



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA READECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO, EN
LA FABRICACIÓN DE PELLET Y PELÍCULA DE POLIETILENO DE ALTA Y BAJA DENSIDAD
RECICLADO, PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA**

Dennis Stuardo Guevara Roca

Asesorado por el MSc. Ing. Oscar Estrada Morales

Guatemala, abril de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA READECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO, EN
LA FABRICACIÓN DE PELLET Y PELÍCULA DE POLIETILENO DE ALTA Y BAJA DENSIDAD
RECICLADO, PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DENNIS STUARDO GUEVARA ROCA

ASESORADO POR EL MSC. ING. OSCAR ESTRADA MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno |
| VOCAL II | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| VOCAL III | Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa |
| VOCAL IV | Br. Walter Rafael Véliz Muñoz |
| VOCAL V | Br. Sergio Alejandro Donis Soto |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|--|
| DECANO | Ing. Herbert René Miranda Barrios |
| EXAMINADOR | Ing. Rodolfo Espinoza Smith |
| EXAMINADORA | Inga. Thelma Maricela Cano Morales |
| EXAMINADOR | Ing. Jaime Domingo Carranza González |
| SECRETARIA | Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA READECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO, EN LA FABRICACIÓN DE PELLET Y PELÍCULA DE POLIETILENO DE ALTA Y BAJA DENSIDAD RECICLADO, PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 23 de octubre de 2013.



Dennis Stuardo Guevara Roca



0709122

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0028-2013

Guatemala, 25 de octubre de 2013

Director:
Víctor Manuel Monzón Valdez
Escuela de Ingeniería Química
Presente.

Estimado Director:


Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Dennis Stuardo Guevara Roca** con carné número **88 - 12251**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"


MA. Oscar Estrada Morales
Asesor (a)
Ing. Oscar Estrada Morales, MAI
Colegiado No. 718

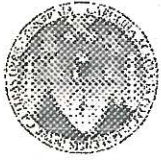

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504
MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



Ref.EIQ.TG.048.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **DENNIS STUARDO GUEVARA ROCA**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ENERGÍA Y AMBIENTE** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA READECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO, EN LA FABRICACIÓN DE PELLET Y PELICULA DE POLIETILENO DE ALTA Y BAJA DENSIDAD RECICLADO, PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor-Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, abril de 2014

Cc: Archivo
Copia: Colegio de Ingenieros Químicos de Guatemala
VMMV/ale





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA READECUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO, EN LA FABRICACIÓN DE PELLET Y PELÍCULA DE POLIETILENO DE ALTA Y BAJA DENSIDAD RECICLADO, PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Dennis Stuardo Guevara Roca**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, abril de 2014

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

| | |
|-----------------------|--|
| Dios | Mi Señor y Salvador, dueño de mi vida, que sea este logro para su mayor honra y Gloria. Bendito seas Señor, gracias por tu misericordia. |
| Mi esposa | Alma, amor de vida. |
| Mis hijos | Lisamaría Cristina, Pedro David Moisés, Jose Adrián de Jesús y Anaisabela Georgina, |
| Mis padres | Virgilio y Rosa Marina. |
| Mis suegras | Georgina de Pivaral y Esperanza Barrientos. |
| Mis hermanos | En especial a mi hermano Julio. |
| Mis familiares | Mis tías y tíos, Balvina de Jesús, Elizabeth, Alma, María Antonia, Marta Lidia, Miguel y Veralí, a mis primos Paola y Juan Diego, Byron y Edna, Ernesto y Lorraine, Leonel, Miguel Alberto y María de los Ángeles. A mis sobrinos, en especial a Julito. |

Mis amigos

Especialmente Marco y Flory, Jaime y Carola, Gonzalo y Laura, José y Mónica, Eduardo e Isabel, Pablo e Isabel, Marcelo y Romina, Juan Carlos y Luz de María, Oliverio y Ana Luisa, Héctor y Ruth, Edith, Mercy, Luz Marie, Roberto, Manlio, Mario, Oscar, Carlos, Domingo, Iñigo, Hugo y Sebastián (q.e.p.d).

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|-------------------------------|--|
| Dios | Dios del amor, creador Supremo, a quien debo mi existencia en su misericordia infinita. |
| Mi esposa | Mi amor, regalo de Dios, que sea colmada de bendiciones por su incansable apoyo y razón de todos mis éxitos. |
| Mis hijos | Por ser mi inspiración, mi alegría, gracias por su amor y darle sentido a mi vida. |
| Mis padres | Todo mi amor y respeto. A mi madre, Rosa Marina, especialmente, por su entrega, dedicación y esfuerzo para brindarme lo mejor de su vida y a quien debo mi educación. A mi padre, Virgilio, por sus oraciones. |
| Mis suegras | Por su cariño y apoyo incondicional. |
| Mis hermanos y familia | Por su amor fraterno y solidaridad. |
| Mis amigos | Por su amistad sincera y momentos inolvidables. |
| Mis centros de estudio | Universidad de San Carlos y Liceo Guatemala, por todas las experiencias vividas. |

**Mis catedráticos
y maestros**

Por su sabiduría, entrega y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | III |
| LISTA DE SÍMBOLOS | V |
| GLOSARIO | VII |
| RESUMEN | XV |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 01 |
| 2. ANTECEDENTES | 03 |
| 3. OBJETIVOS | 07 |
| 4. JUSTIFICACIÓN | 09 |
| 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 13 |
| 6. ALCANCES | 17 |
| 7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL | 19 |
| 7.1. Los desechos plásticos | 19 |
| 7.2. Proceso de reciclaje de desechos plásticos | 21 |
| 7.3. Polietileno, termoplástico reciclable | 23 |
| 7.4. Reciclaje de polietileno en Guatemala | 27 |
| 7.4.1. Situación ambiental de Guatemala y manejo de desechos sólidos | 28 |
| 7.5. Aplicaciones después de reciclaje | 29 |

| | | |
|------|--|----|
| 7.6. | Proceso extrusión para formación de pellet reciclado | 30 |
| 7.7. | Clasificación de los polietilenos..... | 34 |
| 7.8. | Proceso de extrusión y componentes | 35 |
| 7.9. | Aplicaciones del PEBD..... | 37 |
| 8. | CONTENIDO | 39 |
| 9. | METODOLOGÍA | 43 |
| 9.1. | Tipo de investigación..... | 43 |
| 9.2. | Tipo de hipótesis de investigación | 43 |
| 9.3. | Variables e indicadores | 43 |
| 9.4. | Tipo de análisis según diseño de investigación | 44 |
| 9.5. | Metodología | 45 |
| 10. | TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN | 53 |
| 11. | RESULTADOS ESPERADOS | 55 |
| 12. | CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES..... | 57 |
| 13. | RECURSOS NECESARIOS | 59 |
| 14. | BIBLIOGRAFÍA | 61 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1. | Reciclajes de plásticos | 22 |
| 2. | Proceso reciclajes polietileno | 24 |
| 3. | Cadena de polímeros | 27 |
| 4. | Partes principales de un extrusor | 35 |
| 5. | Diseño de cañón de extrusión con zonas de alimentación, compresión y dosificación de tamaño y formas diferentes..... | 36 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Propiedades de polietileno | 25 |
| II. | Características de mallas para tamizado | 30 |
| III. | Referencia corriente consumida en función temperatura de fundición PE..... | 32 |
| IV. | Definición de variables | 46 |
| V. | Características de película polietileno a reciclar | 49 |
| VI. | Condiciones de operación extrusor para reciclaje | 50 |
| VII. | Especificaciones de malla para medición de pellet | 50 |
| VIII. | Propiedades físicas de película extruido con pellet reciclado | 51 |
| IX. | Consumo de energía eléctrica y agua para mezcla resina virgen | 52 |
| X. | Descripción de costos por recursos requeridos en proceso de reciclaje de polietileno | 59 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| A | Amperios |
| DPM o MWD | Curva de distribución de pesos |
| H₂C-CH₂ | Etileno |
| °C | Grados Celsius |
| g/cm³ | Gramo por centímetro cúbico |
| g/10 min | Gramos en 10 minutos |
| kg | Kilogramo |
| kgf/m² | Kilogramo fuerza por metro cuadrado |
| kg/h | Kilogramos por hora |
| kJ/kg | Kilo Joule por Kilogramo |
| kN | Kilo Newton |
| KV/cm | Kilo voltio por centímetro |
| kWh | Kilowatt por hora |
| Lb_f | Libras fuerza |
| L/min | Litros por minuto |
| mg | Miligramos |
| MJ/kg | Mega Joule por Kilogramo |
| mm | Milímetro |
| N/mm² | Newton por milímetro cuadrado |
| n | Número de cadenas |
| M | Peso molecular |
| PC | Policarbonato |
| PE | Polietileno |

| | |
|------------|------------------|
| % | Porcentaje |
| plg | Pulgada |
| TM | Tonelada Métrica |
| UV | Ultravioleta |

GLOSARIO

| | |
|-------------------------------|--|
| Aditivos | Substancias agregadas en los plásticos antes, después o durante su procesamiento para modificar las propiedades o comportamiento de los plásticos. |
| Composición | La incorporación de ingredientes adicionales necesitados para procesar y obtener propiedades óptimas. Estos ingredientes pueden incluir aditivos para mejorar las propiedades físicas de un polímero, estabilidad o procesabilidad. La composición normalmente se requiere para los materiales reciclados. |
| Densidad | Relación entre la masa y volumen de un cuerpo. |
| De-polimerización | La conversión o reciclado de plásticos de vuelta en materias primas por disolución (rotura) de la molécula de polímero. La depolimerización incluye procesos como metanolisis, glicolisis, hidrolisis, y pirólisis. |
| Desarrollo sustentable | Para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. |

Extrusión

Técnica de procesamientos de plásticos en la que las resinas se funden, calientan y bombean. El material a ser procesado es hecho pedazos entre un tornillo y la pared del barril que es fijo. Este proceso produce energía friccional que calienta y fusiona la sustancia para ser después transportada abajo del barril. El fundido extruido de la máquina se procesa después de la fase de expulsión.

