mano de obra y costos de consumo de energía.

CAPÍTULO IV: JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Justificación técnica

Antes de iniciar el proyecto se tomó en cuenta diferentes métodos de polimerización, ya que existen 2 tipos de polimerización industrial para PET en la actualidad estos son: Polimerización en estado fundido y polimerización en estado sólido, esta última es la que se empleó para el proyecto. Para llevar a cabo la polimerización se necesita un reactor en el cual ocurren las siguientes 4 etapas: Precalentamiento, cristalización, polimerización y enfriamiento. En todas las etapas mencionadas las variables a controlar fueron temperatura (°C), tiempo (Horas). Además, cuantificar la humedad (PPM) y la viscosidad intrínseca de los pellets.

Este proceso de polimerización en estado sólido es usado en las empresas de producción de plásticos para utilizar el scrap de PET, se denomina scrap a la palabra en inglés que se utiliza como referencia a los residuos materia prima de un proceso industrial.

4.2 Justificación económica

El reprocesamiento del recuperado BoPET restituye las propiedades físicas del material permitiendo reutilizarlo, como consecuencia se reduce el consumo de materia prima virgen. Al comparar los costos del material reprocesado con la materia prima virgen un ahorro en la formulación de la producción, ya que el coste de una formulación estándar es de \$1,46 por kilo mientras que utilizando el material reprocesado el coste de formulación se reduce a \$ 1,28 por kilo.

4.3 Justificación ambiental

Este proyecto proporciona una opción de reciclaje industrial mediante el reprocesamiento del recuperado de tereftalato de polietileno, que conlleva a la reducción del consumo de materia prima virgen. La materia prima es obtenida de la refinación de combustibles fósiles específicamente de sus subproductos que pasan por procesos posteriores. De esta manera se reduce el impacto ambiental que se origina en la producción de las resinas de polietileno, mediante el uso eficiente de los insumos.



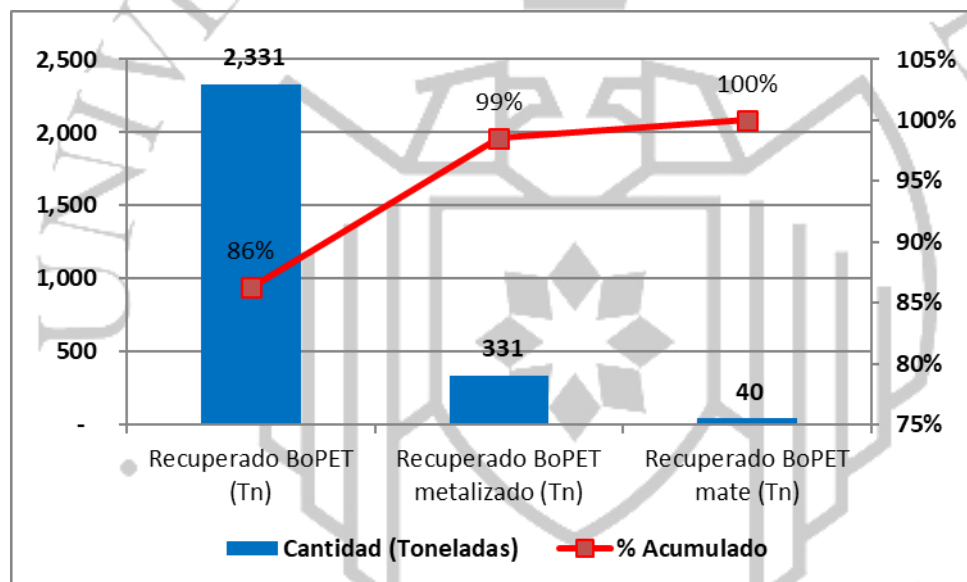
CAPÍTULO V: PROPUESTAS Y RESULTADOS

5.1 Propuesta

Como se mencionó en el la descripción del problema la mayor cantidad de material almacenado es BoPET Cristal, haciendo uso de un diagrama de Pareto se pudo graficar lo comentado, ya que representa el 86% de todo lo almacenado. Ver figura 5.1

Figura 5.1

Pareto del recuperado BoPET almacenado



Elaboración propia

Después de mostrar que el 86% de lo almacenado corresponde al recuperado BoPET, se coordinó una secuencia de actividades en un plazo determinado para probar en el material reprocesado en espesores de 12, 11 y 10 micras, específicamente en ese orden, ya que a medida que el espesor se reduce la inestabilidad de la línea aumenta, la cual se puede ver reflejada en roturas de la película, así como los responsables de cada etapa que se puede ver en la figura 5.2.

Figura 5.2

Diagrama de Gantt

Item	Descripción de la actividad	Involucrados	Días
1	Traslado del BoPET Cristal al reactor	Diego Santiago/Luis Silva	1 2 3
2	Polimerización de BoPET cristal	Diego Santiago/Luis Silva/Juan Nano	4 5 6 7 8 9
3	Traslado del BoPET reprocesado a las líneas de extrusión	Diego Santiago/Luis Silva	10 11 12
4	Análisis de propiedades	Diego Santiago/Jorge Herrera	13
5	Evaluación económica	Diego Santiago	14 15
6	Elaboración del informe técnico	Diego Santiago/Juan Nano	16

Elaboración propia

5.2 Resultados

5.2.1 Resultados de la evaluación técnica.

Para iniciar el proceso el reactor es cargado mediante sopladores, lo cuales impulsan los pellets al interior del mismo, cada batch que se procesó en el reactor contenía 4,5 toneladas cada uno. A continuación, se describe las etapas de la polimerización:

- **Precalentar**

Etapa en la que los pellets de PET empiezan a ganar la temperatura previa a la cristalización, este rango va desde la temperatura ambiente hasta los 150 °C. Esta es una etapa de paso definida por la capacidad del reactor de llegar a esta temperatura, la cual dura un promedio de 3 horas.

- **Cristalizar**

Se define como cristalizar al proceso de purificación de un sólido, en este caso se busca la reducción de la humedad interna de los pellets BoPET. En esta etapa el rango de temperatura va desde los 150 °C hasta los 175 °C en un período de tiempo de 4 a 6 horas, cabe mencionar que el vacío en el reactor es de - 0.1 bares tanto en esta etapa como en las posteriores. El objetivo de esta etapa es reducir la humedad interna de los pellets cuantificada por las PPM's, se tenía como resultado pellets que iban de 300 a 700 PPM después de la etapa de cristalización.

- **Polimerizar**

En la etapa de polimerización el rango de temperatura va desde 175 a 260 °C como máximo ya que esta es su temperatura de fusión, para efectos prácticos se decidió trabajar con 235°C durante un rango de 8 a 12 horas.

- **Enfriar**

Esta etapa dura aproximadamente 3 horas, tiene como fin no generar riesgos de quemadura a los trabajadores al momento de ensacar los pellets procesados.

