

**MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL MULTI OBJETIVO PARA LA
LOGÍSTICA INVERSA DEL SECTOR PLÁSTICO DE POLIPROPILENO**

JORGE ENRIQUE VÉLEZ HOYOS

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C**

2014

**MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL MULTI OBJETIVO PARA LA
LOGÍSTICA INVERSA DEL SECTOR PLÁSTICO DE POLIPROPILENO**

JORGE ENRIQUE VÉLEZ HOYOS

**Tesis presentada en opción al grado de
Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Industrial**

DIRECTOR

**EFRAIN JAVIER DE LA HOZ GRANADILLO
MSc INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C**

2014

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, junio de 2014

AGRADECIMIENTOS

Al concluir este trabajo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que han colaborado y ayudado con el desarrollo del mismo, en especial a mi tutor Efrain De La Hoz quien no sólo ha sido guía, sino también apoyo y soporte de toda la investigación.

Mi reconocimiento a Rafael Zapata, Francisco Caro, Manuel Cordero, Osvaldo Julio y a todos mis amigos y compañeros por haberse convertido en consejeros y fuentes de consultas constantes y desinteresadamente durante todo el trabajo.

Agradezco a en especial a Jairo Martin y al personal del laboratorio de la empresa donde se desarrolló este proyecto por su inapreciable ayuda en la realización de los experimentos.

A Jairo Vélez, por estar disponibles siempre para esas pequeñas tareas que parecen sin importancia pero que comprometen el éxito de un trabajo.

Por último, y no por ello menos importante, quiero expresar mi más profunda gratitud a toda mi familia, en especial a mi esposa Shyrley Díaz y mis hijos Sara Lucía y Jorge Andrés por entenderme en los numerosos momentos que les quite para entregárselos a este proyecto y sin los cuales el trabajo hubiera sido demasiado ingrato y difícil.

Jorge E. Vélez Hoyos

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy el único autor de este trabajo, que pertenece íntegramente a la Facultad de Ingenierías Industrial de la Universidad Tecnológica de Bolívar y autorizo su consulta a otras instituciones, a los profesionales, técnicos y personas en general que lo necesiten, siempre que se respete la procedencia del mismo, quedando prohibida la reproducción total o parcial de este documento, sin la autorización expresa de la Universidad de Tecnológica de Bolívar.

Jorge E. Vélez Hoyos.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Descripción del problema	10
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos del trabajo	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	13
1.4 Metodología	13
1.4.1 Caracterización del sistema de logística inversa del sector plástico de polipropileno	13
1.4.2 Especificación matemática y formulación	14
1.4.3 Verificación, validación y formulación	14
1.4.4 Resolución del modelo de optimización multiobjetivo	14
1.4.5 Construcción de un caso de estudio	15
2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1 Logística inversa	16
2.2 Programación lineal multiobjetivo	21
3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA SECTOR PLÁSTICO DE POLIPROPILENO	23
3.1 La industria del plástico	23
3.1.1 Tipos de plásticos	23
3.2 Tecnología de reciclado de los plásticos	25
3.2.1 Tratamiento primario	25
3.2.2 Tratamiento secundario	26
3.2.3 Tratamiento terciario	26
3.2.4 Tratamiento cuaternario	26

3.3	Identificación de los procesos involucrados en el reciclaje de polipropileno	27
3.3.1	Etapa 1: Recolección de los plásticos de los residuos sólidos urbanos	27
3.3.2	Etapa 2: Separación mecánica de los plásticos provenientes de los residuos sólidos urbanos	28
3.3.3	Etapa 3: Proceso de molienda del polipropileno	29
3.3.4	Etapa 4: Proceso de extrusión y aditivación el polipropileno	30
3.3.4.1	Proceso de extrusión	30
3.3.4.2	Aditivación como mejora de la degradación	31
3.4	Objetivos a optimizar y definición de variables	32
4.	ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA Y FORMULACIÓN	33
4.1	Objetivo 1: minimizar los costos de la logistica inversa del sector plastico de polipropileno	33
4.2	Objetivo 2: minimizar el indice de degradación a la procesabilidad del polipropileno reciclado	35
5.	RESOLUCIÓN DEL MODELO	46
5.1	Introducción	46
5.2	Estructura general del modelo de programación lineal multiobjetivo	46
6.	ESTUDIO DE UN CASO DE APLICACIÓN	51
6.1	Descripción del proceso y equipos usados	51
6.2	Programa de producción desarrollado por el administrador	53
6.3	Programa de producción utilizando el modelo propuesto	57
6.3.1	Peso de los objetivos	58
6.3.2	Restricciones	58
6.3.3	Parámetros constantes	59
6.3.4	Formulación y tabulación de los datos	59

7. ANALISIS DE RESULTADOS	67
7.1 Análisis de la caracterización del sistema de logística inversa del sector plástico de polipropileno	67
7.2 Análisis de la especificación matemática y formulación	67
7.3 Análisis de la verificación, validación y refinamiento del Modelo planteado	68
7.4 Análisis de la resolución del modelo y construcción de un Caso de estudio	68
8. CONCLUSIONES	70
8.1 Propuesta futuros estudios	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Muestra A. Resultados de Índice de Fluidez	36
Tabla 2. Muestra B. Resultados de Índice de Fluidez	37
Tabla 3. Nivel de mezcla estabilizante vs. PDI	37
Tabla 4. Coeficientes PDI Mtra. A	40
Tabla 5. Análisis de Varianza PDI Mtra. A	40
Tabla 6. Valores Predichos PDI Mtra.A	40
Tabla 7. Coeficientes PDI Mtra. B	42
Tabla 8. Análisis de Varianza PDI Mtra. B	42
Tabla 9. Valores Predichos PDI Mtra. B	43
Tabla 10. Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) en el Polipropileno	45
Tabla 11. Información de la demanda en el periodo	54
Tabla 12. Información de costos	54
Tabla 13. Resumen del plan de producción realizado	56
Tabla 14. Peso de los objetivos	59
Tabla 15. Restricciones de la planeación	59
Tabla 16. Variables constantes y valores obtenidos en el modelo	64
Tabla 17. Variables de decisión obtenidos para el modelo para los periodos dados	65
Tabla 18. Comparación de resultados	65
Tabla 19. Restricciones	66
Tabla 20. Variables de decisión	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de los procedo de los materiales plásticos	16
Figura 2. Flujo grama de la logística inversa del plástico de polipropileno (PP)	27
Figura 3. Gráfico del modelo ajustado Mtra. A y B	44

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Paquete de aditivos estabilizantes	75
Anexo B. Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) en el polipropileno degradado	76
Anexo C. Instrumento de recolección de datos	77
Anexo D. Archivo de Excel Anexo – Algoritmo elaborado para simular el modelo propuesto en la optimización del programa de producción.	78

1 - INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

Entre los aspectos que se deben considerar al analizar el papel que desempeñan las empresas a lo largo de toda la cadena de suministro en su relación con el entorno ambiental, se encuentra la gestión de los residuos generados en el ejercicio de su actividad. Debido al aumento de la cantidad de los residuos, de los productos devueltos, y de otros flujos inversos, su manejo se ha convertido en un problema que años atrás no ha tomado mayor relevancia, pero que hoy día cada vez gana mayor importancia y la industria del plástico es uno de los actores principales en la generación de estos residuos.

Diversos estudios han demostrado el gran aumento de la cantidad de residuos que generamos provocando innumerables problemas. Entre los bienes que usamos cada vez hay más objetos que están siendo fabricados para durar unos pocos años y después ser sustituidos por otros de manera que no compensan su recuperación, porque resulta más caro que comprar uno nuevo. Muchos productos entre ellos el plástico están diseñados para ser usados una sola vez y luego desecharlos generando grandes cantidades, sin que haya conciencia clara, en muchos casos, que luego hay que hacer algo con todos estos residuos.

En el campo de los plásticos, Arandes, Bilbao y López (2004) reportan el espectacular aumento en el consumo de este tipo de material en la sociedad moderna, que se estima crece un 4% anualmente. En el mundo y en Colombia han ido apareciendo poco a poco distintos sistemas integrados de gestión que se encargan de procesar la recuperación de diversos productos plásticos, pero la existencia de un sistema de gestión o no, puede depender de diversas características de la red logística tal como la motivación para la recogida, el tipo de demanda, los tipos de actores involucrados, las inversiones y el retorno económico, entre otros. Se conoce de numerosas publicaciones, leyes o decretos por parte de las distintas administraciones locales y nacionales y la aparición de empresas que tratan

de resolver los problemas sobre el manejo adecuado de los residuos plásticos entre los que se encuentra el plástico de polipropileno.

La situación anterior está suponiendo el cierre del círculo logístico para el sector, sin embargo es muy poca la motivación de los inversionista dado que el proceso de reciclaje del plástico no es atractivo debido al alto costo que se requiere pagar y la pérdida de características de calidad que sufre en dicho proceso de recuperación, de tal manera que se considera más económico la adquisición del plástico virgen como materia prima que el plástico reciclado.

La problemática que subyace en el proceso de recuperación y aprovechamiento de los componentes de los productos plásticos al finalizar su ciclo de vida, implica el análisis de la logística inversa en la cadena de suministro, entendiéndose ésta como la unión de todas aquellas empresas y entes involucrados de manera directa o indirecta que satisfacen la solicitud de un cliente, incluyendo la disminución de costos del reciclaje y aumentando su calidad.

El diseño del modelo para la logística inversa en el sector plástico de polipropileno, utiliza la estructura de los tradicionales modelos de localización y asignación, con el objetivo de explicar el comportamiento y las relaciones que se establecen en los procesos de recuperación de los productos al final de su ciclo de vida, sin tener en cuenta en ocasiones la calidad del producto final recuperado dado que conlleva a un incremento en los costos de operación en el proceso en la logística inversa del reciclaje de polipropileno.

De acuerdo con lo anterior se establece la pregunta de investigación: ¿Podrá establecerse un nuevo modelo de programación lineal multiobjetivo para la logística inversa que considere una disminución en los costos y una mejora en su calidad del producto final del sector plástico de polipropileno?

1.2 Justificación

La logística inversa del sector plástico de polipropileno cada vez gana mayor importancia en todos los procesos a nivel industrial, debido a la participación constante de los entes gubernamentales a nivel mundial ejerciendo control cada vez más estrictos en la regulación de los desechos sólidos urbanos que son potencialmente perjudicial para el medio ambiente y entre los que está el plástico de polipropileno, generándose así la aparición de numerosas empresas que tratan de resolver los problemas que esto conlleva.

Adicionalmente y dado a lo anterior, han ido apareciendo poco a poco distintos sistemas integrados de gestión que se encargan de realizar la recuperación del plástico de polipropileno cuando se convierten en residuos al final de su ciclo de vida como por ejemplo los envases de alimentos y artículos para el hogar entre otros, sin embargo esto no ha logrado responder los requerimiento de los inversionistas de manera que los incentive en el progreso de este proceso debido al alto costo y baja calidad que se obtiene del material recuperado en toda la cadena del proceso. Es por esta razón que se hace necesario encontrar la manera de optimizar los costos y la calidad del plástico de polipropileno en la implementación de su logística inversa.

1.3 Objetivo del trabajo

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de programación lineal multiobjetivo para la optimización de la logística inversa en el sector plástico de polipropileno.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Analizar las variables a incluir en el diseño de la red logística inversa del sector plástico de Polipropileno y sus relaciones estructurales con el fin de identificar aquellas sensibles a optimizar.
- Diseñar la estructura general del modelo de programación lineal multiobjetivo para el proceso de logística inversa en el sector plástico de polipropileno, identificando las funciones objetivos y las restricciones que las gobiernan.
- Validar el modelo matemático de programación lineal multiobjetivo para el proceso de logística inversa en el sector plástico de polipropileno, mediante la afinación de los parámetros involucrados y las estructuras de relaciones, utilizando datos pertenecientes a una cadena de suministro inversa real del sector plástico de polipropileno en Colombia.
- Resolver y analizar el modelo matemático de programación lineal multiobjetivo para el proceso de logística inversa en el sector plástico de polipropileno, mediante la utilización de un algoritmo apropiado para tal fin e implementándose en un caso real de una empresas del sector industrial de Cartagena, para la ejemplarización del modelo matemático diseñado.

1.4 Metodología

1.4.1 Caracterización del sistema de logística inversa del sector plástico de polipropileno

A fin de identificar los parámetros, variables de decisión, restricciones y función objetivo involucrados, se exploraran las actividades actuales de las empresas recicladoras y recuperadoras de plástico del sector y de cómo es el proceso de generarle valor a través de la logística inversa. Inicialmente se identificarán claramente las empresas, entidades o

personas involucradas en todo el proceso, incluyendo desde los basureros hasta los puntos de acopio, mecanismos de separación, sistemas de transporte, entre otros.

Obtenida toda la información y dependiendo si es un número muy elevado de variables y función objetivo, se clasificarán y seleccionarán mediante un proceso estadístico descriptivo para la elaboración del modelo.

1.4.2 Especificación matemática y formulación

Definidas las variables y objetivos involucrados en el proceso de logística inversa del sector plástico de polipropileno y que sean seleccionadas como las más relevantes, se construirá la estructura formal del modelo matemático de optimización lineal multiobjetivo para el sector plástico de polipropileno. Este modelo será formulado de forma general, de tal manera que pueda ser utilizado en cualquier empresa del sector. Se utilizará la simbología matemática propia para la definición de un modelo de esta naturaleza.

1.4.3 Verificación, validación y refinamiento

Se comprobará la validez de las simplificaciones realizadas a través de mediante la afinación de los parámetros involucrados y las estructuras de relaciones, los resultados obtenidos, incluso contrastando éstos con situaciones reales o comprobando que los elementos considerados son coherentes con respecto a lo que sucede en la realidad.

1.4.4 Resolución del modelo de optimización multiobjetivo

Solución del modelo matemático de programación lineal multiobjetivo para el proceso de logística inversa en el sector plástico de polipropileno, mediante la utilización de software especializados o implementación de un algoritmo para la obtención de una solución numérica si no óptima, cercana a ella.

1.4.5 - Construcción de un caso de estudio

Una vez construido el modelo propuesto se implementara en el análisis de una empresa del sector plástico de polipropileno de la ciudad de Cartagena, para la así poner a prueba la factibilidad de dicho modelo diseñado.

