



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Química e Ingeniería Química
Escuela Profesional de Ingeniería Química

Uso de recuperado BOPET metalizado en la obtención de fleje PET para incrementar la rentabilidad en la empresa Oppfilm S.A.

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR

José Alfredo NÚÑEZ PEÑA

ASESOR

Dr. José Angel PORLLES LOARTE

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Núñez, J. (2023). *Uso de recuperado BOPET metalizado en la obtención de fleje PET para incrementar la rentabilidad en la empresa Oppfilm S.A.* [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	José Alfredo Núñez Peña
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43373271
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0003-5193-5041
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	José Angel Porlles Loarte
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	25629269
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-1517-6642
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Waldir Desiderio Estela Escalante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09548299
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Víctor Manuel Fernández Guzmán
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06690674
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Angel Porlles Loarte
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25629269

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.7. Diseño y/o fabricación de productos
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Empresa: OPPFILM S.A. País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lurín Calle: Avenida San Pedro Mz B Lt 48-A Latitud: -12.2803189 Longitud: -76.8762899
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Química https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de Procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02 Ingeniería de Materiales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.05.01 Ingeniería de Producción https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.03

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA

Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2023", bajo la Presidencia del **Dr. WALDIR DESIDERIO ESTELA ESCALANTE**; **Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN** (Miembro) y el **Dr. JOSÉ ANGEL PORLLES LOARTE** (Asesor); habiendo presentado para tal efecto el **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, titulada "**USO DE RECUPERADO BOPET METALIZADO EN LA OBTENCIÓN DE FLEJE PET PARA INCREMENTAR LA RENTABILIDAD EN LA EMPRESA OPPFILM S.A.**" después de **SUSTENTADA Y APROBADA** el trabajo de suficiencia profesional elaborado por el bachiller en Ingeniería Química: **JOSÉ ALFREDO NÚÑEZ PEÑA**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECIOCHO

(LETRAS)

(18)

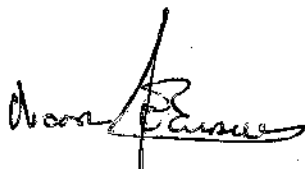
(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 16 de diciembre del 2023.



Dr. WALDIR DESIDERIO ESTELA ESCALANTE

Presidente



Dr. VÍCTOR MANUEL FERNÁNDEZ GUZMÁN

Miembro



Dr. JOSÉ ANGEL PORLLES LOARTE

Asesor



Dr. RUBEN ALFREDO PALOMINO INFANTE

Director de la E.P. de Ingeniería Química





Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Porlles Loarte José Angel en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N°000026-2024-D-FQIQ/UNMSM del trabajo de suficiencia profesional, cuyo título es **“USO DE RECUPERADO BOPET METALIZADO EN LA OBTENCIÓN DE FLEJE PET PARA INCREMENTAR LA RENTABILIDAD EN LA EMPRESA OPPFILM S.A.”**, presentado por el bachiller en Ingeniería Química Núñez Peña José Alfredo para optar el título Profesional de Ingeniera Química CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **7%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención el título correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: 25629269

Nombres y apellidos del asesor:

Porlles Loarte José Angel

Huella
digital



AGRADECIMIENTO

Este trayecto académico ha estado lleno de desafíos y aprendizajes, y no habría sido posible sin el respaldo incondicional de quienes me han acompañado en este recorrido.

En primer lugar, agradezco a mi familia por su constante respaldo y afecto.

A José Luis, mi padre, que con su apoyo ha sido mi pilar durante este largo proceso, brindándome fortaleza y motivación con sus consejos en cada etapa y dificultad de mi vida.

A Olga Esperanza, mi madre, le agradezco profundamente las noches de paciencia, las palabras llenas de amor y el apoyo inquebrantable que me ha brindado sin importar las circunstancia.

A Yesenia y Doménica, mi hermana y sobrina, que con su dulzura y nobleza me recargan de vida con cada uno de sus abrazos y que extraño a la distancia.

A Andrea y Caeli, mis amores, que llegaron en la mejor etapa de mi vida para hacerla mucho más bella, llena de amor, paz, tranquilidad y nuevas experiencias de vida. Las amo.

A Katherine y a Víctor, mis mejores amigos y mis hermanos de vida que siempre me han animado a conseguir mis metas y no rendirme.

Este logro es el resultado del esfuerzo y sacrificio de los considero y son MI FAMILIA, cada uno de ustedes ha dejado una marca indeleble en mi vida y mi corazón. Gracias por ser parte de este viaje y por compartir este momento de logro conmigo.

Con amor sincero e incondicional,

José Alfredo Núñez Peña

INDICE GENERAL

RESUMEN	4
ABTRACT	5
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Datos del lugar donde se desarrolla el trabajo	7
CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
2.1 Descripción del Problema	8
2.2 Objetivos	15
2.3 Justificación	15
2.4 Limitaciones	17
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	18
3.1 Antecedentes	18
3.2 Base teórica	19
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTOS	22
4.1 Determinación de la cantidad de merma acumulada	22
4.2 Procedimiento de caracterización del recuperado BoPET metalizado	23
4.3 Procedimiento de producción de Fleje PET	23
4.4 Determinación de las propiedades mecánicas	23
CAPÍTULO V. PROPUESTA DE SOLUCIÓN, RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5.1 Reflexiones sobre la propuesta de solución	26
5.2 Resultados de la evaluación de procesabilidad y calidad	27
5.3 Resultados de la evaluación económica	29
5.4 Discusión de Resultados	30
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	31
CAPITULO VII. RECOMENDACIONES	32
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS	33
CAPÍTULO IX. ANEXOS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de proceso de Bopet que indica el área de mejora en la empresa OPP FILM S.A.	14
Figura 2: Curva de calorimetría diferencia de barrido (DSC) del PET	21
Figura 3: Pareto de Recuperado BoPET acumulado	22
Figura 4: Diagrama de proceso de Flejes PET en la empresa OPP FILM S.A.	24
Figura 5: Resumen de Balance de Masa del Proceso BoPET y Flejes en la empresa OPP FILM S.A.	26
Figura 6: Extrusor y tina de enfriamiento	36
Figura 7: Rodillos de paso, horno de estiramiento y rodillos de estiramiento en frío	36
Figura 8: Rodillos de paso, Rodillos de enfriamiento y bobinadores	36
Figura 9: Curva DSC de PET virgen	38
Figura 10: Curva DSC de recuperado PET metalizado	39
Figura 11: Curva DSC de Fleje PET	40
Figura 12: Balance de Masa del Proceso BoPET y Línea de Flejes	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Stock acumulado de Recuperado BoPET sin disposición	12
Tabla 2: Resultados de MFI e IV del recuperado BoPET metalizado.....	27
Tabla 3: Velocidades de línea para la producción de fleje de PET.....	28
Tabla 4: Resultados de propiedades mecánicas del fleje de PET 15.5mm x 0.8mm (ratio 4.43)...	28
Tabla 5: Resultados de propiedades mecánicas del fleje de PET 12mm x 0.6mm (ratio 4.43)....	29
Tabla 6: Cotización de disposición del recuperado BoPET Metalizado hacia relleno sanitario ..	37

RESUMEN

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) corresponde a una investigación con enfoque cuantitativo, diseño experimental y aplicativo, que tiene como propósito analizar la viabilidad de utilizar el recuperado BoPET metalizado para la producción de flejes PET y su implementación, vale decir, que el recuperado se trata de mermas de películas metalizadas de Polietileno Tereftalato (BoPET) que se acumulan en la empresa OPP FILM S.A. sin una clara alternativa de valorización, siendo un total de 3450 toneladas acumuladas desde hace unos 9 años atrás hasta inicios del presente año 2023.

Asimismo, se tiene como propósito convertir este pasivo ambiental en una oportunidad sostenible de negocios, específicamente produciendo flejes PET para aplicaciones alternativas como empaque de productos industriales y agrarios. Luego de una evaluación y experimentación rigurosa, se logró validar que el 100% del recuperado BoPET metalizado puede procesarse exitosamente mediante el proceso de extrusión, estiro en caliente y en frío para alcanzar especificaciones mecánicas apropiadas para los flejes según normas estándar.

Complementando el análisis ya realizado, el análisis financiero proyectó un retorno de inversión en sólo 1 año y utilidades totales por encima de millón de dólares procesando todo el material recuperado ya almacenado inicialmente durante 9 años y de los que se obtienen a la fecha.

En síntesis, este estudio demostró la gran oportunidad del aprovechamiento de un material no usado, además de una contribución ambiental, así como la viabilidad económica de agregar valor a un residuo industrial dándole una segunda vida, disminuyendo desechos y conservando recursos naturales mediante este enfoque de economía circular.

En el desarrollo de este trabajo, se ha demostrado las competencias profesionales del autor y su contribución a la economía empresarial

Palabras Clave: fleje PET; recuperado BoPET metalizado; proceso; mejora continua.

24ABSTRACT

The present Work of Professional Sufficiency (TSP) corresponds to a research with quantitative approach, experimental and applicative design, whose purpose is to analyze the feasibility of using the recovered metallized BoPET for the production of PET strapping and its implementation, that is to say, that the recovered is a waste of metallized Polyethylene Terephthalate (BoPET) film that accumulates in the company OPP FILM S. A. without a clear alternative of valorization, being a total of 3450 tons accumulated since about 9 years ago until the beginning of the present year 2023.

Likewise, the purpose is to convert this environmental liability into a sustainable business opportunity, specifically by producing PET strapping for alternative applications such as packaging of industrial and agricultural products. After a rigorous evaluation and experimentation, it was possible to validate that 100% of the recovered metallized BoPET can be successfully processed by extrusion, hot and cold drawing to achieve appropriate mechanical specifications for strapping according to standard norms.

Complementing the analysis already performed, the financial analysis projected a return on investment in only 1 year and total profits in excess of one million dollars by processing all the recovered material already stored initially for 9 years and those obtained to date.

In summary, this study demonstrated the great opportunity of taking advantage of an unused material, in addition to an environmental contribution, as well as the economic viability of adding value to an industrial waste by giving it a second life, reducing waste and conserving natural resources through this circular economy approach.

In the development of this work, the author's professional skills and his contribution to the business economy have been demonstrated.

Keywords: PET strapping; recovered metallized BoPET; process; continuous improvement.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El Polietileno Tereftalato (PET) se ha convertido en uno de los materiales plásticos más ampliamente adoptados a nivel global para la fabricación de envases, textiles y una amplia diversidad de aplicaciones que aprovechan sus sobresalientes características físicas, químicas, técnicas y su costo relativamente bajo (Davis & Song, 2006). Dentro de sus múltiples formatos de uso final, las películas, cintas, flejes y filamentos de PET juegan un rol fundamental en diversas industrias.

Los flejes PET destacan por su elevada resistencia mecánica a la tracción, impacto y desgaste, siendo muy apreciados para el transporte y manipulación de carga, así como abrasivos industriales y usos rudos con exigencia estructural (Wypych, 2021). El proceso productivo para su obtención consiste principalmente en extrusión plana del PET fundido, laminación forzada y un posterior estirado mecánico conocido como orientación, que les confiere una disposición molecular altamente ordenada y mejora dramáticamente sus propiedades (Pritchard, 1999).