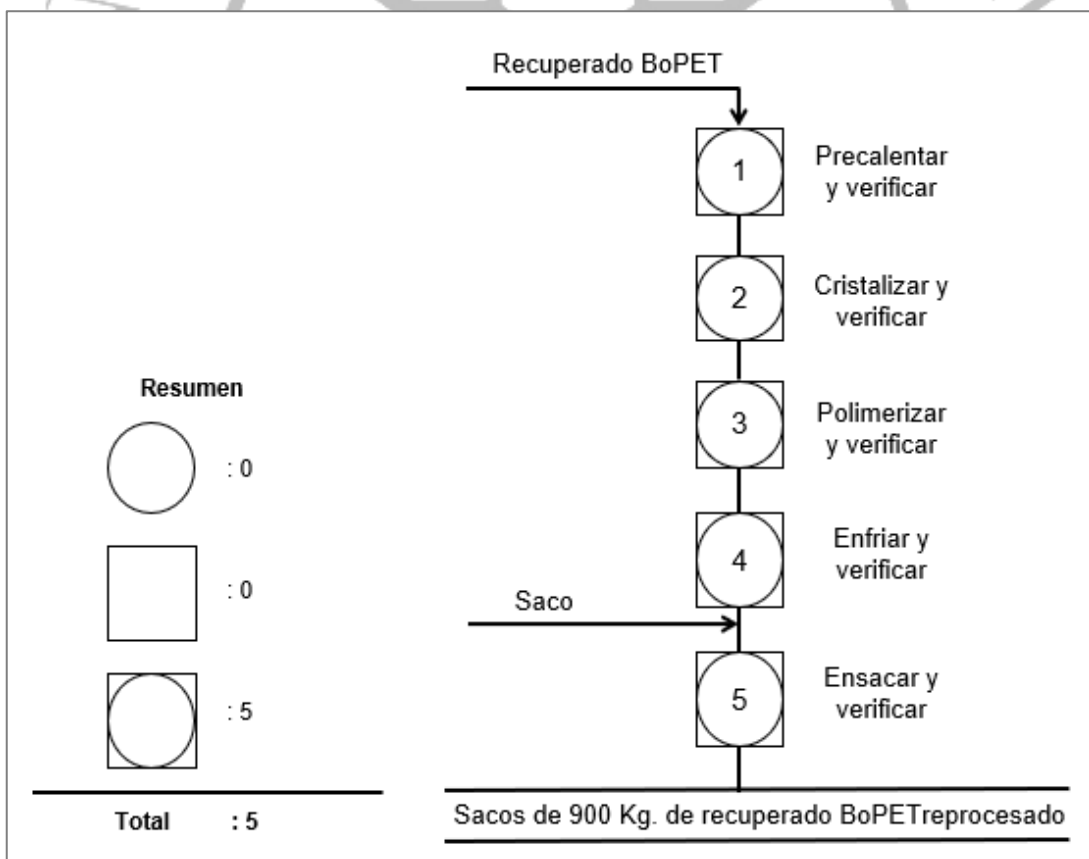
- **Ensacar**

Después de que los pellets se han enfriado se regresan a las bolsas de 900 kg cada una para su traslado al área de extrusión de la línea BoPET.

Se esquematiza las operaciones del proceso mediante un diagrama de operaciones. Ver figura 5.3.

Figura 5.3

DOP del proceso de polimerización del recuperado BoPET



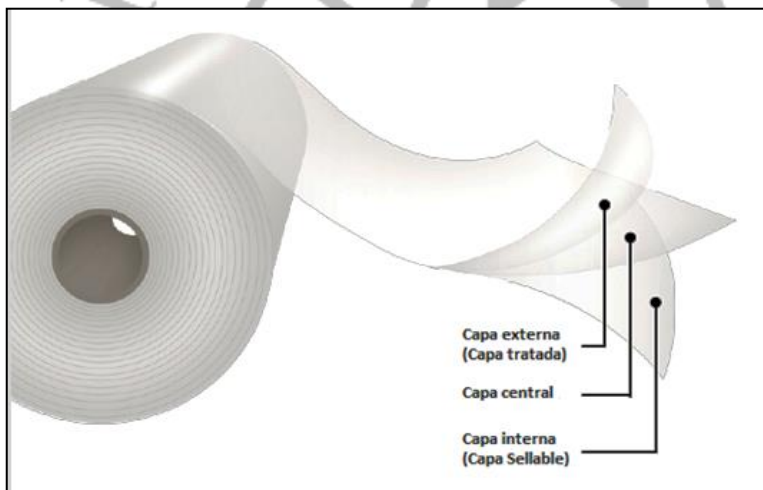
Elaboración propia

Una vez llevados los sacos de 900 kg de pellets reprocessados se dosifica por la tolva auxiliar de la extrusora principal. Antes de detallar el proceso de extrusión de las películas se cree conveniente describir el producto que se obtiene de este proceso:

Las películas BoPET (Polietileno biorientado) constan de 3 capas: Una capa interna (Capa sellable), una capa central que tiene como función proporcionar la mayor parte del espesor solicitado que puede ir desde 10 hasta 50 micras, y la capa externa (Capa tratada), esta capa es tratada por una descarga de alta frecuencia que busca aumentar la tensión superficial facilitando la impresión en esta. Ver figura 5.4

Figura 5.4

Película BoPET



Elaboración propia

A continuación, se detalla el proceso de extrusión para la producción de películas de BoPET:

- **Extruir**

Como se comentó previamente, la película consta de 3 capas: La capa central principalmente compuesta por homopolímero, molécula de cadena larga formada por la unión de un mismo monómero, moléculas poliméricas compuestas por la unión de 2 y 3 monómeros distintos respectivamente. Las 3 capas pasan por un proceso de fundido por extrusoras, las temperaturas de trabajo para estos componentes pueden variar dependiendo del material.

- **Unir capas/Ajustar espesor**

Las capas fundidas se superponen con ayuda del dado, estructura metálica en la que la resina fundida se unen para formar la película, a su salida los pernos termoexpansores ajustan el espesor de la película para que pueda ser lo más uniforme posible dándole el espesor deseado.

- **Enfriar**

La película es enfriada por el contacto de un cilindro cromado que a su vez es temperado con agua (32°C) de chiller mediante una chaqueta interna. La película se adhiere al cilindro cromado debido a la polaridad que ejerce una banda denominada Pinning que trabaja en un rango de $10 \text{ kV} \pm 5$, esta genera la polaridad que hace que la película se adhiera al rodillo cromado, tanto la actividad previa de unir capas y la de enfriar se realiza en el equipo Chill Roll.

- **Estirar en sentido longitudinal**

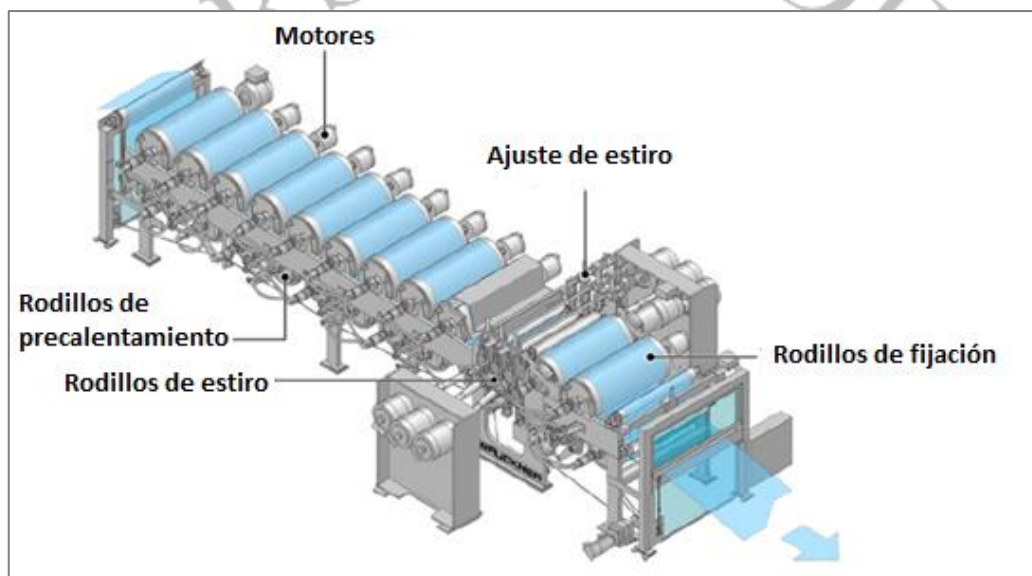
Después de ser enfriada la película pasa al equipo MDO (Machine direction orientation). Este equipo consta de 3 zonas: Precalentamiento, estiro y fijación.

