

Análisis del proceso productivo en una empresa de plásticos usando simulación discreta

Analysis of the production process in a plastics company using discrete-event simulation

David Zapata Chaves¹, Ronald Akerman Ortiz García², Daniela Guerra Ocampo³

¹Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, david.zapata4@udea.edu.co

²Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, ronald.ortiz@udea.edu.co

³Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, dani.udea0311@gmail.com

Fecha de recepción: 19/05/2019 Fecha de aceptación del artículo: 29/07/2019



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15203

Como citar: D. Zapata Chaves, R. A. Ortiz García y D. Guerra Ocampo, Análisis del proceso productivo en una empresa de plásticos usando simulación discreta, Avances, vol. 16, n.º 2, 2019. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.15203>

Resumen

Los desperdicios de materia prima, ocasionados durante la producción de cualquier empresa, son un problema que debe tratarse, porque representan pérdidas importantes de dinero. En este sentido, debe aumentarse la productividad de los procesos y optimizarlos; por ello, se presenta el caso de una empresa en la ciudad de Medellín (Colombia), dedicada a brindar soluciones con productos plásticos con cuidado del medio ambiente. Sus productos se basan en material recuperado de sobrantes de sus procesos de extrusión, sin embargo, se observa que el uso de este tipo de materia prima ocasiona fallas, que afecta los márgenes de ganancia. La metodología implementada para solucionar la problemática es la simulación de eventos discretos, con la cual, después de diagnosticar la situación y analizar la línea de producción, se proponen y evalúan escenarios de solución y se escoge la alternativa que propone la inversión en nuevos elementos de trabajo. Según los resultados encontrados, es la que más aporta a la solución del problema, donde se observa que la disminución de desperdicios es considerable, dado que disminuyen los desperdicios en un 70 %, aproximadamente.

Palabras clave: material recuperado, plástico, procesos de colas, simulación.

Abstract

The raw material waste, as part of the production process of any company, is a problem that must be treated, due to the losses of money that may be conveyed. Hence, it is essential to optimize and increase the productivity of processes. Hence, the case of a company in the city of Medellín-Colombia is presented as an option of how it is suitable to provide solutions with plastic products taking into account the care of the environment. Although their products are made with material recovered from surpluses of processes, it has been observed that the use of this type of raw material causes failures, affecting profit margins. The implemented methodology to solve the company's problem is the Discrete-event simulation, which after making a diagnosis of the situation, and the analysis of the production line, solution scenarios are proposed to invest in new work items. According to the results, this methodology fairly contributes the most to the problem solving, since it is observed that the reduction of waste concerns to 70 % approximately.

Keywords: recovered material, plastic, queueing processes, simulation.

1. Introducción

En Colombia, la producción de recipientes plásticos ha presentado un crecimiento en los últimos años, gracias a su calidad de ejecución e impresión de empaques, con alto valor agregado [1], pues incorpora en los productos diseños vanguardistas. El fenómeno también se ha debido al crecimiento y expansión de las industrias demandantes en los sectores de construcción, agricultura y producción [2].

A su vez, los empaques plásticos han demostrado su capacidad para conservar la calidad y durabilidad de los productos, sean alimenticios o no. Este tipo de empaque con superficies flexibles o rígidas han desplazado los empaques elaborados en otros materiales, como metal y vidrio [3].

Adicional a ello, la tendencia al cuidado del medio ambiente ha generado que la industria se preocupe por desarrollar nuevos productos que aporten a su cuidado [4]–[7] (por ejemplo, aplicaciones bicapa con contenido de material reciclado), hacia la creación de empaques más livianos, entre otros.

En el país también se ha impulsado todo un tema por el cuidado del medio ambiente, gracias a políticas orientadas al cambio de patrones insostenibles de producción y consumo, a fin de estimular el desarrollo sostenible como fuente de desarrollo y competitividad empresarial [2].

A partir de este entorno económico se analizó la problemática de una empresa dedicada a los productos de plástico, ubicada en Medellín (Colombia). Dicha empresa brinda soluciones con productos plásticos, desde rollos hasta empaques, destinados a diferentes industrias, alimenticias, farmacéutica, química e inmobiliaria.

La compañía posee una línea innovadora de termoformado que le permite ofrecer gran variedad de calibres, colores y diseños de impresión para diferentes sectores; además, está comprometida con la puntualidad y la agilidad en los tiempos de entrega, así como con la calidad y resistencia que deben tener este tipo de productos.

Una de las principales características de la empresa es que se encuentra encaminada hacia el cuidado del medio ambiente, dado que el 75% de sus productos son fabricados con material recuperado. Algunas veces, el uso de este tipo de material como materia prima suele ocasionar fallas en el proceso de producción y aumento de desperdicios.

Debido a que para toda empresa es importante velar por aumentar su productividad y optimizar sus procesos, así como tener mayor rentabilidad y competitividad, pero en sintonía con el cuidado con el medio ambiente, como lo hacen en muchas otras partes del mundo [6], [8]–[10], se realizó un análisis utilizando herramientas de simulación para verificar el estado del uso de los desperdicios, entendiendo que la compañía implementa una economía circular e intenta ingresar nuevamente los desperdicios al sistema; pero no se tiene conocimiento de la efectividad del proceso.

Por ende, se evaluó el estado de producción de dicha empresa, con el objetivo de buscar, por medio de la simulación de eventos discretos del proceso, reducir el desperdicio de materia prima y, a su vez, los costos que esto genera.

2. Metodología

El proceso de evaluación se inició con recorridos guiados por el personal de la compañía, para lograr construir el flujograma del proceso (figura 1), el cual se convirtió en el mapa para interpretar las problemáticas que suceden allí. Por medio de reuniones con el jefe de producción se definió estudiar alternativas para disminuir los desperdicios.

Ahora, teniendo en cuenta los actores que hacen parte del proceso, se valoró su incidencia directa en el problema y se encontró que los tres subsistemas, conocidos como extrusión, impresión y sellado, contribuyen al aumento de desperdicios; por ende, las posibles soluciones deben ir encaminadas a estas áreas.