En el centro fabril, el proceso de fabricación principal es la producción de empaques flexibles, se orientan al mercado para el envasado y empackado de productos alimenticios, mientras que el recuperado BoPET metalizado se utilizará alternativamente la producción de flejes PET para el empaque de productos industriales como ladrillos o productos agroindustriales como jabas de frutas, entre otros.

Si bien los flejes están presentes en casi todas las industrias, su amplio volumen de producción y variados grados de calidad hacen que también se generen significativas cantidades de mermas durante los procesos de corte y manufactura., en algunos casos hasta un 25% del material extruido llega a constituir mermas y retazos sin un claro aprovechamiento (Davis & Song, 2006).

En el presente trabajo, el objetivo central es aprovechar el recuperado BoPET metalizado para incrementar la rentabilidad de la empresa OPPFILM S.A. a través de la producción de Fleje PET, optimizando recursos en pro de la economía circular.

1.1 Datos del lugar donde se desarrolla el trabajo

El presente Trabajo de suficiencia Profesional se realizó en la empresa OPPFILM S.A. perteneciente a OBEN GROUP que produce láminas de polipropileno, poliéster y nylon para empaques flexibles, películas recubiertas para la industria gráfica y productos termoformados de polipropileno. Su primera planta se inauguró hace más de 32 años en Quito, Ecuador. Hoy cuenta con 14 plantas de manufactura, 1 centro de distribución y 8 oficinas comerciales en 17 países de América y Europa (Oben Group, 2023).

Este estudio de mejora se realizó durante todo el año 2021 mientras ocupaba el puesto de ingeniero de procesos con la finalidad de darle valor económico a los materiales considerados como “residuos” por su dificultad para ser reutilizados o vendidos.

El propósito de OBEN GROUP es dar soluciones sostenibles para llevar alimentos seguros al mundo, bajo los principios de eficiencia como esencia maximizando los recursos, innovando de manera inteligente buscando formas de mejorar y convertir las ideas en resultados extraordinarios con el compromiso de ser responsables de proteger a la generaciones presentes y futuras impactando en forma positiva en la Tierra, a través del compromiso por desarrollar los mejores y más ecológicos materiales para empaques flexibles, compromiso de mantener un modelo de manufactura limpio y emplear prácticas de economía circular con las personas: clientes, empleados y miembros de la comunidad.

A continuación, se presentan los datos de la empresa:

Razón Social: OPP FILM S.A.

RUC: 20502351908

Dirección Postal: Av. San Pedro Mz. B Lte. 48-A Urb. San Vicente, Lurín, Lima

Código Postal: 15823

Correo: pablovillagarcía@obengroup.com (Gerente General)

CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el objetivo de establecer la caracterización del problema y su importancia, líneas abajo se conceptualiza la existencia de una relación de la variable aprovechamiento del recuperado BoPET metalizado (mermas) para producir fleje PET con la variable aumento de la rentabilidad en la empresa OPP FILM S.A., lo que permite de manera global incrementar el nivel de la competitividad del negocio.

2.1 Descripción del Problema

Con el propósito de tener una mayor visión de esta situación se va a tener en cuenta aspectos similares a nivel internacional y nacional.

Ámbito Internacional

A nivel mundial, el manejo de los desechos y el reciclaje de envases de PET (tereftalato de polietileno) representa un desafío ambiental apremiante. Esta problemática abarca varios aspectos críticos.

El PET, un tipo de plástico ampliamente empleado en envases de bebidas y alimentos, se ha convertido en una amenaza global debido a su disposición inadecuada. Botellas de PET y otros productos plásticos terminan en vertederos y, peor aún, en océanos, ríos y playas, generando una preocupante contaminación ambiental (Tecnología del plástico, 2023).

Además, muchos países carecen de la infraestructura necesaria para recolectar, clasificar y reciclar eficazmente el PET. Esta carencia dificulta la gestión adecuada de los desechos plásticos y aumenta la probabilidad de contaminación.

La variabilidad en la composición y calidad del PET reciclado plantea un desafío significativo para su reutilización. Esto se traduce en una falta de confianza en la calidad del material reciclado, lo que limita su uso en aplicaciones de alta calidad.

Asimismo, existe impacto en la Vida Silvestre. La ingestión de fragmentos de PET por parte de la fauna marina y terrestre tiene un efecto devastador en la vida silvestre. Además, los animales a menudo quedan atrapados en envases de plástico, lo que agrava aún más el problema.

Finalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero desde la producción hasta la eliminación de productos de PET que contribuyen al cambio climático.

Mientras tanto, varias organizaciones y entidades se han involucrado activamente en la lucha por el medio ambiente en el contexto del PET:

- Greenpeace (2023): Con su reconocido activismo ambiental, Greenpeace ha liderado campañas a nivel mundial para abordar la contaminación por plásticos, presionando por la reducción de envases de PET y promoviendo soluciones sostenibles.
- The Ocean Cleanup (2023): Fundada por Boyan Slat, esta organización se dedica a eliminar plásticos de los océanos mediante sistemas de barreras flotantes diseñados para atrapar y recolectar residuos plásticos.
- The Ellen MacArthur Foundation (2023): Esta fundación es una firme defensora de la economía circular y colabora con empresas y gobiernos para reducir la generación de desechos plásticos y promover el reciclaje de PET.
- National Geographic Society (2023): A través de su alcance mediático y apoyo a proyectos de investigación, National Geographic ha desempeñado un papel fundamental en crear conciencia sobre la contaminación por plásticos y sus consecuencias ambientales.
- Acuerdos Internacionales: Organismos internacionales como las Naciones Unidas, a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), han liderado esfuerzos para fomentar la cooperación global en la lucha contra la

contaminación plástica y para mejorar la gestión de los desechos de PET a nivel internacional.

Estas entidades, entre muchas otras, están comprometidas en abordar de manera activa y efectiva los desafíos que plantea la problemática internacional de los desechos y el reciclaje de PET, buscando soluciones que protejan nuestro preciado entorno natural.

Ámbito Nacional

La gestión deficiente de los desechos de PET en el Perú ha resultado en la contaminación de ríos, playas y áreas naturales. Los envases de PET con frecuencia acaban en estos lugares, dañando la belleza natural y amenazando la biodiversidad.

A pesar de mejoras recientes en la infraestructura de reciclaje en Perú, aún existen áreas rurales y comunidades que carecen de sistemas eficaces de recolección y reciclaje de PET. Esto conduce a la acumulación de desechos plásticos en estas zonas.

La quema no regulada de desechos plásticos, incluyendo el PET, para su eliminación, emite gases tóxicos que representan un riesgo para la salud de las personas que residen cerca de estos puntos de quema.

La falta de educación y concienciación ambiental sobre el reciclaje y la gestión de desechos ha contribuido a la problemática. Muchas personas no comprenden la importancia de separar los desechos y reciclar el PET.

En el Perú, algunas entidades involucradas en la lucha por el medio ambiente son:

- Ministerio del Ambiente (MINAM): El MINAM es la entidad gubernamental encargada de promover políticas y estrategias para la gestión ambiental en Perú. Ha estado involucrado en la promoción de prácticas de gestión de desechos más sostenibles, incluyendo el reciclaje de PET. (<https://www.gob.pe/minam>)

- Empresas y Asociaciones Ambientales: En Perú, varias empresas y asociaciones ambientales se han comprometido con la gestión de residuos y la promoción del reciclaje de PET. Ejemplos incluyen el Grupo Gloria, que ha implementado programas de reciclaje, la Asociación Peruana de Recicladores, que trabaja en la formalización de recicladores informales.
- ONGs Ambientales: Organizaciones no gubernamentales como WWF Perú (<https://www.wwf.org.pe/>), Ciudad Saludable (<https://www.ciudadsaludable.org/>) y Recíclame (<https://reciclame.org/>) están activamente involucradas en la promoción de prácticas sostenibles y en la educación ambiental, incluyendo campañas para reducir el consumo de plásticos y promover el reciclaje.

La legislación en Perú se ha centrado cada vez más en abordar la problemática de los desechos y el reciclaje de PET. Algunas leyes y regulaciones relevantes incluyen:

- Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ley N.º 27314): Esta ley establece los fundamentos para una gestión adecuada de los residuos sólidos, incluyendo la promoción del reciclaje y la reducción de la generación de residuos.
- Reglamento de la Ley N.º 27314: El reglamento proporciona orientaciones más detalladas sobre la gestión de residuos sólidos y la responsabilidad de las entidades públicas y privadas en la gestión de desechos, incluyendo el PET.
- Proyectos Locales: Varias municipalidades en Perú han puesto en marcha proyectos locales de reciclaje y campañas de sensibilización para abordar la problemática de los desechos plásticos, incluyendo el PET.

A pesar de los avances legislativos y los esfuerzos de diversas entidades, Perú continúa enfrentando retos en la gestión de los desechos y el reciclaje de PET a nivel nacional,

subrayando la necesidad de una colaboración sostenida entre el gobierno, las empresas y las organizaciones ambientales para abordar de manera eficaz esta problemática ambiental.

Caracterización de la empresa OPP FILM S.A.

Desde el año 2014, en la producción de película flexible para empaque de alimentos mediante el proceso BoPET se han generado mermas de producción las cuales se han acumulado un total de 2700 TN hasta el año 2018 en el cual se realizó un estudio de mejora que propone un método para la reutilización de las mermas debidamente documentado por Santiago Abarca, D.E. (2020).

Sin embargo, después de 9 años, el total de merma generado asciende a 17,250 TN, de las cuales sólo se han consumido el 80% en el proceso BoPET (13,800 TN) y el 20% (3,450 TN) no pueden ser consumidas nuevamente en el proceso principal de BOPET y no tienen disposición final.

El stock de 3,450 TN de merma de BoPET se dividen en dos tipos Metalizado y mate (ver Tabla 1), ambas se encuentran almacenado en los almacenes de materia prima de la planta 1 y planta 2 de OPP FILM S.A. lo que genera un sobre costo de almacenamiento y de inventario.

Tabla 1
Stock acumulado de Recuperado BoPET sin disposición.

Tipo de Recuperado	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	TOTAL (TN)	%
Recuperado BoPET Metalizado	8	23	-	169	470	533	504	523	598	2,828	81.97%
Recuperado BoPET Mate	-	-	-	-	-	113	122	201	186	622	18.03%

Elaboración propia

A pesar de los esfuerzos por vender el material a algún cliente potencial, los resultados no han sido favorables debido a la presencia de aluminio en la merma, además, que no se pueden consumir nuevamente en el proceso de fabricación de película flexible debido al contenido de

aluminio.

En resumen, en el marco de la necesidad de dar uso a las mermas acumuladas surgió la iniciativa de diseñar un proyecto que abordase la problemática del uso de las mermas acumuladas y las que se vienen acumulando dando lugar al proyecto bajo análisis y que se encuentra en ejecución, para solucionar la problemática del stock de 2,828 toneladas de recuperado BoPET metalizado proveniente de la producción de empaque flexible y que ya está en pleno aprovechamiento dándole un valor agregado y contribuyendo con los propósitos de apoyar al medio ambiente y a la rentabilidad de la empresa.