El precalentamiento se realiza mediante un juego 14 de rodillos, 6 cromados y 8 teflonados. Tienen como función de elevar la temperatura de la película para que esta pueda ser estirada mediante un aumento de velocidades en los rodillos de estiro. La etapa

de estiro está conformada por 6 rodillos cromados, que pueden estirarse en un ratio que va desde 4 a 5,4 de su longitud inicial. Después pasa a la zona de fijación en donde la película tiene una contracción imperceptible. El agente térmico que calienta los rodillos es aceite y el que lo enfría es agua de chiller, estos dos circulan por chaquetas distintas dentro de los cilindros, cabe mencionar que las temperaturas de trabajo dependen de los terpolímeros y/o copolímeros que hayan sido dosificados. Para mayor detalle del equipo véase la figura 5.5

Figura 5.5

Equipo de estiro longitudinal (MDO)



Fuente: Morawa (2014)

Elaboración propia

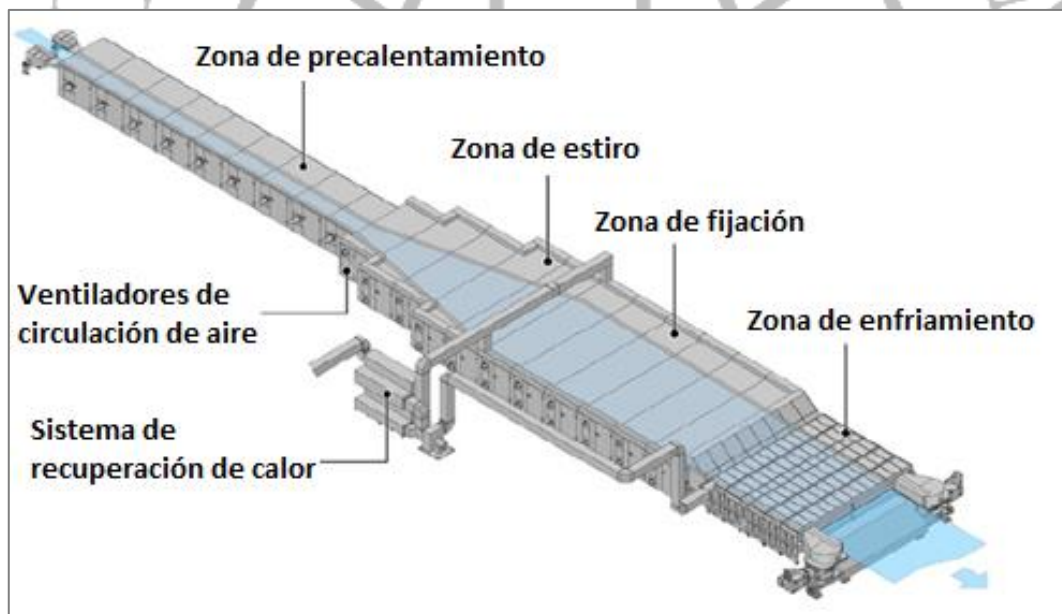
- **Estirar en sentido transversal**

Una vez orientada en sentido longitudinal la película pasa al equipo de estiro transversal. La película es sujeta por unas mordazas metálicas que la transportan por las 4 zonas del equipo TDO (Transversal direction orientation). Zona de precalentamiento, zona de estiro, zona de fijación y zona de enfriamiento. Cada zona es configurada con temperaturas individuales que van acorde a la capacidad en la que el equipo produce.

La zona de precalentamiento, al igual que en el MDO, tiene la función elevar la temperatura de la película para que pueda pasar a la zona de estiro. Ya en la zona de estiro la longitud transversal se empieza a realizar el estiro gradualmente. Después pasa a la zona de fijación, en donde la película sufre una ligera contracción de milímetros. La última zona del estiro transversal es la de enfriamiento, al igual que las zonas anteriores el agente térmico es el aire; sin embargo, en las 3 primeras zonas el aire tiene un sistema de calentamiento que genera el calentamiento uniforme de la película, mediante “Cajas sopladoras”, cajas metálicas con orificios a lo largo de la cara que da a la película. En la zona de enfriamiento se utiliza el aire del ambiente, por lo tanto se enfría a temperatura ambiente. Para mayor detalle del equipo véase la figura 5.6

Figura 5.6

Equipo de estiro transversal (TDO)



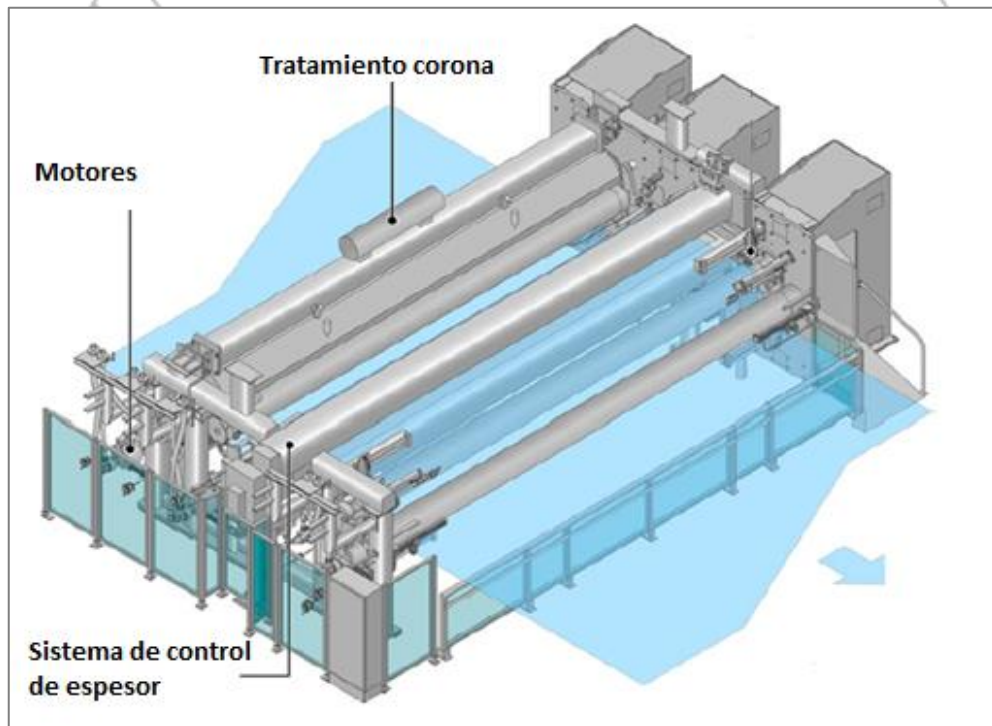
Fuente: Morawa (2014)
Elaboración propia

- **Tratador de tensión superficial**

Después de salir del equipo de estiro transversal la película va al equipo Pull roll, equipo conformado por un juego de rodillos que tienen como función llevar la película hasta el tratador conformado por un rodillo dieléctrico, material de baja conductividad eléctrica, es decir aislante, en donde se hace el “Tratamiento corona”, que es una descarga de alta frecuencia que tiene como fin elevar la tensión superficial de la película, específicamente en la capa externa o tratada para que tenga mayor adherencia la tinta al momento que el cliente imprima sobre ella. Para mayor detalle del equipo véase la figura 5.7