Luego, con base en lo anterior, se construyó un modelo teórico en el software Simul8, herramienta idónea para el estudio de casos utilizando la simulación de eventos discretos, el cual se validó y, posteriormente, se utilizó para el análisis de escenarios.

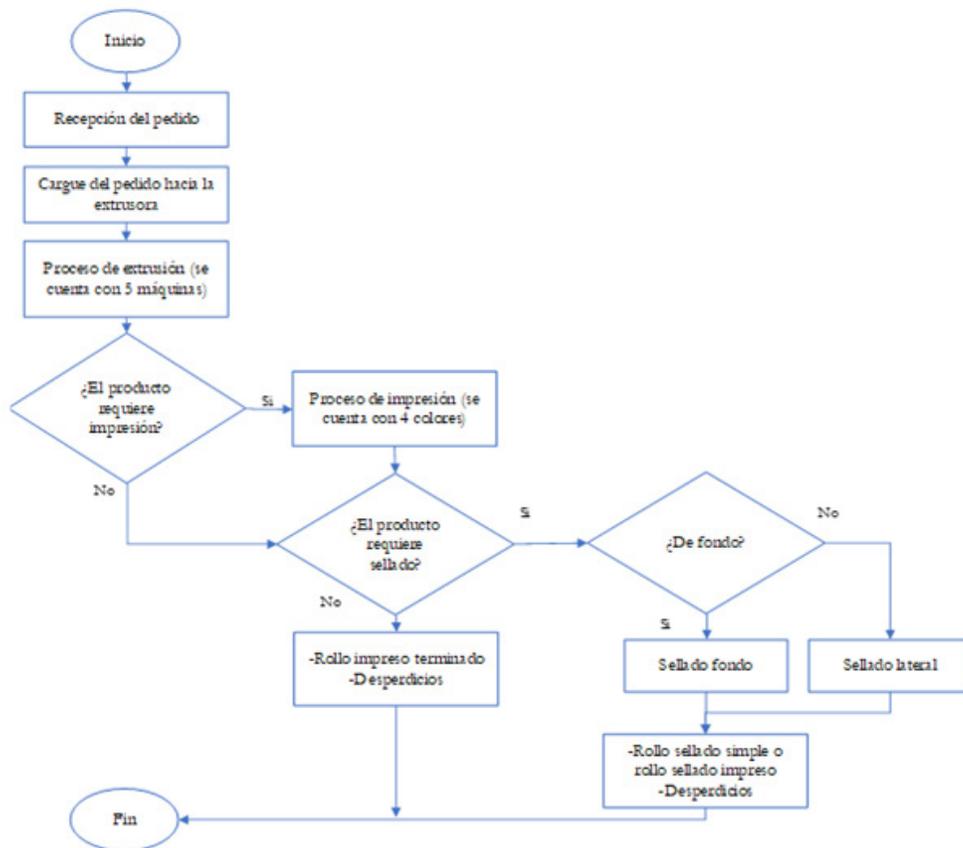


Figura 1. Flujograma del proceso

2.1. Descripción verbal del proceso

La producción de empaques inicia con la recepción del pedido del cliente, en el cual se especifican diversos aspectos del producto como tamaño del empaque, densidad, color, espesor y cantidad. Con esta orden de pedido se dispone de la materia prima necesaria para la producción, la cual ha sido ordenada a los proveedores y clasificada, ya sea por materia prima pura o por material reciclado, como se puede observar en la figura 1.

A su vez, cuando se tiene conocimiento de los requerimientos del cliente respecto al empaque, la materia prima se lleva a la extrusora. La empresa cuenta con cinco máquinas extrusoras que se deben programar de acuerdo con la necesidad y el tipo de características que deba tener el empaque; así, la materia prima se adiciona por la tolva, y allí es donde se debe mezclar con polietileno lineal, el cual les brinda mejores características. Además, si el empaque requiere algún color, en este momento se adiciona el pigmento necesario. Una vez se cuenta con todo el material, se procede a calibrar la velocidad y temperatura de la máquina extrusora, puesto que una inadecuada calibración genera un producto sin los requisitos de calidad necesarios.

Al calibrar las máquinas y ponerlas en ejecución, estas se encargan de derretir el polietileno, homogeneizar el material, inflarlo de acuerdo con la necesidad de tamaño, enfriarlo y enrollarlo. Después de que un rollo es terminado, se verifica si este debe tener algún logo o impresión, y si es así, se transporta hasta la impresora por flexografía, y se procede a montar las planchas para realizar la impresión. Cabe resaltar que esta máquina trabaja con cuatro colores, y para cada color que necesite el logo del empaque se debe disponer de un cirel (estructura en la que se depositan las pinturas). Estos se deben montar manualmente y por medio de ensayo y error se van acomodando en la posición que se necesite.

A su vez, mientras se calibran dichos cireles, a la par se va realizando la impresión en un material de prueba, con el fin de minimizar posibles errores en el proceso de la impresión del producto, y al estar ajustadas todas las planchas, se monta el rollo del pedido y se imprime. Cuando el material se encuentra de nuevo enrollado, se verifica si necesita sellado; si lo requiere, entonces se transporta hasta alguna de las dos selladoras disponibles en la empresa, y el operario se dispone a calibrar la máquina a la que debe programarle el paso del corte y demás parámetros. En efecto, la máquina se programa para que, de acuerdo con una cantidad de empaques fijo, pare unos segundos y, así, el operario pueda doblar, empaclar y almacenar las bolsas en una caja para su entrega.

Además, la producción varía estratégicamente teniendo en cuenta las necesidades, los requerimientos y las expectativas del cliente, por lo que básicamente salen cuatro productos diferentes: empaque en rollo sencillo, empaque en rollo con impresión, empaques sellados y empaques impresos y sellados.