Por el lado de los efectos se pueden indicar los siguientes:

- Ocupaba espacio en los almacenes de OPPFILM S.A. que limita su uso para el almacenaje de materia prima virgen,
- Contamina el suelo debido a que la merma acumulada se tiene que enviar a un relleno sanitario para su disposición final.

Por el lado de los posibles causales se pueden indicar los siguientes:

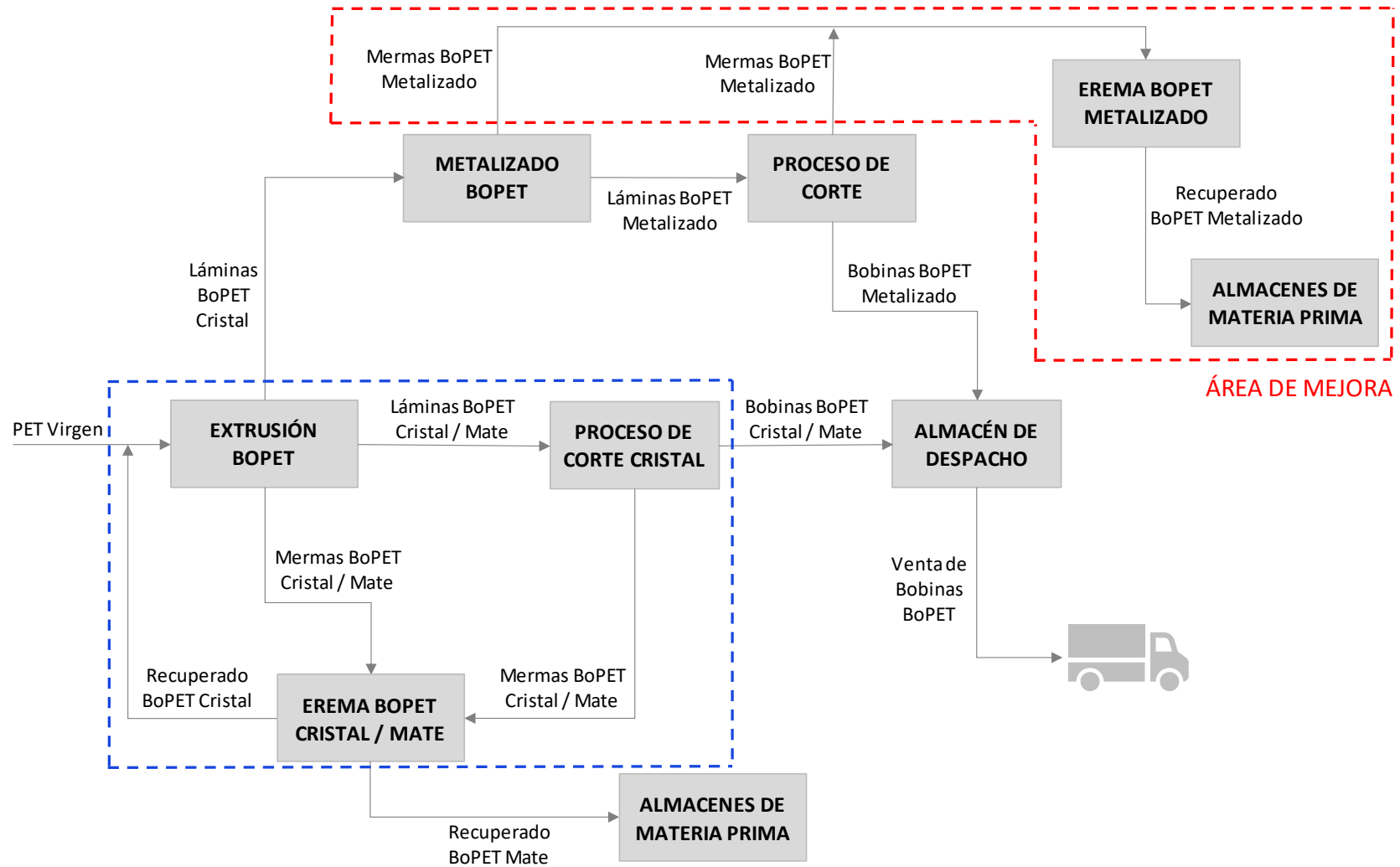
- Pérdida de oportunidades de aprovechamiento para nuevos negocios.
- Pérdida de posibilidad de utilizar nuevas tecnologías ya existentes para su procesamiento.
- Indiferencia inicial de las gestiones anteriores en cuanto a su aprovechamiento.

Por lo cual, el único proceso al cual ha sido sometida la merma es la conversión a pellets de recuperado BoPET metalizado (Santiago Abarca, D. E.,2020) con la finalidad de reducir el volumen que ocupa la merma cuando se encuentra como retazos de película.

Finalmente, para tener clara la problemática, se presenta el diagrama de proceso de BoPET indicando el área de mejora el cual es abordado en el presente trabajo (ver figura 1).

Figura 1

Diagrama de proceso de Bopet que indica el área de mejora en la empresa OPP FILM S.A.



Elaboración propia.

2.2 Objetivos

General:

- Evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de recuperado BoPET metalizado para la producción de flejes PET en usos alternativos y su contribución en la rentabilidad de la empresa.

Específicos:

- Validar la procesabilidad del material recuperado BoPET metalizado para la producción de fleje de PET.
- Validar el cumplimiento de las especificaciones técnicas del fleje producido con el material recuperado BoPET metalizado.
- Determinar la rentabilidad preliminar del proyecto de aprovechamiento de recuperado BoPET metalizado producción de flejes de PET.
- Contribuir en la reducción de residuos industriales haciendo un mejor uso de los recursos considerado mermas.

2.3 Justificación

Justificación técnica:

Se cuenta con un reactor de polimerización en estado sólido con el cual se pueden mejorar las propiedades mecánicas del recuperado BoPET metalizado para la producción de fleje de PET. Este reactor opera mediante una rampa de calentamiento que se divide en 4 etapas:

- Precalentamiento (1): inicio del proceso en el reactor donde se busca superar la temperatura vítrea en el menor tiempo para evitar la coalescencia de los pellets.
- Cristalización (2): etapa que inicia por encima de los 120°C y que favorece el movimiento/ordenamiento de las cadenas de PET siendo la temperatura de 150°C donde se alcanza el punto más alto de energía para conseguir la cristalización.

- Polimerización (3): después de los 170°C las cadenas dejan de moverse, pero ya se encuentra ordenadas y se han convertido en cadenas más largas (mayor peso molecular). La temperatura máxima que se utiliza se encuentra entre los 210 y 220°C.

- Enfriamiento (4): etapa en la cual se deja de suministrar calor al reactor y sólo se mantiene encendido el sistema de vacío y la rotación del reactor.

El tiempo de procesamiento de un batch de 4500 kg es 36 horas, donde la etapa 1 dura 6 horas, la etapa 2 dura 6 horas, la etapa 3 dura 8 horas y la etapa 4 dura 16 horas.

Por confidencialidad de la información del proceso, la rampa de calentamiento no se presenta los valores de tiempo y temperatura seteados en el reactor.

Justificación económica:

La polimerización del recuperado BoPET metalizado mejora las propiedades mecánicas del PET haciendo viable su uso para la producción de flejes de PET sin necesidad de usar materia prima virgen.

El costo de la recuperado BoPET metalizado es de 0.45 \$/kg y el costo de procesamiento en el reactor es 0.15 \$/kg, lo que equivale a un costo total de 0.60 \$/kg, mientras que el costo de materia prima virgen es 1.20 \$/kg lo cual equivale a un ahorro del 50% en costo de materia prima.

Adicionalmente, al ser reutilizado el recuperado BoPET metalizado se ahorraría 0.10 \$/kg, que es el costo para enviar el material a un relleno sanitario.

Justificación ambiental:

Este proyecto proporciona una opción de reciclaje industrial dando una segunda vida al recuperado BoPET metalizado, el cual por su contenido de aluminio no tiene mercado para ser

vendido o reutilizado en el mismo proceso que se originó. En ese sentido, sólo queda la alternativa de darle disposición en un relleno sanitarios.

2.4 Limitaciones del trabajo

- La información perteneciente a la empresa OPPFILM S.A, respecto a la marca, origen, diseño y tipo de equipos usados para la producción de flejes no puede ser revelada debido al compromiso firmado de privacidad y confidencialidad por parte del autor.
- La base de datos de las mediciones de índice de fluidez realizadas al recuperado BoPET metalizado de diferentes lotes, las condiciones de procesamiento, el detalle de las condiciones de operación del extrusor, de los perfiles de temperatura usados en el reactor, extrusor y horno de calentamiento no puede ser revelada debido al compromiso firmado de privacidad y confidencialidad por parte del autor.

CAPÍTULO III. MARCO TEORICO

3.1 Antecedentes

A continuación, se presentan algunos antecedentes de la producción de flejes PET y la reutilización de PET reciclado en diferentes trabajos de investigación:

Santiago Abarca (2020), en su tesis “Estudio de mejora para la implementación del proyecto de reprocesamiento de recuperado BoPET en la empresa OPP FILM S.A.” para optar el título profesional de Ingeniero Industrial). Universidad de Lima, tuvo como objetivo realizar un análisis para el consumo de material recuperado que sea viable para ser usado como materia prima en el proceso de extrusión de película PET orientada biaxialmente (BoPET) para empaque de alimentos que es el núcleo del negocio. Éste estudio permitió aumentar la rentabilidad de la empresa, pero dejó sin uso el recuperado BoPET metalizado que no puede ser utilizado como materia prima para la producción de película BoPET.

De otra parte, Smith & García (2019) en su artículo "Reciclaje de PET y producción de flejes de embalaje" investigaron la viabilidad de utilizar PET reciclado en la producción de flejes de embalaje. Se analizaron las propiedades mecánicas y la calidad de los flejes de PET reciclado en comparación con los convencionales.

También, López & Martínez (2020) en su artículo "Extrusión de PET reciclado para flejes de embalaje" examinaron la tecnología de extrusión utilizada en la producción de flejes de PET reciclado. El estudio se centró en los parámetros de procesamiento que afectan la calidad y resistencia de los flejes reciclados.

Torres & Rodríguez (2018) en su artículo "Sostenibilidad en la producción de flejes de PET reciclado" realizaron una investigación sobre los aspectos ambientales y económicos de la producción de flejes de PET reciclado. Se evaluaron los beneficios ambientales y las ventajas económicas de esta práctica.

García & Pérez (2017) en su artículo "Calidad y aplicaciones de flejes de PET reciclado" llevaron a cabo un estudio exhaustivo sobre la calidad de los flejes de PET reciclado y sus diversas aplicaciones en la industria del embalaje. Se destacaron las ventajas y limitaciones de este material reciclado.

