



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
DE PROCESOS PETROQUÍMICOS**

**Modelado y optimización de la  
producción de una planta de bolsas  
plásticas**

**Myrian Gabriela Santos Torres**

**BAHÍA BLANCA**

**ARGENTINA**

**2023**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
DE PROCESOS PETROQUÍMICOS**

**Modelado y optimización de la  
producción de una planta de bolsas  
plásticas**

**Myrian Gabriela Santos Torres**

**BAHÍA BLANCA**

**ARGENTINA**

**2023**



## PREFACIO

Esta tesis se presenta como parte los requisitos para optar al grado académico de Magister en Ingeniería de Procesos Petroquímicos de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título similar en esta institución u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en ámbito del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Sur durante el período comprendido entre el 15 de diciembre de 2015 y el 25 de octubre de 2023, bajo la dirección de la Dra. M. Susana Moreno, Investigadora Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del Dr. J. Alberto Bandoni, Profesor Emérito la Universidad Nacional del Sur (UNS) e Investigador Superior del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ambos con lugar de trabajo en la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI).

Myrian Gabriela Santos Torres



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el.... /..... /....., mereciendo  
la calificación de.... (.....)

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco a la Universidad Nacional del Sur por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder realizar mi maestría, así como a mis tutores el Dr. Alberto Bandoni y la Dra. Susana Moreno, que me brindaron la oportunidad de recurrir a sus capacidades y conocimientos científicos, y por guiarme durante todo el desarrollo de la tesis de Maestría.

A los docentes del MIPP que impartieron los conocimientos requeridos durante la Maestría. Al personal de la Empresa Nacional de Plásticos CONAPLAS S.A., por su colaboración al brindarme la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

A los docentes de ESPOL, Dres. Yris González, Wilfredo Angulo, Luis González y Santiago Salas y a la docente Dra. Joyne Contreras, por su tiempo y aportes durante la redacción de mi tesis de Maestría.

Y, por último, un agradecimiento especial a las personas que me apoyaron moralmente en Bahía Blanca y Ecuador, soporte fundamental en la culminación de esta tesis.

## DEDICATORIA

*A mis padres*

*A mis hermanos*

*A mi cuñada*

## RESUMEN

Esta tesis introduce un modelo de programación mixto-entero no lineal (MINLP) para la planificación de las operaciones de corto plazo en una planta discontinua multi-etapa que produce diferentes tipos de bolsas plásticas.

La planta debe completar el procesamiento de un conjunto de órdenes de producción a través de una serie de etapas integradas por un número fijo de unidades en paralelo de diferentes tamaños. La fecha de entrega, dimensiones y número de bolsas de cada orden están especificados en el horizonte de programación. En cada etapa, el tiempo de procesamiento de la orden en un equipo es una variable del modelo y se expresa como una función de su velocidad de procesamiento y la longitud de la bolsa. Adicionalmente, se plantean restricciones de calidad en la etapa de extrusión y se tienen en cuenta tanto el tiempo de cambio de rollos en cada unidad del proceso como los tiempos de preparación entre órdenes.

La formulación permite determinar de forma óptima el secuenciamiento de las órdenes de producción de bolsas plásticas y la asignación de las mismas a las unidades en las diferentes etapas del proceso, como así también el número y diámetro de los rollos obtenidos en la etapa de extrusión. En cada etapa de la planta se calcula la capacidad de producción de los equipos y los tiempos de procesamiento de cada producto. Los criterios de desempeño utilizados consisten en minimizar la tardanza en la entrega de todas las órdenes en el horizonte de programación o el tiempo total de producción de todas las órdenes (*makespan*). La formulación MINLP fue implementada y resuelta usando la herramienta computacional GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Aunque existe abundante literatura sobre problemas de planificación a corto plazo, en plantas productoras de plásticos no se han abordado aun formulaciones que incluyan las variables de proceso antes mencionadas.

La tesis presenta resultados de la aplicación del modelo propuesto a un caso de estudio real de una planta ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Esta planta se dedica a la producción de bolsas de polietileno de alta y baja densidad, principalmente para el sector bananero. Para evaluar el desempeño del modelo, se compararon los resultados obtenidos con datos reales. El estudio implicó además explorar funciones objetivo y algoritmos de resolución (*solvers*) alternativos. Como conclusión, se recomienda minimizar el tiempo de



ejecución de las órdenes (*makespan*) y emplear el *solver* SCIP, como alternativa preferida para una eventual aplicación en la planta real.

## ABSTRACT

This thesis introduces a non-linear mixed-integer programming model (MINLP) for scheduling the short-term operations in a discontinuous multi-stage plant that produces different types of plastic bags.

The plant must complete the processing of a set of orders through a series of integrated stages by a fixed number of units of different size in parallel. The date of delivery, size and number of bags of each order are specified in the scheduling horizon. At each stage, the processing time of an order in a unit is a model variable, and it is expressed as a function of its processing speed and the length of the bag. Additionally, quality restrictions are included in the extrusion step and consider both the time of change of rolls in each unit and the preparation times between orders.

The formulation allows to determine an optimal sequencing of production orders of plastic bags and the assignment of these units at different stages of the process, as well as the number and diameter of the rolls obtained in the extrusion step. Likewise, at each section of the plant, the production capacity of each equipment and the processing time of each product are calculated. The performance criteria consist in minimizing the production time, such as the delay in the delivery (tardiness) of all orders in the scheduling horizon and the total production time of all orders (makespan). The MINLP formulation was implemented and solved using the software GAMS (General Algebraic Modeling System). Although literature on short-term planning problems is abundant, formulations that include the abovementioned process variables have not yet been addressed in plastics production plants.

The thesis presents results of the application of the proposed model to a case study of a plant located in the city of Guayaquil, Ecuador. The bags produced are made of high and low-density polyethylene and are mainly used in the banana industry. To evaluate the performance of the model, the results obtained were contrasted with real data. The study also involved the use of alternative objective functions and solvers. In conclusion, minimizing the makespan and the use of the SCIP solver is the recommended option for a potential application in the real plant.

## TABLA DE CONTENIDOS

PREFACIO .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	vi
TABLA DE CONTENIDOS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Historia de Bolsas Plásticas.....	2
1.2 Tipos de Bolsas Plásticas .....	4
1.3 Industria de Bolsas Plásticas en Ecuador .....	6
1.4 Revisión Bibliográfica.....	7
1.5 Objeto de Estudio y Objetivos de la Tesis .....	11
1.6 Estructura de la Tesis .....	13
<b>CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO.....</b>	<b>15</b>
2.1 Breve Descripción de la Planta de Bolsas Plásticas .....	16
2.2 Descripción del Proceso de Producción de Bolsas Plásticas.....	17
2.2.1 Extrusión .....	18
2.2.2 Impresión .....	20
2.2.3 Conversión .....	21
2.2.3.1 Sellado.....	22
2.2.3.2 Rebobinado .....	23
2.2.3.3 Corte y Perforación .....	24
2.3 Control de Calidad de los Productos .....	24
2.3.1 Índice Volumétrico de Fluidéz.....	25
2.3.2 Resistencia al Impacto.....	26
2.4 Operación de la Planta.....	28
<b>CAPÍTULO 3: MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>30</b>
3.1 Definición del Problema.....	31
3.2 Formulación del Modelo Matemático .....	34
3.2.1 Restricciones del Problema .....	35
3.2.2 Función Objetivo.....	46

3.3 Resumen de la Formulación.....	47
3.4 Implementación Computacional .....	48
<b>CAPÍTULO 4: RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO .....</b>	<b>50</b>
4.1 Introducción .....	51
4.2 Caso de Estudio.....	52
4.3 Caso de Referencia: Planificación Realizada en Planta .....	56
4.4 Resultados del Modelo MINLP Propuesto.....	62
4.4.1 Minimizando la Tardanza ( <i>TD</i> ).....	62
4.4.2 Minimizando el Makespan ( <i>MK</i> ) .....	77
4.5 Discusión de los Resultados e Indicadores Adicionales .....	90
4.5.1 Indicadores Económicos .....	90
4.5.2 Funciones Objetivo e Indicadores de Producción.....	91
4.5.3 Tiempos de Cómputo .....	93
4.5.4 Rutas de las Órdenes .....	94
4.5.5 Variables Relacionadas a las Órdenes.....	95
4.5.6 Recomendación Final. ....	97
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO A: Nomenclatura .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO B: Datos de la planta .....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO C: Hoja de Cálculo de la Resistencia al Impacto .....</b>	<b>118</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.1.</b> Bolsas para supermercado .....	2
<b>Fig. 1.2.</b> Implementación de las bolsas plásticas en supermercados.....	3
<b>Fig. 1.3.</b> Esquema de un rollo para bolsas tubo .....	4
<b>Fig. 1.4.</b> Esquema de un rollo para bolsas lámina .....	5
<b>Fig. 1.5.</b> Esquema de un rollo para bolsas lámina envasadora .....	6
<b>Fig. 2.1.</b> Esquema simplificado del proceso de producción de bolsas de la planta .....	17
<b>Fig. 2.2.</b> Equipo para pruebas de índice de fluidez.....	26
<b>Fig. 2.3.</b> Equipo para impacto al dardo.....	27
<b>Fig. 3.1.</b> Esquema generalizado multietapa de la operación de la planta .....	31
<b>Fig. 4.1.</b> Esquema de posibles rutas de las órdenes en la planta.....	54
<b>Fig. 4.2.</b> Esquema de asignación de órdenes realizado por el jefe de producción en la semana 3 del mes de marzo del año 2018 para el caso de estudio.....	57
<b>Fig. 4.3.</b> Diagrama de Gantt del procesamiento de las órdenes elaboradas por el jefe de planta en la semana 3 del mes de marzo del año 2018.....	58
<b>Fig. 4.4.</b> Consumo de energía eléctrica en cada equipo de la planta en marzo 2018.....	60
<b>Fig. 4.5.</b> Ingresos obtenidos en la planta discriminados por tipos de bolsas procesadas.....	60
<b>Fig. 4.6.</b> Costos asociados al caso de estudio en marzo 2018.....	61
<b>Fig. 4.7.</b> Resultados económicos de la planta asociados al caso de estudio en marzo 2018.....	62
<b>Fig. 4.8.</b> Esquema de asignación óptima de las órdenes a cada unidad minimizando la tardanza con el código BARON.....	64
<b>Fig. 4.9.</b> Esquema de asignación óptima de las órdenes a cada unidad minimizando la tardanza con el código SCIP .....	65
<b>Fig. 4.10.</b> Diagrama de Gantt de la asignación de órdenes óptima obtenido minimizando la tardanza con el código BARON.....	67
<b>Fig. 4.11.</b> Diagrama de Gantt de la asignación de órdenes óptima obtenida minimizando la tardanza con el código SCIP.....	68
<b>Fig. 4.12.</b> Consumo de energía de producción minimizando la tardanza con el código BARON.....	74
<b>Fig. 4.13.</b> Consumo de energía de producción minimizando la tardanza con el código SCIP .....	75
<b>Fig. 4.14.</b> Costos energéticos y salariales de las órdenes minimizando la tardanza con los códigos BARON y SCIP .....	76
<b>Fig. 4.15.</b> Resultados económicos minimizando la tardanza con los códigos BARON y SCIP.....	77
<b>Fig. 4.16.</b> Esquema de asignación de las órdenes a cada unidad minimizando el <i>makespan</i> con el código BARON.....	79
<b>Fig. 4.17.</b> Esquema de asignación de las órdenes a cada unidad minimizando el <i>makespan</i> con el código SCIP .....	80
<b>Fig. 4.18.</b> Diagrama de Gantt de asignación de órdenes minimizando el <i>makespan</i> con el código BARON .....	81
<b>Fig. 4.19.</b> Diagrama de Gantt de asignación de órdenes minimizando el <i>makespan</i> con el código SCIP82	

<b>Fig. 4.20.</b> Consumo de energía de producción minimizando <i>makespan</i> con el código BARON.....	87
<b>Fig. 4.21.</b> Consumo de energía de producción minimizando <i>makespan</i> con el código SCIP.....	88
<b>Fig. 4.22.</b> Costos energéticos y salariales de las órdenes minimizando el <i>makespan</i> con los códigos BARON y SCIP .....	89
<b>Fig. 4.23.</b> Resultados económicos minimizando el <i>makespan</i> con los códigos BARON y SCIP .....	89
<b>Fig. C.1.</b> Hoja de cálculo de la Prueba de Impacto al Dardo de un Producto 1.....	118
<b>Fig. C.2.</b> Hoja de cálculo de la Prueba de Impacto al Dardo de un Producto 2.....	119

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Consumo nacional de bolsas plásticas tipo camiseta en el año 2014.....	7
<b>Tabla 1.2.</b> Principales distribuidores de bolsas plásticas .....	7
<b>Tabla 2.1.</b> Productos elaborados por la planta .....	17
<b>Tabla 4.1.</b> Rutas posibles de procesamiento de las órdenes en cada etapa del proceso .....	55
<b>Tabla 4.2.</b> Especificaciones de los rollos para cada orden elaborada en planta .....	59
<b>Tabla 4.3.</b> Velocidades de procesamiento $Pr_{ius}$ (m/min) minimizando la tardanza .....	69
<b>Tabla 4.4.</b> Índices de calidad de las órdenes minimizando tardanza.....	71
<b>Tabla 4.5.</b> Especificaciones de los rollos de las órdenes minimizando la tardanza .....	73
<b>Tabla 4.6.</b> Velocidades de procesamiento $Pr_{ius}$ (m/min) minimizando el <i>makespan</i> .....	84
<b>Tabla 4.7.</b> Índices de calidad de las órdenes minimizando el <i>makespan</i> .....	85
<b>Tabla 4.8.</b> Especificaciones de los rollos de las órdenes minimizando el <i>makespan</i> .....	86
<b>Tabla 4.9.</b> Estructura de costos, ingresos y beneficios de los 5 casos analizados .....	90
<b>Tabla 4.10.</b> Funciones objetivo e indicadores de producción de los 5 casos analizados .....	92
<b>Tabla 4.11.</b> Tiempo de CPU de los casos analizados.....	93
<b>Tabla 4.12.</b> Tiempo Rutas de las órdenes .....	95
<b>Tabla 4.13.</b> Tiempo de procesamiento de una bolsa $Tb_{ius}$ (min) .....	97
<b>Tabla 4.14.</b> Tiempo total de procesamiento de una orden $TT_{ius}$ (min) .....	98
<b>Tabla A.1.</b> Conjuntos .....	109
<b>Tabla A.2.</b> Subconjuntos.....	109
<b>Tabla A.3.</b> Parámetros.....	110
<b>Tabla A.4.</b> Variables binarias.....	111
<b>Tabla A.5.</b> Variables continuas .....	111
<b>Tabla A.6.</b> Variable entera .....	111
<b>Tabla A.7.</b> Parámetros de costos.....	112
<b>Tabla B.1.</b> Información básica de las órdenes.....	113
<b>Tabla B.2.</b> Porcentaje de materias primas.....	113
<b>Tabla B.3.</b> Porcentaje de aditivos.....	113
<b>Tabla B.4.</b> Datos adicionales.....	114
<b>Tabla B.5.</b> Información básica de las unidades.....	114
<b>Tabla B.6.</b> Asignación de órdenes a etapas de procesamiento .....	115
<b>Tabla B.7.</b> Asignación de órdenes a unidades.....	115
<b>Tabla B.8.</b> Unidades en etapas de procesamiento .....	116
<b>Tabla B.9.</b> Límites de velocidad de procesamiento en cada unidad.....	116
<b>Tabla B.10.</b> Indicadores de calidad.....	117
<b>Tabla B.11.</b> Precio de venta de las órdenes.....	117

**Tabla B.12.** Precio de los materiales..... 117



# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Historia de Bolsas Plásticas

La bolsa de plástico es un objeto cotidiano utilizado para transportar y conservar alimentos o materiales (ver Fig. 1.1). Está elaborada de los siguientes tipos de plástico: polietileno, polipropileno o polímero de plástico no biodegradable (Jumarsol, 2015).



Fig. 1.1 Bolsas para supermercado  
Fuente: El Nuevo Diario, Año 2018

Su origen se remonta a periodos bélicos debido a que, la reducción de fuentes naturales de caucho, seda y otros materiales aceleró la investigación sobre el uso de los plásticos como materia prima. A principios de los años sesenta, el ingeniero sueco Sten Gustan Thulin, desarrolló la bolsa plástica de polietileno mediante el doblado de un tubo fino, plano y resistente, para una empresa sueca de empaquetado, quienes patentaron su idea en 1965 (World Environment Day, 2018).

El plástico, debido a sus propiedades térmicas y mecánicas, así como a su bajo costo de producción, ha desplazado a materiales como el metal, papel, cartón y vidrio en la fabricación de bolsas. Se utiliza en diversas áreas, como envases y embalajes, agroindustria, electrónica, salud, entre otras. Gracias a sus propiedades físicas y químicas, las bolsas plásticas pueden ser reutilizadas de varias formas antes de ser enviadas a los rellenos o a reciclaje.

El proceso de elaboración de una bolsa de plástico incluye etapas tales como la extrusión de la resina o polímero, la impresión, la laminación con otra capa de plástico (esta etapa puede o no existir) y, finalmente, el sellado por medio de calor y presión (38Consumer, 2017). El uso de este tipo de bolsas se hizo muy popular en los años setenta, a través de su distribución gratuita en supermercados y tiendas (ver Fig. 1.2). Los factores que han

favorecido a esta industria son los precios competitivos y el hecho de que el petróleo ofrece una mayor disponibilidad de materiales sintéticos.



Fig. 1.2 Implementación de las bolsas plásticas en supermercados  
Fuente: Día Mundial del Medio Ambiente, Creative Commons, Año 2018

La bolsa plástica es un producto universal que se fabrica a razón de un billón de unidades cada año, creando con esta producción importantes desafíos ambientales. A pesar de las preocupaciones por su lenta biodegradabilidad, es un producto muy versátil y tiene todavía una importante demanda.

Actualmente, las materias primas derivadas del petróleo resultan relativamente baratas y abundantes (Gallego y Ortega, 2019). Por lo que, a pesar de que el petróleo es un recurso escaso a nivel mundial, sus derivados siguen siendo muy utilizados como materia prima para la elaboración de las bolsas plásticas en el mercado.

Uno de los derivados del petróleo mayormente utilizado es el polietileno obtenido a partir del etileno que proviene del gas natural (Sosa, 2016). El polietileno es un termoplástico que posee gran flexibilidad y resistencia a la abrasión, al impacto y al desgaste. Es el compuesto base del plástico más empleado a nivel mundial (Rajapack, 2015). Existen diferentes tipos de polietilenos destinados a la elaboración de bolsas plásticas:

- ✓ Polietileno de baja densidad (PEBD)
- ✓ Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)
- ✓ Polietileno de alta densidad (PEAD)

Dentro de esos grupos, existen otros subgrupos que brindan características particulares al producto final. En el caso de las bolsas plásticas, otorgan características como

brillo, resistencia, ligereza, transparencia, etc. También se utilizan los denominados copolímeros, siendo los más utilizados el metaloceno y el buteno. El metaloceno brinda a las bolsas plásticas mayor resistencia, brillo y claridad que el buteno.

En la elaboración de las bolsas plásticas se utilizan aditivos que modifican y mejoran la calidad de las mismas. Los más comúnmente utilizados son para conferir características de antibloqueo, antioxidante, anti-UV, biodegradabilidad, pigmentación de colores y acción insecticida.

## 1.2. Tipos de Bolsas Plásticas

Existen diferentes tipos de bolsas de plástico según su función:

- ✓ Bolsas Tubo: también conocidas como bolsas vacío, son bolsas rectangulares elaboradas con polietileno, de alta o baja densidad, cuyo sellado se realiza en el fondo de la misma y se utilizan para facilitar protección y transporte de productos de un mercado a otro. En el caso de una empresa bananera, estas bolsas sirven para exportar el banano a su respectivo destino.

En la Fig. 1.3 se muestra el esquema de un rollo para bolsas tubo, donde se observa que el ancho de este tipo de bolsas corresponde al ancho del rollo. Además, el espesor del rollo es el espesor de la bolsa. En todo el ancho de estas bolsas, se coloca el logotipo impreso de un cliente en particular.

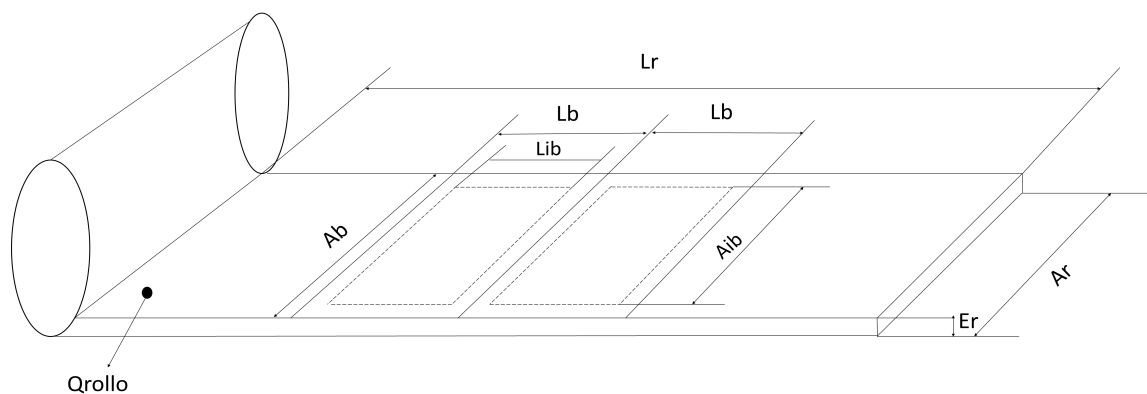


Fig. 1.3 Esquema de un rollo para bolsa tubo

Lr: largo del rollo; Ar: ancho del rollo; Er: espesor del rollo; Lb: largo de la bolsa; Ab: ancho de la bolsa; Lib: longitud de impresión de la bolsa; Aib: ancho de impresión de la bolsa; Qrollo: peso del rollo.

- ✓ Bolsas Lámina: son bolsas rectangulares de menor tamaño que las bolsas tubo y son elaboradas con polietileno de baja densidad, lineal de baja densidad y polipropileno. El sellado de este tipo de bolsa se realiza de forma lateral debido a que en el ancho del rollo se efectúa dos veces la impresión del logotipo de un determinado cliente. Cabe recalcar que, esta impresión se realiza para una bolsa. En el proceso de sellado, las máquinas realizan el doblado de la lámina y luego la cortan y sellan de forma lateral. Estas bolsas se utilizan como bolsas para empaque de alimentos altamente higroscópicos como harina, galletas, etc. En la Fig. 1.4, se muestra el esquema de un rollo para bolsas lámina, con la descripción de los parámetros respectivos.

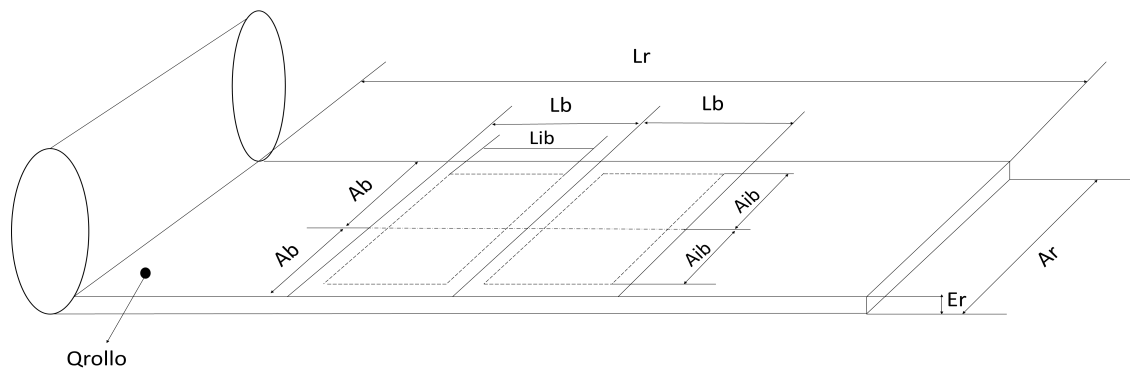


Fig. 1.4 Esquema de un rollo para bolsas lámina

Lr: largo del rollo; Ar: ancho del rollo; Er: espesor del rollo; Lb: largo de la bolsa; Ab: ancho de la bolsa; Lib: longitud de impresión de la bolsa; Aib: ancho de impresión de la bolsa; Qrollo: peso del rollo.

- ✓ Bolsas Tipo Camiseta: son bolsas rectangulares de tamaño mediano, elaboradas con polietileno de alta densidad en las que, al igual que en las bolsas lámina, se efectúa dos veces la impresión del logotipo de un cliente en todo el ancho del rollo. En el proceso de sellado, el equipo dobla la película, luego la corta y la sella de forma lateral y en el fondo. El esquema de estos rollos es similar a la bolsa lámina (Fig. 1.4). Estas bolsas sirven para transportar mercancías dentro de un supermercado (Fig. 1.1).
- ✓ Bolsas Lámina Envasadora: estos son rollos pequeños que se cortan en tres partes y se tienen tres rollos de menor tamaño, por tanto, el ancho de este tipo de bolsa es la tercera parte del ancho del rollo original para las bolsas lámina envasadora. El producto final (rollos) se entregan a los clientes los que, en sus plantas terminan de formar la bolsa al envasar productos tales como azúcar,

avena, etc. En la Fig. 1.5 se muestra el esquema de los rollos para bolsas lámina envasadora.

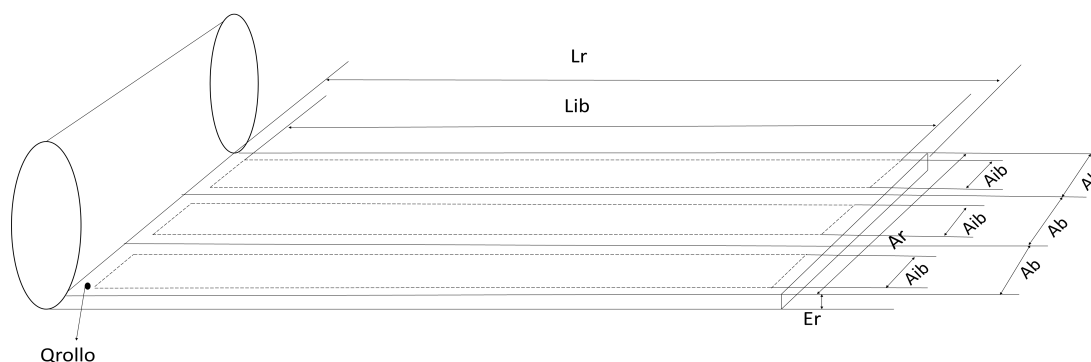


Fig. 1.5 Esquema de un rollo para bolsas lámina envasadora

Lr: largo del rollo; Ar: ancho del rollo; Er: espesor del rollo; Ab: ancho de la bolsa; Lib: longitud de impresión de la bolsa; Aib: ancho de impresión de la bolsa; Qrollo: peso del rollo.

### 1.3. Industria de Bolsas Plásticas en Ecuador

Para dar contexto a la tesis, dado que el caso de estudio presentado corresponde a una planta de elaboración de bolsas plásticas de Ecuador, en esta sección se describe someramente como es la situación de esta industria en este país.

En Ecuador, la producción de bolsas plásticas se ha convertido en una industria muy rentable y competitiva, dando lugar a la existencia de numerosas empresas que fabrican diferentes tipos de bolsas plásticas para varios mercados, tales como el sector bananero, los supermercados, etc.

La elaboración de este producto en Ecuador tiene sus inicios en la década de los sesenta. Específicamente, en el sector bananero se utilizó para transportar sus productos o para resguardarlos de las plagas (Borja y Tigreros, 2018). Este hecho incentivó a empresarios ecuatorianos a invertir en empresas destinadas a la elaboración de estos productos plásticos, las cuales han ido creciendo durante los últimos 10 años.

El Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE) realizó un estudio en el año 2014, donde identificó que más de 1.500 millones de fundas plásticas tipo camiseta (para supermercado) son usadas anualmente en el país, es decir, 130 fundas plásticas por habitante

por año (Martínez y col., 2017). En la Tabla 1.1 se muestra el consumo nacional de bolsas plásticas tipo camiseta en Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2014).

**Tabla 1.1.** Consumo nacional de bolsas plásticas tipo camiseta en el año 2014

Consumo	Cantidad de bolsas
Consumo per cápita anual	253
Consumo nacional de fundas todo tipo	3.657.000.000
Consumo Galápagos anual	4.500.000.000

Fuente: Ministerio del Ambiente, MAE, Año 2014

En los últimos años, se han ido desarrollando los films de películas plásticas y bolsas plásticas en Ecuador, hasta llegar a encontrar un gran número de empresas que proveen una gama sumamente amplia de bolsas para diferentes necesidades de los consumidores.

Un producto plástico que se distribuye mayormente en diferentes partes del país es la bolsa para supermercado, debido a su función de transportar los artículos hacia el destino de su consumidor. En la Tabla 1.2 se muestran los principales mercados de consumo de este tipo de bolsas en Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2014).

**Tabla 2.2.** Principales mercados de consumos de bolsas plásticas

Consumidores	Cantidad de bolsas (%)
Supermercados e hipermercados	8
Vendedores ambulantes, panaderías y quioscos	14
Mercados y ferias libres	30
Tiendas de barrios y bodegas	48

Fuente: Ministerio del Ambiente, MAE, Año 2014

#### 1.4. Revisión Bibliográfica

El tipo de operación de la planta de bolsas plásticas que es objeto de esta tesis es de índole discontinua o *batch*. En relación a esto, es necesario mencionar que existen en la literatura numerosas propuestas de modelado matemático para el tratamiento del problema de planeamiento de corto plazo (también conocido por su término en inglés como *short-term scheduling*) de plantas *batch* generales que utilizan una representación continua del tiempo.

Una extensa revisión en el área se presenta en los artículos de Méndez y col. (2006) y Harjunoski y col. (2014). A continuación, se mencionan sólo aquellos con mayor relación al trabajo desarrollado en esta tesis.

Así se puede referenciar el trabajo de Méndez y col. (2000) quienes desarrollaron un modelo matemático mixto-entero lineal (MILP, por sus siglas en inglés) para optimizar la planificación de operaciones de corto plazo en plantas *batch* multiproducto (también conocidas como plantas *flow-shop*) con una única etapa de procesamiento y múltiples equipos en paralelo. En este trabajo, las órdenes son elaboradas en las respectivas máquinas de acuerdo al pedido realizado por el cliente (*make-to-order*) o pueden ser generadas para cumplir con los requisitos de inventario de la planta (*make-to-stock*). Para identificar el mejor programa de operaciones de la planta utilizaron diferentes funciones objetivo entre las que se encuentran minimizar el tiempo total necesario para efectuar el procesamiento de todas las órdenes (*makespan*, por su nombre en inglés), minimizar la anticipación y tardanza total ponderada en la entrega y minimizar los costos de operación. El modelo implementa restricciones a través de un conjunto de variables de decisión discretas que permiten determinar el secuenciamiento óptimo de las órdenes y la asignación de éstas a las respectivas unidades de procesamiento. Se utilizan tres índices en estas variables discretas para representar órdenes, unidades y órdenes que preceden o suceden a otras (es decir, se agregan nuevos términos como predecesores y sucesores en la secuencia de las órdenes consecutivas que se dirigen a una misma unidad de producción).

Hui y Gupta (2001) mejoraron el modelo anterior al utilizar sólo dos índices que representen las órdenes y unidades, con el fin de reducir el número de variables binarias y, por consiguiente, reducir el tiempo de resolución del modelo. Esto les permitió aplicarlo en problemas industriales de mayor escala.

Posteriormente, Gupta y Karimi (2003) propusieron que el tiempo de transición o cambio entre diferentes órdenes de producción dependiera no solo de la secuencia de las órdenes, sino también de las unidades de procesamiento para una planta que fabrica múltiples productos bajo pedido de los clientes (*make-to-order*). Además, este modelo incluye más de una etapa de procesamiento, convirtiéndolo en un modelo multietapa. Se plantea como función objetivo del modelo minimizar la tardanza en la entrega de las órdenes con respecto al tiempo especificado. La formulación, que incorpora tiempos de transición dependientes de



la unidad, logra obtener programaciones con valores objetivos superiores en comparación con los trabajos previos sobre este problema.

Kopanos y Puigjaner (2009) desarrollaron un nuevo modelo MILP basado en el concepto de precedencia para resolver el problema de programación a corto plazo de una planta *batch* multietapa, que elabora diversos productos en diferentes unidades de procesamiento en paralelo. Estos autores combinan las ventajas de los conceptos de precedencia inmediata y generalizada, lo que resulta en una formulación híbrida y logra un mayor rendimiento al abordar los problemas asociados con los tiempos de cambio de órdenes de producción en la planta.

Otros trabajos presentados en la literatura optimizan el tiempo de producción de la planta. Krastek y col. (2012) formularon un modelo matemático para optimizar el tiempo de producción de una planta extrusora de tubos, la cual elabora los productos bajo pedido del cliente. En el modelo se tienen en cuenta las especificaciones de tiempos de producción de cada tubo en una extrusora y las capacidades de producción de las diferentes extrusoras que se encuentran en la planta.

Recientemente, Elekidis y col. (2019) plantearon un modelo MILP para la programación de la producción de una planta industrial real que produce bienes de consumo bajo pedido del cliente, donde la etapa de empaque representa el cuello de botella del proceso. Se imponen restricciones en la asignación de productos en esta etapa a fin de minimizar el *makespan*. La estrategia de solución permite elaborar planes de programación rigurosos en un entorno de producción dinámico.

Díaz-Ramírez y Huertas (2018) desarrollaron un modelo MILP para el *scheduling* de una planta química con el objeto de maximizar el beneficio. La formulación permite identificar el tamaño de lote y la secuenciación de los productos químicos considerando condiciones típicas de planta, como la penalización por incumplimiento, la programación de mantenimientos preventivos de las estaciones y la disponibilidad temporal de las estaciones.

En cuanto a plantas productoras de las materias primas plásticas, existen también numerosos trabajos de modelado matemático para la optimización del planeamiento de corto plazo. Entre ellos se puede mencionar a Liberopoulos y col. (2010), quienes presentaron un

modelo MILP de una planta de resina tereftalato de polietileno (PET, por su sigla en inglés), que opera bajo la modalidad de fabricación bajo pedido, con el objetivo de minimizar el costo asociado a los cambios de las órdenes durante el proceso de producción, con el fin de evitar variaciones no deseadas en las propiedades de la resina base. Se consideraron como restricciones los cambios dependientes de la secuencia de producción, la capacidad de producción, el almacenamiento intermedio y las fechas de entrega de las órdenes. La principal contribución de este trabajo radica su eficiente abordaje de una importante aplicación práctica, cuya solución exhibe una alta complejidad.

Okoli y col. (2012) desarrollaron un modelo MILP para optimizar el rendimiento de producción de una planta de plásticos en Nigeria. Esta planta opera bajo la modalidad de producción bajo demanda y elabora productos utilizando diferentes máquinas de inyección. En el modelo, se consideran como restricciones la disponibilidad de materiales y las capacidades de las máquinas.

Arboleda y col. (2014) propusieron un modelo MILP de un programa maestro de producción de una planta del sector de plásticos, con el objetivo de minimizar los costos totales de producción y mejorar el sistema de servicio al cliente. El modelo tiene en cuenta parámetros de producción como los pronósticos de demanda, capacidad y gestión de inventarios. Este enfoque aborda un complejo problema de producción y se aplicó en un caso real de una empresa como herramienta esencial para la toma de decisiones en la producción.

Wang y col. (2016) desarrollaron un modelo mixto-entero no lineal (MINLP, por sus siglas en inglés) para mejorar el rendimiento de producción y reducir el consumo de energía de una planta productora de PVC que fabrica productos bajo pedido del cliente (*make-to-order*) y requerimientos de inventario (*make-to-stock*). Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una valiosa guía para la optimizar la planificación en plantas de PVC en el mundo real.

En contraste a la abundante literatura sobre modelado y optimización de plantas batch en general, y de producción de plásticos en particular, son escasos los trabajos dedicados específicamente a plantas de producción de bolsas plásticas.

Uno de los pocos trabajos en este rubro es el de Leung (2009), quien propuso un modelo MINLP para optimizar el *scheduling* de la producción de una planta de plásticos que fabrica por pedido, considerando únicamente la etapa de extrusión e incorporando la calidad del producto en la formulación. Luego, Gopura y Jayawardene (2012) desarrollaron un modelo de simulación para optimizar el tiempo de producción de este tipo de plantas.