En la figura 2 se puede observar la distribución física en planta de la empresa, donde se muestran algunos de los elementos principales y la respectiva distribución en el espacio asignado.

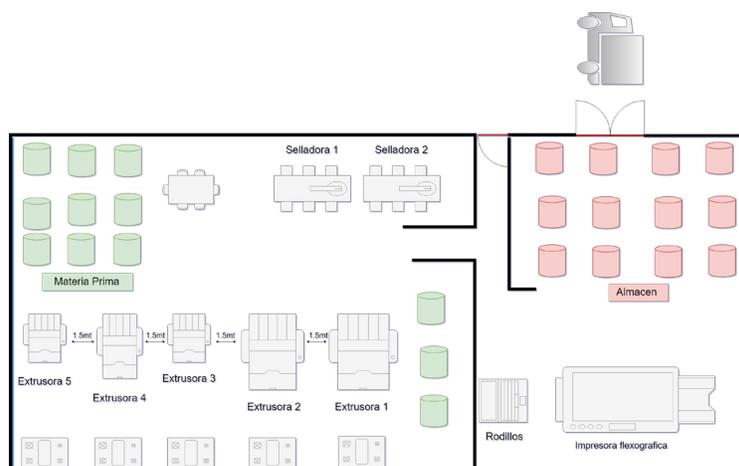


Figura 2. Distribución de planta de la empresa

2.2. Definición de las variables

2.2.1. Variables exógenas

- ◆ Tiempo entre llegadas de pedidos al sistema: se refiere al tiempo que transcurre desde la llegada de un pedido hasta el siguiente más próximo.
- ◆ Medida del rollo: caracteriza la medida de los pedidos, para luego ser enviados a la extrusora.
- ◆ Tiempo de operación de cada extrusora: establece el tiempo que se demora la extrusora al producir el rollo de plástico.
- ◆ Pedidos con necesidad de impresión: indica cuál de los rollos terminados del sistema necesitaran impresión.
- ◆ Tiempo de operación de la impresora: establece el tiempo que se demora la impresora al llevar a cabo su actividad.
- ◆ Pedidos con necesidad de sellado: indica cuál de los rollos terminados del sistema, tanto del proceso de extrusión como del proceso de impresión, necesitan ser sellados.
- ◆ Tiempo de operación de la máquina de sellado: se puede determinar como dato de entrada del modelo. Establece el tiempo que demora el sellado, ya que, dependiendo de las necesidades del pedido, puede ser sellado lateral o de fondo.

2.2.2. Variables endógenas

Todas las variables arrojan los resultados en kilogramos.

- ◆ Desperdicios por extrusora: muestra las cantidades de materia prima desperdiciada durante la creación del rollo (actividad interna del sistema).
- ◆ Desperdicios de la impresora: establece los desperdicios de la impresora (actividad interna del sistema).
- ◆ Plástico sencillo completado: se refiere a la cantidad de plástico sencillo culminado con éxito en el proceso de producción.
- ◆ Plástico impreso completado: es la cantidad de plástico impreso culminado con éxito en el proceso de producción.
- ◆ Plástico del empaque sellado: indica la cantidad de plástico empaque sellado culminado con éxito en el proceso de producción.
- ◆ Plástico empaque impreso: es la cantidad de plástico empaque impreso culminado con éxito en el proceso de producción.

2.2.3. Variables de estado

- ◆ Cantidad de pedidos presentes en la cola de cada extrusora: esta variable demuestra la eficiencia de la empresa al comenzar un nuevo pedido. Indica la cantidad de pedidos en cada tiempo determinado en el sistema.

- ◆ Cantidad de pedidos presentes en la cola de la flexografía: esta variable demuestra la eficiencia de la empresa al llevar a cabo los procesos que solicitan impresión. Además, establece la cantidad de pedidos pendientes para impresión en un tiempo determinado en el sistema.
- ◆ Cantidad de pedidos presentes en la cola a las máquinas selladora: muestra la eficiencia de la empresa al llevar a cabo los procesos que solicitan sellado. Esta representa la cantidad de rollos pendientes de sellado, debido a que provienen de dos procesos diferentes, como ya se mencionó.
- ◆ Almacenamiento: cantidad de productos entregados que se clasifican según el tipo de pedido.

2.2.4. Variables de desempeño

- ◆ Porcentaje de desperdicio: indica el porcentaje de desperdicio que tuvo lugar en el proceso de producción, en contraste con el plástico producido.
- ◆ Eficiencia de las máquinas extrusoras: establece la cantidad del tiempo en el que cada máquina se encuentra operando.
- ◆ Eficiencia de la impresora: establece la cantidad del tiempo en que la impresora se encuentra en operación.
- ◆ Eficiencia de las máquinas selladoras: establece la cantidad del tiempo en que las selladoras se encuentran en operación.

2.3. Recopilación y modelado de los datos

La información del presente trabajo se consultó con el experto, esto es, con el jefe de planta. Los datos que suministró el experto se clasificaron para su correcta utilización.

Tipo de producto: los porcentajes en los que se producen los diferentes tipos de productos con respecto a la producción de un fin de semana se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Tipo de pedidos

| Tipo de pedido | Porcentaje |
|-------------------------|------------|
| Rollo simple | 43 |
| Rollo impreso | 16 |
| Rollo sellado | 20 |
| Rollo sellado e impreso | 21 |

Proceso de carga de extrusora. Este fue el único proceso en el cual se pudieron tomar los tiempos. Se inició desde el momento en el cual el operario toma un bulto de 50 kg para ubicarlo en la tolva y termina hasta que este se vacía.

Para identificar la distribución que se ajusta a los datos, primero, se realizó un análisis gráfico, para, luego, por medio de pruebas de bondad y ajuste, terminar la verificación, como se puede ver en la figura 3.

