



POSGRADOS

Maestría en
**PRODUCCIÓN Y
OPERACIONES INDUSTRIALES**

RPC-SO-30-NO.506-2019

Opción de Titulación:

Artículos profesionales de alto nivel

Tema:

IMPLEMENTACIÓN DE UNA
METODOLOGÍA PARA PLANIFICACIÓN
DE LA PRODUCCIÓN EN EL ÁREA DE
EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA
PREPACKING S.C.C.A PARA REDUCIR
DESPERDICIOS DE PELÍCULA PLÁSTICA
COEXTRUIDA

Autor(es)

Carlos Alberto Hernández Rosero

Director:

Víctor Hugo Moreta Cabrera

QUITO – Ecuador

2022

Autor(es):



Carlos Alberto Hernández Rosero
Ingeniero Electrónico Mención en Sistemas Industriales.
Candidato a Magíster en Producción y Operaciones Industriales por
la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.
chernandezr@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Víctor Hugo Cabrera Moreta
Ingeniero mecánico
Master of Engineering Management
vcabrera@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2022 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Carlos Alberto Hernández Rosero

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN EL ÁREA DE EXTRUSIÓN EN LA EMPRESA PREPACKING S.C.C.A PARA REDUCIR DESPERDICIOS DE PELÍCULA PLÁSTICA COEXTRUIDA.

DEDICATORIA

A Dios, por ser la guía fundamental en cada paso que doy.

A mis padres, Fidel Hernández y Teresa Rosero quienes han sido un soporte incondicional durante mi crecimiento personal y profesional; por ser padres ejemplares y siempre desearme lo mejor.

A mis hermanos, Pablo, Daniel, Santiago, Diego, David, Sebastián y Francisco quienes han sido hermanos ejemplares; siempre han aportado con sus conocimientos y han sido un gran apoyo.

A Nadia Tapia, por ser una parte muy especial de mi vida y el apoyo incondicional que me impulsa a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme crecer académicamente, profesionalmente y como ser humano.

A mis padres y hermanos por todos los consejos brindados; por ser un apoyo moral y espiritual a lo largo de mi vida.

De manera muy especial a mi tutor del artículo profesional de alto nivel, Víctor Hugo Cabrera; por guiarme durante todo el proceso, por su apoyo y su calidad humana.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme crecer en el ámbito académico y ser un soporte fundamental en el desarrollo de mi profesión.

Tabla de Contenido

1. Título	1
2. Autor	1
3. Resumen	1
4. Palabras claves	1
5. Introducción.....	1
6. Método.....	4
7. Resultados y discusión.....	8
8. Conclusión.....	19
Referencias	20

1. Título

Implementación de una metodología para planificación de la producción en el área de extrusión en la empresa PREPACKING S.C.C.A para reducir desperdicios de película plástica coextruida.

Implementation of a methodology for production planning in the extrusion area in the company PREPACKING S.C.C.A to reduce coextruded plastic film waste.

2. Autor

Carlos Alberto Hernández Rosero
Universidad Politécnica Salesiana
Quito - Ecuador
chernandezr@est.ups.edu.ec
Ingeniero electrónico mención en sistemas industriales

3. Resumen

El presente documento tiene como objetivo implementar un modelo heurístico híbrido de planificación de la producción en el área de extrusión de la empresa Prepacking S.C.C.A. Partiendo de una valoración del estado actual del proceso de planificación, determinando los indicadores de desperdicios e implementando tarjetas Kanban para las órdenes de producción. Se ejecutó una investigación de campo y se obtuvo durante el mes de abril del 2022 los datos del estado actual del proceso. Se capacitó al personal y se implementó la metodología durante el mes de mayo del 2022 para obtener datos de producción y desperdicios. Se encontró un resultado favorable, debido a que, los desperdicios disminuyeron en 1.55% generando un ahorro de 801 usd en gastos de materia prima en la producción de película plástica; así como también, se obtuvo una reducción del 5% de la presencia de indicadores de desperdicios. Finalmente se determinó que la producción para stock se incrementó el 11% en mayo a comparación de abril, debido a la demanda generada por el cliente y al modelo de planificación implementado.

Abstract

The present document is aimed to implement a hybrid heuristic planning model of production in the extrusion area at Prepacking S.C.C.A. Company. It started from an assessment of the actual state of the planning process, where there were determined the existing waste indicators generated and it was implemented Kaban cards for the production orders. A field investigation was carried out during April 2022, and the data of the current state was obtained. On May 2022, the staff was trained and the methodology was implemented to get production and waste data. A favorable result was found since the waste decreased in 1.55% generating saving of eight hundred dollars (USD. 801, 00) of raw material expenses in the plastic film production, as well as a reduction of a 5% of the presence of waste generation indicators. Finally, it was determined that the stock production had increased in 11% in May 2022 in comparison to April 2022, due to the demand generated by the customer and the planning model implemented.

4. Palabras claves: modelo heurístico híbrido de planificación, tarjetas Kanban, película plástica coextruida, desperdicios.

Keywords: hybrid heuristic planning model, Kanban cards, coextruded plastic film, waste.

5. Introducción

En la actualidad un empaque flexible fabricado por una película plástica coextruida es útil para que el producto conserve sus propiedades. Esto permite a que el sector alimenticio, agropecuario, hospitalario, inmobiliario y de logística tengan la garantía de que el producto que se oferta este protegido y llegue al consumidor final en óptimas condiciones. Con el objetivo de satisfacer las necesidades de las partes interesadas y generar un valor agregado que les permita destacarse de los demás. Como lo mencionan Argueta et al [1] en su estudio de la importancia de los empaques en la logística del producto,

determinan que conservar las propiedades del producto y lograr una excelente percepción del cliente final hacia el producto que recibe empacado, son las características más importantes que genera un empaque flexible.

Prepacking S.C.C.A es una empresa 100% ecuatoriana, dedicada a la fabricación de empaques flexibles, está ubicada en el valle de los chillos, Quito-Ecuador. La misma que abastece a clientes de consumo masivo y apoya los emprendimientos con nuevos desarrollos. Una de las áreas de su proceso es la extrusión de película plástica, en la cual cuenta con máquinas coextrusoras de PEBD, PPCAST y PA/PE.

Una coextrusora de film plástico en proceso de soplado está conformada por la unión de varias capas. Cada una se procesa mediante un tornillo de alimentación, en el que se funde la materia prima a un grado de temperatura que se especifica en las hojas técnicas de cada polímero. Como lo mencionan Lange y Ponting [2], al tener varias capas de material plástico se mejora las propiedades mecánicas y físicas del film plástico. Por esta razón, mejora el empaque automático de productos, aumenta la resistencia al impacto y cumple con los requerimientos que se generan en el mercado alimenticio y médico.

El polietileno de baja densidad (PEBD) es uno de los principales polímeros usados en la coextrusión de una película plástica. El mismo, se mezcla con un polietileno lineal (PELBD) que le ayuda a mejorar la procesabilidad en máquina. De acuerdo a selke [3], en el año 2012 según un estudio realizado el PEBD mezclado con el PELBD fue usado en un 60% para la fabricación de películas plásticas, dejando el 40% para polímeros de alta densidad, poliamidas y polipropilenos.

En la Figura 1 se observa la Coextrusora de PEBD que se encuentra en el área de extrusión de la empresa. Esta máquina es alimentada por 3 capas en el que se procesan diferentes mezclas de polietilenos de propósito general, polietilenos lineales, metalocenos y aditivos que permiten satisfacer para cada cliente las necesidades del empaque que requieran para sus procesos productivos.



Figura 1. Coextrusora de PEBD/PELBD de 3 capas.

Autor: Carlos Hernández. Foto tomada en la empresa PREPACKING S.C.C.A

La planificación de la producción usando un plan maestro es de vital importancia para ser implementada en la fabricación de película plástica coextruida. Jonsson y Kjellsdotter [4], mencionan que al implementar esta metodología la empresa tiene datos más reales de tiempos de entrega de pedidos para los clientes; así como también, permite manejar adecuadamente los inventarios para reducir costos de almacenamiento. Clark [5] indica que de acuerdo a la cantidad solicitada en el pedido se puede implementar un sistema de requerimientos de materias primas a ser utilizadas en un intervalo de tiempo. De esta manera el MPS y el MRP van de la mano para la planificación de la producción, basados en la capacidad que tiene la planta productiva.

Wikacson y Tianran[6] realizaron una investigación, en la que se determinó que al tener un plan maestro de producción en una empresa que realiza fabricación de productos basada en órdenes de

compra (MTO), es importante conocer la capacidad productiva y la capacidad de la mano de obra que dispone la planta; con el objetivo, de responder en el tiempo establecido a las solicitudes de los clientes.

Jodlbauer y Strasser [7] analizaron que para planificar la producción basada en la capacidad de la planta y en las órdenes generadas es importante cumplir con 3 pasos primordiales. Estos pasos son: la generación de listas de trabajo, el estudio de la capacidad de la máquina y la generación de las órdenes de compra para adquirir los materiales correspondientes.

Prepacking dispone de un plan de producción bajo stock (MTS) para aquellos clientes de consumo masivo en los que se cuenta con un histórico de la demanda. Presta un 90% del nivel de servicio para cumplir con los requerimientos generados; de esta manera, el principal objetivo es no dejar desabastecido al cliente en ningún momento. De acuerdo a esto; Altendorfer [8] realizó una investigación basada en la producción bajo stock, considerando el tamaño del lote y el tiempo de entrega requerido por el cliente. Su objetivo fue optimizar inventarios sin afectar al nivel de servicio y disminuir el tiempo de entrega del producto; como resultado, obtuvo que para ofrecer un nivel de servicio de un 94 %, el tamaño del lote aumenta marginalmente al igual que el plazo de entrega. Por esta razón, sugiere que al ser productos que tienen un historial de demanda conocido, es mejor pre producir para generar stock de seguridad y de esta manera no depender de tamaños de lote, sino de enfocarse en mantener la producción.

En Prepacking se implementa un modelo de planificación híbrido de producción como se observa en la Figura 2. Es una empresa que produce empaques flexibles cuyo principal proceso es la extrusión de film plástico, enfocándose en fabricación bajo órdenes de producción y producción bajo stock.