Desde otra óptica, Martínez & López (2016) en su artículo "Desafíos en la implementación de flejes de PET reciclado en la cadena de suministro" abordaron los desafíos técnicos y logísticos que surgen al implementar flejes de PET reciclado en la cadena de suministro. Se exploraron estrategias para superar estos obstáculos.

3.2 Base Teórica

La producción de flejes de PET a partir de mermas de películas BOPET es un proceso que combina la reutilización de materiales con la sostenibilidad en la industria del embalaje. Para comprender este proceso, es esencial tener en cuenta varios conceptos clave y estudios relevantes.

El Polietileno Tereftalato (PET) es un polímero termoplástico ampliamente utilizado en la industria del embalaje y otros sectores debido a sus propiedades únicas y versatilidad (Smith, 2018). El PET es conocido por su transparencia, ligereza, resistencia química y barrera a la humedad, lo que lo hace ideal para envases de bebidas, alimentos, productos farmacéuticos y textiles (Johnson et al., 2020).

El proceso de producción del PET generalmente comienza con la polimerización del tereftalato de etileno y el etilenglicol para formar el polímero (Brown & White, 2019). Luego, el PET se somete a procesos de extrusión y moldeo por soplado para crear envases y botellas (García et al., 2021). La orientación biaxial del PET mediante el proceso BOPET (Biaxially Oriented Polyethylene Terephthalate) mejora sus propiedades mecánicas y su resistencia (Smith & Davis, 2017).

Mermas de Producción: se refieren a los residuos generados durante el proceso de

fabricación. En el contexto de películas BOPET, esto puede incluir recortes, bordes irregulares o películas que no cumplen con los estándares de calidad.

Reciclaje de Mermas: implica la recolección y reutilización de estos residuos en lugar de desecharlos. Para el PET, este proceso generalmente implica triturar las mermas y convertirlas en gránulos o escamas que se pueden fundir y reformar.

Extrusión de PET Reciclado: La extrusión es una técnica común para transformar el PET reciclado en diferentes formas, como flejes. Durante la extrusión, el PET se derrite y se moldea en una forma específica utilizando maquinaria especializada.

Calidad de los Flejes de PET Reciclados: es crucial para su uso en aplicaciones de embalaje. Esto implica pruebas para garantizar que cumplan con las especificaciones requeridas en términos de resistencia, durabilidad y seguridad alimentaria.

Sostenibilidad: La producción de flejes de PET a partir de mermas de películas BOPET se alinea con los principios de sostenibilidad, ya que reduce la necesidad de materias primas vírgenes, minimiza el desperdicio y contribuye a la conservación de recursos naturales.

Reactor de policondensación en estado sólido al vacío: En la etapa previa a la extrusión, el PET virgen pasa por un proceso de policondensación en estado sólido, donde se introducen los chips o pellets de PET dentro de un reactor cerrado herméticamente y sometido a alto vacío mediante el accionar de bombas con sistema de vacío (Davis & Song, 2006).

Temperaturas características del PET(ver figura 4.2)

El PET como termoplástico semicristalino posee dos temperaturas de transición significativas (Wypych, 2021):

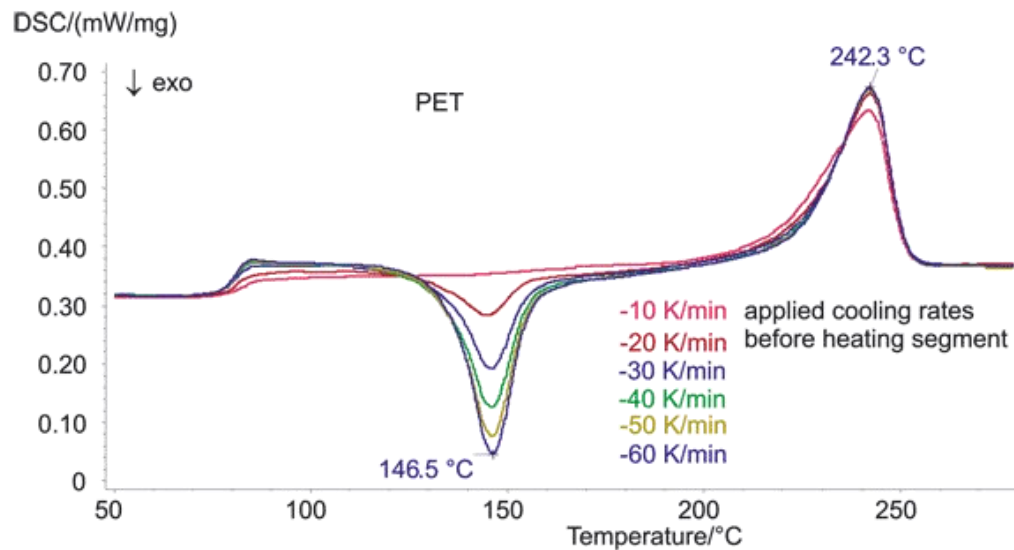
- Temperatura de transición vítrea (T_g): Rango en el cual el PET pasa de un estado sólido quebradizo y vítreo, a uno gomoso capaz de deformarse sin romperse ($75 - 85^{\circ}\text{C}$)
- Temperatura de cristalización (T_c): Rango en el cual el PET parcialmente fundido comienza un rearrreglo molecular más ordenado adoptando estructuras cristalinas ($130-$

170°C)

- Temperatura de fusión (T_m): Punto de absoluta fluidez apto para procesos de moldeo y extrusión (250-260°C)

Figura 2

Curva de calorimetría diferencia de barrido (DSC) del PET



Fuente: NETZSCH Analyzing and testing – DSC PET

En la Orientación molecular, una vez extruidas las láminas, se aplica un fuerte estirado mecánico unidireccional conocido como orientación monoaxial, que genera una realineación preferencial de las cadenas poliméricas en la dirección de aplicación de la fuerza (Pritchard, 1999). Esta orientación molecular confiere propiedades mejoradas de resistencia, rigidez y estabilidad dimensional en dicho sentido.

En la extrusión plana del PET previo a la orientación de los flejes, se utilizan típicamente extrusoras con un tornillo de diámetro entre 75 mm y 200 mm en función de los requerimientos de producción. El PET se alimenta sólido por tolvas en el primer tercio del equipo, fundiéndose progresivamente al ser cizallado y avanzar a través de las sucesivas zonas discretas de calefacción que operan a temperaturas de entre 270 °C y 300 °C (Pritchard, 1999).

CAPÍTULO IV. METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTOS

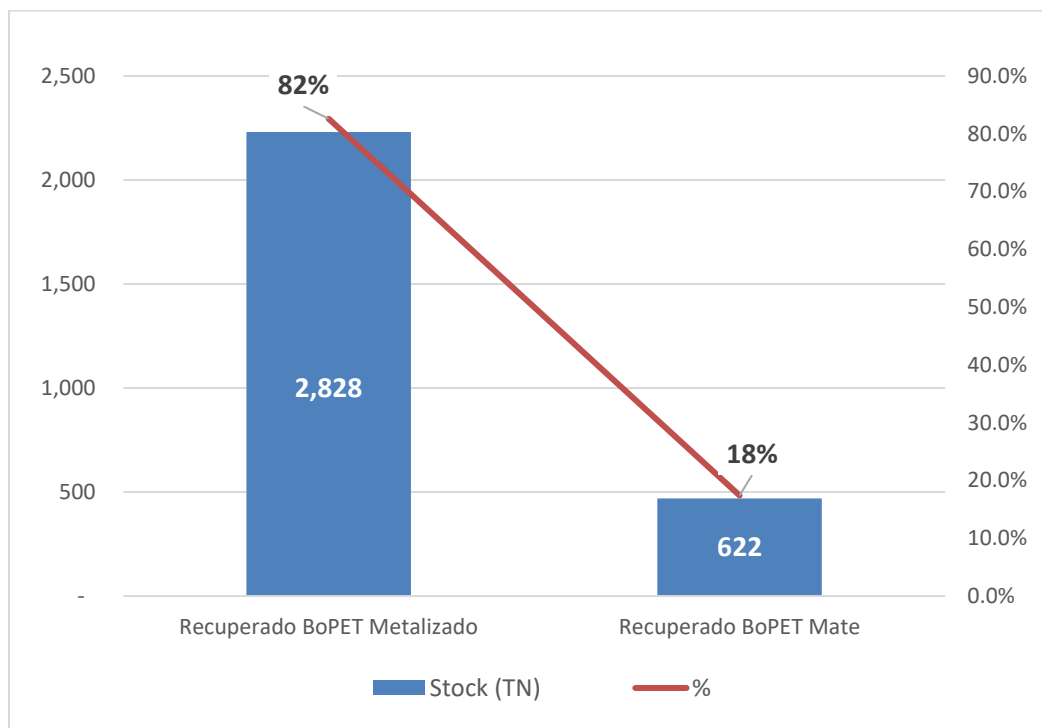
En este capítulo, se establece la metodología que comprende las actividades que se han realizado para lograr determinar la viabilidad técnica y económica del presente trabajo.

4.1 Determinación de la cantidad de merma acumulada

Como se mencionó en la descripción del problema la mayor cantidad de material almacenado es recuperado BoPET metalizado y mediante un diagrama de Pareto se pudo graficar lo comentado, ya que representa el 86% de todo lo almacenado. Ver figura 3.1

Figura 3

Pareto de Recuperado BoPET acumulado



Elaboración Propia

La presente investigación plantea la incorporación de 100% de recuperado de BoPET metalizado, dentro del proceso de extrusión plana para la elaboración de flejes de PET.

4.2 Procedimiento de caracterización del recuperado BoPET metalizado

El material recuperado será caracterizado determinando su índice de fluidez fundido (MFI) según norma ASTM D1238 previo al procesamiento en el reactor y se hará seguimiento de la variación de MFI durante las etapas de cristalización y polimerización.

4.3 Procedimiento de producción de Fleje PET

El recuperado de BoPET metalizado se dosificará en una extrusora mono husillo a 270°C con un controlador de flujo de salida de la cual saldrán 2 correas de PET que serán enfriadas en una tina de agua a 20°C.

Las correas se estirarán 3.75 veces su largo original mediante un sistema de orientación en caliente (horno de estiramiento) trabajando a una temperatura de 180°C. Posteriormente se aplicará un estirado adicional de 1.15 veces en una etapa de orientación en frío.