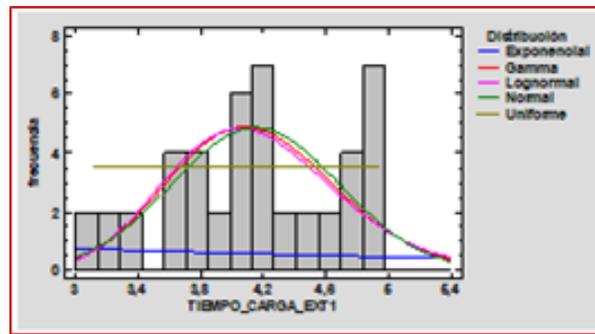


Figura 3. Ajuste la distribución de los diferentes tiempos de carga

En este caso, para la variable que mide los tiempos de carga de la extrusora 1, se encontró que los datos seguían una distribución normal, como se puede observar en histograma de la figura 2.

2.4. Elaboración de un modelo formal

Para simulación se utilizó el software Simul8.

El modelo inició definiendo la llegada de los pedidos, los cuales, según un porcentaje previamente calculado por históricos, se enrutaron a las diferentes extrusoras.

Luego, se asignan las distribuciones a la actividad de carga de la extrusoras, las cuales extraen del almacén de materia prima 150 kg, tanto de polietileno de alta como de baja densidad, como se observa en la figura 4; más tarde, los insumos pasan a la cola de cada máquina extrusora para ser procesados.

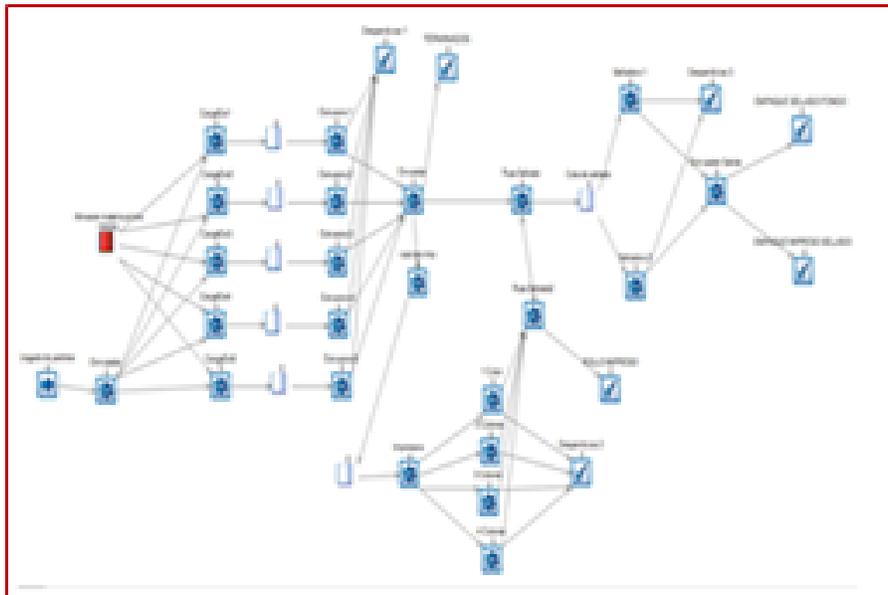


Figura 4. Modelo formal del proceso

Para contabilizarlos, se agregan a cada extrusora los porcentajes de producción y los pertenecientes a desperdicios.

Después, la cantidad de plástico que se produjo pasará a un enrutador, donde el producto se dirige a la finalización del proceso, o continua en el proceso de impresión o va directamente a sellado, dependiendo del requerimiento.

Proceso de impresión. En caso de que el rollo requiera impresión, se dirige el producto a este subsistema del modelo y se conocerá qué especificaciones se requieren, ya sea una impresión de uno, dos, tres o cuatro colores.

Para conseguir una representación acertada del proceso de impresión, se insertaron distribuciones en el modelo, según la cantidad de colores que requiere. Esto debido a que, a mayor cantidad de colores, la duración de la impresión aumentará proporcionalmente.

Por su parte, para definir los desperdicios según el tipo de impresión se declararon los porcentajes correspondientes en los enrutadores, por cantidad de color.

De igual forma, al final de este proceso se define qué cantidad de plástico queda allí como producto terminado o cuál continúa hacia sellado.

Para iniciar la modelación de este proceso, se definieron las distribuciones, basándose en el tipo de sellado, los cuales pueden ser de fondo o laterales. La única diferencia es que el primero se hará en la parte más corta del rollo.

Esta distribución se aplica a las dos máquinas selladoras existentes, las cuales demoran según el producto. También se ubican en cada actividad los porcentajes de desperdicios.

En el “enrutador final” se dividen las dos salidas de producto por este proceso, las cuales son “salida empaque sellado” y “salida empaque impreso sellado”. El proceso se puede observar en la figura 4.

3. Verificación del modelo

Para la verificación del modelo se aplicaron diferentes pruebas, como diversos trabajos de simulación discreta [11]–[17], con el objetivo de determinar la coherencia del modelo; además, una vez que se ha implementado el sistema, los analistas/programadores deben verificar si este código de computador contiene algún error de programación. Varias técnicas son aplicables, pero ninguna es perfecta [18]. Para su verificación se probó lo siguiente: independencia de semillas, trazados y condiciones extremas.

3.1. Independencia de semillas

Con los intervalos de confianza estimados se realizaron otras nueve corridas con semillas diferentes. Así se verificó que los datos se encuentran dentro los intervalos de confianza estimados inicialmente. Los datos de la prueba de independencia de las semillas se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Prueba de independencia de las semillas

| Intervalos de confianza para la producción | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Tipo | Media | ICI | ICS |
| 1 | 6270 | 6104,04 | 6435,96 |
| 2 | 1529,11 | 1427,28 | 1630,94 |
| 3 | 2010,67 | 1949,49 | 2071,84 |
| 4 | 2010,22 | 1949,19 | 2071,26 |

ICI: Intervalo de Confianza Inferior
ICS: Intervalo de Confianza Superior

3.2. Trazados

Mediante el método de trazado se busca analizar con detalle ciertas actividades elegidas a criterio de los modeladores, para, de este modo, estudiar su comportamiento en función del tiempo de manera secuencial [19].