Extrusor

Una máquina que fuerza a materiales sólidos dúctiles o semiblandos a través de una abertura de forma apropiada para producir perfiles, tubas, planchas, películas continuamente. Ofrece las ventajas de una técnica de procesado muy versátil, no mejorada en importancia económica por ninguna otra máquina. El concepto básico es que el material pasa de una tolva a un cilindro en el cual es fundido y arrastrado hacia adelante por el movimiento de un tornillo. Cuando el material fundido llega al final del cilindro, se ve forzado a pasar a través de un filtro antes de entrar en la hilera donde se le da la forma deseada sin interrupción.

Glicólisis

Un proceso que rompe largas cadenas de polímeros en cortas cadenas oligómeros que son re-polimerizadas en polímeros vírgenes.

| | |
|-------------------|--|
| Husillo | Elemento metálico de geometría helicoidal que plastifica los polímeros girando en un cilindro hueco llamado barril o cañón. Los diseños empleados en los husillos varían en función de los requerimientos del material plástico y del proceso de transformación. |
| LDPE | Poliétileno de densidad baja. Un plástico usado predominantemente en las aplicaciones de película. LDPE se usa para fabricar las películas flexibles como aquéllas usadas para bolsas de plástico utilizadas en los centros comerciales. |
| LLDPE | Poliétileno de baja-densidad lineal. Un plástico que se usa predominantemente en aplicaciones de película. LLDPE se usa en artículos como bolsas de comestibles, empaquetación de basura y forros para el relleno sanitario. |
| Malla | Filtro colocado en las máquinas de extrusión para retener las impurezas presentes en el material plastificado. |
| Melt Index | Vocablo inglés del índice de fluidez, que expresa la cantidad de un material que fluye cada diez minutos a través de un reómetro. |
| Mesh | Número de aperturas por pulgada cuadrada de una malla. Es el cuadrado del número de hebras de metal o plástico por pulgada lineal. |

| | |
|---------------------------|---|
| Micrón o Micra | Medida de longitud muy empleada en biología y también para indicar el espesor de películas plásticas, equivalente a una milésima de milímetro (micrómetro - símbolo μm). |
| Módulo Elasticidad | Es la relación constante que existe entre el esfuerzo y el alargamiento, dentro del intervalo elástico de una sustancia. Puede determinarse en los ensayos de tracción, compresión o flexión. Debido al comportamiento viscoelástico de los plásticos, debe tenerse en cuenta la dependencia respecto al tiempo. |
| Molde | Cuerpo hueco o cavidad dentro del cual se introduce la resina fundida para que esta copie la forma interna del mismo. El copiado se puede lograr por la expansión de la resina con la ayuda de un gas (aire, por ejemplo) introducido a presión (como en moldeado por soplado o inyección asistida con gas) o por la compactación de la resina dentro de la cavidad (como en moldeo por inyección). |
| Monómero | Compuesto que puede reaccionar para formar un polímero. |

| | |
|----------------------------|--|
| Orientación | Alineación de las moléculas de un polímero en una o más coordenadas. La orientación puede ser generada durante el proceso de fabricación con el propósito de incrementar las propiedades mecánicas de productos formados, como películas, laminas, filamentos, cuerpos huecos soplados o termo formados. |
| Orientación biaxial | El proceso de estiramiento de películas plásticas calientes, u otros objetos plásticos, en dos direcciones en condiciones tales que las moléculas resultan orientadas también en esas dos direcciones. |
| Pelletizaje | Proceso para producir tamaños uniformes de resinas plásticas vírgenes o recicladas. El polímero fundido se fuerza a través de un extrusor, que produce largas cuerdas de resina. Las cuerdas se sumergen en un baño de agua para solidificar y se cortan para hacer los cilindros uniformes. |
| Pellets | Cilindros diminutos de Resina virgen o reciclada que están listos para fundirse. |
| PET | Polietileno Tereftalato. El PET es utilizado principalmente para la fabricación de recipientes. |
| Pirólisis | La descomposición termal de material orgánico a través de la aplicación de calor en la ausencia de oxígeno. |

| | |
|-------------------------------|--|
| Polímero | Compuesto orgánico de alto peso molecular, natural o sintético cuya estructura puede representarse por una unidad pequeña repetida, el monómero (el ej., polietileno, caucho, celulosa). |
| PVC | Cloruro de Poli vinilo. Antes de la introducción de PET en los años setenta, los recipientes líquidos eran principalmente manufacturados en PVC. Hoy día el PVC todavía se usa para etiquetas. |
| Reciclaje | El proceso de recuperación de materiales que se transforman en nuevos productos. |
| Reología | Estudio del flujo de la materia en relación con el esfuerzo y la deformación, debe ser considerada en el moldeo de plásticos porque al fundir se transforman en líquidos viscosos. |
| Resina | Cualquiera de una clase de sólido o semisólido de productos orgánicos de origen natural o sintético, generalmente de pesos moleculares altos sin un punto de fundición definido. La mayoría de las resinas son polímeros. |
| Resistencia al impacto | Habilidad de un material para resistir cargas de choque sin romperse. También se puede medir como el trabajo realizado para romper un material por la acción de un impacto, llevado de una manera específica sobre una probeta del material. |

Tamiz molecular

Es un material que contiene poros pequeños de un tamaño preciso y uniforme que se usa como agente adsorbente para gases y líquidos. Las moléculas que son lo suficientemente pequeñas para pasar a través de los poros son absorbidas, mientras que las moléculas mayores no. A diferencia de un filtro, el proceso opera a nivel molecular.

Viscosidad

Medida de la fricción interna de un fluido y que está relacionada con la resistencia del fluido al movimiento.

RESUMEN

En el medio guatemalteco existe un interés en alta consideración, para el proceso de reciclaje de plásticos, teniendo como finalidad primordial el control y manejo de los desechos plásticos generados en la población, ya que constituye un foco de contaminación latente, que no solo afecta el entorno de la ciudad de Guatemala, sino también los recursos hídricos tales como los ríos y lagos, como también, en rellenos sanitarios y basureros donde se acumula todo desecho plástico.

El presente trabajo se realiza dentro los requerimientos de la Gestión Ambiental, y específicamente dentro del proceso de reciclaje de polietileno de baja y alta densidad a partir de película proveniente del proceso de extrusión tipo burbuja o soplada.

Se readecuarán las condiciones de proceso, en la fabricación de pellet y película de polietileno de alta y baja densidad reciclado, para reducir el consumo de agua y energía eléctrica. Para comprobar la hipótesis planteada, se analizará el uso eficiente de las condiciones de agua y energía eléctrica, y obtener un pellet reciclado que permita su conversión para la fabricación de película de polietileno de alta y/o baja densidad con características de prestaciones normales de uso.

Se analizará el impacto ambiental que representa el manejo de plásticos en el proceso de reciclaje de los mismos, como también, identificando las ventajas que ofrece a la sociedad, en beneficio de reducir y controlar los desechos generados por la industria de conversión de plásticos (película flexible).

Asimismo, se describirá el proceso de extrusión que permite la fabricación y obtención del pellet de polietileno, para la conversión en película de polietileno reciclada, identificando las variables de control de proceso, tales como, temperatura, revoluciones por minuto del tornillo extrusor, tamaño de partícula del pellet, índice de fluidez del polietileno una vez que alcanza su índice de fundición, el consumo de energía eléctrica y consumo de agua, para la obtención del pellet final.

Se clasificarán los polietilenos, como también, las prestaciones y aplicaciones de película extruida a partir de pellet reciclado, obtenido en condiciones óptimas en el consumo de energía eléctrica y agua de enfriamiento.

Se describirá en detalle la clasificación de la película de polietileno y las variables de proceso que se analizarán, permitiendo un análisis comparativo en las diferentes variables de control del producto final. Finalmente se indica el análisis estadístico que se aplicará a los resultados de las pruebas.

Es importante recalcar, que el objetivo general a cumplirse, será establecer las condiciones de consumo de energía eléctrica y recurso hídrico, que permitan optimizar el costo de recuperación, en la obtención de un tamaño de partícula de pellet de altas prestaciones en el reciclaje de película flexible, para ser utilizado en el proceso de extrusión de película soplada de Polietileno Baja Densidad (PEBD) y Polietileno Alta Densidad (PEAD).

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de la líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, dentro de los requerimientos de la Gestión Ambiental, y específicamente dentro de el proceso de reciclaje de polietileno de baja y alta densidad a partir de película proveniente del proceso de extrusión tipo burbuja o soplada.

Se readecuarán las condiciones de proceso, en la fabricación de pellet y película de polietileno de alta y baja densidad reciclado, para reducir el consumo de agua y energía eléctrica. Para comprobar la hipótesis plateada, se analizará el uso eficiente de las condiciones de agua y energía eléctrica, y obtener un pellet reciclado que permita su conversión para la fabricación de película de polietileno de alta y/o baja densidad con características de prestaciones normales de uso.

Se caracterizará la distribución del tamaño de partícula del pellet reciclado, por medio de una correlación de las condiciones de energía eléctrica y agua consumida en el proceso de extrusión de película de polietileno, mediante la determinación de rangos de clasificación de materiales (polietileno alta y baja densidad), para aumentar la calidad y productividad en la fabricación del pellet reciclado.

El marco teórico y conceptual se divide en cuatro partes principales. La primera parte brinda una explicación breve de la importancia en el manejo de residuos en los países del continente de América, mostrando la distribución y clasificación de los mismos según su importancia.

