

INTEGRACIÓN MANUFACTURA – ENVASADO EN EL ÁREA DE GRAN VOLUMEN EN PREBEL USANDO DES

Manuela Valencia Franco

Ingeniería Matemática
Universidad EAFIT
Medellín, Antioquia

Sara Maria Cano Martínez

Ingeniería Matemática
Universidad EAFIT
Medellín, Antioquia

Thomas Martinod

Ingeniería Matemática
Universidad EAFIT
Medellín, Antioquia

RESUMEN

Prebel, como empresa de producción de cosméticos, enfrenta retrasos en su proceso de envasado debido a la falta de disponibilidad de tanques fijos, lo que afecta el cumplimiento de las órdenes de producción. En este trabajo, se presenta un modelo de simulación de eventos discretos (DES) desarrollado en SIMUL8 para analizar la operación del área de envasado y proponer soluciones que optimicen el proceso. El estudio se basa en datos reales y se enfoca en identificar las causas principales de los paros y su impacto en la producción. Los resultados muestran que reorganizar los descansos del personal podría aumentar la eficiencia en un 10%, sugiriendo que optimizar los recursos existentes es más efectivo que aumentar la capacidad de tanques o personal.

1. INTRODUCCIÓN

Prebel es una destacada empresa colombiana con sede en Medellín, dedicada a la fabricación de cosméticos, productos de cuidado personal y fragancias (Prebel 2024). Esta compañía se especializa en la producción para marcas de terceros, como Avon, PyG y L'Oréal, diversificando ampliamente su catálogo de productos.

Internamente, Prebel ha desarrollado una estructura de producción dividida en tres etapas (áreas) principales: Almacenamiento y Transporte, Manufactura, y Envasado. Además, debido a la gran variedad de productos que maneja y a la naturaleza de sus procesos químicos, la compañía organiza su producción en áreas específicas según el tipo de producto, tales como alto volumen, bajo volumen, colonias, polvos y labiales, entre otros.

En este artículo, se estudia la integración manufactura-ensado en el área de gran volumen, que abarca productos como shampoos, cremas y aceites. El proceso comienza con la recepción de una orden de producción por parte de un cliente externo. Tras la programación de la orden, manufactura gestiona los insumos químicos necesarios, que luego son procesados en marmitas (reactores), generando el producto no envasado (granel). Terminada la reacción, el granel es transferido a tanques fijos a través de tuberías. Posteriormente, en el área de envasado, el granel es empacado utilizando líneas manuales o automáticas. Un desafío recurrente en este proceso es la falta de disponibilidad de tanques fijos, lo cual genera retrasos en la manufactura y afecta significativamente la productividad.

Para abordar esta problemática, se propone el uso de un modelo de simulación de eventos discretos, implementado en SIMUL8 (SIMUL8 Corporation 2024), con el fin de analizar y proponer solucio-

nes que optimicen la disponibilidad de tanques y garanticen el cumplimiento de los plazos de producción.

El esquema del documento es el siguiente: en la sección 2 se describe el modelo conceptual junto con los supuestos y simplificaciones con los cuales se construyó. En la sección 3 se presenta una revisión de la literatura sobre problemas en líneas de producción y envasado. La sección 4 detalla los datos utilizados y su aplicación al modelo. En la sección 5 se explica el proceso de implementación en SIMUL8, mientras que en la sección 6 se analizan los resultados obtenidos. Las secciones 7 y 8 están dedicadas a la verificación, validación y análisis de sensibilidad del modelo, respectivamente. Finalmente, en la sección 9 se experimenta con diferentes escenarios.

2. MODELO CONCEPTUAL

2.1. Definición del Problema

Uno de los mayores retos de Prebel es cumplir con la gran cantidad de órdenes de producción en los plazos establecidos, dado que enfrenta problemas recurrentes que generan retrasos. Este proyecto se enfoca en la falta de disponibilidad de tanques fijos, lo cual impide descargar nuevos graneles listos para envasar, afectando el área de manufactura.

La causa principal de esta situación son las pausas en las áreas de envasado y manufactura, que pueden dividirse en dos tipos: los paros regulares, como los descansos programados de los empleados, y los paros irregulares, que ocurren debido a fallas técnicas, falta de materia prima, temperaturas elevadas del granel o prácticas ineficientes de lavado. Estos paros irregulares impiden que se logre envasar completamente el granel, dejando residuos en los tanques fijos, los cuales permanecen ocupados y limitan el procesamiento de nuevos lotes.

2.2. Objetivos de la Modelación

El objetivo principal de Prebel es optimizar su proceso de envasado para incrementar la capacidad productiva y, de este modo, cumplir con un mayor número de órdenes en menos tiempo. La modelación busca identificar la mejor distribución de los recursos disponibles, como la asignación de personal por turno o el uso eficiente de las líneas de envasado manuales y automáticas, para maximizar la efectividad operativa.

Adicionalmente, el modelo tiene como propósito identificar las principales causas de los paros en el proceso productivo, diferenciando aquellos que tienen mayor impacto en los tiempos de producción. Asimismo, se evaluará el efecto de aumentar la cantidad de tanques fijos, con el fin de determinar si esta medida contribuiría a mejorar los tiempos en el sistema de las diferentes órdenes.

2.3. Entradas y Salidas

Las entradas del modelo incluyen la cantidad de tanques fijos y marmitas, junto con sus respectivas capacidades. Además, se consideran las órdenes de producción semanales, que incluyen atributos como el tipo de producto, la cantidad a fabricar y el tiempo estimado de producción. También se toman en cuenta el número de líneas de envasado disponibles y la cantidad de personal asignado por turno.

En cuanto a las salidas del modelo, se espera generar histogramas e intervalos de confianza para analizar el tiempo total que una orden pasa en el sistema, los tiempos de espera (tanto en los tanques fijos como en las líneas de envasado), el porcentaje de órdenes completadas y el porcentaje de ocupación en cada etapa del proceso. Estos resultados se obtendrán después de realizar un número adecuado de corridas del modelo (ver sección 6.1).

2.4. Contenido del Modelo

2.4.1. Alcance y Nivel de Detalle

Dado que Prebel es una empresa con muchos componentes y una gran variedad de productos, es fundamental definir claramente el alcance del modelo. En la Tabla 1, se muestra el alcance del modelo, indicando los elementos incluidos en la simulación que provienen del proceso productivo.