Por su parte, se determinó variar el tiempo de corrida cada 30 minutos, a fin de analizar el comportamiento de las llegadas y el funcionamiento de las extrusoras en el subproceso de extrusión.

Los resultados concuerdan con el comportamiento esperado del sistema, esto debido a que se observa que las llegadas se comportan de una manera exponencial durante el día. Además, se pudo observar la primera salida de material dada por la extrusora 1 a los 60 minutos, tanto de desperdicios como de producto plástico. Cabe resaltar que no desapareció el material; realmente, parte de este siguió el camino hacia impresión o sellado. El comportamiento de la cola hacia la extrusora 2, es decir, el flujo de material hacia esta es de esperarse, ya que es una de las más utilizadas del sistema.

3.3. Condiciones extremas

En este caso, se corrió el modelo bajo condiciones anormales. Se analizó qué pasaría si la llegada de los pedidos fuera cero, y los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Prueba de valores extremos

| Llegadas | Producto tipo | Número de completados |
|----------|---------------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 |
| 0 | 2 | 0 |
| 0 | 3 | 0 |
| 0 | 4 | 0 |

Como es de esperarse, si no hay llegadas, no hay producción. Ello indica un comportamiento lógico, puesto que, si al sistema no entra nada, del mismo modo nada debe salir. Esto representa el proceder idóneo del modelo.

4. Validación del modelo

En los modelos de simulación, la validación tiene como fin demostrar que la representación del sistema se asemeja al sistema abordado [20], es decir, asegurarse de que los supuestos (datos implementados o secuencias programadas) sean razonables para de este modo obtener resultados predecibles.

Para este apartado se decidió recurrir a la intuición de expertos; en concreto, al ingeniero César, quien nos acompañó durante todo este proceso. Su aporte fue de gran valor; además, según [21], una persona competente en el campo puede realizar juicios acerca de las idealizaciones necesarios con base en su experiencia.

Así, se visitó la planta de la compañía, donde se enseñó el modelo. Cabe resaltar que se destacó la representación del proceso, acorde con lo planteado en los diseños de la empresa, en especial el enrutamiento de los productos, debido a que en esa compañía es un proceso lento y confuso para los operarios.

Como caso especial, y dado al análisis de los desperdicios, se concluyó que, efectivamente, en cada subproceso presente en la fábrica se genera una tasa de desperdicios, ya sea en proceso de extrusión, sellado o impresión.

Por lo tanto, el modelo es una representación simplificada del comportamiento real del sistema, debido a múltiples factores que afectan su variabilidad, como la gran cantidad de productos diferentes que pueden producir; pero se subraya la delimitación hecha utilizando los tamaños mínimos por máquina.

Adicional a ello, se pudieron comparar datos históricos de los reportes de producción, en cuanto a la elaboración de rollo simple en peso: 2374 kg con 356 kg de desperdicios. Realizando un análisis del total de los productos que ofrece la empresa se modelaron las especificaciones de los más representativos, los cuales equivalen aproximadamente al 50% del total producido según históricos, esto porque el informe no contenía toda la información. Se procedió a correr el modelo en un día de trabajo de 8 h y se obtuvo la comparación mostrada en la tabla 4, en cuanto al total producido y desperdicios.

Tabla 4. Datos históricos vs. datos simulados

| Comparación de datos | | | |
|----------------------|--------------|-----------------|--------------|
| Histórico | | Simulación | |
| Total producido | Desperdicios | Total producido | Desperdicios |
| 1187 | 178 | 1032 | 215 |

Se puede observar que, aun cuando los datos no son iguales, las variaciones no son tan altas, y según el ingeniero César “es un escenario posible y válido, plasmado por el modelo”. Esto implica que los datos son aproximados a la realidad y que podrían plantearse cambios para luego ser representados en el sistema de la empresa [22].

5. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de hallar las variables clave del sistema, se realizaron cambios en los parámetros y en los valores introducidos, para así constatar qué tanto varían los resultados arrojados. Por consiguiente, se ejecutaron varias corridas considerando una semana de trabajo (5 días) de 8:00 a.m. a 4:00 p.m. y se analizaron los cambios encontrados.

También hay que mirar qué tanto varían los resultados arrojados por el modelo ante cambios en los parámetros y en los valores introducidos. ¿Cuáles son las variables clave? (Robustez del modelo).

5.1. Cambios en los tiempos de servicio de cada extrusora

Se recalca que el tiempo de cada extrusora puede variar, dependiendo del tipo de pedido y de la calidad de este; entonces, la empresa puede añadir más tiempo a la extrusora, pues necesita que cada rollo se seque un poco más para evitar que, al ser enrollado, se adhiera y afecte la calidad del material. La cuestión es que esto genera una cola demasiado grande antes de cada extrusora, y disminuiría el total de producto terminado, lo cual desarrolla pérdidas, debido a que se entregaría menos material en el mismo tiempo de producción.

En la figura 5 se muestra una corrida aumentando en 20 min el tiempo de cada extrusora. Esta acción tiene como causalidad un incremento sustancial en el tamaño de las colas.