La segunda parte analiza el impacto ambiental que representa el manejo de plásticos en el proceso de reciclaje de los mismos, como también, identificando las ventajas que ofrece a la sociedad, en beneficio de reducir y controlar los desechos generados por la industria de conversión de plásticos (película flexible).

La tercera parte describe el proceso de extrusión que permite la fabricación y obtención del pellet de polietileno, para la conversión en película de polietileno reciclada, identificando las variables de control de proceso, tales como, temperatura, revoluciones por minuto del tornillo extrusor, tamaño de partícula del pellet, índice de fluidez del polietileno una vez que alcanza su índice de fundición, el consumo de energía eléctrica y consumo de agua, para la obtención del pellet final.

La cuarta parte explica la clasificación de los polietilenos, como también, las prestaciones y aplicaciones de película extruida a partir de pellet reciclado, obtenido en condiciones óptimas en el consumo de energía eléctrica y agua de enfriamiento.

En la sección de Métodos y Técnicas, se describe en detalle la clasificación de la película de polietileno y las variables de proceso que se analizarán, permitiendo un análisis comparativo en las diferentes variables de control del producto final. Finalmente se indica el análisis estadístico que se aplicará a los resultados de las pruebas.

2. ANTECEDENTES

Según Elías Castells (2012), refiere que en la unidad europea siendo integrada por países denominados desarrollados, se han dado a la tarea aportar a nivel intelectual el concepto, aplicación y beneficios del reciclaje, a fin de contra restar la problemática medioambiental que está afectando el todo desecho generado por países industrializados, y que de no existir medidas consistentes y de largo plazo, el medio ambiente se castigará en una magnitud inimaginable. Ahí la gran importancia de aplicar el reciclaje de desechos plásticos, para reutilizar un material que puede durar hasta 15 años en degradarse.

El Instituto Mexicano del Plástico Industrial (2000), refiere que dentro de la variedad de polímeros, el polietileno de baja densidad (PEBD) y polietileno de alta densidad (PEAD) respectivamente, sufren una sensible pérdida de densidad por el rompimiento de cadenas moleculares, reduciendo la resistencia a la elongación y tensión del material.

Cuando el PEBD se procesa para realizar película, es común encontrar geles y dificultad de procesamiento, por el incremento en el índice de fluidez. Y se hace aún más complejo, cuando el polietileno está mezclado con otros plásticos tales como Lineal Polietileno de Baja Densidad (LPEBD), EVOH, PVDC y ionómeros, así como también, tintas de impresión.

El PEBD y PEAD tienen la ventaja de resistir elevadas temperaturas, sin llegar fácilmente a la degradación por la acción del calor. Sin embargo, los fabricantes de aditivos han desarrollado antioxidantes que conservan mejor las propiedades mecánicas del plástico, así como de agentes absorbentes de luz ultravioleta para aplicaciones a la intemperie.

Las técnicas de manejo y reciclaje de PEBD están orientadas principalmente a reprocesar películas, enmarcando los siguientes sistemas:

- Físico
- Separación con hidrociclón
- Filtración
- Pelletizado
- Molido
- Térmico
- Incineración

La técnica que se analizará en el presente estudio, constituye la pelletización, el cual consiste en un proceso de extrusión con un dado especial a base de un plato perforado con orificios de 2 o 3 milímetros, donde a través de ellos fluye el plástico fundido y homogenizado para posteriormente ser cortado. El corte se realiza por medio de cuchillas a la cabeza del dado, denominándose pelletizado en caliente y cuando se forman tiras que se enfrían en tinas de agua y posteriormente se cortan, se denominan pelletizado en frío (Uribe, 1996).

Según Pearson (1999), la administración de desperdicio de desechos sólidos plásticos, constituye un pilar importante para el manejo eficiente de mezclas combinadas resina virgen/resina reciclada, controlando el costo de fabricación de películas plásticas.

La tendencia actual es cada vez más hacia una movilización para atajar el problema, tanto por parte de los gobiernos como de distintos sectores civiles comprometidos con el problema, tendencia que toma un impulso gracias a la puesta en práctica de los Mecanismos de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto (Carneiro, 1998).

3. OBJETIVOS

General

Establecer las condiciones de consumo de energía eléctrica y recurso hídrico, que permitan optimizar el costo de recuperación, en la obtención de un tamaño de partícula de pellet de altas prestaciones en el reciclaje película flexible, para ser utilizado en el proceso de extrusión de película soplada de Polietileno Baja Densidad (PEBD) y Polietileno Alta Densidad (PEAD).

Específicos

1. Determinar los rangos de clasificaciones de los materiales (PEBD, PELBD, PE Fraccional y PEAD), que garanticen un reciclaje estable en calidad y productividad en la fabricación del pellet reciclado.
2. Describir las características de operación del proceso de extrusión de película soplada (tipo burbuja), caracterizando el tamaño de partícula del pellet reciclado, para una productividad Kg/h consistente.
3. Describir las propiedades químicas del pellet de PEBD y PEAD (estabilidad cadena molecular, capacidad de mezcla según densidad del polietileno) como material termoplástico, a partir del reciclaje de película plástica.

4. Correlacionar los kWh de energía eléctrica consumida en el proceso de reciclaje versus la propiedad de resistencia de la película extruida, manteniendo las características de elongación y rasgado en la misma.
5. Establecer el método de recirculación del agua drenada, para reutilizarse en el enfriamiento del pellet obtenido a partir del reciclaje de película plástica, para optimizar el uso del recurso hídrico.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se realiza acorde a las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, permitiendo readecuar las condiciones de energía eléctrica y recurso hídrico, dentro de la Gestión de Energía, para optimizar el costo de recuperación de pellet reciclado.

La investigación en materiales es considerada primera en orden de importancia internacionalmente y dirigida a lo siguiente:

- La obtención de nuevos materiales y la caracterización de los mismos.
- La mejora de los métodos de procesamiento tradicionales
- El desarrollo de nuevos procesos industriales

Teniendo como referencia de la importancia que tiene el proceso de reciclaje en los países de la región de México y Centroamérica, la CONACyT en México en su documento “Prospectiva Tecnológica Industrial de México 2002-2015”, establece que los resultados de opinión para proyectos denominados como “Nuevos procesos para el reciclado de polímeros”, son en general los siguientes:

- Nivel de conocimientos: medio en 60,32%
- Grado de importancia: alto en 71,43%
- Limitaciones: tecnológicas en 41,18%
- Impacto: calidad de vida en 46,67 %, desarrollo industrial en 42,22%
- En mejoramiento de la competitividad con América Latina:

- Ciencia y Tecnología: bueno en 75%
- Innovación: bueno en 75%
- Producción: bueno en 73,91%
- Comercialización: bueno en 69,57%

El presente trabajo de investigación tiene relevante importancia, ya que por parte de los países industrializados ha existido un interés en el manejo de desechos sólidos, y para ello el reciclaje de plásticos ha sido desde hace dos décadas, un tema relevante en la gestión ambiental a fin de contribuir con la limpieza en el medio ambiente.

En Guatemala, al igual que en el resto del mundo, el manejo de desechos plásticos representa una tarea constante, ya que en el mercado de consumo se observa diariamente que el plástico representa el medio de comercializar cualquier tipo de producto, ya sea alimenticio, agrícola y de uso general.

Es por ello que el presente trabajo se realiza debido a que el proceso de reciclaje de película de polietileno, representa actualmente un medio para optimizar los costos de fabricación de dicho termoplástico en el proceso de extrusión soplada (tipo burbuja), siendo las variables de energía eléctrica y agua de suma importancia para alcanzar una resina reciclada de altas presentaciones, en toda planta de conversión de plásticos, como también, en empresas dedicadas específicamente al proceso de reciclaje.

Los procesos de reciclados de polímeros ocupan un lugar importante para cumplir con objetivos, tales como:

- Conservación o ahorro de energía
- Conservación o ahorro de recursos naturales

- Disminución del volumen de residuos que hay que eliminar
- Protección del medio ambiente

El reciclaje en general permite:

- Ahorro de recursos
- Disminuir la contaminación
- Alargar la vida de los materiales con los mismos usos o con diferentes
- Ahorrar energía
- Ayudar a facilitar la clasificación y recolección de basura
- Vivir en un mundo más limpio

En tal sentido, el poder compactar, sintetizar y consolidar la extrusión de plásticos, se pueden alargar los ciclos de reciclaje del PEBD o PEAD, para su reutilización en película soplada, permitiendo un beneficio directo en la sociedad en general, como también, al sector industrial dedicado a los diferentes factores expuestos en el área de reciclaje de plásticos.

Asimismo, los usuarios directos del manejo de la tecnología del reciclaje, en conjunto con la optimización del proceso en la formación de pellet, serán todas aquellas plantas de producción establecidas por empresas nacionales e internacionales.

En definitiva el aporte ambiental que ofrece el reciclaje de PEBD y PEAD, radica que contribuir a mantener una sociedad limpia y saludable, permitiendo la reutilización de película soplada, ya sea transparente o pigmentada.

A nivel energético, la clasificación de residuos plásticos previa a iniciar la fundición de estos, permite alcanzar un ahorro en el consumo de energía, por

medio de las resistencias que permiten utilizar un índice de fluidez constante en el proceso de extrusión, y por tal razón en el presente trabajo se plasmará un método que permita aplicarse mediante procedimiento de específicos, la optimización del consumo de energía eléctrica y recurso hídrico utilizado en la fabricación de pellet reciclado.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

El proceso de reciclaje de película de polietileno, demanda cantidades representativas de energía eléctrica que oscilan entre 30 kWh a 100 kWh, como también, un drenaje de agua equivalente a 2,72 metros cúbicos diarios para enfriamiento del pellet, y cuyo uso desmedido de recursos afecta el costo de recuperación de este tipo de materia prima, siendo necesario un análisis cuantitativo comparativo, que permita establecer el menor costo de reciclaje por Kg recuperado.