2 - ESTADO DEL ARTE

2.1 Logística inversa

La cadena de suministro constituye un pilar fundamental hoy día en el éxito del mundo de los negocios, debido a que la administración del flujo de los materiales, información y servicios, iniciando en el proveedor, pasando por la transformación y almacenes hasta llegar al consumidor final, se ha constituido como un enfoque total del sistema (Chase, Jacobs and Aquilano, 2004).

Una cadena de suministro es una serie de procesos y flujos que se realizan dentro y fuera de las industrias y en diferentes etapas que se intercambian para satisfacer las necesidades de los clientes internos y externos, tal como se muestra en la Figura 1, los cuales pueden ser observados a través de ciclos en la que cada uno se realiza entre dos etapas continuas, como por ejemplo almacenes - clientes u observados del proceso de empuje y tirón el cual se da dependiendo si éstos son realizados en respuesta a un pedido del cliente o con anticipación a éste (Chopra & Meindl, 2008).

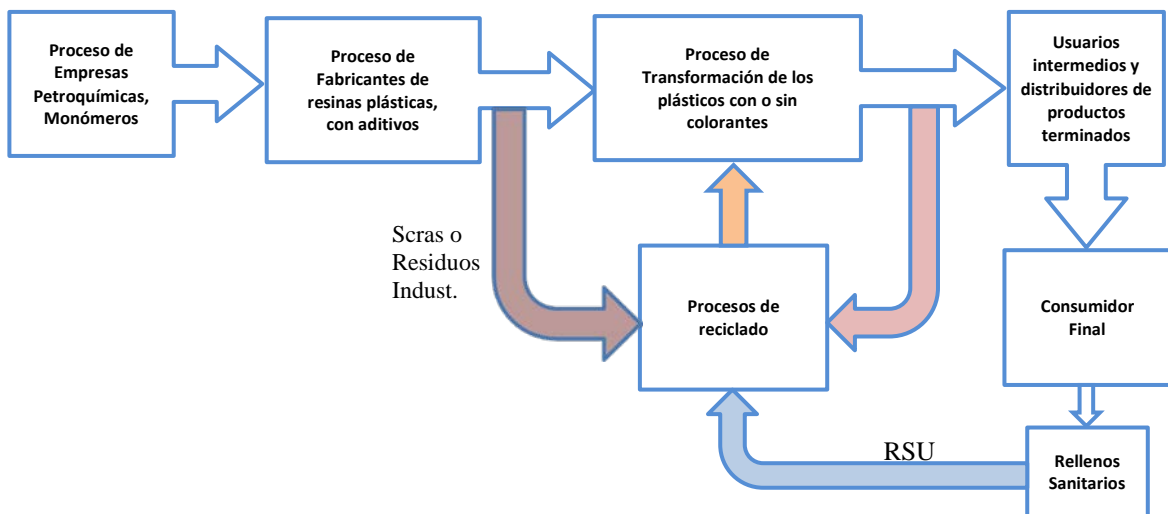


Figura 1. Diagrama de flujo de los procesos de los materiales plásticos

Fuente: Vélez H. Jorge E. Diagrama de flujo de los procesos de los materiales plásticos. Informe de la investigación.

Ballou (2004) establece la cadena de suministro como “un conjunto de actividades funcionales que se repiten a lo largo del canal de flujo del producto, mediante los cuales la materia prima se convierte en productos terminados añadiéndole valor al consumidor” (p.7).

El comité de la OEM (Original Equipment Manufacturer), (citado por Correa & Gómez, 2008) define la cadena de suministro como una asociación de consumidores y proveedores quienes, trabajando juntos en sus propios intereses, compran, transforman, distribuyen, y venden bienes y servicios entre ellos mismos, resultando al final la creación de un producto final específico.

De igual manera, una cadena de suministro inversa se centra en el flujo de retroceso de los materiales desde el cliente final hasta el fabricante o proveedor (o disposición alterna), con los objetivos de maximizar el valor de los artículos devueltos o minimizar el costo total de la logística inversa.

A finales de los noventa, Ronald S. Tibben – Lembke (1998) definen la logística inversa como: “El proceso de planeación, implementación y control de flujo de materias primas, inventario en proceso y bienes terminados, desde un punto de uso, manufactura o distribución a un punto de recuperación o disposición adecuada...” (p.9).

Paralelamente, en el grupo europeo de logística inversa Rogers, Tibben y Lembke (1999) definieron la logística inversa como: “El proceso de planificación, ejecución y control de flujo de información eficaz, rentable de materias primas, el inventario en proceso, productos terminados y la información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el fin de recuperar el valor o la correcta eliminación...”. (p.17).

De igual manera otra definición de logística inversa es la planteada por Reverse Logistic Association, Web Site (2008): “Logística Inversa es toda actividad asociada con la

recuperación de los componentes de un producto después del punto de venta a los clientes, con el objetivo de optimizar su proceso, ahorrando dinero y preservando los recursos ambientales”.

Las definiciones presentadas por los diversos investigadores en el tema encierran un mismo concepto, el cual se puede resumir como “el flujo en retroceso de los materiales que van desde el cliente al fabricante o proveedor (o disposición alterna), con el fin de maximizar el valor de los productos al final de su vida útil y/o de los artículos devueltos, así como también el minimizar el costo total de implementación de la logística inversa”.

Es por lo anterior que la implementación del proceso de Logística Inversa se ha incrementado notablemente desde sus inicios en la década de los ochenta. Aunque inicialmente comenzó por la necesidad que experimentaron las industrias de retornar a las fábricas los productos defectuosos, el término revolucionó con el nacimiento de la conciencia ambiental a nivel mundial, especialmente en Europa y posteriormente en los noventa cuando las empresas americanas descubrieron los beneficios económicos que representa la implementación de este tipo de proceso; luego se fortaleció debido a la presión ejercida por la escases y encarecimiento de algunas materias primas, así como la presión ejercida por los entes gubernamentales de la época, hasta convertirse en un factor estratégico para las compañías. Actualmente la Logística Inversa se ha convertido en parte fundamental de las estrategias de las empresas, especialmente para las compañías que deben competir en el ámbito global (Monroy y Ahumada, 2006).

Así mismo y debido a la gran preocupación sobre el cuidado y la preservación del medio ambiente, en la última década el tema de logística inversa ha despertado gran interés en el ámbito científico, a fin de investigar el problema y encontrar propuestas de solución en el proceso de recolección de las basuras y reciclaje de los productos al final de su vida útil. Desde el punto de vista de optimización del proceso, son muchos los estudios que se han desarrollado a fin de conseguir los mejores resultados en el proceso de logística inversa.

Por otra parte, Alshamrani, Mathur y Ballou (2005) introdujeron la investigación de operaciones en la logística inversa con el desarrollaron un procedimiento heurístico para tratar el diseño de rutas de recogidas de los recipientes vacíos donde fue inicialmente transportado sangre desde el punto de distribución central al cliente, y en donde las recogidas de los recipientes vacíos se debían hacer en el periodo siguiente a la entrega. El resultado fue el análisis de un problema de planeación de logística dinámica, en donde en cada período de entrega el vehículo despachado necesitaba conocer una ruta de múltiples paradas, determinadas por la cantidad de recipientes a ser recogido en cada una de ellas, de manera que en el diseño de la ruta los volúmenes de los recipientes recogidos solo son estimados probabilísticamente.

Un trabajo similar fue el realizado por Gomez, Barbosa y Novais (2006), donde formularon un modelo de programación lineal entera mixta y lo solucionaron por medio de la técnica Branch & Bound para el diseño de una red de logística reversa en un proceso genérico, donde se gestionan múltiples productos, las capacidades son limitaciones y las demandas y retornos son inciertas. El modelo fue aplicado a un caso ilustrativo en una compañía Ibérica. En el mismo año Logozar y Radonjic (2006) también desarrollaron un modelo de programación lineal, el cual fue usado para calcular los costos mínimos anuales de transporte y el camino óptimo en el proceso de recogida del scrap dentro de la planta de procesamiento de aluminio, a fin de escoger el más eficiente; el modelo fue desarrollado y aplicado con el objetivo de reducir la medida del scrap de aluminio transportado, considerando parámetros y variables como: costo fijo y costo variable de transporte, distancia a recorrer, cantidad de material transportado, energía usada para transportar y otros costos operacionales.

En un trabajo, Pati y Vraty (2006) realizaron una investigación para el manejo de los desechos de papel, en el cual formularon un modelo de programación entera mixta por metas, para ayudar a la gestión adecuada del sistema logístico del reciclaje de papel. El modelo estudió la interrelación entre múltiples objetivos, con cambio de prioridades en una red de distribución. Los objetivos planteados fueron la reducción en los costos de logística

inversa, mejora de la calidad del producto a través de la fuente de segregación y los beneficios ambientales generados a través de la recuperación de papel usado. El modelo propuesto también ayudó a determinar la ubicación de las instalaciones, la ruta y el flujo de las diferentes variedades, en el reciclaje de desecho de papel, así como también para direccionar los principales problemas y los temas relacionados con la gestión del sistema de distribución en el reciclaje de papel.

Por otra parte, Mutha y Pokharel (2008) propusieron un modelo matemático para el diseño de una red de logística inversa para las devoluciones de productos. El modelo propuesto consideró la recolección de los productos devueltos a través de colectores externos (Tercerización ó Outsourcing), considerando almacenamientos, reprocesamientos, facilidades de re manufactura y la creación de nuevos módulos de suministros en la red. La formulación del modelo consideraron la construcción de un diagrama de red genérico, en el que relacionan nueve escalones de la red, asumiendo como un escalón a los minoristas (puntos de recolección), a los almacenes (guardar y consolidar), los centros de reprocesamientos (inspección y desmantelamiento), y así sucesivamente. Como un escalón aparte se planteó la pre-selección de nuevos módulos de suministros.

Así mismo, Wilcox, Horvath, Griffis y Autry (2010) proporcionaron un modelo para el proceso dinámico de logística inversa con una evaluación exhaustiva a los impactos a corto plazo. En el trabajo incluyen, en primer lugar, la introducción de las unidades en el sistema a través de números aleatorios, así como la introducción de las unidades que presentan los diversos estados del sistema, en segundo lugar consideraron como escenarios que los estados del sistema operativo están por encima o por debajo de su capacidad de diseño, y los efectos en las variables que esto tendrá en el sistema de logística inversa. Concluyen que el trabajo propuesto contribuye al proceso de planificación de la gestión de logística inversa, facilitando el desarrollo de los intervalos de confianza asociados con las características de distribución de la cadena, a través de la utilización de la teoría sobre cadenas de Markov.

En el mismo año Trappey y Wu (2010) presentaron un trabajo en el que introdujeron las nuevas tecnologías de identificación por radio frecuencia (RFID) para mejorar la transmisión y colección de datos en el proceso de logística inversa. El trabajo desarrolla un enfoque de calidad y cantidad en la recogida de los productos que ya llegaron el final de su ciclo de vida, usando estructuras de grafos difusos a fin de evaluar el comportamiento de las RFID habilitadas en la operación de logística reversa.

2.2 Programación lineal multiobjetivo

La optimización multiobjetivo puede ser definida como un problema de optimización que presenta dos o más funciones objetivo. El inconveniente principal que presenta este tipo de problemas en relación a un modelo de objetivo único, radica en la complejidad para encontrar una solución que haga óptimo a los objetivos considerados y que en la mayoría de los casos entran en conflicto. Un problema multiobjetivo no tiene una solución óptima única, más bien, genera un conjunto de soluciones que no pueden ser consideradas muy diferentes entre sí. De esta manera el conjunto de soluciones óptimas es denominado Frontera de Pareto. Esta frontera de soluciones contiene todos los puntos que no son superados en todos los objetivos por otra solución. Este concepto lleva el nombre de dominancia, por esta razón la frontera de Pareto consiste solo de soluciones no dominadas. Una solución domina a otra si y sólo si, es al menos tan buena como la otra en todos sus objetivos y es mejor en al menos uno de ellos (Baesler, Ceballos y Ramírez, 2006).

En esta línea de investigación, Pishvaei y Torabi (2010) propusieron un modelo bi-objetivo de programación entera mixta para enfrentar el problema de diseño de red de cadena de suministro de ciclo cerrado. El modelo integra las decisiones de diseño de red en ambos sentidos, tanto en logística de suministro como en logística inversa, y también incorpora como estrategia de decisión de diseño de la red junto las tácticas de flujo de material separándose en dos partes a fin de evitar ineficiencia. Para resolver el modelo de optimización propuesto, desarrollaron un enfoque de solución difusa interactiva combinando un número de enfoques de soluciones eficientes de literaturas recientes.

Con los datos obtenidos los autores pudieron demostrar la significancia y la aplicabilidad del modelo desarrollado así como la utilidad del enfoque de solución propuesta.

En el mismo año, Wang, Lai y Shi (2010) también estudiaron el diseño de una red de cadena de suministro para la solución del problema ambiental y decisiones de inversión desde la fase de diseño, proponiendo un modelo de optimización multiobjetivo que considera la compensación entre el costo total y la influencia sobre el medio ambiente, llevando a cabo un amplio conjunto de experimentos numéricos y mostrando que el modelo puede ser aplicado como una herramienta efectiva en la planeación de una cadena de suministro inversa.

Siguiendo la misma línea, Yeh y Chuang (2010) también plantearon un algoritmo genético multiobjetivo para la selección de socios en los problemas de cadena de suministro inversa, involucrando cuatro criterios como son: costos, tiempo, calidad de los productos y un indicador de la evaluación ambiental; con el fin de resolver los objetivos en conflictos, adoptaron dos algoritmos genéticos multiobjetivo para encontrar la solución óptima de Pareto y utilizando el enfoque de la suma ponderada para generar un mayor número de soluciones. En el análisis experimental compararon las soluciones promedios del número óptimo de Pareto y los tiempos computacionales de los dos algoritmos.

3 - CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE LOGÍSTICA INVERSA DEL SECTOR PLÁSTICO DE POLIPROPILENO

3.1 La industria del plástico

Uno de los mayores avances obtenidos por el hombre en la industrial es la creación de nuevos materiales como los plásticos, el cual fue impulsado su desarrollo por el resultado de la escases de materiales como el hule, que provenía de Asia y la seda que provenía de Japón, cuando estalló la segunda guerra mundial en 1939 (Kachur, 2011).