Finalmente, los flejes mono-orientados resultantes se enrollarán en un sistema de bobinado para su almacenamiento y posterior caracterización. (ver figura 4)

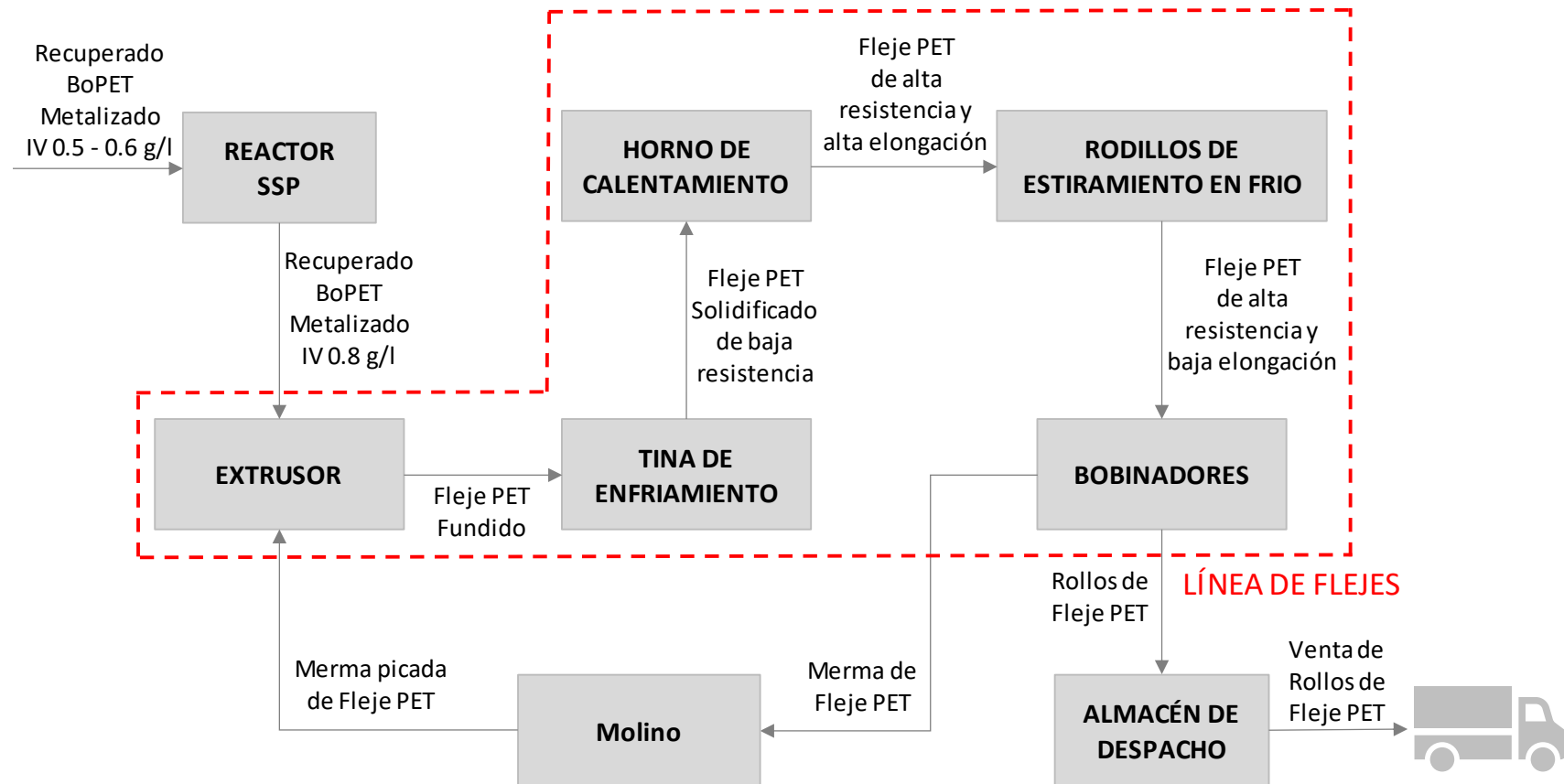
4.4 Determinación de las propiedades mecánicas

Los flejes obtenidos se someterán a ensayos mecánicos de tracción según normas ASTM D882, determinando módulo de elasticidad, resistencia máxima a la tracción, elongación a la ruptura y otras métricas relevantes.

Los valores resultantes se compararán frente a especificaciones estándar, a fin de determinar si se cumple con requerimientos típicos para aplicaciones de flejes de empaque e industriales.

Figura 4

Diagrama de proceso de Flejes PET en la empresa OPP FILM S.A.



Elaboración propia

CAPITULO V. PROPUESTA DE SOLUCIÓN, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Reflexiones sobre la Propuesta de Solución

La propuesta planteó el aprovechamiento de 2828 toneladas de mermas acumuladas de películas metalizadas de PET (BoPET) provenientes del proceso de extrusión de films para empaques flexibles en la empresa OPP FILM S.A.

La solución técnica optimizada a nivel industrial consistió en utilizar la totalidad de estos residuos plásticos como materia prima dentro de un moderno proceso de extrusión plana para la elaboración de flejes PET destinados a aplicaciones de empaquetado y transporte de carga.

El proyecto requirió una inversión inicial de US\$ 500,000 que contempló la adquisición e instalación de una línea de extrusión con capacidad para 300 kg/hr, sistema de enfriamiento (tina de agua), equipo de orientación mono-axial con horno de calentamiento, rodillos de estirado en frío, y sistema automático de bobinado.

Según los resultados experimentales en las primeras evaluaciones con 100% de contenido reciclado BoPET metalizado, se obtuvieron consistentemente flejes dentro de especificaciones de calidad, con resistencia a la tracción de 2700 y 3400 N y elongaciones de 9-11% según el ancho y el espesor de fleje PET producido

Evaluación de Factibilidad:

Económica: Con un precio de venta de 1.65 \$/kg, costos de producción de 1.05 \$/kg y producción anual de 840 toneladas en dos turnos de 12 horas y 365 días laborables, se estiman ventas para los 3 próximos años de US\$ 1,696 millones y utilidades de US\$ 1,196 millones, con un retorno de inversión en 12 meses.

Operativa: La empresa cuenta actualmente con la infraestructura y el personal calificado en extrusión de PET para el uso productivo de esta nueva línea de flejes sin mayores

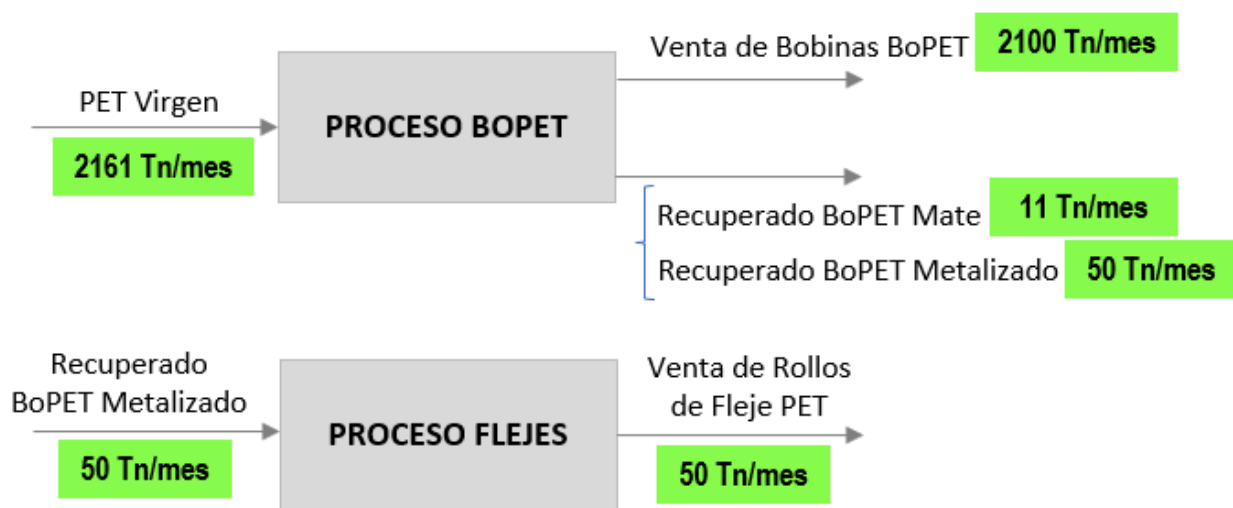
complejidades.

Técnica: La tecnología de extrusión plana es altamente dominada por la compañía actualmente. Los resultados experimentales garantizan la factibilidad técnica para obtener flejes de calidad.

El proyecto es viable integralmente, ofreciendo impactos positivos en economía circular, sustentabilidad y expansión del portafolio de productos.

Figura 5

Resumen de Balance de Masa del Proceso BoPET y Flejes en la empresa OPP FILM S.A.



5.2 Resultados de la Evaluación de Procesabilidad y Calidad

Para la caracterización del recuperado de BoPET metalizado antes de ingresar al reactor, se mide el índice de fluidez (MFI) y se obtiene un valor de 12 g/10min lo que equivale a una viscosidad intrínseca de 0.58 dl/g, obteniendo los siguientes resultados durante las mediciones en el proceso del reactor (ver tabla 2). Además, en el Anexo 3 se presentan las curvas DSC de PET virgen, recuperado BoPET metalizado y Fleje PET (Figura 8, 9 y 10) y en el anexo 5 se presenta el balance de energía del reactor SSP

Tabla 2**Resultados de MFI e IV del recuperado BoPET metalizado.**

Propiedad	Inicio (T° Amb.)	12hrs (160°C)	18hrs (230°C)	24h (230°C)
Melt flow index - MFI (g/10min)	12.0	10.0	6.0	3.0
Viscosidad intrínseca (dl/g)	0.58	0.62	0.72	0.80

Elaboración propia

La producción del fleje de PET, se realizará a una capacidad de 100kg/h que es equivalente al 70% de la capacidad máxima del extrusor, además la velocidad de línea es 25m/min. Esta capacidad produce una correa de PET de 69mm de ancho x 3.55mm de espesor con una variación de 0.1mm.

Además, se coloca la ratio de 3.85 para el estiramiento en caliente y la ratio de 1.15 para el estiramiento en frío haciendo un estiro total de 4.43 veces más respecto a la medida original logrando producir fleje de PET con las siguientes dimensiones: 15.5mm de ancho y 0.8mm de espesor.

Para obtener diferentes dimensiones de flejes, se realiza un ajuste en la velocidad de línea con la finalidad de obtener flejes más delgados y se mantienen las ratios de estiro debido a que al realizar cambios en las ratios se producen constantes roturas y/o menos resistencia del fleje.

En ese sentido, se realiza el ajuste de dimensiones modificando las velocidades de ingreso y salida del horno (estiramiento en caliente) y los rodillos de estiro (estiramiento en frío) con la finalidad de hacer más delgado el fleje PET hasta llegar a las dimensiones de 12mm x 0.6mm que junto al fleje de 15.5mm x 0.8mm son flejes comerciales. Las velocidades se presentan a continuación (ver Tabla 3).