Los plásticos representan el cuarto grupo, generadores de desechos sólidos al ambiente, y dentro de la industria del empaque plástico flexible, la reutilización de resina (pellet) de polietileno representa una reducción entre el 10 a 15% del costo de resina virgen, permitiendo utilizar mezclas combinadas virgen/reciclado, una vez las propiedades físicas y mecánicas de la película sean consistentes.

Formulación del problema

En la industria de conversión de empaques flexibles, el consumo de plásticos es inherente al proceso de fabricación, para ello debemos encontrar un equilibrio entre la reología del pellet y las propiedades mecánicas, hidráulicas y eléctricas en el proceso de compactación de desechos plásticos (tipo película), que se generan en un proceso de conversión de empaque de bolsa sin impresión y con impresión.

Años atrás el manejo de desechos plásticos, y particularmente en el polietileno, se orientaba a la contratación de proveedores externos que brindan el servicio de reciclaje a compañías similares.

No obstante, actualmente existen equipos que contribuyen al manejo eficiente de pellet reciclado, pero que deben cumplir con estándares de proceso, para garantizar la productividad y eficiencia en el proceso de extrusión de polietileno de baja y alta densidad.

Delimitación del problema

El análisis se concentra al proceso de extrusión por medio de burbuja, en una planta de conversión de bolsa y lienzos plásticos, fabricados con polietileno baja densidad y polietileno alta densidad, con la variante de producir película transparente o pigmentada (aplicación de color a la película extruida), y a partir de los desechos sólidos generados en dicho proceso, optimizar de forma ideal la energía eléctrica y el recurso hidráulico que se utiliza, para la conversión eficiente de polímero película a pellet.

Con todo lo anteriormente expuesto surgen las interrogantes siguientes:

- ¿Cómo se clasifican los materiales de PEBD y PEAD, para garantizar un reciclaje estable para la fabricación del pellet?
- ¿Cuáles son las características de operación del proceso de extrusión de película soplada (tipo burbuja), que permiten caracterizar el tamaño de partícula del pellet reciclado?
- ¿Cuáles son las propiedades químicas que deben cumplir los materiales termoplásticos, en el reciclaje de películas plástica de polietileno?

- ¿Cuál es la correlación entre los kWh de energía eléctrica consumida en el proceso de reciclaje de película de PEBD y PEAD, versus la propiedad física de resistencia de la película extruída?
- ¿Qué metodología debe aplicarse para reutilizar el agua drenada, generada por el sistema de enfriamiento del pellet reciclado, para optimizar el uso del recurso hídrico?

6. ALCANCES

Desde la perspectiva investigativa, el presente trabajo ofrece un alcance descriptivo, ya que se describen las características y correlación entre variables de energéticas (energía eléctrica y agua), respecto las propiedades que ofrece un polímero termoplástico, como lo constituye el polietileno de baja densidad y alta densidad respectivamente.

Asimismo, desde una perspectiva técnica, el estudio aquí descrito permitirá identificar una cronología del proceso de reciclaje, identificando las etapas siguientes:

- Clasificaciones de materiales según mezcla original de película de polietileno a reciclar.
- Identificación de variables de consumo de energía eléctrica y agua actuales en la obtención de pellet reciclado.
- Determinación de tamaño de partícula de pellet reciclado.
- Capacidad de fundición de pellet reciclado en el proceso de extrusión soplada (tipo burbuja).
- Análisis de propiedades de resistencia de película extruída a partir de pellet reciclado.
- Ajuste de variables para optimizar el consumo de energía eléctrica y agua, teniendo como objetivo la reducción del costo de operación.

El presente estudio está enfocado a empresas dedicadas al reciclaje o planas de conversión de empaque flexible, donde se tenga disponibilidad de película de PEBD y/o PEAD, siendo las áreas específicas las siguientes:

- Plantas de conversión de empaque flexible
- Plantas de conversión dedicadas exclusivamente a película de polietileno
- Empresas de reciclaje con aplicación a polietileno
- Proyectos de desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje
- Proyectos a nivel gobierno o municipalidades con enfoque a reciclaje de polietileno en película soplada.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

7.1. Los desechos plásticos

El consumo de plásticos continua experimentando un crecimiento notable en todos los sectores industriales. Este éxito comercial tiene un efecto negativo ya que genera un volumen de residuos importante que necesita ser gestionado de forma eficaz. A pesar de los esfuerzos que se están realizando por parte de las instituciones nacionales y comunitarias, la mayor parte de los residuos plásticos continúan en la actualidad depositándose en vertederos.

Es por ello, que al preguntar desde el punto de vista del medio ambiente, ¿por qué se deben de reciclar residuos plásticos?, se encontrarán una infinidad de respuestas que se generan desde un punto de vista de entidades que velan actualmente por un entorno más limpio, hasta entidades gubernamentales que aportan con un tinte político, un interés en el manejo de desechos, pero para alcanzar beneficios económicos de una manera unilateral, dejando a nivel marginal las ventajas positivas y completamente ecológicas, que puede alcanzar una comunidad, un municipio, una ciudad cosmopolita y hasta en un país completo, a fin de contribuir en el mejoramiento de calidad de vida de la población.

Ahora bien, para que un proceso integral de reciclaje ofrezca resultados efectivos y eficientes, debe existir una base de valores y cultura en las personas muy elevada, a fin de administrar el desperdicio desde los hogares, permeando dicha filosofía de vida a nivel industrial.

Dejando a un lado la problemática político-económico que cualquier ciudad puede experimentar, si existe una realidad tecnológica que permite ofrecer soluciones, para que los desechos plásticos tengan un control y manejo ordenado, para no aumentar la contaminación del ambiente a nivel mundial.

En tal sentido, el presente trabajo de investigación aborda un tema que se aplica a todo desecho plástico generado de película de polietileno baja densidad y polietileno alta densidad, y que para obtener un pellet de altas prestaciones que se reutilice en el proceso de extrusión, se aplicarán técnicas estadísticas que permitan dejar establecido, las condiciones de proceso reales, que garanticen el uso eficiente del mismo, manteniendo un ahorro controlado en el consumo de energía eléctrica y agua de enfriamiento en el pellet extruido, y así brindar una película reciclado con óptimo funcionamiento en cualquier equipo de extrusión, en las diferentes compañías de conversión de plásticos.

A nivel macro en la industria de conversión de plásticos se dice que, el espectacular aumento en el consumo de los plásticos en la sociedad moderna, se estima que crece 4% anualmente, y se ha producido en paralelo con el desarrollo tecnológico de estos materiales, cuyo uso se ha extendido además en el campo ya convencional de los envases, en la fabricación de componentes de las industrias de automoción, vivienda, vestido y todo tipo de bienes de consumo. Así el consumo mundial de materiales plásticos ha pasado de los 10 millones de TM en 1978 hasta los 60 millones de TM en el 2000 de los cuales el 50% corresponde a USA y el resto se reparte por igual entre Europa y Japón. (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004).

Otro aspecto interesante en el manejo de residuos plásticos, corresponde a la combustión de los mismos, lo cual es una idea interesante desde la perspectiva de recuperación de energía en los materiales plásticos, los cuales

poseen un elevado poder calorífico (polietileno 43 MJ/Kg; polipropileno 44 MJ/Kg; poliestireno 40 MJ/Kg; PVC 20 MJ/Kg, etc.). Sin embargo, la combustión debe estar sujeta a fuertes controles medioambientales, para neutralizar los residuos sólidos y los efluentes gaseosos (como cloruro de hidrógeno de la combustión de PVC). (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004).

7.2. Proceso de reciclaje de desechos plásticos

El proceso de reciclaje de desechos plásticos, toma auge en el segmento de polietileno, debido a que este tipo de material se utiliza en una amplia diversidad de aplicaciones a nivel doméstico e industrial. Para ello, si se identifica las fases para reciclar película de polietileno, se tiene los siguientes puntos:

- Recolección de desechos
- Separación de desechos
- Conversión de desecho plástico a pellet reciclado
- Extrusión de película plástica con pellet reciclado
- Uso de película de polietileno de baja densidad y alta densidad, con propiedades de resistencia y maquinabilidad, a partir de pellet reciclado

Tal y como se observa en la figura 1, una línea de producción para obtener pellet reciclado, requiere un extrusor cuyas características o especificaciones de equipo, brinden una máquina robusta para procesar película de polietileno.

Figura 1. **Reciclajes de plásticos**



Fuente: transformación de termoplásticos, termofijos y reciclado, 1996.

Cabe mencionar, que en lo referente a tecnología de reciclado existen diversos métodos que contribuyen al tratamiento del reciclado de plásticos, y los cuales dependerán del costo, regulaciones ambientales y tipo de plástico, para realizar la mejor elección del mismo.