Hoy día el gran crecimiento en el consumo de los plásticos en la sociedad moderna, ha generado de manera paralela un gran avance tecnológico en el desarrollo de estos materiales cuyo uso se ha extendido a sectores industriales. El consumo mundial de plástico por año ha pasado de los 10 millones de toneladas en 1978 a los casi 260 millones de toneladas a finales del año 2007 (Gent, Menendez, Toraño y Torno, 2011).

En la Enciclopedia del Plástico (2000) se definen los plásticos como: “Sustancias orgánicas formadas por largas cadenas macromoleculares en cuya estructura contiene carbono e hidrógeno en su mayoría y su materia prima principalmente está el petróleo y en mucho menor grado la madera y el algodón de donde se obtiene la celulosa...” (p.399). La reacción utilizada para sintetizar o unir las sencillas moléculas de la materia prima (monómeros) y convertirlas en macromoléculas llamadas “polimerización” lo cual se logra con el uso de un catalizador en presencia de calor o luz”.

3.1.1 Tipos de Plásticos

Hay dos grandes tipos de plásticos: Los Termoplásticos (Reciclables) y los Termofijos o Termoestables (No Reciclables) y la enciclopedia Plastics Materials y Processes (2003) los define de la siguiente manera:

Los materiales termoplásticos es un plástico que, a temperatura ambiente, es plástico o deformable, se derriten cuando se calientan y se endurecen en un estado vítreo cuando se

enfían lo suficiente. La mayoría de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular y los más usados son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el polimetilmetracrilato (PMMA), el policloruro de vinilo (PVC), el politereftalato de etileno (PET), y el teflón o politetrafluoretileno (PTFE), entre otros y los materiales Termofijos o termoestables a diferencia del anterior, no se funden al elevarlos a altas temperatura, sino que se queman, siendo imposible volver a moldearlos y es por eso que no son reciclables. Entre los plásticos termofijos se encuentran: Caucho natural vulcanizado; Baquelita que es una resina tipo fenol formaldehído y se utilizada principalmente en la industria electrónica; Duroplast; Urea-Formaldehído Espuma que es utilizada en imitaciones de madera y tableros; Melamina que es utilizada en tableros para trabajo; Resinas insaturadas de poliéster, que casi siempre se usan reforzadas con fibra de vidrio; Resina epoxicas, utilizada como adhesivo y en plásticos reforzados; Poliuretanos; Siliconas; y Caucho sintético, entre otros. (Jhon y Sons 2003, p.258).

El polipropileno es un material termoplástico que nació en 1954 y 10 años después se convirtió en uno de los principales plásticos mundiales (Sato y Ogawa, 2009) por sus excelentes propiedades como la alta rigidez, su baja densidad, su alta transparencia, su alta resistencia al impacto, su gran capacidad de ser reciclado y su relativo bajo costo frente a otros plásticos, haciéndolo muy atractivo en el sector industrial.

Por lo anterior, la producción mundial del polipropileno, que se estima está en unos 47 millones de toneladas por año (predicción para el 2008), ha tenido un crecimiento exponencial promedio de 6% anual en las últimas dos décadas (Sato y Ogawa, 2009) incursionando en amplios sectores industriales como la industria alimenticia, la industria de envases rígidos, la industria automotriz, de construcción, medica e higiene personal, agrícola y para el hogar entre otras, y en diseños de uso en su ciclo de vida de corto y largo periodo, convirtiéndolo a su vez en una fuente considerable de generación de desecho al final de su vida útil.

Toda actividad humana produce un impacto ambiental, en los procesos industriales la fabricación de un producto impacta desde la extracción de materias primas utilizadas como

insumo, hasta el momento en que el producto finaliza su vida útil, por eso el análisis de ciclo de vida de los materiales a utilizar es tan importante para cuantificar el impacto ambiental de un producto (Romero Rodríguez, 2003).

Teniendo en cuenta lo anterior y el seguimiento riguroso de entes gubernamentales en el control de la generación de desechos y de la concientización en la preservación del medio ambiente que cada vez tiene un mayor auge, se hace necesario la implementación de mecanismos de recuperación y reutilización de desechos de polipropilenos a fin de minimizar el impacto ambiental. Sin embargo, el éxito en el desarrollo tecnológico no ha llevado emparejada la previsión de reciclado de producto que condiciona ya la propia filosofía de fabricación (Molgaard, 1995) y se estima que se recupera o recicla menos del 15% del total de materiales plásticos a nivel mundial y de esta cantidad el 60% es plástico de polietileno y polipropileno (Arandes, Bilbao, López – 2004).

3.2 Tecnologías de reciclado de los plásticos

Son varias las tecnologías que se han implementado para el reciclaje de desechos sólidos de plásticos denominados: Tratamiento primario, secundario, terciario y cuaternario (Salem, 2009).

3.2.1 Tratamiento primario

Consiste en un proceso de operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este proceso de reciclado se aplica para el aprovechamiento de recortes o scrap de las plantas de producción y transformación de plástico y corresponde a un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos debido a que es solo aplicable dentro del proceso de las empresas productoras y transformadoras, el cual lo consideran como material de reproceso y no de desecho. La reutilización de este material puede realizarse dentro de la misma empresa donde se genera o comercializada con empresas afines para aplicaciones de menor exigencia, por ejemplo el

scrap generado en las empresas transformadoras de empaques para alimentos son comercializados con empresa transformadores de artículos que no están en contacto con alimentos (Salem, 2009).

3.2.2 Tratamiento secundario

Es el proceso, también de operación mecánica, en el cual se da la separación de los diferentes tipos de plásticos que llegan mezclados provenientes de los rellenos sanitarios urbanos, los cuales son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, que son diferentes a las del plástico original y que pueden ser usados en un proceso evolutivo "en cascada" hacia prestaciones inferiores, es decir, en aplicaciones donde las exigencias del plástico son menores. Esta es la tecnología más usada hasta ahora en el reciclaje de los plásticos (Salem, 2009).

3.2.3 Tratamiento terciario

Persiguen el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables bien 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. Este es un proceso muy poco convencional debido al alto costo de las plantas químicas para este proceso (Salem, 2009).

3.2.4 Tratamiento cuaternario

Consiste en la incineración de los desechos plásticos para recuperar energía, pero éste método actualmente es muy cuestionado socialmente por los problemas medio ambientales generados por los gases que se desprenden en la combustión de los plásticos (Salem, 2009).

3.3 Identificación de los procesos involucrados en la logística inversa de polipropileno.

La logística inversa de los plásticos e incluido el polipropileno en general, es el proceso mediante el cual el plástico post-consumo provenientes de los rellenos sanitarios o basureros, llamados también Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o el industrial (Scrap) provenientes de las empresas fabricantes y transformadoras de plásticos, son recuperados permitiendo su posterior utilización. Este proceso lo clasificaremos en diferentes etapas en la cadena de logística inversa (Figura 2)

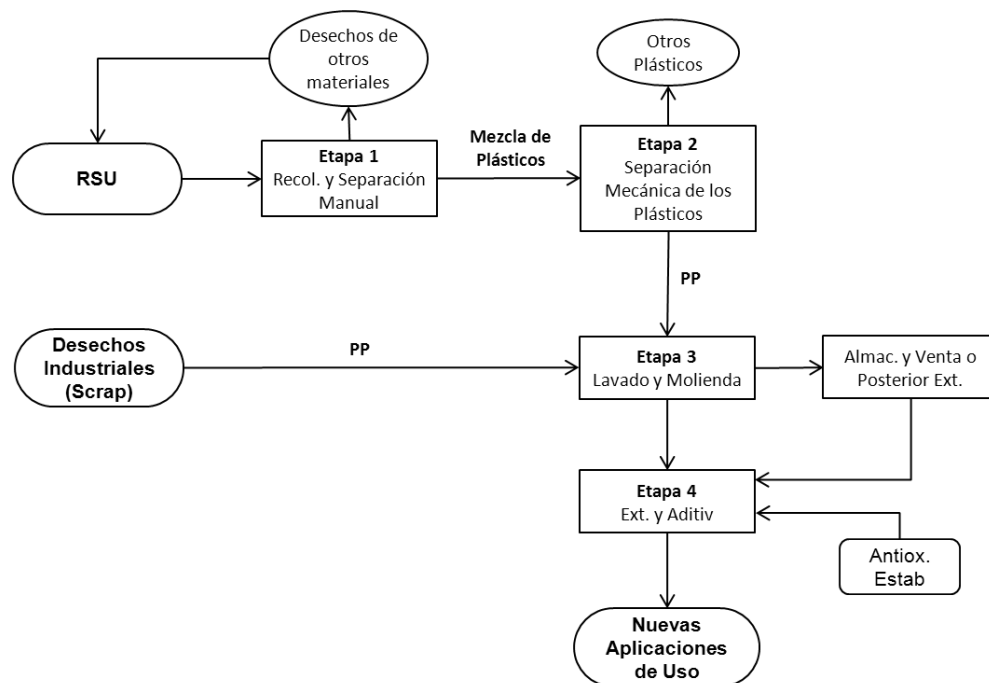


Figura 2 –Flujograma de la logística inversa del plástico de polipropileno (PP)

Autor: Vélez H. Jorge E. Flujograma de la logística inversa del plástico de polipropileno (PP). Informe de la Investigación

3.3.1 ETAPA 1 - Recolección de los plásticos de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Esta primera etapa de la cadena se realiza de una manera manual, es decir, es el proceso en el cual es hombre recoge manualmente los plásticos de los RSU y los clasifica de una

manera muy subjetiva, por tipo de plástico de acuerdo al conocimiento propio de la persona o si las condiciones se dan, al código que identifica el plástico, y el nivel de contaminación con otros materiales, el cual comercializan por unida de peso y su valor comercial es variable y acorde y su nivel de clasificación (Salem, 2009), los cuales se da en tres clases:

- Residuos plásticos de tipo simple: Los cuales han sido separado de acuerdo al código que define el tipo de plástico y clasificados entre sí los de distintas clases.
- Residuos mixtos: Los cuales son los diferentes tipos de plásticos que se hallan mezclados intrínsecamente entre sí, pero que manualmente es difícil separar.
- Residuos plásticos mixtos combinados: Los cuales son los residuos mixtos mezclados con otros residuos como el papel, cartón, metales, entre otro.

Una vez recolectado y clasificado en el mismo sitio de los rellenos sanitarios, el plástico reciclado es transportado en camiones, tracción animal o a pie (dependiendo de la distancia y volumen a transportar), al primer punto de acopio donde es almacenado hasta obtener un volumen considerable, el cual depende de la capacidad de almacenamiento de la bodega. Para efecto de optimizar la capacidad de la bodega el material plástico es picado o troceado en tamaño que oscila de 10 a 50 mm de lado y empacado en bolsas o cubos metálicos y/o madera, antes de ser almacenados (Salem, 2009).

Una vez almacenado una cantidad considerable de plástico recolectado, es transportado al proceso de separación.

3.3.2 ETAPA 2 – Separación mecánica de los plásticos provenientes de los (RSU)

Una de las técnicas más usadas para la separación de los plásticos es la técnica de flotación y hundimiento por diferencia de densidad (Salem, 2009), el cual consiste en sumergir todos los plásticos provenientes de los RSU y previamente troceados en una piscina llena con una solución de densidad conocida, que normalmente es agua mezclada con cristales de sal, para así obtener la densidad de la solución requerida. El plástico, que tiene una densidad que lo caracteriza, flota a diferentes niveles en la solución dependiendo del tipo de plástico, facilitando así su separación por medio de mallas separadoras.

Una vez obtenido el plástico separado y clasificado, es conducido por medio de bandas transportadoras o manualmente al proceso de lavado, el cual se realiza dependiendo del tipo de plástico, nivel y tipo de suciedad, con un baño con solución ácida o básica, pasando posteriormente a ser enjuagado con agua, secado y almacenado o pasando directamente a la etapa de molienda.

El polipropileno proveniente de las plantas de producción y/o transformación considerados como recortes o scrap los cuales deben ser reciclado y que llegan libre de contaminante de otros materiales y tipo de plástico, pueden entrar al proceso a la etapa de troceado o picado, también en tamaños que puede oscilar de 10 a 50 mm, pasando directamente al proceso de lavado o proceso de molienda.

3.3.3 ETAPA 3 – Proceso de molienda del polipropileno

Recibido el plástico de polipropileno previamente separado en la etapa anterior, el proceso de molienda reduce el tamaño hasta obtener el tamaño deseado que depende de los requerimientos de la máquina del proceso siguiente (proceso de extrusión). Existen diversos tipos de tecnología según el tamaño al cual se quiera llegar, en general puede llegarse a

obtener hojuelas de 2 a 5 mm o finalmente polvo, según el tipo de molino del que se disponga (Salem, 2009).

El proceso de molienda comienza con la entrada del plástico de polipropileno en el molino triturador, este muele el material mediante el sistema de cuchillas impulsado por un motor eléctrico. Una vez triturado el material es expulsado a través de una malla de orificios con diámetro del tamaño del producto final deseado, las cuales se encuentran en las paredes internas del equipo. Se pueden encontrar diversos tipos de molinos que se diferencian en potencia, capacidad (en kg), tipo de rotor (rotor en P, rotor en B, rotor en N).

Una vez extraído el polipropileno del molino puede pasar directamente a la entrada del proceso siguiente o empacado y almacenado para ser procesado o comercializado posteriormente.

3.3.4 ETAPA 4 – Proceso de Extrusión y Aditivación del Polipropileno

3.3.4.1 Proceso de Extrusión. Este proceso consiste en el prensado y moldeado del material procesado anteriormente hasta obtener la forma deseada, en nuestro caso de cilindro fino y alargado (como un "spagueti"). El proceso de extrusión se realiza mediante una máquina extrusora y comienza con la llegada del polipropileno triturado o molido a la zona de alimento de la máquina extrusora, cae al cilindro principal (cañón) donde se encuentra con el husillo (tornillo de Arquímedes) calentado por resistencias eléctricas a temperatura de 220°C aproximadamente para fundir el polipropileno a procesar (Salem, 2009).

El husillo gira concéntricamente en el cañón o cilindro impulsado por el motor eléctrico, en este momento el material comienza a mezclarse, fundirse y fluir a través del cilindro debido a las elevadas temperaturas que este adquiere por efecto de la fricción y de las resistencias eléctricas anteriormente mencionadas. La primera fusión del polipropileno ocurre en la pared interna del cilindro, en forma de una delgada película, cuando esta película crece se desprende de la pared del cilindro y avanza gracias al empuje del husillo o tornillo.