Tabla 1: Alcance del modelo.

Componente	Incluido/Excluido	Por qué
Órdenes	Incluido	Los tiempos de llegada de las órdenes y el tamaño de las órdenes influyen en el tamaño de los reactores y tanques que se necesitan.
Manufactura	Incluido	Los paros en manufactura y el tiempo que toma la mezcla de un granel afectan el tiempo total de las órdenes en el sistema.
Marmitas	Incluidas	Su disponibilidad afecta el tiempo de espera de las órdenes.
Tanques fijos	Incluidos	Su disponibilidad afecta el tiempo de espera de las órdenes.
Envasado	Incluido	Los paros y tiempos de desplazamiento afectan todo el proceso de envasado.
Filas en órdenes	Incluidas	Las órdenes deben esperar a que haya una marmita y un tanque disponibles.
Turnos	Incluidos	Los paros más frecuentes son debido a los tiempos de alimentación.

2.4.2. Supuestos y Simplificaciones

El modelo se construye bajo las siguientes hipótesis:

- Solo se considera el área de gran volumen, y en particular la interacción manufactura - envasado.
- Aunque en general las llegadas de pedidos son determinísticas (las empresas solicitan en fechas tabuladas), se asumirá que el tiempo entre llegadas sigue una distribución de probabilidad (validada en la sección 4.2).
- Todos los pedidos tienen una cantidad estandarizada de 6 toneladas.
- Se trabajará únicamente con el producto más demandado, *Crema Bebé Éxito*. Luego, no hay paros por limpieza de tanques o marmitas.
- El área de manufactura no comienza a preparar un granel hasta que no exista un tanque fijo libre, de forma que no se dañe el granel.
- Aunque el tiempo de simulación abarca 3 meses, no se hace distinción por temporadas, o por días de la semana en la cantidad de pedidos. La distribución del tiempo entre llegadas tiene parámetros constantes a lo largo del tiempo.
- No hay prioridad entre las líneas de envasado automáticas y manuales.

Como anotación final, las entidades de la simulación de eventos discretos no serán las botellas individualmente procesadas, sino que serán conjuntos o lotes de 250 botellas a la vez, esto con el fin de disminuir por mucho el tiempo que tarda en ejecutar la simulación. Para entrar en detalle en cuanto a los elementos de la simulación, en la Tabla 2, se presenta en términos de variables, el nivel de detalle del modelo.

3. ANTECEDENTES

Se analizaron dos artículos sobre sistemas de producción en empresas, ambos centrados en mejorar el aprovechamiento de los recursos y reducir retrasos en la entrega de órdenes, utilizando simulación DES. Aunque comparten este enfoque, uno se concentra en el área de envasado y el otro en manufactura. Mientras que uno propone medidas para mitigar los paros, el otro evalúa el impacto de soluciones ya implementadas. Estas similitudes y diferencias fueron clave para la construcción del modelo.

Tabla 2: Nivel de detalle del modelo.

Componente	Detalle	Incluido/Excluido	Por qué
Órdenes	Tiempos entre llegadas	Incluido	Es necesario modelar el flujo de órdenes que entran al sistema.
	Tamaño de la orden	Incluido	El tamaño de la orden determina cuántos reactores y tanques fijos deben estar disponibles para producir el granel.
	Tiempo de llegada entre órdenes por día de la semana	Excluido	No se considera relevante la diferencia en los tiempos de llegada según el día de la semana.
Manufactura	Paros por alimentación	Incluido	Es el paro más frecuente en el área de manufactura.
	Paros por tanques fijos	Incluido	Indica con qué frecuencia se detiene la producción por falta de disponibilidad de tanques fijos.
	Otros paros (reuniones, fallos de energía, soporte técnico)	Excluido	Estos tipos de fallos no son frecuentes ni prolongados.
Marmitas	Tiempo de duración del proceso	Incluido	Especifica cuánto tiempo toma el reactor en procesar un granel.
Tanques fijos	Disponibilidad	Incluido	Una orden no puede comenzar en el reactor si no hay tanques fijos disponibles para descargar el granel.
Envasado	Bandas semi-automáticas	Incluido	Estas bandas envasan rápidamente un pedido y requieren menos personal.
	Bandas manuales	Incluido	Se utilizan cuando las bandas semi-automáticas están ocupadas.
	Rendimiento de los empleados	Excluido	Todos los empleados se demoran el mismo tiempo en realizar sus tareas.
	Fallos de las máquinas de envasado	Excluido	Las máquinas no fallan con mucha frecuencia.
Turnos	Duración de cada turno	Incluido	Es útil para modelar el funcionamiento de los empleados en la planta.
	Número de empleados por turno	Incluido	La eficiencia varía según el número de empleados que trabajan por turno.

3.1. *Reducing Negative Impact of Machine Failures on Performance of Filling and Packaging Production Line – A Simulative Study*

El artículo de Bartkowiak y Pawlewski estudia el caso de una empresa de cosméticos donde las fallas en las máquinas interrumpen y retrasan el proceso de llenado y envasado. El objetivo principal del estudio es determinar la asignación óptima de "buffers", es decir, espacios de almacenamiento temporales, en la línea de producción para mejorar su rendimiento (Bartkowiak and Pawlewski 2016).

La principal contribución del artículo radica en demostrar cómo un modelo de simulación validado puede optimizar la eficiencia mediante diferentes asignaciones de buffers. Utilizando el software *FlexSim*, los autores experimentaron con seis escenarios que incluían diversas configuraciones de cinco buffers, cada uno probado con entre 1 y 1000 piezas. Para validar el modelo de simulación, se comparó el indicador de rendimiento "Overall Asset Efficiency" (OAE), que mide la eficiencia global de los activos de producción.

Los resultados obtenidos fueron prometedores, demostrando que es posible mitigar el impacto negativo de las fallas en las máquinas y aumentar el rendimiento de las líneas de producción de llenado y envasado en casi un 15%.