## **1.5. Objeto de Estudio y Objetivos de la Tesis**

Sobre la base del contexto desarrollado hasta aquí en el capítulo, en esta sección se describen someramente las actividades principales de una planta de elaboración de bolsas plásticas y se presenta el objetivo concreto de la tesis.

Las materias primas empleadas usualmente son polietileno de alta y baja densidad y polietileno de baja densidad lineal. La planta ejecuta el procesamiento de un conjunto de órdenes de producción a través de una serie de etapas, las cuales están conformadas por un número fijo de equipos de diferentes tamaños que operan en paralelo.

La operación principal en el proceso es el soplado del polímero para formar el film o película en la extrusora. A este proceso le siguen las etapas de impresión, conversión y empaque (Gopura y Jayawardane, 2009). En la etapa de conversión, se encuentran unidades que realizan tareas variadas como son las de corte, sellado, rebobinado y perforado.

La producción de bolsas plásticas se realiza en una planta discontinua o *batch* que produce diferentes tipos de bolsas. La fecha de entrega, las dimensiones y el número de bolsas de cada orden están especificados en el horizonte de programación. En esta planta, se pueden presentar “cuellos de botella” tanto en la capacidad como en el tiempo de operación en algunas de las etapas del proceso.

Además, en cada área de procesamiento se pueden fabricar diferentes productos utilizando la misma unidad. Por lo tanto, el jefe de planta debe decidir en qué equipo y bajo qué secuencia se debe elaborar cada producto, considerando el tiempo de entrega indicado en los órdenes de producción para cada uno.

La mejor forma de solucionar este problema es empleando metodologías computacionales que le permitan obtener una óptima programación de las operaciones de corto plazo de la planta, que maximice el rendimiento de cada equipo y minimice los tiempos de producción en cada área de trabajo a fin de evitar retrasos en la entrega de productos a los clientes.

De modo que, en esta tesis, se propone estudiar la optimización del problema de programación de las operaciones de corto plazo en plantas de producción de bolsas plásticas mediante la aplicación de técnicas de programación matemática.

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en desarrollar un modelo de optimización de tipo mixto-entero no lineal (MINLP, *Mixed Integer Non Linear Programming*) que incorpore criterios de desempeño para mejorar la producción de bolsas plásticas de una planta. Las funciones objetivo del modelo consisten en minimizar el tiempo de retraso en entregar las órdenes, conocido como tardanza y minimizar el tiempo requerido para el procesamiento de todas las órdenes también conocido como *makespan* (Santos-Torres y col., 2020).

La formulación matemática desarrollada permite determinar de manera óptima el secuenciamiento de las órdenes de producción de bolsas plásticas y su asignación a las unidades en las diferentes etapas del proceso. Además, se optimiza el número y diámetro de los rollos plásticos producidos en la etapa de extrusión, así como la velocidad y el tiempo de procesamiento de los equipos, todo ello considerando la calidad del producto final.

Los valores de esas variables, obtenidas como resultado del modelo matemático, tienen un efecto significativo en la optimización de la producción de la planta, dado que permite que las unidades se utilicen en forma efectiva y funcionen a la velocidad óptima, para mejorar la producción y evitar costos de mantenimiento (Abu Jadayil y col., 2017).

Teniendo en cuenta los modelos de optimización de los trabajos mencionados en la sección anterior, la formulación propuesta en esta tesis adiciona nuevas variables operativas propias de este tipo de plantas, tales como el diámetro ( $Dr$ ), peso ( $Qr$ ) y número ( $Nr$ ) de rollos de una orden, las capacidades de producción ( $Qp$ ) en base a velocidades de procesamiento ( $Pr$ ), que a su vez afectan a los tiempos totales de producción ( $TT$ ) de las

órdenes y los tiempos totales de cambio de rollo (*TTC*) en cada unidad. Se introducen, además, expresiones para calcular los tiempos de elaboración de cada bolsa de la orden en cada unidad y etapa del proceso, como función de la velocidad de procesamiento. Asimismo, la calidad del producto final se tiene en cuenta en la formulación al incluir los índices de calidad de las órdenes en función de las capacidades de producción.

El modelo MINLP desarrollado se implementa en el software de modelado y optimización GAMS (Brooke y col., 2012). El mismo se aplica para programar las operaciones de la planta descrita considerando como caso de estudio un escenario típico de la misma ocurrido en el año 2018. Además, se emplean dos *solvers*, uno comercial (BARON) y el otro no-comercial (SCIP), con el fin de evaluar su comportamiento al resolver el problema con las dos funciones objetivo propuestas.

### 1.6. Estructura de la Tesis

En esta sección se describe la estructura de la tesis, así como los temas abordados en cada capítulo de la misma.

Luego de la introducción general realizada en este capítulo, en el Capítulo 2, se presenta una descripción general de la planta bajo estudio, detallando el proceso de elaboración de las bolsas plásticas, así como los equipos presentes en cada etapa de producción, con sus respectivas condiciones operativas y los índices de calidad que debe cumplir cada bolsa plástica elaborada.

El Capítulo 3 describe la formulación matemática del modelo MINLP propuesto para la programación de las tareas en la planta.

Por su parte, en el Capítulo 4 se presenta la descripción del caso de estudio de la planta de Ecuador con un esquema detallado de la producción de las bolsas plásticas, proporcionando información sobre parámetros operativos de los equipos de proceso y las características de cada bolsa. Este caso de estudio se implementa y resuelve en GAMS, donde se busca optimizar el problema minimizando las dos funciones objetivo propuestas. Luego, se procede a la discusión comparativa de los resultados obtenidos en el caso nominal (realizado

en la planta), en relación con los resultados generados mediante el modelo empleando tanto la tardanza como el *makespan* como criterios objetivo, y BARON y SCIP como *solvers*.

Por último, en el Capítulo 5 se discuten las conclusiones obtenidas de esta tesis y los trabajos futuros, sobre la base de las contribuciones realizadas en la misma.

**CAPÍTULO 2**  
**DESCRIPCIÓN GENERAL DEL**  
**PROCESO**

## 2.1. Breve Descripción de la Planta de Bolsas Plásticas

La planta en la cual se basa el estudio propuesto en esta tesis se encuentra ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, y produce bolsas de polietileno de alta y baja densidad y polietileno de baja densidad lineal, especialmente para la industria bananera. Además, la planta atiende a otros clientes del mercado local pertenecientes a diferentes sectores comerciales, proporcionando bolsas de supermercado.

La planta en cuestión fue inaugurada en 1989 para satisfacer la demanda de embalaje de una exportadora bananera. La misma inició sus actividades con tres extrusoras de polietileno de baja densidad, una impresora de seis colores, tres selladoras y una rebobinadora. Unos años más tarde, gracias a una nueva inversión y expansión, la planta adquirió seis extrusoras (tres de alta densidad y tres de baja densidad), dos impresoras (una de seis colores y otra de ocho colores) y siete selladoras y una rebobinadora.

La empresa cuenta además con personal altamente capacitado en cada área del proceso de producción de bolsas de polietileno, lo cual ha permitido mantener una alta calidad en sus productos.

La planta tiene una capacidad instalada semanal de 612 toneladas para la producción de bolsas plásticas, que comprende:

- ✓ 231.000 kg de bolsas plásticas (bolsas tubo y bolsas lámina envasadora) de polietileno de alta densidad
- ✓ 381.000 kg en bolsas plásticas (bolsas tubo y bolsas lámina) de polietileno de baja densidad y polietileno lineal de baja densidad

Se utilizan diversos colores de tintas para imprimir el logotipo del cliente en las bolsas plásticas que se comercializan. Las materias primas y aditivos se obtienen de proveedores tanto locales como del exterior. Los tamaños y tipos de bolsas fabricados dependen de los pedidos realizados por los clientes, y también se elaboran en stock para clientes regulares. La Tabla 2.1 presenta ejemplos de productos fabricados en la planta, incluyendo los tres tipos de bolsas y sus respectivas medidas.



**Tabla 2.1.** Productos elaborados por la planta

Producto	Materia prima	Forma	Medidas		
			Ancho (m)	Largo (m)	Espesor $\times 10^{-4}$ (m)
Bolsa vacío impresa “Sabrostar”	PELBD	Tubo	0,9652	1,3462	0,2794
Bolsa impresa “Bonita USA”	PEBD	Lámina	0,254	0,4064	0,3175
Lamina pigmentada impresa “Maizabrosa”	PEAD	Lámina envasadora	0,31	0,227	0,22

Fuente: Compañía de Plásticos, Año 2018

## 2.2. Descripción del Proceso de Producción de Bolsas Plásticas en la Planta

El proceso de elaboración de bolsas plásticas en la fábrica cuenta con tres etapas o áreas de procesamiento, a saber: extrusión, impresión y conversión. Esta última área está compuesta, a su vez, por 3 subáreas: sellado, rebobinado y corte y perforación. En la Fig. 2.1 se presenta un esquema simplificado del proceso de producción.



Fig. 2.1 Esquema simplificado del proceso de producción de bolsas de la planta

Las bolsas plásticas son elaboradas de acuerdo a diferentes parámetros de las mismas que son especificados por el cliente, por ejemplo, dimensiones (ancho, largo y espesor), color (que identifica al cliente), materia prima, aditivos, etc. La mayoría de los productos contienen mezclas de polímeros como, por ejemplo, 70% de polietileno de baja densidad y 30% de polietileno lineal de baja densidad, etc.

El proceso de producción de bolsas comienza con la recepción de la materia prima (polietileno) en forma de gránulos o pellets en la bodega y cuya presentación es en sacos de 25 kg los que, son apilados en pallets para un mejor almacenamiento y distribución. A continuación, se detalla cada una de las etapas de procesamiento, divididas en la descripción del proceso en sí y del procedimiento de trabajo.

### **2.2.1. Extrusión**

Básicamente, una extrusora consta de una tolva, un túnel o cilindro, un tornillo de transportación, un intercambiador de malla, un distribuidor, un cabezal, un anillo de enfriamiento, un sistema giratorio, rodillos de soporte de la película, rodillos de tiro y un rebobinador.

#### *Proceso*

Los pellets de materia prima almacenada en la tolva que se encuentra en un extremo de la máquina de extrusión, baja al túnel y debido a la acción de empuje del tornillo de transportación, se funde, fluye y mezcla a temperaturas controladas, obteniendo por el otro extremo del equipo, un perfil geométrico preestablecido.

El polímero fundido pasa a través del intercambiador de mallas, el cual evita las impurezas de la mezcla y de ahí va al distribuidor donde es forzado a pasar a través de un dado o cabezal, también conocido como boquilla, por medio del empuje generado por la acción giratoria del tornillo de transporte o husillo. Este último gira concéntricamente en el túnel, manteniendo una separación milimétrica entre ambos elementos.

Una vez que sale del cabezal, el polímero se expande y toma la forma de una película inflada o globo, que es enfriada por un anillo de enfriamiento situado a la salida del cabezal. A continuación, la película pasa a través de rodillos de tracción que se cierran para aplanarla y transportarla a lo largo de rodillos de soporte hasta llegar al rebobinador. Allí, se enrolla en bobinas de cartón para crear un solo rollo si la película sale en formato tubular o dos rollos si se presenta en forma de lámina plana.

La extrusora tiene un sistema giratorio que distribuye mejor el espesor en toda la película plástica procesada. Cada extrusora posee una capacidad máxima de producción que va desde 84.000 kg a 90.000 kg al mes y un consumo de energía específico que va desde 0,30 kW-h/kg a 0,85 kW-h/kg.

Un aditamento de la extrusora es el tratador tipo corona, el cual aumenta la energía superficial de la película para mejorar la permeabilidad y adhesión de la tinta, lo cual se usa para preparar la película cuando va a ser impresa.

### ***Procedimiento***

Una vez que el bodeguero despacha la materia prima, los sacos son abiertos por el operador de la máquina y su contenido es depositado en la tolva de la extrusora para mantener una alimentación continua. Se ajustan las temperaturas de las diferentes zonas del equipo (túnel, intercambiador de malla y cabezal) dependiendo del tipo de materia prima. Luego, se coloca en el eje del embobinador la bobina de cartón sobre la cual se va a embobinar la película que tendrá un diámetro mínimo de 0,1 m para formar el rollo plástico.

Una vez que la máquina alcanza la temperatura de operación, se enciende el motor principal y el motor del anillo de enfriamiento, y se ajusta el espesor y el ancho de la película de acuerdo con lo requerido. Dado que esta última debe cumplir con las medidas solicitadas, se debe realizar el corte a la película y, por tanto, se generará una cantidad de desperdicio.

Si el producto debe pasar por una etapa de impresión, entonces se enciende el tratador tipo corona para aumentar la tensión superficial de la película plástica y promover la permeabilidad y adhesión de la tinta. Para corroborar que la tinta no se corra, se aplica un marcador de tratamiento a la película plástica.

Si el requerimiento es en lámina, se colocan cuchillas a los extremos del tubo y dos bobinas en los ejes rebobinadores con el fin de obtener dos rollos.

Una vez completo el rollo, se enciende la alarma (contador en metros) de la máquina, el operador hace el cambio de rollo y lo lleva a una balanza electrónica para determinar su peso, luego de lo cual se lo embala y etiqueta para ubicarlo en el pallet asignado. El tiempo de cambio de un rollo a otro es de aproximadamente 0,3 minutos, y es realizado por la extrusora de forma automática.

En esta sección, también existe una cantidad de desperdicio dado que se corta el rollo plástico hasta que éste posea un peso determinado. Por tanto, el porcentaje total de desperdicio obtenido en el proceso es de aproximadamente 5%.

El embobinador soporta rollos con un diámetro máximo de 0,54 m, por tanto, el peso máximo que tiene un rollo obtenido en extrusión es aproximadamente 180 kg.

Una vez que se completa la producción en cada turno, los pallets son enviados a la bodega de producto en proceso para su posterior distribución a la siguiente etapa del proceso, esto es, la impresión o conversión, según sea el caso.

### 2.2.2. Impresión

La planta cuenta con impresoras flexográficas de tambor central de 6 y 8 colores, en las cuales los grupos de impresión están dispuestos alrededor de un cilindro único de gran tamaño. Las máquinas impresoras cuentan con un desbobinador, alineadores de banda, un rodillo pisor, el tambor central, grupos impresores, secadores entre tinteros, el túnel de secado, una calandria de refrigeración y un embobinador.

#### *Proceso*

La impresión flexográfica utiliza planchas flexibles de impresión de fotopolímero que contienen una imagen en relieve en negativo de la impresión requerida. A través de un rodillo anilox, se dosifica la cantidad de tinta a transferir a la plancha, siendo la última la que finalmente imprime la película de polietileno.

Cada unidad de impresión está formada por el rodillo anilox, (rodillo de cerámica grabado con láser formando celdas diminutas con ángulo, tramado de líneas y volumen determinados para ofrecer la mejor calidad de impresión), un sistema de rasqueta con cámara el cual transfiere la tinta al rodillo anilox, un cilindro porta plancha sobre el que se monta la plancha de impresión y un sistema de entintado compuesto por un depósito que almacena la tinta, la bomba de tinta y las mangueras de entrada a la cámara y retorno al depósito, además del solvente necesario para mantener la viscosidad de la tinta.

Cada impresora posee una capacidad máxima de producción de 55.000 kg al mes y un consumo de energía específico que va desde 0,20 kW-h/kg a 0,35 kW-h/kg.

Durante el proceso de impresión, la tinta se bombea a la cámara del sistema de rasquetas desde donde es transferida al rodillo anilox, el cual al girar entra en contacto con las áreas elevadas de la plancha de impresión, transmitiéndole la cantidad necesaria de tinta para imprimir sobre la película.

### ***Procedimiento***

El primer paso es el montaje de las planchas de impresión en los rodillos y luego su instalación en los grupos de impresión. A continuación, se colocan en los depósitos los diferentes colores de tinta a usar.

El supervisor de impresión solicita a la bodega de productos en proceso los rollos que van a imprimir. El operador de la impresora coloca un rollo en el desbobinador y entrelaza la película en la máquina pasando a través de rodillos libres por el alineador de banda, el rodillo pisor, el tambor central, túnel de secado, calandra de refrigeración y embobinador en donde se coloca en el eje de salida la bobina de cartón sobre la cual se va a embobinar la película.

Una vez completado este proceso, el operador enciende la máquina y acerca los grupos impresores al tambor central para iniciar la impresión de la película. A medida que la película avanza a través del túnel de secado, adquiere una temperatura que luego es enfriada por medio de la calandra de refrigeración. Finalmente, la película se dirige hacia el embobinador. La velocidad de la máquina es ajustada por el operador de acuerdo con las necesidades específicas del trabajo a imprimir.

Durante el proceso de impresión, cuando se termina de imprimir el primer rollo, el operador hace el cambio de rollo y lo envía a la balanza electrónica para su pesaje, embalaje y etiquetado luego de lo cual se lo coloca en el pallet asignado. Una vez finalizado el turno de trabajo, se envían todos los rollos impresos a la bodega de productos en proceso para su posterior utilización en la etapa de conversión. El tiempo de cambio de un rollo a otro es de aproximadamente 0,3 minutos realizado de forma automática por la impresora.

### **2.2.3. Conversión**

Los rollos impresos pasan a la última etapa del proceso donde los mismos son convertidos a bolsas tubo o lámina en el área de sellado, a rollos jumbo que son cortados en rollos individuales destinados para clientes que tienen envasadoras (azúcar, sal, harina, avena, camarón) en el área de rebobinado, o a bolsas con perforaciones destinadas a plantaciones de banano en el área de corte y perforación.

Cada equipo en el proceso de conversión posee una capacidad máxima de producción que de 60.000 kg a 120.000 kg al mes y un consumo de energía específico que va desde 0,05 kW-h/kg a 0,20 kW-h/kg.

### **2.2.3.1. Sellado**

En lo que respecta al sellado de las bolsas, los rollos, ya sean impresos o no, se envían a las respectivas máquinas selladoras, cuya función principal es cortar y sellar. La planta tiene 11 selladoras de las cuales solo se usan 9, las otras 2 que elaboraban fundas tipo camiseta están fuera de servicio.

#### *Proceso*

La selladora está compuesta por un desbobinador, rodillos de soporte de la película, rodillos de tiro, el bloque sellador, bandas del transportador, rodillos apiladores, una mesa transportadora y ojo electrónico.

El rollo de película pasa a través de los rodillos de tiro, rodillos de soporte de la película y las bandas transportadoras hasta el bloque sellador, el cual funciona a base de calor y lo hace como si fuera una guillotina.

Cuando el cabezal del bloque sellador entra en contacto con un rodillo, se produce el corte y sellado de la película plástica, dando forma a las bolsas. Estas bolsas son luego recogidas por los rodillos apiladores y transferidas a la mesa transportadora de manera individual. A medida que las bolsas se acumulan en la mesa, un contador, previamente configurado por el operador, supervisa la cantidad de bolsas formadas. Una alarma suena cuando se alcanza el número especificado, indicando al operario que es momento de retirar ese paquete de bolsas y preparar el proceso para la siguiente serie.

Como se mencionó, el cabezal funciona con calor y tiene que estar a una temperatura que oscila entre los 193,3 °C y 248,8 °C, dependiendo del tipo de película que se va a cortar. Si la temperatura es menor no sella y, si es mayor quema la película y el material se pega al cabezal del sellador.

### ***Procedimiento***

Se solicita a la bodega de productos en proceso la cantidad de rollos que se va a sellar en el turno. El operador de sellado enciende la máquina y pone a calentar el bloque sellador luego de lo cual ubica un rollo en el centro del desbobinador y lo pasa a través de los rodillos de tiro y los rodillos de soporte de la película hasta el boque sellador. Luego, en la pantalla de programación, coloca los parámetros de la bolsa a sellar, la velocidad de la máquina y la cantidad de apilado.

Una vez que se alcanza la temperatura del cabezal del sellador el operador comienza el proceso de sellado. Cada pila de 100 bolsas es despejada automáticamente por la mesa transportadora hacia el operario quien las ubica en paquetes, que son luego colocados en sacos hasta alcanzar la cantidad de bolsas requerida por saco. Posteriormente, los sacos son cosidos, pesados en una balanza electrónica, etiquetados y puestos en el respectivo pallet para su posterior entrega a la bodega de productos terminados. El tiempo de cambio de un rollo a otro es de aproximadamente 3 minutos realizado de forma manual por el operador (personal de la planta) del equipo.

#### **2.2.3.2. Rebobinado**

La rebobinadora es una máquina que permite el reajuste de las dimensiones de un rollo de película. Esto es, se introduce un rollo de película de grandes dimensiones en la máquina y se extraen bobinas más pequeñas, las cuales se pueden configurar de acuerdo a su longitud y ancho. Una rebobinadora cuenta con un eje desbobinador, una guía automática, el rodillo de presión, rodillos estáticos, rodillos de ranura, cuchillas y ejes embobinadores.

### ***Proceso***

En lo que respecta al rebobinado, este proceso básicamente consta de dos etapas, en la primera se realiza el corte de la película impresa para darle las medidas requeridas por el cliente y a continuación se embobina la película con las nuevas medidas.

En el rodillo desbobinador se coloca un rollo Jumbo y se lo hace pasar por una serie de rodillos y la lámina es cortada por medio de discos o cuchillas de corte, los cuales se

colocan sobre un rodillo de acuerdo con la medida deseada, obteniéndose rollos individuales con la tensión necesaria para ser usados en las envasadoras.

### ***Procedimiento***

Se solicita a la bodega de productos en proceso la cantidad de rollos que se va a rebobinar en el turno. El operador ubica un rollo en el centro del eje desbobinador, luego de lo cual pasa la película por los rodillos de traslado y cuadra las cuchillas de acuerdo a la orden de producción. Posteriormente, procede a halar la película manualmente hasta los embobinadores delanteros, cuadrando el rollo que está en la parte posterior de la máquina con el ojo electrónico de la guía automática.

En el panel de control, el operador programa la cantidad de metros que tendrá cada rollo y luego da velocidad a la máquina. Una vez que se obtiene la longitud deseada, el operador saca los rollos, los pesa, embala, etiqueta y los coloca en el pallet respectivo. Una vez terminado el turno entrega los rollos elaborados a la bodega de productos terminados. Al igual que en el equipo anterior, el cambio de rollos lo realiza el operador de la unidad de forma manual, proceso que insume un tiempo de 3 minutos, aproximadamente.

#### **2.2.3.3. Corte y Perforación**

En esta área se utiliza una máquina cortadora que es alimentada por 5 rollos a la vez en forma de tubo y, a través de un contador de metros, se enrolla y corta a la medida deseada, luego de lo cual la máquina para y se desenrolla en paquetes de 100 bolsas. Estas pasan inmediatamente a una perforadora mecánica y luego, son dobladas y colocadas en sacos para su embalaje. Dependiendo del cliente, la perforación puede ser de 3, 6, 10 o 13mm. Esta área cuenta con 3 perforadoras mecánicas y dos cortadoras mecánicas. De forma similar, la operación de cambio de rollos se realiza manualmente con un tiempo estimado de aproximadamente 3 minutos.

### **2.3. Control de Calidad de los Productos**

La planta cuenta también con un laboratorio de control de calidad para la realización de las pruebas necesarias que indican si los productos que se están elaborando cumplen con todos los estándares de calidad y con los requisitos establecidos y aprobados por los clientes.



Dos pruebas principales de control de calidad que se realizan en esta planta son el índice volumétrico de fluidez y la resistencia al impacto.

### 2.3.1. Índice Volumétrico de Fluidez

El índice de fluidez (*IFM*) es un indicador utilizado en el área de control de calidad que permite controlar las propiedades reológicas y calidad de las resinas (materia prima) termoplásticas y, por tanto, estudiar el comportamiento de los plásticos en los diferentes procesos de producción. Este índice ha sido aceptado como una muestra de la habilidad de una materia prima para fluir, siendo además una medida cualitativa de la degradación termomecánica (Sangurima y Maldonado, 2018).

El índice de fluidez es una medida de la capacidad de flujo de una resina termoplástica y se define como la cantidad de material (en gramos) que fluye a través del orificio de un dado capilar en un lapso de 10 minutos, bajo condiciones controladas de presión y temperatura estándares. Los estándares utilizados son las normas ASTM D 1238 (Xu y col., 2020), DIN 53735, JIS K7210, ISO R 1133. El procedimiento de esta prueba se detalla en los siguientes párrafos.

Inicialmente, se enciende el equipo y se programa la temperatura requerida para el ensayo (190°C) según lo establece la norma ASTM D 1238. Para verificar que se alcanzó la temperatura para este procedimiento, se coloca un termómetro en el equipo. Seguidamente, se introduce la resina (materia prima en forma de pellets) en el extremo superior de un tubo que posee la unidad y se coloca un cilindro cuyo peso dependerá del tipo de materia prima que se analiza.

Después, se mueve la platina del extremo inferior del mismo tubo, para luego, ejercer presión con el cilindro de modo que el plástico fluya como en forma de un fideo durante un tiempo de 10 minutos. Finalmente, se pesa el plástico fundido en una balanza. En la Fig. 2.2, se muestra el equipo para pruebas de índice de fluidez que emplea la planta de estudio.

A pesar de que el índice de fluidez es definido empíricamente y tiene ciertas limitaciones, sigue siendo uno de los parámetros más populares en la industria de plásticos para distinguir diversos grados de polímeros (Sangurima y Maldonado, 2018).



Fig. 2.2 Equipo para pruebas de índice de fluidez  
Fuente: Compañía de Plásticos, Año 2018

En la caracterización de los plásticos, se emplean dos tipos de índices de fluidez, que son el índice de fluidez másico y el índice de fluidez volumétrico. Considerando que el índice de fluidez se refiere al flujo volumétrico de un material, entonces la caída de fluidez se reporta como índice de fluidez volumétrico (*IFV*), debido a la mayor densidad de los polímeros fundidos. Este parámetro de control de calidad se lo representa por medio de la siguiente fórmula (Leung, 2009):

$$IFV = \frac{IFM}{\rho} = \frac{\frac{g}{10 \text{ min}}}{\frac{g}{\text{cm}^3}} = \frac{\text{cm}^3}{10 \text{ min}} \quad (2.1)$$

### 2.3.2. Resistencia al Impacto

La resistencia al impacto es una característica de calidad que permite determinar la tenacidad de diferentes películas plásticas. Existen diferentes pruebas que se utilizan para determinar la resistencia al impacto. La prueba estándar que se utiliza comúnmente es la ASTM D 256 (Patterson y col., 2019), el ensayo de impacto Izod con muesca, que utiliza un péndulo oscilante para verificar la calidad de un material.

La planta en estudio usa la prueba ASTM D 1709 (Macas y Salazar, 2017), el ensayo de impacto al dardo. Como su nombre lo indica se utiliza un dardo que cae desde una cierta altura e impacta las películas plásticas bajo condiciones específicas. En la Fig. 2.3, se muestra el equipo para pruebas de impacto que se utiliza.



Fig. 2.3 Equipo para impacto al dardo  
Fuente: Compañía de Plásticos, Año 2018

El procedimiento de esta prueba es el siguiente. Inicialmente, se revisa que el equipo este nivelado observando que la burbuja dentro del visor del equipo esté centrada. Luego, se coloca la película plástica de 1 metro obtenida del proceso de extrusión entre los anillos sujetadores superiores e inferiores del equipo.

Después, se estima un peso inicial ( $W_0$ ) que, generalmente, comprende entre 0,05 kg hasta 2 kg aproximadamente, y una distancia de impacto que va desde la película plástica sujeta por los anillos hasta una altura de 0,66 m (según la norma ASTM D 1709), desde donde se dejará caer el dardo para comenzar la prueba.

Si la muestra se rompe se registra el resultado usando una  $X$  para denotar la falla y se disminuye la masa del dardo por 0,005 kg; pero, si no se rompe, entonces se registra el resultado usando un círculo para denotar la no falla y se aumenta el peso en 0,005 kg al dardo y se continua con la prueba.

Se repite este proceso hasta tener 20 caídas del dardo en toda la película plástica. Después de la última caída, se cuenta el número total ( $N$ ) de fallas ( $X$ ). Si  $N$  es igual a 10, la prueba termina. Si  $N$  es menor que 10, la prueba sigue hasta que  $N$  sea igual a 10. Si  $N$  es superior a 10, sigue la prueba hasta que el número de caídas no rotas sea igual a 10.

En el Anexo C, se muestran ejemplos de las hojas de cálculo donde se registra la prueba de impacto al dardo de los productos. Para calcular el peso (kg) de la muestra se registra bajo ( $ni$ ) el número total de  $X$  por cada peso del dardo, contando solamente las últimas 10  $X$  durante la prueba. Enseguida, se ingresan en ( $i$ ) números enteros 0, 1, 2, etc., para cada ingreso ( $ni$ ), esto es, se coloca 0 para el peso del dardo más bajo, luego, 1 para el siguiente peso del dardo, y así sucesivamente. Después se registra el producto de ( $i$ ) por ( $ni$ ).

Luego, se suman los ( $ni$ ) y se ingresa el resultado como  $N$  que, por el procedimiento descrito, siempre será 10. Luego, se suman los productos ( $i \times ni$ ) y su resultado se lo registra como  $A$ . Se ingresa  $W_o$  y  $DW$  como el incremento uniforme de 0,005 kg. Según la norma ASTM D 1709 (Macas y Salazar, 2017), se obtiene el peso final ( $W_F$ ) en kilogramos mediante la siguiente fórmula:

$$W_F = W_o \left[ DW \left( \frac{A}{N} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2.2)$$

Para calcular la energía ( $J/m^2$ ) de la muestra se divide el resultado formado por el producto entre el peso de la muestra (kg), la altura de caída del dardo (m) y el factor de conversión 9,8 (correspondiente al valor de la aceleración gravitatoria), para el área de la muestra que se utiliza para la prueba.

#### 2.4. Operación de la Planta

La planta opera 24 horas al día, 7 días a la semana con 2 turnos de 12 horas por día.

Esta planta elabora una determinada cantidad de productos de acuerdo con los pedidos y fechas de entregas establecidos por los clientes. A medida que ingresan los pedidos a la planta, el departamento de Servicios al Cliente se encarga de generar la orden de producción, que indica las especificaciones de la bolsa tales como medidas (largo, ancho y espesor), cantidad y tipo de materia prima (alta densidad, baja densidad o baja densidad lineal), cantidad de aditivos, cantidad y colores de tintas, número de perforaciones y cantidad de bolsas y, para el caso de bolsas lámina envasadora, la cantidad de rollos.

La orden de producción pasa al departamento de planificación donde se asignan las órdenes a las unidades de proceso. Dependiendo de los requerimientos de la bolsa a procesar y las especificaciones de las unidades de cada etapa del proceso (capacidad de operación, velocidad de procesamiento, materia prima en extrusión y colores en impresión), se deriva dicho producto a una determinada unidad en cada etapa. Por ejemplo, una bolsa tipo lámina de banano se puede elaborar en las extrusoras 4 y 6.

La orden de producción y programación de las máquinas se la entregan al departamento de producción para la elaboración del producto de acuerdo con lo planificado. Las órdenes pasan por la primera etapa de procesamiento (extrusión), para luego ir a la siguiente etapa, ya sea impresión (bolsas impresas) o conversión (bolsas sin imprimir).

Existen órdenes (productos) que no llevan logotipo de impresión, por tanto, no pasan por todas las etapas de procesamiento, sino solo por dos de ellas (extrusión y conversión).

En cada cambio de área de procesamiento, en este caso, de extrusión a impresión y de impresión a conversión, los productos se envían a una bodega temporal con su respectiva orden de ingreso. El tiempo que pasen allí dependerá de la disponibilidad de equipos para seguir el proceso.

Una vez obtenido el rollo plástico de un producto en la etapa de extrusión, se corta un metro de rollo de ese producto y es entregado a control de calidad para verificar que el producto que se está elaborando cumpla con todos los estándares de calidad y con los requisitos establecidos y aprobados por el cliente. Como se describió anteriormente, dos de los métodos que se emplean en esta planta para controlar la calidad de los productos son el índice de fluidez y la prueba de impacto al dardo que determina la resistencia de diferentes películas plásticas. Una vez que una orden cumple todos los requisitos de calidad, se envía al cliente tan pronto como sea posible.

Después de varios años de baja producción debido a la disminución de la exportación de banano del principal cliente de la empresa, se tomó como prioridad la captación de nuevos clientes en esta área y en el mercado local.

**CAPÍTULO 3**  
**MODELO MATEMÁTICO**

### 3.1. Definición del Problema

La planta bajo estudio consta de  $S$  etapas de procesamiento (extrusión, impresión y conversión), donde un total de  $I$  órdenes deben ser procesadas en  $U$  unidades de producción durante un horizonte de programación  $H$ . En cada etapa de procesamiento  $s$ , se encuentra un determinado número de unidades  $U_s$  y cada unidad  $u$  procesa un determinado conjunto de órdenes  $I_u$ . Dado que la planta elabora tanto bolsas impresas como sin imprimir, existen órdenes que no pasan por todas las etapas de procesamiento. Por esta razón, se define un subconjunto  $I_s$  que indica las órdenes  $i$  que se procesan en la etapa  $s$ . La Fig. 3.1 muestra un esquema general de la operación de la planta.

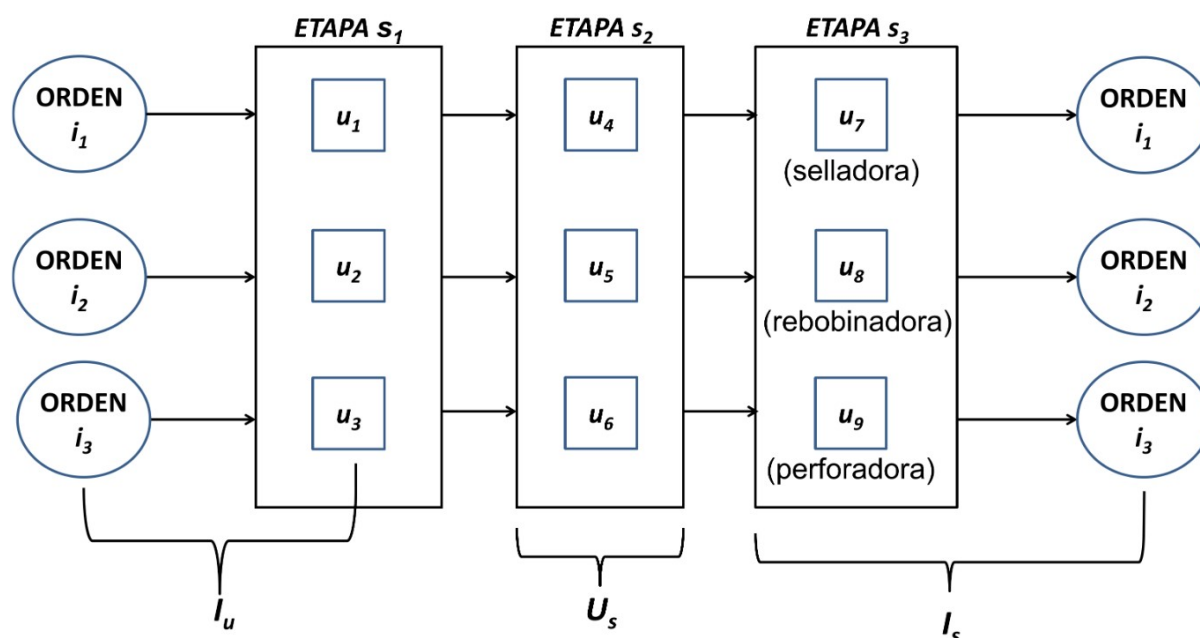


Fig. 3.1 Esquema generalizado multietapa de la operación de la planta

Cada orden  $i$  es un producto diferente (es decir, un tipo de bolsa) que se fabrica de acuerdo con las especificaciones solicitadas por los clientes, tales como materias primas  $m \in M_i$ , aditivos  $a \in A_i$  y, si se trata de una bolsa impresa, los tipos de tintas  $k \in K_i$  utilizados. Además, la longitud  $Lb_i$ , el ancho  $Ab_i$  y el espesor de la bolsa  $Eb_i$  y el número de bolsas  $Nb_i$ , así como los porcentajes de materia prima  $m$ ,  $PM_{mi}$ , y de aditivo  $a$ ,  $PA_{ai}$ , que se deben usar en cada orden  $i$ , son considerados datos del problema. A continuación, se detallan algunos parámetros adicionales requeridos en el modelo que se calculan a partir de estos datos básicos.