Finalmente, el plástico fundido llega al final del recorrido del cilindro donde se ve obligado a pasar por el dado o boquilla de múltiples orificio. El dado se considera como un consumidor de presión, ya que al terminar el husillo la presión es máxima, mientras que a la salida del dado la presión se reduce a nivel atmosférico.

En el caso del reciclaje del plástico, el dado tiene una o varias perforaciones (dependiendo del tamaño de la extrusora) circular central que da forma de filamento al plástico fundido que es empujado por el husillo. Llegados a este punto, se obtiene unos filamentos caliente de plástico de 2 a 3 mm de diámetro y que deben ser enfriados, para ello los filamentos salientes de la extrusora pasan directamente a un baño de agua donde se enfrían para su posterior corte también de 2 a 3 mm. A la salida de la extrusora el polipropileno pasa al proceso de secado para luego ir directamente a un silo de almacenamiento o a la entrada del proceso de empaque comercial, el cual puede ser en bolsas de 20 o 25 kg o big-bag de 800 ó 1000 kg., pasando finalmente al área bodegaje o despachado directamente al cliente.

3.3.4.2 Aditivación como mejora de la degradación. El plástico de polipropileno reciclado no está exento de problemas irreversibles como los cambios estructurales y morfológicos que son inducidos mecano químicamente o químicamente durante el procesamiento o el envejecimiento producido por calor o mediante la radiación UV durante su uso o en su estancia en los RSU (Grisa, Zeni y Muñoz, 2010). Por otro lado, el nivel de la degradación del material plástico de polipropileno reciclado es influenciado por su historia de origen y también por el sistema base de estabilización particular utilizado. Se ha demostrado que a veces la base del sistema de estabilización no es suficiente para impedir la degradación durante el reciclaje (Hamskog, 2004).

Uno de los métodos de mayor eficacia para la actualización o bloqueo de la degradación del polipropileno en el proceso de reciclaje se puede lograr mediante la adición de aditivo estabilizador o antioxidante en concentraciones que depende del grado de

degradación del material antes de ser procesado, por ello se requiere conocer el nivel de degradación antes y después de ser extruido el material a través de técnicas de ensayo en laboratorio como lo son Elongación al Rotura, Tiempo de Inducción de la Oxidación (OIT, por sus siglas en ingles), Cambio en el Índice de Amarillamiento y cambio en el índice de fluidez, siendo esta última la técnica de ensayo la que mejor muestra el grado de reciclabilidad del polipropileno dependiendo de la concentración agregada de aditivo (Tochacek, Jancar, 2011).

3.4 Funciones objetivos a optimizar y definición de variables

En los procesos involucrados para la logística inversa de los plásticos desde los rellenos sanitarios hasta nuevamente los procesos de transformación de todas las variables susceptibles a optimizar y debido a la variabilidad que tiene la demanda para este tipo de producto, la que mayor impacto tiene para cualquier administrador son los costos del producto final (Gent et al., 2011), sin embargo otra variable no menos importante que los costos de producción y que cada vez gana ventaja para tener en cuenta por los administradores, es la estabilidad de la degradación del polipropileno recuperado como factor determinante de la calidad del polipropileno reciclado, es decir, recuperar un material plástico de manera que quede apto para nuevamente ser procesado (Tochacek, Jancar, 2011).

Por lo anterior, las dos funciones objetivos a optimizar en la propuesta del modelo de programación lineal son:

Función Objetivo 1: “Costos de la logística inversa de polipropileno”.

Función Objetivo 2: “Degradación del polipropileno reciclado”

4 - ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA Y FORMULACIÓN

4.1 Función objetivo 1: costos de la logística inversa del polipropileno.

Son muchos los estudios que se han realizado sobre la logística inversa incluyendo los diferentes modelos que se han planteados para su optimización, pero para nuestro caso específico y en aras de sintetizar la expresión matemática de la función objetivo 1 de forma general, a partir de la observación realizada del proceso se pudo identificar cada una de las actividades logísticas y del proceso productivo que intervienen tales como Transporte, Almacenes o punto de acopio, Inventarios, Procesos productivos (materia prima), Horas hombres operacionales normales y horas extras, Contrataciones adicionales, Despidos, Incumplimientos de entregas, Perjuicios por despidos y Tiempo ocioso entre otros, se plantea a continuación la estructura matemática teniendo en cuenta todas las variables recolectadas y analizadas a través del instrumento de recolección de datos usado para tal fin (ver anexo 3) y teniendo en cuenta los costos de transporte desde el lugar desde el lugar de recogida del plástico a reciclar hasta los centros de acopio, los costos de almacenaje de los centros de acopio, las horas hombre de trabajo, contrataciones y despidos de la fuerza de trabajo, las horas extras, el tiempo ocioso”, “los inventarios” y “los pedidos atrasados acumulados” y “la producción subcontratada” (Chase, 2004), se plantea de la siguiente forma:

Objetivo 1: Minimizar Z_1 (Costos de la logística inversa del polipropileno).

Teniendo en cuenta que el primer paréntesis hace referencia a los costos de la fuerza de trabajo (horas hombre), el segundo paréntesis hace referencia a los costos causados por las contrataciones y despidos, el tercer paréntesis a las horas extras generadas en el periodo, el cuarto paréntesis a los inventarios en el periodo, el quinto paréntesis a los retrasos en el despachos en el periodo y el sexto paréntesis a los costos por subcontrataciones externas de la producción, se tiene la expresión matemática de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
Min Z_1 = \sum_{p=1}^P \left[\left(\sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R (Trans_{rp} * CTrans) + (Alm_{np} * CAlm) \right) + (Pd_p * CMP) \right. \\
+ (HhR_p * CHhR) + (HE_p * CHE) + (C_p * PC_p) + (D_p * PD_p) \\
+ (HhO_p * CHO) + CInv * \left(\frac{Inv_p + Inv_{p-1}}{2} \right) + (PNS_p * CPNS) \\
\left. + (PS_p * CPS) + (Adt_p * CAdt) \right] \quad (1)
\end{aligned}$$

Fuente: Vélez H. Jorge E. Objetivo 1: Minimizar Z_1 (Costos de la logística inversa del polipropileno).

Dónde:

- p : Periodos de producción, p=1 ... P
- n : Centros de Acopio, n=1 ... N
- r : Ruta del transporte, r=1 ... R
- Trans_{rp} : Transporte por la ruta “r” hasta en el periodo p.
- CTrans : Costo del Transporte
- Alm_{np} : Almacenaje en el centro de acopio “n” en el periodo p.
- CAlm : Costo de Almacenaje.
- Pd_p : Producción realizada en el periodo p.
- CMP : Costo de Materia prima.
- Hh_p : Horas hombre Regular en el periodo p.
- CHR : Costo hora regular
- HE_p : Horas extras en el periodo p
- CHE : Costo horas extras
- C_p : Contrataciones en el periodo p
- PC_p : Costo del Perjuicio por las contrataciones en el periodo p
- D_p : Despidos en el periodo p
- PD_p : Costo del Perjuicio por los despidos en el periodo p
- HhO_p : Horas hombre ociosas en el periodo p

CHO	: Costo Hora hombre ociosa
Inv _p	: Inventario en bodegas en el periodo p
CInv	: Costo por inventario en bodegas
PNS _p	: Pedidos no satisfechos en el periodo p
CPNS	: Costo de los pedidos no satisfechos
PS _p	: Producción subcontratadas en el periodo p
CPS	: Costo por producción subcontratadas
Adt _p	: Aditivo usado en el periodo p
CAdt	: Costo aditivos

Fuente: Vélez H. Jorge E. Definición de variables objetivo 1.

4.2 Función objetivo 2: Índice de degradación a la procesabilidad - (pdi) del polipropileno reciclado

Para minimizar la degradación del PP reciclado representado matemáticamente como función objetivo, se tuvo en cuenta lo expuesto por Tochacek y Jancar (2012) en su estudio “Processing degradation index (PDI) – A quantitative measure of processing stability of polypropylene”, quienes determinaron a nivel de laboratorio el Índice de Degradación del Procesamiento (PDI por sus siglas en inglés) a partir de múltiples re-extrusiones a la resina virgen de homolímero y copolímero de etileno-propileno y midiendo el índice de fluidez o Melt Flow Rate (MFR por sus siglas en inglés) de cada re-extrusión, observaron que a medida que se incrementa el número de re-extrusiones, se incrementa el MFI como consecuencia de la degradación del material debido al sometimiento de trabajo y altas temperaturas propias de la extrusión.

Para el caso del polipropileno reciclado igualmente se hizo a nivel de laboratorio múltiples re-extrusiones con diferentes concentraciones del mismo paquete de aditivos antioxidantes o estabilizantes usados por Tochacek y Jancar (2012) a fin de observar el comportamiento del material.

El estudio se hizo en el laboratorio de una empresa dedicada a la fabricación de resina de polipropileno ubicada en la ciudad de Cartagena, empresa productora con más de 23 años de experiencia. Se utilizó dos muestras de polipropileno reciclado. Una muestra proveniente de los rellenos sanitarios (RSU) previamente separado, lavado y molido a tamaño de 1 a 2 mm, identificándose como muestra A y la otra muestra proveniente como desecho industrial de una empresa transformadora, previamente molido a tamaño de 1 a 2 mm e identificándose como muestra B.

Cada una de las muestras A y B se subdividieron en siete (7) muestras identificándose con el subíndice de 1 a 7. Cada una de las sub-muestras de A y B se le adicionó un nivel de la mezcla de aditivos antioxidante en concentraciones de 0 a 0,6 % con incrementos de 0,1% y a las cuales se les realizó seis (6) re-extrusiones, considerándose la primera re-extrusión como la extrusión cero (0), que para el caso del reciclador es indispensable realizar. Posterior a cada re-extrusión de cada sub-muestra se le midió el índice de fluidez o MFR de acuerdo a la norma ASTM D 1238 (2010) (método automático) tabulándose los resultados en la tabla 1 y 2.

Tabla 1 – Muestra A. Resultados de Índice de Fluidez

Sub-muestra	Nivel de mezcla Estabilizante %	MFR (dg/min.) después de cada extrusión a 260°C/600 rpm – husillo de 50 mm					
		Ext. 0	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3	Ext. 4	Ext. 5
A1	0.0	8.03	15.20	24.05	34.15	44.83	55.23
A2	0.1	6.51	11.34	17.10	24.85	31.25	38.64
A3	0.2	5.66	7.77	12.06	15.89	21.06	25.31
A4	0.3	4.70	6.50	8.75	11.20	14.08	17.41
A5	0.4	4.30	4.95	7.20	8.34	11.15	13.45
A6	0.5	4.10	4.77	5.02	5.50	6.04	6.82
A7	0.6	3.95	4.50	5.03	5.02	5.22	5.70

Autor: Vélez H. Jorge E. Muestra A. Resultados de Índice de Fluidez. Informe de la investigación.

Tabla 2 – Muestra B. Resultados de Índice de Fluidez

Sub-muestra	Nivel de mezcla Estabilizante %	MFR (dg/min.) después de cada extrusión a 260°C/600 rpm – husillo de 50 mm					
		Ext. 0	Ext. 1	Ext. 2	Ext. 3	Ext. 4	Ext. 5
B1	0.0	12.10	21.10	28.20	37.45	44.20	53.70
B2	0.1	11.12	16.45	22.40	28.53	34.55	40.56
B3	0.2	9.53	13.40	17.66	22.50	26.12	31.22
B4	0.3	8.41	10.71	14.54	16.70	19.20	22.63
B5	0.4	7.73	9.85	11.00	12.87	14.23	16.60
B6	0.5	6.63	7.88	8.01	8.43	9.70	10.75
B7	0.6	5.88	5.96	6.13	7.53	8.11	8.45

Autor: Vélez H. Jorge E. Muestra B. Resultados de Índice de Fluidez. Informe de la investigación.

Con los datos anterior reportados para cada una de las sub-muestras se calculó el índice de procesabilidad de acuerdo a la formula propuestas por Tochacek y Jancar (2012) tabulándose en las tablas 3.

Tabla 3 – Nivel de mezcla estabilizante vs. PDI.

Nivel de mezcla Estabilizante %	PDI Muestra A	PDI Muestra B
0.0	2.767	1.710
0.1	2.320	1.302
0.2	1.584	1.106
0.3	1.221	0.827
0.4	0.914	0.558
0.5	0.311	0.292
0.6	0.241	0.192

Autor: Vélez H. Jorge E. Nivel de mezcla estabilizante vs. PDI. Informe de la investigación.

Con la anterior información se realizó un análisis de regresión simple a fin de obtener un modelo lineal que describa la relación entre el PDI de cada una de las muestras A y B con la concentración de aditivo estabilizante.

Para efecto de establecer si existe una relación entre las variables del nivel de mezcla de aditivo estabilizante y el PDI de las muestras A y B, o en su defecto se consideran variables independientes, a continuación se describen las dos posibles hipótesis:

- Hipótesis Nula (H_0) :
Ho: El nivel de aditivo estabilizante y el PDI para las muestras A y B son independientes.
- Hipótesis Alternativa (H_a):
Ha: El nivel de aditivo estabilizante y el PDI para las muestras A y B están relacionados.

A fin de determinar el estadístico anterior se realiza el análisis de regresión simple utilizando el software estadístico StatGraphics Centurion XV Versión 15.2.06, obteniéndose el siguiente de resultados para la muestra A:

Resumen - Regresión Simple – PDI Mtra. A vs. Aditivo Estab

Variable dependiente: PDI_A (Muestra A)

Variable independiente: Aditivo_Estab (%)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficiente de Correlación = -0.9868

R-cuadrada = 97.37 %

Error estándar del est. = 0.1703

Error absoluto medio = 0.1304

Estadístico Durbin-Watson = 1.891 (P=0.2232)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.156

La ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre PDI Mtra A y la concentración de Aditivo_Estab. Es:

$$\text{PDI Mtra. A} = 2.651 - 4.381 * \text{Aditivo_Estab} \quad (\text{Ec. 1})$$

Ahora bien, en el análisis de varianza de la tabla 5 el modelo tiene un valor P de 0.0000 el cual es menor que 0.05 y con lo que se rechaza la hipótesis nula, demostrándose así la veracidad de la hipótesis alternativa, es decir, las variables Nivel de mezcla de aditivo estabilizante y el PDI de la Mtra. A están estrechamente relacionados, con un nivel de confianza del 95.0%.