3.2. *Manufacturing System Lean Improvement Design using Discrete Event Simulation*

El sistema Lean es una metodología enfocada en optimizar procesos productivos y administrativos mediante la eliminación de desperdicios y la mejora continua. Este enfoque, originado en la industria automotriz con el Sistema de Producción Toyota, se ha expandido a múltiples sectores y áreas de

negocio (Omogbai and Salonitis 2016).

En el documento, se identifica que, aunque las herramientas Lean permiten implementar prácticas de mejora dentro de una compañía, es difícil prever cómo se comportarán estas mejoras en la realidad sin antes realizar pruebas. Por lo tanto, el objetivo principal del estudio es simular diferentes escenarios de mejora antes de su implementación. Para ello, se construyó un modelo de simulación de eventos discretos (DES) utilizando el software SIMUL8, donde se analizaron ocho prácticas de mejora propuestas.

Los resultados muestran un aumento del 50% en el rendimiento de la producción y la eficiencia de los operadores. Además, se observó un incremento del 20% en la ocupación de las máquinas. En conclusión, el documento sugiere que el modelo puede ampliarse para implementar un conjunto más amplio de mejoras en el futuro.

4. DATOS DEL MODELO

4.1. Bases de Datos

Para construir las distribuciones del modelo, se utilizaron tres bases de datos. La primera contenía información sobre los tiempos de llegada de los pedidos y el tiempo de fabricación de los productos durante el año 2023, lo que permitió calcular las respectivas distribuciones. Las otras dos bases de datos incluían los registros de los tiempos entre paros y los tipos de fallos en las áreas de manufactura y envasado, respectivamente, proporcionando una visión detallada de los eventos que interrumpen el proceso productivo. La visualización inicial de los datos se realizó en Excel, mientras que para las pruebas de hipótesis y la validación de las distribuciones se utilizaron RSTUDIO y STATFIT de SIMUL8.

Tabla 3: Nombres de las variables en cada base de datos.

Base de Datos	Variabes
Datos de llegadas	Material, Texto breve material, Ctd.teórica, Ctd entregada, Ctd.notif, Unidad, Inic.extr, FeFinReal, Status de sistema, Lote, Centro, RspCtrPrd, Desc. Resp.ctrl.producción, Inic.real, Denom. Grupo Planif.nec., N° sec, Modif.por, PerfFabr
Datos de manufactura	Centro de Trabajo, Turno, Fecha Turno, Año, Mes, Fecha Inicio del Paro, Fecha Fin del Paro, Tiempo del Paro (Minutos), Orden, Nombre Intervalo, Grupo Centro, Tipo Intervalo
Datos de envasado	Id, Paro producción, Centro de trabajo, Evento

4.2. Pruebas de Bondad de Ajuste y Distribuciones de Manufactura

En la consolidación de las pruebas de bondad de ajuste surgieron varios obstáculos. Aunque las bases de datos contenían información correspondiente a todo un año, no se disponía de suficientes datos para calcular de manera confiable las distribuciones de los productos que se querían modelar. Por esta razón, fue necesario limitar el modelo a un solo producto, seleccionando la referencia con mayor cantidad de registros, la cual constaba de solo 20 entradas. Esto imposibilitó la selección de otros productos, ya que las demás referencias en la base de datos contaban con un soporte de datos aún menor.

Para modelar la distribución del tiempo entre llegadas, se creó una distribución empírica debido a la limitada cantidad de datos disponibles para el producto seleccionado. La figura 1 muestra los resultados de este análisis no paramétrico. Al procesar los registros en STATFIT, el software arrojó un p -valor que valida la hipótesis de que los datos siguen una distribución exponencial con media 2880min. En consecuencia, en el modelo se implementaron ambas distribuciones: la exponencial para los tiempos de llegada, y en la sección de “Batching” se añadió la posibilidad de que en una llegada se generaran dos órdenes simultáneamente, ajustando así la frecuencia de llegadas.



Figura 1: Distribución empírica del tiempo entre llegadas.

De igual manera, para modelar los tiempos de reparación en la actividad “Preparar granel”, se utilizó STATFIT. El software sugirió que las distribuciones más adecuadas eran la Pearson 6, Weibull y la distribución lognormal. Se optó por emplear la distribución lognormal debido a su simplicidad de interpretación. La figura 2 presenta los resultados generados por STATFIT, que corresponden a los tiempos de reparación.

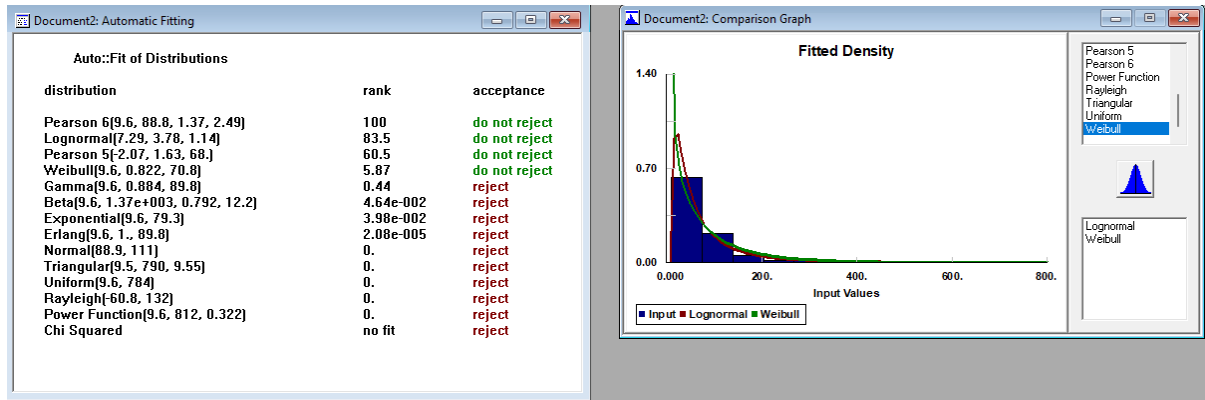


Figura 2: Distribución de los tiempos de reparación.

El mismo procedimiento se repitió para los tiempos entre fallos en la actividad “Preparar granel”, donde la distribución que mejor se ajustaba fue una exponencial con media de 100min. La Tabla 4 presenta el resumen de las variables aleatorias y distribuciones validadas para el área de manufactura, incluyendo sus medias y desviaciones estándar.