Para ello, se clasifican los métodos bajo de la denominación siguiente:

- Primario
- Secundario
- Terciario
- Cuaternario

En el tratamiento primario consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este reciclado se aplica para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción y transformación, y corresponde a un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos. (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004)

En el tratamiento secundario, consistente en la fusión, los desechos son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, las cuales son diferentes a las del plástico original, en un proceso evolutivo “en cascada” hacia prestaciones inferiores. Esta es la tecnología más usada hasta ahora, particularmente en la industria del automóvil, y se estima en solo el 20% los plásticos que pueden ser reciclados de esta forma. (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004)

El terciario, o “reciclado químico”, persigue el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables nuevamente en la ruta de obtención de plásticos o en otras rutas de la industria petroquímica. Los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero. (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004)

El reciclado cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía. Actualmente es muy contestado socialmente por los problemas medioambientales. (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004)

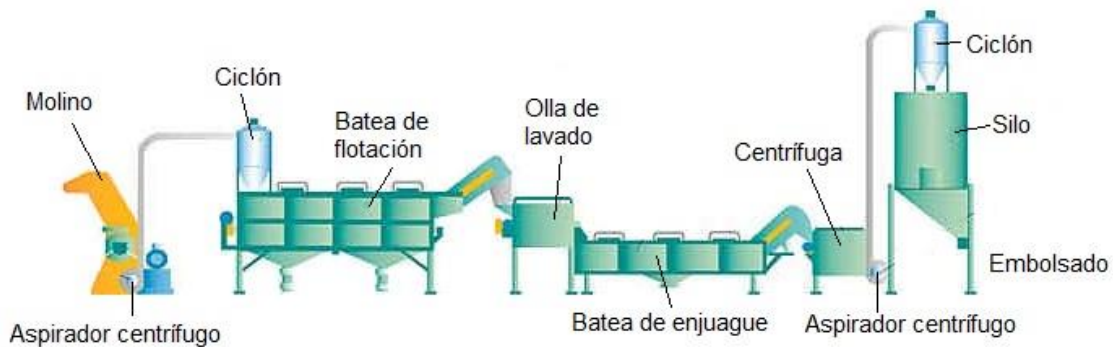
7.3. Polietileno, termoplástico reciclable

El polietileno constituye uno de los termoplásticos más utilizados en la vida diaria, y se clasifican como alta densidad, baja densidad y lineal baja densidad. En referencia a este aspecto se muestra en la figura 2, el proceso de reciclaje del polietileno, en el cual se identifican los siguientes puntos principales, tales como:

- Molino (sección donde se aspira la película de polietileno a fundir).
- Área de resistencias para calentamiento y fundición del material.

- Batea de flotación, en la cual se transporte el pellet obtenido.
- Batea de enjuague, sección en donde se realiza la limpieza del material y enfriamiento del pellet
- Aspirador centrífugo que transporta el pellet obtenido al silo de almacenamiento.
- Embolsado, donde se mide el batch de producción, en sacos de 25 Kg respectivamente.

Figura 2. **Proceso reciclajes polietileno**



Fuente: reciclaje de residuos industriales, 2012.

El polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE) es el primer polímero de etileno y se descubrió en 1939 en Gran Bretaña. Este polímero se obtiene a partir del etileno, el cual debe ser sometido a altas temperaturas y presión controlada, como también, en presencia de un catalizador de radicales libres. La diferencia entre alta densidad y baja densidad, radica en que este último es mucho más ramificado a nivel molecular.

Las características físicas y sensoriales de este material, son un plástico semicristalino, flexible, blanquecino, inodoro e insípido, de tacto parafínico, con excelentes propiedades eléctricas y poca resistencia a elevadas temperaturas. Las principales propiedades que se analizan, se muestran en la tabla I. Es propensa agrietarse bajo carga ambiental, ya que su resistencia a la radiación UV es mala (cuya propiedad se corrige agregando aditivos UV, para brindar mayor resistencia. Posee un elevado poder calorífico (46 000 kJ/kg). Para ello, todo polietileno debe cumplir con propiedades específicas que dictan sus características de proceso, tal y como se describe en la tabla I.

Tabla I. **Propiedades de polietileno**

| PROPIEDADES | UNIDADES | VALOR |
|--|--------------------|--------------------|
| Densidad | g/cm ³ | ≤ 0,920 |
| Absorción al agua | mg @ 96h | < 0,5 |
| Contracción | % | 1,5 – 3 |
| Resistencia a la Tensión al Cede | N/mm ² | 5 – 13 |
| Elongación Punto de Ruptura | % | 100 – 700 |
| Resistencia al impacto ranurado @ 20°C | Kgf/m ² | NO ROMPE |
| Temperatura de Deflexión 186 N/mm ² 0.45 N/mm ² | °C | 32 – 41 38 – 49 |
| Resistencia Dieléctrica | KV/cm | >700 |

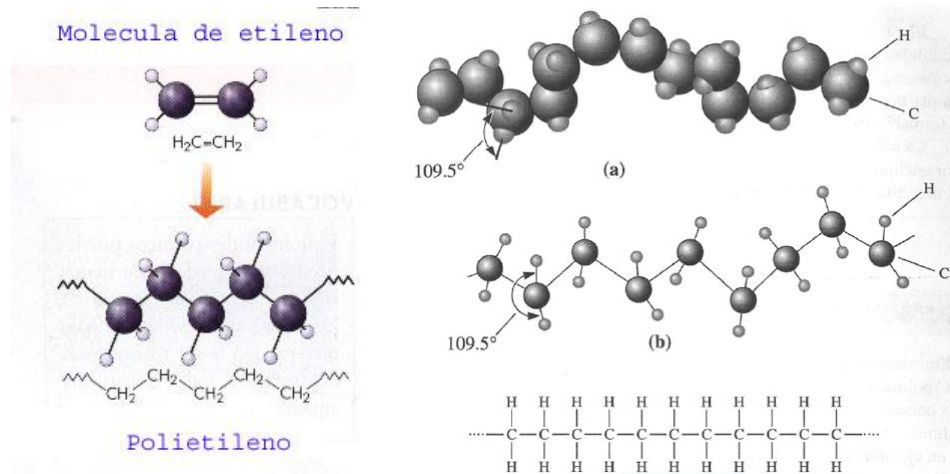
Fuente: enciclopedia del plásticos, 2000.

Es utilizado en bolsas plásticas, sobre todo para basuras, pero también se utilizan para embalajes industriales, impermeabilización de terrenos y edificios, acolchamientos agrícolas, contenedores, tuberías, etc. Debido a su buena resistencia eléctrica (alta constante dieléctrica), frente a las altas frecuencias, se utiliza para aislar cables, como puede ser los de las antenas de las televisiones.

El polietileno de baja densidad, junto con su variedad lineal, es uno de los plásticos más utilizados en agricultura, siendo un 50% mayor respecto a los demás plásticos.

Cabe mencionar que adicionalmente de las características principales del polietileno, se deben conocer como se conforma la cadena de polímeros, también la forma de representar una cadena de polietileno, tal y como se muestra en la figura 3 respectivamente.

Figura 3. Cadena de polímeros



Fuente: principios of polymerchemistry, 1971.

7.4. Reciclaje de polietileno en Guatemala

El PEBD es dentro de la variedad de los plásticos en Guatemala, el más reciclado, superando con mucha diferencia el porcentaje de reciclaje de los demás plásticos.

El reciclaje de PEBD, que ha ido aumentando a lo largo de los años, hoy en día se ha estancado debido a la aparición de nuevos polietilenos lineales con los que se fabrican filmes, sacos y otros productos.

Tal y como se muestra en la figura 1, todo proceso de reciclaje es un sistema mecánico, que permite procesar los diferentes desechos plásticos, y que particularmente al utilizar película de polietileno, debe existir una clasificación efectiva, ya que de ello dependerá las características y funcionamiento del producto final fabricado, a partir de pellet reciclado.

El inconveniente que se tiene, al no tener una clasificación óptima de materiales, la película reciclada obtenida perderá la elasticidad propia de todo PEBD, y por ende causará problemas en el rendimiento de los equipos de extrusión. En este caso, a fin de utilizar en condiciones controladas material reciclado con estas características, debe agregarse resina virgen para alcanzar las propiedades de maquinabilidad y desempeño de la película.

7.4.1. Situación ambiental de Guatemala y manejo de desechos sólidos

En la actualidad, en Guatemala la situación ambiental y explícitamente el deterioro del medio ambiente es uno de los problemas que urge solucionar, y el deterioro medioambiental se mantiene debido a la falta de políticas claras y leyes que realmente impongan sanciones a quienes atentan contra la naturaleza y el medio ambiente y por ende contra la salud y la vida de las y los guatemaltecos.

La falta de una legislación adecuada, así como de la implementación de políticas integrales que solucionen el problema, son algunas de las causas que hace de esta situación uno de los problemas para que la contaminación ambiental sea generalizada en el país.

Actualmente no se ha definido qué instancia realmente tiene la potestad de tomar decisiones y aplicar las sanciones correspondientes en materia de contaminación por desechos sólidos, ya que el control de estos es otorgado a varias instancias que no tienen mucha coordinación entre sí (Ministerio de Salud, municipalidades, Ministerio de Ambiente). Sin embargo, las atribuciones que en materia del manejo de desechos sólidos tienen, están distribuidas institucionalmente de la siguiente manera; municipalidades, Ministerio de

Ambiente y Recursos Naturales, Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social y las respectivas sanciones penales contempladas en el Código Penal Guatemalteco, Decreto 17-73 del Congreso de la República de Guatemala.

En lo que respecta a la situación de los desechos sólidos se les ha atribuido hasta la fecha la responsabilidad de su manejo, disposición y tratamiento a las municipalidades del país, en cuyo caso son pocas las que aplicando sus escasos conocimientos en la materia han reglamentado lo relativo a la recolección y disposición final de desechos sólidos sin embargo no han reglamentado aspectos relativos a una correcta disposición, como separación de dichos desechos. Sin embargo, vale decir que la reglamentación se ha circunscrito, en la mayoría de los casos, al mantenimiento del ornato dentro del área urbana de los municipios, y la disposición final de los desechos termina en barrancos o depresiones, sin ningún tratamiento y control contaminando por ende ríos, bosques, lagunas, lagos, etc.

7.5. Aplicaciones después de reciclaje

Una de las principales aplicaciones que se tiene en el PEBD reciclado, lo constituyen las bolsas para basura, la cual por se regularmente de un color negro, permite realizar mezclas de diferentes películas pigmentados, y que unificados, se obtiene una película oscura. Lo anterior, permite aclarar que en a partir de películas pigmentadas de diferentes colores, no se alcanzará una película pigmentada blanca, ya que todo proceso de aclarar o convertir de un color oscuro a claro, o viceversa, sería sumamente costoso e improductivo.