Así mismo, en el modelo el intercepto con valor de 2.651 y la pendiente con valor de - 4.381 de la tabla 4, tienen un valor de 0.0000 y siendo igualmente menor que 0.05 y como ya lo habíamos dicho, se rechaza la hipótesis nula, demostrándose así la veracidad de la hipótesis alternativa, es decir, las variables Nivel de mezcla de aditivo estabilizante y el PDI de la Mtra. A están estrechamente relacionados, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrado obtenido en el análisis nos indica la proporción de variación para la variable PDI_A con un valor de 97.37% y el coeficiente de correlación es igual a - 0.9868, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables, es decir, que la relación que hay entre la variable nivel de mezcla de aditivos estabilizante y el PDI de la muestra A es muy estrecha de manera que refleja una línea recta.

La tabla 6. Muestra las mejores predicciones para los valores de PDI_A usando el modelo ajustado, así como también muestra los intervalos de previsión del 95% para las nuevas observaciones y los intervalos de confianza del 95% para la media de varias observaciones.

Tabla 4. Coeficientes PDI Mtra. A

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	2.651	0.1161	22.84	0.0000
Pendiente	-4.381	0.3219	-13.61	0.0000

Autor: Vélez H. Jorge E. Coeficientes PDI Mtra. A. Informe de la investigación.

Tabla 5. Análisis de Varianza PDI Mtra. A

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5.373	1	5.373	185.17	0.0000
Residuo	0.1451	5	0.02902		
Total (Corr.)	5.518	6			

Autor: Vélez H. Jorge E. Análisis de Varianza PDI Mtra. A. Informe de la investigación.

Tabla 6. Valores Predichos PDI Mtra. A

		95.00%		95.00%	
	Predicciones	Límite	Predicción	Límite	Confianza
X	Y	Inferior	Superior	Inferior	Superior
0.0	2.651071	2.121188	3.180955	2.352698	2.949445
0.6	0.02264286	-0.5072406	0.5525263	-0.2757305	0.3210163

Autor: Vélez H. Jorge E. Valores Predichos PDI Mtra. A. Informe de la investigación.

Por otro lado, igualmente se hizo el análisis de regresión simple para la muestra B obteniéndose los siguientes:

Resumen - Regresión Simple – PDI Mtra. B vs. Aditivo Estab

Variable dependiente: PDI_B (Muestra B)

Variable independiente: Aditivo_Estab (%)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficiente de Correlación = -0.992405

R-cuadrada = 98.48677 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.18412 %

Error estándar del est. = 0.0746108

Error absoluto medio = 0.05469388

Estadístico Durbin-Watson = 1.860865 (P=0.2096)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.2601677

La ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre PDI Mtra B y la concentración de Aditivo_Estab. Es:

$$PDI_B = 1.618357 - 2.543571 \cdot \text{Aditivo_Estab} \quad (\text{Ec. 2})$$

Ahora bien, en el análisis de varianza de la tabla 7 el modelo tiene un valor P de 0.0000 el cual es menor que 0.05 y con lo que se rechaza la hipótesis nula, demostrándose así la veracidad de la hipótesis alternativa, es decir, las variables Nivel de mezcla de aditivo estabilizante y el PDI de la Mtra. B están estrechamente relacionados, con un nivel de confianza del 95.0%.

Así mismo, el intercepto con un valor de 1.6183 y la pendiente con valor de -2.5435 de la tabla 7, tienen un valor de 0.0000 y siendo menor que 0.05, y como ya lo habíamos dicho, se rechaza la hipótesis nula, demostrándose así la veracidad de la hipótesis alternativa, es decir, las variables Nivel de mezcla de aditivo estabilizante y el PDI de la Mtra. B están estrechamente relacionados, con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada obtenido en el análisis nos indica la proporción de variación para la variable PDI_B con un valor de 98.48677% y el coeficiente de correlación es igual a -0.992305, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables, es decir, que la

relación que hay entre la variable nivel de mezcla de aditivos estabilizante y el PDI de la muestra B es muy estrecha de manera que refleja una línea recta.

La tabla 9. Muestra las mejores predicciones para los valores de PDI_B usando el modelo ajustado, así como también muestra los intervalos de previsión del 95% para las nuevas observaciones y los intervalos de confianza del 95% para la media de varias observaciones.

Los intervalos de predicción y de confianza corresponden a las cotas internas y externas en la gráfica del modelo ajustado.

Tabla 7. Coeficientes PDI Mtra. B

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	1.618357	0.05083869	31.83318	0.0000
Pendiente	-2.543571	0.1410012	-18.03937	0.0000

Autor: Vélez H. Jorge E. Coeficientes PDI Mtra. B. Informe de la investigación.

Tabla 8. Análisis de Varianza PDI Mtra. B

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.811532	1	1.811532	325.42	0.0000
Residuo	0.02783386	5	0.005566771		
Total (Corr.)	1.839365	6			

Autor: Vélez H. Jorge E. Análisis de Varianza PDI Mtra. B. Informe de la investigación.

Tabla 9. Valores Predichos PDI Mtra. B

		95.00%		95.00%	
	Predicciones	Límite	Predicción	Límite	Confianza
X	Y	Inferior	Superior	Inferior	Superior
0.0	1.618357	1.386272	1.850442	1.487672	1.749043
0.6	0.09221429	-0.1398708	0.3242994	-0.03847109	0.2228997

Autor: Vélez H. Jorge E. Valores Predichos PDI Mtra. B. Informe de la investigación.

Con el anterior análisis se puede concluir que el material de polipropileno reciclado proveniente de los rellenos sanitarios (RSU) Muestra A y el material de polipropileno reciclado provenientes de los desechos industriales provenientes de una empresa transformadora, Muestra B, tienen una relación lineal en el comportamiento del Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) calculado a las 6 re-extrusiones y el nivel de aditivo estabilizante, con la diferencia que la pendiente obtenida del modelo lineal ajustado es mayor para la muestra provenientes de los rellenos sanitarios (RSU), comparado con la pendientes del modelo lineal ajustado para la muestra provenientes de los residuos industriales de una empresa transformadora, como se muestra en figura 2.

Lo anterior explica que el material proveniente de los RSU inicia el proceso de reciclaje con una mayor degradación causado por la oxidación térmica, la foto-degradación causada por la exposición a los rayos ultravioleta generados por el sol y a la acción de microbios propio de los rellenos sanitarios (Grisa y Zeni, 2010).

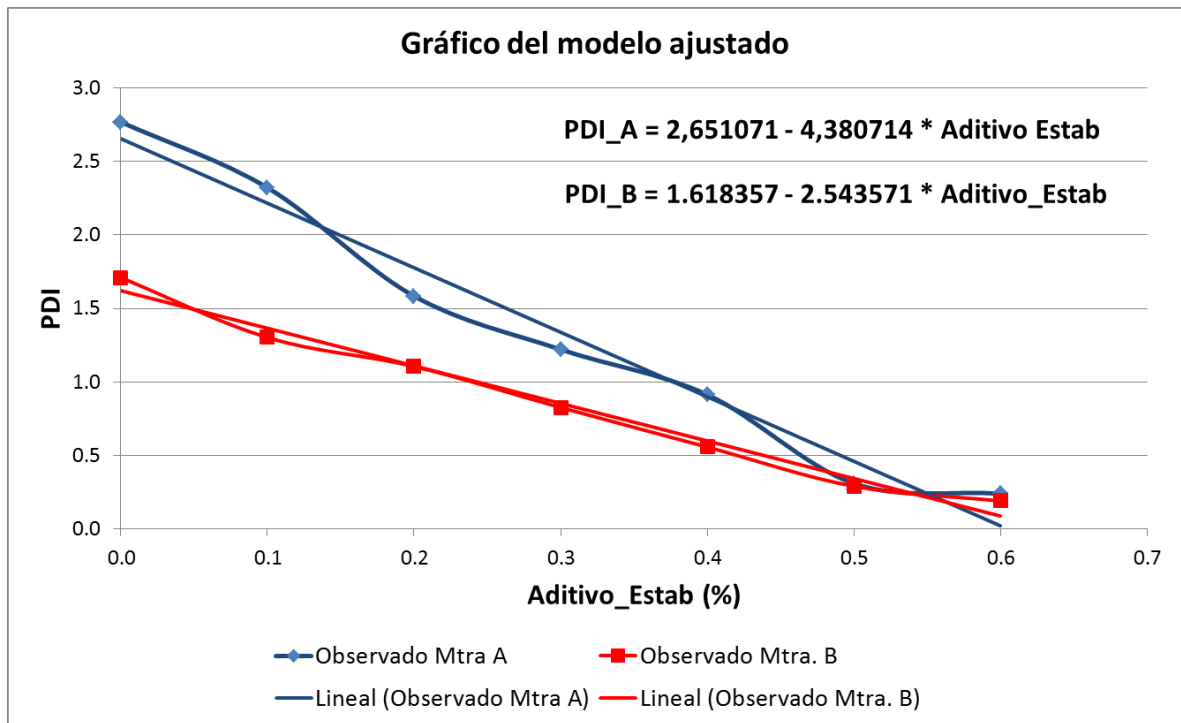


Figura 3. Gráfico del modelo ajustado Mtra. A y B

Autor: Vélez H. Jorge E. Gráfico del modelo ajustado Mtra. A y B. Informe de la investigación.

Obtenido las ecuaciones de las muestras A y B del modelo ajustado se plantea de manera general la siguiente ecuación como función objetivo de la siguiente forma:

Función Objetivo 2: Minimizar Z_2 (Índice de Degradación a la Procesabilidad – PDI)

$$Min Z_2 = \sum_{p=1}^P (PDI_0 + m * Adt_p) \quad (2)$$

Fuente: Vélez H. Jorge E. Objetivo 2: Minimizar Z_2 (Índice de Degradación a la Procesabilidad – PDI).

Dónde:

PDI_0 : Índice de Degradación a la Procesabilidad al inicio del proceso de reciclaje

m : Pendiente de la línea obtenida en la relación del PDI y el Adt

Adt_p : Concentración de aditivo estabilizante adicionada en el periodo.

Fuente: Vélez H. Jorge E. Definición de variables objetivo 2.

Como un aporte para su uso, se tabula la concentración de aditivo en aumentos de 0,05% usado tanto para el polipropileno reciclado proveniente de los RSU como de los desechos industriales y el nivel de degradación calculado a obtener.

Tabla 10. Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) en el Polipropileno Reciclado

Item	Concentración Aditivo Estab. (%)	PDI Reciclaje del PP Desechos RSU	PDI Reciclaje del PP Desechos Industriales
1	0.05	2.43	1.49
2	0.10	2.21	1.36
3	0.15	1.99	1.24
4	0.20	1.77	1.11
5	0.25	1.56	0.98
6	0.30	1.34	0.86
7	0.35	1.12	0.73
8	0.40	0.90	0.60
9	0.45	0.68	0.47
10	0.50	0.46	0.35
11	0.55	0.24	0.22
12	0.60	0.02	0.09

Autor: Vélez H. Jorge E. Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) en el Polipropileno Reciclado. Informe de la investigación.

Con la anterior tabla podría estimarse el nivel de degradación con el que quedaría el material de polipropileno reciclado, teniéndose en cuenta su procedencia, una vez haya sido procesado para su recuperación y prediciéndose así el nivel de degradación final de acuerdo al nivel de concentración de aditivo estabilizante usado.

5 - RESOLUCIÓN DEL MODELO

5.1 Introducción

Los modelos de programación lineal revisada en la bibliografía son muy diversos, sin embargo todos ellos tienen enfoques característicos similares. Dichos enfoques fueron utilizados para el planteamiento y desarrollo del modelo bajo análisis multiobjetivo y tienen como estructura general una “función objetivo” que sin importar el grado de complejidad persiguen minimizar o maximizar problemas de diseños de red de suministros directo e inverso con “restricciones básicas” que son necesarias para hacer que sea factible el modelo y “extensiones del modelo” los cuales se presentan como restricciones específicos de cualquier tipo para el modelo propuesto.

En el presente capítulo se presenta la propuesta de la estructura general para el modelo de programación multi-objetivo para la logística inversa del sector plástico de polipropileno buscando optimizar aquellos factores más relevantes que influyen a lo largo de toda la cadena del proceso, incluyendo sus restricciones e implementándose en un caso de estudio en una empresa de la zona industrial Mamonal de la ciudad de Cartagena que se dedica al procesamiento y comercialización de plásticos reciclados incluyendo el polipropileno.

5.2 Estructura general del modelo de programación lineal multi-objetivo

Como se comentó en el capítulo anterior, los dos objetivos más relevantes son los “costos de la logística inversa del polipropileno” y el “Índice de degradación a la procesabilidad del polipropileno”, siendo este último expresado como factor relevante para la calidad del polipropileno reciclado.