Tabla 4: Resumen de variables aleatorias para el área de manufactura. **revisar esto**

Actividad	V.A.	Distribución	Media y Desviación Estándar
Tiempo entre llegadas	X_1	$X_1 \sim \text{Exp}(\lambda = 2880)$	$\mu = 2880, \sigma = 2880$
Tiempos de reparación	X_2	$X_2 \sim \text{Lognormal}(7,29,3,78,1,14)$	$\mu = 7,29, \sigma = 3,78$
Tiempo entre fallos	X_3	$X_3 \sim \text{Exp}(\lambda = 100)$	$\mu = 100, \sigma = 100$

4.3. Distribuciones de Envasado

El modelo desarrollado en este artículo abarca tanto el área de manufactura (proceso de cocción y almacenamiento en tanques fijos) como el área de envasado, tratada en esta sección. Inicialmente, aunque las líneas de envasado pueden ser automáticas (llamadas también semiautomáticas) o manuales, el proceso que siguen es esencialmente el mismo: llenado (inyección), colocación de la tapa, torque de la tapa, verificación del torque, adición de la etiqueta y empaquetado en cajas (*boxing*).

Cada una de estas actividades en el modelo de simulación de eventos discretos tiene una variable aleatoria asociada que modela su duración. En esta subsección, se presenta la recopilación de datos y el razonamiento que condujo a las distribuciones utilizadas en el modelo (se detalla el caso de las

líneas automáticas, aunque el análisis es aplicable también a las manuales).

Inicialmente, el equipo de trabajo visitó las instalaciones de Prebel y observó el proceso de envasado, cronometrando en segundos el tiempo aproximado que demora cada uno de los pasos mencionados. Las medias de 20 cronometradas se presentan en las primeras dos columnas de la Tabla 5.

Tabla 5: Tiempos promedio y proporciones de cada actividad en el proceso de envasado automático.

Actividad (por botella)	Tiempo (s)	Proporción
Llenado (automático)	3.3	26.4 %
Colocación de la tapa	1.2	9.6 %
Torque	0.7	5.6 %
Revisión del torque	1.2	9.6 %
Etiquetado (automático)	3.1	24.8 %
<i>Boxing</i>	3.0	24.0 %
Total	12.5	100 %

Esto permite calcular las proporciones del tiempo que cada botella pasa en cada actividad. Por ejemplo, dado que una botella está en una línea de envasado automática, el 26.4% del tiempo estará en el proceso de llenado ($26,4\% = 3,3s/12,5s$). Estos valores se muestran en la tercera columna de la Tabla 5. Sin embargo, no se requieren las duraciones exactas de cada actividad por botella, sino que es crucial encontrar distribuciones para estas actividades en lotes de 250 botellas, ya que el modelo se ejecuta en estos bloques para reducir el costo computacional, por lo que se realizó un análisis adicional.

Los directivos de Prebel consultados informaron al equipo que el tiempo total que se tarda en envasar un lote de 6 toneladas de granel en una línea automática (sin descansos) es de aproximadamente dos turnos (16 horas). Esto se corroboró con las bases de datos, obteniendo que el tiempo medio de este proceso es de $15,40h = 924min$. Por lo tanto, el tiempo total para envasar uno de los dieciocho lotes de 250 botellas es aproximadamente $924min/18 = 51,33min$.

Con este dato y las proporciones calculadas en la tabla 5, se multiplicó cada proporción por el tiempo total de uno de los lotes para aproximar el tiempo que tarda cada actividad en un lote. Por ejemplo, el tiempo de llenado de un lote es $0,264 \cdot 51,33min = 13,55min$.

Para convertir estas aproximaciones en variables aleatorias que modelen las actividades, se asumió que el proceso de manufactura es repetitivo y no se presenta fatiga en actividades menores a media hora. Las aproximaciones serán la media de las variables aleatorias, que se modelarán como distribuciones normales con una desviación estándar del 10% de la media para las actividades realizadas por máquinas, y una desviación mayor para las actividades realizadas por el personal.

Repitiendo este proceso para las diferentes actividades de la cadena de envasado, se obtuvo la Tabla 6 con las distribuciones para las actividades de envasado en la línea automática.

Tabla 6: Distribuciones para las actividades de envasado automático.

Actividad	Distribución	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)
Llenado (automático)	Normal	13.56	1.36
Colocación de la tapa	Normal	4.92	2.00
Torque	Normal	2.88	0.29
Revisión del torque	Normal	13.54	3.00
Etiquetado (automático)	Normal	12.72	1.28
<i>Boxing</i>	Normal	12.34	5.00

Las distribuciones para las líneas manuales se determinaron de manera similar y también se incluyen en el modelo.

5. IMPLEMENTACIÓN EN SIMUL8

5.1. Descripción del Modelo

Como se mencionó previamente, para modelar esta problemática se utilizó el software SIMUL8. En la Figura 3 se presenta una vista general del modelo, mostrando las actividades, colas, recursos, y el flujo de llegada y salida de órdenes.