7.6. Proceso extrusión para formación de pellet reciclado

Se debe de considerar que el tema de obtener un película pigmentada específica a partir de pellet reciclado es sumamente complejo, pero lo que si permite el proceso controlar, es la calidad de la partícula de dicho pellet, el cual permite tal y como se muestra en la tabla II, las especificaciones o características de mallas para el tamizado de los mismos.

Tabla II. Características de mallas para tamizado

| Malla | Diámetro del alambre | | Abertura | |
|-------|----------------------|--------|----------|--------|
| | mm | plg | mm | plg |
| 4x4 | 1,2450 | 0,0490 | 5,1050 | 0,2010 |
| 5x5 | 0,8890 | 0,0350 | 4,1910 | 0,1650 |
| 10x10 | 0,6340 | 0,025 | 1,9050 | 0,0750 |
| 16x16 | 0,5590 | 0,022 | 1,0280 | 0,0405 |
| 20x20 | 0,4060 | 0,016 | 0,8640 | 0,0340 |

Fuente: los polímeros-síntesis, caracterización, degradación y reología, 1996.

Como una referencia, la cantidad de energía que demanda el reciclaje de un kg de bolsas para basura asciende a 0,6 kW/h.

Las primeras materias primas para la obtención de los plásticos eran de origen vegetal, provenientes del algodón, las avellanas o del almidón. Hoy en día la mayoría, por no decir todas, las materias primas para la obtención de los plásticos se obtienen a partir del petróleo crudo o el gas natural (etileno, butadieno y propileno), mediante procesos químicos. Sin embargo el porcentaje

utilizado de petróleo y gas natural para la fabricación de plásticos es solamente el 1,5 o 2% del consumo total de los mismos.

Los plásticos pueden ser clasificados en dos importantes familias:

- Termoplásticos: son plásticos fácilmente reciclables ya que funden cuando se calientan y por tanto se pueden moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales se alteren demasiado. Sin embargo, durante los distintos ciclos de reprocesado van sufriendo modificaciones por lo que no pueden ser reciclados más de 5 o 7 veces. Los termoplásticos más conocidos son: PEBD, PEAD, PP, PET, PVC, PS, EPS y PC.
- Termoestables: son difíciles de reciclar ya que están formados por polímeros con cadenas ligadas químicamente (con enlaces transversales) que hacen necesaria la destrucción de su estructura molecular para poder fundirlos y esto conlleva a una alteración grande de sus propiedades originales. Existen distintos termoestables como por ejemplo: resinas fenólicas, resinas ureicas, etc.

Es importante destacar la poca compatibilidad, en cuanto a estructura química, de las dos familias, por lo que si se mezclaran se reducirían sus propiedades mecánicas respecto de las que poseen sin mezclarse.

Las ventajas que presentan los plásticos frente a otros materiales son las siguientes:

- Debido a su baja densidad son materiales muy ligeros.

- Son materiales fácilmente moldeables, lo que facilita la obtención de productos con formas raras o complejas sin demasiado gasto de energía. Se ejemplifica en la tabla III, la energía necesaria en el perfil de calentamiento del polietileno, a fin de alcanzar su fundición y temperatura ideal de procesamiento en el sistema de extrusión por burbuja.

Tabla III. **Referencia corriente consumida en función temperatura de fundición PE**

| Zona | Temperatura (°C) | Corriente Consumida (A) |
|------|------------------|-------------------------|
| 1 | 180 | 17 |
| 2 | 180 | 16 |
| 3 | 180 | 5 |
| 4 | 190 | 5 |
| 5 | 210 | 6.5 |

Fuente: principios básicos de extrusión de plásticos, 2000.

- Suelen ser materiales aislantes tanto térmicamente como eléctricamente.
- Son resistentes a la corrosión y el ataque de distintos agentes químicos por lo que les hace ser buenos materiales para envases y embalajes.
- Son muy versátiles por lo que se encuentran en campos tan dispares como la industria aeronáutica y la agricultura o la automoción y la industria de alimentación.

Pero también existen grandes inconvenientes:

- Durante la fabricación de los productos plásticos se contamina, como cualquier otro proceso industrial.

- Su porcentaje en volumen es elevado, debido a la baja densidad de los mismos, y esto es un problema de espacio tanto en contenedores como en vertederos.
- Una vez que han sido reciclados, aunque sólo haya sido una vez, no se pueden utilizar para envasar productos de consumo humano.
- Existen gran cantidad de plásticos que actualmente no se pueden reciclar pues serían necesarios procesos costosos e incluso imposibles.
- Si se mezclan distintas familias de plásticos para reciclarlos se obtiene un producto de baja calidad.

Los plásticos de mayor consumo son:

- PVC: cloruro de polivinilo.
- PEAD: polietileno de alta densidad.
- PET: polietileno tereftalato.
- PP: polipropileno.
- EPS: poliestireno expandido.
- PC: policarbonato.
- PS: poliestireno.
- PEBD: polietileno de baja densidad.

En la actualidad la cantidad de productos plásticos en el mercado es enorme y por consiguiente la cantidad de residuos plásticos también es elevada. Teniendo en cuenta la alta resistencia de éstos a la degradación y que se obtienen a partir del petróleo (gas natural o carbón), fuente de energía no renovable y escasa, por lo tanto más cara según pasa el tiempo, se hace necesaria la recuperación y reciclaje de los mismos.

7.7. Clasificación de los polietilenos

Los polietilenos se clasifican por:

- Densidad
- Contenido de monómeros
- Peso molecular
- Distribución del peso molecular
- Índice de fluidez
- Modificación

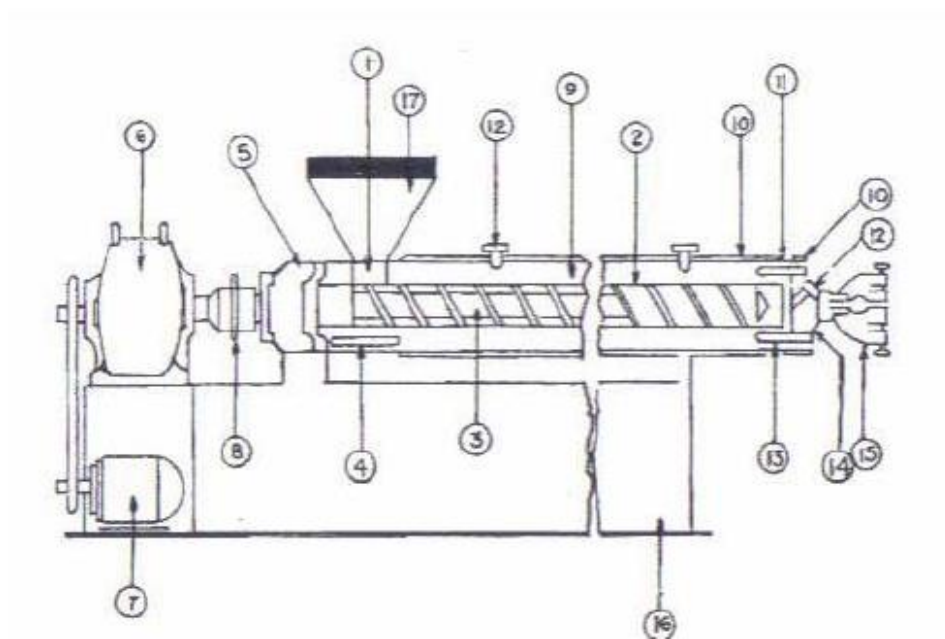
El criterio de clasificación más empleado es la densidad; por este los polímeros de etileno están agrupados en dos clases: alta y baja densidad.

- Polímero de etileno baja densidad
 - Polietileno de baja densidad
 - Polietileno lineal de baja densidad
 - Polietileno de muy baja densidad
 - Etil vinil acetato
- Polímeros de etileno de alta densidad
 - Polietileno de alta densidad
 - Polietileno de alta densidad alto peso molecular
 - Polietileno de ultra alto peso molecular

7.8. Proceso de extrusión y componentes

Identificando los diferentes tipos de polietileno, debemos conocer las principales partes en el proceso de extrusión, lo que nos permitirá conocer la importancia del equilibrio de las diferentes variables en sistema tipo burbuja, según se explica la figura 4.

Figura 4. Partes principales de un extrusor



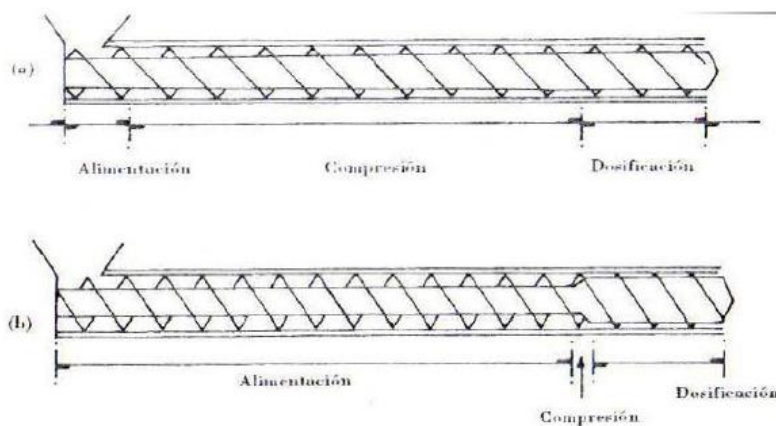
Fuente: principios básicos extrusión de plásticos, 2000.