Figura 5.7

Tratador Corona



Fuente: Morawa (2014)

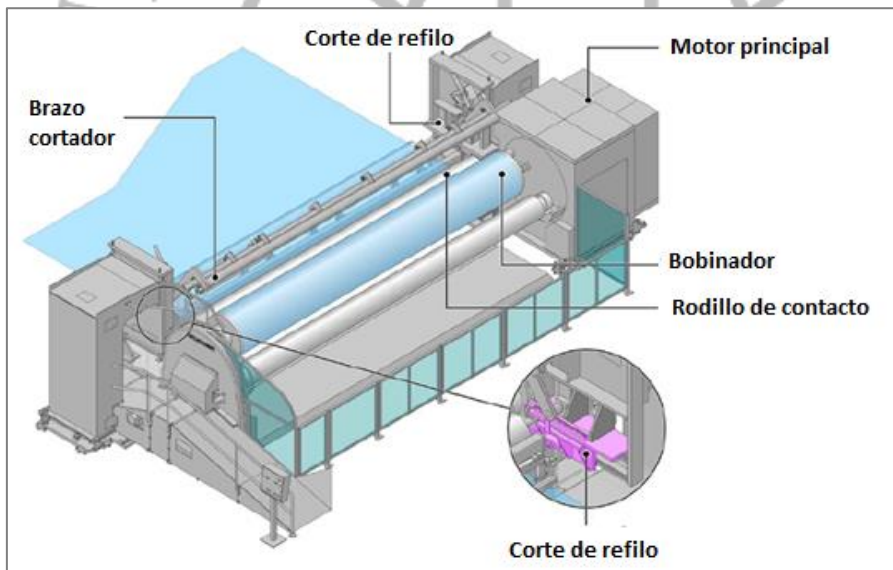
Elaboración propia

- **Bobinar**

Después de aumentar la tensión superficial de la película, esta es bobinada (Winder en inglés) sobre cores metálicos y enviada a los rack's, donde se almacenan para su posterior programa de corte acorde a los pedidos solicitados por el área comercial. Después de terminar el bobinado del rollo madre se corta cierto metraje del mismo para las evaluaciones de propiedades físicas: Resistencia a la tracción y elongación, y propiedades como: Temperatura de inicio de sello en la cara no tratada (Cara sellable), coeficiente de fricción cinético en la cara no tratada y tensión superficial en la cara tratada. Además, de posibles defectos de apariencia que pudieran tener. Para mayor detalle del equipo véase la figura 5.8

Figura 5.8

Equipo bobinador



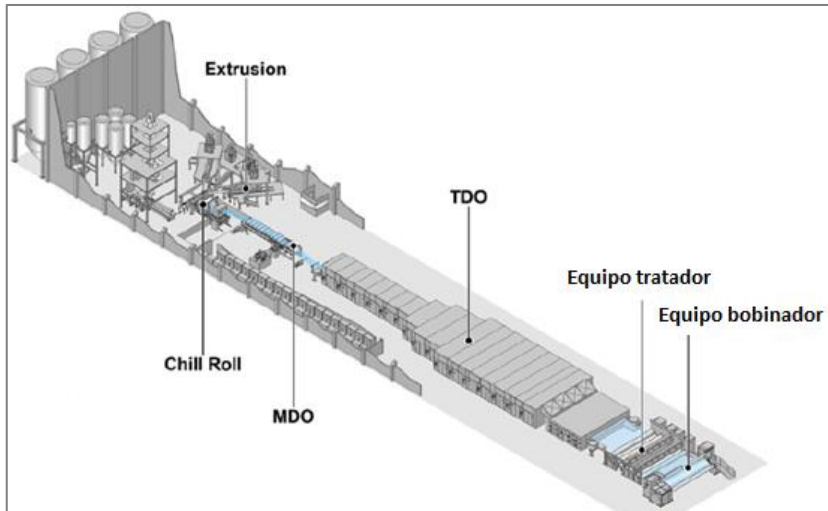
Fuente: Morawa (2014)

Elaboración propia

Para mostrar la secuencia de los equipos véase la figura 5.9.

Figura 5.9

Línea de producción de películas BoPET

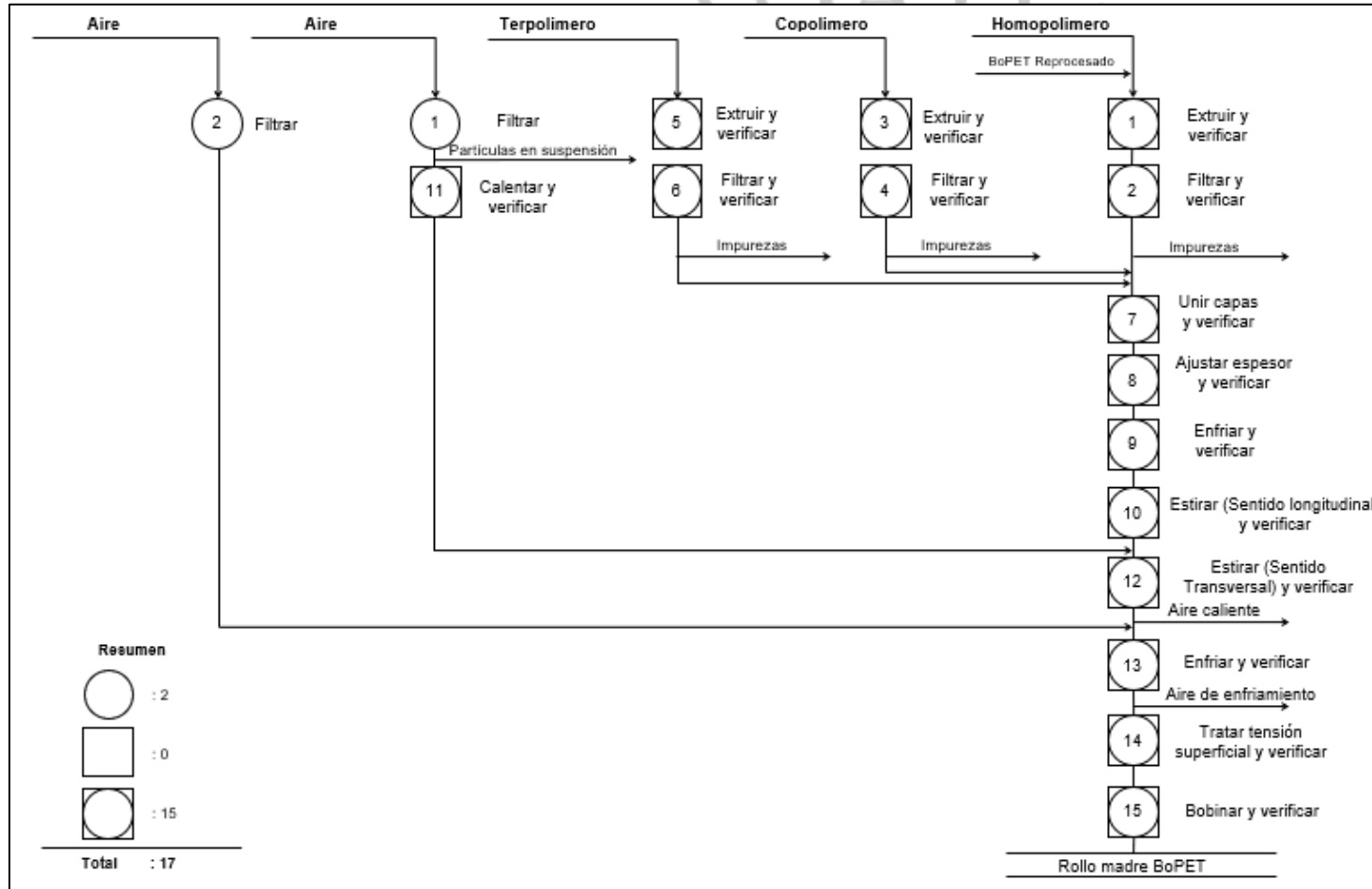


Fuente: Morawa (2014)
Elaboración propia

Para esquematizar el proceso se realizó el diagrama de operaciones que se puede ver en la figura 5.10