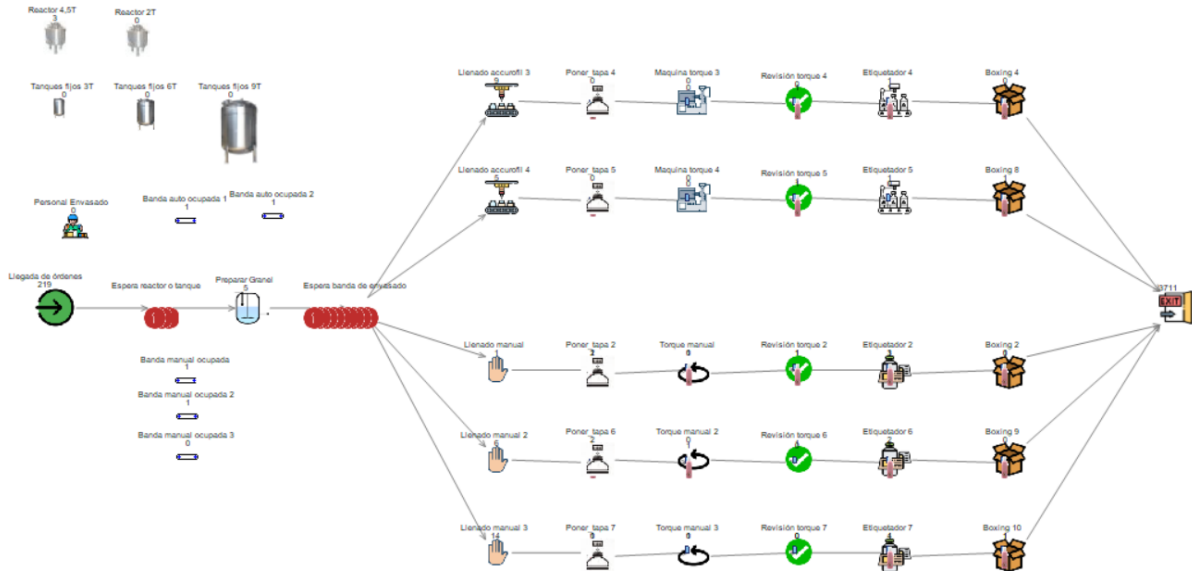


Figura 3: Modelo implementado en SIMUL8.

El modelo cuenta con cuatro grupos principales de recursos. El primer grupo lo conforman los reactores, que representan las marmitas donde se prepara el producto ordenado. Este grupo incluye seis marmitas con una capacidad de 4.5 toneladas y diez marmitas de 2 toneladas. El segundo grupo corresponde a los tanques fijos, que son donde se deposita el producto una vez procesado. Estos tanques tienen tres capacidades: 3, 6 y 9 toneladas. El tercer grupo representa el personal de envasado, cuyo número varía según el turno: 13 personas en el primer y segundo turno, y 5 personas en el tercer turno. Finalmente, el cuarto grupo incluye recursos ficticios que garantizan que una nueva orden no avance a la línea de envasado mientras se está procesando una orden anterior.

Las actividades del modelo se dividen en once tipos. La primera actividad es la preparación del producto en los reactores. Las demás están relacionadas con el área de envasado, donde se cuenta con líneas manuales y semiautomáticas. Aunque hay algunas diferencias entre ellas, en general, ambas líneas incluyen actividades para el llenado, colocación de la tapa, aplicación de torque, verificación de torque, etiquetado y empaquetado.

Por otro lado, el modelo incluye dos colas principales: una para la espera de reactores o tanques y otra para la espera de las bandas de envasado. Estas colas son clave en el análisis, ya que intervienen directamente en los retrasos para cumplir con las órdenes. Finalmente, el modelo también contempla los puntos de entrada y salida de las órdenes.

5.2. Descripción del Funcionamiento

En el modelo, las llegadas de órdenes se generan automáticamente. Cuando una orden llega, se le asignan diversos atributos, como la imagen y el tipo de orden. Además, se le asigna la distribución estimada que utilizará en cada una de las actividades posteriores. Este proceso se gestiona a través de Visual Logic, como se muestra en la Figura 4.

```

Llegada de órdenes Entry Logic
-- SET R1 = RANDOM[0]
-- SET At_Producto_ = 1
-- Set Work Item Image Icon_1
-- SET At_dist_llenado_auto_____ = llenado_accurofill_prod1
-- SET At_dist_llenado_manual_____ = llenado_manual_prod1
-- SET At_dist_poner_tapa___ = ponertapa_1
-- SET At_dist_torque_auto_____ = torque_auto_1
-- SET At_dist_torque_manual_ = torque_manual_1
-- SET At_dist_rev_torque_ = revisar_toque_1
-- SET At_dist_et_manual_____ = etiquetado_manual_1
-- SET At_dist_etiq_auto_____ = etiquetador_auto_1
-- SET at_dist_box_____ = boxing_1
    
```

Figura 4: Código en Visual Logic para la llegada de órdenes.

Es importante destacar que el modelo asume que todas las órdenes son de 6 toneladas. Una vez que la orden llega, debe esperar a que haya reactores y tanques fijos disponibles con la capacidad adecuada para procesar el producto. Después de finalizar el proceso de manufactura, la orden pasa a la espera de una línea de envasado disponible, momento en el cual libera los reactores utilizados. Sin embargo, los tanques fijos no se liberan hasta que el producto ha completado todo el proceso de envasado. Para garantizar que las órdenes se procesen correctamente, se emplea un recurso ficticio que impide que una nueva orden entre en la línea de envasado mientras se está procesando la orden actual. Este mecanismo se puede observar en la Figura 5.

```

Espera reactor o tanque On Exit Logic
Obeeyed just after a work item exits the queue but before it begins travelling to the next object
IF Tanques fijos 3T.Current Available >= 2
-- Set Resource Requirement Type Preparar Granel , Tanques fijos 3T , Hold Only
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 3T , 2 , 2
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 6T , 0 , 0
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 9T , 0 , 0
ELSE IF Tanques fijos 6T.Current Available >= 1
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 3T , 0 , 0
-- Set Resource Requirement Type Preparar Granel , Tanques fijos 6T , Hold Only
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 6T , 1 , 1
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 9T , 0 , 0
ELSE IF Tanques fijos 9T.Current Available >= 1
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 3T , 0 , 0
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 6T , 0 , 0
-- Set Resource Requirement Type Preparar Granel , Tanques fijos 9T , Hold Only
-- Set Resources Required Preparar Granel , Tanques fijos 9T , 1 , 1
Obeeyed just after a work item exits the queue but before it begins travelling to the next object
IF Reactor 2T.Current Available >= 3
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 2T , 3 , 3
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 4,5T , 0 , 0
ELSE IF [Reactor 2T.Current Available >= 1] & [Reactor 4,5T.Current Available >= 1] = 1
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 4,5T , 1 , 1
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 2T , 1 , 1
ELSE IF Reactor 4,5T.Current Available >= 2
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 2T , 0 , 0
-- Set Resources Required Preparar Granel , Reactor 4,5T , 2 , 2
    
```

Figura 5: Código en Visual Logic para la espera de disponibilidad de un tanque y un reactor.