El peso de una bolsa de la orden  $i$ ,  $Qb_i$ , se calcula como el producto entre el volumen de la misma ( $Lb_i \times Ab_i \times Eb_i$ ) y la densidad del material  $De_i$ , considerado un 5% de desperdicio, tal como se expresa en la Ec. (3.1). Mediante la Ec. (3.2) se obtiene el peso total a extruir para la orden  $i$ ,  $QT_i$ , definido por el producto entre el peso de la bolsa  $Qb_i$  y el número total de bolsas  $Nb_i$  solicitadas por el cliente. El peso de un metro de rollo,  $Qm_i$ , se obtiene en la Ec. (3.3) al multiplicar el ancho del rollo  $Ar_i$  por el espesor del rollo  $Er_i$  y la densidad  $De_i$ .

$$Qb_i = 1.05 Lb_i Ab_i Eb_i De_i \quad \forall i \in I \quad (3.1)$$

$$QT_i = Qb_i Nb_i \quad \forall i \in I \quad (3.2)$$

$$Qm_i = Ar_i Er_i De_i \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

La cantidad de materia prima  $m$  empleada en la orden  $i$ ,  $MP_{mi}$ , se define en la Ec. (3.4) como el producto entre el porcentaje de materias primas,  $PM_{mi}$ , y el peso total extruido,  $QT_i$ , mientras que la cantidad de aditivo  $a$  de una orden  $i$ ,  $AD_{ai}$ , se determina con la Ec. (3.5) como el producto entre el porcentaje de aditivos,  $PA_{ai}$ , y el peso total extruido,  $QT_i$ . Cabe aclarar que, la suma de los porcentajes de materia prima y de aditivos de una orden  $i$  es igual a 1.

$$MP_{mi} = PM_{mi} QT_i \quad \forall m \in M_i, i \in I \quad (3.4)$$

$$AD_{ai} = PA_{ai} QT_i \quad \forall a \in A_i, i \in I \quad (3.5)$$

En la Ec. (3.6), la cantidad total de la materia prima  $m$ ,  $ToMP_m$ , utilizada durante el horizonte de programación  $H$  se calcula como la suma de las cantidades parciales de esa materia prima empleadas para elaborar las diferentes órdenes  $i$ . Por otra parte, la cantidad total de aditivo  $a$ ,  $ToAD_a$ , se determina como la suma de las cantidades parciales del aditivo que se añaden en la elaboración de las órdenes tal como se expresa en la Ec. (3.7). Todas las órdenes deben ser entregadas en una fecha límite  $dd_i$  conocida que, generalmente, es de 7 días.

$$ToMP_m = \sum_i MP_{mi} \quad \forall m \in M \quad (3.6)$$

$$ToAD_a = \sum_i AD_{ai} \quad \forall a \in A \quad (3.7)$$



En la etapa de impresión ( $s = 2$ ), se consume una determinada cantidad de tinta para generar el logotipo que identifica a un cliente específico. En la Ec. (3.8) se obtiene el consumo de tinta  $k$  en una orden  $i$ ,  $Co_{ki}$ , en función del consumo máximo de tinta  $Comax_{ki}$  de un rollo de orden  $i$ , el peso total a extruir para la orden  $i$ ,  $QT_i$ , y el peso total admisible máximo para un rollo,  $PTMAX$ .

$$Co_{ki} = \frac{(Comax_{ki} QT_i)}{PTMAX} \quad \forall i \in I_{s_2}, k \in K_i \quad (3.8)$$

La Ec. (3.9) corresponde al consumo total de tinta,  $ToCo_k$ , que se obtiene como la suma de todas las cantidades parciales de tintas  $k$  empleadas en las bolsas impresas.

$$ToCo_k = \sum_{i \in I_{s_2}} Co_{ki} \quad \forall k \in K \quad (3.9)$$

Los datos básicos para las unidades de procesamiento son la capacidad máxima de producción,  $CAP_u$ , el consumo específico de producción en una unidad  $u$ ,  $CEP_u$ , el tiempo de cambio de un rollo,  $TCr_u$ , y el peso máximo permisible de un rollo plástico,  $PTMAX$ , obtenido en la primera etapa de procesamiento  $s = 1$  (extrusión).

Las principales asunciones para la formulación del modelo matemático, las cuales son típicas para este tipo de problemas, considerando tiempo continuo, se detallan a continuación:

- ✓ Existe un número fijo de unidades en cada etapa de procesamiento que operan en paralelo.
- ✓ Las unidades de procesamiento en cada etapa no son idénticas, ya que varían según la marca, el modelo, número de serie y año de fabricación, tipo de materia prima utilizada (extrusión), cantidad de colores (impresión) y tipo de bolsa (conversión).
- ✓ Una unidad no puede procesar más de una orden a la vez y una orden no puede ser procesada por más de una unidad al mismo tiempo.
- ✓ No hay restricciones de recursos, mano de obra o materiales, durante la producción de las órdenes.

- ✓ Se dispone de una bodega de almacenamiento intermedio después de cada etapa de procesamiento sin restricciones de capacidad ni influencia en el tiempo de procesamiento de las órdenes.
- ✓ Cualquier mantenimiento preventivo se llevará a cabo fuera del horizonte de programación.

El objetivo del problema consiste en encontrar el programa detallado de operaciones en la planta, de forma tal que determine:

- ✓ La asignación de órdenes a una unidad específica en cada etapa de procesamiento
- ✓ La secuencia de procesamiento de las órdenes en cada equipo disponible
- ✓ El tiempo de producción de una bolsa
- ✓ La velocidad de procesamiento de cada orden en cada unidad
- ✓ Los tiempos de inicio y finalización del procesamiento de cada orden en todas las etapas
- ✓ El número, diámetro y peso de cada rollo en la etapa de extrusión
- ✓ Los índices de calidad
- ✓ El consumo de energía en la planta
- ✓ Los costos, ingresos y beneficios netos de la producción

### **3.2. Formulación del Modelo Matemático**

El modelo de optimización del proceso de producción de bolsas plásticas durante un horizonte de programación conocido, que respete las pautas enumeradas en las secciones anteriores, se puede representar matemáticamente a través de:

- ✓ Conjuntos de índices que representan las etapas, órdenes, unidades, materias primas, aditivos y tintas de la planta bajo estudio, descritos anteriormente.

- ✓ Subconjuntos de índices que representan el dominio sobre el cual se aplican determinadas restricciones.
- ✓ Datos vinculados a las especificaciones de las órdenes, de las unidades, a los precios de las materias primas, ingresos, costos y datos adicionales de la planta.
- ✓ Parámetros vinculados a las especificaciones de las órdenes, consumos, costos e ingresos.
- ✓ Variables binarias vinculadas a la asignación de órdenes, a la primera orden a ser procesada y a la secuencia de procesamiento de las órdenes en una etapa.
- ✓ Variables enteras vinculadas al número de rollos de las órdenes.
- ✓ Variables continuas vinculadas a los tiempos y velocidades de procesamiento, capacidades de producción, tiempos de inicio y finalización de producción de las órdenes.
- ✓ Un conjunto de ecuaciones expresadas en función de las variables continuas y discretas que representan las diferentes restricciones operativas.
- ✓ Una función objetivo o criterio de evaluación que establece la calidad del programa de operaciones generado.

A continuación, se presenta el modelo completo de la planta bajo estudio. En el Anexo A se detalla la nomenclatura utilizada en la formulación del mismo.

### 3.2.1. Restricciones del Problema

#### a) Asignación de órdenes a equipos en cada etapa

Con el fin de asignar órdenes a unidades, se define la siguiente variable binaria:

$$W_{iu} = \begin{cases} 1 & \text{si la orden } i \text{ se asigna a la unidad } u, \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La Ec. (3.10) indica que, si una orden  $i$  debe ser procesada en una etapa  $s \in S$ , entonces ésta debe ser asignada exactamente a una unidad  $u$  en esa etapa  $s$ . Es necesario señalar que, la sumatoria en la última expresión se realiza sobre los elementos de la intersección de los

conjuntos  $U_i$  y  $U_s$ , es decir, solo sobre aquellas unidades que pueden procesar la orden  $i$  y que pertenecen a la etapa  $s$  (ver Tabla A.2).

$$\sum_{u \in (U_i \cap U_s)} W_{iu} = 1 \quad \forall i \in I_s, \forall s \in S \quad (3.10)$$

b) Cada unidad  $u$  puede procesar sólo una orden  $i$  primero.

De todas las órdenes asignadas a una unidad  $u$ , una sola orden  $i$  puede ser procesada en primer lugar. Para seleccionar esta orden, se define la variable binaria  $Z_{iu}$  como sigue:

$$Z_{iu} = \begin{cases} 1 & \text{si la orden } i \text{ se procesa primero en la unidad } u, \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La restricción (3.11) expresa matemáticamente que una única orden  $i$  puede ser procesada en primer lugar en una unidad  $u$ . La igualdad será verdadera para aquellas unidades que procesen al menos una orden.

$$\sum_{i \in I_u} Z_{iu} \leq 1 \quad \forall u \in U \quad (3.11)$$

c) Relación entre las variables  $W_{iu}$  y  $Z_{iu}$

La restricción (3.12) denota que una orden  $i$  puede ser procesada primero en una unidad  $u$  solamente si es asignada a esa unidad.

$$W_{iu} \geq Z_{iu} \quad \forall i \in I_u, \forall u \in U \quad (3.12)$$

d) Cada orden  $i$  puede tener como máximo una orden  $j$  como precedente inmediata

Si un par de órdenes  $(i, j)$  se asignan a una misma unidad en una determinada etapa  $s$ , entonces el concepto de precedencia específica si la orden  $j$  se procesa antes o después de la orden  $i$ . Para establecer el orden de procesamiento, se define la variable binaria  $X_{ijs}$  que satisface:

$$X_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{si la orden } j \text{ se procesa justo después de la orden } i \text{ en la misma unidad de la etapa } s, \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Existen dos posibilidades para una orden  $i$  procesada en una etapa  $s$ . Esto es, se procesa primero en alguna unidad o sigue a la orden  $j$  en la misma unidad en la etapa  $s$ . Estas dos posibilidades se expresan en la Ec. (3.13), en la cual, la sumatoria en el primer término se realiza sobre el subconjunto de posibles predecesores de la orden  $i$  en la etapa  $s$ ,  $PP_{is}$ , e indica si la orden  $i$  se procesa después de alguna orden  $j$  en una misma unidad de la etapa, mientras que el segundo término indica si la orden  $i$  se procesa primera en alguna unidad de esa etapa.

$$\sum_{j \in PP_{is}} X_{jis} + \sum_{u \in (U_i \cap U_s)} Z_{iu} = 1 \quad \forall i \in I_s, \forall s \in S \quad (3.13)$$

e) Cada orden  $i$  puede tener como máximo una orden  $j$  sucesiva directa

La restricción (3.14) indica que una orden  $i$  no puede tener más de una orden sucesiva en la etapa  $s$ . Aquí, la sumatoria se realiza sobre el subconjunto de órdenes que podrían suceder a la orden  $i$  en la etapa  $s$ ,  $PS_{is}$ . La desigualdad denota que la última orden procesada en una etapa no puede tener ninguna orden sucesora.

$$\sum_{j \in PS_{is}} X_{jis} \leq 1 \quad \forall i \in I_s, \forall s \in S \quad (3.14)$$

f) Secuenciación de órdenes consecutivas en una misma unidad en cada etapa

Esta restricción implementada en la Ec. (3.15) denota que órdenes contiguas se procesan en una misma unidad en una etapa de procesamiento. Si una orden  $i$  se asigna a una unidad  $u$ , y si una orden  $j$  sigue a la orden  $i$  en una misma etapa de procesamiento  $s$ , entonces la orden  $j$  también se asignará para ser procesada en la unidad  $u$  en dicha etapa de procesamiento  $s$ :

$$W_{iu} + \sum_{\substack{v \in (U_i \cap U_s) \\ v \neq u}} W_{jv} + X_{ijs} - 2 \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in PP_{is}, \forall u \in U_i \cap U_s, \forall s \in S \quad (3.15)$$

g) Determinación del tiempo de procesamiento de una bolsa en cada etapa.

El tiempo necesario para procesar una bolsa de la orden  $i$  en una unidad  $u$  en cada etapa de procesamiento  $s$ ,  $Tb_{ius}$ , se calcula a través de las Ecs. (3.16) a (3.18).

En la etapa de extrusión ( $s = 1$ ), el tiempo de procesamiento está en función de la longitud de la bolsa,  $Lb_i$ , la velocidad de procesamiento de la orden en la unidad  $u$  de la etapa,  $Pr_{ius}$ , un

término correspondiente al desperdicio ocurrido en esta etapa,  $DEX$ , y la variable de asignación de la orden  $i$  a la unidad  $u$ ,  $W_{iu}$ , según se expresa en la Ec. (3.16).

$$Tb_{ius} Pr_{ius} = (1 + DEX) Lb_i W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, s = 1 \quad (3.16)$$

El tiempo para procesar una bolsa de la orden  $i$  en las etapas de impresión ( $s = 2$ ) y conversión ( $s = 3$ ) se calculan con las Ecs. (3.17) y (3.18), respectivamente. En la Ec. (3.17) se incluye el factor de impresión de la bolsa,  $Filb_i$ .

$$Tb_{ius} Pr_{ius} = Filb_i Lb_i W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, s = 2 \quad (3.17)$$

$$Tb_{ius} Pr_{ius} = Lb_i W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, s = 3 \quad (3.18)$$

Estas tres últimas restricciones son no lineales debido al producto de las variables continuas  $Tb_{ius}$  y  $Pr_{ius}$ . Para garantizar que, si la orden  $i$  se asigna a la unidad  $u$  en una etapa  $s$ , se compute el tiempo correspondiente al procesamiento de una bolsa, es necesario incluir las restricciones (3.19) a (3.21).

$$Tb_{ius} \leq TTup_{ius} W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, \forall s \in S \quad (3.19)$$

$$Pr_{ius} \leq Prup_{ius} W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, \forall s \in S \quad (3.20)$$

$$Pr_{ius} \geq Prlo_{ius} W_{iu} \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, \forall s \in S \quad (3.21)$$

Si la orden  $i$  no se asigna a la unidad  $u$ , el valor de la variable  $Tb_{ius}$  debe ser nulo. La Ec. (3.19) garantiza esta última condición y resulta redundante cuando la orden se procesa en la unidad  $u$ . Por otra parte, las Ecs. (3.20) y (3.21) imponen una cota inferior y superior para la velocidad de procesamiento de una orden en una unidad. Los parámetros  $Prlo_{ius}$  y  $Prup_{ius}$  representan la cota inferior y superior de la variable  $Pr_{ius}$  que relajan las desigualdades cuando la orden  $i$  no se asigna a la unidad  $u$  en una etapa  $s$ .

#### h) Determinación del tiempo total de procesamiento

La Ec. (3.22) corresponde al cálculo del tiempo total de procesamiento de una orden  $i$  en una unidad  $u$ ,  $TT_{ius}$ , en función del tiempo  $Tb_{ius}$  y del número de bolsas  $Nb_i$  requeridas.

$$TT_{ius} = Tb_{ius} Nb_i \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, \forall s \in S \quad (3.22)$$

i) Determinación de la capacidad de producción de una orden en una unidad

La Ec. (3.23) determina la capacidad de producción de la unidad  $u$  para la orden  $i$ ,  $Qp_{iu}$ , en función de la velocidad de procesamiento,  $Pr_{ius}$ , y el peso de un metro de rollo,  $Qm_i$ . A su vez, en la Ec. (3.24) se establece que la variable  $Qp_{iu}$  no puede superar la capacidad máxima de producción de la unidad,  $CAP_u$ .

$$Qp_{iu} = Pr_{ius} Qm_i \quad \forall i \in I_s, \forall u \in U_s, \forall s \in S \quad (3.23)$$

$$Qp_{iu} \leq CAP_u \quad \forall i \in I_u, \forall u \in U \quad (3.24)$$

j) Determinación del peso del rollo de una orden

En cada unidad de la primera etapa de procesamiento (extrusión), se obtiene como producto intermedio un rollo con un espesor y ancho que cumple con la orden de producción solicitada por el cliente.

La Ec. (3.25) calcula el peso de un rollo de la orden  $i$ ,  $Qr_i$ , que se elabora en la etapa de extrusión ( $s = 1$ ) en función del volumen del rollo de forma cilíndrica y la densidad del material a procesar. En esta expresión,  $Dr_i$  es el diámetro del rollo de la orden  $i$  y el parámetro  $DEM$  es el diámetro del carrete bobinador.

Cada extrusora  $u$  tiene un diámetro máximo de rollo de la orden  $i$  que puede procesar, por lo tanto, en la Ec. (3.26) se establece que el peso del rollo,  $Qr_i$ , no puede exceder un peso máximo permisible,  $PTMAX$ .

Debido a que sólo una unidad  $u$  en la primera etapa procesará a la orden  $i$  y dado a que no se conoce cuál es dicha unidad, entonces se incluyen las restricciones (3.27) a (3.29) para indicar la unidad  $u$  donde se elabora la orden  $i$ . Las Ecs. (3.27) y (3.28) establecen una cota inferior ( $DEM$ ) y superior ( $Drup_{iu}$ ) para el diámetro del rollo de una orden en una unidad.

$$Qr_i = \frac{\pi Ar_i}{4} (Dr_i^2 - DEM^2) De_i \quad \forall i \in I_s, s = 1 \quad (3.25)$$

$$Qr_i \leq PTMAX \quad \forall i \in I \quad (3.26)$$

$$Dr_{iu} \leq Drup_{iu} W_{iu} \quad \forall i \in I_s, u \in U_s, s = 1 \quad (3.27)$$

$$Dr_{iu} \geq DEM W_{iu} \quad \forall i \in I_s, u \in U_s, s = 1 \quad (3.28)$$

$$Dr_i = \sum_{u \in (U_i \cap U_s)} Dr_{iu} \quad \forall i \in I_s, s = 1 \quad (3.29)$$

k) Determinación del número de rollos de una orden

En la Ec. (3.30) se obtiene el número de rollos,  $Nr_i$ , en función del peso total extruido,  $QT_i$ , y el peso de un rollo,  $Qr_i$ , de una orden  $i$  que se elabora en la primera etapa de procesamiento. Cabe resaltar que el número de rollos es una variable entera en el modelo por lo que se tienen términos bilineales en esta ecuación.

$$QT_i = Qr_i Nr_i \quad \forall i \in I \quad (3.30)$$

l) Determinación del tiempo total de cambio de todos los rollos

La Ec. (3.31) determina el tiempo total de cambio de todos los rollos de la orden  $i$  en la unidad  $u$ ,  $TTC_{iu}$ , en función del número de rollos,  $Nr_i$ , y el tiempo de cambio de un rollo en cada unidad de procesamiento,  $TCr_u$ .

$$TTC_{iu} = Nr_i TCr_u \quad \forall i \in I_u, u \in U \quad (3.31)$$

Esta restricción garantiza que si la orden  $i$  se asigna a la unidad  $u$  se compute el tiempo correspondiente al cambio de todos los rollos de la orden. Para poder expresar esta relación, se utilizan las restricciones (3.32) y (3.33) del tipo big-M:

$$TTC_{iu} \leq Nr_i TCr_u + TTCup_{iu} (1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_u, u \in U \quad (3.32)$$

$$TTC_{iu} \geq Nr_i TCr_u - TTCup_{iu} (1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_u, u \in U \quad (3.33)$$

donde el parámetro  $TTCup_{iu}$  representa la cota superior de la variable  $TTC_{iu}$  que relaja las desigualdades cuando la orden  $i$  no se asigna a la unidad  $u$ . La Ec. (3.34) impone una cota superior para el tiempo total de cambio de rollos.

$$TTC_{iu} \leq TTCup_{iu} W_{iu} \quad \forall i \in I_u, u \in U \quad (3.34)$$



m) Relación entre los tiempos de inicio de etapas consecutivas en las que se procesa una misma orden

La Ec. (3.35) denota que el tiempo de inicio de una orden  $i$  en la etapa  $r$ ,  $TS_{ir}$ , debe ser mayor que el tiempo de inicio de esa orden en la etapa anterior  $s$ ,  $TS_{is}$ , más su tiempo de procesamiento en una unidad  $u$  y tiempo total de cambio de todos los rollos de la orden  $i$  en la etapa anterior  $s$ . El conjunto  $NS_{si}$  contiene a las etapas subsiguientes a la etapa  $s$  en el procesamiento de la orden  $i$ .

$$TS_{ir} \geq TS_{is} + \sum_{u \in (U_i \cap U_s)} (TT_{ius} + TTC_{iu}) \quad \forall s \in S_i, r = NS_{si} \quad (3.35)$$

n) Relación entre los tiempos de inicio de órdenes consecutivas en una misma etapa

Si la orden  $j$  se procesa inmediatamente después de la orden  $i$  en la etapa  $s$  ( $X_{ijs} = 1$ ), entonces su tiempo de inicio  $TS_{js}$  debe ser mayor que el tiempo de inicio de la orden  $i$ ,  $TS_{is}$ , más su tiempo de procesamiento en una unidad  $u$  y tiempo total de cambio de todos los rollos de la orden  $i$  en la misma etapa  $s$ , además del tiempo requerido para el cambio de la orden  $i$  a la orden  $j$ ,  $C_{ij}$ . El tiempo de cambio es independiente de la unidad, y es sólo una función de las órdenes  $i$  y  $j$ . La restricción (3.36) del tipo big-M garantiza lo anterior:

$$TS_{js} \geq TS_{is} + \sum_{u \in (U_i \cap U_s)} (TT_{ius} + TTC_{iu}) + C_{ij} - BM_1(1 - X_{ijs}) \quad \forall i \in I_s, j \in PS_{is}, s \in S \quad (3.36)$$

donde  $BM_1$  es un número suficientemente grande que convierte en redundante esta restricción y permitirá que el tiempo de inicio de la orden  $j$  pueda tener cualquier valor en caso de que la orden  $j$  no se asigne como la inmediata posterior a la orden  $i$ .

o) Determinación del tiempo final de ejecución de las órdenes en cada etapa

La Ec. (3.37) define el tiempo final de ejecución de una orden  $i$  como el tiempo de inicio  $TS_{is}$  de una orden  $i$  más su tiempo de procesamiento en una unidad  $u$  y tiempo total de cambio de todos los rollos de la orden  $i$  en la etapa  $s$ .

$$TF_{is} = TS_{is} + \sum_{u \in (U_i \cap U_s)} (TT_{ius} + TTC_{iu}) \quad \forall i \in I_s, s \in S \quad (3.37)$$

p) Determinación del tiempo total de procesamiento de una unidad

La Ec. (3.38) determina el tiempo total de procesamiento de la unidad  $u$ ,  $TTX_u$ , sumando los tiempos de procesamiento de todas las órdenes.

$$TTX_u = \sum_{i \in (I_u \cap I_s)} TT_{ius} \quad \forall u \in U \quad (3.38)$$

q) Determinación de la tardanza

La Ec. (3.39) determina la tardanza de cada orden  $i$   $D_i$ , definida como la diferencia positiva entre el tiempo de finalización real de una orden  $i$  y su fecha límite de entrega.

$$D_i \geq TS_{is} + \sum_{u \in U_s} (TT_{ius} + TTC_{iu}) - dd_i \quad \forall i \in I_s \quad (3.39)$$

r) Tiempo requerido para el procesamiento de todas las órdenes o “*makespan*”

El *makespan*,  $MK$ , calculado en la Ec. (3.40), es definido como el tiempo total requerido para la finalización de una serie de órdenes  $i \in I$ , desde el principio del horizonte de programación hasta el tiempo de finalización de la última orden.

$$MK \geq TF_{is} \quad \forall i \in I_s, s = 3 \quad (3.40)$$

s) Determinación de la calidad de los productos

Las Ecs. (3.41) y (3.46) introducen el concepto de calidad en el modelo. Como se mencionó anteriormente, para el caso de bolsas plásticas se dispone de dos medidas principales de control de calidad: el índice volumétrico de fluidez  $MVR$  y la prueba de impacto al dardo  $IMP$ . Estas medidas dependen de la velocidad de procesamiento,  $Pr_{ius}$ , y de la velocidad del tornillo de extrusión,  $Nt_u$ , que a su vez afectan el tiempo de producción de las órdenes.

En las Ecs. (3.42) a (3.45) y (3.47) a (3.50) se utiliza la representación big-M que garantiza que los índices se determinen si la orden  $i$  se procesa en una unidad  $u$  de la etapa  $s_1$ ; de lo contrario las restricciones son redundantes debido a los grandes valores de las BM antes mencionadas.

Los parámetros  $BM_2$ ,  $BM_3$ ,  $MVRlo$  e  $IMPllo$  representan las cotas superiores e inferiores para las variables de los índices de calidad que relajan las desigualdades cuando la orden  $i$  no se asigna a la unidad  $u$  en la primera etapa.

✓ Determinación del índice de fluidez de una orden en una unidad

$$MVR_{iu} = 28.8 + 0.0857 Nt_u - 0.0812(Qp_{iu} 60) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.41)$$

$$MVR_{iu} \leq 28.8 + 0.0857 Nt_u - 0.0812(Qp_{iu} 60) + BM_2(1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.42)$$

$$MVR_{iu} \geq 28.8 + 0.0857 Nt_u - 0.0812(Qp_{iu} 60) - BM_2(1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.43)$$

$$MVR_{iu} \leq BM_2 \cdot W_{iu} \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.44)$$

$$MVR_{iu} \geq MVRlo_{iu} \cdot W_{iu} \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.45)$$

✓ Determinación de la resistencia de impacto de una orden en una unidad

$$IMP_{iu} = 14.5 - 0.012 Nt_u + 0.0150(Qp_{iu} 60) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.46)$$

$$IMP_{iu} \leq 14.5 - 0.012 Nt_u + 0.0150(Qp_{iu} 60) + BM_3(1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.47)$$

$$IMP_{iu} \geq 14.5 - 0.012 Nt_u + 0.0150(Qp_{iu} 60) - BM_3(1 - W_{iu}) \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.48)$$

$$IMP_{iu} \leq BM_3 \cdot W_{iu} \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.49)$$

$$IMP_{iu} \geq IMPllo_{iu} \cdot W_{iu} \quad \forall i \in I_1, u \in U_1 \quad (3.50)$$

t) Determinación de la cantidad de energía consumida en la planta

La Ec. (3.51) determina la cantidad de energía eléctrica  $EP_u$  que se consume en la producción de las órdenes en función del tiempo  $TT_{ius}$  y capacidad de procesamiento de la orden  $i$  en la unidad  $u$  y el consumo energético específico de cada unidad,  $CEP_u$ .

La Ec. (3.52) corresponde al consumo total de energía  $EPT$  como la suma de todas las cantidades parciales de energía  $EP_u$  de todas las unidades.

$$EP_u = \sum_{i \in (I_u \cap I_s)} (Qp_{iu} TT_{ius}) CEP_u \quad \forall u \in U \quad (3.51)$$

$$EPT = \sum_u EP_u \quad (3.52)$$

u) Determinación de los costos de la planta

Las Ecs. (3.53) a (3.55) determinan costos incurridos para la producción de los órdenes. Específicamente, el costo de la materia prima  $m$ ,  $CMP_m$ , expresado en función del precio de materia prima  $PMP_m$  y la cantidad total de materia prima  $ToMP_m$ , el costo del aditivo  $a$ ,  $CAD_a$ , calculado multiplicando el precio de aditivo  $PAD_a$  y la cantidad total de aditivo  $ToAD_a$ , el costo de cada tinta  $CTIN_k$  en función del precio de tinta  $PTIN_k$  y la cantidad total de tinta  $ToCo_k$

$$CMP_m = PMP_m ToMP_m \quad \forall m \in M \quad (3.53)$$

$$CAD_a = PAD_a ToAD_a \quad \forall a \in A \quad (3.54)$$

$$CTIN_k = PTIN_k ToCo_k \quad \forall k \in K \quad (3.55)$$

En las Ecs. (3.56) a (3.58) se calculan algunos costos tales como el costo total por compra de materia prima  $CTMP$ , costo por compra de aditivos  $CTAD$ , y el costo total de la tinta  $CTIN$ .

$$CTMP = \sum_{m \in M} CMP_m \quad (3.56)$$

$$CTAD = \sum_{a \in A} CAD_a \quad (3.57)$$

$$CTIN = \sum_{k \in K} CTIN_k \quad (3.58)$$

El costo por el consumo de energía eléctrica en cada unidad  $u$ ,  $CEN_u$ , está expresado en la Ec. (3.59) mediante el producto del precio de la energía  $PEP$  por la cantidad de energía que se consume en cada unidad,  $EP_u$  en la producción de los órdenes.

$$CEN_u = PEP EP_u \quad \forall u \in U \quad (3.59)$$

El costo total de energía eléctrica,  $CTEN$ , y el costo de personal,  $CTPE$ , se calculan en las Ecs. (3.60) y (3.61), respectivamente. Este último se expresa en función de la cantidad de

personal  $NPE$  que trabaja en la planta, el salario básico del personal  $SPE$  y el tiempo final  $MK$ . El valor de 31.680 representa el factor de conversión del tiempo de minutos a mes.

$$CTEN = \sum_u CEN_u \quad (3.60)$$

$$CTPE = \frac{NPE \text{ SPE } MK}{31680} \quad (3.61)$$

El costo total de la planta,  $CTOT$ , se determina con la Ec. (3.62) donde cada uno de sus términos fueron determinados con anterioridad en el modelo.

$$CTOT = CTMP + CTAD + CTTIN + CTEN + CTPE \quad (3.62)$$

v) Determinación de los ingresos de la planta

Algunos ingresos de la planta pueden ser calculados independientemente de los resultados del modelo debido a que dependen de datos del problema y de otros parámetros obtenidos previamente. Así, tenemos que los ingresos por la venta de cada orden  $i$ ,  $IN_i$  se obtienen como el producto entre el precio de venta  $PV_i$  y el peso total a extraer de cada orden  $i$ ,  $QT_i$  mediante la Ec. (3.63). Luego, con la Ec. (3.64) se obtiene el ingreso total como la suma de los ingresos por cada orden.

$$IN_i = PV_i QT_i \quad \forall i \in I \quad (3.63)$$

$$INT = \sum_{i \in I} IN_i \quad (3.64)$$

El peso total de producción,  $PTOT$ , corresponde a la suma de los pesos totales extraídos de todas las órdenes  $i$ , tal como lo expresa la Ec. (3.65).

$$PTOT = \sum_{i \in I} QT_i \quad (3.65)$$

El peso total de producción de bolsas de supermercado  $PTBS$  corresponde a la suma de los pesos totales extraídos de las órdenes  $i$  que existen dentro del subconjunto de órdenes  $IBS \subset I$  que corresponden a las bolsas de supermercado. Esto se expresa en la Ec. (3.66).

$$PTBS = \sum_{i \in IBS} QT_i \quad (3.66)$$

El peso total de producción de bolsas de banano  $PTBB$  corresponde a la resta del peso total de producción y el peso total de producción de bolsas de supermercado, tal como se expresa en la Ec. (3.67).

$$PTBB = PTOT - PTBS \quad (3.67)$$

Los ingresos por los diferentes tipos de productos que elabora la planta como bolsas de banano y bolsas de supermercado se determinan con las Ecs. (3.68) y (3.69). Para el caso del ingreso por bolsas de banano,  $INBB$ , viene definido en función el peso total  $PTBB$  de bolsas de banano, el peso total  $PTOT$  de producción de todas las órdenes y el ingreso total  $INT$ , mientras que el ingreso por bolsas de supermercado,  $INBS$ , viene definido en función el peso total  $PTBS$  de bolsas de supermercado, el peso total  $PTOT$  de producción de todas las órdenes y el ingreso total  $INT$ .

$$INBB = \frac{PTBB}{PTOT} INT \quad (3.68)$$

$$INBS = \frac{PTBS}{PTOT} INT \quad (3.69)$$

w) Determinación del beneficio neto de la planta

La Ec. (3.70) determina el beneficio neto  $BEN$  de producción de todas las órdenes definido como la diferencia entre el ingreso total y el costo total de la planta.

$$BEN = INT - CTOT \quad (3.70)$$

### 3.2.2. Función Objetivo

La función objetivo del problema es el criterio de evaluación que permite identificar el mejor programa de operaciones de la planta. Para medir la calidad de cada *schedule* (o programa de producción) factible, en este trabajo de tesis se seleccionaron dos funciones objetivo que son comúnmente utilizadas en esta clase de ambientes de producción industrial,

donde se desea minimizar los tiempos incurridos en la elaboración de todas las órdenes en un dado horizonte. Por tanto, las funciones objetivo que se emplearán en este modelo son la minimización de la tardanza total y del *makespan*.

La Ec. (3.71) establece la primera función objetivo tardanza total, *TD*, definida como la suma de la tardanza de todas las órdenes.

$$\text{Min } TD = \sum_i D_i \quad (3.71)$$

La segunda función objetivo expresada en la Ec. (3.72) corresponde a la minimización del *makespan*, *MK*, definido como el tiempo total requerido para la finalización de una serie de órdenes calculado a través de la Ec. (3.40).

$$\text{Min } MK \quad (3.72)$$

### 3.3. Resumen de la Formulación

En síntesis, el modelo matemático final para la optimización de la producción de bolsas plásticas propuesto es un problema de programación mixto-entero no lineal (MINLP). La formulación presentada en este capítulo comprende las siguientes etapas integradas por diferentes grupos de ecuaciones:

- ✓ Etapa previa a la solución del modelo: esta etapa comprende a las Ecs. (3.1) a (3.9) que se utilizan para calcular parámetros adicionales que son requeridos por el modelo de optimización y que se obtienen a partir de los datos originales solicitados por el cliente.
- ✓ Etapa de optimización: esta etapa comprende a las Ecs. (3.10) – (3.30), (3.32) – (3.40), (3.42) – (3.45), (3.47) – (3.52), (3.71) y (3.72) que representan el modelo MINLP propuesto para resolver el problema planteado en esta tesis. El modelo consiste en minimizar la tardanza representada por la Ec. (3.71) o bien, el *makespan* representado en la Ec. (3.72) sujeto a las restricciones detalladas previamente junto con las cotas que puedan aplicarse.

- ✓ Etapa posterior a la solución del modelo: comprende las Ecs. (3.53) a (3.70) que se usan para calcular los costos e ingresos de la planta bajo estudio los que se pueden determinar haciendo uso del valor óptimo de las variables del modelo. Es decir, la evaluación de estas expresiones se realiza luego de que se ha obtenido la solución óptima del problema.

Los modelos MINLP son los más desafiantes desde el punto de vista de la resolución, debido a las complejidades de sus subclases como el entorno combinatorio de los programas mixto-enteros (MIP) y la dificultad para resolver los programas no lineales no convexos (NLP).

### 3.4. Implementación Computacional

El modelo propuesto fue implementado en el programa GAMS 24.1.3 (Brooke y col., 2012) en una computadora portátil marca DELL con procesador Intel(R) Core™ i7-6500CPU 2.59 GHz y 16 Gb de memoria RAM. El caso de estudio presentado se resolvió usando el *solver* adecuado para este tipo de programación MINLP, en este caso, los códigos BARON y SCIP.

Se utilizan los códigos BARON y SCIP con el propósito de determinar cuál de estos ofrece un mejor rendimiento global para el sistema de planificación de esta planta, optimizando las funciones objetivo definidas en las Ecs. (3.71) y (3.72). A continuación, se brinda una breve descripción de cada uno de estos *solvers* según sus respectivos manuales de usuario.

BARON es un *solver* de optimización comercial que se basa en el concepto de Ramificación y Acotamiento (*Branch and Bound*) para resolver problemas MINLP no convexos, garantizando la convergencia al óptimo global de modelos con un amplio espectro de funciones no-lineales bajo asunciones generales. Estas asunciones incluyen la disponibilidad de límites superiores e inferiores finitos en las variables y sus expresiones en el problema NLP o MINLP a resolver. BARON implementa algoritmos del tipo de ramificación y enlace mejorados con una variedad de propagación de restricciones y técnicas



de dualidad para reducir los rangos de las variables en el curso del algoritmo (Brooke y col., 2012).