Por lo anterior, como propuesta para lograr la optimización de la logística inversa del plástico de polipropileno a través del proceso de reciclaje se propone el siguiente modelo de programación lineal a seguir:

Función Objetivo 1: Minimizar Z_1 (Costos de la logística inversa del polipropileno)

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = \sum_{p=1}^P \left[\left(\sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R (\text{Trans}_{rp} * C\text{Trans}) + (\text{Alm}_{np} * C\text{Alm}) \right) + (\text{Pd}_p * C\text{MP}) \right. \\
 + (\text{HhR}_p * C\text{HhR}) + (\text{HE}_p * C\text{HE}) + (C_p * PC_p) + (D_p * PD_p) \\
 + (\text{HhO}_p * C\text{HO}) + C\text{Inv} * \left(\frac{\text{Inv}_p + \text{Inv}_{p-1}}{2} \right) + (\text{PNS}_p * C\text{PNS}) \\
 \left. + (\text{PS}_p * C\text{PS}) + (\text{Adt}_p * C\text{Adt}) \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

Función Objetivo 2: Minimizar Z_2 (Índice de Degradación a la Procesabilidad – PDI)

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{p=1}^P (\text{PDI}_{0p} + m * \text{Adc}_p) \quad p = 1 \dots P \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

Restricciones de producción:

$$(\text{Dm}_p + \text{Inv}_p + \text{Inv}_{p-1}) \leq (\text{Pd}_p) \leq (C\text{pd}_p) \quad p = 1 \dots P \quad (5)$$

- Restricción de mano de obra u horas hombre:

$$\text{Hh}_p \leq M\text{Hh} \quad p = 1 \dots P \quad (6)$$

- Restricción de contrataciones despidos:

$$C_p \leq M\text{C} \quad p = 1 \dots P \quad (7)$$

$$D_p \leq M\text{D} \quad p = 1 \dots P \quad (8)$$

- Restricción de horas extras y ociosas de los trabajadores:

$$HE_p \leq X\% * HhR \quad p = 1 \dots P \quad (9)$$

$$HhO_p \leq HhR_p \quad p = 1 \dots P \quad (10)$$

- Restricción de inventarios en las bodegas:

$$Inv_p \leq MInv \quad p = 1 \dots P \quad (11)$$

- Restricción de la producción no entregada a tiempo (perjuicio por insatisfacción por los retrasos:

$$PNS_p \leq Dm_p \quad p = 1 \dots P \quad (12)$$

- Restricción de la producción subcontratada en empresa externa:

$$PS_p \leq CPS \quad p = 1 \dots P \quad (13)$$

- Restricción de la concentración de aditivo estabilizante agregado:

$$0,05\% \leq Adc_p \leq 0,6\% \quad p = 1 \dots P \quad (14)$$

- Restricción de la pendiente m en la ecuación 12:

$$- 4.4 \leq m \leq -2.5 \quad p = 1 \dots P \quad (15)$$

- Restricciones de valores no negativos:

$$Inv_p, HhR_p, C_p, D_p, HE_p, HhO_p, Inv_p, PNS_p, PS_p, Adt_p \geq 0 \quad p = 1 \dots P \quad (16)$$

Índices

- p : Conjunto de periodos ($p = 1 \dots P$)
 r : Conjunto de rutas ($r = 1 \dots R$)
 n ; Conjunto de centros de acopios ($n = 1 \dots N$)

Variables de decisión

- $Trans_{rp}$: Transporte por la ruta “r” hasta en el periodo.
 Alm_{np} : Almacenaje en el centro de acopio “n” en el periodo.
 Pd_p : Producción en el periodo
 HhR_p : Horas hombre mínimos determinados en la nómina en el periodo p
 C_p : Contrataciones en el periodo p
 D_p : Despidos en el periodo p
 HE_p : Horas Extras de los trabajadores en el periodo p
 HO_p : Horas Ociosas de los trabajadores en el periodo p
 Inv_p : Inventario en el periodo p
 PNS_p : Producción no satisfecha en el periodo p
 PSp : Producción subcontratada en el periodo p
 Adt_p : Aditivo Estabilizante consumido en el periodo p

Índice de Costos

- C_{Trans} : Costo del Transporte
 CA_{lm} : Costo de Almacenaje.
 CMP : Costo de Materia Prima
 CHR : Costos de Hora hombre regular de los trabajadores
 PC_p : Costo del perjuicio por contrataciones de los trabajadores
 PD_p : Costo del perjuicio por los despidos de los trabajadores
 CHE : Costo Horas extras de los trabajadores

CHO : Costo Hora hombre Ociosa de los trabajadores
CInv : Costo de inventario retenido en las bodegas
CPNS : Costo de la Producción No Satisfecha
CPS : Costo de la Producción Subcontratada.
CAdt : Costo del Aditivo Estabilizante.

Otros Datos

HRp : Hora laboral regular en el periodo
MHh : Máximo de trabajadores establecidos por política por la empresa
MC : Máximo contrataciones de trabajadores establecidos por políticas de la empresa.
MD : Máximo despidos de trabajadores establecidos por políticas de la empresa.
X%HR: Porcentaje máximo de horas extras establecidos por ley.
MInv : Máximo inventario permitido ya sea por capacidad o por política
Dm_p : Demanda en el periodo
PDI_{0p} : Índice de degradación a la procesabilidad del polipropileno a reciclar al inicio del periodo
m : Pendiente de la línea obtenida en la relación del PDI y el Adt
Cpd : Capacidad de la producción

Fuente: Vélez H. Jorge E. Modelo de programación lineal. Objetivo 1 – Objetivo 2 – Restricciones.

6 - ESTUDIO DE UN CASO DE APLICACIÓN

Como resultado del capítulo 3, se obtuvo los datos experimentales necesarios para llevar a cabo el método de optimización propuesto. A continuación, este método fue aplicado a un caso de estudio concreto, para observar su eficacia y analizar los resultados obtenidos.

El caso de estudio fue implementado en una empresa dedicada, entre otras líneas de producción, al procesamiento y comercialización de material plástico reciclados entre los que está incluido el polipropileno, ubicada en la zona industrial Mamonal de la ciudad de Cartagena, la cual llamaremos “Reciclaje Anónimo”¹.

La empresa “Reciclaje Anónimo” se aprovisiona de plástico de polipropileno para reciclar de las dos fuentes descritas en el capítulo 2: de los residuos sólidos urbanos (RSU) y de los residuos industriales.

Para desarrollar el caso de estudio en la empresa “Reciclaje Anónimo” se realiza inicialmente una breve descripción del proceso usado, los equipos utilizados y la planeación realizada por el administrador para un programa de producción desarrollado en los periodos mensuales de mayo a octubre (seis periodos) del año 2012, indicándose los costos de producción obtenidos en dicha planeación e incluyéndose la cantidad de aditivo estabilizante usado por el administrador para garantizar la calidad del polipropileno reciclado.

6.1 Descripción del proceso y equipos usados

La empresa Reciclaje Anónimo se compone de dos líneas de producción: La “Línea 1” en la cual fabrican cubiertos desechables y otros artículos a partir de polipropileno virgen y la “Línea 2” en la cual procesan el reciclaje plástico de polipropileno entre otros a partir de los RSU y de los Residuos Industriales.

¹ Nombre cambiado por solicitud del gerente, dueño de la empresa.

Cuando el producto a recuperar proviene de los RSU, los costos del transporte y del almacenaje en los centros de acopio son incluidos en los costos del producto y para nuestro caso específicos estos casos se consideran constantes debido a que solo existe una sola ruta desde los rellenos sanitarios de Cartagena hasta el centros de acopio, del cual solo también existe uno, y hasta la empresa “Reciclaje Anónimo”, de manera que para efecto de este ejercicio, esta variable se descarta dado que está incluido en el costo del producto como costo de material prima.

La línea 2, nuestra Línea de interés, inicia su proceso con el recibo del polipropileno para reciclar de los RSU, donde la empresa recibe el plástico de polipropileno previamente separado de los otros plásticos y partículas contaminante, lavado y molido en tamaño de 5 a 10 mm, es decir, listo para ser mezclado con el aditivo estabilizante y posterior peletizado.

Por otro lado, también recibe el plástico de polipropileno para reciclar proveniente de los Desechos Industriales, éstos llegan ya separados o libres de contaminantes de otros plásticos, en grandes trozos llamado “Torta”, los cuales deben ser molidos a tamaños de 5 a 10 mm y lavados en algunos casos, para luego ser mezclado con el aditivo estabilizante y posterior peletizado. Esta última fuente de suministro es la que abastece la mayor parte para el proceso de producción de reciclaje a la empresa, un 70% a 80% de la capacidad total de la línea 2. Los costos de transporte y de almacenaje en los centros de acopio para este caso, también está incluido dentro de los costos del producto debido a que la zona industrial de la ciudad de Cartagena, donde comúnmente se comercializan los plásticos post-consumo, solo existe una ruta y los punto de acopio son la industria que genera el scras y la empresa “Reciclaje Anónimo”.

La empresa Reciclaje Anónimo, en la Línea 2 posee los siguientes equipos:

- Un alberca de 4 m³ de capacidad, con sistema de flujo de agua recirculante usado para el lavado de producto plástico y capacidad de proceso aproximado de 200 Kg/hr.

- Un equipo de secado centrifugado de 20 HP y capacidad de proceso aproximado de 250 Kg/hr.
- Un molino de 60 HP, 1800 rpm y capacidad de proceso de 250 Kg/hr aproximadamente.
- Un mezclador tipo aspas de 5 HP y capacidad de proceso aproximado de 200 Kg/hr.
- Una extrusora mono husillo de 100 mm de diámetro, cabezal o dado de 24 hilos con sistema de corte y enfriamiento con agua tipo cerrado, motor de 60 HP y capacidad de proceso aproximado de 150 Kg/hr.
- Un sistema de empaque manual tipo embudo, báscula digital con capacidad de pesaje de 100 Kg., bolsa para empaque de rafia plástica y sistema de cierre cosido con máquina manualmente.

6.2 Programa de producción desarrollado por el administrador

En el año 2012 el gerente administrador de la empresa desarrolló el programa de producción para seis (6) períodos basado en su experiencia, es decir, sin la certeza que el plan elaborado es el óptimo.

El administrador desarrolló el plan de producción para los seis meses comprendidos de mayo a octubre del 2012, con base a la demanda pronosticada descritos en la tabla 10 y con los siguientes recursos y políticas de decisión de empresa: seis (6) operarios, con un stock al inicio de 7 Tn, tratando de mantener un stock mínimo de 10 Tn por periodo y con una cantidad de aditivo estabilizante agregada de uno por ciento (1%) del polipropileno procesado para todos los periodos.

Los datos suministrados por el administrador a tener en cuenta y usados en la planeación se relacionan en la tabla 11:

Tabla 11 Información de la demanda en el periodo

Detalle	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct
Días Lab.	25	24	24	25	25	26
Hrs Lab.	200	192	192	200	200	208
Demanda (Tn)	40	37	45	27	30	30
Aditivo Estab. (1%) (Tn)	0.030	0.030	0.025	0.030	0.030	0.027

Autor: Vélez H. Jorge E. Información de la demanda en el periodo. Informe de la investigación.

Tabla 12. Información de costos

Detalle	Valor
Costo de un Trab. (Incluy. Prest)	\$ 919,620,00 /Mes
Costo Directos	\$ 825,000.00 /Tn
Costo Aditivo Estabilizante	\$ 10,608,000.00/Tn
Costo por Mantener Inventarios	\$ 10,000.00/Tn/mes
Costo Marginal del Desabasto	\$ 9,000.00/Tn
Costo de Contratación	\$ 7,000.00/Trab
Costo de Despidos	\$ 3,000.00/Trab
Costo del Tiempo Regular	\$ 3,125.00/hr
Costo del Tiempo Extra	\$ 3,906.25/hr
Capacidad Máxima del Proceso	0.17 Tn/hr
Inventario Inicial	7/Tn
Inventario mínimo requerido (stock)	10/Tn
Número de operarios	6

Autor: Vélez H. Jorge E. Información de costos. Informe de la investigación.

Teniendo en cuenta las políticas de la administración, el plan fue elaborado bajo la primicia que el plástico a reciclar es proveniente de los Desechos Industriales, el número de trabajadores es constante, es decir, no se hacen contrataciones ni despidos, no se debe subcontratar la producción con empresas externas a menos que la demanda en el periodo sea el doble de la capacidad del proceso y las fluctuaciones de la demanda deben ser absorbidas con horas extras, trabajos en días de descanso y si es el caso que la demanda sea mayor a 50% y menor que el 100% de la capacidad, entonces se implementa jornada laboral por turnos de 12 horas, es decir, 2 turnos de 12 horas por día respectivamente. En todos los casos dentro de lo establecido por ley.

Así mismo, por políticas de la empresa la producción se realizó a su máxima capacidad para los seis periodos, de manera que se prefirió tener tiempo ocioso de los trabajadores, al cumplirse la programación requerida al final de lo programado, antes que correr el riesgo de tener un retraso en las entregas.

A continuación en la tabla 13 se relaciona un resumen entregado del plan realizado por el administrador en donde finalmente obtuvo los costos de la planeación de la producción.

Tabla 13. Resumen del plan de producción realizado.

Detalle	Total
Días Lab.	149
Hrs Lab.	1192
Demanda requerida (Tn)	209
Aditivos Estab. Consumido (1%) (Tn)	2.09
Horas Extras realizadas	273.3
Costo Materia Prima	\$ 174,900,000
Costo Horas hombre Regular	\$ 25,827,798
Costo Hrs. Extras	\$ 7,854,130
Costo Aditivo Estabilizante	\$ 26,424,528
Total:	\$ 235,006,456

Autor: Vélez H. Jorge E. Resumen del plan de producción realizado. Informe de la investigación.

Es evidente que este plan, a pesar de ser factible, no se puede establecer si es óptimo ya que es el único plan establecido por el administrados y como respuesta a políticas de la empresa, al producir a una tasa diaria constante colocada a la máxima establecida por el proceso incluyendo las horas extras (independientemente que la demanda del periodo sea mayor o menor), el administrador obtuvo un nivel de stocks aceptable, a pesar que de acuerdo a lo comentado por el administrador, en el tercer periodo se generó un retraso en la entrega de cuatro toneladas, pero que no contabilizó como costos de perjuicio debido a que fue acordado previa conversación con el cliente final.

Por otro lado, al tener establecido como medida de seguridad para la calidad del polipropileno reciclado, tener un factor constante la adición de aditivo estabilizante de 1% del peso del material procesado, conlleva a unos costos elevados e innecesarios si se tiene en cuenta lo expuesto anteriormente ... véase el numeral 3.2 ...

6.3 Programa de producción utilizando el modelo propuesto

La logística inversa de la cadena de suministro del polipropileno utilizando el modelo propuesto para el caso específico de este ejercicio, inicia con la recogida de los desechos industriales y transportándolos hasta la empresa “Reciclaje Anónimo” haciendo constante los costos de transportes y almacenamiento ya que no existe empresa intermedia o centro de acopio intermedio o diferentes rutas a escoger para su transporte. Este material es llevado directamente desde la empresa que genera el Scras hasta la empresa Reciclaje Anónimo.

Antes de poner a prueba el modelo propuesto primero hay que tener en cuenta que ningún modelo continuo de análisis multiobjetivo como el planteado, por su juicio, tienen el evento de generar una solución “óptima” en el sentido usual de optimalidad. Los métodos continuos de análisis multiobjetivo generan la facilidad de encontrar un conjunto de alternativas consideradas como aceptadas, de las cuales, de manera intuitiva o sea utilizando métodos discretos de análisis multiobjetivo, se jerarquizan o escalafonan, siendo la alternativa posicionada en el primer lugar, la más conveniente para su implementación. De manera que el proceder para solucionar los problemas continuos de análisis multiobjetivo es el siguiente:

Creación del modelo continuo: Esto incluye la definición de variables de decisión, parámetros, funciones objetivo y restricciones.