Los tanques fijos se liberan una vez que la orden ha completado el proceso de envasado y empaquetado. El código que gestiona la liberación de los tanques al finalizar el proceso de envasado se muestra en la Figura 6.

```
New Code2
-- Set Work Item Image    Box_small
-- Get Held Resource Count    num_9 , Tanques fijos 9T
-- Get Held Resource Count    num_6 , Tanques fijos 6T
-- Get Held Resource Count    num_3 , Tanques fijos 3T
-- Get Result    cajas_auto , Current Run , Boxing 4: Number Completed Jobs
IF At_Q = 1
  IF Tanques fijos 9T.Current Available < 10
    IF cajas_auto > 17+cajas_auto
      Resources Release    Tanques fijos 9T , num_9
      Resources Release    Tanques fijos 3T , num_3
      Resources Release    Banda auto ocupada 2 , 1
    ELSE
      IF Tanques fijos 6T.Current Available < 3
        IF Tanques fijos 3T.Current Available < 4
          IF cajas_auto > 17+cajas_auto
            Resources Release    Tanques fijos 6T , num_6
            Resources Release    Tanques fijos 3T , num_3
            Resources Release    Banda auto ocupada 2 , 1
          ELSE
            IF Tanques fijos 3T.Current Available < 4
              IF cajas_auto > 17+cajas_auto
                Resources Release    Tanques fijos 3T , num_3
                Resources Release    Tanques fijos 3T , num_3
                Resources Release    Banda auto ocupada 2 , 1
              ELSE
                IF Tanques fijos 6T.Current Available < 3
                  IF cajas_auto > 17+cajas_auto
                    Resources Release    Tanques fijos 6T , num_6
                    Resources Release    Banda auto ocupada 2 , 1
                  ELSE
                    IF Tanques fijos 3T.Current Available < 4
                      IF cajas_auto > 17+cajas_auto
                        Resources Release    Tanques fijos 3T , num_3
                        Resources Release    Banda auto ocupada 2 , 1
```

Figura 6: Código para liberar tanques fijos al finalizar el proceso de envasado.

El modelo también incorpora los turnos del personal de envasado, que están organizados en tres turnos. El primer turno va de 6:00 am a 2:00 pm y cuenta con 13 personas; el segundo turno es de 2:00 pm a 10:00 pm y también cuenta con 13 personas; y el tercer turno es de 10:00 pm a 6:00 am, con 5 personas asignadas. Los turnos del personal se ilustran en la Figura 7.

The image shows two overlapping dialog boxes. The top one is 'Resource Properties' with the 'Visual Logic' tab selected. It contains a text field with 'Personal Envasado', a 'Number of this type of resource available' field with '13', and a checked 'Shift Dependent' checkbox. The bottom dialog is 'Shift Availability', showing a list of shifts: '13 Day Shift', '13 Evening Shift', and '5 Dawn Shift'. The 'Day Shift' is selected. Both dialogs have 'OK', 'Close', 'Help', and 'Memo' buttons.

Figura 7: Turnos del personal de envasado.

6. RESULTADOS

6.1. Cálculo del Número de Corridas.

Para el análisis de resultados, en SIMUL8 se calculó el número de corridas necesarias para obtener una mayor precisión en los tiempos de espera en cola. El resultado de este cálculo se muestra en la Figura 8. Sin embargo, como la duración de una corrida es de alrededor de 10 segundos, se decidió realizar el análisis con 25 corridas.

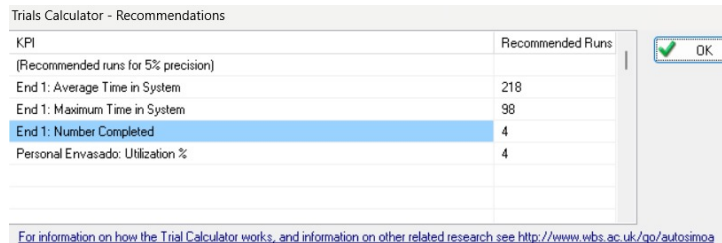


Figura 8: Cantidad de corridas necesarias para lograr mayor precisión.

6.2. Resultados Crudos e Intervalos de Confianza.

Después de correr el modelo 25 veces, con un tiempo de simulación de 2 meses en cada intento, se obtuvieron las medias y los intervalos de confianza presentados en la Figura 9. Como observación, todos los tiempos vienen reportados en minutos.

standard-trials		Low 95% Range	Average Result	High 95% Range	Risk
End 1	Average Time in System	1102.62	1320.74	1538.87	
	Maximum Time in System	3184.28	3548.10	3911.93	
Reactor 4,5T	Utilization %	46.30	48.34	50.38	
Reactor 2T	Utilization %	59.81	61.18	62.55	
Tanques fijos 3T	Utilization %	76.98	79.52	82.07	
Tanques fijos 6T	Utilization %	72.42	75.89	79.36	
Tanques fijos 9T	Utilization %	44.38	52.15	59.92	
Preparar Granel	Number Completed Jobs	218.92	223.88	228.84	
Personal Envasado	Utilization %	93.09	94.76	96.42	
Banda auto ocupada 1	Utilization %	53.38	60.76	68.15	
Banda auto ocupada 2	Utilization %	51.62	58.50	65.37	
Banda manual ocupada	Utilization %	35.30	41.77	48.25	
Banda manual ocupada 2	Utilization %	36.63	41.76	46.89	
Banda manual ocupada 3	Utilization %	34.45	40.59	46.74	
Espera banda de envasado	Average Queuing Time	200.10	252.95	305.81	
Espera reactor o tanque	Average Queuing Time	236.71	409.43	582.15	

Figura 9: Intervalos de confianza obtenidos con SIMUL8.

Los resultados muestran una alta tasa de ocupación en los tanques y el personal de envasado, a pesar de que solo se está modelando un producto. Además, se observa que el tiempo máximo que un orden pasa en el sistema es de casi 3 días, mientras que el tiempo promedio es cercano a un día. El histograma de la espera en la línea de envasado se puede ver en la Figura 10.