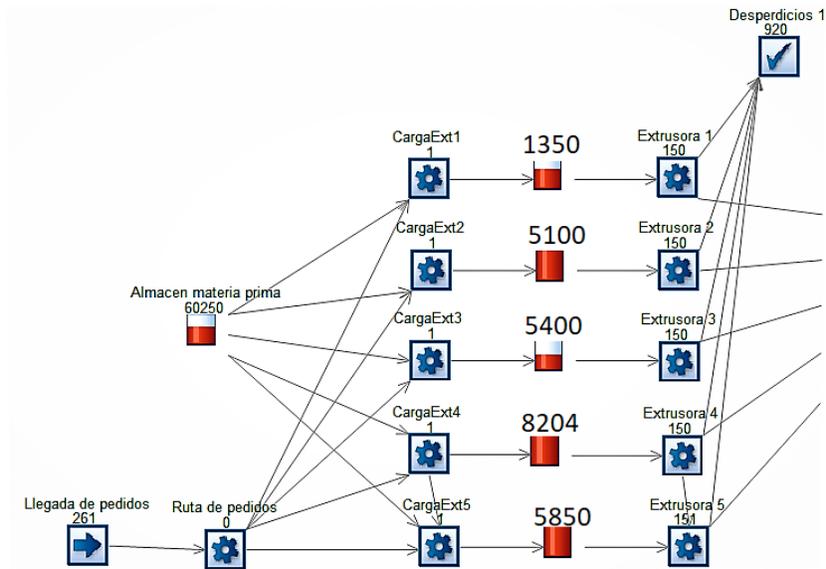


Figura 5. Aumento en los tiempos de servicio de cada extrusora

Luego se realiza una corrida que le disminuya a cada extrusora 20 min el tiempo de producción, a fin de reducir las colas de cada extrusora. Aquí se debe analizar el tipo de pedido, pues no se podrá secar bien el rollo, lo cual generaría más desperdicio y, por ende, más pérdida de tiempo y dinero. Esto se puede observar en la figura 6.

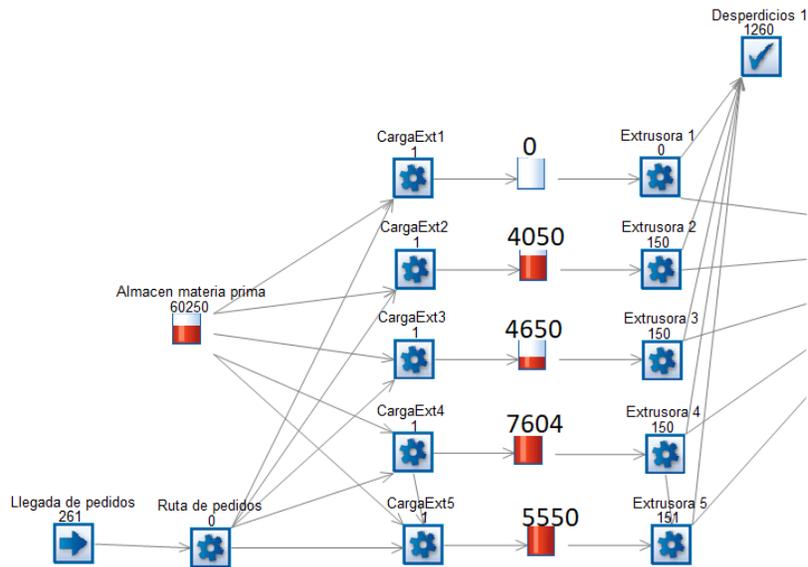


Figura 6. Disminución en los tiempos de servicio de cada extrusora

5.2. Cambios en las tasas de llegada

Al disminuir la tasa de llegada de pedidos en el modelo inicial, se observa que no hay cambios significativos, ya que las colas se siguen manteniendo durante el mismo intervalo de kilos represados, y siguen saliendo la misma cantidad de productos. Por ello, se puede concluir que el disminuir la tasa de llegada de pedido no es una mejora potencial para el modelo, a lo que se adiciona que menos llegadas de pedido son menos entradas de dinero para la empresa.

5.3. Cambios en la capacidad de almacenamiento

Con el modelo básico se cuenta con una capacidad de almacenamiento de materia prima de 100.000 kg, de los cuales sobran semanalmente 54.700 kg, que no se requieren para la producción y que en la realidad están obstruyendo el paso de los empleados. Por esta razón, se optó por reducir en un 50% esta capacidad durante el análisis de sensibilidad (ver figura 7), lo cual evidenció que se puede seguir cumpliendo con el 100% de los pedidos semanales, y aun así quedan 4700 kg de materia prima como inventario de seguridad.

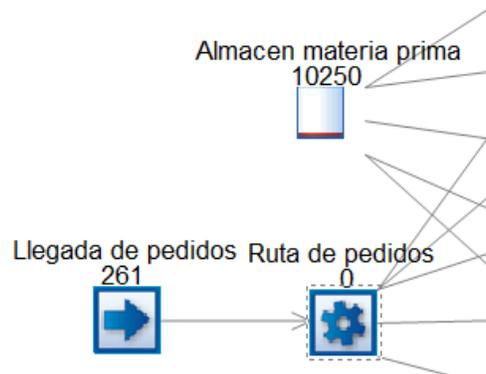


Figura 7. Cambios en la capacidad de almacenamiento, modelado con 50.000 kg de almacenamiento (50% menos)

6. Resultados y discusión

6.1. Escenario 1

Las extrusoras requieren un cambio de malla para su buen funcionamiento. Estas mallas se usan para eliminar los residuos que puedan afectar el proceso productivo en la materia prima. Con solo un cambio diario del filtro en la extrusora, se obtienen 1456 kg de desperdicios en 5 días. Si se implementa el doble cambio en el día, se obtiene una disminución en la probabilidad de desperdicios en la extrusora 1, 3 y 4 del 5%, y en la extrusora 2 y 5, del 3%, consiguiendo que al final de la simulación los desperdicios hayan disminuido hasta 720 kg.

En la figura 8 se compara, de manera más detallada, lo que arroja la simulación en cantidad de desperdicios semanales, según el número de cambios de filtro que se realicen en el día. La prueba de hipótesis para determinar el posible comportamiento de los desperdicios será:

H01: Los desperdicios disminuyen

Ha1: Los desperdicios no disminuyen.