Creación del conjunto de soluciones no dominadas: Este consiste en el seguimiento de alternativas satisfactorias para el administrador dentro del espacio factible de soluciones. Esto se realiza mediante un método continuo de análisis multiobjetivo.

Escalonar las Alternativas no dominadas: Consiste en realizar un ordenamiento descendente teniendo en cuenta el beneficio global de la alternativa. Esto se logra mediante los métodos discretos de análisis multiobjetivo.

El modelo propuesto fue implementado en la empresa Reciclaje Anónimo para el análisis de las operaciones logísticas de los seis periodo antes descritos, con el fin de demostrar la utilidad del análisis multiobjetivo, “Costos de Producción” e “Índice de Degradación a la Procesabilidad” y su diferenciación de los métodos tradicionales para el recuperado de plásticos de polipropileno como el usado actualmente en dicha empresa que, de acuerdo a lo manifestado por el administrador actualmente, genera aparentemente resultados aceptables.

6.3.1 Peso de los Objetivos

El gerente administrador de la empresa, como decisor en este caso, divulgó su escala de preferencias de dichos objetivos planteando el peso para cada uno de ello, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Peso de los objetivos

Objetivo	Peso
Costo de Producción	70
PDI	50

Autor: Vélez H. Jorge E. Peso de los objetivos. Informe de la investigación.

6.3.2 Restricciones

En la tabla 15 se muestran los parámetros de las restricciones por políticas incluidas en el modelo.

Tabla 15. Restricciones por políticas de la planeación

Restricción	Valor
Porcentaje máximo de horas extras (X%)	25%
Inventario mínimo (Inv_p)	10
Contratación máxima	0
Despido máximo	0
Producción en turnos	$1.5*Capacidad < Demanda < 2*Capacidad$
Máximo subcontratación	$2*Capacidad < Demanda$
Cantidad de aditivo Estabilizante agregado	$0,05\% < Adt_p < 0,60\%$

Autor: Vélez H. Jorge E. Restricciones por políticas de la planeación. Informe de la investigación.

Estas restricciones son determinadas por el gerente administrador de la empresa o por políticas de la empresa. Para el caso, de la primera restricción es establecida por ley, la segunda restricción es establecida por espacio en las bodegas y la cuarta, quinta y sexta, son políticas de empresa y resultados de este estudio.

6.3.3 Parámetros constantes

Teniendo en cuenta los parámetros constantes de la tabla 1, se delimita el modelo continuo para el problema específico y se elige el método continuo de análisis multiobjetivo para la obtención del conjunto de soluciones no dominadas. El método elegido fue el “Método de las Restricciones”, tomando como referencia al objetivo “Costos de Producción”. El objetivo “Índice de Degradación a la Procesabilidad” se incorpora, al igual que los demás objetivos si los hubiere, como restricciones en el objetivo tomado como referencia. Al variar los parámetros de los límites de esas restricciones se genera el espacio de soluciones no dominadas (Smith, Correa y Aristizabal, 2000).

6.3.4 Formulación y Tabulación de los Datos

Luego de revisar toda la información necesaria en el modelo matemático propuesto, llevando los costos de transporte y almacenamiento a cero (0) dado que están incluidos en los costos del producto como materia prima, y reemplazando cada uno de los parámetros constantes y las restricciones dadas, queda finalmente la ecuación 16 de la siguiente manera...

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & \sum_{p=1}^6 \left[((Pd_1 + Pd_2 + Pd_3 + Pd_4 + Pd_5 + Pd_6) * \$825.000,00) \right. \\
 & + ((HhR_1 + HhR_2 + HhR_3 + HhR_4 + HhR_5 + HhR_6) * \$3.871,75 * 6) \\
 & + ((HE_1 + HE_2 + HE_3 + HE_4 + HE_5 + HE_6) * \$4.789,69 * 6) \\
 & + ((C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6) * \$7.000,00) \\
 & + ((D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6) * \$3.000,00) \\
 & + ((HhO_1 + HhO_2 + HhO_3 + HhO_4 + HhO_5 + HhO_6) * \$2.000,00 * 6) \\
 & + \left(\frac{(Inv_1 + Inv_0) + (Inv_2 + Inv_1) + (Inv_3 + Inv_2) + (Inv_4 + Inv_3) + (Inv_5 + Inv_4) + (Inv_6 + Inv_5)}{2} \right) \\
 & * 10.000,00 + ((PNS_1 + PNS_2 + PNS_3 + PNS_4 + PNS_5 + PNS_6) * \$9.000,00) \\
 & + ((PS_1 + PS_2 + PS_3 + PS_4 + PS_5 + PS_6) * \$1.000.000,00) \\
 & + ((Adt_1 + Adt_2 + Adt_3 + Adt_4 + Adt_5 + Adt_6) \\
 & * \$10.608.000,00) \left. \right] \quad (17)
 \end{aligned}$$

Sujeto a:

- Restricción de la producción en el periodo:

La producción en el periodo debe satisfacer la demanda más el inventario en el periodo, pero no debe exceder la capacidad de proceso de producción.

$$(Dm_p + Inv_p + Inv_{p-1}) \leq (Pd_p) \leq (Cpd_p) \quad p = 1 \dots P \quad (18)$$

- Restricción de Horas hombre regular:

Las horas hombre regular deben ser las necesarias para satisfacer la demanda, pero inferior o igual que lo establecido por ley en Colombia (48 hrs semanales)

$$0 \leq HhR_p \leq MHh_p \quad p = 1 \dots P \quad (19)$$

- Restricción de Horas Extras:

Las horas extras deben ser las necesarias para satisfacer la demanda, pero inferior o igual que lo establecido por ley en Colombia (12 horas semanales)

$$0 \leq HE_p \leq MHE_p \quad p = 1 \dots P \quad (20)$$

- Restricción de las Contrataciones:

Dado que por políticas o decisión tomada por el administrador, las contrataciones para este caso en particular debe ser igual a cero, es decir, no se deben dar contrataciones.

$$C_p = 0 \quad p = 1 \dots P \quad (21)$$

- Restricción de los Despidos:

Dado que por políticas o decisión tomada por el administrador, los despidos para este caso en particular debe ser igual a cero, es decir, no se deben dar despido de personal.

$$D_p = 0 \quad p = 1 \dots P \quad (22)$$

- Restricción de Horas hombre Ociosas:

La horas hombre ociosas deben ser mayor o igual a cero (0) y menor o igual que la capacidad máxima de horas hombre regular

$$0 \leq HO_p \leq MHhR_p \quad p = 1 \dots P \quad (23)$$

- Restricción de Inventario al final del periodo:

El inventario para este caso en particular y de acuerdo a lo establecido por el administrador, debe ser mínimo 10 Tn, sin embargo, es probable que para algunos periodos no se pueda cumplir debido a la demanda requerida y la capacidad del proceso productivo.

Por la anterior razón y para efecto de este ejercicio, la restricción de la demanda se coloca como mayor o igual cero (0).

$$0 \leq Inv_p \quad p = 1 \dots P \quad (24)$$

- Restricción de la producción no satisfecha en el periodo:

La producción no satisfecha debe ser mayor o igual que cero (0) y menor o igual que la demanda en el periodo.

$$0 \leq PNS_p \leq Dm_p \quad p = 1 \dots P \quad (25)$$

- Restricción de la producción subcontratada en el periodo:

La producción subcontratada en el periodo es igual que cero (0) para el caso que la demanda sea menor o igual que el doble de la capacidad de producción, pero si la demanda es mayor que el doble de la capacidad de producción, entonces la producción subcontratada será mayor que cero (0). Para el caso particular de este ejercicio y dado que la demanda nunca es superior que el doble que la capacidad de producción, la producción subcontratada siempre será igual a cero, sin embargo, como restricción se coloca mayor o igual a cero.

$$0 \leq PS_p \quad p = 1 \dots P \quad (26)$$

- Restricción del Aditivo Estabilizante usado en la producción en el periodo:

Para el caso de este ejercicio en particular dado que el plástico de polipropileno a recuperar proviene de los desechos industriales, la concentración de aditivo debe ser mayor o igual que 0,05% y menor o igual que 0,6%

$$0,05\% \leq Adt_p \leq 0,6\%$$

$$p = 1 \dots P \quad (26)$$

Formulado los datos constantes, las variables de decisión, y sus restricciones, se establecen los datos de entrada relacionados en la tabla 15 y tabla 16, los cual son llevados a una hoja de cálculo de Microsoft Excel versión 2010, donde se agrupan y ordenan claramente para su comprensión, lo siguiente cuadros de datos (ver archivo anexo como parte fundamental de este trabajo):

- Datos de Entrada - Costos (Tabla 15)
- Otros Datos de entradas (Inv. Ini., Operarios, Cap. de Proceso, Etc.) (Tabla 16)
- Demanda Requerida y Capacidad del Proceso. (Tabla 17)
- Restricciones (Tabla 18)
- Variables de Decisión (Tabla 19)

Obtenida y organizada toda la información en la hoja de Excel (archivo anexo como parte de este trabajo), se utilizó la herramienta de análisis Solver para Excel de Microsoft en donde se establece la celda objetivo, las variables de decisión, las restricciones y después de ejecutado el programa, en la función objetivo se obtiene un mínimo valor total para la producción de **\$ 205.405.630**,

Tabla 16. Datos de entrada – Costos

Costo de un Trab. (Incluy. Prest) (\$/Mes):	\$ 919,620
Costos Materia Prima (\$/Tn):	\$ 825,000
Costo del Perjuicio por Contrataciones (\$/Trb):	\$ 7,000
Costo del Perjuicio por Despidos (\$/Trb):	\$ 3,000
<i>Costo por hora Ociosa (\$/Hr-Trb)</i>	\$ 2,000
<i>Costo de Inventario (\$/Tn-Mes)</i>	\$ 10,000

<i>Costo de la Producción No Satisfecha (\$/Tn)</i>	\$ 9,000
<i>Costo de la Producción Subcontratada (\$/Tn)</i>	\$ 1,100,000
<i>Costo de Aditivo Estabilizante (\$/Tn)</i>	\$10,608,000

Autor: Vélez H. Jorge E. Datos de entrada – Costos. Informe de la investigación.

Tabla 17. Otros datos de entrada

Horas laborales por Día:	8
Inventario Inicial en el Periodo 1 (Tn):	7
Inventario Mínimo al final del Periodo (Tn):	10
Total a Producir en todos los periodos:	212
Capacidad del Proceso (Tn/hr):	0.17
Número de trabajadores requeridos:	6
Contra. Adicionales por Turnos en el periodo:	0
Despidos en el periodo:	0
Producción Subcontratada en el periodo:	0

Autor: Vélez H. Jorge E. Otros datos de entrada. Informe de la investigación.

Tabla 18. Demanda Requerida y Capacidad del Proceso

Detalle	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct
Demanda requerida (Tn)	40	37	45	27	30	30
Demanda de Índice de Degradación (Cencent. Adtv.) (%)	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%	0.05%
Días Hábiles Laboral en el Periodo (Días)	25	24	24	25	25	26
Hrs Lab. en el periodo (Hr)	200	192	192	200	200	208
Hrs. Extras Máx. en el periodo (Hr)	50	48	48	50	50	52
Capacidad de Producción en Hr Regular (Tn)	34.00	32.64	32.64	34.00	34.00	35.36

Capacidad de Producción en Hr Extra (Tn)	8.50	8.16	8.16	8.50	8.50	8.84
Capacidad Total de la Producción (Tn)	42.50	40.80	40.80	42.50	42.50	44.20

Autor: Vélez H. Jorge E. Demanda Requerida y Capacidad del Proceso. Informe de la investigación.

Tabla 19. Restricciones

Detalle		May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct
<i>Restricción de la producción</i>	<i>Mín.</i>	42.50	37.00	40.80	27.00	30.00	30.00
	<i>Máx.</i>	42.50	40.80	40.80	42.50	42.50	44.20
<i>Restricción Hrs Hombre Regular en el Periodo</i>	<i>Mín.</i>	200	192	192	159	176	176
	<i>Máx.</i>	200	192	192	200	200	208
<i>Restricción Hrs Hombre Extras en el Periodo</i>	<i>Mín.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<i>Máx.</i>	50	48	48	50	50	52
<i>Restricción Contrataciones en el periodo</i>	<i>Mín.</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Restricción Despidos en el Periodo</i>	<i>Mín.</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>Máx.</i>	6	6	6	6	6	6
<i>Restricción Producción No Satisfecha en el Periodo</i>	<i>Mín.</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>Máx.</i>	40	37	45	27	30	30
<i>Restricción Prod. Subcontratada en el Periodo</i>	<i>Mín.</i>	0	0	0	0	0	0

Autor: Vélez H. Jorge E. Restricciones. Informe de la investigación.

Tabla 20. Variables de Decisión

Detalle		May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct
Producción Fabricada en Hora Regular (Tn)	PdR _p	34.0	32.6	32.6	31.7	30.0	30.0
Producción Fabricada en Hora Extra (Tn)	PdE _p	8.5	4.4	8.2	0.0	0.0	0.0
Producción fabricada en el Periodo (Tn)	Pd _p	42.5	37.0	40.8	31.7	30.0	30.0
Material Despachos (Tn)		40.0	37.0	45.0	27.0	30.0	30.0
Inv. al final de Periodo (Tn)	Inv _p	9.5	9.5	5.3	10.0	10.0	10.0
Horas hombre Ociosas en el periodo (Hr)	HhO _p	0.0	0.0	0.0	13.5	23.5	31.5
Horas Hombre Regular en el periodo (Hr)	HhRp	200	192	192	186	176	176
Horas Extras en el periodo (Hr)	HE _p	50	26	48	0	0	0
Contrataciones en el Periodo (Und)	C _p	0	0	0	0	0	0
Despidos en el Periodo (Und)	D _p	0	0	0	0	0	0
Producción No Satisfecha en el periodo (Tn)	PNS _p	0	0	0	0	0	0
Producción Subcontratada en el periodo (Tn)	PSP	0	0	0	0	0	0

Autor: Vélez H. Jorge E. Variables de Decisión. Informe de la investigación.

Cada una de las tablas fue obtenida del archivo en Excel donde se tabularon para luego ejecutar el Solver y generando los resultados antes mencionados.

El archivo de Excel “Ejercicio del Trabajo 2.xlsm” hace parte del presente trabajo, así como también las Instrucciones de uso anexo del archivo de Excel los cuales está anexo a este trabajo.