1. Garganta de alimentación
2. Superficie tratada o barril
3. Tornillo o husillo
4. Camisa de refrigeración de la tolva de alimentación
5. Cojinete de empuje
6. Engrane reductor

7. Motor
8. Acoplamiento ajustable
9. Pared Cilíndrica
10. Elemento de calefacción
11. Mallas
12. Termopar
13. Plato Rompedor
14. Cabezal
15. Boquilla
16. Soporte
17. Tolva

Como aspecto importante adicional, es contar con un diseño de tornillo que permita manipular y transformar la película PEBD y PEAD, para obtener un pellet de altas prestaciones, tal y como se indica en la figura 5.

Figura 5. Diseño de cañón de extrusión con zonas de alimentación, compresión y dosificación de tamaño y formas diferentes



Fuente: principios básicos extrusión de plásticos, 2000.

El contenido de monómeros determina muchas de las cualidades del plástico, en este aspecto los plásticos pueden ser:

- Homopolímeros
- Copolímeros

Si se grafica el número de cadenas (n) contra el peso molecular (M), se obtendrá una curva conocida con el nombre de curva de distribución de pesos moleculares (DPM o MWD).

7.9. Aplicaciones del PEBD

Obtenido a partir de gas natural. Su número de código es cuatro "4". El PEBD se utiliza en aplicaciones donde se requiere flexibilidad, barrera a la humedad y fácil procesamiento. Además, cumple con aprobación FDA y resistencia química.

La mayor aplicación está dirigida a película para bolsas de diversa índole, tal como transporte de productos de supermercado, basura, pan, acolchado agrícola y base para pañales desechables, entre otros.

8. CONTENIDO

El contenido general del presente trabajo de investigación, contempla establecer una relación de las variables mecánicas y reológicas del proceso de extrusión, para brindar un tamaño de pellet reciclado de altas prestaciones. Para ello, el esquema de presentación se describe en los capítulos siguientes:

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. PROCESO DE RECICLAJE DE PLÁSTICOS

1.1. La industria y el plástico

1.2. Nuevas tecnologías para reciclaje de plásticos

1.3. Aplicaciones de polietileno baja densidad y alta densidad reciclado

2. EXTRUSIÓN DE PELÍCULA SOPLADA DE POLIETILENO TIPO BURBUJA
 - 2.1. Proceso de extrusión
 - 2.2. Variables de control
 - 2.3. Perfil de resina para extrusión efectiva
 - 2.4. Relación de extrusión de película soplada versus pellet reciclado

3. MEDICIÓN DE VARIABLES MECÁNICA EN LA APLICACIÓN DE ENERGÍA Y AMBIENTE DEL PROCESO
 - 3.1. Medición de variables mecánica y reológicas de pellet reciclado
 - 3.2. Perfil de energía eléctrica y consumo hídrico en proceso reciclado
 - 3.3. Características de pellet reciclado de altas prestaciones

4. PERFIL DE FABRICACIÓN DE PELLETS RECICLADO
 - 4.1. Perfil de extrusión en el uso de pellet reciclado
 - 4.2. Características funcionamiento de pellet reciclado
 - 4.3. Propiedades físicas y mecánicas de película de pellet reciclado

5. MEDICIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PEBD Y PEAD RECICLADO
 - 5.1. Medición de propiedades físicas según tipo de pellet reciclado
 - 5.2. Análisis estadístico de perfil de funcionamiento de pellet reciclado
 - 5.3. Medición máxima resistencia en extrusión de pellet reciclado

6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8. CONCLUSIONES
9. RECOMENDACIONES
10. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS
11. ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de investigación

El estudio establecido es de tipo cuantitativo, ya que las variables involucradas dentro del proceso de optimización de energía eléctrica y agua para el proceso de reciclado, son perfectamente medibles.

9.2. Tipo de hipótesis de investigación

La hipótesis planteada en este trabajo es una hipótesis descriptiva correlacional, ya que se afirma que las condiciones de procesamiento del pellet reciclado son diferentes respecto a las mezclas utilizadas en la película plásticas de PEBD y PEAD a reciclarse, permitiendo una readecuación de dichas condiciones, para alcanzar un ahorro de energía eléctrica y recurso hídrico en el proceso de reciclado.

9.3. Variables e indicadores

Variable independiente tipo cuantitativa:

Película de PEBD o PEAD

Indicadores

- Mezcla de resinas – porcentaje (%)
- Pigmentación de la película – porcentaje (%)

- Espesor de la película – milésima de pulgada o micra (rango de 0,5 a 6 milésimas de pulgada)

Variable dependiente:

Propiedades mecánicas y reológicas de pellet:

Indicadores

- Consumo de energía eléctrica por resistencia de calentamiento - lectura de amperaje en display análogo
- Caudal de agua de purga – L/min de agua drenada al desagüe municipal
- Tamaño de partícula de pellet – diámetro de partícula en mm o plg, utilizando un mesh que facilita la medición del tamaño
- Índice de fluidez del pellet – fluidez de un material termoplástico, que identifica los gramos fundidos en 10 minutos, a temperatura y presión controlada
- Fuerza de resistencia a elongación en dirección máquina y dirección transversal en película extruida reciclada – fuerza de elongación expresada en N (newton), kN o lb fuerza

9.4. Tipo de análisis según diseño de investigación

Se aplicara un análisis estadístico descriptivo-correlacional al presente diseño de investigación tipo experimental.

9.5. Metodología

Investigación preliminar

- Investigación documental
Se estudiará información teórica sobre las resinas de PEBD y PEAD que permiten la manipulación de la película extruida para ser sujetas a un proceso de reciclaje y tener por ende la capacidad de medir cuantitativamente las variables involucradas para realizar un análisis estadístico de los datos recabados, para así identificar parámetros de ahorro que contribuyan a la energía y ambiente.
- Análisis de muestras
El material a reciclarse se acumulará en un área confinada para desechos de película de polietileno, que una vez se tengan 10 TM, garantice el arranque del equipo de extrusión para obtención de pellet reciclado, y se genere la toma de datos para el estudio del presente trabajo.

Diseño de investigación, métodos e instrumentación

Variables

Tabla IV. Definición de variables

| Variable | Tipo de Variable | Indicador | Dimensionales |
|--|-------------------------|---|-----------------------------------|
| <i>Película de Polietileno Baja Densidad</i> | Independiente | Materia Prima (cuantitativo) | % en peso de mezcla resina virgen |
| <i>Película de Polietileno Alta Densidad</i> | Independiente | Materia Prima (cuantitativo) | % en peso de mezcla resina virgen |
| <i>Espesor de película</i> | Independiente | Aplicación Extrusión Soplado | Milésimas de pulgada o micras |
| <i>Resistencia Eléctrica</i> | Dependiente | Calentamiento de zonas en cañón de extrusión | Amperios |
| <i>Caudal agua de purga</i> | Dependiente | Agua drenada por enfriamiento de pellet | L/min |
| <i>Tamaño de partícula pellet</i> | Dependiente | Diámetro de pellet obtenido en extrusión | mm ó plg |
| <i>Índice de fluidez de fundición</i> | Dependiente | Capacidad de fundición de polietileno | g/10 min |
| <i>Fuerza de resistencia a elongación</i> | Dependiente | Fuerza máxima de resistencia a elongación de película | N, kN ó Lb _f |

Fuente: elaboración propia.

- Manipulación de variables

El experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afecta a una o más variables dependientes y por qué las afectan. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

Cada una de las variables independientes se manipulará en un máximo de 4 diferentes tipos de mezcla, y se evaluará el efecto que tendrá cada mezcla sobre las variables dependientes. Dicho en otras palabras, se variará las condiciones de amperaje de las resistencias (energía eléctrica) según el tipo de mezcla de la película, para obtener un pellet reciclado que permita una extrusión soplada tipo burbuja, y que la película final de polietileno alcance las condiciones de resistencia que demande el cliente final.

- Validez

Todo experimento debe cumplir con el control o validez interna de la situación experimental, o sea, si se observa que la manipulación de las variables independientes provoca una variación de las variables dependientes, la variación de estas últimas se debe a la manipulación de las independientes no a otros factores (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio).

Validez interna: para validar la readecuación de condiciones de operación, se analizará la capacidad de fundición de la película de polietileno a reciclar, observando las características del pellet extruido, a fin que cumpla con el tamaño de partícula que garantice su reconversión en película reciclada, optimizando el recurso de energía eléctrica y recurso hídrico para su conversión.

Validez externa: para validar las condiciones de proceso del pellet reciclado, se utilizará una extrusora de soplado tipo burbuja, para validar la capacidad de extrusión de la resina reciclada y medir la fuerza dirección y máquina de la película obtenida, para garantizar sus propiedades de resistencia en la aplicación como producto final según el requerimiento del cliente.

Las fases a seguir en la metodología para el proceso de análisis, son las siguientes:

- A. Clasificación del material a reciclar, dependiendo de las características siguientes:
 - a. Película transparente o pigmentada (aparición visual de la película extruida a ser reciclada).
 - b. Tipo de mezcla de la película de polietileno (porcentaje de PEBD, PELBD, PE fraccional, PEAD, según la mezcla de fabricación de origen en la película extruida).
 - c. Espesor de la película de polietileno (medición en micras o milésimas de pulgada, en un rango comprendido de 0,5 a 6 milésimas de pulgada).

En este sentido se utilizará el siguiente cuadro, para control de registro de la clasificación:

Tabla V. **Características de película polietileno a reciclar**

| Clasificación película a reciclar | | | | |
|--|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|--|
| Tipo de Polietileno Baja/Alta | Color pigmento | Espesor de película (plg) | %Mezcla Resina Virgen | Cantidad disponible a reciclar (Kg) |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Fuente: elaboración propia.