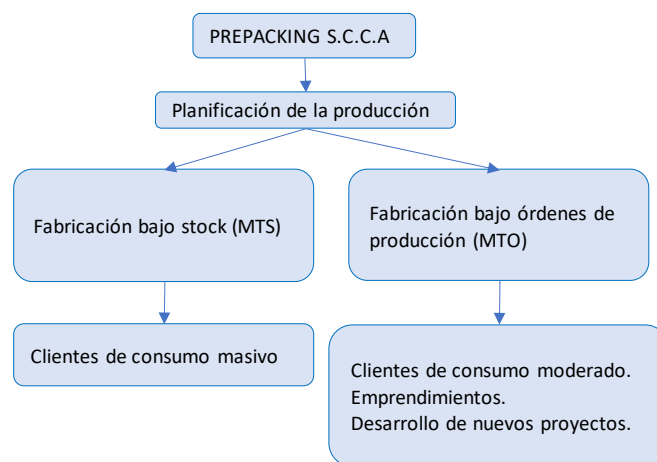


Figura 2. Esquema de modelo de planificación a implementar en el área de extrusión de PREPACKING S.C.C.A
Autor: Carlos Hernández.

Soman et al [9] desarrollaron el análisis de un caso de estudio para la planificación de la producción en el que existe un modelo híbrido de producción (MTS y MTO). En el caso de estudio se analizó una fábrica que produce más de 220 productos en una sola línea con capacidad limitada. El resultado indicó, que al fabricar 10 unidades de producción se obtiene un coeficiente de variación alto aproximado a 7; mientras que, al fabricar 100000 unidades el coeficiente de variación baja drásticamente a 1. Con esto, sugieren que al tener bajo volumen y alta variabilidad se debe producir bajo órdenes de pedido, mientras que al tener alto volumen y menor variabilidad se debe producir bajo stock.

Beemsterboer et al [10] en su investigación sobre la aplicación de un sistema híbrido de producción MTO-MTS determinaron que, al aplicar un sistema híbrido de planificación de la producción, el ahorro de costos productivos reduce un 65% en comparación a que se aplique uno de los dos métodos. De igual manera, Kanda et al [11] mediante una investigación de proponer flexibilidad a los parámetros de precio y demanda, determinaron que al aplicar un sistema híbrido de planificación de la producción los costos disminuyen notablemente.

Chang et al [12] desarrollaron un modelo heurístico para la implementación de un sistema híbrido de producción (MTS y MTO). Ellos tomaron como caso de estudio una empresa que fabrica obleas. El resultado indicó que es mejor dar prioridad a la fabricación bajo orden y completar la producción con la fabricación bajo stock. Esto reduce significativamente los tiempos de entrega, disminuye los desperdicios generados y permite tener mejor calidad en los productos terminados.

Bortolini et al [13] analizaron una propuesta de implementación de un modelo de planificación bi-objetivo, para identificar las mejoras de elegir que método es mejor (MTS/MTO). Su objetivo era disminuir inventarios que eleven costos de producción. El resultado dio un 35% de reducción en inventarios.

En la planificación de la producción implementada es importante disponer de un sistema de planificación de requerimientos de materiales. El objetivo es obtener la materia prima a tiempo para fabricar la película plástica y cumplir con los tiempos de entrega. Mientras mejor se aplique el MRP, existirá menos inventario de materiales en bodega. Como lo indican Milne et al [14], el parámetro a tomar en cuenta en el requerimiento de materiales, es el tiempo de entrega de cada material dado por el proveedor. El mismo, que permitirá generar órdenes de compra a tiempo con el objetivo de no quedar desabastecido en ningún momento para la fabricación de la orden de trabajo. Ellos mencionan que un 75% de la industria utiliza el MRP para requerimiento de materiales.

Ramya et al [15] mencionan que un sistema MRP permite establecer la cantidad de materia prima que se necesita para fabricar una orden de producción y definir los tiempos para la entrega del producto terminado.

En el área de extrusión se implementa una herramienta de mejora de la producción en el que se utiliza tarjetas Kanban para generar una orden de trabajo más específica y explicativa. Las mismas, permiten desarrollar a los operadores su trabajo con mejor calidad y cumplir con los requerimientos especificados para reducir desperdicios en el área. Como lo menciona Powel [16], quien baso su investigación en los tiempos de producción en el proceso de fabricación de componentes con bajo volumen y un gran porcentaje de mezcla. Mediante su análisis determinó, que al implementar las tarjetas Kanban, redujo un 50% el tiempo de entrega del producto y mejoró la calidad del mismo. Con esto concluyó que Kanban puede ser utilizado ampliamente en la industria manufacturera cuando existe una capacitación constante del personal para enfocarse en la mejora continua.

Naufal et al [17] analizaron un caso de estudio en una empresa en Malasia en el que se implementó un sistema de tarjetas Kanban. Como resultado obtuvieron un área de inventarios de proceso optimizada por el bajo nivel de inventario y la reducción de tiempo en la fabricación de productos.

6. Método

En el presente documento se realiza una valoración del estado actual de planificación de la producción generando un diagrama de flujo actual del proceso de extrusión que se observa en la Figura 3. El objetivo es determinar el porcentaje de desperdicios que se generan en las 9 máquinas extrusoras pertenecientes al área.

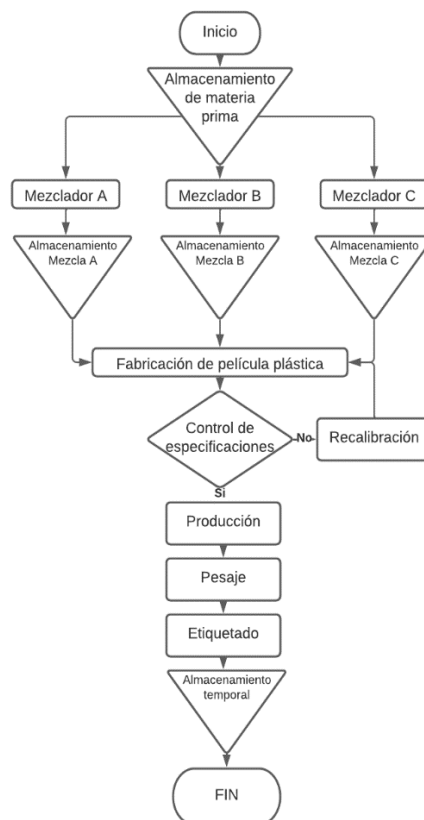


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de extrusión de PREPACKING S.C.C.A.
 Autor: Carlos Hernández.

Se genera un diagrama de procesos actual que se visualiza en la Figura 4, correspondiente a las órdenes de pedido. El diagrama abarca el proceso desde que llega la orden de compra hasta que la película plástica fabricada se almacena en un área de producto terminado. El mismo, puede ser usado en el siguiente proceso o ser entregado al cliente final, dependiendo de las características de la orden de compra recibida.

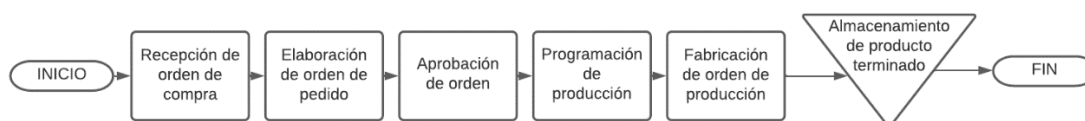


Figura 4. Diagrama de procesos de las órdenes de pedido en PREPACKING S.C.C.A.
 Autor: Carlos Hernández.

Se procede a implementar una investigación de campo en la que se toma los datos de productividad y desperdicios registrados. Los mismos que están escritos por los operadores en un Kardex que en la actualidad se utiliza en el área de extrusión; con el objetivo, de determinar los indicadores de desperdicios. Estos indicadores de gestión permitirán establecer la frecuencia con la que se genera cada causa y su respectivo peso con el que cada uno aporta al desperdicio total. La meta es disminuir la frecuencia con la que cada indicador se presenta en el proceso y disminuir el número de indicadores si lo amerita.

Una vez terminado la valoración del estado actual se procede a implementar la metodología de planificación de la producción utilizando un modelo heurístico híbrido que propuso Soman [9]; éste se indica en la Figura 5.

El modelo contempla la fabricación de productos bajo orden de producción para clientes de consumo moderado, emprendimientos y productos de desarrollo; así como también, la fabricación bajo stock para clientes de consumo masivo. Se basa en dar prioridad a las órdenes bajo pedido organizándoles

por fechas de vencimiento de menor a mayor para cumplir con el tiempo estimado; posteriormente, se producen las órdenes para stock teniendo en consideración que se fabrique el producto antes de que se agote del inventario.

El modelo permite evaluar la viabilidad de la planificación y es flexible a una modificación con el fin de cumplir con lo planificado en los tiempos estimados. La capacidad de la planta es una restricción que se mide con el modelo para evaluar la necesidad de requerir la contratación de horas extras con el fin de evitar pérdidas de ventas. El objetivo del modelo es disminuir la generación de desperdicios en el área de extrusión.