7 - ANALISIS DE RESULTADOS

7.1 Análisis de la caracterización del sistema de logística inversa del sector plástico de polipropileno

Para analizar las variables a incluir en el diseño de la red logística inversa del sector plástico de Polipropileno y sus relaciones estructurales, se logró identificando claramente cada uno de los órganos que interfieren a lo largo de la cadena de suministro, detallándose muy brevemente la industria del plástico, las tecnologías del reciclaje, la identificación de los procesos involucrados y con lo que se pudo establecer los objetivos a optimizar incluyendo las definiciones de las variables.

7.2 Análisis de la especificación matemática y formulación

Para diseñar la estructura general del modelo de programación lineal multiobjetivo para el proceso de logística inversa en el sector plástico de polipropileno, se logró identificando las funciones objetivos y las restricciones que las gobiernan en la etapa de caracterizado de todo el sistema de la logística inversa y en donde se pudo determinar claramente las funciones objetivos y sus restricciones. Dentro de los objetivos establecidos a optimizar el primero, minimizar costos de la logística inversa del sector plástico de polipropileno, ha sido ampliamente estudiado, sin embargo se estableció y moldeó para este caso específico articulándolo con el segundo objetivo, el de minimizar la degradación del polipropileno como variable de calidad.

Minimizar el índice de degradación a la procesabilidad del polipropileno fue determinado partiendo del estudio realizado por el Tochacek y Jancar (2012), quienes determinaron a nivel de laboratorio el Índice de Degradación del Procesamiento (PDI por sus siglas en inglés) a partir de múltiples re-extrusiones al polipropileno virgen y midiendo el índice de fluidez o Melt Flow Rate (MFR por sus siglas en inglés) de cada re-extrusión,

observándose que a medida que se incrementa el número de re-extrusiones, se incrementa el MFI como consecuencia de la degradación del material debido al sometimiento de trabajo y altas temperaturas propias de la extrusión.

Este mismo estudio fue realizado para los materiales reciclados de polipropileno provenientes del RSU y de los desechos industriales y llegándose a la ecuación propuesta la puede ser usada independientemente de donde provengan los desechos a procesar.

7.3 Análisis de la verificación, validación y refinamiento del modelo planteado.

Una vez obtenidos las funciones objetivos a las variables involucradas fue presentado exhaustivamente con todas sus restricciones de manera generalizada para que así pueda ser usado por cualquier administrador que lo requiera.

En la determinación de las restricciones se tuvo cuidado de plantearlas de manera general para cualquier caso, sin embargo, estas pueden ser modificadas o adaptadas para el caso específico según sea el caso.

7.4 Análisis de la resolución del modelo y construcción de un caso de estudio.

Para poder realizar la resolución del modelo de optimización multiobjetivo se hace necesario ponerlo a prueba en un caso real, es por ello que este aparte se fusiona con la construcción de un caso de estudio, donde se puede observar la validez del modelo propuesto.

El modelo planteado para optimizar la logística inversa del sector plástico del polipropileno, el cual abarca todos los entes involucrados en la cadena de suministro, fue ajustado específicamente para simular un programa de producción ya ejecutado en la empresa “Reciclaje Anónimo” y comparándose los resultados antes y después de

implementado el modelo planteado, tal como se muestra en la tabla 21. Comparación de resultados.

Tabla 21. Comparación de resultados

Detalle	Total Programa realizado por el administrados	Total Programa realizado por con el modelo propuesto
<i>Días Lab.</i>	149	149
<i>Hrs Lab.</i>	1192	1192
<i>Demanda requerida (Tn)</i>	209	209
<i>Aditivos Estab. consumido (Tn)</i>	2.09	0.491
<i>Horas Extras realizadas</i>	273.3	250.9
<i>Costo de Materia Prima</i>	\$ 174.900.000	\$ 174.900.000
<i>Costo Horas hombre Regular</i>	\$ 25.826.798	\$ 25.826.798
<i>Costo Hrs. Extras</i>	\$ 7,854,130	\$ 3.553.385
<i>Costo horas hombre Ociosas</i>	---	\$ 823.059
<i>Costo de Inventario</i>	---	\$ 543.000
<i>Costo Aditivo Estabilizante</i>	\$ 26,424,528	\$ 1.124.448
Total:	\$ 235,006,456	\$ 205.405.631

Autor: Vélez H. Jorge E. Comparación de resultados. Informe de la investigación.

Se puede observar en los resultados obtenidos que la mayor diferencia y que conlleva a un ahorro significativo con el uso del modelo propuesto, se presenta en el consumo del aditivo estabilizante, producto de la implementación del segundo objetivo. Así también y propio del primer objetivo, se presenta en menor escala, pero no de menor importancia, un ahorro en la generación de las horas extras.

Finalmente y a pesar que con la implementación del modelo propuesto se puede visualizar los costos que se incurren en horas hombre ociosas y en inventarios, se puede lograr una reducción en los costos hasta del 12.6% lo cual puede ser atractivos para los inversionistas.

8 – CONCLUSIONES

Como puede verse, el plan obtenido por métodos de análisis multiobjetivo, se puede ajustar de manera que se cumplan todas las restricciones. Este plan utiliza toda su capacidad regular y de horas extras los primeros tres períodos, generando inventarios para suplir en la medida de lo posible, la demanda de los meses uno, dos y tres. De allí en adelante, el plan es más flexible, ya que no se generan horas extras, pudiéndose satisfacer la demanda y el inventario de seguridad requerido.

Este plan modificado, cumple todas las restricciones, y si bien no podemos asegurar que es el plan óptimo, el cual se conseguiría si se cambiaran las políticas establecidas por la empresa de manera que se pueda contemplar las contrataciones, los despidos y la producción subcontratación, se puede decir que es plan que satisface todos los objetivos generando un menor costo que el realizado por el administrador, tal como lo muestra la tabla 17.

Un punto importante a tener en cuenta es el logro del segundo objetivo, el cual es minimizar el índice de degradación a la procesabilidad, lo que genera una buena calidad del polipropileno reciclado. Este logro se puede garantizar sin la necesidad de hacer el ensayo de índice de fluidez para calcular el índice de degradación final, si se tiene en cuenta lo expuesto en el capítulo 4. en el cual se presenta en la tabla 10 la estimación del nivel de degradación con el que quedaría el material de polipropileno reciclado, teniéndose en cuenta su procedencia, una vez haya sido procesado para su recuperación y prediciéndose así el nivel de degradación final de acuerdo al nivel de concentración de aditivo estabilizante usado.

El gran aporte y la importancia del modelo propuesto se centra básicamente en dos aspectos: el beneficio económico dado al ahorro que se obtiene con su implementación y el conocimiento de las características finales del material reciclado, lo que cual es de gran aporte tanto para el administrador como para el usuario o cliente, ya que de esa manera

puede realizar, por un lado una mejor negociación y por otro lado un mejor uso o aplicación del producto final obtenido.

De esta manera queda demostrada la utilidad e ilustrado el proceder y el logro de los objetivos planteados y la utilización del “Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo para la Logística Inversa del Sector Plástico de Polipropileno” propuesto en este trabajo.

8.1 Propuesta futuros estudios

Para futuros estudios y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo, los siguientes campos de investigación:

- Posible implementación de nuevas técnicas de ensayos para la medición del índice de degradación por medio de la técnica de “espectrofotometría de rayos infrarojos con transformadas de Fourier (FTIR - por sus siglas en inglés), lo cual podría generar una disminución considerable en el tiempo requerido para obtener la respuesta de índice de degradación a la procesabilidad disminuyendo así los costos de este ensayo.
- Estudio para conocer en el polipropileno reciclado el comportamiento del índice de degradación a la procesabilidad con diferentes tipos de aditivos estabilizantes encontrados en el mercado, así como el conocer el comportamiento del polipropileno reciclado en sus propiedades mecánicas utilizando igualmente diferentes tipos y concentraciones de aditivos estabilizantes y otros aditivos como nucleantes y lubricantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad Alshamrani, Kamlesh Mathur y Ronald H. Ballou (2005): Reverse logistics: simultaneous design of delivery routes y returns strategies.
- Arandes José M, Bilbao Javier y López Valerio Danilo (2004): Reciclado de Residuo Plásticos
- Ballou Ronald (2004): Business Logistics Management. Prentice Hall, USA.
- Chase Richard B., Jacobs F. Robert, Aquilano Nicholas J (2004): Administración de la Producción y Operaciones para una Ventaja Competitiva, Mc Graw Hill.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). Administración de la cadena de suministro (Tercera ed.). México: Pearson Educación.
- Correa Espinal Alexander, Gómez Montoya Rodrigo Andrés (2008): Tecnología de la Información en la Cadena de Suministro.
- Drisa Ana M.C., Zeni Mara, Muñoz Aldemas (2010): Análisis Multivariado de Parámetros Físicoquímicos del Relleno Sanitario de São Giacomo de Caxias do Sul, RS en la de Degradación de Polipropileno
- Enciclopedia del Plástico, México (2000)
- Gent Malcolm Richard, Menendez Mario, Toraño Javier, Torno Susana (2011): Optimization of the recovery of plastics for recycling by density media separation cyclones
- Gomes Salema, Barbosa-Povoa y Novais (2006): An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty
- Hamskog M., Klügel M., Forsström D., Terselius M. B., Gijssman P. (2004): The effect of base stabilization on the recyclability of polypropylene as studied by multi-cell imaging chemiluminescence y microcalorimetry
- Hideki Sato y Hiroyuki Ogawa (2009): Review on Development of Polypropylene Manufacturing Process.
- Jhon Wiley & Sons, Inc. (2003): Plastics Materials y Processes – A Concise Encyclopedia, New Jersey

- Jirí Toháček, Josef Jancár, Jan Kalfus, Sona Hermanová (2011): Processing stability of polypropylene impact-copolymer during multiple extrusion - Effect of polymerization technology
- Logozar, Radonjic y Bastic (2006) Incorporation of reverse logistics model into in-plant recycling process: A case of aluminium industry
- Matthew Kachur (2011): Los Plásticos, un material milagroso
- Molgaard, C., Resourc. Conserv. Recycl (1995)
- Monroy Nestor, Ahumada Maria Claudia (2006): Logistica Reversa, Retos para la Ingeniería Industrial
- Reverse Logistic Association, Web Site - <http://www.reverselogisticstrends.com>
- Rogers & Tibben-Lembke. RLEC. Reverse Logistics Executives' Council. p.9, 1999
- Romero Rodríguez (2003): El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental
- Ronald S. Tibben-Lembke (1998): Going Backwards - Reverse Logistics Trends y Practices
- Rupesh Kumar Pati, Prem Vraty Pradeep Kumar (2006) A goal programming model for paper recycling system
- Salem S.M. Al, Lettieri P., Baeyens J., 2009 - Recycling y recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review
- Smith Ricardo, Correa Alexander y Aristizabal Jaime Alberto (2003): Un Enfoque de análisis Multiobjetivo para la Planeación Agregada de Producción.
- Tohacek Jiri, Jancar Josef (2012): Processing degradation index (PDI) – A quantitative measure of processing stability of polypropylene
- Wang Fan, Lai Xiaofan, Shi Ning. (2010): A multi-objective optimization for green supply chain network design
- William Wilcox, Philip A. Horvath, Stanley E. Griffis y Chad W. Autry (2010): A Markov model of liquidity effects in reverse logistics processes: Thee effects of random volume y passage
- Yeh Wei-Chang, Chuang Mei-Chi. (2010): Using multi-objective genetic algorithm for partner selection in green supply chain problems

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. Paquete de aditivos estabilizantes

Mezcla de Aditivos Estabilizantes:

Irganox 1010

Irgafos 168

Irgafos P-EPQ

En relación 1 : 1 : 1

En una Base de 0.04% CaSt y 0.04% DHT-4A

Irganox 1010 (CAS: 6683-19-8)	Pentaerythritol tetrakis[3-(3',5'-di-tert-butyl-4'-hydroxyphenyl)propyl]
Irgafos 168 (CAS: 31570-04-4)	Tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite
Irgafos P-EPQ (CAS: 119345-01-6)	Phosphorous trichloride, reaction products with 1,1'-biphenyl y 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)phenol)
CaSt (CAS: 1592-23-0)	Calcium Stearate
DHT-4A (CAS: 11097-59-9)	Aluminate (Al(OH) ₃), (OC-6-11)-, magnesium carbonate hydroxide (2:6:1:4))

Anexo B. Índice de Degradación a la Procesabilidad (PDI) en el Polipropileno Reciclado

Item	Concentración Aditivo Estab. (%)	PDI Reciclaje del PP Desechos RSU	PDI Reciclaje del PP Desechos Industriales
1	0.05	2.43	1.49
2	0.10	2.21	1.36
3	0.15	1.99	1.24
4	0.20	1.77	1.11
5	0.25	1.56	0.98
6	0.30	1.34	0.86
7	0.35	1.12	0.73
8	0.40	0.90	0.60
9	0.45	0.68	0.47
10	0.50	0.46	0.35
11	0.55	0.24	0.22
12	0.60	0.02	0.09

Anexo C. Instrumento de recolección de datos

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR Maestría en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Industrial Facultad de Ingeniería		
Título de la investigación:	Modelo de programación lineal multiobjetivo para la logística inversa del sector plástico de polipropileno.	
Tema:	Optimización del programa de producción para la logística inversa del polipropileno.	
Objetivo de la entrevista:	Recolectar la información requerida usada para el programa de producción realizado por la empresa a fin de conocer las variables más relevantes a tener en cuenta para formular el modelo a proponer.	
Nombre de la empresa:		
Ciudad:		
Fecha:		
Nombre del entrevistado:		
La empresa se provee de:	RSU: _____	Residuos Industriales: _____
¿La empresa recibe el material separado y clasificado?	Si: _____	No: _____
¿La empresa recibe el material lavado?	Si: _____	No: _____
Cuál es la capacidad de operación de su proceso		
Cuántas etapas tiene el proceso?		
Describa las etapas del proceso:		
Cuál de las etapas es la más crítica y susceptible a mejorar u optimizar?		
En su proceso se gestiona para mejorar la calidad del material reciclado y que tipo de gestión se hace?		
Cuántas personas se requieren para su proceso?		
Cuántos turnos de trabajo hay en su proceso?		
Cuál es la capacidad de su inventario?		

Anexo D. Archivo de Excel Anexo – Algoritmo elaborado para simular el modelo propuesto en la optimización del programa de producción.