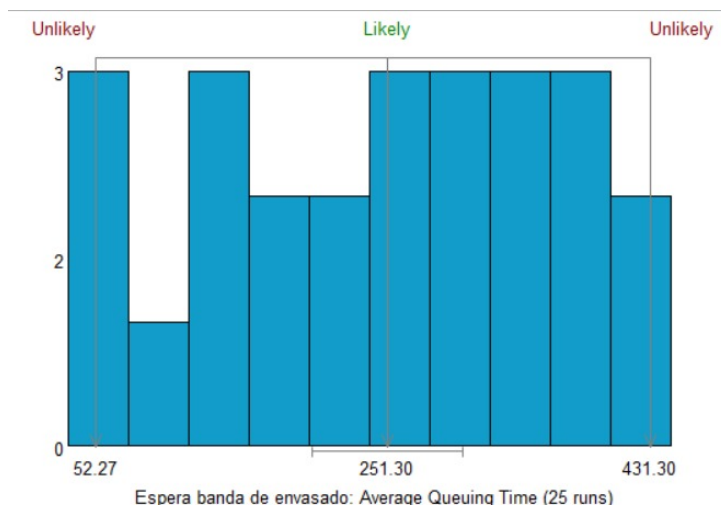


Figura 10: Histograma de la espera en la línea de envasado.

Es importante destacar que, aunque inicialmente se podría pensar que los principales responsables de los retrasos en las órdenes se encuentran en el área de manufactura, el análisis revela que el problema principal se concentra en el área de envasado. Esto ocurre porque la línea de envasado retiene muchos de los tanques fijos necesarios para que el área de manufactura pueda procesar nuevas órdenes. Además, al profundizar en el análisis, se observó que el horario de alimentación del personal podría estar contribuyendo a los retrasos, ya que todos los empleados salen a comer al mismo tiempo. Se sospecha que, si se reorganiza este horario, se podría reducir significativamente las filas.

Las filas han provocado retrasos de hasta más de diez horas. No obstante, la principal fila que se quería analizar en este experimento es la correspondiente a la espera de una línea de envasado, cuyo histograma se puede observar nuevamente en la Figura 10.

7. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

La verificación del modelo se realizó mediante el análisis del comportamiento de las entidades en cada etapa del tiempo, prestando especial atención a la línea de envasado. Era fundamental verificar que, al ingresar una orden en la etapa de llenado, salieran 18 entidades (subconjuntos de 250 botellas) de esta. También se verificó que la asignación de tanques y reactores fuera coherente con el tamaño de la orden. En ningún caso se observó que el modelo seleccionara una combinación de reactores y tanques con capacidad menor a 6 toneladas. Finalmente, se comprobó que los recursos se liberaran correctamente al finalizar cada proceso. Por lo tanto, se concluye que el modelo está funcionando correctamente y se puede proceder con la validación.

La validación del modelo es un paso crucial para asegurar que los resultados sean precisos y reflejen fielmente la realidad en Prebel. Dado que no se contaba con suficientes datos históricos para una comparación directa, se optó por consultar a algunos empleados de Prebel sobre la coherencia de los resultados obtenidos. Según estos empleados, la producción mensual del producto modelado es de aproximadamente 370.000 botellas, mientras que el modelo arrojó una producción de 417.000 botellas, lo que equivale a 1688 lotes de 250 unidades. Este resultado sugiere un comportamiento similar al real.

Por otro lado, los tiempos de espera en cola de reactores o tanques fueron estimados por Prebel en retrasos de hasta 2 días, mientras que el modelo mostró un tiempo de espera promedio de 20 horas. Una posible explicación para esta diferencia radica en las simplificaciones realizadas durante la construcción del modelo. En general, se puede concluir que el modelo es confiable para reproducir el comportamiento del sistema real.

8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para el análisis de sensibilidad, se seleccionaron las distribuciones correspondientes a las líneas de envasado, ya que estas presentaban la menor cantidad de datos. El objetivo era evaluar la susceptibilidad del modelo ante posibles desviaciones de estas distribuciones con respecto a la realidad. Los resultados de este análisis se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7: Análisis de sensibilidad para las distribuciones de las líneas de envasado.

Variable de salida	Espera reactor y tanque (h)	Espera envasado (h)
Límite inferior IC	236.78	265.65
Valor promedio IC	413.22	313.42
Límite superior IC	589.66	361.21
Llenado automático: -10%	411.77	317.02
10 %	408.40	316.90
Sensibilidad	0.0096	0.0013
Fuera del IC	0	0
Llenado manual: -10%	411.28	416.22
10 %	416.22	321.54
Sensibilidad	0.014	0.084
Fuera del IC	0	0
Preparar producto: -10%	383.07	331.31
10 %	475.89	284.01
Sensibilidad	0.26	0.49
Fuera del IC	0	0
Torque automático: -10%	413.22	313.43
10 %	413.22	313.43
Sensibilidad	0	0
Fuera del IC	0	0
Torque manual: -10%	406.03	303.79
10 %	430.54	310.87
Sensibilidad	0.070	0.074
Fuera del IC	0	0
Revisar torque: -10%	316.76	282.08
10 %	520.27	339.55
Sensibilidad	0.58	0.60
Fuera del IC	0	0
Etiquetador automático: -10%	420.59	310.88
10 %	412.80	308.04
Sensibilidad	0.022	0.029
Fuera del IC	0	0
Etiquetador manual: -10%	309.12	278.92
10 %	530.29	338.36
Sensibilidad	0.63	0.62
Fuera del IC	0	0

Los resultados muestran que, en general, las distribuciones no son altamente sensibles. Todas presentan bajas tasas de sensibilidad y se encuentran dentro del intervalo de confianza. Las distribuciones más sensibles fueron la revisión de torque y el etiquetador manual; sin embargo, ambas permanecen dentro de los resultados esperados.

9. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La experimentación en simulación de eventos discretos se refiere a modificar parámetros o cantidades del modelo para observar los cambios en los indicadores o métricas de salida. A continuación, se presenta una breve discusión sobre el período de calentamiento del modelo y una experimentación enfocada.

9.1. Determinación del Período de Calentamiento

El período de calentamiento tiene como objetivo suavizar las salidas de la simulación y graficar la serie resultante, lo que permite observar el comportamiento de los datos a lo largo del tiempo. Se sugiere trabajar a partir del punto en que los datos se vuelven estacionarios para mejorar la exactitud del modelo.

Para calcular este intervalo de tiempo, se utilizó el método de Welch con cinco corridas, apoyándose en SIMUL8 y Excel. La Figura 11 muestra la gráfica obtenida.