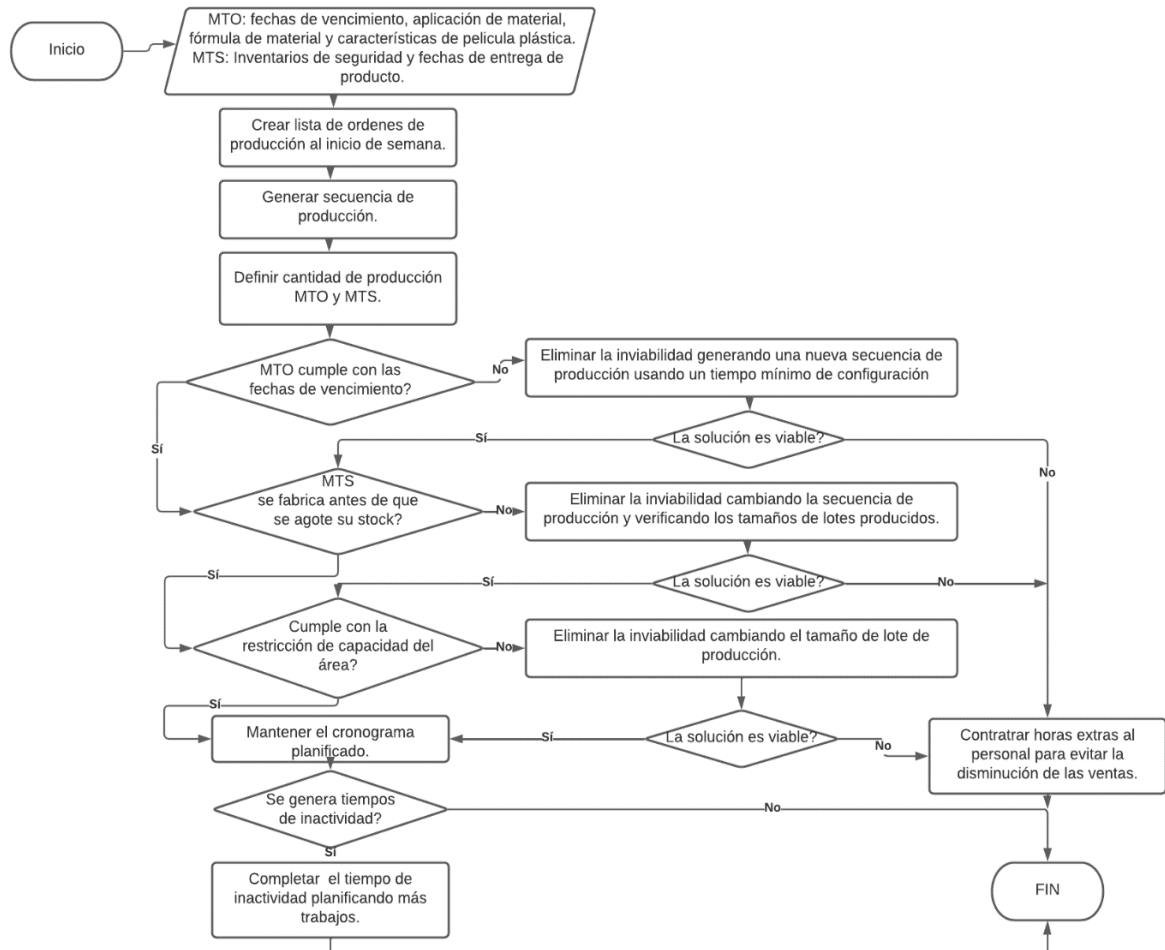


Figura 5. Modelo híbrido de planificación MTO/MTS implementado en PREPACKING S.C.C.A
 Autor: Carlos Hernández. Tomado de Soman [9]

En la organización de pedidos a fabricar y luego de determinar la secuencia y la cantidad de producción, se acopla un procedimiento de requerimiento de materias primas necesarias para la fabricación de la película plástica. El mismo que se socializa con los proveedores mediante reuniones, dejando claro el objetivo de responder a los requerimientos en tiempos oportunos.

La planificación de requerimientos de materiales, así como también el programa de producción en las órdenes por fabricar (MTO), tienen asignado un tiempo de entrega y un nivel de servicio dependiendo el cliente. Al mismo que se le asigna una prioridad desde la A hasta la C, debido a la demanda del mercado actual y los contratos existentes. Mientras que las órdenes para stock (MTS), el tiempo de entrega y la cantidad de producto a fabricar se define con los clientes de consumo masivo al inicio de cada trimestre y se cumple con lo establecido.

Para optimizar los tiempos que el operador del área se demora en retirar los aditivos de procesabilidad los mismos que son: alto coeficiente de deslizamiento, antibloqueo, pigmentos, entre otros; se realiza una redistribución del lugar de materias primas. La materia prima principal se almacena en la bodega matriz y se asigna en el área de extrusión una bodega de aditivos de procesabilidad. Esto se realiza

debido a que los aditivos se usan en muy bajas proporciones. En muchas ocasiones, el tiempo que un operador toma para dirigirse a la bodega y retirar un aditivo es un tiempo que se puede optimizar con el objetivo de mejorar calidad y disminuir desperdicios.

La película plástica fabricada se produce bajo formulaciones dadas para diferentes productos. Cada formulación permite que el producto fabricado se adapte a las necesidades que cada cliente tiene en sus plantas productivas. Por esta razón, se diseña un modelo unificado para ingresar las diferentes formulaciones asignando un código a cada fórmula con el objetivo de facilitar la programación de producción en el área.

Las fórmulas se publican en la cartelera del área de extrusión para que los operadores tengan como guía al momento de fabricar un producto. El esquema de formulaciones implementado se lo observa en la Figura 6. Es de vital importancia el número asignado de cada extrusora con el respectivo código de formulación para realizar la trazabilidad de requerimiento de materia prima y producto terminado de cada fórmula elaborada.

REGISTRO DE MEZCLAS (EXTRUSIÓN)				
FECHA DE ACTUALIZACIÓN:				#1
MÁQUINA EXTRUSORA				
DESCRIPCIÓN				
TIPO DE MATERIAL:	CÓDIGO DE MATERIAL:	CANTIDAD SACOS:	CAPA:	CÓDIGO:
			A	PFV1
			B	
			C	

Figura 6. Esquema de formulaciones de mezclas de materia prima para las extrusoras del área de extrusión de PREPACKING S.C.C.A.

Autor: Carlos Hernández.

Para realizar el programa de producción se genera órdenes de trabajo en el área de extrusión mediante el uso de tarjetas Kanban, la misma que se observa en la Figura 7. Estas tarjetas permiten tener una programación más precisa y explicativa del trabajo a realizar; tienen información necesaria para realizar trazabilidad de desperdicios, así como también de calidad y productividad.

Si el producto fabricado tiene un proceso posterior la tarjeta es enviada a la siguiente área con la respectiva planificación, hasta llegar al producto terminado. La tarjeta diseñada se coloca en una cartelera que se encuentra en el área de extrusión. La misma sirve para que los operadores, supervisores y jefes sepan el estado actual de la orden de pedido y contempla 4 partes en las cuales se ubica la tarjeta las cuales son: por fabricar, en proceso de fabricación, producto terminado y producto despachado.

PEDIDO N°

ITEM:

CANTIDAD METROS: CANTIDAD DE ROLLOS:

EXTRUSIÓN

TRATAMIENTO: SI NO

MEZCLA: UBICACIÓN DE LA MEZCLA:

ADITIVOS: SI NO UBICACIÓN DEL ADITIVO:

EXTRUSOR:

AYUDANTE:

FECHA:

CARACTERÍSTICAS

MEDIDAS

ESPESOR (MILÍMETROS)

COLOR

DESPERDICIO:

Figura 7. Tarjeta Kanban utilizada en la programación de producción del área de extrusión de PREPACKING S.C.C.A

Autor: Carlos Hernández.

Para implementar el sistema de planificación se capacita al personal del área de extrusión. Se estandariza los pasos para cumplir con la producción y se genera las nuevas tarjetas de programación. Posteriormente se realiza la toma de datos en un lapso de 31 días. Con los datos obtenidos se construye una base de datos similar a la base generada en la investigación de campo del estado actual. Al cumplir con lo mencionado se realiza un análisis estadístico de los indicadores de desperdicios generados y se compara los resultados obtenidos de la actualidad versus la implementación realizada. Se evalúa la incidencia del método implementado para planificación de la producción con la respectiva disminución de desperdicios.

7. Resultados y discusión

Para realizar la valoración del estado actual de la producción en el área de extrusión de PREPACKING se identificó el número de máquinas extrusoras existentes. Las mismas que se detallan en la Tabla 1. Se asignó una identificación por código a cada extrusora, el tipo de material que se fabrica en cada máquina, las capas con las que cuenta, la capacidad productiva y el personal requerido para que cada máquina produzca.

Tabla 1. Caracterización de extrusoras existentes en el área de extrusión.

Identificación de extrusora	Material a fabricar	Capas	Capacidad (kg/h)	Personal operativo
1 MP	PEBD/PEAD	3	120	2
2 TP	CPP	2	80	2
3 CHP	PEBD/PEAD/BIO	1	20	1
4 KP	PEBD+PA	3	110	2
5 BP	PEBD	1	40	1
6 CP	PEBD/PEAD/BIO	1	60	1
7 ZP	PEBD	1	10	1
8 SP	PEBDL	1	40	2
9 HBP	PEBD+PA	5	50	3

En el área de extrusión existen 9 extrusoras de película plástica, las mismas que han sido identificadas con un código respectivo. El material que cada extrusora procesa puede ser un polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD), polipropileno cast (CPP), polietileno de baja densidad lineal, coextrusión de polietileno de baja densidad con poliamida (PEBD/PA) y biodegradables (BIO).

Cada extrusora tiene un diseño de tornillos extrusores y cabezal estandarizados para procesar cada tipo de material. Al ser PREPACKING una empresa que fabrica una variedad de productos; cada máquina es utilizada para procesar diferentes materiales de acuerdo a las especificaciones que los clientes generen, es por esto, que no todas tienen el mismo número de capas, sino que varían de acuerdo a los requerimientos del producto a fabricar.

La capacidad productiva de kg/h de cada máquina extrusora está dada por su diseño y por el producto final a fabricar; de acuerdo a esto, la empresa define el número de personal operativo que cada máquina requiere para producir.

Se dispone de 80 tipos de materias primas que son utilizadas de acuerdo a las formulaciones existentes para la fabricación de cada película plástica que satisfaga la necesidad generada por el cliente final. Por esta razón se realizó la asignación de códigos a cada formulación en la que se indica la máquina correspondiente en la que se puede fabricar cada una de las estructuras como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Estructuras codificadas usadas en cada extrusora.