SCIP (*Solving Constraint Integer Programs*) es un entorno para la programación entera restringida orientado a los expertos en programación matemática que desean tener un control total del proceso de solución y acceder a información detallada (Brooke y col., 2012). SCIP es un *solver* no comercial que combina técnicas de resolución y modelamiento provenientes de los campos de la programación con restricciones (CP, por sus siglas en inglés), la programación mixta-entera (MIP, por sus siglas en inglés) y la satisfactibilidad (SAT, por sus siglas en inglés). Cabe destacar que, la programación mixta-entera y la programación de restricciones tienen diferentes fortalezas: la primera usa relajaciones LP y planos de corte para proporcionar fuertes límites duales, mientras que la segunda puede manejar restricciones arbitrarias (no lineales) y usa la propagación para ajustar los dominios de las variables.

**CAPÍTULO 4**  
**RESULTADOS DEL CASO DE**  
**ESTUDIO**

#### 4.1. Introducción

En este capítulo se aplica el modelo de optimización desarrollado en el Capítulo 3 a un caso real (pedido de órdenes de producción) ocurrido en la planta de producción de bolsas plásticas ubicada en Ecuador. El objetivo operativo de estas plantas es completar en tiempo y forma las entregas de un conjunto de órdenes de bolsas plásticas comprometidas con los clientes. De allí que la elección de la función objetivo esté relacionada con la necesidad de minimizar los tiempos de producción en cada etapa de procesamiento. Por lo tanto, como se discutiera anteriormente surgen naturalmente como opciones para las funciones objetivo minimizar la tardanza (*TD*) o tiempo de retraso en la ejecución de las órdenes y el *makespan* (*MK*) o tiempo total requerido para completar todas las órdenes de producción.

Como se describió en el capítulo anterior, el modelo desarrollado para abordar este problema es de tipo mixto entero no-lineal (MINLP) y, el mismo, se implementa y resuelve utilizando el software GAMS. Una cuestión que pretende abordar esta tesis es de discernir si es posible resolver el problema con *solvers* no comerciales y comparar su rendimiento con los comerciales, de modo de poder hacer una recomendación a la empresa al respecto. En este sentido se decidió evaluar dos tipos de *solvers* diferentes que están disponibles en GAMS. En cuanto a los paquetes seleccionados, dentro de los comerciales, la justificación de la elección del código BARON, es que es el único algoritmo de optimización global disponible en la licencia del grupo de investigación que garantiza la convergencia finita al óptimo global en problemas de programación mixta entera no-lineal. Por su parte, como *solver* no comercial se seleccionó el paquete SCIP que implementa un algoritmo *branch-cut-and-price* para resolver diferentes tipos de problemas de optimización, principalmente, problemas de tipo MILP y MINLP. En principio, es de esperar que con BARON se obtengan mejores soluciones a expensas de mayores tiempos de ejecución, especialmente debido a la presencia de funciones no convexas. De todos modos, el *solver* BARON es ampliamente utilizado para problemas de tamaño acotado como el abordado en esta tesis, aunque queda pendiente dilucidar la practicidad que representa este *solver* en cuanto a los tiempos de cómputo requeridos para obtener la solución. Por otra parte, SCIP como *solver* local y no comercial disponible en el software GAMS, resultó adecuado para resolver el problema y, por ende, se usó para comparar los resultados con BARON, tanto en calidad de la solución como en tiempo de cómputo.

## 4.2. Caso de Estudio

En esta sección, se presenta un caso de estudio en el que se aplica la formulación MINLP desarrollada en el capítulo anterior. Este caso corresponde a un escenario operativo típico de la planta de bolsas plásticas descrita en la tesis y refiere a un conjunto de pedidos realizados durante la semana 3 del mes de marzo de 2018. Estos pedidos consisten en 10 órdenes de compra que engloban un total de 1.525.000 bolsas plásticas que deben entregarse en una semana ( $dd_i = 10,080$  minutos = 168 horas). En este caso particular, se utilizan 4 tipos de materias primas, 3 tipos de aditivos y 11 colores de tinta en la elaboración de las diferentes bolsas plásticas.

Las materias primas empleadas para producir las órdenes solicitadas son: polietileno de alta densidad ( $m_1$ ), polietileno de baja densidad ( $m_2$ ), polietileno lineal de baja densidad con copolímero metaloceno ( $m_3$ ) y polietileno de baja densidad con copolímero buteno ( $m_4$ ).

Los aditivos utilizados son: masterbach biflex ( $a_1$ ), insecticida usado para las plantaciones de banano; masterbach biodegradable ( $a_2$ ), pigmento aplicado para las bolsas de supermercado y pigmento blanco ( $a_3$ ). En cuanto a las tintas utilizadas para elaborar el logotipo de las bolsas, son las siguientes: blanco ( $k_1$ ), amarillo proceso ( $k_2$ ), azul proceso ( $k_3$ ), azul pantone 281 ( $k_4$ ), rojo proceso ( $k_5$ ), azul réflex ( $k_6$ ), amarillo pantone ( $k_7$ ), rojo 186C ( $k_8$ ), verde 361C ( $k_9$ ), verde 348 ( $k_{10}$ ) y negro ( $k_{11}$ ).

Todos los datos correspondientes a este caso de estudio se encuentran detallados en el Anexo B. En la Tabla B.1 se presenta la información básica sobre cada orden de producción, que consiste en lo siguiente: longitud, ancho y espesor de cada bolsa, fecha de entrega, factor de impresión de la bolsa, número de bolsas, ancho y espesor de cada rollo, peso de un metro de rollo, peso total a extruir y consumo máximo de tinta de una orden (para el caso de bolsas impresas).

En la Tabla B.2 se muestran los porcentajes de materia prima requeridos para elaborar cada orden, mientras que en la Tabla B.3 se indican los porcentajes de aditivos que deben ser incluidos en su elaboración.

Otros datos adicionales, como el porcentaje de desperdicio obtenido en la etapa de extrusión, el diámetro del carrete bobinador, los pesos totales permisibles de un rollo en las

extrusoras e impresoras, el precio de energía de producción de una unidad, la cantidad de personal que trabaja en la planta y el salario básico del personal, se incluyen en la Tabla B.4.

Asimismo, en la Tabla B.5 se especifica la capacidad de producción, el tiempo de cambio de rollo en una unidad de proceso y el consumo específico de energía en cada unidad al elaborar un pedido determinado.

La Tabla B.6 muestra la ruta de producción de cada orden en las diferentes etapas de procesamiento, donde un valor igual a 1 indica que la orden  $i$  se debe procesar en la etapa  $s$  y un espacio en blanco indica lo contrario.

La Tabla B.7 presenta la trayectoria de procesamiento de las órdenes en las diferentes unidades, donde un valor igual a 1 indica que la orden  $i$  se puede procesar en la unidad  $u$  y un espacio en blanco indica lo contrario. El tiempo requerido para el cambio de órdenes ( $C_{ij}$ ) se considera despreciable frente a los tiempos de procesamiento, por lo que se asumen iguales a 0.

La Tabla B.8 detalla las unidades que se encuentran en cada etapa de procesamiento, donde un valor igual a 1 indica que la unidad  $u$  pertenece a la etapa de procesamiento  $s$ . La Tabla B.9 indica la velocidad mínima y máxima de procesamiento de cada unidad.

Las especificaciones para los indicadores de calidad de los productos (índice volumétrico de fluidez y la resistencia al impacto) y para la velocidad del tornillo de cada extrusora se pueden encontrar en la Tabla B.10.

Los precios de venta de las órdenes incluidas en el caso de estudio se presentan en la Tabla B.11, mientras que en la Tabla B.12 se incluyen los precios de cada materia prima, aditivo y tinta utilizados en los productos requeridos. Estos datos, junto con el precio de la energía y la cantidad de personal, son necesarios para calcular las diferentes funciones de costo mencionadas en el Capítulo 3 de esta tesis.

En este caso de estudio, se producen dos tipos de bolsas ampliamente empleadas en el sector bananero: las bolsas de banano para exportación (tipo lámina) y las bolsas de banano

para protección del producto (tipo tubo). Además, se fabrica un tipo de bolsa de uso comercial, como las bolsas de supermercado.

En la Fig. 4.1, se muestra un esquema de todas las rutas de procesamiento alternativas de las órdenes de producción en las diferentes unidades de cada etapa de la planta. La misma información se presenta en forma más concisa en la Tabla 4.1.

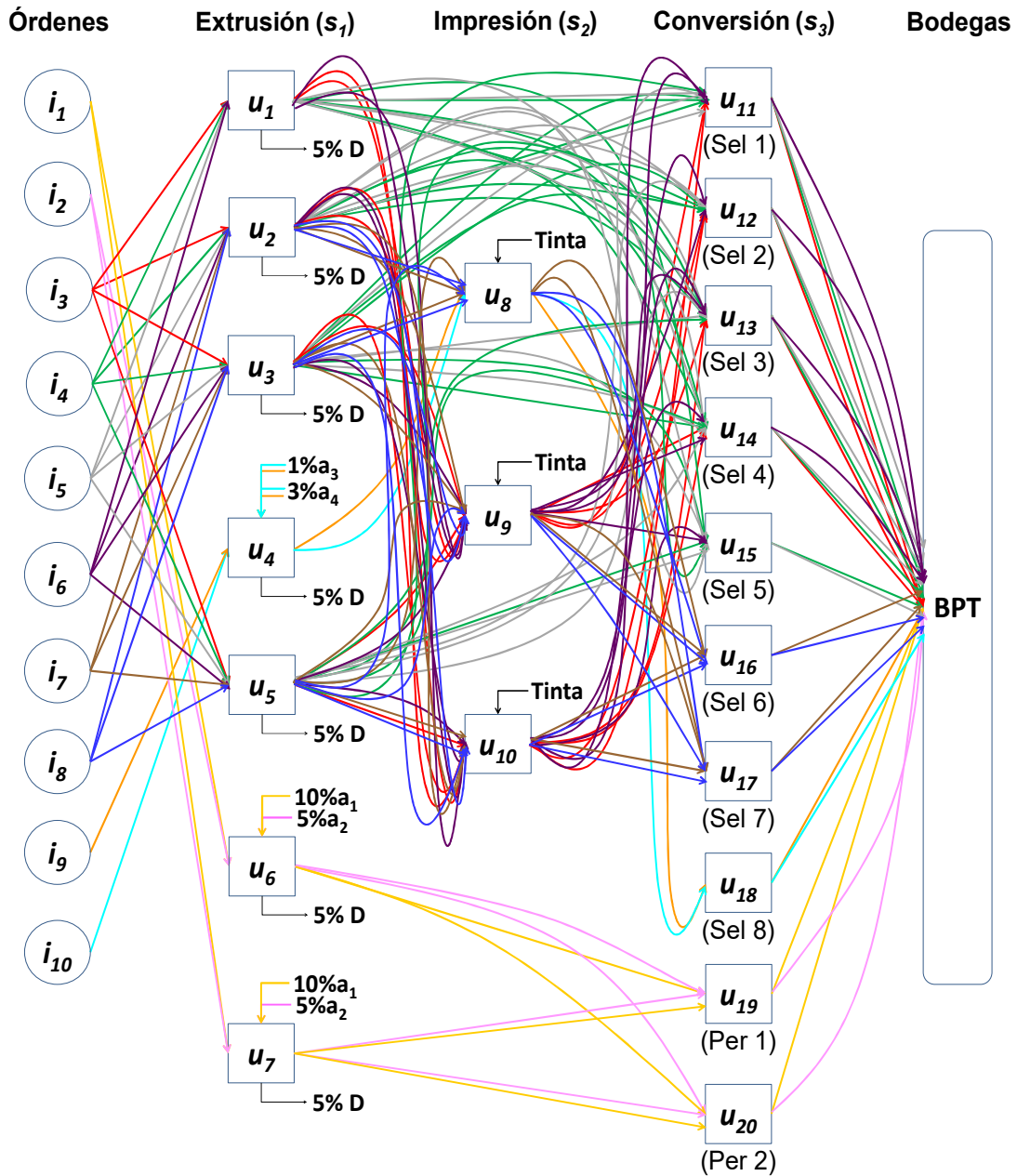


Fig. 4.1 Esquema de posibles rutas de las órdenes en la planta  
*i*: órdenes; *u*: unidades; *s*: etapas de proceso; D: Desperdicio; Sel: Selladoras; Per: Perforadoras; BPT: Bodega de producto terminado

Como se puede observar, existen órdenes que se pueden elaborar en más de un equipo en las diferentes etapas del proceso. Por ejemplo, la orden 1 (orden de compra sin requerimiento de impresión) se puede procesar en las extrusoras 6 o 7 y después pasar por las perforadoras 19 o 20, mientras que la orden 7 (orden impresa) se puede elaborar en las extrusoras 2, 3 o 5, pasando luego por las impresoras 8, 9 o 10 para ser finalmente convertida en bolsas plásticas en las selladoras 16 o 17.

**Tabla 4.1.** Rutas posibles de procesamiento de las órdenes en cada etapa del proceso

Orden	Etapas		
	$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	$u_6, u_7$		$u_{19}, u_{20}$
$i_2$	$u_6, u_7$		$u_{19}, u_{20}$
$i_3$	$u_1, u_2, u_3, u_5$	$u_9, u_{10}$	$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}$
$i_4$	$u_1, u_2, u_3, u_5$		$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}$
$i_5$	$u_1, u_2, u_3, u_5$		$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}$
$i_6$	$u_1, u_2, u_3, u_5$	$u_9, u_{10}$	$u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}$
$i_7$	$u_2, u_3, u_5$	$u_8, u_9, u_{10}$	$u_{16}, u_{17}$
$i_8$	$u_2, u_3, u_5$	$u_8, u_9, u_{10}$	$u_{16}, u_{17}$
$i_9$	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$
$i_{10}$	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$

Las órdenes 3, 6, 7, 8 (órdenes impresas) y 4, 5 (órdenes sin requisito de impresión) utilizan polietileno de baja densidad como materia prima y se elaboran a bajas velocidades de procesamiento debido a que este material es menos resistente. Por este motivo, los valores permitidos para la velocidad de procesamiento de estas órdenes están comprendidos entre 20 – 60 m/min en la primera etapa, entre 80 – 250 m/min en la segunda etapa y entre 20 – 110 m/min en la última etapa.

Por otra parte, las órdenes 1, 2 (órdenes sin impresión) y 9, 10 (órdenes impresas) requieren de polietileno de alta densidad para su elaboración, por lo que se pueden procesar a altas velocidades debido a que este material es más resistente. Por tanto, los valores de velocidad de procesamiento de estas órdenes están comprendidos entre 20 – 130 m/min en la primera etapa, 80 – 250 m/min para el caso de las órdenes con solicitud de impresión en la segunda etapa y 20 – 150 m/min en la última etapa.

Para disponer de una referencia que permita evaluar la calidad de los resultados de la aplicación del modelo MINLP desarrollado en la tesis, en la siguiente sección, se presenta el plan de producción de las 10 órdenes, tal como fue efectivamente realizado en la planta. Este plan de producción fue ejecutado de acuerdo al planeamiento establecido por el personal responsable del sector de producción.

### 4.3. Caso de Referencia: Planificación Realizada en Planta

Las Figs. 4.2 y 4.3 muestran el esquema de procesamiento y el diagrama de Gantt, respectivamente, del plan de producción realizado en la planta durante la tercera semana de marzo del año 2018. Se puede observar que la unidad 15, en la última etapa del proceso, fue la única que no se utilizó para la elaboración de las 10 órdenes requeridas. Esto es debido a que, como se mencionó previamente, la responsabilidad de la operación de la planta recae en el jefe de producción, por lo que es éste quien, en base a su experiencia, define el plan de producción asignando órdenes a unidades de proceso. En este caso decidió no emplear la unidad 15 dado que, a su criterio, con las unidades 11 a 14 se logra procesar todas las órdenes de bolsas tipo tubo de polietileno de baja densidad.

Para ejemplificar las decisiones tomadas por el personal responsable de la producción (jefe de producción), a continuación, se presentan las rutas correspondientes a tres de las órdenes requeridas (órdenes 1, 7 y 9). Se puede observar en las Figs. 4.2 y 4.3 que la orden 1, en la que se elaboran bolsas de banano tipo tubo, ingresa a la etapa de extrusión en la unidad 7 y una vez finalizado este proceso se transfiere inmediatamente a la selladora 20 de la última etapa. Por otra parte, la orden 7 (orden de bolsas de banano tipo lámina) se procesa en la extrusora 5, pasando luego por la impresora 8 para finalmente obtener la bolsa en la selladora 16 sin tiempos de espera entre etapas. Por último, la orden 9 (orden de bolsas de supermercado) se elabora en la extrusora 4 y, luego de un tiempo de espera, se envía a la impresora 8 para culminar su proceso en la selladora 18.



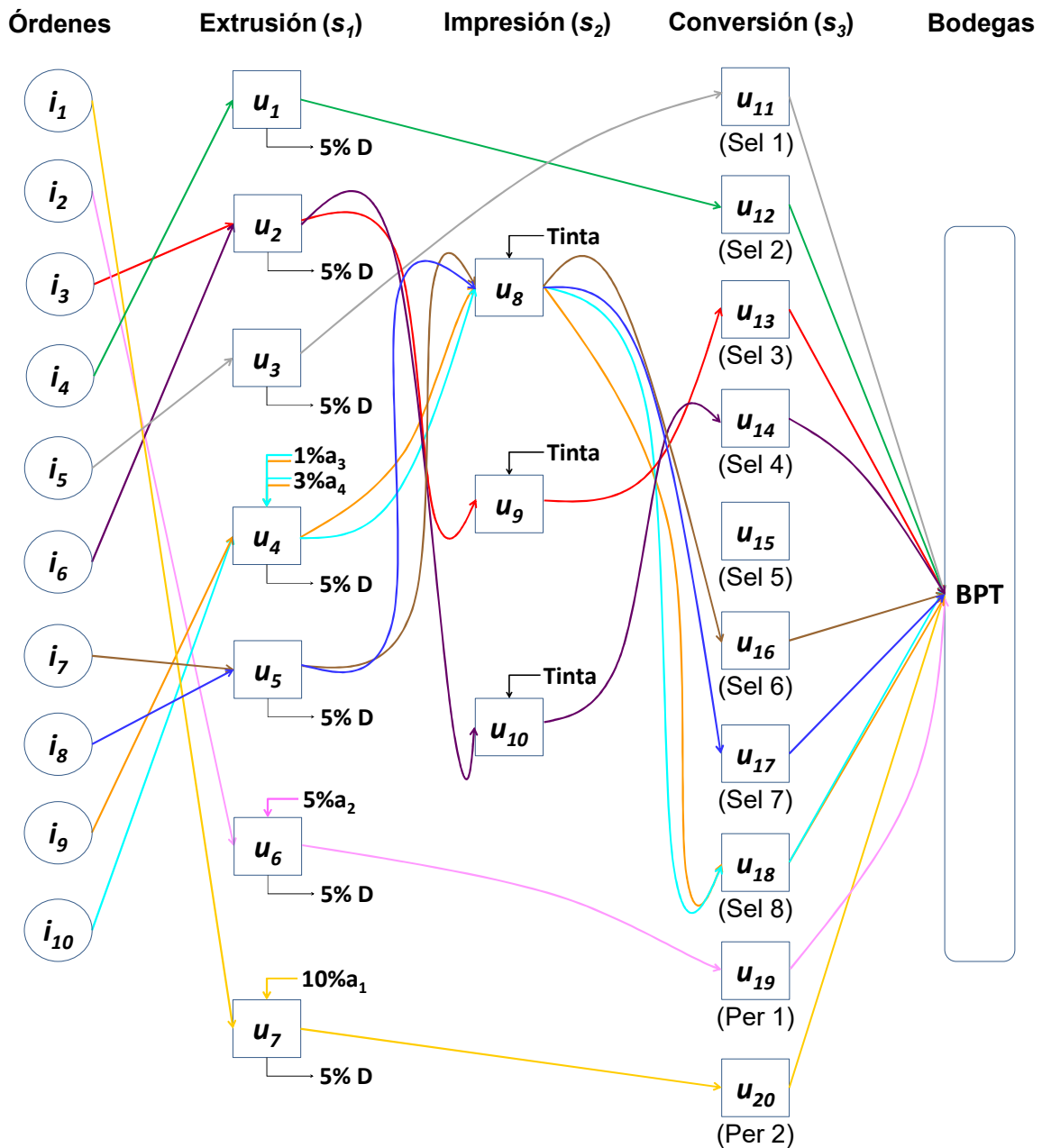


Fig. 4.2 Esquema de asignación de órdenes realizado por el jefe de producción en la semana 3 del mes de marzo del año 2018 para el caso de estudio

Respecto a los tiempos de demora para el procesamiento de las órdenes, en la Fig. 4.3 se puede apreciar que las órdenes 3, 6, 8, 9 y 10 tienen un tiempo de espera de 16,2 h (970 min), 16,7 h (1.000 min), 1,7 h (100 min), 56,7 h (3.400 min) y 40 h (2.400 min), respectivamente, antes de ser enviados a la etapa 2 del proceso. Por otro lado, las órdenes 3, 4, 8 y 10 poseen un tiempo de espera de 3,3 h (200 min), 3,7 h (220 min), 6,7 h (400 min) y 25 h (1.500 min) respectivamente, antes de ser procesadas en la etapa 3.

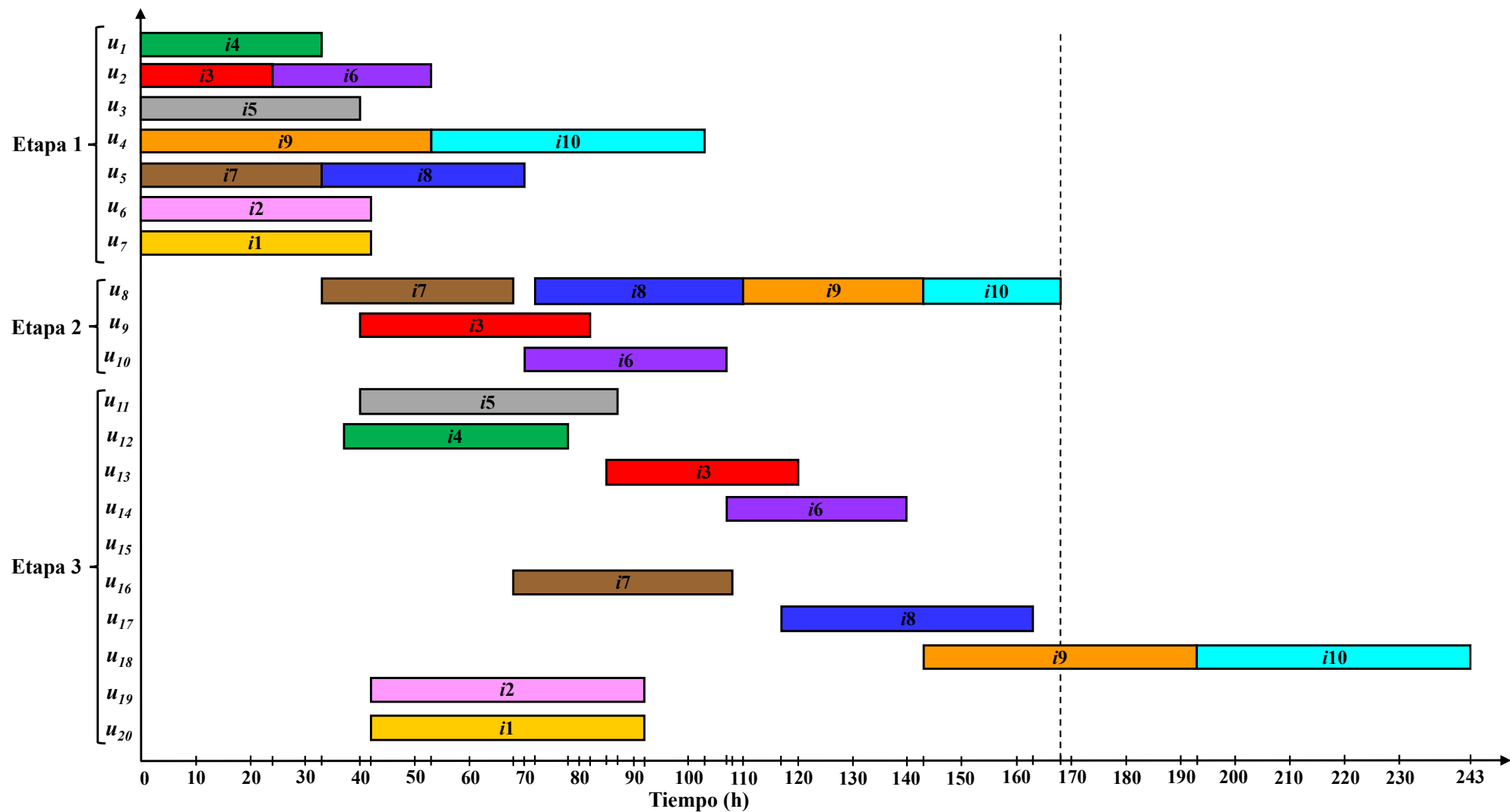


Fig. 4.3 Diagrama de Gantt del procesamiento de las órdenes elaboradas por el jefe de planta en la semana 3 del mes de marzo del año 2018

Finalmente, se observa que las órdenes 9 y 10 incurren en una demora de 25 h (1.520 min) y 75 h (4.520 min) respecto a la fecha límite de entrega pactada de 168 h (7 días), generando una tardanza total de 6.040 min (4 días). Asimismo, se muestra que el tiempo final de realización de la última orden es 243 h para cumplir con la entrega de un total de 1.525.000 bolsas plásticas.

La Tabla 4.2 presenta en detalle los valores para el diámetro, peso y número de rollos usados en planta para las 10 órdenes elaboradas.

**Tabla 4.2.** Especificaciones de los rollos para cada orden elaborada en planta

Orden	Planta		
	$Dr_i$ (m)	$Qr_i$ (kg)	$Nr_i$
$i_1$	0,456	120	16
$i_2$	0,456	120	13
$i_3$	0,509	175	10
$i_4$	0,465	145	12
$i_5$	0,444	140	17
$i_6$	0,509	175	10
$i_7$	0,462	120	7
$i_8$	0,462	120	7
$i_9$	0,420	120	11
$i_{10}$	0,423	120	9

En el diagrama de barras de la Fig. 4.4 se aprecia el consumo de energía eléctrica de las unidades utilizadas. Aquí se observa que, en la etapa de extrusión, la unidad 4 consumió la mayor cantidad de energía (5.007 kW-h), debido a que en esta unidad se procesaron todas las órdenes de bolsas de supermercado de PEAD (600.000) por un total de 2.399 kg. Por otra parte, en la etapa de impresión, es la unidad 8 la que presenta el mayor consumo energético (1.088 kW-h) ya que fue allí donde procesaron 3.993 kg en total correspondientes a las 4 órdenes impresas (órdenes 7, 8, 9 y 10) de mayor requerimiento en número de bolsas (1.100.000 en total). Finalmente, en la etapa de conversión, el pico de consumo se registró en la selladora 18 (842 kW-h) debido a que, al igual que lo ocurrido en la etapa de extrusión, se elaboraron todas las bolsas de supermercado en esta unidad. El consumo total de energía utilizada para la producción de todas las órdenes fue 17.792 kW-h. Cabe destacar que, el tiempo incurrido en la elaboración de estos productos fue de 11 días.

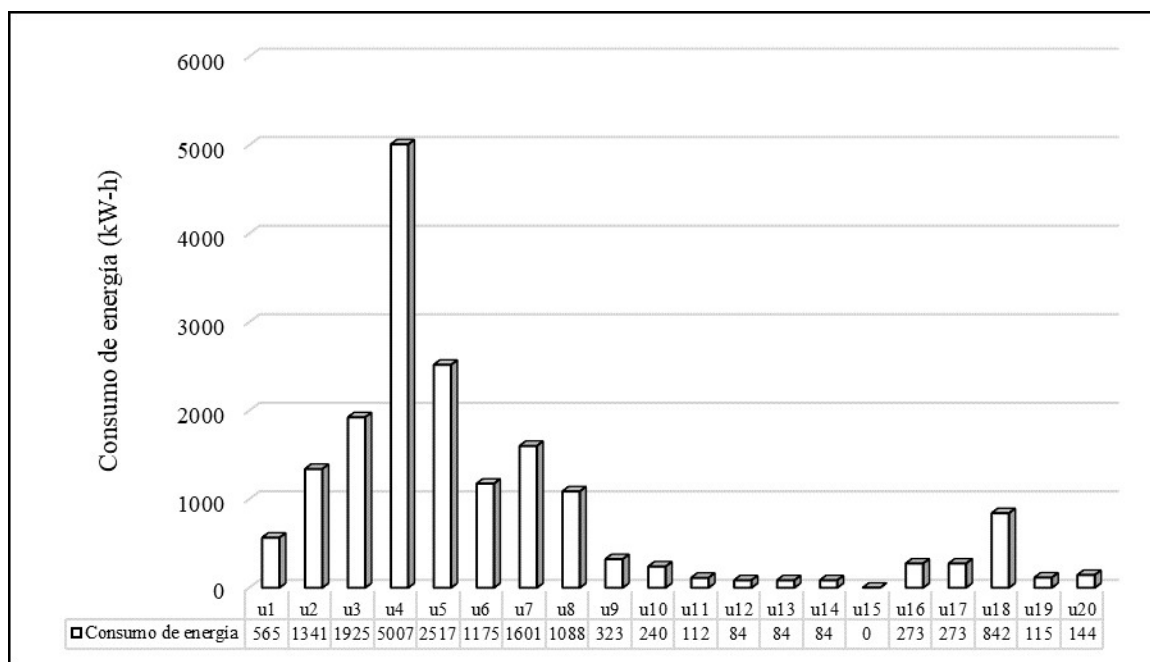


Fig. 4.4 Consumo de energía eléctrica en cada equipo de la planta en marzo 2018

Actualmente, la mayoría de los clientes de la planta son del sector bananero, debido a que la misma fue originalmente construida para satisfacer la demanda de embalaje de una exportadora bananera. No obstante, como se mencionó anteriormente, se están produciendo además bolsas de supermercado. Según se observa en la Fig. 4.5, los ingresos generados por las ventas de bolsas de banano (órdenes 1 - 8) ascendieron a \$40.388, mientras que para las bolsas de supermercado (órdenes 9 y 10) fueron de \$7.676. Los valores mencionados refieren a dólares estadounidenses, moneda oficial en Ecuador desde el año 2000.

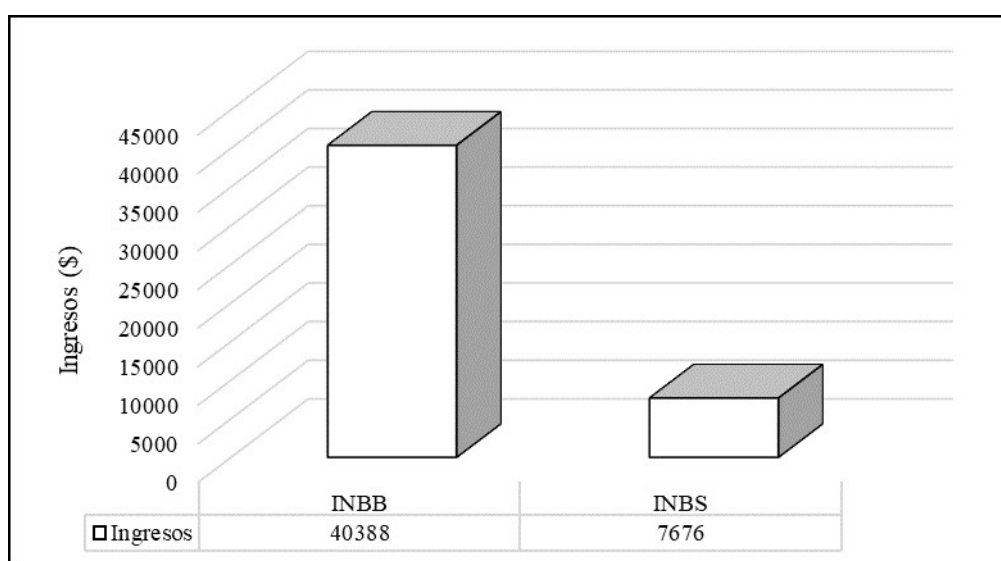


Fig. 4.5 Ingresos obtenidos en la planta discriminados por tipos de bolsas procesadas  
*INBB*: Ingresos por bolsas de banano (\$); *INBS*: Ingresos por bolsas de supermercado (\$)

En la Fig. 4.6, se presenta un detalle de los costos en dólares asociados al caso de referencia. Como se puede ver, el mayor gasto de \$19.761 corresponde a la compra de materia prima para la elaboración de las 10 órdenes requeridas (*CTMP*), al cual le sigue el costo del personal que trabaja en la planta que asciende a \$12.674. Lejos de estos valores se encuentran los costos asociados a la compra de aditivos empleados en las órdenes de polietileno de alta densidad (órdenes 1, 2, 9 y 10) por \$4.587 y al pago de la energía eléctrica por \$1.601. Finalmente, los \$430 corresponden a la compra de tinta necesaria para producir las órdenes con requerimiento de impresión (órdenes 3 y 6 a 10).

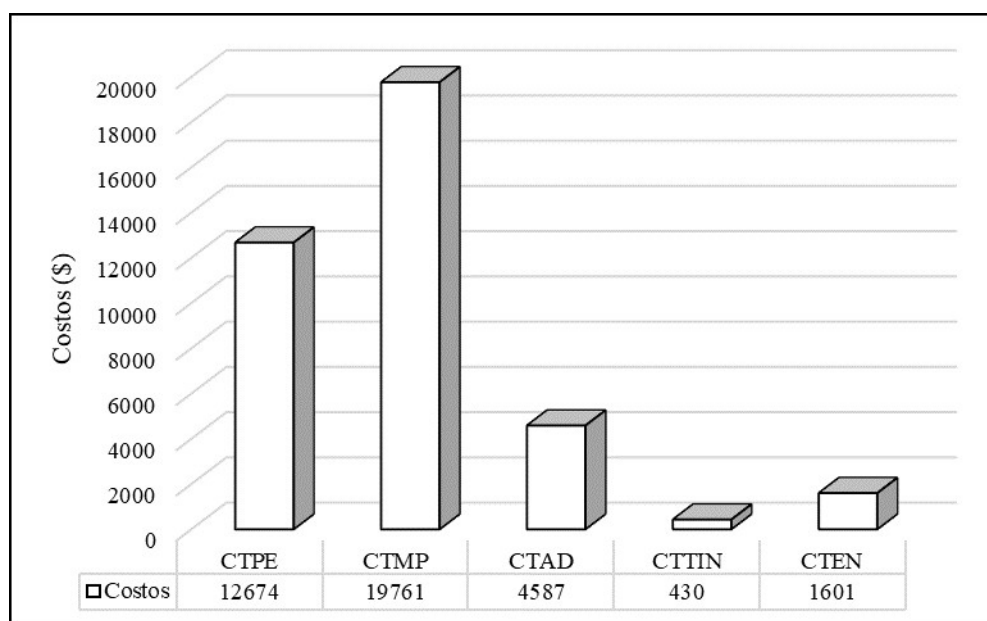


Fig. 4.6 Costos asociados al caso de estudio en marzo 2018

*CTPE*: Costo total del personal (\$); *CTMP*: Costo total de materia prima (\$); *CTAD*: Costo total de aditivo (\$); *CTTIN*: Costo total de tinta (\$); *CTEN*: Costo total de energía de producción (\$)

En la Fig. 4.7 se muestra el costo total de \$39.053, el ingreso total de \$48.064 y el beneficio total obtenido de \$9.011.

Hasta aquí se han presentado los resultados del plan de producción definido por el jefe de planta. En la próxima sección, se demuestra que el uso del modelo matemático desarrollado en esta tesis permite obtener un plan de producción con mejoras sustanciales en diferentes indicadores económicos y operativos. Para ello, se utilizan dos funciones objetivo alternativas: la minimización de la tardanza y la minimización del tiempo total requerido para la elaboración de las órdenes.