Tabla 3**Velocidades de línea para la producción de fleje de PET**

Dimensiones de Flejes	Horno de Estiro		Rodillos de estiro	
	Vel. de Ingreso (m/min)	Vel. de Salida (m/min)	Vel. de Ingreso (m/min)	Vel. de Salida (m/min)
15.5mm x 0.8mm	50.0	187.5	187.5	215.6
12.0mm x 0.6mm	65.0	243.8	243.8	280.3

Elaboración propia

Las propiedades mecánicas obtenidas para el fleje PET de dimensiones 15.5mm x 0.8mm y de dimensiones 12.0mm x 0.6mm se presentan en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4**Resultados de propiedades mecánicas del fleje de PET 15.5mm x 0.8mm (ratio 4.43)**

Propiedad	VALOR OBJETIVO	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Resistencia a la Tracción (N)	3450 +/- 300	3,504	3,398	3,450	3,438
Elongación (%)	8%-12%	10.0	11.0	10.4	10.5
Ancho (mm)	15.5 +/- 0.3	15.54	15.46	15.5	15.5
Espesor (mm)	0.8 +/- 0.03	0.82	0.79	0.81	0.81

Elaboración propia

Tabla 5**Resultados de propiedades mecánicas del fleje de PET 12mm x 0.6mm (ratio 4.43)**

Propiedad	VALOR OBJETIVO	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Resistencia a la Tracción (N)	2650 +/- 200	2,750	2,687	2,611	2,607
Elongación (%)	8%-11%	9.0	9.6	9.7	9.4
Ancho (mm)	12.0 +/- 0.3	12.07	12.03	12	11.96
Espesor (mm)	0.6 +/- 0.03	0.61	0.6	0.6	0.58

Elaboración propia

5.3 Resultados de la evaluación económica

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, el costo del material recuperado BoPET metalizado es 0.45 \$/kg, el cual tiene un valor de IV entre 0.58 y 0.60 dl/g. Adicionalmente, el costo del procesamiento en el reactor para incrementar la viscosidad intrínseca a un valor de 0.8 dl/g es 0.15 \$/kg y el costo de producción de flejes de PET es 0.45 \$/kg.

En todos los casos, los costos incluyen la mano de obra directa e indirecta, repuestos, embalaje, depreciación, servicios de terceros y energía eléctrica.

En ese sentido, el costo total de producción de flejes es:

Costo Total de producción

= Costo de Recuperado BoPET Metalizado

+ Costo de procesamiento en el reactor + Costo de producción de flejes

= 0.45 \$/kg + 0.15 \$/kg + 0.45 \$/kg = 1.05 \$/kg

El precio de venta del rollo de fleje de PET es 33 \$/und y el peso de cada rollo es 20kg/und, por lo cual precio unitario es igual a 1.65 \$/kg.

La cantidad mensual de rollos de flejes PET producidos es 3500 unidades/mes que equivale a 70,000 kg/mes de recuperado BoPET metalizado de consumo mensual.

La rentabilidad mensual considerando el volumen máximo de producción es:

Utilidad Anual

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Precio venta unitario} \\
 &\quad - \text{Costo de producción unitario}) \times \text{Producción mensual} \left(\frac{\text{kg}}{\text{mes}} \right) \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} \\
 &= \left(1.65 \frac{\$}{\text{kg}} - 1.05 \frac{\$}{\text{kg}} \right) \times 70,000 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} = \mathbf{504,000 \$/\text{año}}
 \end{aligned}$$

Considerando que el costo de compra e instalación de la línea de producción de flejes es igual a \$ 500,000 para una capacidad de línea de producción de flejes PET de 840 toneladas/año (70,000 kg/mes), prácticamente permite recuperar la referida inversión en un año.

Finalmente, estimamos la utilidad total si es que se reutilizara hoy todo el stock:

$$\begin{aligned}
 \text{Utilidad Total} &= \text{ingresos totales} - \text{inversión} \\
 &= \left(1.65 \frac{\$}{\text{kg}} - 1.05 \frac{\$}{\text{kg}} \right) \times 2,828 \text{ TN} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{TN}} - 500,000 \$ \\
 &= \mathbf{1,196,800 \text{ dólares}}
 \end{aligned}$$

5.4 Discusión de Resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos afirmar que los resultados obtenidos respecto a la procesabilidad del recuperado BoPET metalizado para la producción de Fleje PET y la calidad obtenida de los mismos es conforme en comparación a los valores estándar referenciales detallados en este trabajo para los flejes PET de dimensiones 15.5mm x 0.8mm y dimensiones 12.0mm x 0.6mm.

Además, de acuerdo a los cálculos de utilidad anual y total, la implementación de esta línea de producción genera beneficios económicos a partir del segundo año de producción de fleje PET.

Finalmente, la validación final de que los flejes producidos con el recuperado BoPET metalizado son funcionales en la aplicación para la cual han sido fabricados es positiva de parte de los clientes que al día de hoy vienen haciendo uso.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES

La contribución del autor de este Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) corresponde a la generación de la iniciativa y fundamentalmente a la implementación y operación de la línea de producción de flejes PET, así como de la validación de las especificaciones de los flejes PET producidos.

- Desde el punto de vista del proceso tecnológico, la nueva línea productiva implementada para la obtención de rollos de fleje PET a partir de material recuperado BoPET metalizado (merma) se ejecutado bajo la conducción de un equipo de ingenieros de la empresa OPPFILM s.a. incluyendo al autor del presente TSP.
- Se ha validado el cumplimiento de las especificaciones técnicas del fleje PET producido con recuperado BoPET metalizado para la cual se hicieron las pruebas de medición de propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y el % de elongación.
- El aprovechamiento del recuperado BoPET metalizado (merma) que anteriormente no tenía uso y se mantiene en inventario durante año, actualmente está siendo procesado, contribuyendo con los propósitos de la economía circular y de otra parte, de un manejo óptimo en la gestión de residuos.
- La propuesta en el marco de este TSP ha significado una inversión de US\$ 500,000 para la instalación de la línea de producción de Fleje PET ha generado una rentabilidad medida como retorno sobre inversión del 239%, destacándose además que la inversión se recupera en el primer año, fortaleciendo de esta manera el nivel de competitividad de la empresa OPP FILM S.A.

CAPITULO VII. RECOMENDACIONES

Como resultado de la experiencia adquirida en la implementación y puesta en marcha de la referida iniciativa y como actual ingeniero de procesos, se tiene en cuenta que existen otras posibilidad de mejora, se recomienda a la empresa OPP FILM S.A. lo siguiente:

- Evaluar la posibilidad de dosificar el recuperado BOPET cristal en mezcla con el recuperado BoPET, evaluando y comparando la utilidad neta respecto a la alternativa de uso en el proceso principal de producción de láminas de PET. Asimismo, evaluar si existen mejoras en las propiedades mecánicas de los flejes PET.
- Ampliar la cartera de productos en las dimensiones 11.0mm x 0.5mm, 15.5mm x 1.0mm y 19.0mm x 1.0mm para cumplir con las necesidad de nuevo clientes potenciales del sector industrial y agrícola, los cuales representan un volumen importante en el consumo de fleje PET para asegurar y transportar sus cargas.
- Establecer convenios con distribuidores posicionados en el rubro de empaques como lo son la empresa FROMM y GARIBALDI con el objetivo que ampliar el mercado y generar un flujo de venta dinámico y así minimizar el riesgo de volúmenes bajos de venta por la estacionalidad de algunos negocios.

CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

- Santiago Abarca, D. E. (2020). 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). Universidad de Lima.
<http://doi.org/10.26439/ulima.tesis/11233>
- Sánchez Mora, J. J (2003). Comportamiento térmico y mecánico del poli(etilén tereftalato) (PET) modificado con resinas poliméricas basadas en bisfenol-A (tesis para optar al grado de doctor en ingeniería industrial). Universitat Politècnica de Catalunya.
<http://hdl.handle.net/10803/6037>
- Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 147-161. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004>
- Pritchard, G. (1999). Two technologies collide: biaxial orientation of extruded PET sheet. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 457, No. 1, pp. 52-65). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.57468>
- Wypych, G. (2021). *Handbook of Polymers*. 3ra Ed. ChemTec Publishing.
<https://doi.org/10.1016/C2019-0-04228-6>
- Greenpeace International, 2023, <https://www.greenpeace.org/international/>
- The Ocean Cleanup, 2023, <https://theoceancleanup.com/>
- Ellen MacArthur Foundation, 2023, <https://ellenmacarthurfoundation.org/>
- National Geographic Society, 2023, <https://www.nationalgeographic.org/society/>

- United Nations Environment Program, 2023, <https://www.unep.org/es>
- Tecnología del Plástico, 2023, <https://www.plastico.com/es/noticias/guia-sobre-el-pet-propiedades-produccion-y-aplicaciones>

CAPITULO IX. ANEXOS

9. ANEXO 1

Figura 6: Extrusor y tina de enfriamiento

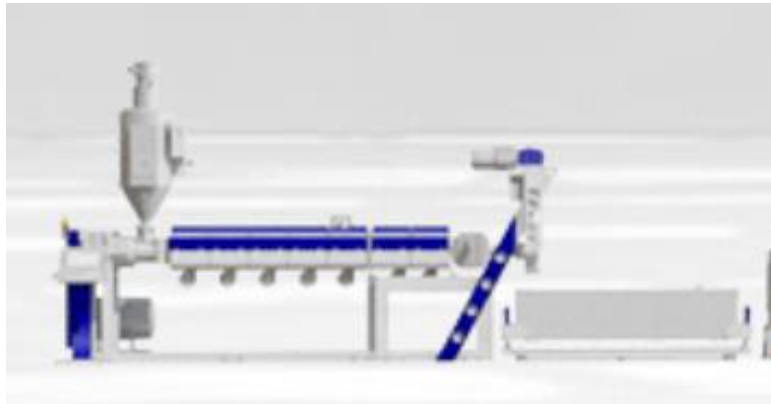


Figura 7: Rodillos de paso, horno de estiramiento y rodillos de estiramiento en frío

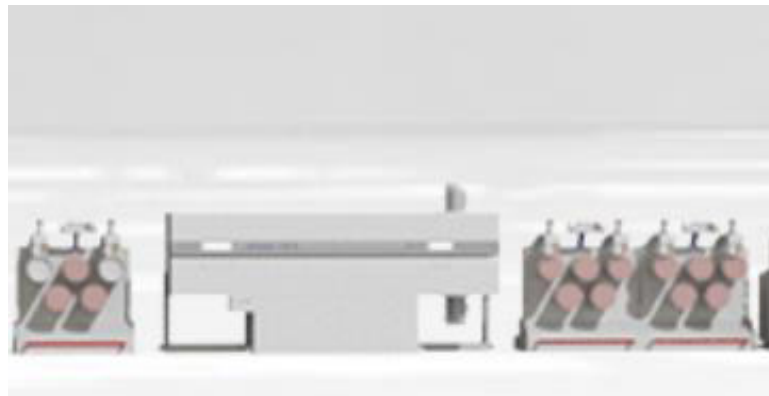


Figura 8: Rodillos de paso, Rodillos de enfriamiento y bobinadores



10. ANEXO 2

Tabla 6

Cotización de disposición del recuperado Bopet Metalizado hacia un relleno sanitario

DATOS DEL SERVICIO						
N°	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS	UM	CANT.	P.U.	P. TOTAL
DESTRUCCIÓN						
1	Productos vencidos para destrucción	DESTRUCCIÓN MECANICA	TN	2230	S/. 350 (Sin IGV)	S/. 780,500.00 (Sin IGV)
TRANPORTE						
2	Furgón cerrado para residuos PELIGROSOS, incluye 1 conductor y 1 operario	30 TN	Viaje	75	S/. 3,000.00 (Sin IGV)	S/. 225,000.00 (Sin IGV)
TOTAL					S/. 1'005,500.00 (Sin IGV)	
NOTA: El recojo se realizará en : PLANTA OPP FILM LURIN y el proceso se realizará en ECOCENTRO CHILCA, ubicada en Quebrada La Chutana Km. 4.2 Chilca - Cañete.						