Extrusora	Estructura
1 MP	PGP1/PPP/PEAP/PLPP/PLGP/PLRDP/PAP/PEADP
2 TP	CPPP
3 CHP	PGP1/PTP/PBA
4 KP	CNP/PGP1/PLGP/PLPP/PEAP
5 BP	PBP1/PBP2
6 CP	PGP1/PTP/PBA/PAP
7 ZP	PZP
8 SP	PSP
9 HBP	BP/PG/GE/PSM/TC

Las estructuras que se observan tienen un significado correspondiente que se expone con los operadores del área. Con esto, el objetivo es identificar de mejor manera la planificación y el programa de producción; así como también, se realice un sistema de requerimiento de materiales (MRP).

La empresa dispone de un proveedor de materia prima con el que se tiene el convenio de un tiempo de entrega inmediato de materiales para ser utilizados en la fabricación de película plástica. Al ser un proveedor estratégico se tiene asignado en la planta un galpón para ubicar la materia prima del proveedor y de esta manera abastecer diariamente la materia prima requerida.

Se diseñó el sistema de requerimiento de materiales en el que se toma en cuenta la cantidad inicial de la materia prima disponible, la cantidad necesaria para fabricar en el mes y la cantidad de materia prima que se dispone al final del mes. Esto se realiza, con el objetivo de planificar mensualmente la compra de materias prima y generar un presupuesto para ser asignado a esta compra; así como también, para los aditivos de procesabilidad que se compran a diferentes proveedores.

Al realizar la toma los datos del mes de abril del 2022, sobre la producción de película plástica antes de la implementación de la metodología de la planificación se construyó la Figura 8. En la misma se indica el porcentaje de la productividad total de película plástica extruida en las 9 máquinas con el correspondiente porcentaje de desperdicio total.

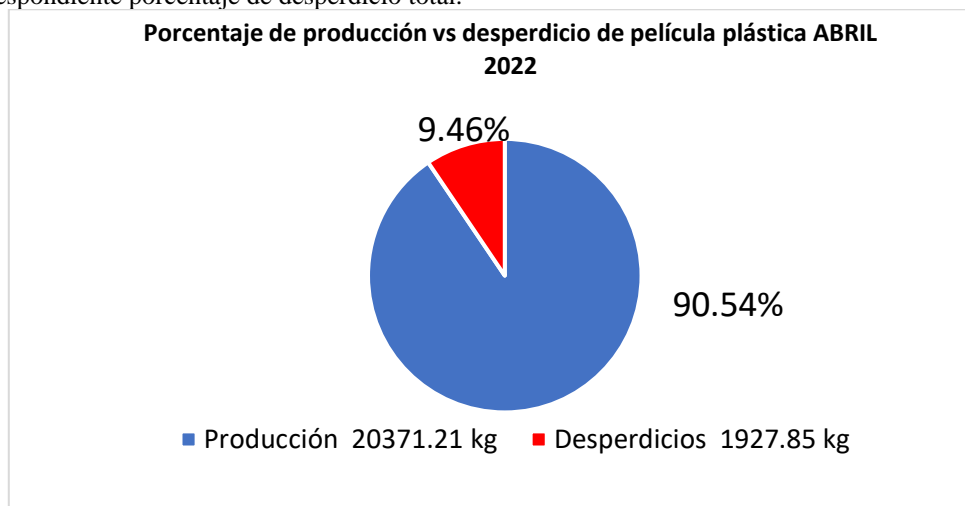


Figura 8. Porcentaje de producción vs desperdicios en el área de extrusión en abril de 2022.
Autor: Carlos Hernández.

En el área de extrusión durante el mes de abril del 2022 se produjo un total de 20371.21kg de película plástica teniendo como desperdicio 1927.85kg; es decir, se generó un 9.46% de desperdicio en las 9 extrusoras existentes. De esta manera es importante analizar el comportamiento de productividad con el respectivo desperdicio en cada extrusora de película plástica el mismo que se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción y desperdicios por máquina extrusora en abril de 2022.

Máquina	Producción (kg)	Desperdicios (kg)	Porcentaje de desperdicios
MP	14273.75	1028.3	7.20%
TP	519.6	12.4	2.39%
CHP	1050.1	61.05	5.81%
KP	1126.37	250.7	22.26%
BP	130.7	24	18.36%
CP	1366.8	290.8	21.28%
ZP	108.85	16.4	15.07%
SP	0	0	0.00%
HBP	1795.04	244.2	13.60%
Total	20371.21	1927.85	9.46%

Al determinar el porcentaje de desperdicio que se genera en cada máquina se verifica que la extrusora con mayor porcentaje de desperdicio es la máquina KP, la misma que tiene un valor de 22.26%. Mientras que la extrusora TP es la máquina con menor porcentaje de desperdicio con un valor de 2.39%. En la Figura 9 se observa un diagrama de barras en el que se visualiza la producción de película plástica con el respectivo desperdicio expresado en kilogramos.

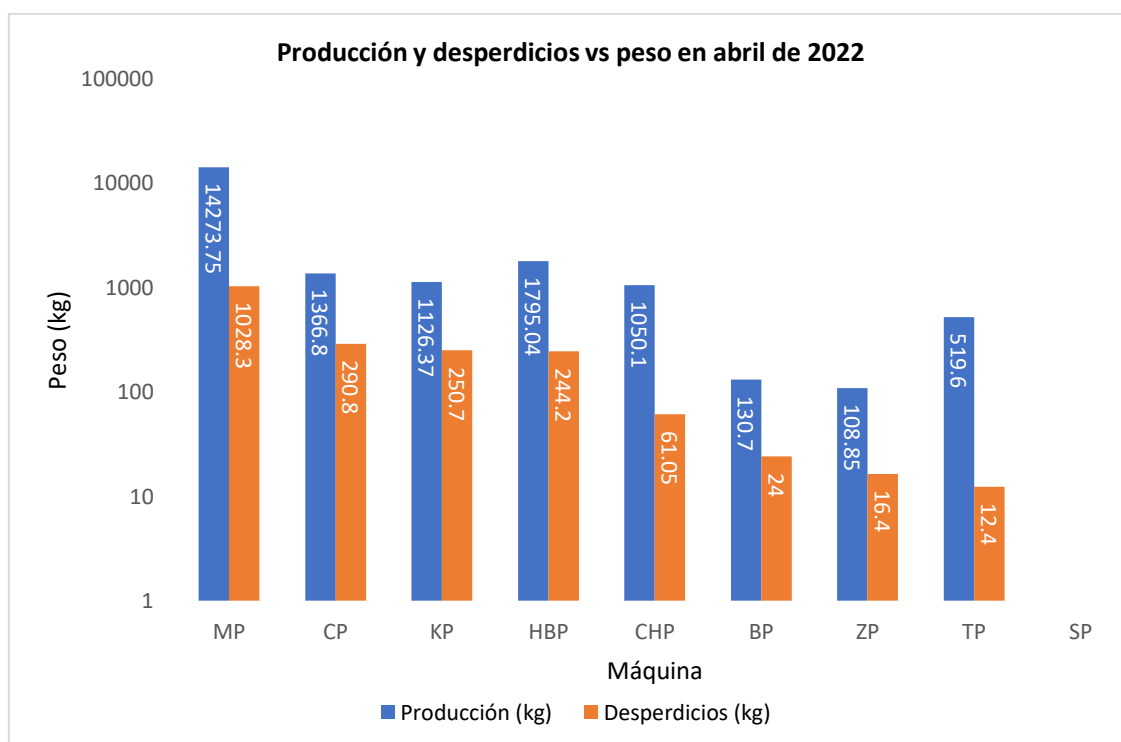


Figura 9. Producción y desperdicio vs peso expresado en kilogramos en cada extrusora del área en abril de 2022.

Autor: Carlos Hernández.

En la Figura 10 se observa un diagrama de pastel en el que se indica en porcentaje la producción que aporta cada máquina a la producción total del área.

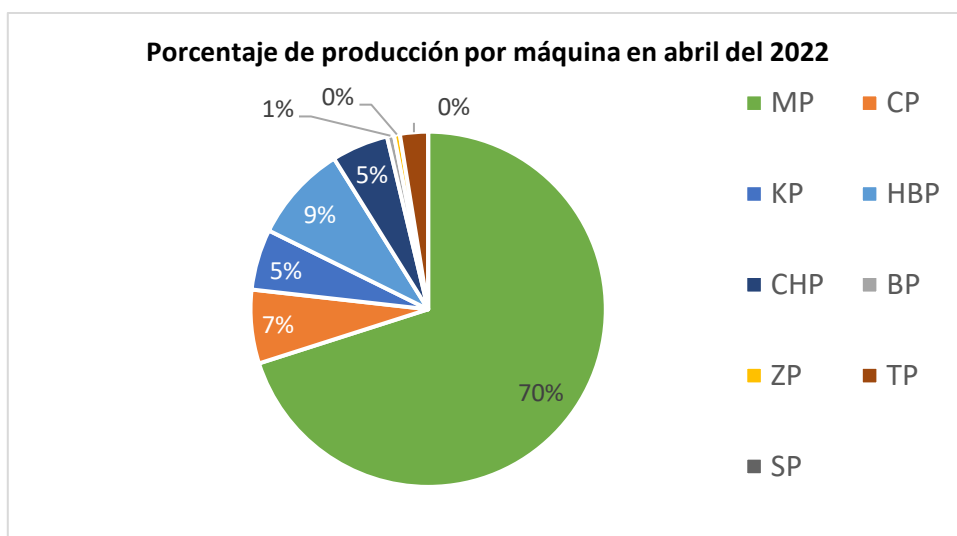


Figura 10. Porcentaje de producción de cada máquina extrusora en abril del 2022.
 Autor: Carlos Hernández

Se determina que la extrusora con mayor porcentaje de producción es la máquina MP ocupando un 70% de la productividad del mes de todo lo producido; mientras que la máquina SP tiene un valor de 0%. Esto se da porque la máquina no se prendió durante el mes de abril debido a que no se generaron órdenes de compra en las que se requiera la estructura que se produce en esta extrusora.

Se visualiza que la extrusora HBP produce un 9% de la producción total del mes, la CP un 7%, la KP un 5%, la CHP un 5%, la TP un 3%, la BP un 1% y la ZP un 0.5% de toda la producción de abril de 2022.