Figura 5.10

DOP de la producción de películas BoPET

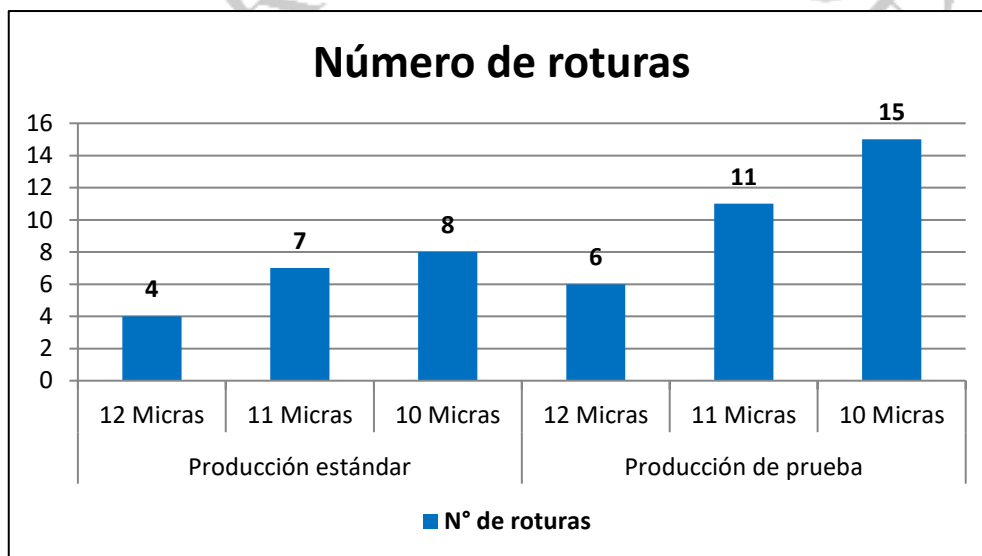


Elaboración propia

Se realizaron 3 lotes de producción de prueba: El primer lote fue de 12 micras, el segundo de 11 y el tercero de 10, ya que son los espesores más propensos a tener problemas de estabilidad en el proceso debido al material a evaluar. Cada lote fue de 30 Toneladas cada uno en los cuales se comparó su procesabilidad con lotes previos, número de roturas durante el transcurso de la producción, y propiedades físicas como tracción y elongación. Ver figura 5.11.

Figura 5.11

Comparativa del número de roturas

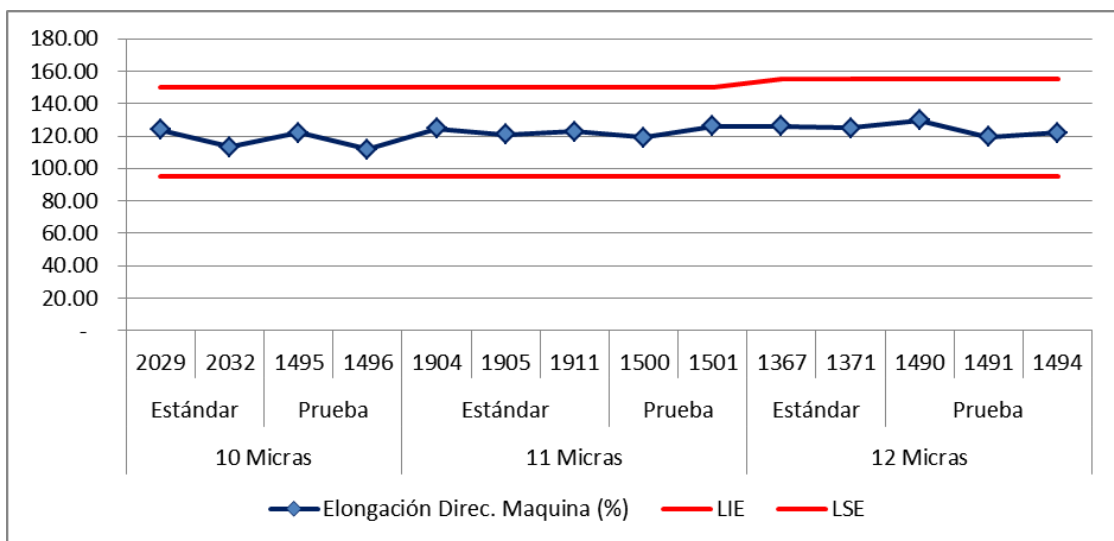


Elaboración propia

Durante la producción de prueba se observó mayor inestabilidad en los espesores de 11 y 10 expresada en números de rotura que tuvo durante la prueba. Después de esto y una vez obtenido el rollo madre se saca una muestra para medir las propiedades de la película, para el proyecto se enfocó en las propiedades físicas como lo son: elongación y tracción tanto en dirección máquina longitudinal y dirección transversal graficadas en hojas de control como se ve en las figuras 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15.

Figura 5.12

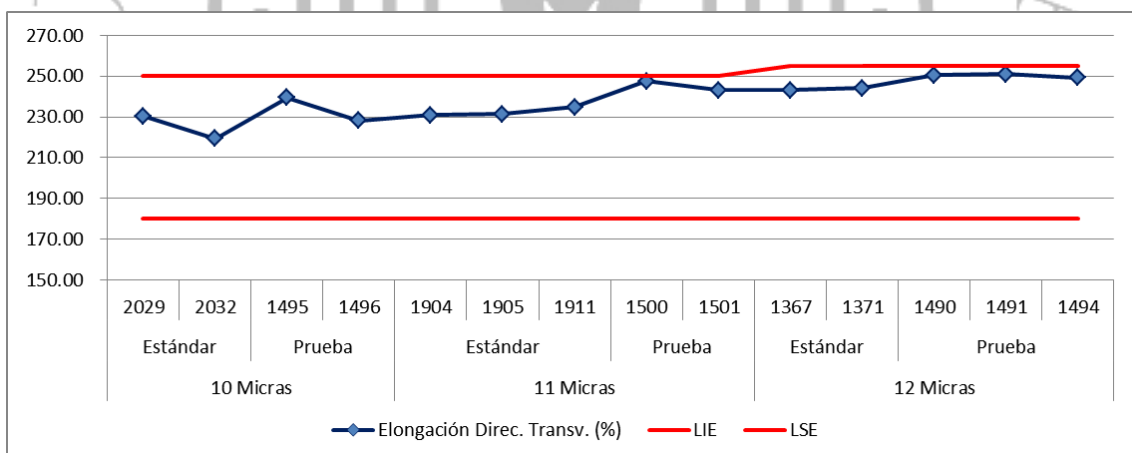
Cartas de control: Elongación dirección máquina (%)