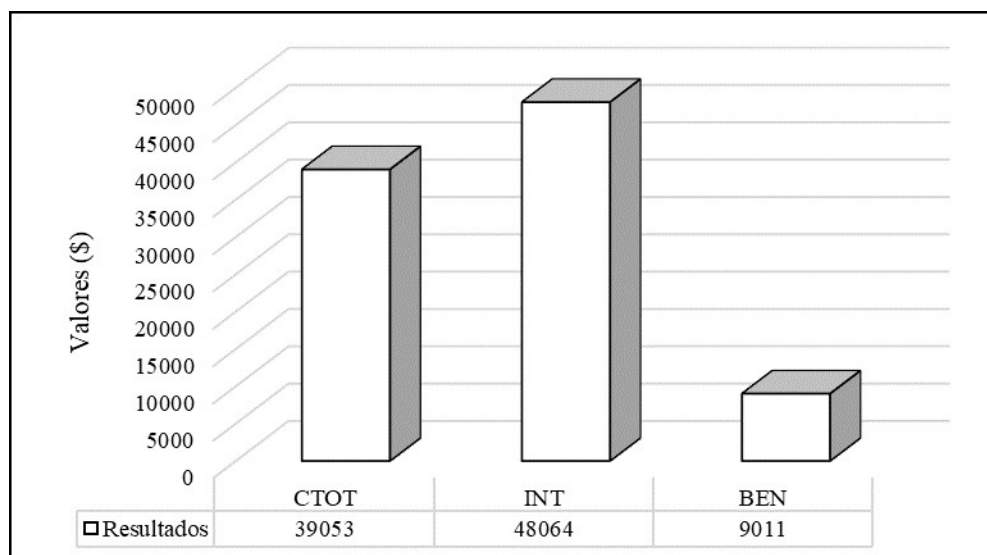


Fig. 4.7 Resultados económicos de la planta asociados al caso de estudio en marzo 2018  
*CTOT*: Costo total (\$), *INT*: Ingreso total (\$), *BEN*: Beneficio (\$)

#### 4.4. Resultados del Modelo MINLP Propuesto

##### 4.4.1. Minimizando la Tardanza (*TD*)

En esta sección, se presentan los resultados de la optimización del problema de *scheduling* del caso de estudio, utilizando el modelo MINLP propuesto con la función objetivo de minimizar la tardanza total (*TD*). Como se mencionó previamente, el modelo se implementa en GAMS 24.1.3 (Brooke y col., 2012), y la resolución se lleva a cabo usando tanto el código comercial BARON como el no comercial SCIP, que están incluidos en este software.

La formulación para el ejemplo resuelto incluye 777 variables continuas, 220 variables binarias y 1.574 restricciones. La solución óptima del problema encontrada por ambos *solvers* presenta una tardanza total nula ( $TD = 0$  h) por lo que cumple con las fechas de entrega pactadas con todos los clientes. Sin embargo, desde el punto de vista computacional, el tiempo empleado por el código BARON en encontrar la solución es de 46,53 s de CPU, mientras que la solución con el código SCIP se obtiene en 0,47 s de CPU. Cabe recalcar que el *solver* BARON requiere más tiempo de cómputo dado que provee una solución global del modelo MINLP, característica indicada en la sección 3.4 del Capítulo 3.

Las Figs. 4.8 y 4.9 ilustran la ruta de procesamiento de las diferentes órdenes en la solución obtenida usando los *solvers* BARON y SCIP, respectivamente. En ambas figuras se

puede ver que se emplean 4 de las 7 extrusoras disponibles en la primera etapa, las 3 impresoras en la segunda y 7 unidades en la tercera etapa. Asimismo, se observa que la totalidad de las bolsas tipo tubo de PEAD requeridas en las órdenes 1 y 2 se procesan en una única extrusora, esto es, en la unidad 7 en la Fig. 4.8 (código BARON) y en la unidad 6 en la Fig. 4.9 (código SCIP), a diferencia de lo que fue realizado en planta donde estas órdenes se repartieron en esas 2 extrusoras. En lo que refiere a las órdenes de PEBD, en la Fig. 4.8 se observa que, a diferencia de lo realizado en planta, 4 (órdenes 4, 6, 7 y 8) de las 6 órdenes requeridas se elaboran en la unidad 3, en cambio, en el caso del código SCIP, es la unidad 5 la que produce todas las órdenes de PEBD excepto por la orden 5 que se produce en la unidad 3. En ambos casos, para la producción se emplean velocidades cercanas o iguales a la máxima velocidad de procesamiento (60 m/min), reduciendo así los tiempos de procesamiento para este tipo de bolsas (ver Tabla 4.3).

Si se compara con lo realizado en la planta, donde se utilizaron un total de 19 unidades (7 extrusoras, 3 impresoras, 7 selladoras y 2 perforadoras) para la producción de las órdenes del caso de estudio (ver Fig. 4.2), las soluciones encontradas tanto por SCIP como por BARON, emplean un total de 14 unidades para cumplir con lo solicitado por los clientes. Es decir, ambas soluciones óptimas cumplen los objetivos planteados haciendo un uso más eficiente de las instalaciones al utilizar menor cantidad de unidades. Cabe resaltar que, en la etapa de impresión, las 3 unidades tienen igual capacidad máxima de producción, es decir, 9,52 kg/min, por lo que es indistinto su uso.

En general, la ruta de procesamiento de las órdenes obtenida por ambos *solvers* difiere del planeamiento de las operaciones realizado en la planta. En lo sucesivo, en aras de simplificar la presentación de los resultados, solo se analizará como fueron procesadas las órdenes 1 y 7 que emplean PEAD y PEBD en su elaboración, respectivamente.

En la solución dada por el código BARON (Fig. 4.8), las bolsas de PEAD de la orden 1 se elaboran en la extrusora 7 pasando luego a la perforadora 19 en la etapa de conversión, en cambio, en la solución obtenida con SCIP (Fig. 4.9), esta orden se procesa en la unidad 6 de la primera etapa y en la unidad 20 de la etapa final. En la Fig. 4.2 se aprecia que, en la planta esta orden se asignó a la misma extrusora que la solución encontrada por BARON y a la misma perforadora de la solución de SCIP.

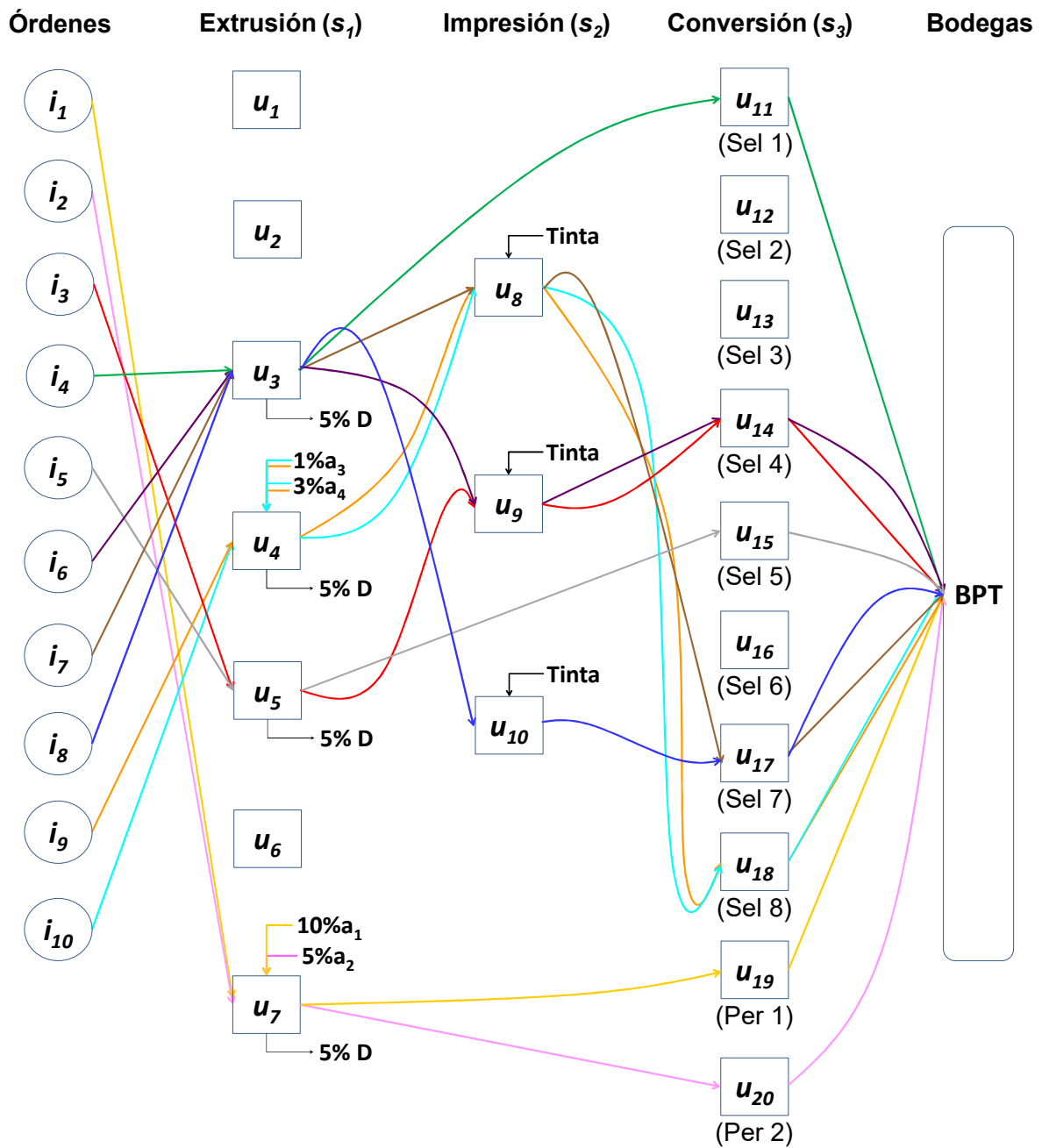


Fig. 4.8 Esquema de asignación óptima de las órdenes a cada unidad minimizando la tardanza con el código BARON

Para el caso de la orden 7, donde se requieren bolsas de PEBD, de acuerdo a BARON, la orden se procesa en la extrusora 3, la impresora 8 y la selladora 17 a máxima velocidad de procesamiento en las dos primeras etapas. En tanto que, para el código SCIP (Fig. 4.9), la orden ingresa en la extrusora 5, pasando a la impresora 9 y terminando su proceso en la misma selladora 17 utilizando velocidades muy por debajo de las máximas. Como se



mencionó previamente, en planta esta orden se procesa en la extrusora 5, la impresora 8 y la selladora 16.

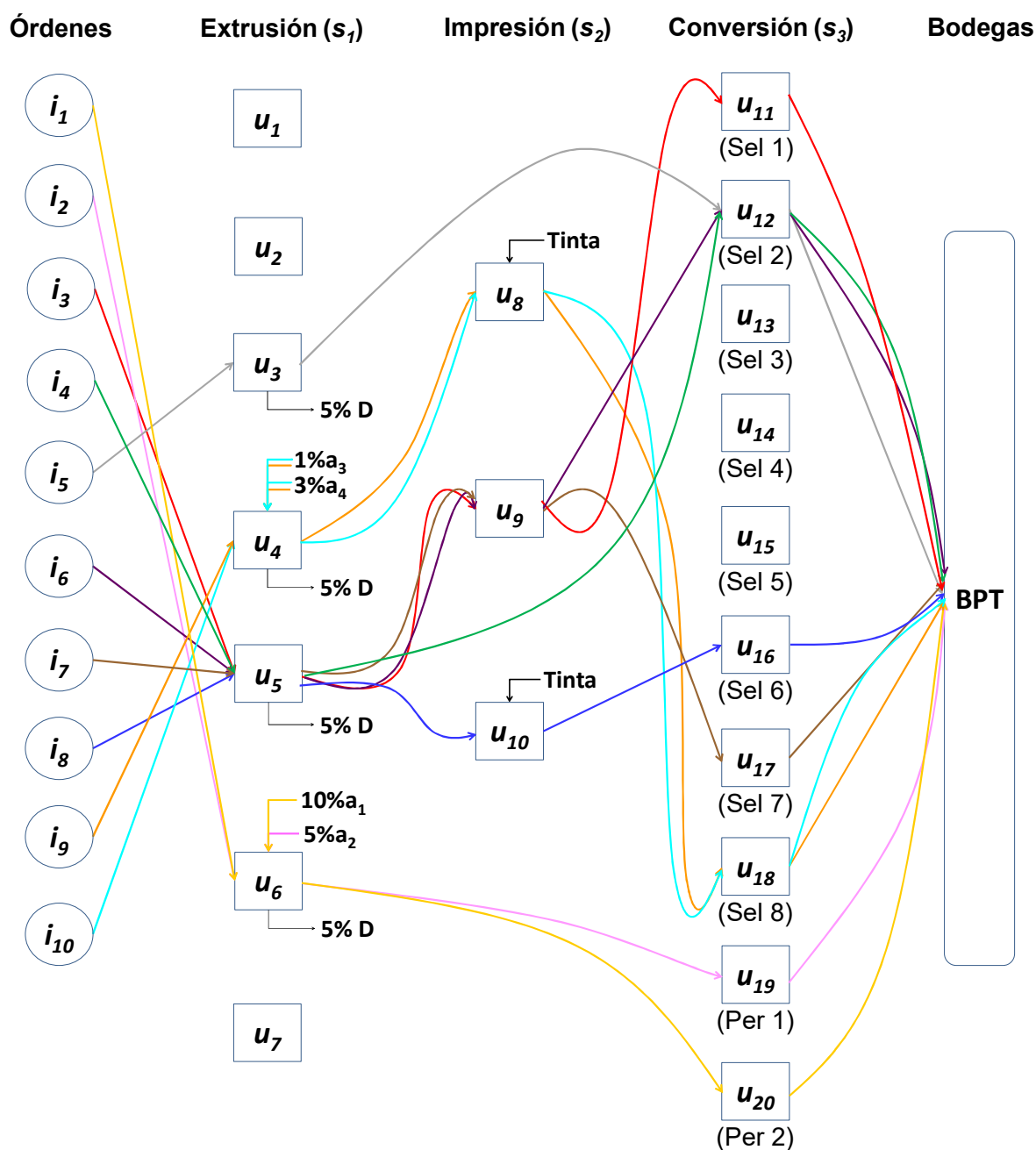


Fig. 4.9 Esquema de asignación óptima de las órdenes a cada unidad minimizando la tardanza con el código SCIP

Los diagramas de Gantt de las Figs. 4.10 y 4.11 muestran la secuencia de producción óptima en cada unidad de las diferentes etapas obtenida por los algoritmos BARON y SCIP, respectivamente. De las mismas, se puede observar el tiempo final de procesamiento de la última orden donde, para el caso de la solución obtenida con BARON (Fig. 4.10) es de

exactamente 135 h (8.078 min) mientras que para la solución con SCIP (Fig. 4.11) es superior con un valor de 165 h (9.908 min), logrando cumplir con el tiempo requerido por los clientes para la entrega de las 10 órdenes del caso de estudio.

Se puede observar en la Fig. 4.11 que la secuencia de producción obtenida con el código SCIP presenta tiempos muertos para el procesamiento de todas las órdenes en las diferentes etapas del proceso. En la primera etapa, las órdenes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, se empiezan a elaborar recién a partir de las 10,5 h (631 min), 68,5 h (4.107 min), 25 h (1.505 min), 71,3 h (4.279 min), 12,1 h (726 min), 95,6 h (5.733 min), 2,4 h (143 min), 49,4 h (2.963 min), 5,7 h (342 min) y 67,3 h (4.040 min), respectivamente, de iniciado el horizonte de planeamiento. Asimismo, las órdenes 3, 6, 7, 9 y 10 presentan tiempos de espera de 80,8 h (4.849 min), 1,8 h (109 min), 115 h (6.899 min), 11,3 h (675 min) y 10,8 h (649 min), respectivamente, antes de ser enviadas a la etapa de impresión y, las órdenes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 esperan 37,2 h (2.232 min), 14,5 h (870 min), 7,2 h (433 min), 16,7 h (1.004 min), 24,4 h (1.462 min), 15,7 h (944 min), 2,7 h (164 min), 47,1 h (2.826 min), 9,1 h (548 min) y 9,3 h (557 min), respectivamente, en la bodega de producto intermedio antes de pasar a la etapa final de conversión. Cabe mencionar que, durante los periodos de espera entre etapas las órdenes deben pasar a la bodega de producto intermedio.

En cambio, como se puede observar en la Fig. 4.10 la solución obtenida con el código BARON presenta muy pocos tiempos muertos únicamente para 3 órdenes de producción. Específicamente, las órdenes 7 y 10 esperan 69,8 h (4.190 min) y 48,4 h (2.904 min), respectivamente, antes de ser enviadas a la segunda etapa del proceso mientras que la orden 9 espera 19,6 h (1.177 min) en la bodega de producto intermedio antes de comenzar la etapa 3.

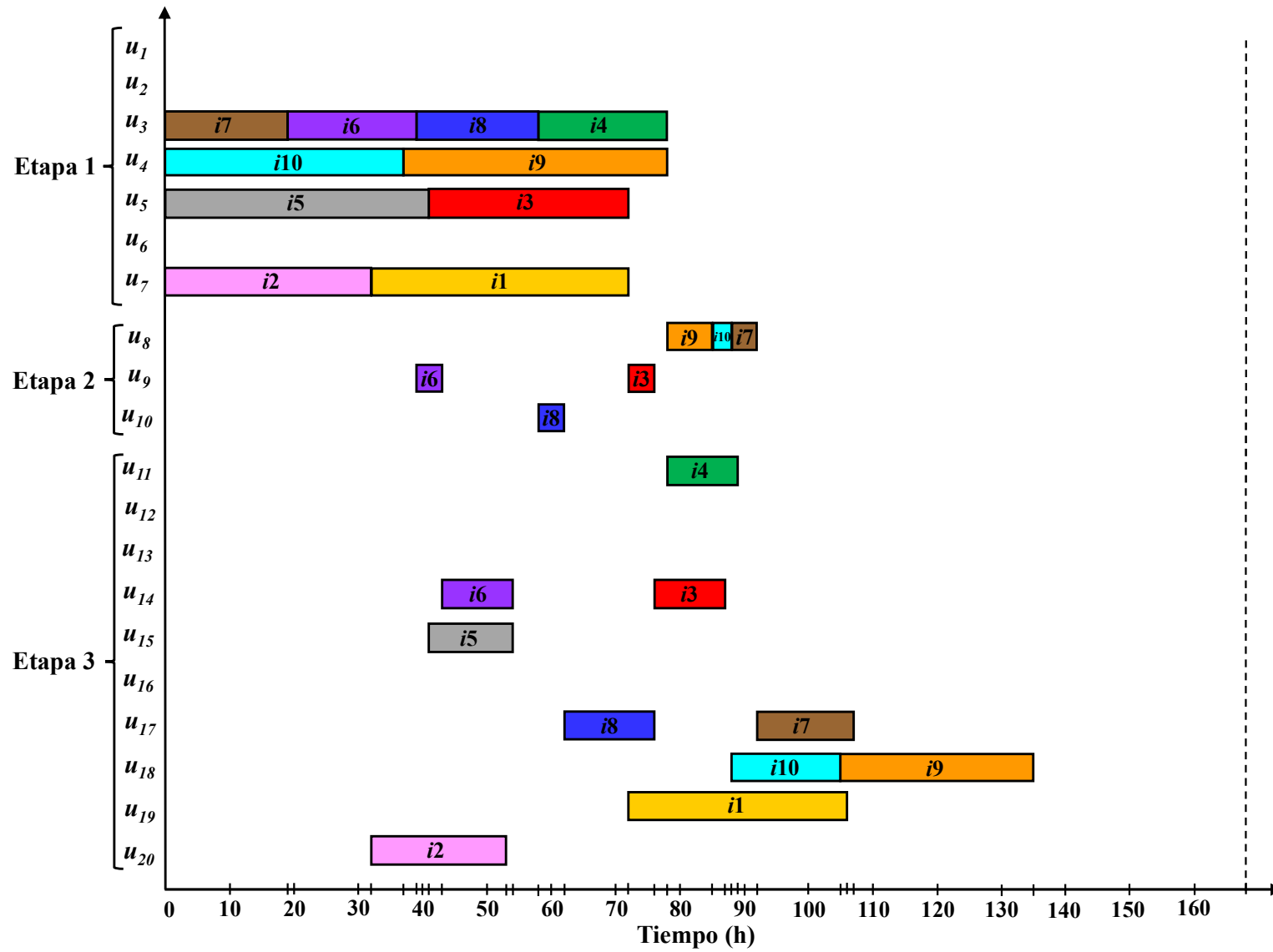


Fig. 4.10 Diagrama de Gantt de la asignación de órdenes óptima obtenido minimizando la tardanza con el código BARON

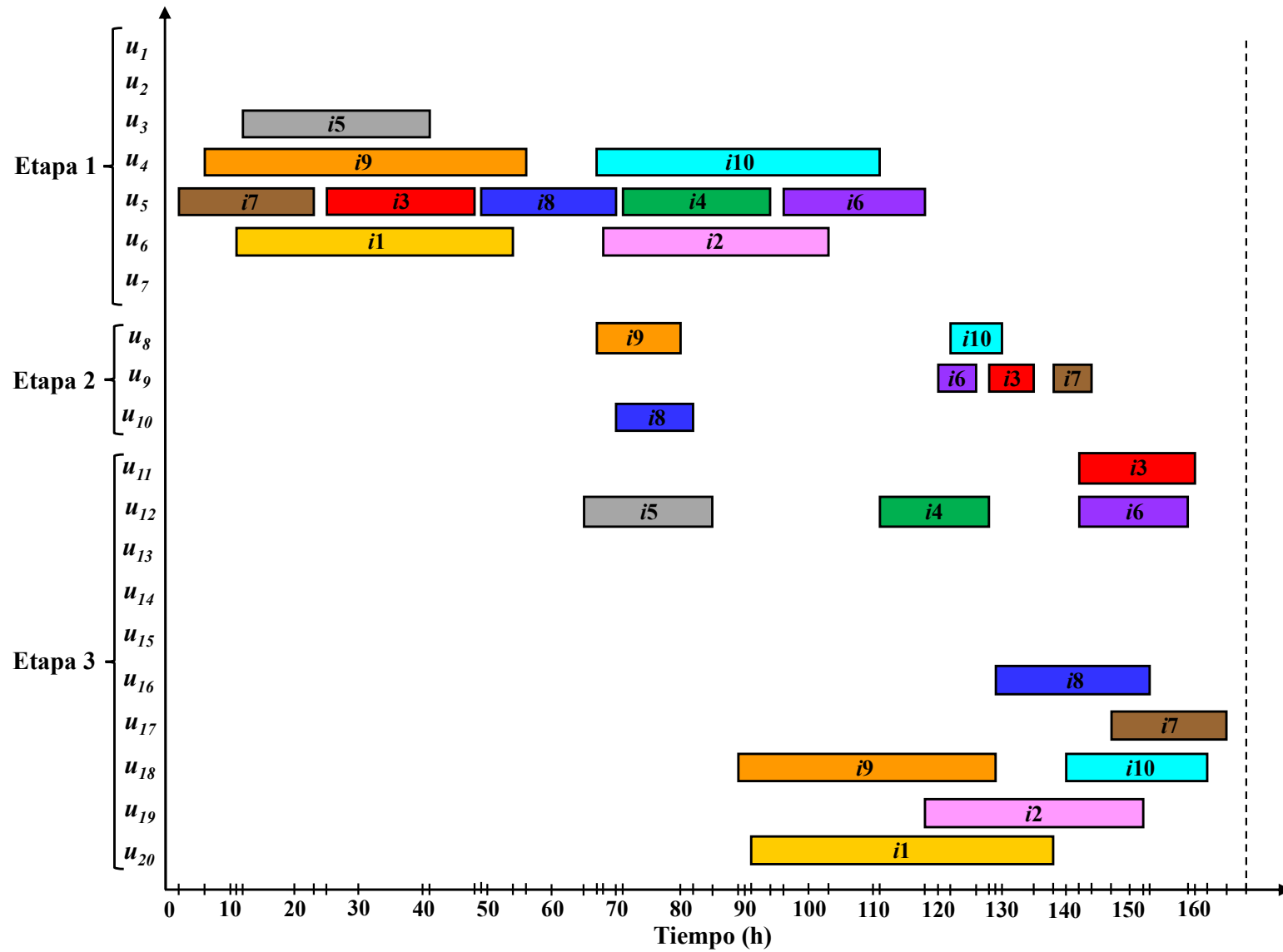


Fig. 4.11 Diagrama de Gantt de la asignación de órdenes óptima obtenida minimizando la tardanza con el código SCIP

La Tabla 4.3 resume las velocidades de procesamiento de cada unidad utilizada en el procesamiento de las órdenes del caso de estudio, correspondientes a las soluciones de los *solvers* BARON y SCIP. En ella se puede notar que las órdenes elaboradas con polietileno de baja densidad (órdenes 3 a 8), poseen valores de velocidades de procesamiento entre 26 – 60 m/min en la primera etapa, entre 79 – 250 m/min en la segunda y 45 – 110 m/min en la última. En cambio, para las órdenes elaboradas con polietileno de alta densidad (órdenes 1, 2, 9 y 10) las velocidades se encuentran en el rango comprendido entre 45 – 100 m/min para la primera etapa, 103 – 250 m/min para la segunda y 82 – 150 m/min para la última etapa. Estos valores se encuentran dentro de los límites permitidos indicados en la Tabla B.9 para cada máquina dado que los mismos fueron incluidos como cotas dentro del modelo.

**Tabla 4.3.** Velocidades de procesamiento  $Pr_{ius}$  (m/min) minimizando la tardanza

Orden	BARON			SCIP		
	Etapas			Etapas		
	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	100,00	-	113,50	92,20	-	82,83
$i_2$	100,00	-	150,00	92,20	-	90,05
$i_3$	38,28	234,42	110,00	52,55	162,80	66,69
$i_4$	57,42	-	110,00	52,55	-	64,16
$i_5$	26,34	-	80,73	37,83	-	53,89
$i_6$	57,42	250,00	110,00	52,55	165,99	66,56
$i_7$	60,00	250,00	76,16	54,91	147,26	59,64
$i_8$	60,00	250,00	76,16	54,91	79,67	45,92
$i_9$	90,00	250,00	120,00	74,85	128,99	89,67
$i_{10}$	54,72	250,00	120,00	45,51	103,91	84,81

Los valores de velocidad obtenidos durante la optimización del modelo MINLP propuesto empleando ambos códigos difieren considerablemente de los utilizados por el jefe de planta. A continuación, se intenta resaltar este resultado al comparar aquellas órdenes que emplearon las mismas unidades para su procesamiento tanto en planta como en la solución obtenida durante la optimización del modelo MINLP con ambos *solvers*.

Analizando la orden 7 correspondiente a una bolsa PEBD, se pueden notar los siguientes resultados de velocidad. En planta, esta orden se procesó a una velocidad de 27 m/min en la unidad 5 por aproximadamente 42 h (2.500 min), a 28 m/min por 35 h (2.100 min) en la unidad 8 y a 26 m/min en la unidad 16 por 40 h (2.400 min). En cambio, en la solución reportada por SCIP, esta orden se procesa a una velocidad de 54,9 m/min durante 20

h (1.214 min) en la misma unidad de la etapa 1, pero en la segunda etapa, la orden se procesa en la unidad 9, que posee características similares a la unidad 8, a 147,2 m/min por 6,8 h (405 min) y en la última etapa, en lugar de la unidad 16 se utiliza la 17 de idénticas características a 59,6 m/min por 18 h (1.065 min). Comparando los valores obtenidos con los fijados en planta, se observa una reducción del 51%, 81% y 56% en los tiempos de procesamiento de la orden en las etapas 1, 2 y 3, respectivamente. Se evidencia un alto porcentaje en la disminución del tiempo requerido en la segunda etapa debido a la velocidad empleada para elaborar esta orden se quintuplica respecto a la utilizada en planta.

Por otra parte, para la orden 9 con requerimiento de bolsas PEAD, se obtuvieron los siguientes resultados. De acuerdo a lo realizado en planta, esta orden fue elaborada a 70 m/min durante 53 h (3.200 min) en la unidad 4, a 51 m/min en la unidad 8 por 33 h (2.000 min) y a 71 m/min en la unidad 18 en un tiempo de operación de 50 h (3.000 min). Con respecto a la solución alcanzada por BARON, esta orden es elaborada en las mismas unidades a velocidades de 90 m/min en 42 h (2.489 min), 250 m/min en 7 h (410 min) y 120 m/min en 30 h (1.778 min) en la primera, segunda y tercera etapa de operación, respectivamente. Mientras que con SCIP las velocidades requeridas para procesarla en las mismas unidades son de 75 m/min, 129 m/min y 90 m/min durante tiempos operativos de 50 h (2.993 min), 13 h (794 min) y 40 h (2.379 min), respectivamente. Comparando las velocidades de procesamiento obtenidas en ambos *solvers* con las indicadas en planta, se observa que en los primeros se utilizan mayores velocidades consiguiendo así reducir el tiempo de procesamiento de esta orden en un 22%, 80% y 41% con BARON y en un 6%, 60% y 21% con SCIP en la primera, segunda y tercera etapa, respectivamente. Asimismo, como sucedió con la orden anterior, se evidencia una reducción sustancial del tiempo en la segunda etapa dado que se emplean velocidades mayores a 125 m/min (SCIP) o la máxima velocidad (BARON) para elaborar la orden 9.

Analizando las velocidades de procesamiento en cada etapa, tanto para cada código como para los utilizados en planta, se aprecia que, con ambos *solvers*, en la mayoría se de las órdenes se requieren valores de velocidad más elevados que los que se emplearon en las unidades en planta, logrando así menores tiempos de producción. Cabe destacar que, para la elaboración de bolsas PEBD se emplean bajas velocidades de procesamiento y, por ello, los tiempos de procesamiento son mayores a los de las bolsas PEAD que son elaboradas a altas velocidades de procesamiento, generando como resultado menores tiempos de proceso.

Cabe señalar que los valores de velocidad reportados en la Tabla 4.3, tanto para bolsas PEBD como PEAD, se deben al grado de ramificación de los materiales utilizados. En este caso, el PEBD tiene un grado de ramificación elevado dando como resultado una cristalinidad inferior a la del PEAD por la presencia de macromoléculas muy ramificadas en su estructura. Este hecho ocasiona que exista una mayor distancia entre las moléculas y, por ende, el PEBD adquiere menor densidad y resistencia que el PEAD, lo que requiere que su procesamiento se realice a velocidades menores que las utilizadas para el PEAD, especialmente en las primeras etapas.

En la Tabla 4.4, se detallan los índices de calidad que se obtienen para la planta de bolsas plásticas cuando se resuelve el modelo MINLP con los *solvers* BARON y SCIP. Los valores de resistencia al impacto del dardo para las 10 órdenes requeridas en el caso de estudio están comprendidos entre 14 – 15,5 J/m<sup>2</sup>, mientras que los valores de índice de fluidez se encuentran entre 26,5 – 32,5 cm<sup>3</sup>/10 min. Al incluir las restricciones de calidad en el modelo propuesto, los productos obtenidos siempre satisfacen los requerimientos de calidad cuyos límites (incluidos como cotas) están indicados en la Tabla B.10.

**Tabla 4.4.** Índices de calidad de las órdenes minimizando la tardanza

Orden	BARON		SCIP	
	$IMP_{ius}$ (J/m <sup>2</sup> )	$MVR_{ius}$ (cm <sup>3</sup> /10 min)	$IMP_{ius}$ (J/m <sup>2</sup> )	$MVR_{ius}$ (cm <sup>3</sup> /10 min)
$i_1$	14,21	32,09	14,23	31,83
$i_2$	14,21	32,09	14,23	31,83
$i_3$	14,90	27,42	15,05	26,90
$i_4$	15,10	26,72	15,05	26,90
$i_5$	14,90	27,42	15,08	26,81
$i_6$	15,10	26,72	15,05	26,90
$i_7$	15,10	26,72	15,05	26,90
$i_8$	15,10	26,72	15,05	26,90
$i_9$	14,41	31,42	14,42	30,98
$i_{10}$	14,41	31,42	14,42	30,98

A continuación, se comparan los valores de cada índice de calidad calculados con cada *solver* con los obtenidos en los equipos de laboratorio de control de calidad en planta para las mismas órdenes indicadas anteriormente.

Con respecto al índice volumétrico de fluidez ( $MVR_{ius}$ ), el valor obtenido en planta para la orden 7 fue de  $26,89 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$  mientras que con el *solver* SCIP prácticamente no hubo variación en el valor del mismo ( $26,90 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$ ). Este valor implica que para el polímero de menor viscosidad y resistencia empleado en esta bolsa (PEBD) no se generarán deformaciones durante la elaboración de la bolsa plástica. Para el caso de la orden 9, en planta este índice fue de  $28,58 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$  en cambio se alcanzaron valores de  $31,42$  y  $30,98 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$  en las soluciones provistas por BARON y SCIP, respectivamente. Los valores de índice de fluidez obtenidos por ambos *solvers* son más grandes que el valor medido en planta debido no solo a las elevadas revoluciones utilizadas en el tornillo,  $102 \text{ rpm}$  para BARON y  $85 \text{ rpm}$  para SCIP (frente a  $53 \text{ rpm}$  en planta), sino también a las altas velocidades de procesamiento empleadas,  $250 \text{ m/min}$  para BARON y  $129 \text{ m/min}$  para SCIP, en la unidad 4. Los valores obtenidos de índice de fluidez para bolsas PEAD indica una mayor fluidez del polímero a través de la unidad de procesamiento para la formación del rollo plástico sin generar deformaciones en su estructura de cadena larga. Como se puede observar, los valores de este indicador de calidad, tanto en planta como los obtenidos con los *solvers* para cada tipo de material, son cercanos entre sí a pesar de las diferentes velocidades de procesamiento utilizadas en el equipo de extrusión. No obstante, los valores de índice volumétrico de fluidez para bolsas PEBD son siempre menores que los valores de este parámetro para las de PEAD. Esto se debe a que las ramificaciones en el polietileno de baja densidad son cortas y su peso molecular es bajo logrando bajos valores de índice de fluidez.

En lo que respecta a la prueba de impacto al dardo ( $IMP_{ius}$ ), para la orden 7 se reportó un valor en planta de  $14,94 \text{ J/m}^2$  que con el *solver* SCIP se logra incrementar levemente a  $15,05 \text{ J/m}^2$ . Este valor de impacto al dardo obtenido para esta orden presenta una leve mejora sobre lo que se obtuvo en planta, indicando que el material logra tener una mayor resistencia al impacto y, por tanto, se logra una menor rotura del material frente a un mismo esfuerzo. Sin embargo, para la orden 9 el valor obtenido en planta fue de  $14,74 \text{ J/m}^2$  mientras que con ambos *solvers* fue alrededor de  $14,42 \text{ J/m}^2$ . Este resultado es menor al obtenido en planta debido a que este índice también depende de la velocidad del tornillo (se reduce a mayores rpm) y, como se mencionó en el párrafo previo, ambos *solvers* emplean una alta velocidad en el tornillo de la unidad 4, generando una leve disminución en el valor de impacto al dardo de la orden, indicando que el material soporta cierta cantidad de masa, logrando una mínima rotura. Este hecho resalta la importancia de incluir estos parámetros como variables de optimización en el modelo. Tal como sucedió con el parámetro de calidad anterior, los



valores obtenidos en planta y por ambos códigos para cada material son similares entre sí. No obstante, los valores de prueba de impacto para bolsas PEBD son mayores a los valores reportados para bolsas PEAD. Esto se debe a las propiedades de los aditivos que se colocan en la mayoría de las bolsas PEBD, brindando mayor resistencia al material.

En la Tabla 4.5, se detallan las variables específicas de los rollos correspondientes a las 10 órdenes del caso de estudio obtenidos en la solución de los *solvers* BARON y SCIP. Posteriormente, se realiza una comparación de estos valores con aquellos obtenidos a través de mediciones realizadas en planta (longitud, número y peso) para las mismas órdenes que se analizaron anteriormente.