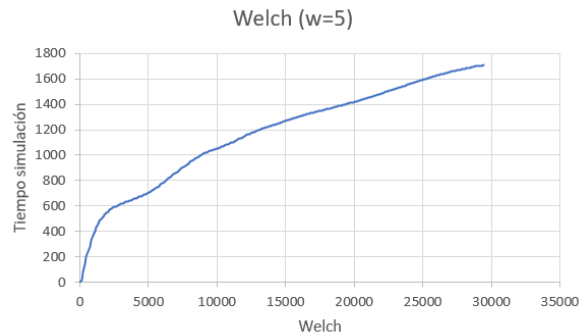


Figura 11: Período de calentamiento.

Como se puede observar, la gráfica no parece mostrar un comportamiento estacionario durante los tres meses simulados. Esta situación pudo deberse a que no se modeló un período de tiempo lo suficientemente largo. Sin embargo, también podría deberse a la limitada cantidad de información utilizada para construir las distribuciones, lo que impidió que el modelo se estabilizara. Además, los supuestos y simplificaciones realizados en el modelo podrían haber afectado el análisis de los resultados.

9.2. Experimentación enfocada

Hasta ahora, no se han presentado resultados concretos sobre indicadores de desempeño relevantes para Prebel. La compañía está interesada en realizar experimentaciones enfocadas, es decir, modificar parámetros particulares para evaluar si ciertas estrategias relacionadas con el personal o el inventario podrían reducir los tiempos en cola y en el sistema, aumentando la producción.

Las propuestas de mejoramiento evaluadas por Prebel son las siguientes:

- Aumentar la cantidad de tanques fijos.
- Aumentar el número de personal de envasado disponible durante el turno de la noche.

Además, el equipo de trabajo propone reducir los tiempos de descanso, que actualmente son de aproximadamente 100 minutos, manteniendo su frecuencia (cada cuatro horas). En la Tabla 8, se presentan los cuatro experimentos realizados y los resultados obtenidos para las métricas más importantes del análisis.

Métricas	Usual	+2 Tanques 3T	+3 en turno de noche	Break de 60 min
t_{sis} (h)	2688 (44 horas)	2693	2688	1806
$t_{\text{fila reactor}}$ (h)	1492	1436	1503	764
$t_{\text{fila envasado}}$ (h)	577	650	571	379
%oc tanque 3T	84 %	86 %	85 %	83 %
%oc tanque 6T	82 %	84 %	85 %	79 %
%oc tanque 9T	69 %	71 %	71 %	61 %
Unds (x 250)	3309	3304	3310	3704

Tabla 8: Resultados de diferentes configuraciones y métricas en el sistema de producción.

El primer experimento, titulado "usual", consiste en ejecutar el modelo con las cantidades previamente definidas en este documento. Se generaron un total de $3309 \cdot 250 = 827,250$ botellas en los dos

meses considerados.

El segundo experimento consiste en añadir dos tanques fijos de tres toneladas a los recursos disponibles (suficientes para almacenar una orden adicional). Los resultados muestran que este cambio no mejora significativamente ningún indicador de desempeño, lo cual indica que aumentar la capacidad de los tanques fijos no es una estrategia eficaz para mejorar la producción.

El tercer experimento añade tres operarios adicionales para el turno de la noche, lo que permite activar una nueva línea de envasado automática. Sin embargo, los resultados indican que este cambio tampoco mejora significativamente los indicadores, lo que sugiere que esta estrategia no es la más eficiente para utilizar los recursos.

Finalmente, la última estrategia, que reduce los descansos a 60 minutos en lugar de 100, tiene un efecto inmediato en todas las métricas de interés para Prebel. Solo con este cambio, la producción aumentaría en más de 98,000 botellas al mes.

En conclusión, este análisis refleja la importancia de los métodos de simulación para evaluar el desempeño y las estrategias de mejora en cualquier proceso. Aunque Prebel inicialmente consideraba otras alternativas como más lógicas, los resultados muestran que la compañía ya cuenta con los recursos necesarios para aumentar su productividad en más de un 10%.

10. CONCLUSIONES

La implementación del modelo de simulación proporciona una visión general de la compleja dinámica del área de gran volumen en PREBEL, aunque está sujeta a varios supuestos. Una de las limitaciones más destacadas es la falta de representación de otros productos en el área de gran volumen, lo que podría afectar la precisión de los resultados. Otra gran limitación se centra en la poca cantidad de datos que se tenía para aproximar las distribuciones. Por lo que el hecho de incrementar la información que se le ingresa a las pruebas de bondad de ajuste también podría contribuir a un mejor desarrollo de la idea.

Además, en empresas de esta envergadura, la cantidad de empleados por línea tiende a ser dinámica y no estática, lo que no se refleja en el modelo. Para abordar estas limitaciones y mejorar la validez del estudio, se recomienda seguir buenas prácticas en la recolección y disposición de datos, lo que permitirá una mejor comprensión y análisis de la problemática estudiada. En futuras investigaciones, se propone ampliar el modelo para incorporar otras áreas de la producción, como el envasado de bajo volumen y la fabricación de colonias, además de considerar la gestión de pedidos prioritarios, los tiempos de lavado y los fallos potenciales de las máquinas, lo que proporcionaría una representación más completa y precisa del proceso productivo de la empresa.

REFERENCIAS

- Bartkowiak, T., and P. Pawlewski. 2016. "Reducing negative impact of machine failures on performance of filling and packaging production line—A simulative study". In *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2912–2923.
- Belew, R. K. 2019. *Data Acquisition: A Complete Guide*.
- Díez, M. 2006. "Análisis y mejoramiento de procesos en la industria cosmética. Caso práctico: Prebel S.A". <https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/7a33dad9-9a27-43c2-9f59-b98ab0d612d8/content>, Accedido: 08-Oct-2024.
- Omogbai, O., and K. Salonitis. 2016. "Manufacturing System Lean Improvement Design Using Discrete Event Simulation". *Procedia CIRP* 57:195–200.
- Prebel 2024. "Prebel - Industria de Belleza y Cuidado Personal en Colombia". <https://www.prebel.com/>, Accedido: 08-Oct-2024.
- SIMUL8 Corporation 2024. "SIMUL8 - Student Edition for Educational Use". <https://www.simul8.com/education/student>, Accedido: 08-Oct-2024.