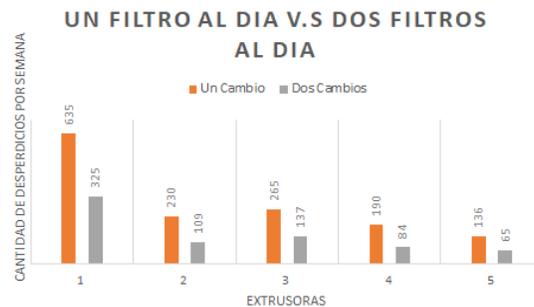


Figura 8. Comparación de desperdicios semanales (en kilogramos) según el número de cambios de filtro al día

Se puede observar que es viable la implementación del plan de mantenimiento propuesto. La estrategia, además de producir una disminución en los desperdicios, no requiere mucho tiempo para el cambio de filtro, el cual se lleva a cabo cuando se programa la máquina. En este caso, no se rechaza la H0 planteada, es decir, que los desperdicios disminuyen con la estrategia planteada.

6.2. Escenario 2

Este escenario se plantea desde la compra de una nueva impresora flexográfica, donde se disminuyen los tiempos de procesamiento en un 70%. En la tabla 5 se muestran las mejoras obtenidas en términos de tiempos de impresión y cantidad de desperdicios.

Tabla 5. Escenario 2

| Impresión | | | | |
|-----------|---------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|
| Colores | Tiempo actual | Tiempo con mejora | Desperdicios actuales (%) | Desperdicios con mejora |
| 1C | 30 | 9 | 3 | 0,6 |
| 2C | 60 | 18 | 6 | 1,2 |
| 3C | 90 | 27 | 9 | 1,8 |
| 4C | 120 | 36 | 12 | 3,6 |

Las pruebas de hipótesis realizadas para la cola de impresión son:

H01: La cola de impresión disminuye

Ha1: La cola de impresión no disminuye

Las respectivas pruebas de hipótesis para la variable desperdicios son:

H02: Los desperdicios disminuyen

Ha2: Los desperdicios no disminuyen.

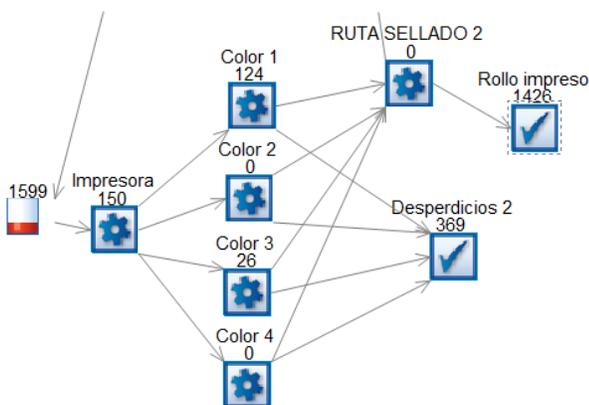


Figura 9. Comportamiento con la antigua impresora

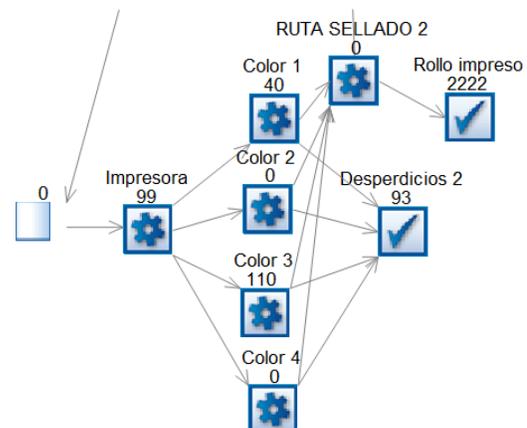


Figura 10. Comportamiento con la nueva impresora

Como se observa en las figuras 9 y 10, la cola disminuye de tal forma que se elimina, y esto le permitirá a la empresa aceptar más órdenes de impresión; por esto, H01 no se rechaza, es decir, la cola de impresión disminuye.

En cuanto a desperdicios, con la implementación de la mejora, los desperdicios variaron de 369 kg a 93 kg, una disminución del 75% aproximadamente; por esto, se concluye que H02 no se rechaza, es decir, los desperdicios disminuyen.

6.3. Escenario 3

En este escenario los tiempos por extrusora disminuyeron 15 min cada uno, dada la implementación de la capacitación a los operarios, tal como se representa en la figura 11.

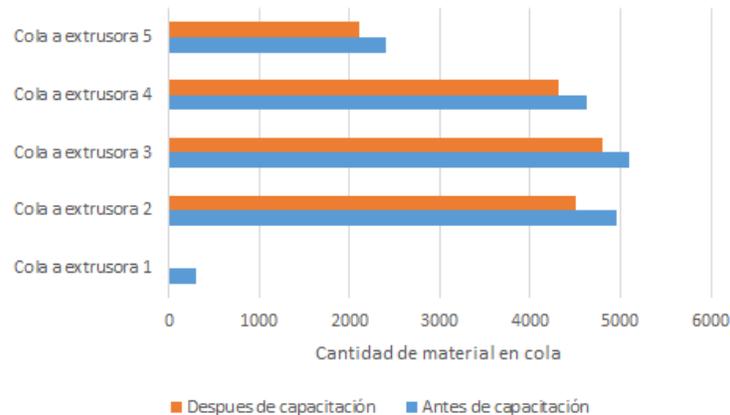


Figura 11. Antes y después de la capacitación

En este caso, el efecto del cambio no fue tan drástico; sin embargo, se observa que sí se alcanza una disminución, en especial en la cola de la extrusora 1, que se elimina. Por lo tanto, H02 no se rechaza.

7. Conclusiones

Se concluye que mediante el uso de la simulación y la elaboración de un modelo que represente la realidad, es menos costoso para las empresas detallar el comportamiento del sistema y verificar los cambios que se planean en el proceso, antes de incurrir en los costos de implementarlos sin conocer a fondo los resultados que se podrían obtener, lo que podría incidir positivamente en los márgenes de ganancia en las empresas.

A su vez, como se evidenció en el software, durante el diseño de experimentos se puede observar que el cambio de filtro de la extrusora dos veces al día reduce los desperdicios en las extrusoras 1, 3 y 4, en un 5%, y en las extrusoras 2 y 5, en un 3%; además de que al realizar la compra de la nueva impresora dichos desperdicios se reducen en un 70%. Con la implementación de ambos escenarios se esperaría una reducción de desperdicios del 78% semanal.