ELABORADO POR

- Contacto: Katherine Paico Albitres
- Cargo: Jefe Comercial
- Correo: k.paico@sechegroup.com
- Celular: 968 687 198



11. ANEXO 3

Figura 9

Curva DSC de PET virgen

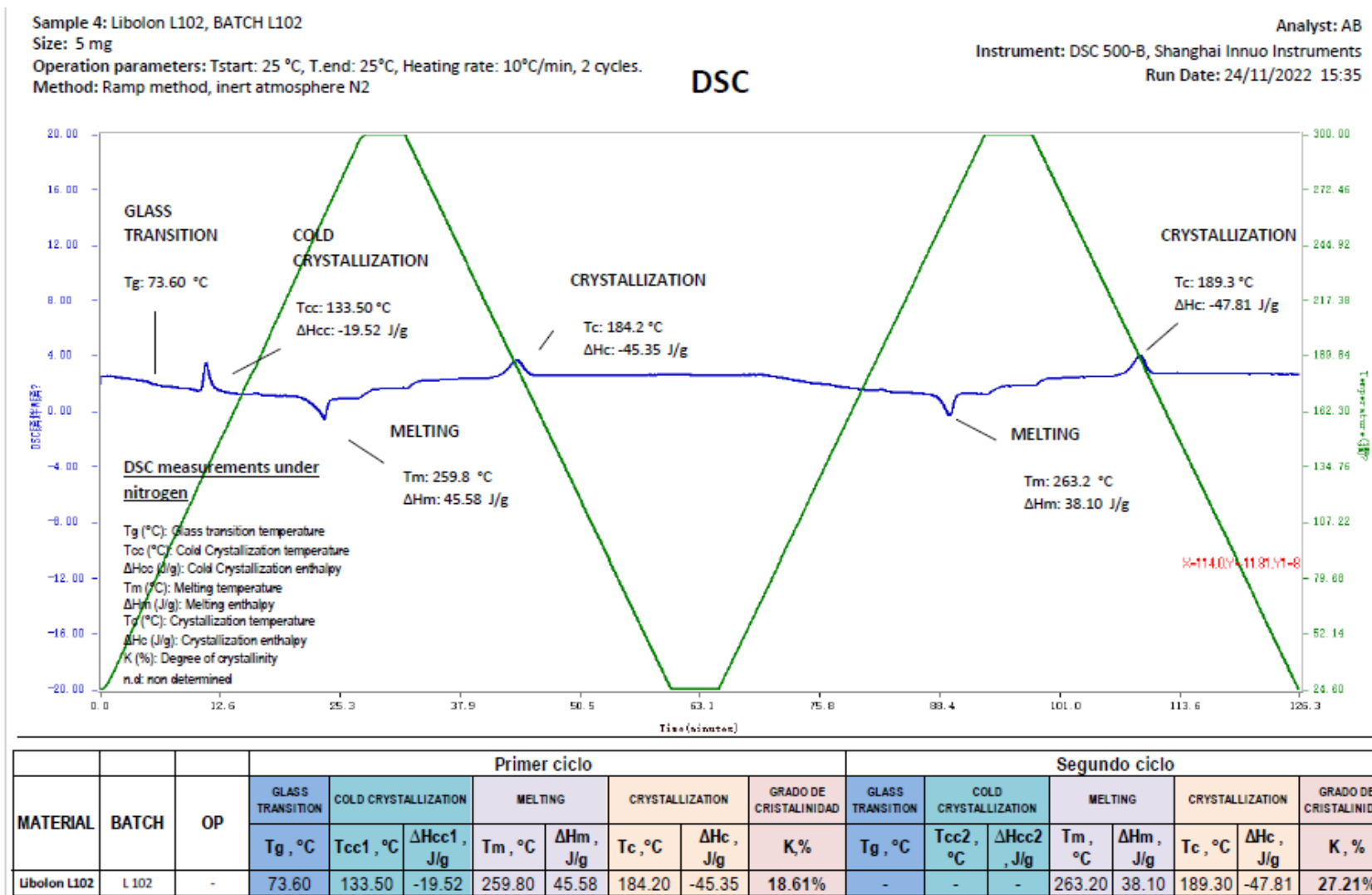


Figura 10

Curva DSC de recuperado PET metalizado

Sample 4: RP-768 PET RECICLADO, BATCH MYD2202303251024

Size: 4 mg

Operation parameters: Tstart: 25 °C, T.end: 25°C, Heating rate: 10°C/min, 2 cycles.

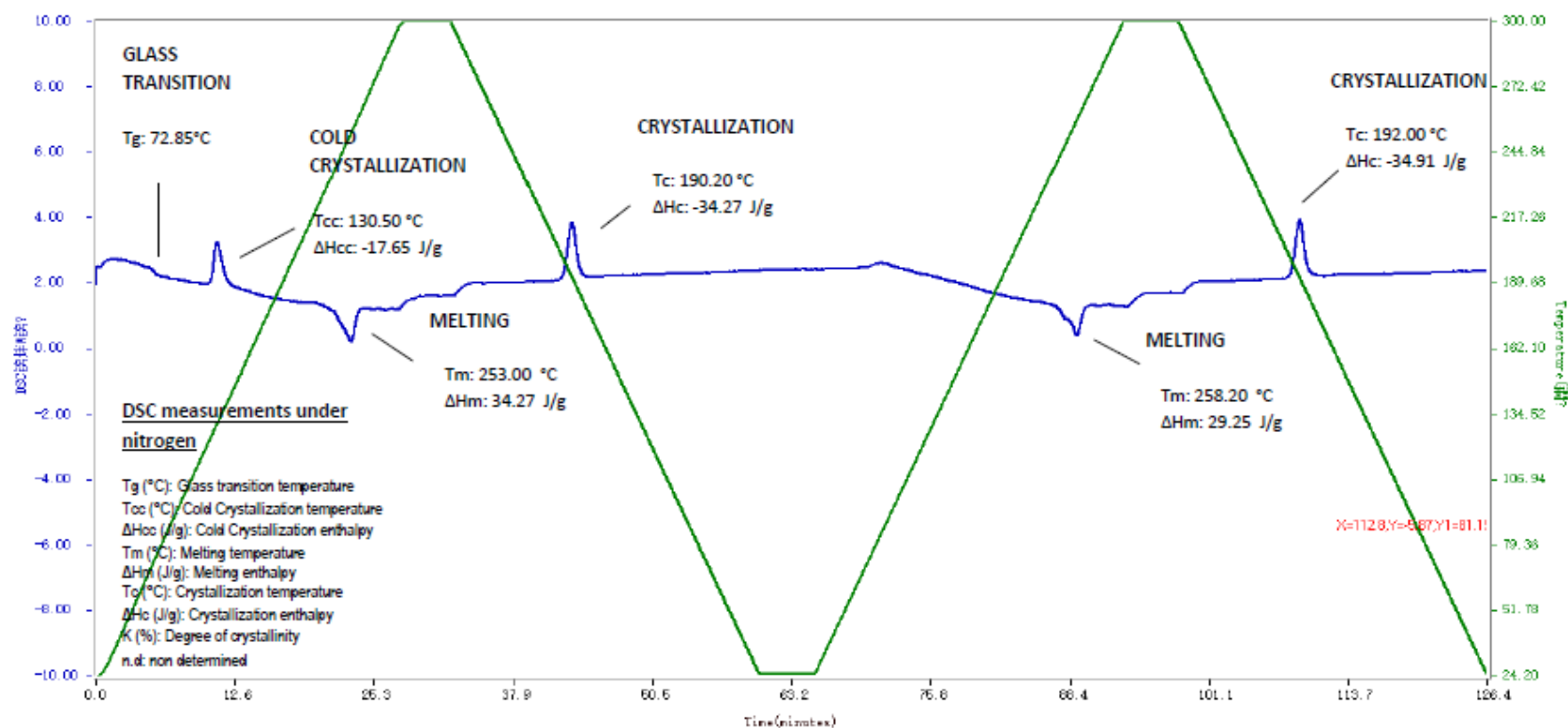
Method: Ramp method, inert atmosphere N2

Analyst: AB

Instrument: DSC 500-B, Shanghai Innuo Instruments

Run Date: 14/09/2023 10:35

DSC



		Primer ciclo								Segundo ciclo					
MATERIAL	BATCH	GLASS TRANSITION	COLD CRYSTALLIZATION		MELTING		CRYSTALLIZATION		GRADO DE CRISTALINIDAD	GLASS TRANSITION	MELTING		CRYSTALLIZATION		GRADO DE CRISTALINIDAD
		Tg , °C	Tcc , °C	ΔHcc , J/g	Tm , °C	ΔHm , J/g	Tc , °C	ΔHc , J/g	K, %	Tg , °C	Tm , °C	ΔHm , J/g	Tc , °C	ΔHc , J/g	K , %
RP-768	MYD2202303251024	72.85	130.50	-17.65	253.00	34.27	192.20	-34.27	11.87%	-	258.20	29.25	192.00	-34.91	20.89%

Figura 11

Curva DSC de Fleje PET

Sample 4: FLEJES AZULES

Size: 3 mg

Operation parameters: Tstart: 25 °C, T.end: 25°C, Heating rate: 10°C/min, 2 cycles.