**Tabla 4.5.** Especificaciones de los rollos de las órdenes minimizando la tardanza

Orden	BARON			SCIP		
	$Dr_i$ (m)	$Qr_i$ (kg)	$Nr_i$	$Dr_i$ (m)	$Qr_i$ (kg)	$Nr_i$
$i_1$	0,541	171,24	11	0,541	171,24	11
$i_2$	0,535	167,43	9	0,535	167,43	9
$i_3$	0,451	135,76	13	0,511	176,49	10
$i_4$	0,421	117,66	15	0,511	176,49	10
$i_5$	0,484	167,66	14	0,484	167,66	14
$i_6$	0,451	135,76	13	0,511	176,49	10
$i_7$	0,529	159,33	5	0,529	159,33	5
$i_8$	0,529	159,33	5	0,529	159,33	5
$i_9$	0,481	159,67	8	0,481	159,67	8
$i_{10}$	0,485	160,30	7	0,485	160,30	7

Como se puede observar en la Tabla 4.5, los valores de las variables de diámetro, peso y número de rollos de la orden 7 obtenidos por ambos *solvers* fueron 0,529 m, 159 kg y 5 rollos, respectivamente. Para esta orden las cifras en planta fueron de 0,462 m para el diámetro, 120 kg su peso y se elaboraron 7 rollos en total. Por otra parte, para el caso de la orden 9, el diámetro del rollo y su peso fueron 0,420 m y 120 kg, respectivamente, produciéndose un total de 11 rollos. En cambio, en las soluciones provistas por BARON y SCIP se lograron valores de 0,481 m para el diámetro, 160 kg en el peso y elaborando 8 rollos. Estas especificaciones de cada rollo para las dos órdenes mencionadas indican una reducción del orden del 27-28% de la cantidad de rollos y, por tanto, una disminución de desperdicio en la primera etapa de proceso. Al comparar los valores de las variables de cada rollo presentados en la Tabla 4.5 con los correspondientes obtenidos en planta (ver Tabla 4.2)

se observa que, para la mayoría de las órdenes, los valores de diámetro y peso del rollo obtenidas con ambos *solvers* son mayores que los datos medidos en planta, debido a que se utilizan pesos de rollo cercanos al peso total máximo permitido para un rollo en una unidad.

Las Figs. 4.12 y 4.13 exponen los resultados referidos al consumo de energía eléctrica de cada unidad utilizada en el procesamiento de las 10 órdenes obtenidos al minimizar la tardanza con los códigos BARON y SCIP, respectivamente.

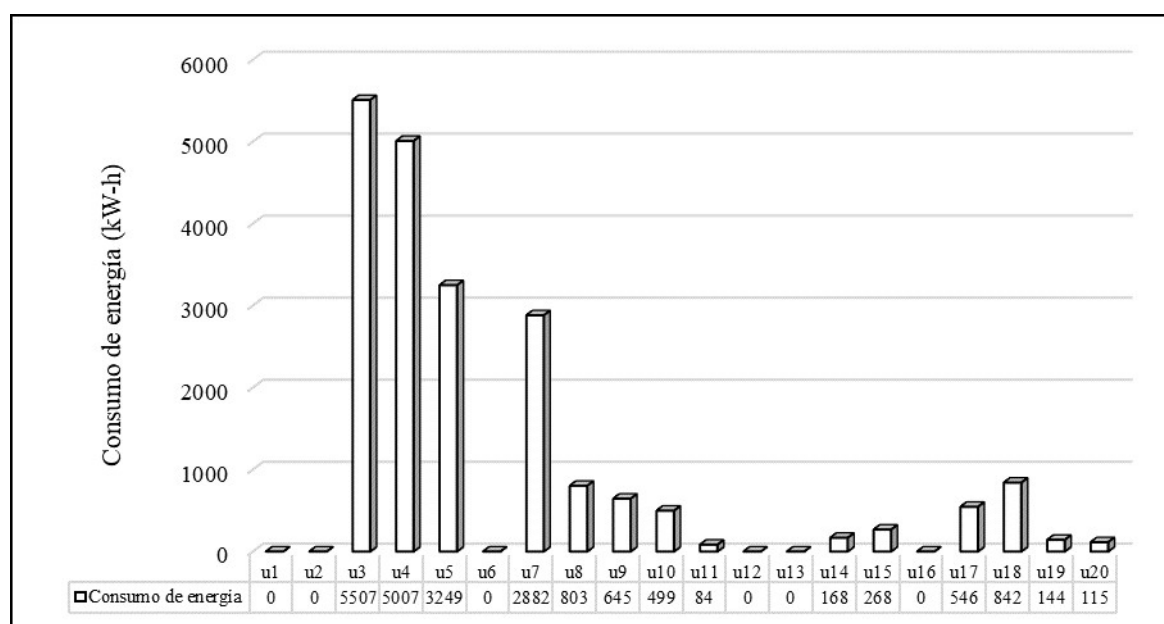


Fig. 4.12 Consumo de energía de producción minimizando la tardanza con el código BARON

Se observa en la Fig. 4.12 que la extrusora 3 consume la mayor cantidad de energía debido a que esta unidad procesa 4 de las 6 órdenes de PEBD solicitadas por los clientes (órdenes 4 y 6 - 8) con un total de 600.000 bolsas, implicando un tiempo total de procesamiento de 4.684 min. Por otra parte, en la Fig. 4.13 es la unidad 5 la que presenta el mayor consumo energético, en este caso porque procesa 5 de 6 órdenes de PEBD (órdenes 3, 4 y 6 - 8) con un total de 650.000 bolsas requiriendo un tiempo total de 6.463 min.

Para la etapa de impresión, se puede ver que en la solución de BARON (Fig. 4.12) la unidad 8 presenta el mayor consumo energético (803 kW-h). En esta unidad se procesan 3 de las 6 órdenes de mayor volumen que requieren impresión (órdenes 7, 9 y 10), esto es un total de 850.000 bolsas. En cambio, para la solución del código SCIP se puede notar que la

impresora 9 registra un pico en el consumo energético de 931 kW-h, dado que se imprimen las órdenes 3, 6 y 7, en este caso, por un total de 350.000 bolsas en un tiempo de 1.191 min.

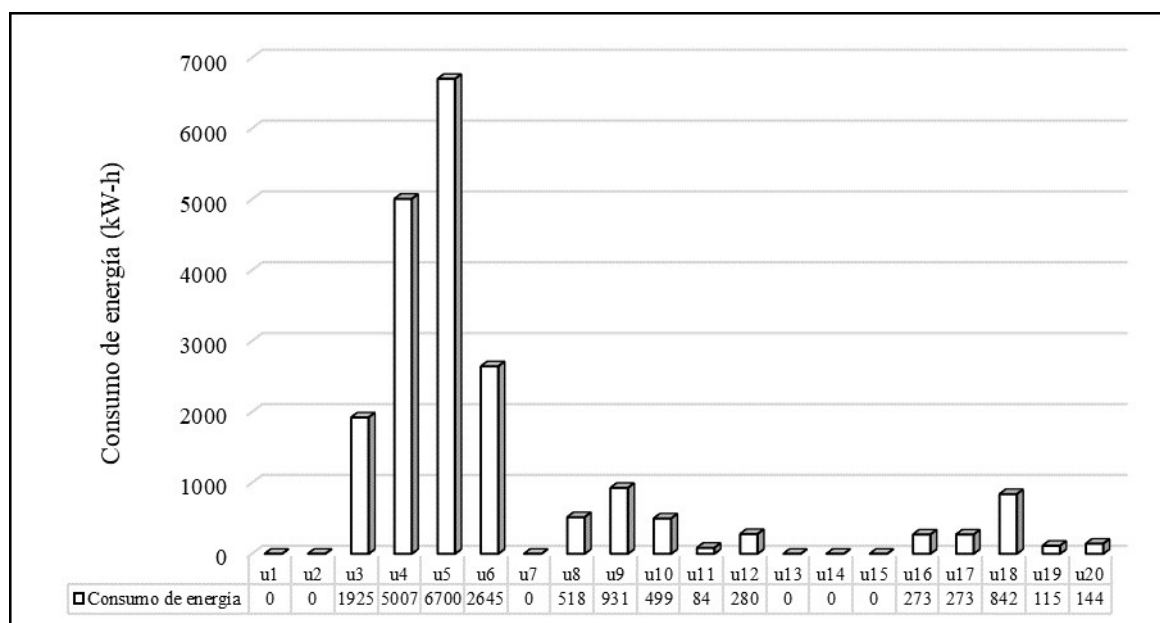


Fig. 4.13 Consumo de energía de producción minimizando la tardanza con el código SCIP

En la solución obtenida por ambos algoritmos, la unidad con mayor consumo energético en la etapa de conversión corresponde a la selladora 18 donde se procesan las 600.000 bolsas de supermercado requeridas en las órdenes 9 y 10.

El consumo total de energía utilizada para la producción de todas las órdenes del caso de estudio es de 20.759 kW-h empleando el código BARON (Fig. 4.12) y 20.234 kW-h con el código SCIP (Fig. 4.13) en el horizonte de programación de una semana. Comparando ambos resultados con el consumo total de energía alcanzado en planta en marzo de 2018 (ver Fig. 4.4), se aumentó el mismo en un 17% con BARON y en un 14% con SCIP debido a que se procesa una mayor cantidad de órdenes en las unidades 3 (en BARON) y 5 (en SCIP) que poseen elevados consumos de energía específicos.

Los costos obtenidos en la solución del modelo MINLP propuesto empleando los solvers BARON y SCIP se muestran en la Fig. 4.14. Solo se muestran los costos cuyos valores dependen de las variables del modelo, es decir, el costo energético y de salarios. Como se puede observar los gastos energéticos y salariales obtenidos con la solución aportada por BARON difieren de los de la aportada por SCIP. Esta diferencia se debe a los

distintos valores que ambas soluciones obtienen para variables operativas tales como el consumo de energía y el tiempo total de proceso.

El gasto salarial se debe al costo del personal de \$7.012 de acuerdo a la solución obtenida con BARON y de \$8.601 para el caso del *solver* SCIP. Estos resultados difieren debido a que este valor depende del *makespan* (*MK*) obtenido en cada código que, como se mencionó previamente, este valor corresponde a 8.078 min con BARON y a 9.908 min con SCIP.

El costo debido al consumo de energía asciende a \$1.821 con el código SCIP mientras que con el código BARON resulta un valor algo mayor de \$1.868. Esto se debe a que, aunque se utilizaron menor cantidad de unidades en ambos *solvers* (14) respecto a las empleadas en planta (19), se obtuvo un aumento global del consumo energético de un 14% con SCIP y de un 17% con BARON.

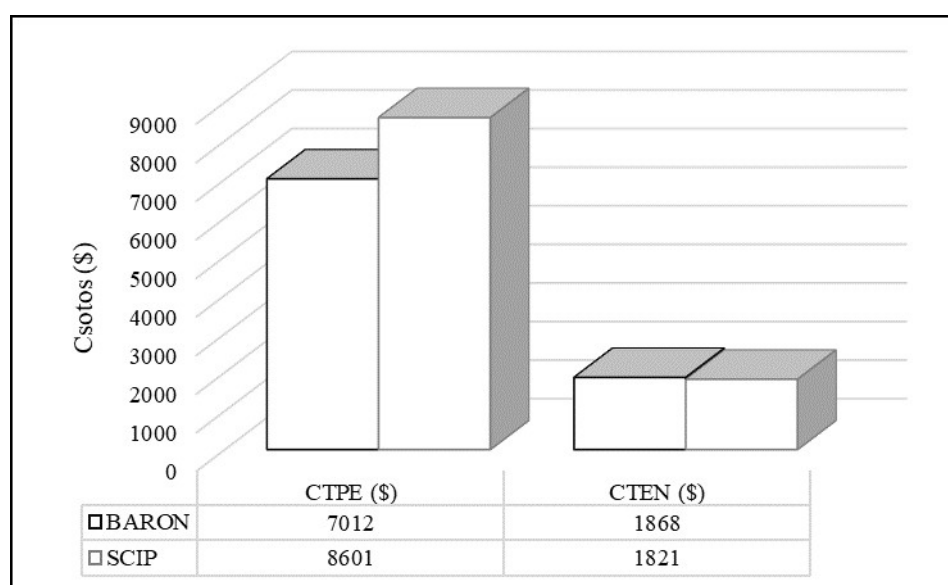


Fig. 4.14 Costos energéticos y salariales de las órdenes minimizando la tardanza con los códigos BARON y SCIP

En la Fig. 4.15 se visualizan los costos totales y beneficios obtenidos con los *solvers* BARON y SCIP, respectivamente. El valor del ingreso total es constante dado que depende del peso total de las 10 órdenes del proceso. La solución del código BARON reporta un costo total de \$33.658 y la del código SCIP un valor de \$35.200. Estos valores de costos son menores al costo total obtenido con el programa realizado en la planta, por el alto costo

salarial de \$12.674 obtenido en ese último caso, debido al elevado tiempo de procesamiento total (*makespan*) alcanzado en planta de 243 h (14.600 min).

Con respecto al beneficio, los valores alcanzados con BARON y SCIP ascienden a \$14.406 y \$12.864, respectivamente. Estas cifras son mayores que la ganancia neta indicada en la sección 4.2 obtenida en planta, especialmente en la solución reportada por BARON, debido a que se obtienen menores costos totales al disminuir los costos salariales.

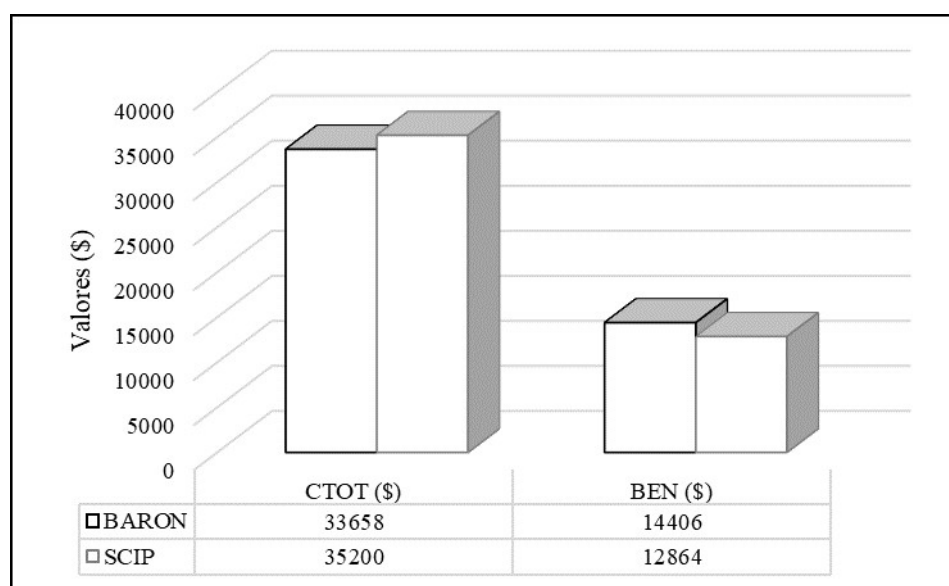


Fig. 4.15 Resultados económicos minimizando la tardanza con los códigos BARON y SCIP

#### 4.4.2. Minimizando el Makespan (*MK*)

A continuación, se muestran los resultados de la optimización del modelo MINLP propuesto para el problema del planeamiento de corto plazo del caso de estudio bajo análisis utilizando el *makespan* (*MK*) como función objetivo. Al igual que en la sección anterior, la formulación se implementó en GAMS 24.1.3 (Brooke y col., 2012) y su resolución se llevó a cabo usando los códigos SCIP y BARON.

Dado que solo se modifica la función objetivo utilizada en el modelo, la formulación posee el mismo número de variables continuas, binarias y restricciones mencionados en la sección previa. La solución óptima del problema obtenida por ambos *solvers* da como resultado un *makespan* de 98 h (5.864 min) o 4 días, cumpliendo con las fechas de entrega establecidas con los clientes. No obstante, desde el punto de vista computacional, el tiempo

de resolución del problema con el código BARON es de 172 s de CPU, mientras que la solución con el código SCIP se logra en 1,64 s de CPU.

Las rutas óptimas de procesamiento de las 10 órdenes del caso de estudio al minimizar el *makespan* se presentan en las Figs. 4.16 y 4.17 para BARON y SCIP, respectivamente. Se observa en la Fig. 4.16 que se utilizan todas las unidades en la primera y segunda etapa y 6 de las 10 unidades disponibles en la tercera etapa, mientras que para el código SCIP (Fig. 4.17), se usan sólo 4 unidades de las 7 disponibles en la primera etapa, las 3 impresoras de la segunda y 7 unidades en la última. A diferencia de lo que ocurre en la solución obtenida por BARON (Fig. 4.16), el procesamiento de las órdenes de PEBD (órdenes 3 - 8) en esta última solución (Fig. 4.17), se concentra únicamente en las extrusoras 2 y 3 utilizando velocidades cercanas a su velocidad máxima de procesamiento (60 m/min). Para ambos *solvers*, las órdenes de bolsas de supermercado (órdenes 9 y 10) se procesan en la unidad 4.

En la solución de BARON se emplea un total de 16 unidades mientras que con SCIP se utilizan 14 unidades. Al igual que con la función objetivo tardanza, en ambas soluciones se utilizan menor cantidad de unidades de producción (de las 20 disponibles) para cumplir con el objetivo planteado.

Asimismo, como en la sección anterior, la ruta de procesamiento de las órdenes determinada con ambos códigos se diferencia de lo planificado por el jefe de planta. Para realizar un análisis de los resultados de rutas de proceso, a continuación, se consideran las mismas órdenes mencionadas previamente cuando se minimizó la tardanza (órdenes 1 y 7).

En ambos *solvers* la orden 1 (bolsas de PEAD) se elabora en la extrusora 6 de la primera etapa, finalizando su procesamiento en la unidad 19 de la etapa 3 en la solución obtenida con BARON (Fig. 4.16) y en la 20 en la solución de SCIP. Por su parte, en planta (Fig. 4.2) se asignó esta orden a la extrusora 7 y a la misma perforadora de la solución encontrada por SCIP.

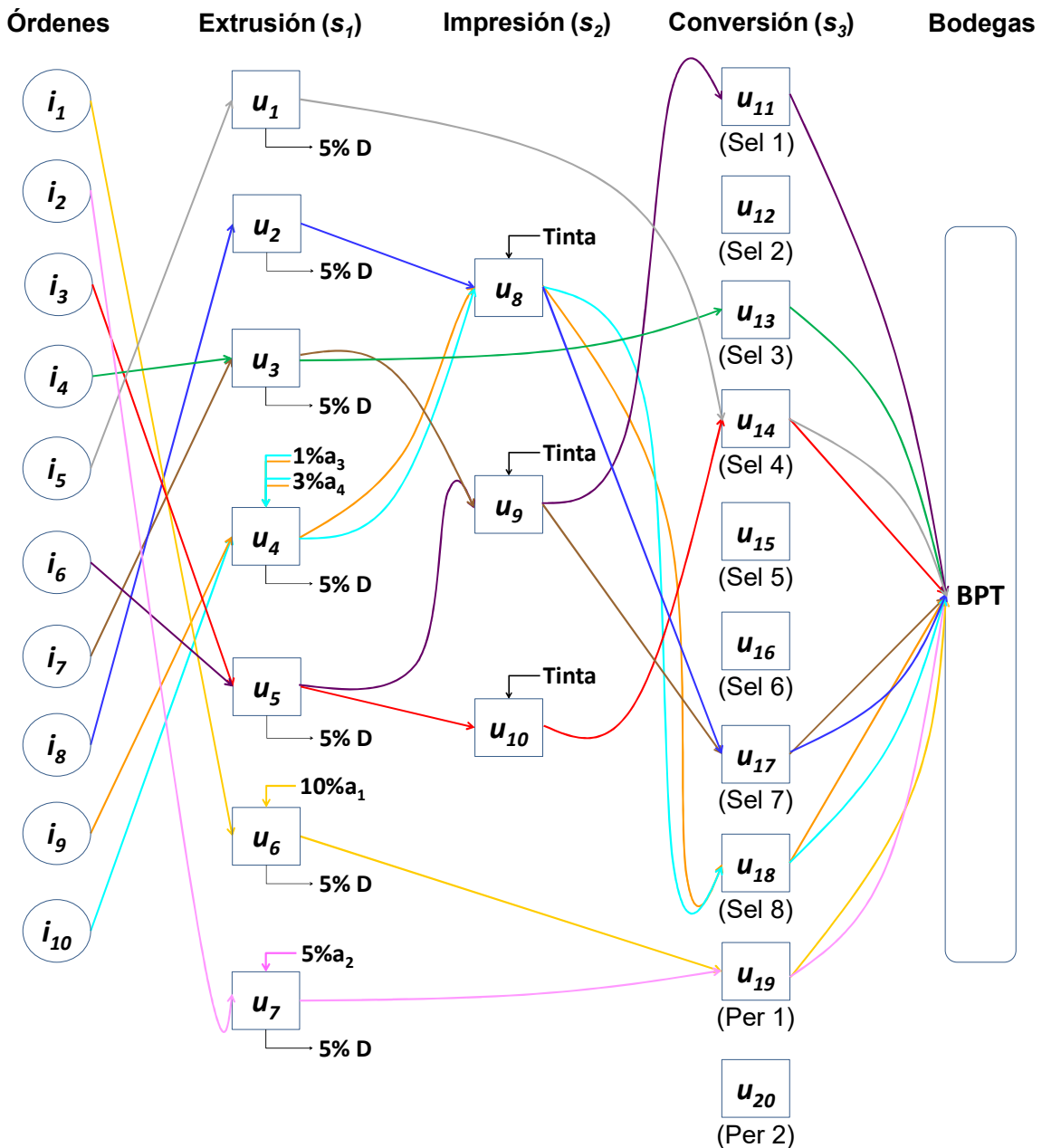


Fig. 4.16 Esquema de asignación de las órdenes a cada unidad minimizando el *makespan* con el código BARON

Por otro lado, en la solución hallada por el *solver* BARON la orden 7 (bolsas de PEBD) se procesa en la extrusora 3, la impresora 9 y en la selladora 17 mientras que en la solución de SCIP (Fig. 4.17), la misma se elabora en la unidad 2 de la primera etapa, la misma unidad que la solución de BARON de la segunda y la unidad 16 de la tercera. De acuerdo a lo realizado en la planta, esta orden fue asignada a las unidades 5 y 8 en las etapas de extrusión e impresión respectivamente y al mismo equipo de proceso que con el código SCIP.

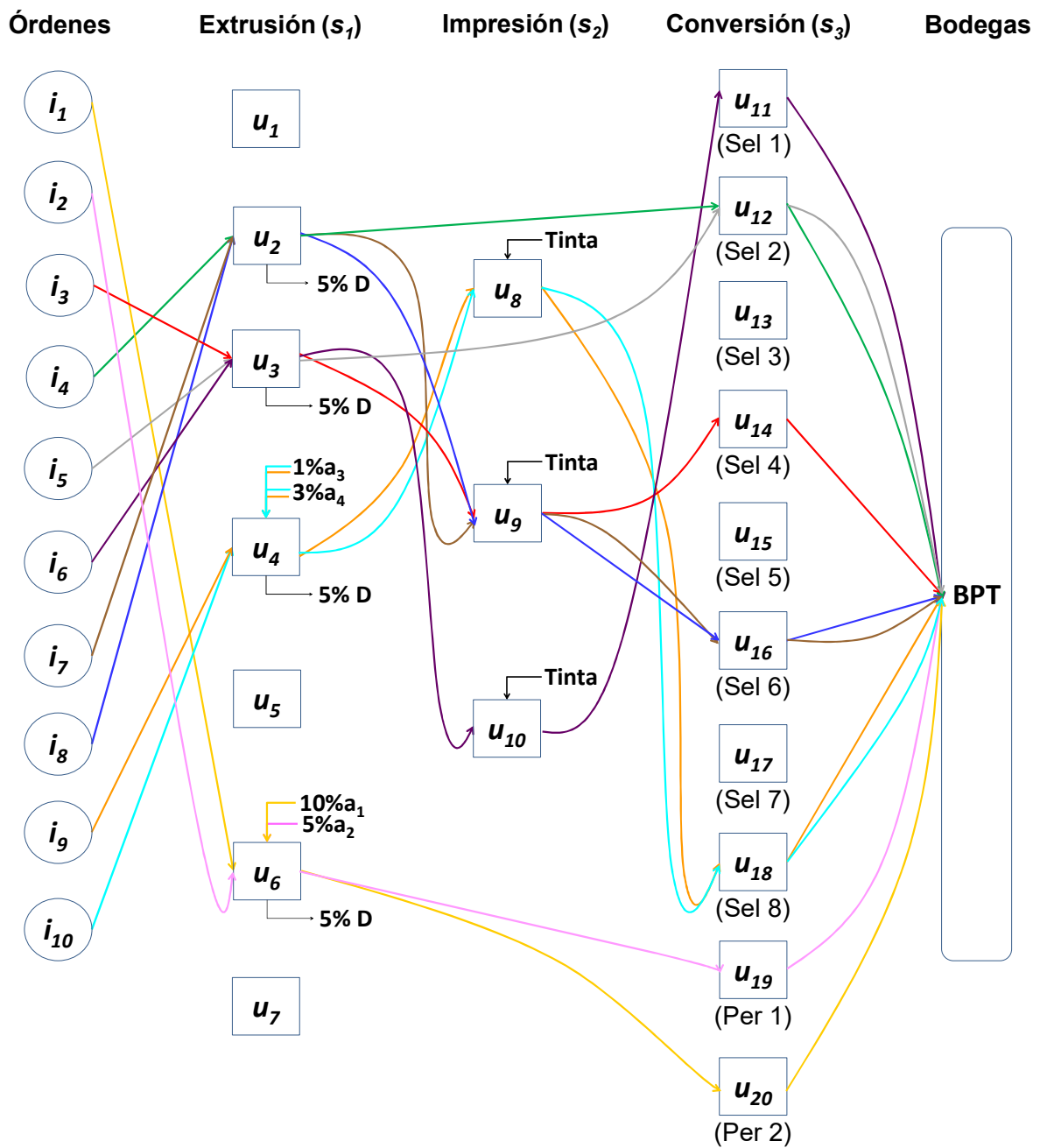


Fig. 4.17 Esquema de asignación de las órdenes a cada unidad minimizando el *makespan* con el código SCIP

La secuencia de producción óptima de las órdenes obtenida minimizando el *makespan* con los *solvers* BARON y SCIP se muestra en los diagramas de Gantt de las Figs. 4.18 y 4.19, respectivamente. En ambas gráficas, se observa que el tiempo de proceso de la última orden es 98 h (5.864 min), cuyo valor es menor al horizonte de programación de 168 h, logrando la entrega a tiempo de las órdenes del caso de estudio.



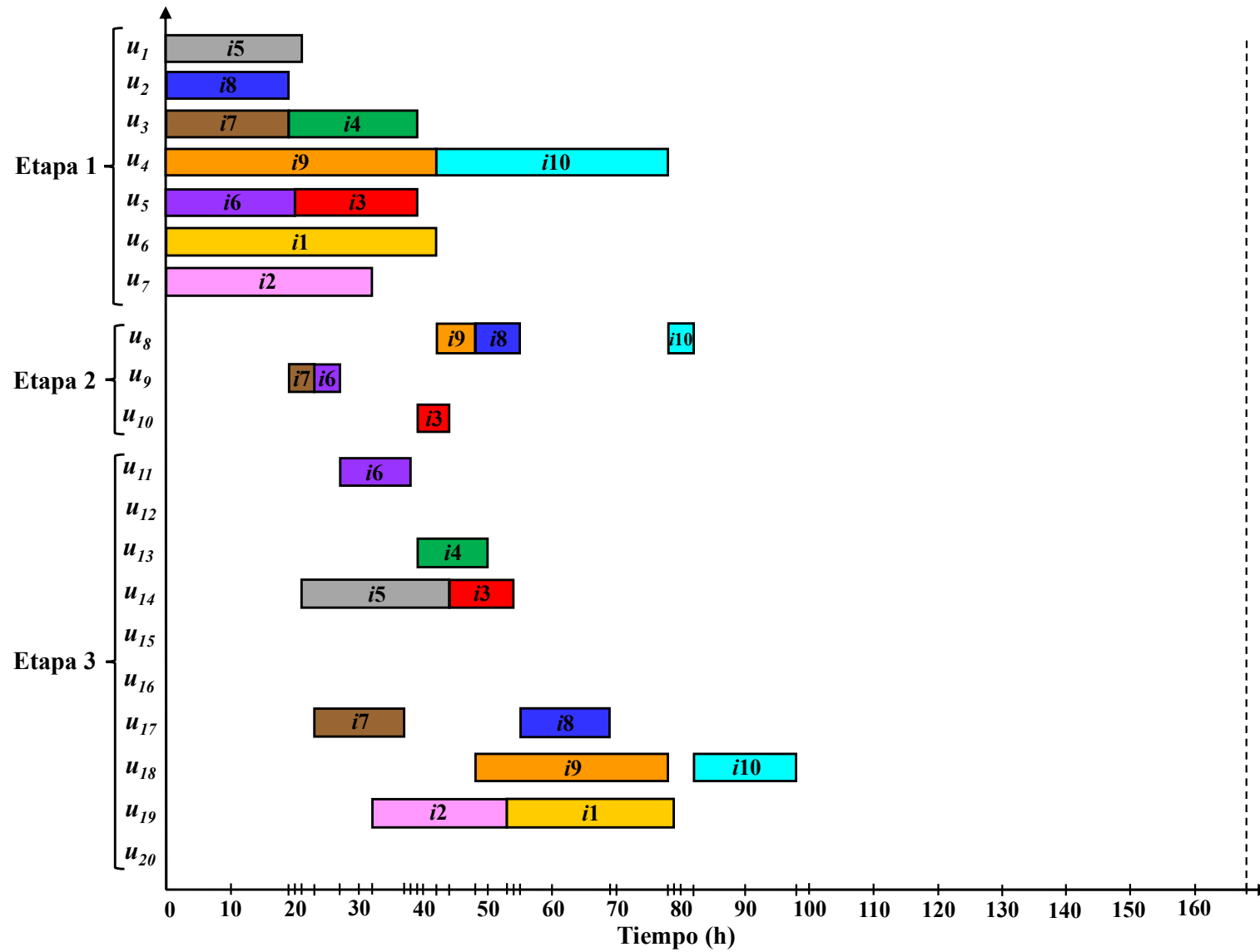


Fig. 4.18 Diagrama de Gantt de asignación de órdenes minimizando el *makespan* con el código BARON

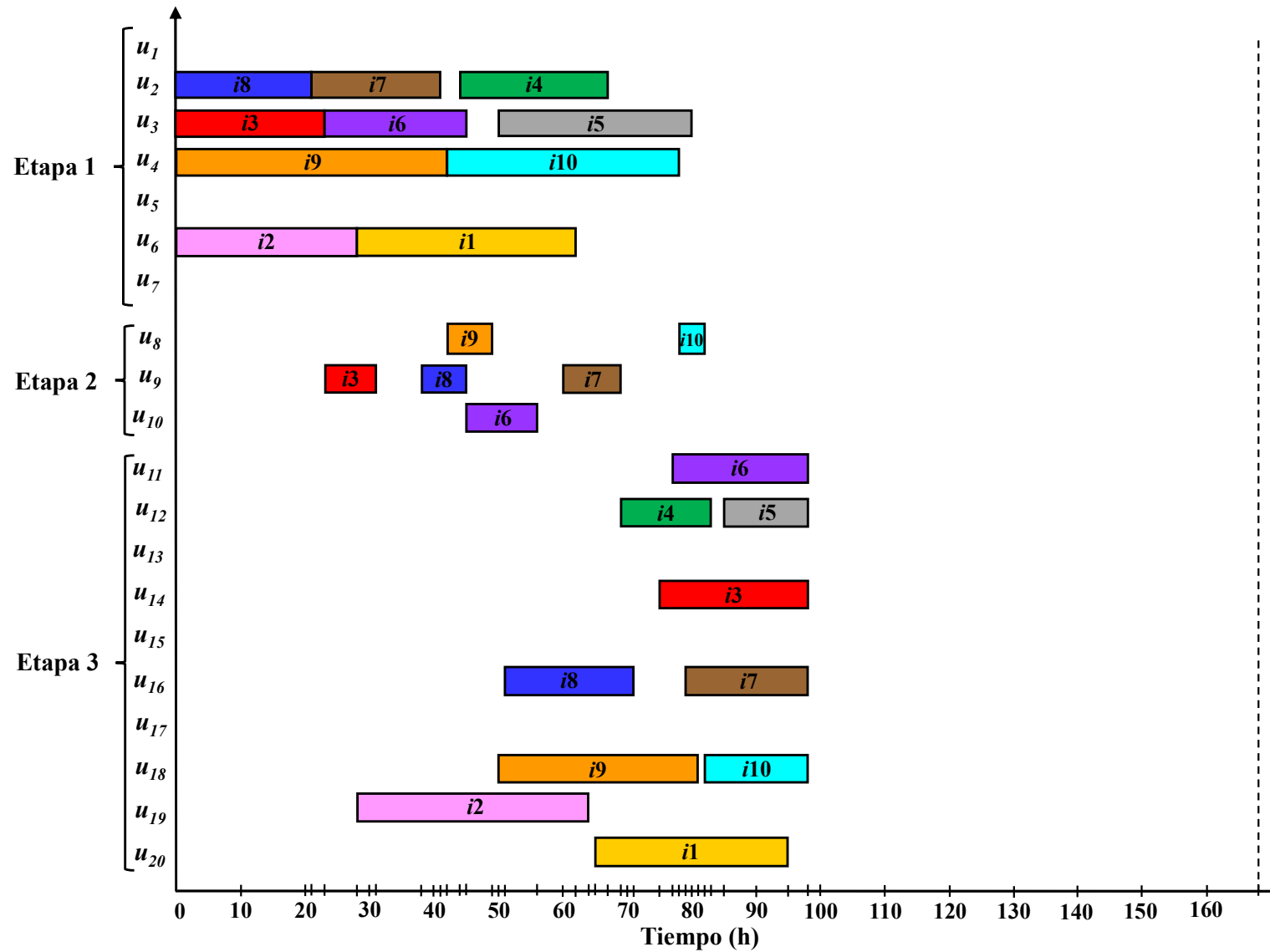


Fig. 4.19 Diagrama de Gantt de asignación de órdenes minimizando el *makespan* con el código SCIP

De acuerdo a la secuencia de proceso obtenida por el algoritmo BARON, en la Fig. 4.18 se puede ver que las órdenes 6 y 8 poseen un tiempo muerto de 2,9 h (172 min) y 29,8 h (1.791 min), respectivamente, antes de ser enviadas a la etapa 2, en tanto que la orden 1 posee un tiempo de espera de 10,8 h (647 min), antes de ser procesada en la última etapa. Por ello, durante el tiempo indicado, estas órdenes pasan a la bodega de producto intermedio.

De manera similar a lo ocurrido al minimizar la tardanza, en la solución obtenida con el código SCIP (Fig. 4.19) se observan mayor cantidad de tiempos muertos en cada etapa de procesamiento respecto a la solución de BARON. Específicamente, en la primera etapa, las órdenes 4 y 5 se empiezan a elaborar a las 44 h (2.642 min) y 50 h (3.003 min) respectivamente, en las unidades 2 y 3, mientras que las órdenes 7 y 8 esperan 18,3 h (1.095 min) y 17 h (1.028 min) respectivamente, en la bodega de producto intermedio antes de ser enviadas a la etapa de impresión. Además, las órdenes 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 poseen tiempos de espera de 3,2 h (190 min), 44,1 h (2.644 min), 2,2 h (134 min), 5,2 h (312 min), 21 h (1.259 min), 10 h (602 min), 0,7 h (40 min) y 2 h (104 min), respectivamente, antes de pasar a la última etapa del proceso.

Las velocidades de procesamiento de cada unidad empleada en la producción de las órdenes del caso de estudio, pertinentes a las soluciones de los algoritmos BARON y SCIP se resumen en la Tabla 4.6. En la misma se muestra que los valores seleccionados para las velocidades de procesamiento de las órdenes 3 a 8 donde se elaboran bolsas de PEBD van entre 35 – 60 m/min en la primera etapa, entre 112 – 250 m/min en la segunda y 46 – 110 m/min en la última. Por el contrario, las velocidades de procesamiento para las órdenes con PEAD (órdenes 1, 2, 9 y 10) se encuentran en el rango comprendido entre 54 - 117 m/min en la primera etapa, 217 - 250 m/min para las órdenes impresas (órdenes 9 y 10) y 85 - 150 m/min en la última etapa.

A continuación, se realiza un análisis solo de las velocidades de procesamiento de las mismas órdenes seleccionadas en la sección 4.4.1, es decir de las órdenes 7 y 9. Con respecto a la orden de PEBD (orden 7), se lograron los siguientes resultados. En la solución obtenida con el *solver* SCIP, la orden 7 se procesa en la unidad 2, de características similares a la unidad 5 (extrusora utilizada en planta), a una velocidad de 54 m/min durante 20,7 h (1.241 min) en la etapa 1. En la etapa 2, la orden se imprime en la impresora 9 (unidad de igual tipo que la unidad 8 usada en planta) a 112 m/min durante 8,9 h (533 min), y en la última etapa, se

utiliza la misma unidad utilizada en planta (unidad 16) a una velocidad de 56 m/min por 18,9 h (1.132 min). Al comparar los resultados de velocidad obtenidos en los modelos con los utilizados en planta (detallados en la sección 4.4.1) se puede ver que, al incluirla como variable en el modelo, el tiempo de procesamiento se reduce en un 50%, 75% y 53% en la primera, segunda y tercera etapa, respectivamente. Análogamente a lo sucedido al utilizar la tardanza como función objetivo, se produce una reducción considerable del tiempo en la etapa 2 debido a que se cuatriplica la velocidad utilizada en este caso, y en el caso de BARON la reducción es aún mayor debido a que se usa la máxima velocidad de procesamiento.