En base a los datos obtenidos en el mes de abril de 2022 se organizó de mayor a menor el porcentaje de desperdicio que se genera en cada extrusora en relación a la producción total del área. Para la exposición de estos datos se construyó un diagrama de pastel como se observa en la Figura 11. En el mismo se puede observar que la máquina MP genera un 5.05% de desperdicio en relación a la producción total; mientras que las otras extrusoras expresan valores que al sumarse dan un total de 4.41%; es decir, del total producido de película plástica se genera un 9.46% de desperdicio de material.

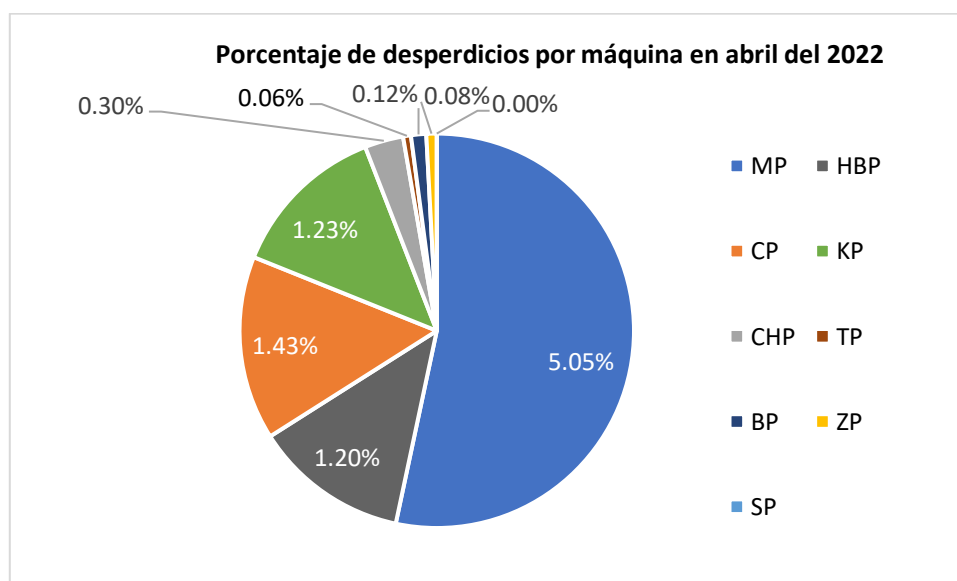


Figura 11. Porcentaje de desperdicio de cada máquina extrusora en abril de 2022.
 Autor: Carlos Hernández

Se estableció los indicadores de desperdicio de película plástica antes de la implementación los mismos que se detallan en la Tabla 4. En ella se detalla el indicador de desperdicio con el respectivo porcentaje

de incidencia sobre el desperdicio total del área en el mes de abril del 2022; así como también la frecuencia con la que se genera cada causa.

Tabla 4. Indicador de desperdicios expresados en porcentajes y frecuencia de incidencia.

Indicador	Porcentaje	Frecuencia
Cambio de OP	31.63%	27
Arranque	31.48%	25
Operatividad	14.79%	6
Cambio de color	8.69%	6
Materia prima con fallas	5.01%	6
Corte de energía	3.63%	2
Ausencia de material	3.53%	1
Desperfecto mecánico	1.24%	2

Con los datos obtenidos mediante la Tabla 4, se construye el diagrama de pastel que se observa en la Figura 12. Se determina que del total de desperdicio generado de película plástica el 63.11% se da por las 25 ocasiones en las que se arranca cada máquina y por los 27 cambios de órdenes de producción. Mientras que el 14.79% se genera por operatividad dado por causas de desconocimiento de formulaciones, calibración de elementos de cada máquina y de características de la orden de producción.

El cambio de color es referente a las 6 oportunidades en que se elaboró una película plástica pigmentada y al terminar cada orden se realiza la limpieza de color; esta causa tiene una incidencia del 8.69% del total. La materia prima suele tener un cierto porcentaje de desviaciones y es por eso que el 5.01% del desperdicio es ocasionado por materiales húmedos, fuera de rango o que mantienen contaminación cruzada.

La ausencia de aditivos que en una ocasión no existía en el inventario incide en 3.53%. Al tener un mantenimiento preventivo de la maquinaria el desperdicio generado por esta causa es pequeño tomando un valor de 1.24% y presentándose en dos oportunidades. La planta se encuentra ubicada en un sector en el que el corte de energía eléctrica sucede siempre que hay lluvias intensas; esto genera que en las extrusoras se produzcan desperdicios tomando un valor de 3.63% de incidencia en los desperdicios.

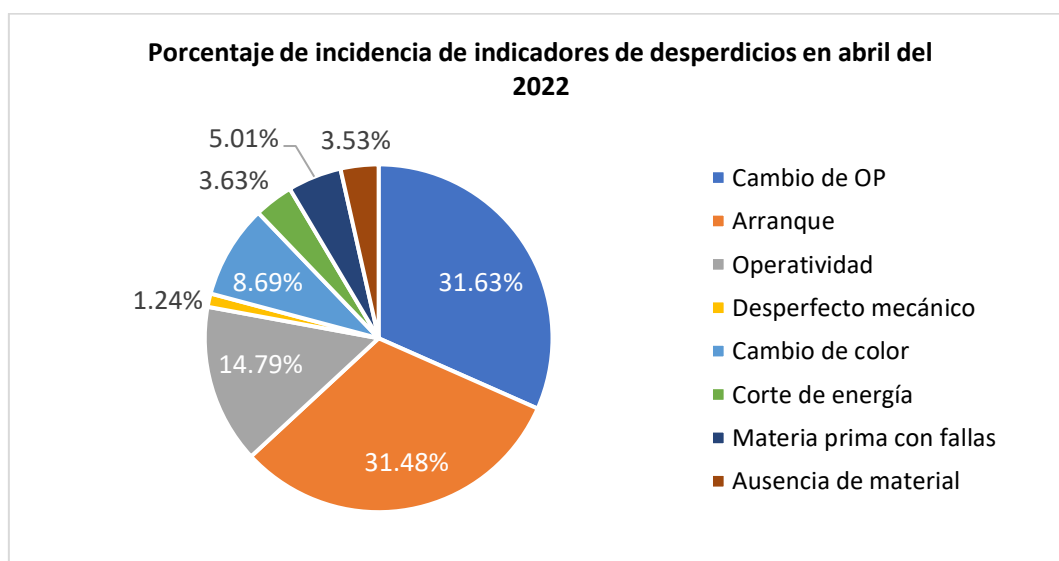


Figura 12. Porcentaje de incidencia de desperdicios en abril de 2022.
Autor: Carlos Hernández

Una vez implementado el modelo de planificación en el mes de mayo del 2022, se toman los datos y se determina el porcentaje de desperdicio en base a la productividad del mes. En la Figura 13 se

visualiza un diagrama de pastel en el que se plasma el porcentaje de producción y del desperdicio generado en todas las extrusoras del área.

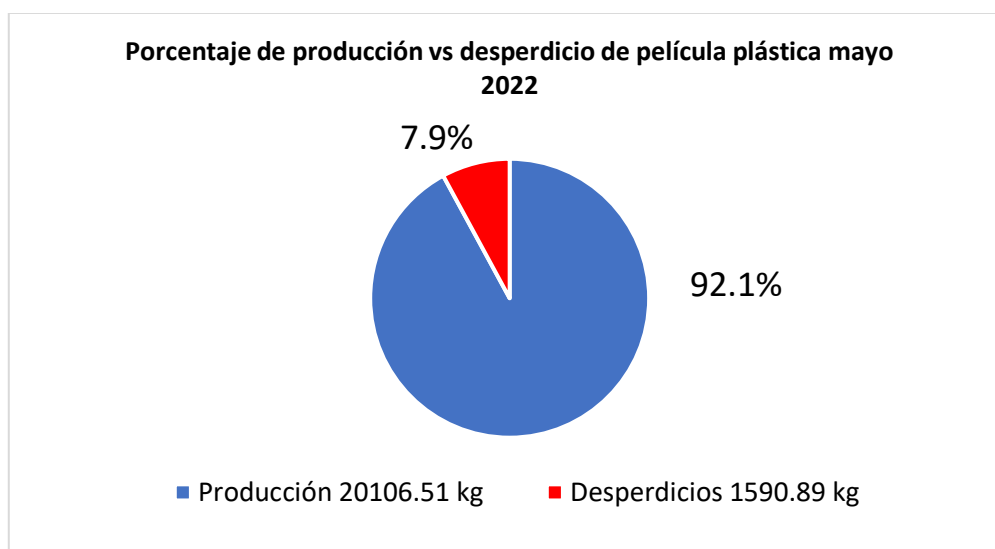


Figura 13. Porcentaje de productividad vs desperdicios en el área de extrusión en mayo de 2022.
Autor: Carlos Hernández.

En el área de extrusión durante el mes de mayo del 2022 se produjo un total de 20106.51kg de película plástica teniendo como desperdicio 1590.89kg; es decir, se generó un 7.9% de desperdicio en las 9 extrusoras existentes. Para determinar el respectivo desperdicio que se genera en cada extrusora se detalla la Tabla 5.

Tabla 5. Productividad y desperdicios por máquina extrusora en mayo de 2022.

Máquina	Producción (kg)	Desperdicios (kg)	Porcentaje de desperdicios
MP	12817.3	748.35	5.84%
TP	2452.35	80.95	3.30%
CHP	960.45	24.15	2.51%
KP	1050	250	23.81%
BP	538.8	62.85	11.66%
CP	330.85	54.2	16.38%
ZP	118.9	5.7	4.79%
SP	0	0	0.00%
HBP	1837.86	364.69	19.84%
Total	20106.51	1590.89	7.91%

Se verifica que la extrusora con mayor porcentaje de desperdicio es la máquina KP la misma que tiene un valor de 23.81%. Mientras que la extrusora CHP es la máquina con menor porcentaje de desperdicio con un valor de 2.51%. En la Figura 14 se observa un diagrama de barras en el que se visualiza la producción de película plástica con el respectivo desperdicio expresado en kilogramos de los datos tomados de productividad en el mes de mayo de 2022.