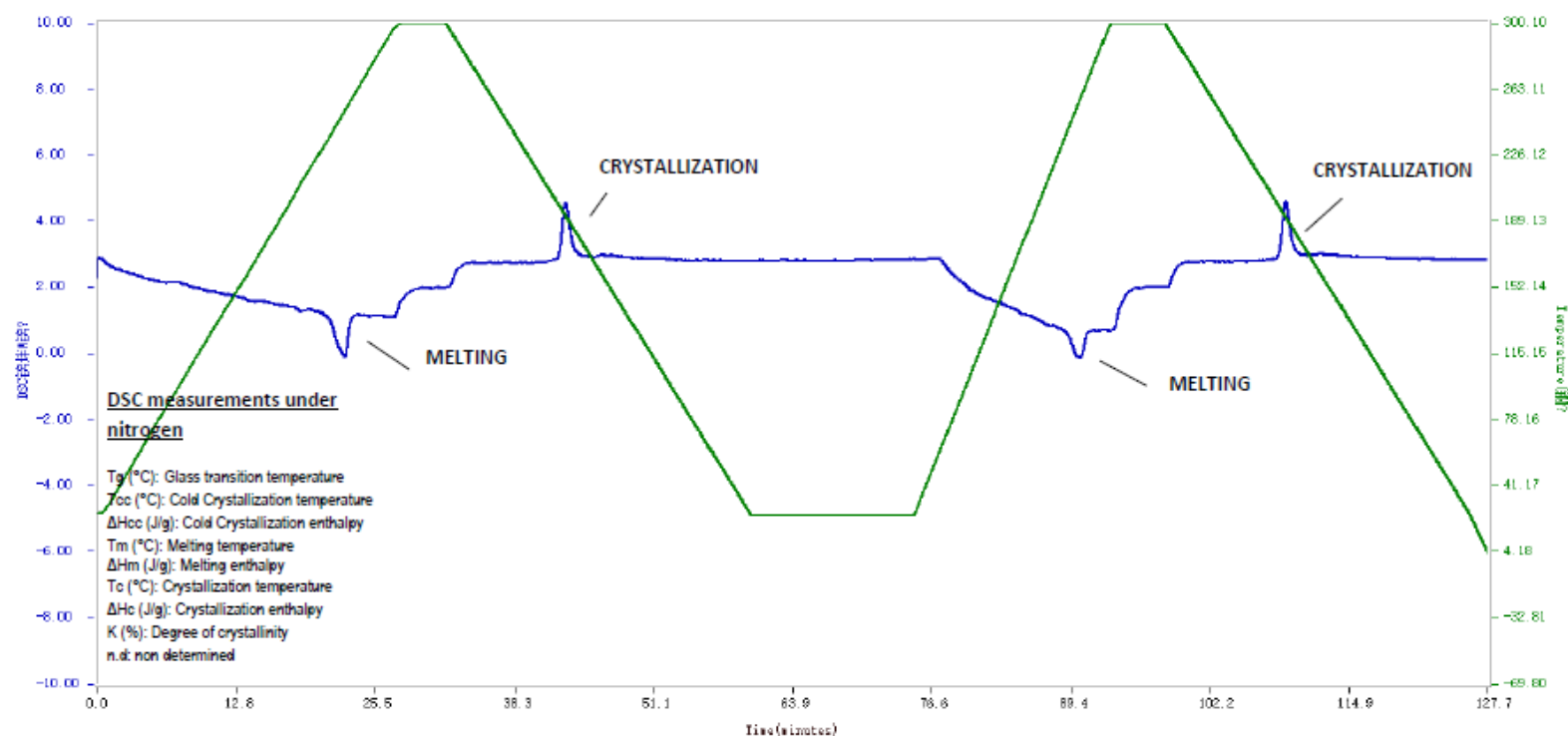
Method: Ramp method, inert atmosphere N2

Analyst: AB

Instrument: DSC 500-B, Shanghai Innuo Instruments

Run Date: 22/11/2023 13:23

DSC

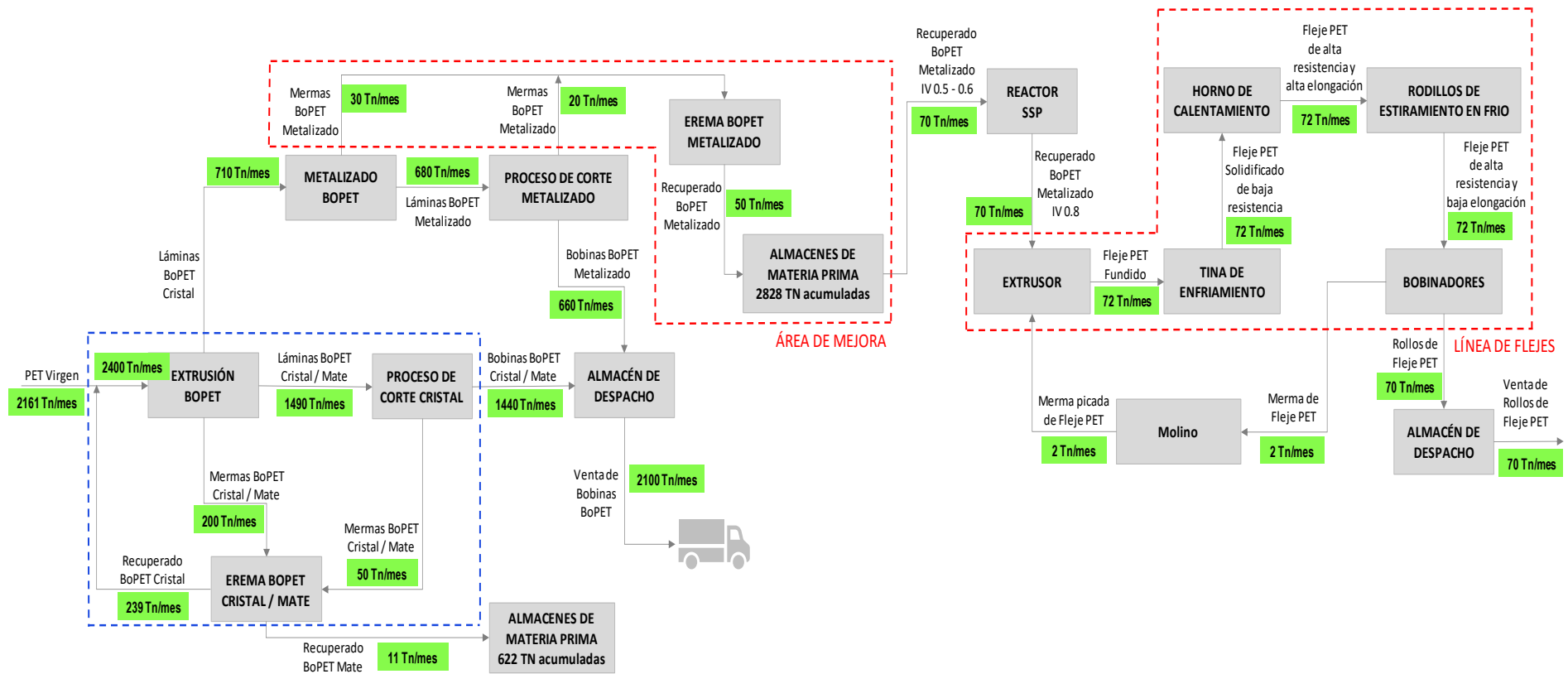


MATERIAL	PROVEEDOR	BATCH	Primer ciclo					Segundo ciclo				
			MELTING		CRYSTALLIZATION		GRADO DE CRISTALINIDAD K, %	MELTING		CRYSTALLIZATION		GRADO DE CRISTALINIDAD K, %
			Tm, °C	ΔHm, J/g	Tc, °C	ΔHc, J/g		Tm, °C	ΔHm, J/g	Tc, °C	ΔHc, J/g	
FLEJES AZULES	FLEJES	-	251.30	64.38	192.30	-49.97	45.99%	257.10	42.48	191.50	-43.93	30.34%

12. ANEXO 4

Figura 12

Balance de Masa del Proceso BoPET y Línea de Flejes



13. ANEXO 5

Balance de Térmico para el Reactor SSP

Se procesan 4,500 kg de PET en un reactor de 4000 m³ de acero inoxidable en 4 etapas descritas en justificación técnica (página 15)

Las etapas de calentamiento son:

Etapas 1: 25°C a 120°C (6 horas)

Etapas 2: 120°C a 160°C (6 horas)

Etapas 3: 160°C a 245°C (8 horas)

El sistema de calentamiento usa aceite térmico que se calienta mediante resistencias eléctricas

La etapa de enfriamiento es:

Etapas 4: 245°C a 50°C (sin aporte de energía)

Datos para los cálculos:

Densidad PET: 1380 kg/m³

Calor específico PET: 1.2 kJ/kg°C

Entalpía transición vítrea PET metalizado: 0.416 kJ/kg (79°C)

Entalpía cristalización PET metalizado: 0.086 kJ/kg (130°C)

Se asumen las siguientes pérdidas de calor respecto al calor suministrado:

Etapas 1: 5%

Etapas 2: 6%

Etapas 3: 7%

Calor específico del aceite térmico: 2.0 kJ/kg°C

Densidad del aceite térmico: 0.8 kg/l

Resultados de los Balances de Energía

Se muestran los cálculos detallados por cada etapa

Etapas 1 (25→120°C) 6 hrs:

$$\text{Energía 1} = \text{Calor sensible} + \text{Entalpía transición vítrea} = m \cdot C_e \cdot \Delta T + m \cdot H_{vt}$$

$$\text{Energía 1} = 4500 \text{ kg} \cdot 1.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot (120-25)^\circ\text{C} + 4500 \text{ kg} \cdot 0.416 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Energía 1} = 5.14 \times 10^5 \text{ kJ} = 23.8 \text{ Watts}$$

$$\text{Pérdidas de calor 1 (5\%)} = 0.05 \cdot 5.14 \times 10^5 \text{ kJ} = 0.26 \times 10^5 \text{ kJ} = 1.2 \text{ Watts}$$

Etapas 2 (120→160°C) 6 hrs:

$$\text{Energía 2} = \text{Calor sensible} + \text{Entalpía cristalización} = m \cdot C_e \cdot \Delta T + m \cdot H_{cc}$$

$$\text{Energía 2} = 4500 \text{ kg} \cdot 1.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot (160-120)^\circ\text{C} + 4500 \text{ kg} \cdot 0.086 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Energía 2} = 2.16 \times 10^5 \text{ kJ} = 10.0 \text{ Watts}$$

$$\text{Pérdidas de calor 2 (6\%)} = 0.06 \cdot 2.16 \times 10^5 \text{ kJ} = 0.13 \times 10^5 \text{ kJ} = 0.6 \text{ Watts}$$

Etapas 3 (160→245°C) 8 hrs:

$$\text{Energía 3} = \text{Calor sensible} = m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

$$\text{Energía 3} = 4500 \text{ kg} \cdot 1.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot (245-160)^\circ\text{C}$$

$$\text{Energía 3} = 4.59 \times 10^5 \text{ kJ} = 15.94 \text{ Watts}$$

$$\text{Pérdidas de calor 3 (7\%)} = 0.07 \cdot 4.59 \times 10^5 \text{ kJ} = 0.32 \times 10^5 \text{ kJ} = 1.12 \text{ Watts}$$

$$\text{Energía total} = \text{Energía 1,2,3} + \text{Pérdida de calor 1,2,3}$$

$$\text{Energía total} = 5.14 \times 10^5 \text{ kJ} + 2.16 \times 10^5 \text{ kJ} + 4.59 \times 10^5 \text{ kJ} + 0.26 \times 10^5 \text{ kJ} + 0.13 \times 10^5 \text{ kJ} + 0.32 \times 10^5 \text{ kJ}$$

$$\text{Energía total} = 12.6 \times 10^5 \text{ kJ} = 52.7 \text{ Watts}$$

Podemos calcular también el caudal requerido del aceite térmico con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{aceite}} = E_{\text{total}} / (C_e \cdot \Delta T)$$

Donde:

E_{total} = Energía térmica requerida calculada previamente (12.6×10^5 kJ)

C_e = Calor específico del aceite (2.0 kJ/kg°C)

ΔT = Diferencia de temperatura del aceite (ingresa a 245°C y sale a 230°C)

$$Q_{aceite} = \frac{E_{total}}{C_e} \times \Delta T = \frac{12.6 \times 10^5 \text{ kJ}}{2.0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} \times (245 - 230)^\circ\text{C}}$$

$$Q_{Aceite} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 2.625 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$