**Tabla 4.6.** Velocidades de procesamiento  $Pr_{ius}$  (m/min) minimizando el *makespan*

Orden	BARON			SCIP		
	Etapas			Etapas		
	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	95,28	-	150,00	116,48	-	130,19
$i_2$	100,00	-	150,00	116,48	-	85,04
$i_3$	60,00	250,00	110,00	52,25	123,15	51,53
$i_4$	57,42	-	110,00	51,43	-	85,81
$i_5$	52,17	-	46,98	35,95	-	87,59
$i_6$	60,00	250,00	110,00	52,25	98,32	55,93
$i_7$	60,00	250,00	76,16	53,74	112,03	56,07
$i_8$	60,00	144,99	76,16	53,74	133,22	53,35
$i_9$	90,00	250,00	120,00	90,00	217,47	116,52
$i_{10}$	54,72	250,00	120,00	54,72	250,00	120,00

Cabe destacar que, para la orden 9, se seleccionan las mismas unidades de procesamiento (unidades 4, 8 y 18) dado que estos equipos son exclusivos para elaboración de bolsas de supermercado, aunque al minimizar el *makespan* las velocidades utilizadas son diferentes. Empleando el código BARON, la orden 9 se procesa a una velocidad de 90 m/min por 41,5 h (2.489 min) en la primera etapa, 250 m/min por 6,8 h (410 min) en la segunda y 120 m/min por 29,6 h (1.778 min) en la tercera. En cambio, con el código SCIP, esta orden de PEAD se elabora a velocidades de 55 m/min por 41,5 h (2.489 min), 250 m/min por 7,9 h (471 min) y 120 m/min por 30,5 h (1.831 min) en la primera, segunda y tercera etapa, respectivamente. Al comparar los resultados de ambos *solvers* con las velocidades en planta, para esta orden se pudieron reducir los tiempos de procesamiento en un 22% en la etapa 1 (para ambos *solvers*), en un 80% en la etapa 2 para BARON y en un 76% para SCIP, y en un 41% con BARON y en un 39% con el código SCIP en la etapa 3. Al igual que la orden

anterior, la segunda etapa es la que presenta la mayor reducción en el tiempo de procesamiento porque se utiliza la máxima velocidad de procesamiento permitida (BARON).

A partir de estos resultados se observa que los valores de velocidad de procesamiento obtenidas con el modelo, por ambos algoritmos, son mayores que las velocidades empleadas en planta. Es decir, que mediante una pequeña modificación de la velocidad operativa en los límites pertinentes del equipo (Tabla B.9), se obtienen tiempos de procesamiento menores para la elaboración de las órdenes. Asimismo, las velocidades de procesamiento para la orden de PEBD son menores a las velocidades de la orden de PEAD. Como se indicó anteriormente, estos valores se relacionan con el grado de ramificación que originan cambios en las propiedades químicas (densidad y resistencia) de ambos materiales y, por lo tanto, se puedan elaborar correctamente las bolsas plásticas correspondientes. Al igual que en el caso de minimizar la tardanza, se observa que las velocidades, tanto para bolsas PEAD como PEBD, se aproximan a sus cotas máximas con la finalidad de reducir el *makespan*.

A continuación, la Tabla 4.7 detalla los valores de los índices de calidad para cada orden obtenidos al minimizar el *makespan* con los códigos BARON y SCIP. En el caso del impacto al dardo *IMP* los valores para las 10 órdenes se encuentran en el rango de 14 – 15,5  $J/m^2$ , mientras que para el índice de fluidez *MVR* están comprendidos entre 26 – 33  $cm^3/10$  min.

**Tabla 4.7.** Índices de calidad de las órdenes minimizando el *makespan*

Orden	BARON		SCIP	
	$IMP_{ius}$ ( $J/m^2$ )	$MVR_{ius}$ ( $cm^3/10$ min)	$IMP_{ius}$ ( $J/m^2$ )	$MVR_{ius}$ ( $cm^3/10$ min)
$i_1$	14,23	31,93	14,16	32,63
$i_2$	14,21	32,09	14,16	32,63
$i_3$	15,13	26,63	15,05	26,91
$i_4$	15,10	26,72	15,04	26,94
$i_5$	15,30	26,06	15,05	26,91
$i_6$	15,13	26,63	15,05	26,91
$i_7$	15,10	26,72	15,04	26,94
$i_8$	15,10	26,72	15,04	26,94
$i_9$	14,41	31,42	14,41	31,42
$i_{10}$	14,41	31,42	14,41	31,42

Seguidamente se analizan los índices de calidad obtenidos al minimizar el *makespan* con cada código para las órdenes 7 y 9. En lo referente al índice volumétrico de fluidez, la orden 7 adopta valores de 26,72 y 26,94 cm<sup>3</sup>/10 min empleando el código BARON y SCIP, respectivamente; mientras que, para la orden 9, el valor obtenido para ambos *solvers* es 31,42 cm<sup>3</sup>/10 min. Estos valores permiten afirmar que no se producirán deformaciones del polímero durante la elaboración de la bolsa plástica. De forma análoga a lo ocurrido utilizando la tardanza como función objetivo, para las órdenes de PEBD este índice es menor que el de las órdenes de PEAD debido a la velocidad del tornillo y al tipo de ramificación del material. En torno a la prueba de impacto al dardo, se obtuvieron valores de 15,10 y 15,04 J/m<sup>2</sup> para la orden 7 para los *solvers* BARON y SCIP. En cambio, para la orden 9, el resultado de este índice para ambos códigos fue de 14,41 J/m<sup>2</sup>. Estos valores indican que el polímero tiene alta resistencia al impacto y la bolsa plástica no se rompe con facilidad. La prueba de impacto de las órdenes de PEBD son mayores a los valores de impacto de las órdenes de PEAD debido a la adición de aditivos que dan mayor resistencia al material.

En la Tabla 4.8 se presentan las especificaciones de los rollos de las 10 órdenes obtenidas en la solución de cada código. Los valores logrados para las ordenes seleccionadas para el análisis (órdenes 7 y 9) son exactamente los mismos que se obtuvieron al minimizar la tardanza por lo que, para evitar información redundante, se omite el mismo en esta sección. Cabe mencionar que los valores de las variables específicas de los rollos obtenidos implican una reducción en la cantidad de rollos respecto a lo realizado en planta y, por consiguiente, una reducción en la cantidad de desperdicio generado en la etapa de extrusión.

**Tabla 4.8.** Especificaciones de los rollos de las órdenes minimizando el *makespan*

Orden	BARON			SCIP		
	$Dr_i$ (m)	$Qr_i$ (kg)	$Nr_i$	$Dr_i$ (m)	$Qr_i$ (kg)	$Nr_i$
$i_1$	0,541	171,24	11	0,541	171,24	11
$i_2$	0,535	167,43	9	0,535	167,43	9
$i_3$	0,511	176,49	10	0,511	176,49	10
$i_4$	0,511	176,49	10	0,511	176,49	10
$i_5$	0,391	106,69	22	0,484	167,66	14
$i_6$	0,511	176,49	10	0,511	176,49	10
$i_7$	0,529	159,33	5	0,529	159,33	5
$i_8$	0,529	159,33	5	0,529	159,33	5
$i_9$	0,481	159,67	8	0,481	159,67	8
$i_{10}$	0,485	160,30	7	0,485	160,30	7

El consumo de energía eléctrica requerido en cada unidad para producir las órdenes del caso de estudio al minimizar el *makespan* con los algoritmos BARON y SCIP se muestra en las Figs. 4.20 y 4.21, respectivamente. En ambas figuras, se puede ver que la extrusora 4 es la que presenta el mayor consumo energético en planta (5007 kW-h) hecho que se asocia a la gran cantidad de material de las órdenes 9 y 10 (600.000 bolsas) que se procesan en esta unidad requiriendo un tiempo total de procesamiento de 4.682 min. En el caso de la solución del *solver* SCIP, la unidad 3 tiene también un consumo de energía elevado (4819 kW-h) ya que, como se mencionó previamente, al utilizar menor número de unidades respecto de lo que se observa con BARON, en esta unidad se concentran más órdenes (3, 5 y 6) requiriendo un tiempo total de 4.504 min para procesarlas frente a los 2.342 min necesarios para procesar las 300.000 bolsas pertenecientes a las órdenes 4 y 7.

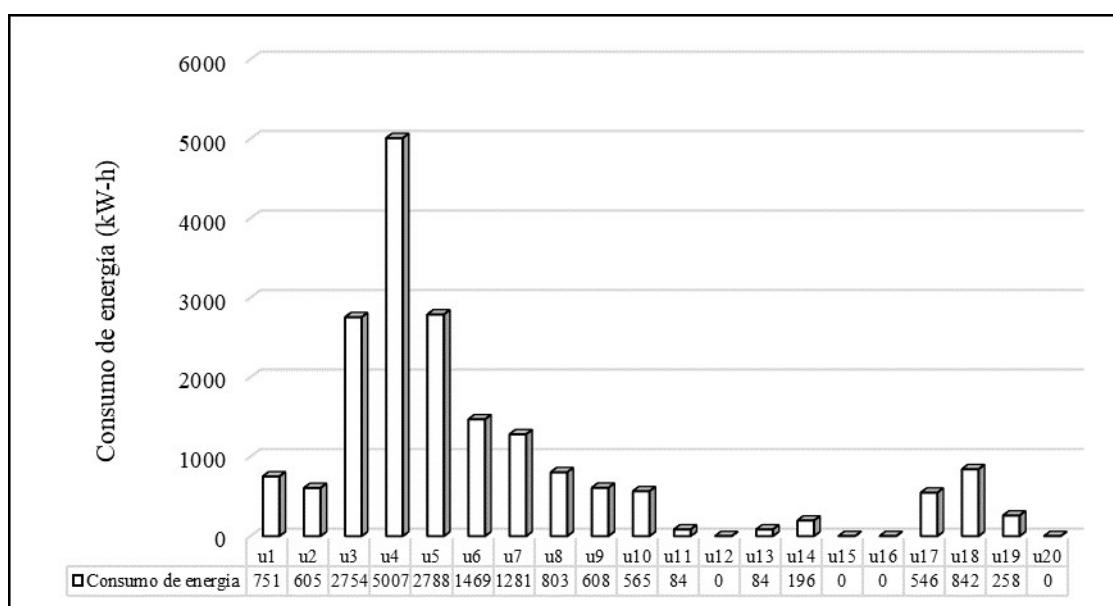


Fig. 4.20 Consumo de energía de producción minimizando *makespan* con el código BARON

En la etapa de impresión, en la Fig. 4.20 (*solver* BARON) se observa que la unidad 8 es la que consume mayor cantidad de energía debido a la impresión de 3 de las 6 órdenes impresas con mayor volumen (órdenes 8 a 10), es decir, un total de 850.000 bolsas requiriendo un tiempo total de 1.022 min. En cambio, con SCIP (Fig. 4.21), la unidad 9 es la que presenta el mayor consumo energético (893 kW-h) al procesar 550.000 bolsas de las órdenes 3, 7 y 8 dado que se emplean bajas velocidades de procesamiento de 123 m/min para la orden 3, 112 m/min para la orden 7 y 133 m/min para la orden 8, ocasionando tiempos de procesamiento elevados de 525 min para la orden 3, 533 min para la orden 7 y 448 min para la orden 8.

Al igual que en la función tardanza empleando ambos códigos, la unidad 18 consume mayor energía eléctrica en la etapa de conversión debido al procesamiento de 600.000 bolsas de supermercado (órdenes 9 y 10).

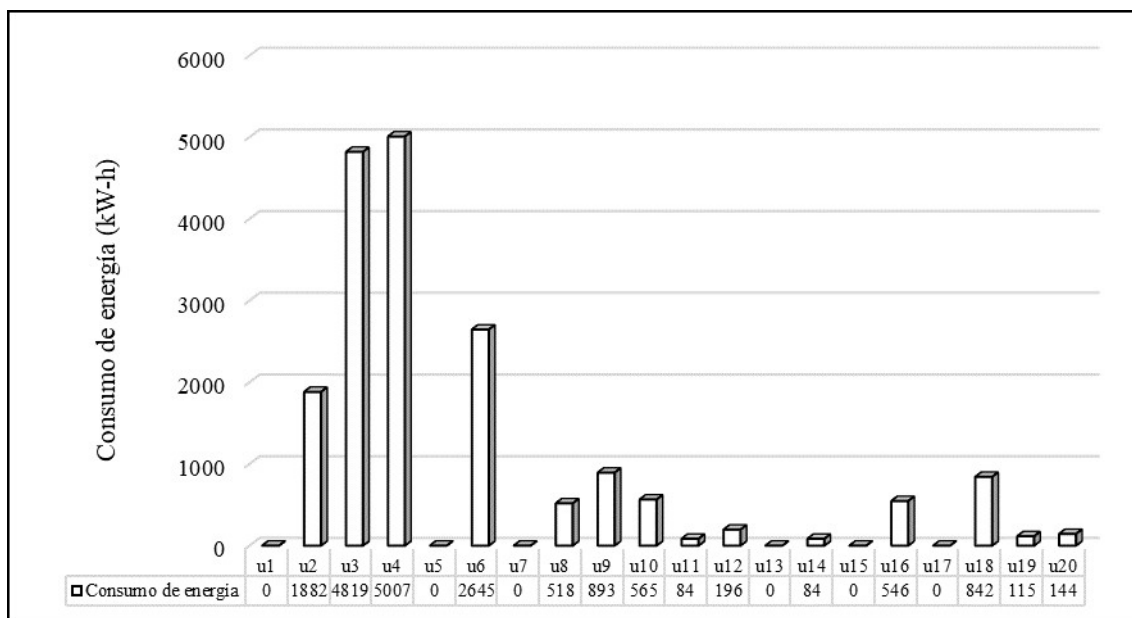


Fig. 4.21 Consumo de energía de producción minimizando el *makespan* con el código SCIP

Al minimizar el *makespan*, la energía total consumida para elaborar las órdenes del caso de estudio es de 18.641 kW-h y de 18.338 kW-h con los *solvers* BARON y SCIP, respectivamente. Estos valores son levemente mayores a los registrados en planta en un 5% con BARON y en un 3% con SCIP, debido al aumento en el consumo energético alcanzado en las unidades 3, 4 y 5 de 4.819 kW-h (SCIP), 5.007 kW-h (ambos *solvers*) y 2.788 kW-h (BARON), respectivamente.

En la Fig. 4.22 se muestran los costos de personal y de energía eléctrica obtenidos con los códigos BARON y SCIP, respectivamente. En lo que respecta al costo salarial, se obtiene un valor de \$5.090 para ambos códigos, debido a que el *makespan* alcanzado en los dos códigos es el mismo (5.864 min). Por otra parte, se obtuvieron costos totales por el consumo de energía eléctrica de \$1.678 y \$1.650 con los *solvers* mencionados, valores cercanos al costo energético total obtenido en planta, debido a que en todos ellos la unidad con mayor consumo de energía eléctrica es la extrusora 4 (5.007 kW-h).



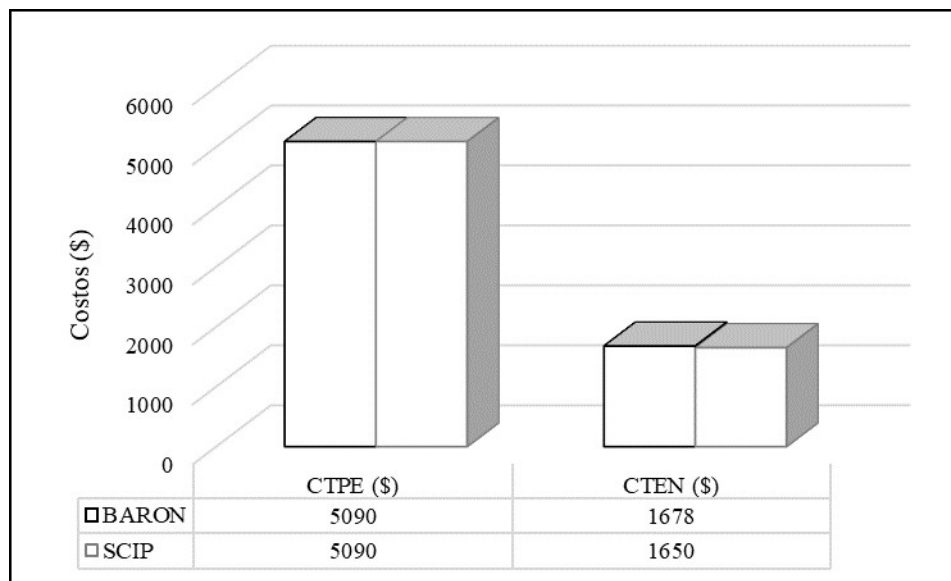


Fig. 4.22 Costos energéticos y salariales de las órdenes minimizando el *makespan* con los códigos BARON y SCIP

Por lo tanto, al variar los costos minimizando el *makespan*, también varía el beneficio. En la Fig. 4.23, se observa que el costo total para la solución obtenida con BARON es de \$31.545 y de \$31.518 para el código SCIP. Para el caso de la ganancia, se obtuvo un valor de \$16.519 para el código BARON y \$16.546 para el código SCIP. El beneficio en ambas gráficas es mayor que el presentado en la sección 4.2 (caso de referencia) debido a que el costo de mano de obra en la solución de ambos algoritmos es menor que el valor alcanzado en la planificación realizada en la planta (ver Fig. 4.6).

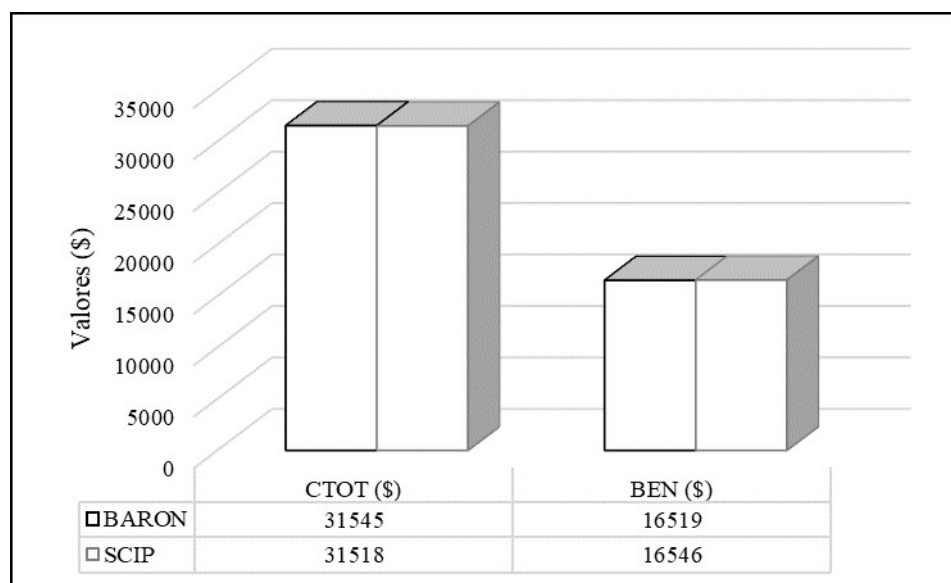


Fig. 4.23 Resultados económicos minimizando el *makespan* con los códigos BARON y SCIP

#### 4.5. Discusión de Resultados e Indicadores Adicionales

Hasta este punto en el capítulo, se han presentado y discutido parcialmente los resultados de la aplicación del modelo al caso de estudio. En esta sección, se presenta una discusión adicional que compara los resultados operativos del caso de referencia (planificación realizada en planta) con los valores óptimos obtenidos al resolver el modelo utilizando ambas funciones objetivo (*TD* y *MK*) y ambos *solvers* (BARON y SCIP). Esta comparación se centrará en indicadores económicos y de producción obtenidos en las soluciones encontradas, así como en la eficiencia computacional, evaluada en términos de tiempos de CPU.

##### 4.5.1. Indicadores Económicos

La Tabla 4.9 condensa los resultados de las variables económicas, costos, ingresos y beneficios tanto para el caso de referencia como para los cuatro casos resueltos con el modelo de optimización propuesto en esta tesis. Es importante destacar que, dado que la cantidad de órdenes a procesar es un dato fijo y que deben verificarse en las soluciones óptimas, los valores económicos que dependen de esta producción permanecen constantes. Así, todos los ítems de ingresos que se relacionan directamente con la cantidad de órdenes de compra producidas se mantienen constantes, al igual que los costos relacionados con la materia prima, la tinta y los aditivos. Esto significa que solo los costos de personal y de energía son variables en el modelo de optimización.

**Tabla 4.9.** Estructura de costos, ingresos y beneficio neto de los 5 casos analizados

Casos	Estructura de costos (\$)						Estructura de ingresos (\$)			Beneficio neto (\$)	
	<i>CTPE</i>	<i>CTMP</i>	<i>CTAD</i>	<i>CTIN</i>	<i>CTEN</i>	<i>CTOT</i>	<i>INBB</i>	<i>INBS</i>	<i>INT</i>		<i>BEN</i>
Planta	12.674	19.761	4.587	430	1.601	39.053	40.388	7.676	48.064	9.011	
<i>MK</i>	BARON	5.090	19.761	4.587	430	1.678	31.545	40.388	7.676	48.064	16.519
	SCIP	5.090	19.761	4.587	430	1.650	31.518	40.388	7.676	48.064	16.546
<i>TD</i>	BARON	7.012	19.761	4.587	430	1.868	33.658	40.388	7.676	48.064	14.406
	SCIP	8.601	19.761	4.587	430	1.821	35.199	40.388	7.676	48.064	12.864

De la Tabla 4.9 se pueden derivar las siguientes observaciones generales:

- ✓ En todos los casos evaluados, los resultados arrojados por el modelo MINLP propuesto (con las dos funciones objetivo y ambos *solvers*) para los beneficios

netos resultan mejores que para el caso de referencia. Si bien existe una gran experiencia en el personal que administra la producción de la planta, dada la cantidad de variables involucradas es de esperar que exista espacio para optimizar la operación mediante el uso de modelos.

- ✓ En promedio los valores obtenidos por el modelo matemático para los beneficios netos son del orden de \$ 15.084, unos \$ 6.073 (aproximadamente un 67 %) por encima del alcanzado en planta.
- ✓ Las mejoras en los beneficios netos se basan principalmente en la reducción de los costos de personal, a pesar del incremento en los costos de energía. Se observa que al optimizar la función objetivo *MK* se obtienen costos de personal más bajos en comparación con la función *TD*.
- ✓ Con ambos *solvers*, las soluciones obtenidas al minimizar el *makespan* logran reducir los costos de energía en comparación con la minimización de la tardanza. Los valores más elevados en estos costos obtenidos con BARON respecto a los de SCIP se deben a la mayor proporción de unidades trabajando a velocidades de producción cercanas a su límite superior. Por ejemplo, en el caso de minimizar *MK*, en la solución de BARON son 13 las unidades operando a máxima velocidad frente a 2 unidades con SCIP.
- ✓ De todos los casos evaluados, el mejor resultado corresponde a la optimización del modelo minimizando el *makespan* y utilizando el *solver* SCIP. En este caso, se logra una mejora del 84% en los beneficios netos en comparación con lo realizado efectivamente en la planta, con un total de \$16.546 frente a \$9.011.
- ✓ La disminución de los costos totales en las soluciones óptimas obtenidas en los distintos casos resueltos con el modelo representa, en promedio, un 16% menos que los costos totales incurridos en la planta.

#### 4.5.2. Funciones Objetivo e Indicadores de Producción

La Tabla 4.10 presenta un resumen de los valores de las dos funciones objetivo (*TD* y *MK*) y de cuatro indicadores de producción para los 5 casos analizados en esta tesis. Como indicadores se seleccionaron los tiempos de procesamiento, de espera y de cambio de rollos y

el número total de unidades utilizadas en la producción de las órdenes requeridas. Los valores temporales se indican en días (d).

**Tabla 4.10.** Funciones objetivo e indicadores de producción de los 5 casos analizados

Casos	Funciones objetivo		Indicadores de producción				
	TD (d)	MK (d)	Tiempos (d)			Unidades	
			Procesamiento	Espera	Cambio de rollos		
Planta	3,14	10,13	6,08	2,27	0,27	19	
MK	BARON	0,00	4,07	3,29	1,70	0,23	16
	SCIP	0,00	4,07	3,70	1,89	0,21	14
TD	BARON	0,00	5,61	3,44	1,88	0,24	14
	SCIP	0,00	6,88	4,57	1,96	0,21	14

Las observaciones de la Tabla 4.10 que pueden remarcarse son las siguientes:

- ✓ Al optimizar la función objetivo *TD* con ambos *solvers* se logra alcanzar el valor ideal de cero, a diferencia de los 3,14 días de tardanza total que ocurrieron en planta en el caso de referencia.
- ✓ Cuando se optimiza la función objetivo *MK*, ambos *solvers* obtienen el mismo valor de 4,07 días para esta variable, sin incurrir en tardanza. En los cuatro casos se logra una mejora significativa del *MK* en comparación con los 10 días del caso de referencia, con una disminución promedio de casi 5 días.
- ✓ Al optimizar *MK* con ambos *solvers*, la solución resultante reduce el valor en un 60% en comparación con el del caso de referencia, mientras que, si se optimiza *TD*, la reducción del *MK* es del orden del 38 %.
- ✓ Los tiempos de espera en los casos resueltos son menores que los ocurridos en la planta en el caso de referencia. Esto se debe a que la mayoría de las órdenes, para las dos funciones objetivo, se procesan en una o dos unidades en cada etapa a diferentes velocidades. Esto significa que no existen largos tiempos de parada como los observados en la planta y se utiliza menos la bodega de producto intermedio, lo que conduce a una mayor eficiencia del proceso.
- ✓ El tiempo total de procesamiento en la solución óptima de cada caso resuelto con el modelo es, en promedio, unos 2,3 días menor que en el caso de referencia.

Esto se debe a que la velocidad de procesamiento afecta tanto el tiempo de cambio de rollo como el tiempo de procesamiento (menor velocidad mayor tiempo), por lo que en las soluciones óptimas se eligen valores de velocidad que mejoran el tiempo total de procesamiento.

- ✓ El tiempo total en espera y el tiempo de cambio de rollos, son significativamente mejores en los casos resueltos en comparación con lo ocurrido en la planta, con mejoras de casi 1 día y 0,03 días, respectivamente.
- ✓ Las soluciones óptimas logran cumplir los mismos objetivos de producción usando una menor cantidad de unidades, entre 6 y 4 unidades menos en comparación con el caso de referencia. Esto se logra gracias a una óptima elección de las velocidades de procesamiento y las capacidades de producción de las diferentes unidades.
- ✓ El *solver* BARON, permite obtener mejores valores de *makespan* que SCIP cuando se optimiza la función objetivo *TD* (5,61 días vs 6,88) mientras que al minimizar *MK* los dos *solvers* logran que la tardanza sea nula.

### 4.5.3. Tiempos de Cómputo

En cuanto a los tiempos de CPU, como era de esperar, debido a que BARON es un *solver* global y SCIP es un *solver* local, los tiempos de cómputo de BARON son significativamente mayores. La Tabla 4.11 resume estos tiempos en segundos y minutos, tanto por *solver* como por función objetivo, y se puede observar efectivamente cuáles son esas diferencias.

**Tabla 4.11.** Tiempo de CPU de los casos analizados

	<b>Casos</b>	<b>CPU (s)</b>	<b>CPU (min)</b>
<i>MK</i>	BARON	172	2,87
	SCIP	1,64	0,027
<i>TD</i>	BARON	46,53	0,78
	SCIP	0,47	0,0078

Es importante aclarar que todos los casos se implementaron en el programa GAMS y fueron resueltos con una diferencia de integralidad (*gap*) relativa y absoluta del 0%. Esto

significa que el *solver* detendrá el proceso de solución cuando se garantice que la diferencia proporcional entre la solución encontrada y la mejor función objetivo teórica sea menor que esa tolerancia. Al establecer el criterio en 0% se asegura que la solución encontrada por el *solver* sea la óptima.

Como se puede observar en la Tabla 4.11, los tiempos requeridos por BARON para hallar la solución son considerablemente mayores, aproximadamente en un orden de magnitud, en comparación con los de SCIP. Sin embargo, dado que el problema, a pesar de ser no lineal, tiene dimensiones moderadas, estos tiempos no son excesivos. El mayor tiempo de CPU, que corresponde al caso que utiliza BARON como *solver* y optimiza el *MK*, es de aproximadamente 3 minutos.

Este tiempo requerido para resolver el modelo MINLP propuesto resulta totalmente razonable para planificar una producción semanal y, en consecuencia, los dos *solvers* podrían ser utilizados para resolver el problema.

#### 4.5.4. Rutas de las Órdenes

En cuanto al análisis comparativo de las rutas seguidas por las diferentes órdenes (Tabla 4.12) en los casos estudiados, es importante destacar que la estructura de etapas que cada orden debe seguir está determinada por el tipo de producto que se debe elaborar en la misma, lo que significa que es la misma en todos los casos. En cambio, sí se observa una variación en las unidades utilizadas por la orden en cada etapa, es decir, se encuentran rutas de procesamiento diferentes en las soluciones proporcionadas por cada *solver* al minimizar ambas funciones objetivo.

Al extraer las secuencias de unidades que definen los caminos de las diferentes órdenes, tal como se ilustra en las Figs. 4.2, 4.3, 4.8, 4.9, 4.16 y 4.17, se puede apreciar que, en general, BARON difiere más en la elección de las unidades en comparación con la elección realizada en la planta, que lo que hace el *solver* SCIP.

Tabla 4.12. Rutas de las órdenes

Orden	Casos		Etapas			Orden	Casos		Etapas		
			$s_1$	$s_2$	$s_3$				$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	Planta		$u_7$	--	$u_{20}$	$i_2$	Planta		$u_6$	--	$u_{19}$
	MK	BARON	$u_6$	--	$u_{19}$		MK	BARON	$u_7$	--	$u_{19}$
		SCIP	$u_6$	--	$u_{20}$			SCIP	$u_6$	--	$u_{19}$
	TD	BARON	$u_7$	--	$u_{19}$		TD	BARON	$u_7$	--	$u_{20}$
SCIP		$u_6$	--	$u_{20}$	SCIP	$u_6$		--	$u_{19}$		
$i_3$	Planta		$u_2$	$u_9$	$u_{13}$	$i_4$	Planta		$u_1$	--	$u_{12}$
	MK	BARON	$u_5$	$u_{10}$	$u_{14}$		MK	BARON	$u_3$	--	$u_{13}$
		SCIP	$u_3$	$u_9$	$u_{14}$			SCIP	$u_2$	--	$u_{12}$
	TD	BARON	$u_5$	$u_9$	$u_{14}$		TD	BARON	$u_3$	--	$u_{11}$
SCIP		$u_5$	$u_9$	$u_{11}$	SCIP	$u_5$		--	$u_{12}$		
$i_5$	Planta		$u_3$	--	$u_{11}$	$i_6$	Planta		$u_2$	$u_{10}$	$u_{14}$
	MK	BARON	$u_1$	--	$u_{14}$		MK	BARON	$u_5$	$u_9$	$u_{11}$
		SCIP	$u_3$	--	$u_{12}$			SCIP	$u_3$	$u_{10}$	$u_{11}$
	TD	BARON	$u_5$	--	$u_{15}$		TD	BARON	$u_3$	$u_9$	$u_{14}$
SCIP		$u_3$	--	$u_{12}$	SCIP	$u_5$		$u_9$	$u_{12}$		
$i_7$	Planta		$u_5$	$u_8$	$u_{16}$	$i_8$	Planta		$u_5$	$u_8$	$u_{17}$
	MK	BARON	$u_3$	$u_9$	$u_{17}$		MK	BARON	$u_2$	$u_8$	$u_{17}$
		SCIP	$u_2$	$u_9$	$u_{16}$			SCIP	$u_2$	$u_9$	$u_{16}$
	TD	BARON	$u_3$	$u_8$	$u_{17}$		TD	BARON	$u_3$	$u_{10}$	$u_{17}$
SCIP		$u_5$	$u_9$	$u_{17}$	SCIP	$u_5$		$u_{10}$	$u_{16}$		
$i_9$	Planta		$u_4$	$u_8$	$u_{18}$	$i_{10}$	Planta		$u_4$	$u_8$	$u_{18}$
	MK	BARON	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$		MK	BARON	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$
		SCIP	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$			SCIP	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$
	TD	BARON	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$		TD	BARON	$u_4$	$u_8$	$u_{18}$
SCIP		$u_4$	$u_8$	$u_{18}$	SCIP	$u_4$		$u_8$	$u_{18}$		

#### 4.5.5. Variables Relacionadas a las Órdenes

A continuación, se analizan los resultados de las variables relacionadas con las órdenes, obtenidos en la solución proporcionada por cada *solver* al se minimiza tanto la tardanza como el *makespan*.

*Variables relacionadas con las dimensiones de los rollos:*

- ✓  $Dr_i$ : Diámetro del rollo de la orden  $i$  (m)
- ✓  $Qr_i$ : Peso de un rollo de la orden  $i$  (kg)
- ✓  $Nr_i$ : Número total de rollos de la orden  $i$

Los valores de las variables de diámetro, peso y número de rollos obtenidos con ambos *solvers* al minimizar  $TD$  y  $MK$  se presentaron en las Tablas 4.5 y 4.8, respectivamente. Se observa que, en general, se obtienen los mismos valores para las órdenes con ambas funciones objetivo y utilizando los 2 *solvers*. En el caso de la minimización del *makespan*, la única orden que presenta diferentes valores es la 5, donde el *solver* BARON muestra una reducción en el diámetro y peso del rollo, con el consiguiente aumento en el número total de rollos elaborados, siendo de 0,391m, 106,69 kg y 22, respectivamente. Por otro lado, las ordenes 3, 4 y 6 son las que presentan valores diferentes para estas dimensiones cuando se minimiza  $TD$  utilizando BARON. Se puede ver que también aumentan los  $Nr_i$  y disminuyen  $Dr_i$  y  $Qr_i$  en estas órdenes.

#### ***Variables de tiempos de procesamiento de las órdenes***

- ✓  $Tb_{ius}$ : Tiempo de procesamiento de una bolsa de la orden  $i$ , en la unidad  $u$  y etapa  $s$  (min)
- ✓  $TT_{ius}$ : Tiempo total de procesamiento de la orden  $i$ , en la unidad  $u$  y etapa  $s$  (min)

Según se evidencia en las Tablas 4.13 y 4.14, los tiempos de procesamiento de una bolsa de la orden  $i$  y el tiempo total requerido para dicha orden en la unidad asignada en cada etapa son, en su mayoría, inferiores en las soluciones proporcionadas por BARON. Sin embargo, existen excepciones en el caso de SCIP en las órdenes 1, 2, 3 y 5, resaltadas en gris en las tablas.

Al calcular los tiempos totales de procesamiento de una dada orden  $i$ , en todas las unidades y etapas, se observa que, en el caso de la función objetivo  $MK$ , los resultados proporcionados por el *solver* BARON son superiores, ya que ajusta las variables de decisión de modo tal que estas toman valores más bajos, lo que implica tiempos de procesamiento más cortos. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 4.13 existen dos excepciones que corresponden a las órdenes 1 y 5, donde los resultados del *solver* SCIP son mejores. Esto se debe a que estas dos órdenes tienen velocidades de procesamiento mayores, lo que resulta en tiempos más cortos. En resumen, parece que la solución de SCIP enfatiza este aspecto más local (solo dos órdenes) mientras que la solución de BARON se concentra en proporcionar una solución general para todas las órdenes. Es decir que BARON ofrece una solución en la



que se logra una distribución más equitativa de los tiempos de operación de cada orden entre todas las unidades y etapas.