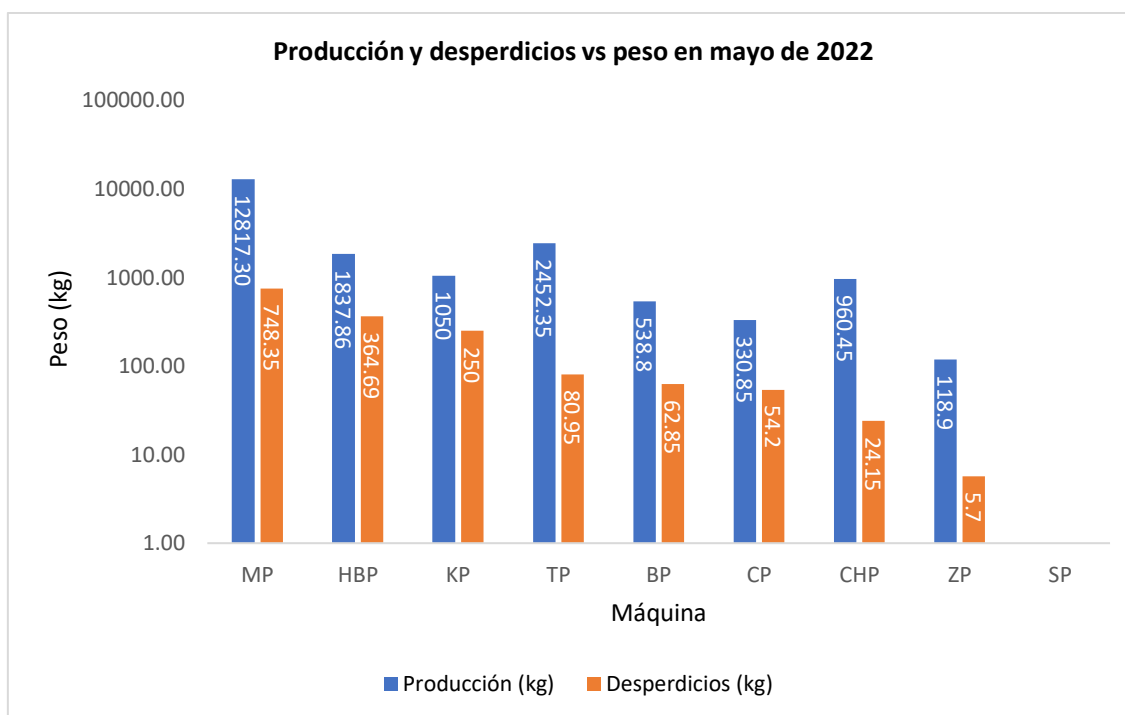


Figura 14. Producción y desperdicios vs peso expresado en kilogramos en cada extrusora del área en mayo de 2022.

Autor: Carlos Hernández.

En la Figura 15 se observa un diagrama de pastel en el que se indica en porcentaje la producción que aporta cada máquina a la producción total del área durante el mes de mayo de 2022.

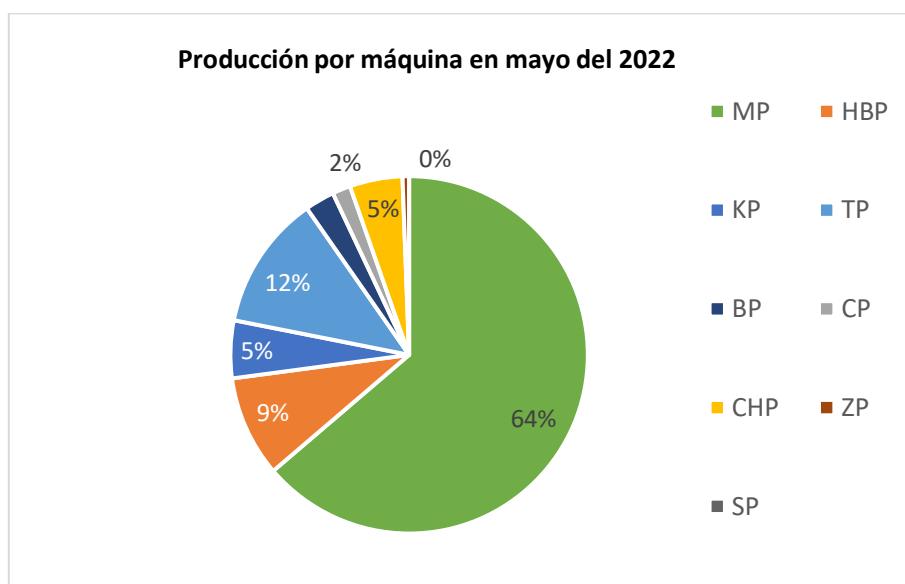


Figura 15. Porcentaje de producción de cada máquina extrusora en mayo del 2022.

Autor: Carlos Hernández

Mediante el gráfico de pastel se determina que en el mes de mayo la extrusora MP es la máquina que genera mayor producción ocupando un 64% del total de la producción del área. Al igual que el mes de abril la máquina SP no se prende por no tener órdenes de compra por lo que tiene un valor de 0% de aporte a la productividad.

Se observa que la extrusora TP produce un 12% de la producción total, la HBP un 9%, la KP un 5%, la CHP un 5%, la BP y la CP un 2% cada máquina, y la extrusora ZP un 0,5% de la productividad total de mayo.

En base a los datos obtenidos en el mes de mayo de 2022 se organizó de mayor a menor el porcentaje de desperdicio que se genera en cada extrusora en relación a la producción total del área. Para la exposición de estos datos se construyó un diagrama de pastel como se observa en la Figura 16. En el mismo, se puede observar que la máquina MP genera un 3.72% de desperdicio en relación a la producción total; mientras que las otras extrusoras expresan valores que al sumarse dan un total de 4.19%; es decir, del total producido de película plástica se genera un 7.91% de desperdicio.

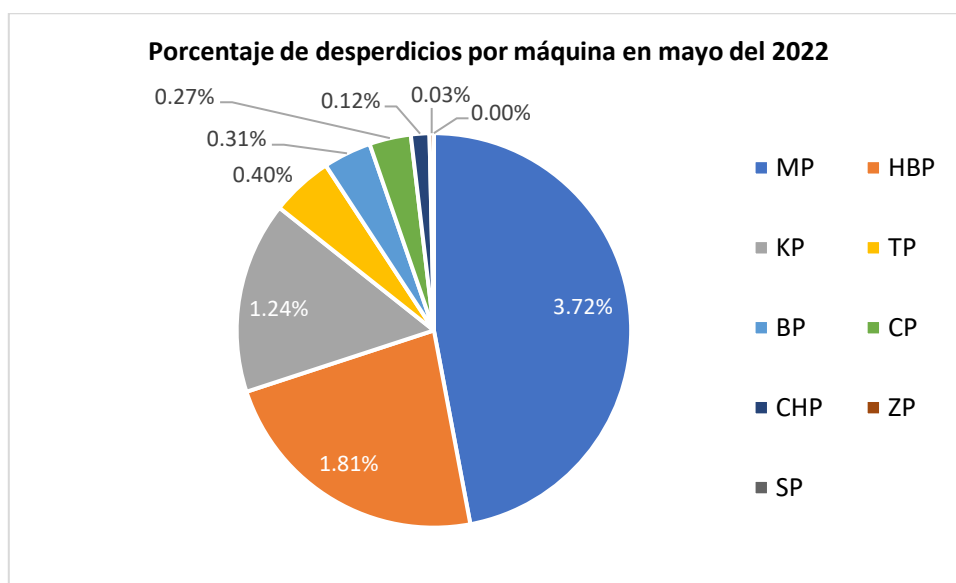


Figura 16. Porcentaje de desperdicio de cada máquina extrusora en mayo de 2022.
Autor: Carlos Hernández

Se analizó los indicadores de desperdicio establecidos en la Tabla 4. Con los datos obtenidos en el mes de mayo del 2022 se construye la Tabla 6 en la que se detalla el indicador de desperdicio con el porcentaje de incidencia y la frecuencia con la que se genera la causa.

Tabla 6. Indicador de desperdicios expresados en porcentajes y frecuencia de incidencia.

Indicador	Porcentaje	Frecuencia
Cambio de OP	37.71%	30
Arranque	37.32%	22
Operatividad	7.40%	10
Desperfección mecánica	7.01%	6
Cambio de color	7.41%	2
Corte de energía	3.14%	1
Materia prima con fallas	0.00%	0
Ausencia de material	0.00%	0

Con los datos obtenidos mediante la Tabla 6, se construye un diagrama de pastel que se observa en la Figura 17. Se determina que del total de desperdicio generado de película plástica el 37.71% se da por los 30 cambios de órdenes de producción que existió en la planificación del área. Mientras que el arranque de máquinas ocupa el 37.32% generado en las 22 ocasiones en las que se prendieron las extrusoras.

La operatividad generó un desperdicio del 7.40% generados por las 10 oportunidades en las que se notificó en planta. El desperfección mecánica a comparación de abril incrementó notablemente reportándose en 6 ocasiones y ocupando un 7.01% del total del desperdicio generado. En mayo de

acuerdo a la planificación existió solamente dos ocasiones en lo que se realizó un cambio de color el mismo que ocupa un 7.41% del total del desperdicio. El corte de energía se ocasiono una sola vez ocupando el 3.14% del total del desperdicio.

En mayo no existió desperdicio por ausencia de material debido a la planificación de requerimiento de materiales y tampoco existió desperdicio por materia prima con fallas debido al control de calidad más estricto durante el mes de mayo de 2022.