Elaboración propia

Figura 5.13

Carta de control: Elongación dirección transversal (%)

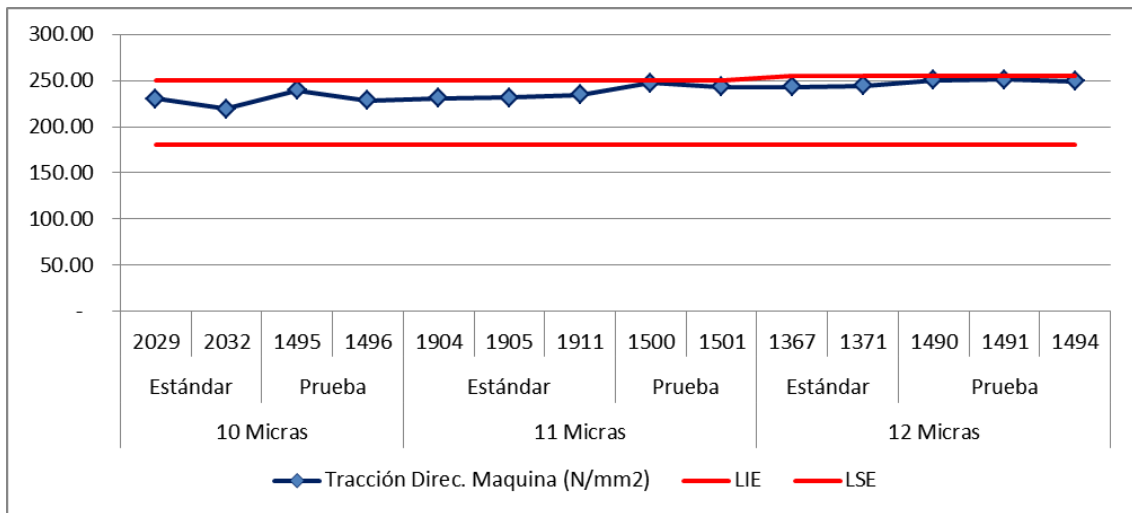


Elaboración propia

Con respecto a la elongación tanto dirección máquina como transversal mantiene el mismo comportamiento que las producciones estándar, en ambos casos cumple con las especificaciones técnicas.

Figura 5.14

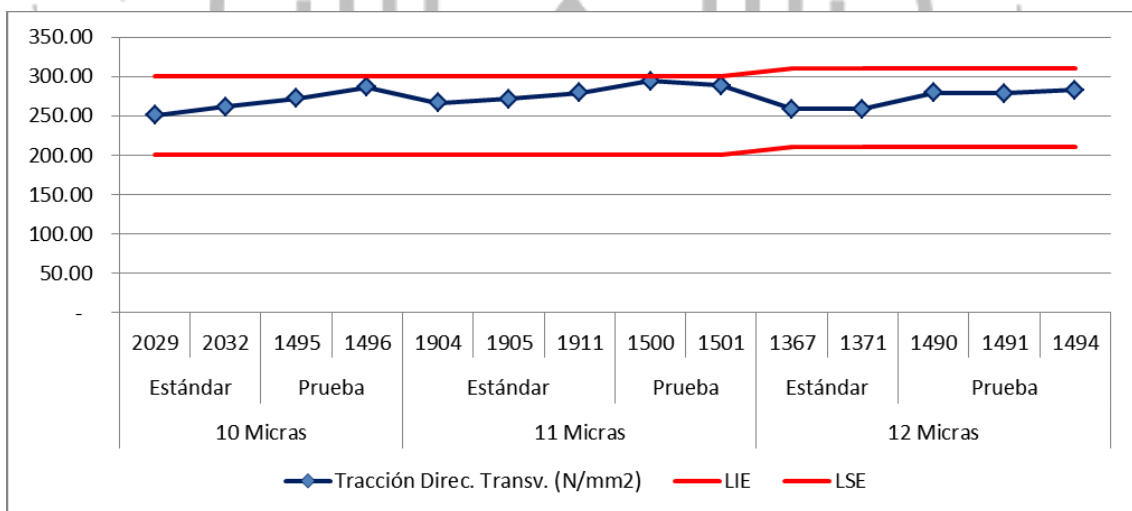
Carta de control: Tracción dirección máquina (N/mm²)



Elaboración propia

Figura 5.15

Carta de control: Tracción dirección transversal (N/mm²)



Elaboración propia

De lo mostrado en las hojas de control de la tracción se observa un ligero aumento de los valores tanto en el sentido máquina como transversal, aunque en ambos casos dentro de las especificaciones técnicas.

5.2.2 Resultados de la evaluación económica

Para evaluar económicamente el proyecto primero se tomó como referencia lo producido en las líneas de extrusión BoPET del año 2017, específicamente por espesor debido a la observación en la evaluación técnica que la que se restringe el uso del recuperado BoPET reprocesado a productos de 12 micras a más. Para mayor detalle ver la tabla 5.1

Tabla 5.1

Producción por espesores del 2018

Espesor	Producción 2018 (Tn)
10 Micras	1 905
11 Micras	4 273
12 Micras	13 183
15 Micras	49
18 Micras	361
19 Micras	162
23 Micras	807
36 Micras	119
50 Micras	105
Total	20 964

Elaboración propia

Lo producido en el año 2017 en espesores iguales o mayores a 12 micras fueron 14 786 toneladas, para realizar el cálculo del ahorro generado por el proyecto se usó el costo por Kilo del espesor de 12 micras ya que desde este espesor el producto mantiene estabilidad durante su producción. Después se costó la receta de dosificación en una producción estándar, ver tabla 5.2, y en la producción de prueba para determinar cómo se puede ver en las tablas 5.3

Tabla 5.2

Costeo de producción estándar (\$/Kg)

Capas	Espesor (Micras)	Capa %
Micraje	12,2	100,00%
Capa central	10,2	83,61%
Capa tratada	1	8,20%
Capa no tratada	1	8,20%

Capa	Materia prima	Capa %	Película %	Costo (\$/Kg)	Costo (\$)
Capa central	Homopolímero	100,00%	83,61%	\$1,43	\$1,20
		100,00%	83,61%		\$1,20
Capa tratada	Terpolimero	97,00%	7,95%	\$1,37	\$0,11
	Masterbatch antibloqueo	3,00%	0,25%	\$1,97	\$0,00
		100,00%	8,20%		\$0,11
Capa no tratada	Copolimero	77,60%	6,36%	\$1,38	\$0,09
	Terpolimero	10,00%	0,82%	\$4,69	\$0,04
	Microesfereas	5,00%	0,41%	\$2,14	\$0,01
	Masterbatch antifriccionante	3,70%	0,30%	\$2,02	\$0,01
	Masterbatch antibloqueo	3,70%	0,30%	\$1,81	\$0,01
		100,00%	8,20%		\$0,15
				Costo (\$/Kg)	\$1,46

Elaboración propia

Específicamente el material recuperado BoPET tiene un costo inicial de \$ 0,14 por kilogramo, después de reprocesarlo para el proyecto se incurrió tanto a costos adicionales como mano de obra y consumo de energía que se sumaron al costo inicial del material recuperado para poder calcular el costo del recuperado BoPET reprocesado que se detallan a continuación en la tabla 5.3

El proceso adicional a las operaciones regulares fue la polimerización, la cual se llevó a cabo con la ayuda de dos operadores que estaban encargados de la carga del material a procesar al reactor, el monitoreo de las variables y la descarga.