- B. Para cada uno de los materiales especificados en los incisos anteriores, se identificarán las características de operación:
- a. Perfil de temperaturas en el cañón de extrusión (medibles en grados Celsius - °C)
 - b. Control del índice de fluidez (medible en g/10 min).
 - c. Control del tamaño de partícula del pellet (diámetro de partícula en mm o plg, utilizando una malla mesh para la medición del partícula de pellet).
 - d. Determinación de densidad del pellet reciclado (medible en g/cc).

Tabla VI. **Condiciones de operación extrusor para reciclaje**

| Condiciones de Operación Extrusión Película a Reciclar | | | | | | | | |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|--|---|
| No. Muestra | Zona 1 (°C/A) | Zona 2 (°C/A) | Zona 3 (°C/A) | Zona 4 (°C/A) | Zona 5 (°C/A) | Tamaño de partícula (mm) | Índice de fluidez calculado o (g/10min) | Densidad del pellet reciclado (g/cc) |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

- C. Se analizará puntualmente cada pellet obtenido según su clasificación de material, realizando la extrusión de película soplada utilizando como materia prima este tipo de pellets. La clasificación se realizará según las condiciones de tamizado siguiente:

Tabla VII. **Especificaciones de malla para medición de pellet**

| Malla | Diámetro del alambre | | Abertura | |
|--------------|-----------------------------|------------|-----------------|------------|
| | mm | plg | mm | plg |
| 4x4 | 1,2450 | 0,0490 | 5,1050 | 0,2010 |
| 5x5 | 0,8890 | 0,0350 | 4,1910 | 0,1650 |
| 10x10 | 0,6340 | 0,025 | 1,9050 | 0,0750 |
| 16x16 | 0,5590 | 0,022 | 1,0280 | 0,0405 |
| 20x20 | 0,4060 | 0,016 | 0,8640 | 0,0340 |

Fuente: elaboración propia.

- D. Se analizará las prestaciones que ofrezca la película reciclada, controlando las variables siguientes:
- Apariencia física de la película extruida (apreciación cualitativa ó visual de la película extruída).
 - Medición de resistencia a la punción.
 - Medición de resistencia al rasgado.
 - Medición de resistencia al estiramiento (medible en N, kN o kgf, que permite establecer la máxima fuerza de estiramiento de la película).
 - Capacidad de sellabilidad de la película extruida (medible en N, kN o kgf, de la película sellada mediante una resistencia, que permita fundir dos caras de la película de polietileno extruída).

Tabla VIII. **Propiedades físicas de película extruido con pellet reciclado**

| Propiedades físicas de película extruido con pellet reciclado | | | | | |
|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| No. Muestra | Apariencia Visual Película C/NC | Resistencia a la punción C/NC | Rasgado de película C/NC | Fuerza Elongación (N ó kN) | Fuerza a sellabilidad (N ó kN) |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

- E. Datos de energía eléctrica (kW y Amperios) y agua consumida (L) en el proceso de reciclaje, para identificar el uso óptimo de dichos recursos.

Tabla IX. **Consumo de energía eléctrica y agua para mezcla resina virgen**

| No. Muestra según Mezcla Resina Virgen | Control Energía Eléctrica y Agua | |
|---|---|--------------|
| | kW | L/min |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Fuente: elaboración propia.

- F. Los datos recabados durante la aplicación de la metodología, se registrarán en hojas electrónicas de Excel (Plataforma Microsoft Office), permitiendo un análisis estadístico de la información.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

En el presente estudio se aplicarán técnicas estadísticas, que permitan analizar los diferentes datos recopilados, siendo las siguientes:

- Aplicando un análisis descriptivo con datos ordinales, permitirá aplicar como procedimiento estadístico la “moda y mediana”, cuyas medidas de tendencia central permitirá identificar los valores repetitivos o el valor que separe los datos en partes iguales, a fin de garantizar un tamaño de partícula de pellet reciclado, manteniendo condiciones de consumo de energía eléctrica y consumo hídrico en el proceso extrusión de película de PEAD y PEBD como residuo plástico.
- Asimismo, se aplicará un procedimiento correlacional, determinando una regresión de los datos obtenidos, estableciendo si existe un comportamiento lineal entre las condiciones de proceso en la fabricación de pellet reciclado, analizando las variables independientes y dependientes, descritas en el inciso 3 de la sección de metodología.

11. RESULTADOS ESPERADOS

En base a la información teórica basada en las referencias bibliográficas, y los datos experimentales obtenidos en la sección de Métodos y Técnicas, se espera encontrar las siguientes relaciones:

- Tamaño óptimo de partícula de pellet, según tipo de polietileno clasificado.
- Perfil de calentamiento y fundición para obtención de pellet para reciclar
- Equilibrio de propiedades mecánicas y reológicas respecto pellet para reciclar.
- Ahorro de consumo de energía eléctrica respecto resistencias de calentamiento.
- Diseño de circulación de agua de enfriamiento para optimización de consumo.
- Condiciones de máximo resistencia de película a partir de pellet reciclado

12. CRONOGRAMA ACTIVIDADES

| Actividad Mensual | Mes 1 | | | | Mes 2 | | | | Mes 3 | | | | Mes 4 | | | | Mes 5 | | | | Mes 6 | | | | Mes 7 | | | | | | | | | | | |
|--|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|-------|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|
| Actividad Semanal | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| Selección de reciclado alta & baja densidad | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Selección de material a reciclar sin impresión y con impresión | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ingreso de condiciones de operación para proceso de reciclado según densidad del material | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Alimentación de material a reciclar | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Medición de corriente Amperios (Resistencia) | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Gráficos de control para medición de variables | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Control consumo energía eléctrica | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Control consumo hídrico | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Medición granulométrica de pellet reciclado | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Análisis costo producción pellet reciclado versus pellet virgen | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Análisis cuantitativo de propiedades plásticas en película de polietileno reciclado | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Comparativo de condiciones de operación de extrusión con pellet reciclado versus pellet virgen | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Análisis de Resultados e Informe Final | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |

13. RECURSOS NECESARIOS

En base al método y técnica a utilizarse, los recursos necesarios en el presente estudio son:

Tabla X. Descripción de costos por recurso requeridos en proceso de reciclaje de polietileno

| Recurso | Costo (Q.) | Costo 6 meses |
|---|-------------------------|-----------------------|
| Equipo de reciclado para polietileno baja densidad y polietileno alta densidad | Q. 15/h | Q. 5 400 |
| Control de temperatura mediante resistencias eléctricas | Q. 20/h Q. 5/h | Q. 7 200 Q. 10 800 |
| Malla para medición de tamaño de partícula de pellet | Q. 33/día | Q. 2 970 |
| Control de consumo de agua para proceso de enfriamiento | Q. 3000/mes | Q. 18 000 |
| Equipo de extrusión para película soplada para evaluación de prestaciones de película | Q. 50/día | Q. 4 500 |
| Equipo de medición de tensión y resistencia de película de polietileno a partir de pellet reciclado | Q. 10/día Q. 15,28/h | Q. 900 Q. 33 000 |
| Balanza analítica para determinación de gramaje de película | | |
| Mano de obra | | |
| | Costo Total | Q. 82 770 |

Fuente: elaboración propia.

Observación: el material de PEBD y PEAD a reciclar, será proveído por el mismo proceso de extrusión, en la planta de conversión donde se aplicará el presente diseño de investigación.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Arandes, J., Bilbao, J., López, D. (2004). *Reciclado de Residuos Plásticos*. España: Revista Iberoamericana de Polímeros.
2. Carneiro, C.M. (1998). *Consideraciones generales sobre el Protocolo de Kioto y su Mecanismo de Desarrollo Limpio*. Santiago, Chile: Boletín FAO. No.5.
3. Askelan, D.R. (2005). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (4ª ed.) D.F., México: Thomson.
4. Elías, X. (2012). *Reciclaje de residuos industriales*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
5. Guajardo, A.B., Najar, L.E., Prósperi, S. B., Molina, M. G. (1997). *Propiedades de los plásticos reciclados*. Argentina: Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria.
6. Hernández, S.R., Fernández, C., Baptista, P. (s.f.). *Metodología de la Investigación*. Monterrey: McGraw Hill.
7. Hernández, H. (1996). *Transformación de Termoplásticos, Termofijos y Reciclado* (1ª. ed.) México: Instituto Politécnico Nacional

8. IDRC Canadá, Ministerio de Ambiente y Territorio Italiano, IBAM (2006). *Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina*. Guatemala: autor.
9. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (2002). *Perfil Ambiental*. Guatemala: autor.
10. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2008). *Guía técnica para el mecanismo de residuos sólidos domésticos después de un desastre natural*. Guatemala: autor.
11. Ministerio de Salud Pública (1997). *Normativa reguladora leyes y normas relacionadas con el manejo de los desechos sólidos*. Guatemala: autor
12. Organización Internacional del Trabajo (2009). *Programa Internacional para la Erradicación del Trabajo Infantil*. Guatemala: autor.
13. Flory, P.J. (1971). *Principles of polymer chemistry*(8a. ed.) United States: Cornell University press.
14. Presidencia de la República (2005). *Política nacional para el manejo integral de los residuos y desechos sólidos*. Guatemala: autor.
15. Programa Ambiental Regional para Centroamérica (2004). *Reporte nacional de manejo de residuos*. Guatemala: autor.
16. Ramos, L.F. (2000). *Principios Básicos de Extrusión de Plásticos*(2ª.ed.) México: Limusa.

17. Trabajo Infantil en los Basureros: Una Evaluación Rápida. (2002). Guatemala
18. Universidad Rafael Landívar (2007). *Primer informe de desechos sólidos domiciliarios*. Guatemala: autor.
19. Uribe, M. (1996). *Los Polímeros-Síntesis, Caracterización, Degradación y Reología*(1ª. ed.) México: Instituto Politécnico Nacional.