Con el modelo básico se cuenta con una capacidad de almacenamiento de materia prima de 100.000 kg, de los cuales sobran semanalmente 54.700 kg, que no se necesitan para la producción y que en la realidad obstruyen la libre circulación del personal de la empresa. Debido a ello se decidió reducir esta capacidad en un 50% y se evidenció que se puede seguir cumpliendo con el 100% de los pedidos semanales, pues quedan 4700 kg de materia prima como inventario de seguridad.

Finalmente, se concluye, mediante este estudio, que el problema detectado de los desperdicios de materia prima se podría disminuir significativamente, aunque una de las soluciones propuestas tiene un costo significativo (compra de impresora automática), algo que la empresa ya tiene previsto para mejorar su producción. Ello indica que la posible solución planteada se asemeja a la realidad del sistema.

Con la elaboración del modelo se encontraron los porcentajes promedios de desperdicios generados durante cada proceso, del 8,4%, del 7,5% y del 15% para las extrusoras, selladoras e impresoras, respectivamente.

Referencias

- [1] L. Flórez, "Industria de envases plásticos en Colombia: crecimiento a través de calidad y especialización", Elempaque.com, 2014. [en línea]. Disponible: <http://www.elempaque.com/temas/industria-de-envases-plasticos-en-Colombia.-crecimiento-a-traves-de-calidad-y-especializacion+97344>.
- [2] B. A. Alzate, J. B. Hurtado, y L. F. M. López, "Implementación De Herramientas para el diagnóstico de innovación en la empresa Novaflex del sector calzado en colombia", *Rev. Adm. Innov.*, vol. 12, n.º 3, p. 310, 2015.
- [3] J. P. Pérez Góngora, "La industria del plástico en México y el mundo", *Comer. Exter.*, vol. 64, n.º 5, pp. 6–9, 2014.
- [4] F. Arias Jiménez, "El consumo de bolsas cae un 30% por impuesto en Colombia", *El Colombiano*, Medellín, p. 1, 24-Oct-2017.
- [5] M. Gear, J. Sadhukhan, R. Thorpe, R. Clift, J. Seville, y M. Keast, "A life cycle assessment data analysis toolkit for the design of novel processes – A case study for a thermal cracking process for mixed plastic waste", *J. Clean. Prod.*, vol. 180, pp. 735–747, 2018.
- [6] B. G. Mwanza, C. Mbohwa, y A. Telukdarie, "Strategies for the recovery and recycling of plastic solid waste (PSW): A focus on plastic manufacturing companies", *Procedia Manuf.*, vol. 21, n.º 2017, pp. 686–693, 2018.
- [7] H. Eduardo Díaz Rodríguez, "Tecnologías de la información y comunicación y crecimiento económico", *Econ. Inf.*, vol. 405, pp. 30–45, 2017.
- [8] W. M. Cheung, J. T. Leong, y P. Vichare, "Incorporating lean thinking and life cycle assessment to reduce environmental impacts of plastic injection moulded products", *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 759–775, 2018.
- [9] G. Erni-Cassola, V. Zadjelovic, M. I. Gibson, y J. A. Christie-Oleza, "Distribution of plastic polymer types in the marine environment: A meta-analysis", *J. Hazard. Mater.*, vol. 369, n.º November 2018, pp. 691–698, 2019.
- [10] E. Iacovidou, A. P. M. Velenturf, y P. Purnell, "Quality of resources: A typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example", *Sci. Total Environ.*, vol. 647, pp. 441–448, 2019.
- [11] M. S. Ramírez, M. Z. Jaramillo, y S. C. Espinosa, "Análisis de la producción de productos alimenticios tipo snacks mediante simulación de eventos discretos en una empresa de Medellín", vol. 17, n.º 1, 2019.
- [12] R. Lovreglio, A. Fonzone, L. dell'Olio, y D. Borri, "A study of herding behaviour in exit choice during emergencies based on random utility theory", *Saf. Sci.*, vol. 82, pp. 421–431, 2016.
- [13] A. Alrabghi y A. Tiwari, "A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 154, pp. 160–170, 2016.
- [14] C. Baril, V. Gascon, J. Miller, y N. Côté, "Use of a discrete-event simulation in a Kaizen event: A case study in healthcare", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 249, n.º 1, pp. 327–339, 2016.

- [15] A. Borshchev y A. Filippov, "Borshchev_Filippov", *Simulation*, vol. 66, n.º 11, pp. 25–29, 2004.
- [16] K. P. Lin, M. L. Wang, Y. Hong, Y. Yang, y J. X. Zhou, "Discrete event simulation of long-duration space station operations for rapid evaluation", *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 68, pp. 454–464, 2017.
- [17] G. E. Vieira, M. Kück, E. Frazzon, y M. Freitag, "Evaluating the robustness of production schedules using discrete-event simulation", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, n.º 1, pp. 7953–7958, 2017.
- [18] Kleijnen J. P. C., "Verification and validation of simulation models", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 82, n.º mimic, pp. 145–162, 1995.
- [19] R. G. Sargent, *Verification and Validation of Simulation Models*, 2012.
- [20] A. García Sánchez, M. Ortega Mier, e I. Delgado David, "Elementos de simulación: un enfoque práctico con Witness", 2012 [en línea]. Disponible: <https://docplayer.es/19237285-Elementos-de-simulacion-un-enfoque-practico-con-witness-marzo-2012-universidad-politecnica-de-madrid.html>.
- [21] L. Godoy y C. Bartó, "Validación y valoración de modelos en la dinámica de sistemas", *Rev. Argentina Enseñanza la Ing.*, pp. 31–47, 2012.
- [22] J. M. Drake, "Ingeniería software verificación y validación", *Ing. Program.*, pp. 1–33, 2009.