Para simplificar el cálculo se tomará en cuenta 4 semanas por mes, 6 días a la semana, 3 turnos por día cada uno de 8 horas para las horas hombres:

$$H - H (Mes) = 2 Op \times \frac{4 Sem}{Mes} \times \frac{6 Días}{Sem} \times \frac{3 Turnos}{Día} \times \frac{8 Horas}{Turno} = \frac{384 H - H}{Mes}$$

La remuneración de los operarios es de 1 500 soles al mes, para igualar unidades la unidad monetaria será el dólar, con un tipo de cambio de 3.25 soles por dólar:

$$\text{Costo MO (H - H)} = \frac{1\,500 \text{ Soles}}{\text{Mes}} \times \frac{1 \text{ Dólar}}{3,25 \text{ Soles}} \times \frac{1 \text{ Mes}}{384 \text{ H - H}} = \frac{4,81 \text{ Dólares}}{\text{H - H}}$$

Cada batch de material procesado tiene un tamaño de 4 500 kilogramos y toma un tiempo de 22 horas para su procesamiento, con estos datos se puede calcular el costo de mano de obra por kilo producido:

$$\text{Costo MO (Kg)} = \frac{4,81 \text{ Dólares}}{\text{H - H}} \times \frac{1 \text{ Batch}}{4500 \text{ Kg}} \times \frac{22 \text{ Horas}}{1 \text{ Batch}} = \frac{0,023 \text{ Dólares}}{\text{Kg}}$$

Adicional al costo de mano de obra también se incurrió en costo de energía, para esto se obtuvo el consumo de energía registrado en la ficha técnica del reactor que es de 66,21 Kw-h con un coste de 0,07 dólares por Kw-h:

$$\begin{aligned} \text{Costo energía (\$/Kg)} &= \frac{66,21 \text{ Kw}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ Batch}}{4500 \text{ Kg}} \times \frac{7 \text{ Dólares}}{1 \text{ Kw}} \times \frac{22 \text{ Horas}}{1 \text{ Batch}} \\ &= \frac{0,022 \text{ Dólares}}{\text{Kg}} \end{aligned}$$

El costo del recuperado BoPET previo al reproceso es de 0,1454 dólares por kilogramo, para calcular el costo del reprocesado se agregaron los costos de mano de obra y costos de energía:

$$\begin{aligned} \text{Costo RR (\$/Kg)} &= \frac{0,14 \text{ Dólares}}{\text{Kg}} + \frac{0,02 \text{ Dólares}}{\text{Kg}} + \frac{0,02 \text{ Dólares}}{\text{Kg}} \\ &= \frac{0,19 \text{ Dólares}}{\text{Kg}} \end{aligned}$$

Una vez obtenido el costo del recuperado BoPET reprocesado, \$0,19 por kilo, se costeo nuevamente el producto terminado teniendo un costo de \$ 1,28 por kilo

Tabla 5.3

Costeo de producción de prueba (\$/Kg)

Capas	Espesor (Micras)	Capa %
Micraje	12,2	100,00%
Capa central	10,2	83,61%
Capa tratada	1	8,20%
Capa no tratada	1	8,20%

Capa	Materia prima	Capa %	Película %	Costo (\$/Kg)	Costo (\$)
Capa central	Homopolimero	85,00%	71,07%	\$1,43	\$1,02
	Recuperado Reprocesado	15,00%	12,54%	\$0,19	\$0,02
		100,00%	83,61%		\$1,02
Capa tratada	Terpolimero	97,00%	7,95%	\$1,37	\$0,11
	Masterbatch antibloqueo	3,00%	0,25%	\$1,97	\$0,00
		100,00%	8,20%		\$0,11
Capa no tratada	Copolimero	77,60%	6,36%	\$1,38	\$0,09
	Terpolimero	10,00%	0,82%	\$4,69	\$0,04
	Microesferas	5,00%	0,41%	\$2,14	\$0,01
	Masterbatch antifriccionante	3,70%	0,30%	\$2,02	\$0,01
	Masterbatch antibloqueo	3,70%	0,30%	\$1,81	\$0,01
		100,00%	8,20%		\$0,15
				Costo (\$/Kg)	\$1,28

Elaboración propia

Debido a corroborar la viabilidad técnica y económica se puso en marcha el proyecto para reprocesar el BoPET recuperado, entre las funciones que se encomendaron las principales fueron: Liderar, gestionar y coordinar la evaluación del proyecto que finalizó con un entregable emitido tanto a las Jefaturas involucradas, Gerencia de Planta y Gerencia Comercial. Además de dar las restricciones del consumo de recuperado BoPET reprocesado.

Como resultado final se logró reutilizar el material mermado de las líneas generando una reducción en el coste de la producción por kilo de la película. Con los datos obtenidos en la evaluación económica se pudo calcular el ahorro que implicaría el reproceso del recuperado BoPET reprocesado durante un año. Para mayor detalle ver tabla 5.4

Tabla 5.4

Ahorro generado por el proyecto

Ahorro por kilo producido (\$/Kg)	Producción anual de espesores mayores o iguales a 12 micras (Toneladas)	Ahorro generado por el proyecto (\$)
0,18	14 786,84	2 659 807,33

Elaboración propia

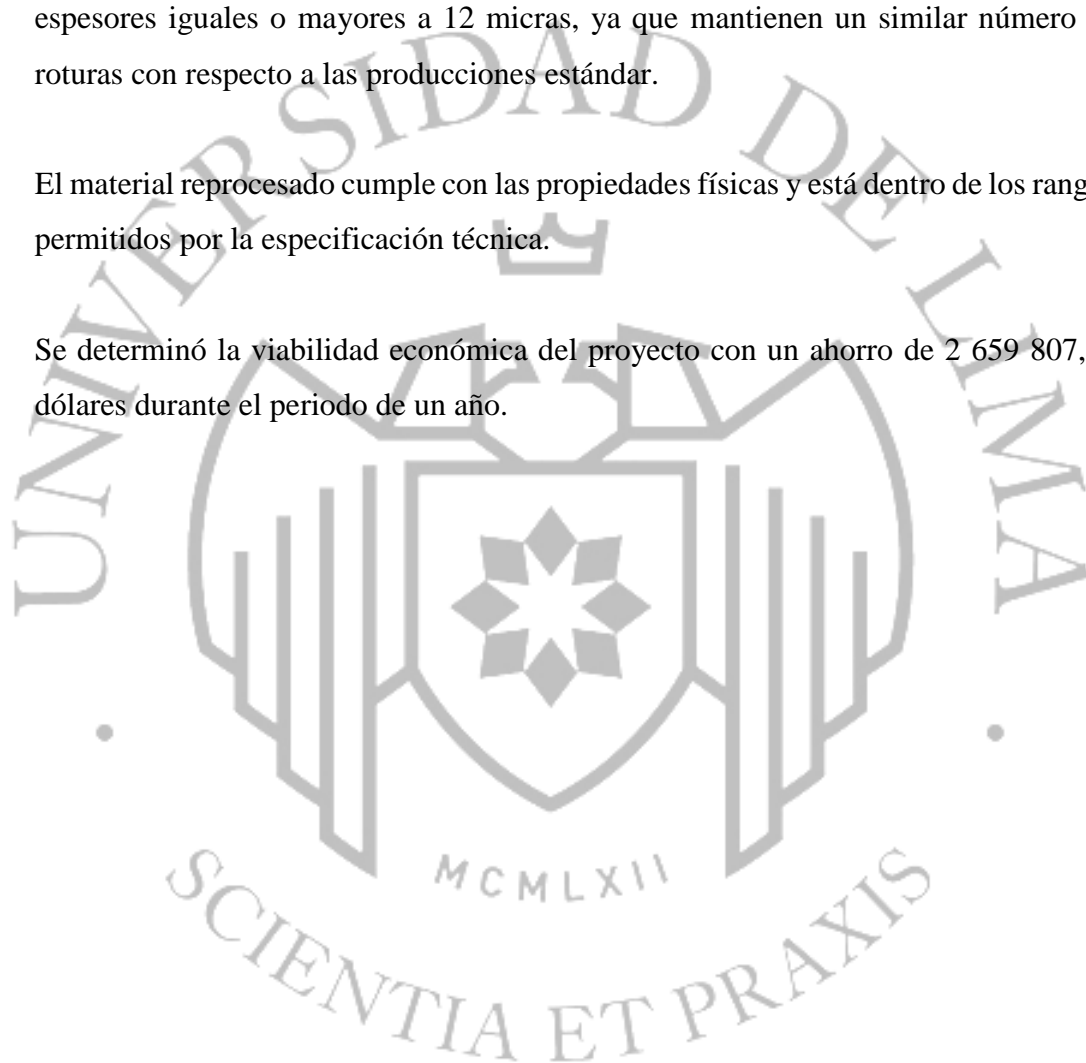
La realización del proyecto incurriría en el ahorro de 2 659 807,33 dólares durante 1 año en películas espesor igual o mayor a 12 micras.