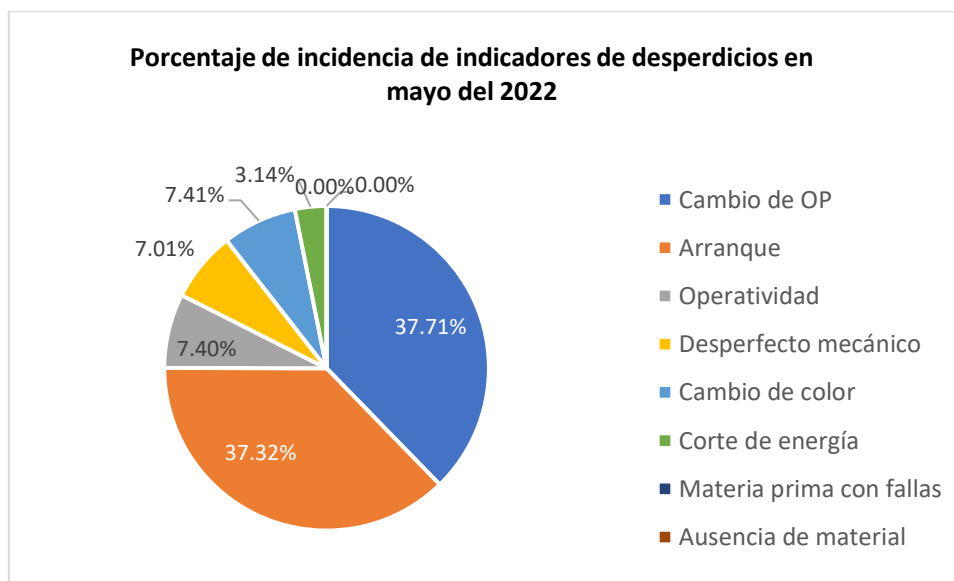


Figura 17. Porcentaje de incidencia de desperdicios en mayo de 2022.
Autor: Carlos Hernández

Para observar la comparación de producción y desperdicios generados en el área antes de la implementación; es decir abril del 2022, frente a mayo del 2022 una vez implementado la metodología de planificación de la producción, se construye la Tabla 7.

Tabla 7. Comparación de producción y desperdicios con el respectivo porcentaje durante el mes de abril y mayo del 2022.

Mes	Producción (kg)	Desperdicio (kg)	Porcentaje de desperdicio
Abril	20371.21	1927.85	9.46%
Mayo	20106.51	1590.89	7.91%

En abril el porcentaje de desperdicio tomo un valor de 9.46%, es decir en el área de extrusión se fabricó 20371.21kg de película plástica generando un desperdicio de 1927.85kg el mismo que se visualiza en la Figura 8. Mientras que en el mes de mayo el desperdicio disminuyó a 7.91% como se observa en la Figura 13. Durante este mes se fabricó 20106.51kg de película plástica generándose un desperdicio de 1590.80kg.

Este resultado se logra mediante la implementación de la metodología de producción con ardua capacitación al personal y una planificación adecuada de órdenes de producción y requerimiento de materias primas.

Se construye la Tabla 8 con los datos de porcentaje de desperdicio por máquina extrusora que aporta al desperdicio total del área. Se detallan los datos para el mes de abril como para el mes de mayo cuando se implementó el modelo de planificación.

Tabla 8. Porcentaje de desperdicio generado por cada máquina en relación a la producción total del área de extrusión durante el mes de abril y mayo del 2022.

Máquina	Porcentaje desperdicios de producción total en abril	Porcentaje desperdicios de producción total en mayo	Diferencia
MP	5.05%	3.72%	1.33%
CP	1.43%	0.27%	1.16%
CHP	0.30%	0.12%	0.18%
ZP	0.08%	0.03%	0.05%
SP	0.00%	0.00%	0.00%
KP	1.23%	1.24%	-0.01%
BP	0.12%	0.31%	-0.19%
TP	0.06%	0.40%	-0.34%
HBP	1.20%	1.81%	-0.62%
Total	9.46%	7.91%	1.55%

En la Tabla 8 se observa el porcentaje de desperdicio que aporta cada máquina extrusora al desperdicio total del área de extrusión. Se detalla la diferencia existente entre abril y mayo del 2022; los valores positivos expresan que el desperdicio disminuyó en el mes de mayo en comparación con el mes de abril, mientras que los datos en negativo indican que el desperdicio aumentó.

Como resultado final en el área de extrusión el desperdicio en mayo disminuyó en 1.55% en relación al mes de abril. Estos datos están representados en el diagrama de barras que se visualiza en la Figura 18.

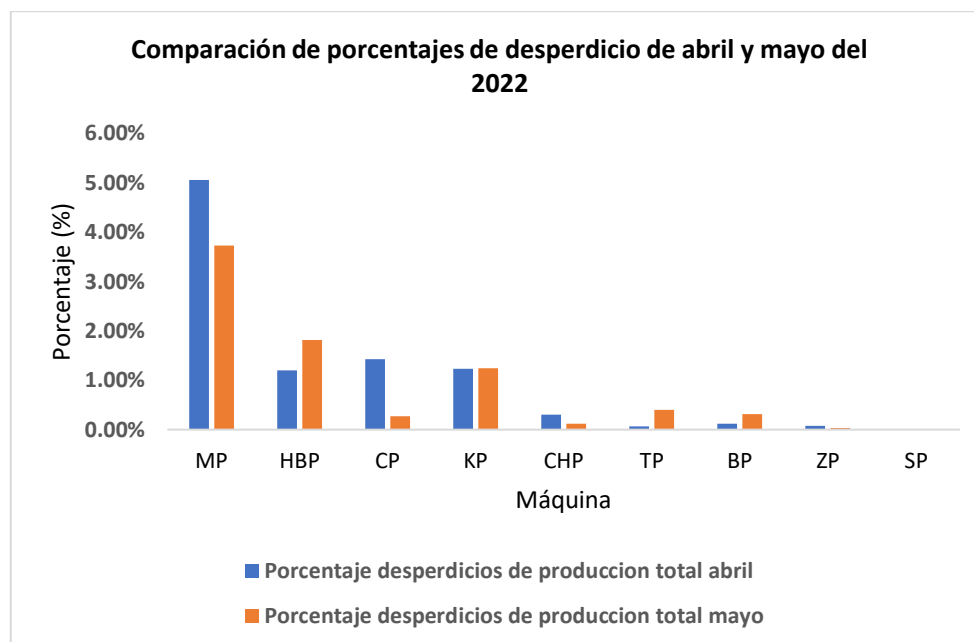


Figura 18. Comparación de porcentajes de desperdicio entre abril y en mayo del 2022.
Autor: Carlos Hernández

En cuanto a los indicadores de causa de generación de desperdicio en el área de extrusión se construye la Tabla 9.

Tabla 9. Indicadores de causa de desperdicio expresado en peso, porcentaje y frecuencia de incidencia en relación al desperdicio total del área en abril y mayo del 2022.

Indicador	ABRIL 2022			MAYO 2022		
	Desperdicio (kg)	Porcentaje	Frecuencia	Desperdicio (kg)	Porcentaje	Frecuencia
Cambio de OP	609.75	31.63%	27	600	37.71%	30
Arranque	606.85	31.48%	25	593.75	37.32%	22
Operatividad	285.15	14.79%	6	117.8	7.40%	10
Desperfecto mecánico	24	1.24%	2	111.47	7.01%	6
Cambio de color	167.5	8.69%	6	117.88	7.41%	2
Corte de energía	70	3.63%	2	50	3.14%	1
Materia prima con fallas	96.6	5.01%	6	0	0.00%	0
Ausencia de material	68	3.53%	1	0	0.00%	0

Es importante mencionar que en la Tabla 9 se observa el peso del desperdicio en kilogramos generado por cada indicador, con el respectivo porcentaje de incidencia del total generado; así como también, el nivel de frecuencia con el que el desperdicio se generó durante el mes de abril y el mes de mayo del 2022.

Se observa que el mes de mayo existen dos indicadores que generan 0kg de desperdicio; esto se da por la planificación de requerimiento de materiales implementada y por el mejoramiento del control de la calidad a la materia prima recibida.

En la Figura 19 se ilustra la gráfica comparativa del desperdicio generado en el área de extrusión durante el mes de abril y mayo del 2022. En la misma, se observa que el peso disminuyó en todos los indicadores excepto en la causa de desperfecto mecánico. Esto se dio, debido a que existieron 3 mantenimientos preventivos que no se realizaron a tiempo incumpliendo la planificación realizada.

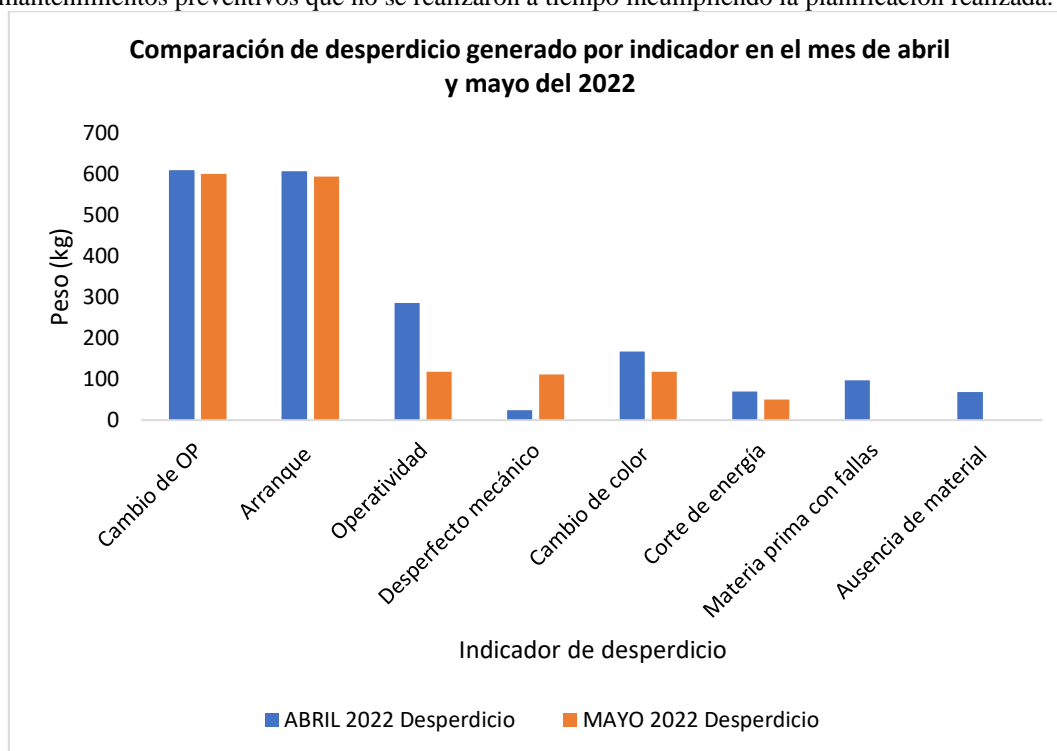


Figura 19. Comparación de desperdicios expresados en kilogramos entre abril y en mayo del 2022.
Autor: Carlos Hernández

En la Figura 20 se observa la comparación de la frecuencia con la que se generó el desperdicio durante el mes de abril y mayo en el área de extrusión. En la misma se distingue que existió mayor frecuencia

en los cambios de órdenes de producción programados, aunque esto generó incluso un menor desperdicio en kilogramos como se observa en la Figura 19.