**Tabla 4.13.** Tiempo de procesamiento de una bolsa  $Tb_{ius}$  (min)

Orden	Casos		Etapas			Orden	Casos		Etapas		
			$s_1$	$s_2$	$s_3$				$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	MK	BARON	0,02	--	0,012	$i_2$	MK	BARON	0,019	--	0,012
		SCIP	0,016	--	0,014			SCIP	0,016	--	0,022
	TD	BARON	0,019	--	0,016		TD	BARON	0,019	--	0,012
		SCIP	0,021	--	0,022			SCIP	0,021	--	0,020
$i_3$	MK	BARON	0,024	0,005	0,012	$i_4$	MK	BARON	0,025	--	0,012
		SCIP	0,027	0,01	0,026			SCIP	0,027	--	0,016
	TD	BARON	0,037	0,006	0,012		TD	BARON	0,025	--	0,012
		SCIP	0,027	0,008	0,020			SCIP	0,027	--	0,021
$i_5$	MK	BARON	0,025	--	0,026	$i_6$	MK	BARON	0,024	0,005	0,012
		SCIP	0,036	--	0,014			SCIP	0,027	0,013	0,024
	TD	BARON	0,049	--	0,015		TD	BARON	0,025	0,005	0,012
		SCIP	0,034	--	0,023			SCIP	0,027	0,008	0,020
$i_7$	MK	BARON	0,004	0,001	0,003	$i_8$	MK	BARON	0,004	0,002	0,003
		SCIP	0,005	0,002	0,005			SCIP	0,005	0,002	0,005
	TD	BARON	0,004	0,001	0,003		TD	BARON	0,004	0,001	0,003
		SCIP	0,005	0,002	0,004			SCIP	0,005	0,003	0,006
$i_9$	MK	BARON	0,006	0,001	0,004	$i_{10}$	MK	BARON	0,011	0,001	0,005
		SCIP	0,006	0,001	0,005			SCIP	0,011	0,001	0,005
	TD	BARON	0,006	0,001	0,004		TD	BARON	0,011	0,001	0,005
		SCIP	0,007	0,002	0,006			SCIP	0,013	0,002	0,007

En cuanto a la función objetivo  $TD$ , se observa que la solución de BARON es superior para 9 de las 10 órdenes. Solo en el caso de la orden 5, la solución de SCIP supera a la de BARON. Esto se debe a que esta orden de baja densidad tiene una velocidad de procesamiento más alta (37,8 vs. 26,3 m/min), lo que resulta en un tiempo de procesamiento menor en la etapa de extrusión. Nuevamente, parece que la solución de SCIP prioriza características específicas favorables (o locales en el conjunto de todas las órdenes), mientras que la solución de BARON logra un mejor equilibrio global para todas las órdenes.

#### 4.5.6. Recomendación Final

De los estudios realizados se pueden derivar algunas conclusiones que pueden orientar a la empresa en la elección de la función objetivo y el *solver* más adecuado, en caso de que se desee utilizar el modelo desarrollado en esta tesis como herramienta de apoyo a la toma de decisiones operativas en la planta.

**Tabla 4.14.** Tiempo total de procesamiento de una orden  $TT_{ius}$  (min)

Orden	Casos		Etapas			Orden	Casos		Etapas		
			$s_1$	$s_2$	$s_3$				$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	MK	BARON	2,519	--	1,524	$i_2$	MK	BARON	1,920	--	1,219
		SCIP	2,061	--	1,756			SCIP	1,649	--	2,150
	TD	BARON	2,400	--	2,014		TD	BARON	1,920	--	1,219
		SCIP	2,603	--	2,760			SCIP	2,083	--	2,031
$i_3$	MK	BARON	1,178	258	612	$i_4$	MK	BARON	1,230	--	612
		SCIP	1,353	525	1,306			SCIP	1,374	--	784
	TD	BARON	1,846	276	612		TD	BARON	1,231	--	612
		SCIP	1,345	397	1,009			SCIP	1,345	--	1,049
$i_5$	MK	BARON	1,240	--	1,311	$i_6$	MK	BARON	1,178	258	612
		SCIP	1,799	--	703			SCIP	1,353	657	1,203
	TD	BARON	2,456	--	763		TD	BARON	1,231	258	612
		SCIP	1,710	--	1,143			SCIP	1,345	389	1,011
$i_7$	MK	BARON	1,111	239	834	$i_8$	MK	BARON	1,111	412	834
		SCIP	1,241	533	1,132			SCIP	1,241	448	1,190
	TD	BARON	1,111	239	834		TD	BARON	1,111	239	834
		SCIP	1,214	405	1,065			SCIP	1,214	749	1,383
$i_9$	MK	BARON	2,489	410	1,778	$i_{10}$	MK	BARON	2,193	201	953
		SCIP	2,489	471	1,831			SCIP	2,193	201	953
	TD	BARON	2,489	410	1,778		TD	BARON	2,193	201	953
		SCIP	2,993	794	2,379			SCIP	2,637	484	1,347

En primer lugar, como era de esperar, las soluciones proporcionadas por el modelo son significativamente mejores que la implementada en la planta. Esto reafirma la utilidad de desarrollar y eventualmente implementar el modelo como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la planta.

En cuanto a los *solvers*, es importante recordar dos diferencias fundamentales entre BARON y SCIP como *solvers* de optimización. BARON es un *solver* de optimización global, lo que significa que obtiene la mejor solución teórica posible para cada escenario ejecutado, mientras que SCIP, al ser un *solver* de optimización local, no puede garantizar que la solución encontrada, aunque pueda ser buena desde el punto de vista práctico, sea la mejor desde el punto de vista teórico. Además, es importante destacar que BARON es un *solver* de pago, que requiere disponer de la herramienta GAMS, mientras que SCIP puede adquirirse a un costo muy bajo para las empresas. Aunque también está disponible bajo GAMS, se puede obtener una licencia independiente sin necesidad de adquirir otros programas.

Si únicamente se observa la calidad de las soluciones, sin tener en cuenta consideraciones de costos y tiempos de cómputo, los estudios realizados confirman que, como era de esperar, BARON proporciona soluciones igualmente buenas o incluso mejores en términos de diversas variables operativas en comparación con las proporcionadas por SCIP. Además, ofrece la garantía de encontrar la mejor solución teórica.

Sin embargo, es importante destacar que, no existen diferencias entre BARON y SCIP en cuanto a los valores obtenidos de las funciones objetivo  $MK$  y  $TD$ . Como se puede observar en la Tabla 4.10, si se opta por optimizar la función objetivo  $TD$ , ambos *solvers* encuentran la solución ideal, esto es, que la tardanza sea cero, siendo mínima la diferencia en la variable  $MK$  calculada es en ambos casos. Cuando se optimiza la función objetivo  $MK$ , ambos *solvers* ofrecen el mismo valor y el valor de la variable  $TD$  calculada es igual a la solución ideal.

En lo que respecta a los tiempos de cómputo, como era de esperar, BARON, al ser un *solver* de optimización global, requiere un tiempo de CPU considerablemente mayor en términos relativos que SCIP. Sin embargo, si consideramos los valores absolutos de estos tiempos y teniendo en cuenta que el problema que se está resolviendo es relativamente pequeño en tamaño, los tiempos son bastante bajos, del orden de unos pocos minutos (alrededor de 1 minuto para SCIP y 3 minutos para BARON). Estos valores son completamente aceptables, especialmente desde una perspectiva práctica para un problema que no requiere una resolución en tiempo real.

En base a estas consideraciones de calidad de las soluciones, tiempos de cómputo y costos, se recomienda el uso del *solver* SCIP para una posible implementación práctica en la planta en estudio, en particular, la optimización de la función objetivo  $MK$  parece ser la opción más conveniente.

**CAPÍTULO 5**  
**CONCLUSIONES Y TRABAJO**  
**FUTURO**

## 5.1. Conclusiones y Trabajo Futuro

En esta tesis se presentó el desarrollo y aplicación de un modelo de optimización para el planeamiento de las operaciones de corto plazo en una planta discontinua destinada a la producción de bolsas plásticas. Se trata de un modelo MINLP donde se analizan dos criterios de evaluación correspondientes a minimizar la tardanza en la entrega de todas las órdenes en el horizonte de programación o el tiempo total de producción de todas las órdenes también conocido como *makespan*. Se presentan resultados de un estudio de caso correspondiente a una planta de bolsas plásticas ubicada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, la cual consta de varias unidades en cada una de las etapas del proceso.

El modelo propuesto captura las principales consideraciones operativas de este tipo de plantas como la asignación de las órdenes a las diferentes unidades de cada etapa de procesamiento, mientras verifica restricciones de equipamiento y calidad de producto. A diferencia de lo realizado en trabajos previos para este tipo de plantas, el modelo propuesto incorpora variables de proceso como variables de decisión.

Los resultados del modelo se compararon con los datos correspondientes a una semana de operación de la planta en 2018. Se observó que al utilizar el modelo se logra una programación más eficiente de las operaciones de la planta, gracias a una mejor secuenciamiento de las órdenes de producción de bolsas de plástico. Esto resultó en la utilización de menos unidades de procesamiento y una reducción en los costos laborales, a pesar del aumento en el costo de la energía.

El modelo fue implementado en el programa GAMS y se utilizaron dos *solvers* alternativos: el código comercial BARON que implementa una estrategia de optimización global y el *solver* no comercial SCIP, que utiliza una metodología de tipo local. Los resultados obtenidos con ambos *solvers* permitieron obtener un mejor programa de producción para el caso de estudio, tanto al minimizar el tiempo total de producción como al minimizar la tardanza. Aunque no se utilizó como criterio de optimización, en todos los casos se logró un mayor beneficio económico en comparación con lo ocurrido en planta.

El modelo desarrollado representa una variación de un trabajo previo en la literatura (Leung, 2009), en el cual se han incorporado restricciones adicionales relacionadas con

características específicas de la planta. Estas restricciones permiten capturar y calcular diversas variables operativas, como el peso, número y diámetro de los rollos obtenidos en la etapa de extrusión, el tiempo de elaboración de cada bolsa, los índices de calidad (índice volumétrico de fluidez y resistencia al impacto), y las velocidades y capacidades de producción de las unidades utilizadas en cada etapa.

Uno de los hallazgos significativos de este trabajo de tesis es la importancia de la velocidad de procesamiento de las órdenes, que se relaciona directamente con la calidad del producto y el tiempo de producción. Al considerar la velocidad de procesamiento como una variable de optimización, fue posible lograr tiempos de producción más eficientes sin comprometer la calidad del producto. Esta inclusión de la velocidad de procesamiento convirtió el modelo en un problema de optimización no lineal más complejo, específicamente en un problema MINLP.

Otra mejora significativa incorporada en el modelo se relaciona con la etapa clave del proceso: la extrusión, donde se produce la película plástica base para las bolsas. Se introdujo la posibilidad de ajustar las velocidades de procesamiento de las órdenes, lo que implica variar la velocidad del tornillo de la extrusora. Esta adición permitió abordar un aspecto crítico en la producción de bolsas: la calidad. Al controlar cuidadosamente este parámetro, se puede acotar la aparición de deformaciones y cumplir con las especificaciones de calidad. Además, las velocidades de los rodillos de extrusión influyen en los tiempos de producción de las órdenes, por lo que el modelo aborda simultáneamente consideraciones de calidad y eficiencia en la producción.

Estas modificaciones permiten tener un modelo más realista, de modo que pueda constituir una herramienta práctica para planificar de forma óptima las operaciones de este tipo de plantas, permitiendo cumplir con los plazos de entrega y/o minimizar los tiempos de producción.

Como trabajo futuro para este modelo, se considera su aplicación en otros tipos de plantas de plásticos que involucren datos adicionales de la planta o definan métricas de calidad específicas que se deseen optimizar. El modelo puede ser adaptado para abordar diversos criterios de optimización, como la minimización de costos o la maximización de beneficios, en función de los objetivos particulares de cada planta.

## **REFERENCIAS**

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 38Consumer. (26 de septiembre de 2017). *¿Quién inventó las bolsas de plástico?* México. <https://38consumer.com/2017/09/26/quien-invento-las-bolsas-de-plastico/> [visitado 9 de mayo 2018].
- Arboleda, J.; Ramírez, N. (2014). *Modelamiento matemático del programa maestro de producción [MPS] en una empresa del sector de plásticos*. Ingenium, 8 (20), 47-55.
- Borja Manobanda, S.; Tigreros Arreaga, J. (2018). *Evaluación y propuestas de mejoras en la distribución espacial de la fábrica SERVIPAXA S.A.* [Tesis de Grado en Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15479>
- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; Raman, R. A. *User's guide*. (2012). Available at the GAMS Development Corporation web site: <http://www.gams.com/> [visitado 1 de diciembre 2017].
- Díaz-Ramírez, J.; Huertas, J. I. (2018). *A continuous time model for a short-term multiproduct batch process scheduling*. Ingeniería e Investigación, 38(1), 96–104. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n1.66425>
- Elekidis, A.; Coraminas, F.; Georgiadis, M. (2019). *Optimal short-term Scheduling of Industrial Packing Facilities*. Computer Aided Chemical Engineering, 46, 1183–1188. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50198-3>
- Gallego, L. M.; Ortega, A. (2019). *Propuesta de estandarización en la fabricación de bolsas en Paperplast SAS*. Facultad Tecnológica. Tecnología en Gestión Industrial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. <http://hdl.handle.net/11349/15783>
- Gopura, R. A. C. R.; Jayawardane T. S. S. (2009). *A study on a poly-bag manufacturing system preliminary analysis and simulation*. 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 546–551, <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2009.5429802>
- Gopura, R. A. C. R.; Jayawardane T. S. S. (2012). *Analysis, modeling and simulation of a poly-bag manufacturing system*. Engineering, 4, 256–265.



- Gupta, S.; Karimi I. A. (2003). *An improved MILP formulation for scheduling multiproduct, multistage batch plants*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 2365-2380.
- Harjunkski, I.; Maravelias, C. T.; Bongers, P.; Castro, P. M.; Engell, S.; Grossmann, I. E.; Hooker, J.; Méndez, C.; Sand, G.; Wassick, J. (2014). *Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods*. *Computers & Chemical Engineering*, 62, 161–193
- Hui, C.; Gupta, A. (2001). *A bi-index continuous-time mixed-integer linear programming model for single-Stage batch scheduling with parallel units*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 5960-5967.
- Jadayil, A. W.; Khraisat, W; Shakoor, M. (2017). *Different strategies to improve the production to reach the optimum capacity in plastic country*. *Cogent Engineering*, 4: 1389831. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1389831>
- Jumarsol (9 de diciembre de 2015). *La historia de las bolsas de plástico*. <http://blogjumarsol.es/la-historia-de-las-bolsas-de-plastico/> [visitado el 10 de mayo 2018]
- Kopanos, G.; Puigjaner, L. (2009). *A MILP scheduling model for multi-stage batch plants*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 26, 369-374.
- Krastek, R.; Ramos, S.; Duarte, A. (2012). *Formulación de un modelo matemático para optimizar el tiempo de producción en una planta extrusoras de tubos*. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 16(62), 33 - 41.
- Leung, M. (2009). *Production scheduling optimization of a plastics compounding plant with quality constraints*. [Master's Thesis. Master of Applied Science in Chemical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canadá].
- Liberopoulos, G.; Kozanidis, G.; Hatzikonstantinou, O. (2010). *Production scheduling of a multi-grade PET resin plant*. *Computers & Chemical Engineering*, 34, 387-400.
- Macas Valdez, X. O.; Salazar Alvear, M. V. (2017). *Diseño y construcción de un equipo para ensayo de impacto por caída de dardo conforme a la norma ASTM D1709-15*. [Tesis de Maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Facultad de Ingeniería

- Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador].  
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17224>
- Martínez, M. A.; Vicuña, Z. (2017). *Estimación del consumo y tiempo de uso de fundas plásticas para el transporte de mercancías en los principales comercios de la ciudad de Cuenca, e impactos de la aplicación de medidas restrictivas*. [Tesis de Maestría. Departamento de Posgrados. Maestría en Gestión Ambiental Versión III. Universidad del Azuay, Ecuador].
- Méndez, C.A.; Henning, G.P.; Cerdá, J. (2000). *Optimal scheduling of batch plants satisfying multiple product orders with different due-dates*. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 2223–2245.
- Méndez, C.A.; Cerdá, J.; Grossmann, I.E.; Harjunkoski, I.; Fahl, M. (2006). *State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes*. *Computers and Chemical Engineering*, 30, 913–946
- Ministerio del Ambiente (MAE). (15 de abril de 2014). *MAE promueve la primera política de consumo responsable de fundas plásticas tipo camiseta*. Quito, Ecuador.  
<http://www.ambiente.gob.ec/mae-promueve-la-primera-politica-de-consumo-responsable-de-fundas-plasticas-tipo-camiseta/#> [visitado 8 de junio 2018]
- Okoli, N.; Obuka, N.; Onyechi, P.; Ikwu, G. (2012). *Modeling of production plan and scheduling of manufacturing process for a plastic industry in Nigeria*. *Industrial Engineering Letters*, 8, 30-40.
- Patterson, A.; Rocha, T.; Allison, J.; Messimer, S. (2019). *IZOD impact properties of full-density FDM polymer materials with respect to raster angle and print orientation*. *Proceedings of IMECHE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 1-3.
- Rajapack. (17 de junio de 2015). *Diferencias entre polietileno y polipropileno*. Madrid, España. <https://www.rajapack.es/blog-es/curiosidades/diferencias-entre-polipropileno-polietileno> [visitado 11 de mayo 2018]
- Sangurima Chunchi, E. X.; Maldonado Tapia, F. M. (2018). *Determinación del índice de fluidez, torque máximo y temperatura de degradación, de residuos plásticos provenientes de la represa Daniel Palacios, ubicada en el cantón Paute, provincia del Azuay*. [Trabajo

- Final de Grado. Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador].  
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16621>
- Santos-Torres, M.; Bandoni, J. A.; Moreno, M. S. (2020). *Modeling and optimization for short-term scheduling of plastic bag plants*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 619-624.
- Sosa Toapanta, J. V. (2016). *Estudio de factibilidad en la adquisición del material plástico reciclado de polietileno en una industria de fundas plásticas de la ciudad de Guayaquil*. [Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Guayaquil].  
<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/14252>
- Wang, Y.; Lian, X.; Gao, X.; Feng, Z.; Huang, D.; Chen, T.; Liu, S.; Bai, J. (2016). *Multiperiod planning of a PVC plant for the optimization of process operation and energy consumption: An MINLP approach*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55, 12430-12443.
- World Environment Day. (25 de abril de 2018). *La historia de la bolsa de plástico, desde su nacimiento hasta su prohibición*. USA. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-historia-de-la-bolsa-de-plastico-desde-su-nacimiento-hasta-su>  
[visitado 10 de mayo 2018]
- Xu, T.; Shen, W.; Lin, X.; Xie, Y. M. (2020). *Mechanical properties of additively manufactured thermoplastic polyurethane (TPU) material affected by various processing parameters*. *Polymers*, 12, 3010.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

## Nomenclatura

Tabla A.1. Conjuntos

Símbolo	Descripción	
$I$	Conjunto de órdenes que deben ser procesadas en el horizonte de planeamiento	$(i, j) \in I$
$U$	Conjunto de unidades disponibles en planta	$(u, v) \in U$
$S$	Conjunto de etapas de procesamiento	$(s, r) \in S$
$M$	Conjunto de materias primas	$m \in M$
$A$	Conjunto de aditivos	$a \in A$
$K$	Conjunto de tintas	$k \in K$

Tabla A.2. Subconjuntos

Símbolo	Descripción	
$I_s$	Conjunto de órdenes que se procesan en la etapa $s$	$(i, j) \in I_s$
$I_u$	Conjunto de órdenes que pueden ser procesadas en la unidad $u$	$(i, j) \in I_u$
$U_s$	Conjunto de unidades que están en la etapa $s$	$(u, v) \in U_s$
$U_i$	Conjunto de unidades que pueden procesar la orden $i$	$(u, v) \in U_i$
$M_i$	Conjunto de materia prima de las órdenes de producción $i$	$m \in M_i$
$A_i$	Conjunto de aditivos que posee la orden de producción $i$	$a \in A_i$
$K_i$	Conjunto de tintas que posee la orden de producción $i$	$k \in K_i$
$PP_{is}$	Conjunto de órdenes que preceden a la orden $i$ en la etapa $s$	$i \in PP_{is}$
$PS_{is}$	Conjunto de órdenes que suceden a la orden $i$ en la etapa $s$	$i \in PS_{is}$
$NS_{si}$	Etapas sucesoras de $s$ en el procesamiento de la orden $i$	$s \in NS_{si}$

Tabla A.3. Parámetros

Símbolo	Descripción	Unidades
$Comax_{ki}$	Consumo máximo de tinta $k$ de una orden $i$	kg
$C_{ij}$	Tiempo requerido para un cambio de órdenes (de una orden $i$ a una orden $j$ )	min
$PM_{mi}$	Porcentaje de la cantidad de materia prima $m$ de una orden $i$	%
$PA_{ai}$	Porcentaje de la cantidad de aditivo $a$ de una orden $i$	%
$BM$	Número grande	s/u
$DEX$	Porcentaje de desperdicio en la etapa $s_l$	%
$DEM$	Diámetro del embobinador de una unidad	m
$PTMAX$	Peso total admisible máximo para un rollo en una unidad	kg
$PEP$	Precio de energía de producción de una unidad	\$/kW-h
$NPE$	Cantidad de personal dentro de la planta	s/u
$SPE$	Salario básico del personal	\$/mes
$Filb_i$	factor de impresión de la longitud de la bolsa de la orden $i$	s/u
$dd_i$	Fecha límite de entrega de la orden $i$	min
$Eb_i$	Espesor de la bolsa de la orden $i$	m
$De_i$	Densidad de la orden $i$	kg/m <sup>3</sup>
$Lb_i$	Longitud de la bolsa de la orden $i$	m
$Ab_i$	Ancho de la bolsa de la orden $i$	m
$Nb_i$	Número total de bolsas de la orden $i$	s/u
$Ar_i$	Ancho del rollo de la orden $i$	m
$Er_i$	Espesor del rollo de la orden $i$	m
$CAP_u$	Capacidad máxima de producción de una unidad $u$	kg/min
$TCr_u$	Tiempo de cambio de rollo en una unidad $u$	min
$CEP_u$	Consumo de energía específico de producción en una unidad $u$	kW-h/kg
$PV_i$	Precio de venta de una orden $i$	\$/kg
$PMP_m$	Precio de materia prima $m$	\$/kg
$PAD_a$	Precio de aditivos $a$	\$/kg
$PTIN_k$	Precio de tinta $k$	\$/kg
$QT_i$	Peso total de la orden $i$	kg
$Qb_i$	Peso de una bolsa de la orden $i$	kg
$Qm_i$	Peso de un metro de rollo de la orden $i$	kg
$MP_{mi}$	Cantidad de materia prima $m$ de una orden $i$	kg
$AD_{ai}$	Cantidad de aditivo $a$ de una orden $i$	kg
$ToMP_m$	Cantidad total de materia prima $m$	kg
$ToAD_a$	Cantidad total de aditivo $a$	kg
$Co_{ki}$	Consumo de tinta $k$ de una orden $i$	kg
$ToCo_k$	Consumo total de tinta $k$	kg
$Prlo_{ius}$	Velocidad de procesamiento mínima de una orden $i$ en una unidad $u$ en una etapa $s$	m/min
$Qplo_{iu}$	Capacidad de producción mínima de una orden $i$ en una unidad $u$	kg/min

**Tabla A.4.** Variables binarias

Símbolo	Descripción	Unidades
$X_{ijs}$	Orden $j$ a ser procesada directamente después de orden $i$ en la etapa $s$	s/u
$W_{iu}$	Orden $i$ a ser procesada en la unidad $u$	s/u
$Z_{iu}$	Primera orden $i$ a ser procesada en la unidad $u$	s/u

**Tabla A.5.** Variables continuas

Símbolo	Descripción	Unidades
$Tb_{ius}$	Tiempo de procesamiento de una bolsa de la orden $i$ en la unidad $u$ en una etapa de procesamiento $s$	min
$TT_{ius}$	Tiempo total de procesamiento de la orden $i$ en la unidad $u$ en una etapa de procesamiento $s$	min
$Pr_{ius}$	Velocidad de procesamiento de la orden $i$ en la unidad $u$ en una etapa de procesamiento $s$	m/min
$TS_{is}$	Tiempo de inicio para procesar la orden $i$ en la etapa $s$	min
$TF_{is}$	Tiempo de finalización de procesamiento de la orden $i$ en la etapa $s$	min
$D_i$	Tardanza o retraso en la finalización de procesamiento de una orden $i$	min
$Qp_{iu}$	Capacidad de producción de una orden $i$ en una unidad $u$	kg/min
$Dr_i$	Diámetro del rollo de una orden $i$	m
$DU_{iu}$	Diámetro del rollo de una orden $i$ en una unidad $u$	m
$Qr_i$	Peso del rollo de la orden $i$	kg
$TTC_{iu}$	Tiempo de cambio de rollo de una orden $i$ en una unidad $u$	min
$Nt_u$	Velocidad del tornillo de extrusión de una unidad $u$	rpm
$IMP_{ius}$	Prueba de impacto al dardo de un material producida de una orden $i$ en una unidad $u$	J/m <sup>2</sup>
$MVR_{ius}$	Índice volumétrico de fluidez de un material producido de una orden $i$ en una unidad $u$	cm <sup>3</sup> /10 min
$TTX_u$	Tiempo total de procesamiento en una unidad $u$	min
$EP_u$	Consumo de energía de producción en una unidad $u$	kW-h
$EPT$	Consumo total de energía de producción	kW-h
$TD$	Tardanza total	min
$H$	Tiempo total de producción o "Makespan"	min

**Tabla A.6.** Variable entera

Símbolo	Descripción	Unidades
$Nr_i$	Número total de rollos de la orden $i$	s/u

Tabla A.7. Parámetros de costos

Símbolo	Descripción	Unidades
$PTOT$	Cantidad total de productos (órdenes)	kg
$PTBS$	Cantidad total de bolsas de supermercado	kg
$PTBB$	Cantidad total de bolsas de banano	kg
$CMP_m$	Costo de materia prima $m$	\$
$CAD_a$	Costo de aditivos $a$	\$
$CTIN_k$	Costo de tinta $k$	\$
$CEN_u$	Costo del consumo de energía de producción en una unidad $u$	\$
$CTMP$	Costo total de materia prima	\$
$CTAD$	Costo total de aditivos	\$
$CTTIN$	Costo total de tinta	\$
$CTEN$	Costo total del consumo de energía de producción	\$
$CTPE$	Costo total por todo el personal de la planta	\$
$CTOT$	Costo total	\$
$IN_i$	Ingreso por cada orden $i$	\$
$INBB$	Ingreso por bolsas de banano	\$
$INBS$	Ingreso por bolsas de supermercado	\$
$INT$	Ingreso total	\$
$BEN$	Beneficio neto	\$



## ANEXO B

## Datos de la Planta

Tabla B.1. Información básica de las órdenes

Orden	$Nb_i$	$dd_i$ (min)	$Lb_i$ (m)	$Ab_i$ (m)	$Eb_i$ ( $\times 10^{-5}$ m)	$De_i$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Filb_i$	$Ar_i$ (m)	$Qm_i$ (kg/m)	$QT_i$ (kg)	$Comax_{ki}$ (kg)
$i_1$	125.000	10.080	1,8288	0,8128	1,016	950,28	-	0,8128	0,008	1884	-
$i_2$	100.000	10.080	1,8288	0,8128	1,016	950,28	-	0,8128	0,008	1507	-
$i_3$	50.000	10.080	1,3462	0,9652	2,794	925,97	0,96	0,9652	0,025	1765	0,50
$i_4$	50.000	10.080	1,3462	0,9652	2,794	925,97	-	0,9652	0,025	1765	-
$i_5$	50.000	10.080	1,2319	1,0287	3,810	925,97	-	1,0287	0,036	2347	-
$i_6$	50.000	10.080	1,3462	0,9652	2,794	925,97	0,96	0,9652	0,025	1765	0,50
$i_7$	250.000	10.080	0,254	0,4064	3,175	925,97	0,94	0,8128	0,024	797	1,00
$i_8$	250.000	10.080	0,254	0,4064	3,175	925,97	0,94	0,8128	0,024	797	1,00
$i_9$	400.000	10.080	0,5334	0,3937	1,524	950,28	0,48	0,9652	0,014	1277	0,02
$i_{10}$	200.000	10.080	0,5715	0,38735	2,540	950,28	0,44	0,9525	0,023	1122	0,02

Tabla B.2. Porcentaje de materias primas

Orden	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
$i_1$	0,90	-	-	-
$i_2$	0,95	-	-	-
$i_3$	-	-	0,70	0,30
$i_4$	-	-	0,70	0,30
$i_5$	-	-	0,70	0,30
$i_6$	-	-	0,70	0,30
$i_7$	-	0,90	-	0,10
$i_8$	-	-	0,90	0,10
$i_9$	0,96	-	-	-
$i_{10}$	0,96	-	-	-

Tabla B.3. Porcentaje de aditivos

Orden	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$i_1$	0,10	-	-
$i_2$	0,05	-	-
$i_3$	-	-	-
$i_4$	-	-	-
$i_5$	-	-	-
$i_6$	-	-	-
$i_7$	-	-	-
$i_8$	-	-	-
$i_9$	-	0,01	0,01
$i_{10}$	-	0,03	0,03

**Tabla B.4.** Datos adicionales

Datos	Valor	Unidades
<i>DEX</i>	5	%
<i>DEM</i>	0,1	m
<i>PTMAX</i>	180	kg
<i>PEP</i>	0,09	\$/kW-h
<i>SPE</i>	375	\$/mes
<i>NPE</i>	100	s/u

**Tabla B.5.** Información básica asociada a cada unidad

Unidades	$CAP_u$ (kg/min)	$TCr_u$ (min)	$CEP_u$ (kW-h/kg)
$u_1$	3,00	0,30	0,32
$u_2$	3,00	0,30	0,38
$u_3$	3,00	0,30	0,82
$u_4$	2,00	0,30	0,85
$u_5$	3,00	0,30	0,79
$u_6$	1,88	0,30	0,78
$u_7$	1,88	0,30	0,85
$u_8$	9,52	0,30	0,20
$u_9$	9,52	0,30	0,20
$u_{10}$	9,52	0,30	0,35
$u_{11}$	5,43	3,00	0,05
$u_{12}$	5,43	3,00	0,05
$u_{13}$	5,43	3,00	0,05
$u_{14}$	5,43	3,00	0,05
$u_{15}$	2,93	3,00	0,12
$u_{16}$	1,82	3,00	0,18
$u_{17}$	1,82	3,00	0,18
$u_{18}$	3,14	3,00	0,15
$u_{19}$	1,22	3,00	0,08
$u_{20}$	1,22	3,00	0,08

**Tabla B.6.** Ruta de producción de las órdenes

Orden	Etapas		
	$s_1$	$s_2$	$s_3$
$i_1$	1	-	1
$i_2$	1	-	1
$i_3$	1	1	1
$i_4$	1	-	1
$i_5$	1	-	1
$i_6$	1	1	1
$i_7$	1	1	1
$i_8$	1	1	1
$i_9$	1	1	1
$i_{10}$	1	1	1

**Tabla B.7.** Asignación de órdenes a unidades

Orden	Unidades																			
	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$	$u_7$	$u_8$	$u_9$	$u_{10}$	$u_{11}$	$u_{12}$	$u_{13}$	$u_{14}$	$u_{15}$	$u_{16}$	$u_{17}$	$u_{18}$	$u_{19}$	$u_{20}$
$i_1$	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
$i_2$	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
$i_3$	1	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
$i_4$	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-
$i_5$	1	1	1	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-
$i_6$	1	1	1	-	1	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
$i_7$	-	1	1	-	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
$i_8$	-	1	1	-	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
$i_9$	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
$i_{10}$	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-

**Tabla B.8.** Unidades en cada etapa de procesamiento

Unidades	Etapas		
	$s_1$	$s_2$	$s_3$
$u_1$	1	-	-
$u_2$	1	-	-
$u_3$	1	-	-
$u_4$	1	-	-
$u_5$	1	-	-
$u_6$	1	-	-
$u_7$	1	-	-
$u_8$	-	1	-
$u_9$	-	1	-
$u_{10}$	-	1	-
$u_{11}$	-	-	1
$u_{12}$	-	-	1
$u_{13}$	-	-	1
$u_{14}$	-	-	1
$u_{15}$	-	-	1
$u_{16}$	-	-	1
$u_{17}$	-	-	1
$u_{18}$	-	-	1
$u_{19}$	-	-	1
$u_{20}$	-	-	1

**Tabla B.9.** Límites de velocidad de procesamiento en cada unidad

Unidades	$Pr_{ius}$ (m/min)	
	Valor mínimo	Valor máximo
$u_1$	20	60
$u_2$	20	60
$u_3$	20	60
$u_4$	20	90
$u_5$	20	60
$u_6$	20	130
$u_7$	20	100
$u_8$	20	250
$u_9$	20	250
$u_{10}$	20	250
$u_{11}$	20	110
$u_{12}$	20	110
$u_{13}$	20	110
$u_{14}$	20	110
$u_{15}$	20	110
$u_{16}$	20	80
$u_{17}$	20	80
$u_{18}$	20	120
$u_{19}$	20	150
$u_{20}$	20	150

**Tabla B.10.** Indicadores de calidad

Datos	Valor	Unidades
$IMP_{ius}$	12 – 40	J/m <sup>2</sup>
$MVR_{ius}$	15 – 60	cm <sup>3</sup> /10 min
$N_u$	30 – 120	rpm

**Tabla B.11.** Precio de venta de las órdenes

Orden	Precio (\$)
$i_1$	3,98
$i_2$	3,00
$i_3$	3,43
$i_4$	2,41
$i_5$	2,41
$i_6$	3,43
$i_7$	3,39
$i_8$	3,43
$i_9$	3,55
$i_{10}$	3,62

**Tabla B.12** Precios de los materiales

Materiales	Precio (\$)
$m_1$	1,34
$m_2$	1,41
$m_3$	1,36
$m_4$	1,30
$a_1$	15,30
$a_2$	14,00
$a_3$	3,00
$k_1$	4,20
$k_2$	5,05
$k_3$	5,30
$k_4$	6,28
$k_5$	5,20
$k_6$	6,42
$k_7$	5,05
$k_8$	5,12
$k_9$	5,14
$k_{10}$	5,14
$k_{11}$	4,20

## ANEXO C

### Hoja de Cálculo de la Prueba de Impacto

En las Fig. C.1 y C.2 se muestran dos ejemplos de las hojas de control de calidad para la prueba de resistencia al impacto que se realiza en esta planta para los diferentes productos.

## CONTROL DE CALIDAD

### IMPACTO DARDO

**MEDIDAS:** 12+3 1/2 FL X 21 X 0,0006

**MAQUINA:** EXTRUSORA 5

**RESINAS:** A/D E 924 85% - REPROCESO 10% - PIG BLANCO 4 % - BIO 1%

**ROLLO:** 1

**PRODUCTO:** MI

**COMISARIATOO.P.:**19992

**TURNO:** 1

**FECHA:** 28 de Marzo de 2018

**OPERADOR:** J Bravo

**SUPERVISOR:** G Alarcon

																ni	i	ni*i			
<b>210</b>												X				X	X	X	4	1	4
<b>205</b>	X		X		X		X		X		O	X		O		O		O	6	0	0
<b>200</b>		O		O		O		O		O				O							

**N** 10 **A** 4  
**Wo** 205 **DW** 5

**WF = Wo +**  
**(DW\*((A/N) - 0,5))**

**WF =** 2

**04,5 g.**

\_\_\_\_\_  
Inspector

Fig. C 1. Hoja de cálculo de la prueba de impacto al dardo de un producto 1

# CONTROL DE CALIDAD

## IMPACTO DARDO

**MEDIDAS:** 40 x 0,00141 (0,00145)  
**MAQUINA:** EXTRUSORA # 2  
**RESINAS:** LINEAL 62009 - 99,5 % - ANTIBLOCK 0,5%  
**ROLLO:** 1  
**PRODUCTO:**  
**VACIO O.P.:** 19990

**TURNO:** 1  
**FECHA:** 27 de Marzo de 2018  
**OPERADOR:** Panchana  
**SUPERVISOR:** Eduardo Hernández

																		ni	i	ni*i
515			X					X		X		X			X			5	1	5
510		O		X		X		O		O		X		O		X		5	0	0
505	O				O		O							O			O			

**N** 10    **A** 5  
**Wo** 510    **DW** 5

**WF = Wo +**  
**(DW\*((A/N) - 0,5))**  
**WF =**  
**510 g.**

\_\_\_\_\_  
Inspector

Fig. C 2. Hoja de cálculo de la prueba de impacto al dardo de un producto 2