CONCLUSIONES

Después de realizadas las pruebas para evaluar la viabilidad técnica y los cálculos para determinar la viabilidad económica se puede concluir lo siguiente:

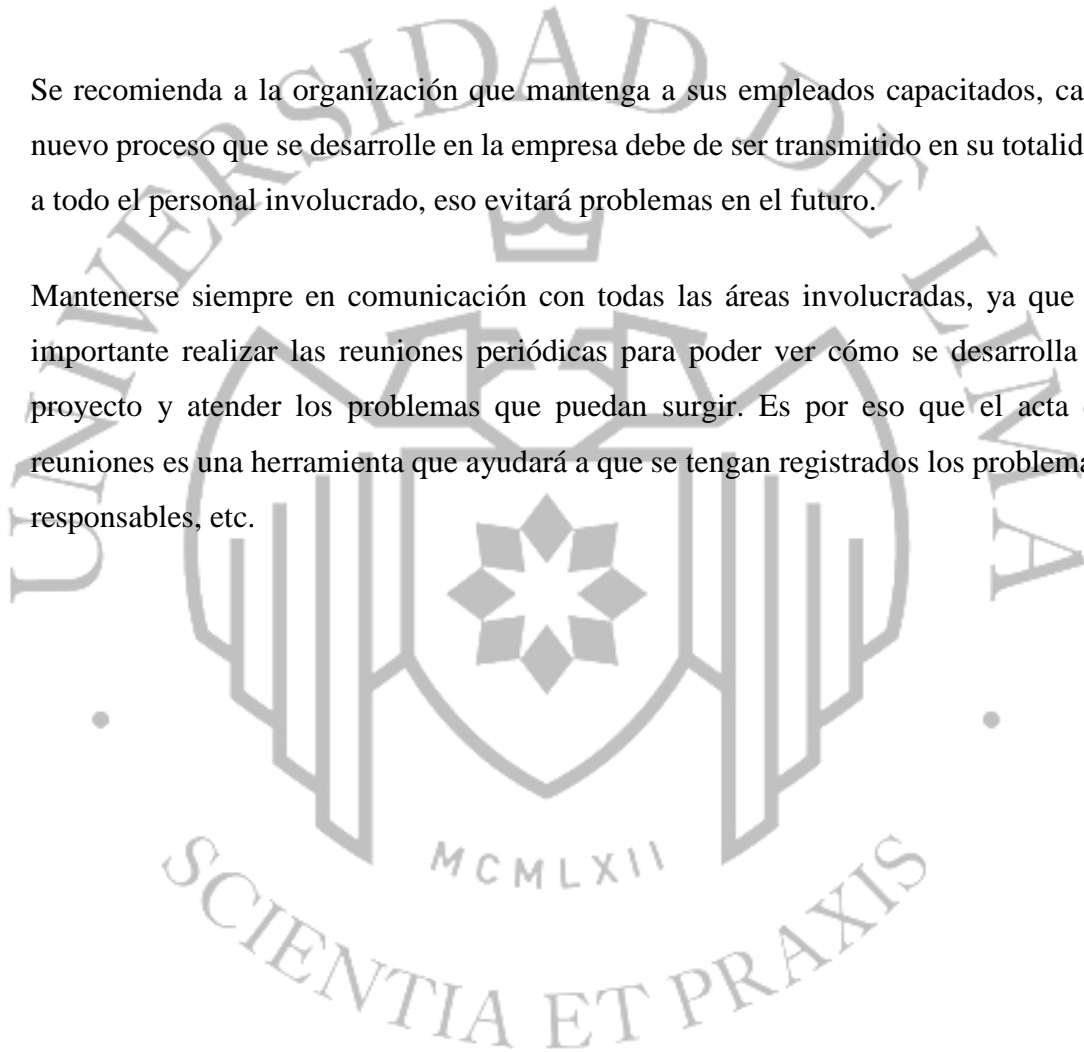
- La dosificación de recuperado BoPET reprocesado no afecta la procesabilidad de espesores iguales o mayores a 12 micras, ya que mantienen un similar número de roturas con respecto a las producciones estándar.
- El material reprocesado cumple con las propiedades físicas y está dentro de los rangos permitidos por la especificación técnica.
- Se determinó la viabilidad económica del proyecto con un ahorro de 2 659 807,33 dólares durante el periodo de un año.



RECOMENDACIONES

Por lo observado durante el proyecto se recomiendan las siguientes acciones:

- Restringir el uso del recuperado BoPET reprocesado en espesores menores a 12 micras.
- Se recomienda a la organización que mantenga a sus empleados capacitados, cada nuevo proceso que se desarrolle en la empresa debe de ser transmitido en su totalidad a todo el personal involucrado, eso evitará problemas en el futuro.
- Mantenerse siempre en comunicación con todas las áreas involucradas, ya que es importante realizar las reuniones periódicas para poder ver cómo se desarrolla el proyecto y atender los problemas que puedan surgir. Es por eso que el acta de reuniones es una herramienta que ayudará a que se tengan registrados los problemas, responsables, etc.



BIBLIOGRAFÍA

- Bonilla, P. E., Díaz, G. B., Kleeberg, H. F., y Noriega, A. M. T. (2010). *Mejora continua de los procesos: Herramientas y técnicas*. Lima: Universidad de Lima, Fondo Editorial.
- Díaz, G. B., Noriega, M. T. (2017). *Manual para el diseño de instalaciones manufactureras y de servicios*. Lima: Universidad de Lima, Fondo Editorial.



REFERENCIAS

- Aimcal. (2018). Global trends in flexible packaging. Recuperado de https://www.aimcal.org/uploads/4/6/6/9/46695933/trovillion_presentation.pdf
- Erema. (2019). Sistema de reciclaje termoplástico. Recuperado de https://www.ereama.com/assets/media_center/folder/INTAREMA_T_TE_2014_07_ES.pdf
- Morawa. (2014). *Film processing advances*. Recuperado de <https://www.morawa.at/annotstream/2244005055704/PDF/Kanai-Toshitaka/Film-Processing-Advances.pdf>