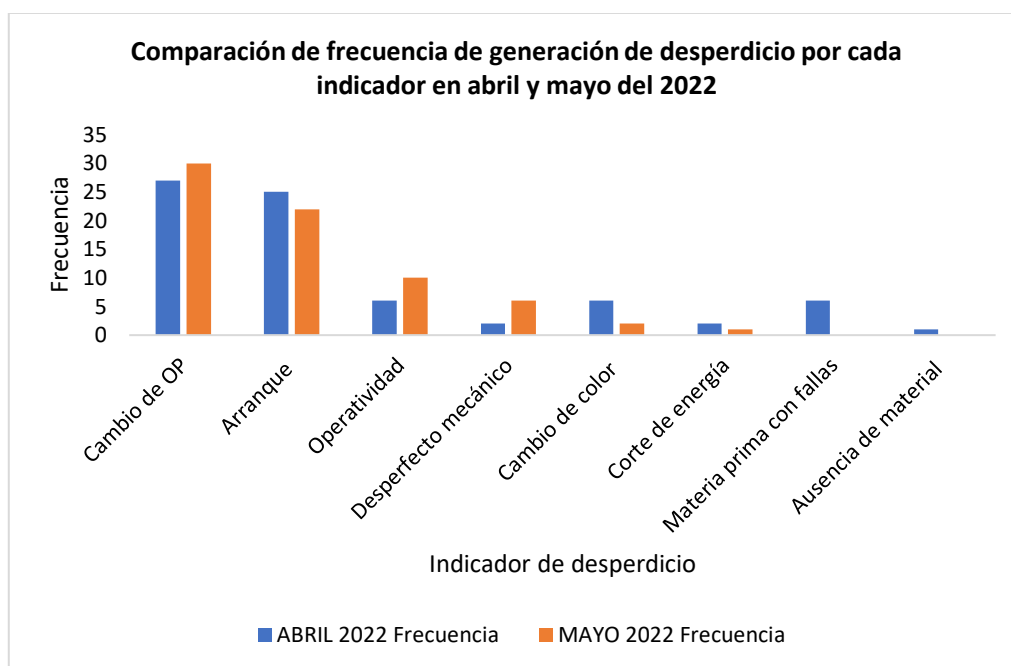


Figura 20. Comparación de frecuencia de generación de desperdicio entre abril y en mayo del 2022.
Autor: Carlos Hernández

Para detallar los kilogramos de película plástica producidos en abril y en mayo del 2022 tanto para órdenes de compra como para stock, se construyó la Tabla 10.

Tabla 10. Producción bajo órdenes de compra y bajo stock en abril y mayo del 2022.

Mes	Producción bajo órdenes de compra (kg)	Producción para stock (kg)
Abril	15846.21	4525
Mayo	14977.81	5128.7

Una vez implementado la metodología de planificación de la producción en el mes de mayo se incrementó en 11% la producción para stock. Este incremento permite tener una reducción de desperdicios. Mediante un convenio realizado con los clientes se determina el porcentaje de stock que en planta se podría almacenar para entrega inmediata cuando el mercado y la demanda lo necesite; con la condición de que este producto no pase más de 30 días en inventario.

Una vez determinado el peso del desperdicio durante el mes de abril y mayo como se observa en la Tabla 7; se calcula el costo en dólares a lo que equivale el desperdicio total por mes. Estos datos se detallan en la Tabla 11. El costo de kilogramo de materia prima tiene un valor de 2.38USD.

Tabla 11. Ahorro en costo de materia prima entre abril y mayo del 2022.

Mes	Desperdicio (kg)	Costo total (USD)
Abril	1927.85	4588.283
Mayo	1590.89	3786.3182
Diferencia	336.96	801.9648

8. Conclusiones

La investigación de campo en abril del 2022 mostró que el área de extrusión generó el 9.46% de desperdicio de película plástica coextruida; de los cuales, la máquina que más aporta a la producción del área genera un 5.05% del total, mientras que las demás máquinas generan el 4.41% restante; debido a que son máquinas que no trabajan constantemente, sino bajo órdenes de compra para fabricar productos especiales con valor agregado.

Se estableció 8 indicadores de desperdicios que durante abril se presentaron en 75 ocasiones, mientras que en mayo se presentaron en 71 oportunidades; es decir, disminuyó en 5% la presencia de los indicadores que generaban desperdicio de película plástica coextruida.

Se determinó que, de los 8 indicadores se lograron evitar 2, debido a la implementación de la planificación de requerimiento de materiales y al mejoramiento del control de calidad de materias primas. Como resultado, en el mes de mayo se generó 0kg de desperdicio por los 2 indicadores, a diferencia de los 164.6kg que generaron en abril.

Se implementó el modelo heurístico híbrido de planificación de la producción que permite la fabricación de productos bajo órdenes de producción y bajo stock. El 66% de la producción se llevó a cabo bajo órdenes de compra, mientras que el 34% se lo fabricó para stock. Comparando con abril la producción de productos para stock aumento en 11% debido a la generación de acuerdos con clientes de consumo masivo en base a la demanda del mercado ecuatoriano.

Se determinó la incidencia del modelo de planificación de producción implementado. En mayo, el desperdicio generado en el área de extrusión presentó un total de 7.91%; es decir, disminuyó en comparación con el mes de abril en 1.55%; lo que equivale a 336.96kg de materia prima que no se desperdició, generando un ahorro en costos de 801usd.

9. Referencias

- [1] C. M. Argueta, O. C. S. Cardona, H. M. G. Albán, and J. P. M. Moreno, "Minimum cost package size analysis in the supply chain: A case study in Colombia," *Estudios Gerenciales*, vol. 31, no. 134, pp. 111–121, 2015, doi: 10.1016/j.estger.2014.06.009.
- [2] D. Langhe and M. Ponting, "Coextrusion Processing of Multilayered Films," in *Manufacturing and Novel Applications of Multilayer Polymer Films*, Elsevier, 2016, pp. 16–45. doi: 10.1016/b978-0-323-37125-4.00002-2.
- [3] S. E. M. Selke, "Packaging: Polymers in Flexible Packaging," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier, 2019. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02168-8.
- [4] P. Jonsson and L. Kjellsdotter Ivert, "Improving performance with sophisticated master production scheduling," *International Journal of Production Economics*, vol. 168, pp. 118–130, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.012.
- [5] A. R. Clark, "Optimization approximations for capacity constrained material requirements planning," 2003.
- [6] H. Wicaksono and T. Ni, "An automated information system for medium to short-term manpower capacity planning in make-to-order manufacturing," in *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 52, pp. 319–324. doi: 10.1016/j.promfg.2020.11.053.
- [7] H. Jodlbauer and S. Strasser, "Capacity-driven production planning," *Computers in Industry*, vol. 113, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.103126.
- [8] K. Altendorfer, "Influence of lot size and planned lead time on service level and inventory for a single-stage production system with advance demand information

- and random required lead times,” *International Journal of Production Economics*, vol. 170, pp. 478–488, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.07.030.
- [9] C. A. Soman, D. P. van Donk, and G. J. C. Gaalman, “Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study,” *International Journal of Production Economics*, vol. 108, no. 1–2, pp. 191–199, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.ijpe.2006.12.042.
- [10] B. Beemsterboer, M. Land, and R. Teunter, “Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study,” *European Journal of Operational Research*, vol. 248, no. 2, pp. 453–461, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ejor.2015.07.037.
- [11] S. Kanda, K. Takahashi, and K. Morikawa, “A Flexible Service Rule for the Dynamic Make-to-Stock/Make-to-order Hybrid Production System,” *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 46–50, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.009.
- [12] S. H. Chang, P. F. Pai, K. J. Yuan, B. C. Wang, and R. K. Li, “Heuristic PAC model for hybrid MTO and MTS production environment,” in *International Journal of Production Economics*, Sep. 2003, vol. 85, no. 3, pp. 347–358. doi: 10.1016/S0925-5273(03)00121-X.
- [13] M. Bortolini, M. Faccio, M. Gamberi, and F. Pilati, “MTO/MTS policy optimization for sheet metal plate parts in an ATO environment,” in *Procedia CIRP*, 2019, vol. 81, pp. 1046–1051. doi: 10.1016/j.procir.2019.03.249.
- [14] R. J. Milne, S. Mahapatra, and C. T. Wang, “Optimizing planned lead times for enhancing performance of MRP systems,” *International Journal of Production Economics*, vol. 167, pp. 220–231, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.05.013.
- [15] G. Ramya, M. Chandrasekaran, and E. Shankar, “Case Study Analysis of Job Shop Scheduling and its Integration with Material Requirement Planning,” 2019. [Online]. Available: www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings
- [16] D. J. Powell, “Kanban for Lean Production in High Mix, Low Volume Environments,” Jan. 2018, vol. 51, no. 11, pp. 140–143. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.248.
- [17] A. Naufal, A. Jaffar, N. Yusoff, and N. Hayati, “Development of kanban system at local manufacturing company in Malaysia-Case study,” in *Procedia Engineering*, 2012, vol. 41, pp. 1721–1726. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.374.