DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 275-283

Propuesta para reducción de fallas de máquinas en una fábrica de papel corrugado mediante simulación
Proposal to reduce machine failures in a corrugated paper factory using simulation

B. Waldo-González [a], J. Medina-Marín [a, *], J. C. Seck-Tuoh-Mora [a], N. Hernández-Romero [a], M. G. Serna-Díaz [b]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Escuela Preparatoria Número Uno, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo en máquinas industriales es clave para mejorar la confiabilidad operativa y reducir costos en entornos industriales. En este trabajo se lleva a cabo un análisis de las fallas en los equipos de una fábrica de papel corrugado, tomando en cuenta datos históricos de fallas en sus máquinas flexográficas y la impresora digital. Se cuenta con un total de 495 registros de fallas registradas en la planta, durante un periodo de cuatro meses. A partir de estos datos se hizo un ajuste para obtener las funciones de densidad de distribución para calcular el momento de ocurrencia de las fallas, así como el tiempo utilizado en su reparación. El ajuste de las funciones fue realizado en el software Statfit®. Se realizó un diagrama Ishikawa para detectar las posibles causas que generan la alta ocurrencia de fallas en las máquinas, generando atrasos en el cumplimiento de los pedidos. Se utilizó el software de simulación ProModel® para desarrollar los modelos y analizar diversos escenarios sobre las estrategias de mejora que permitan reducir la ocurrencia de fallas en la línea de producción. Mediante este estudio, se identificó que la estrategia con mayor impacto positivo para reducir fallas es la capacitación del personal operativo de la línea de producción, lo cual genera un incremento del 2.51% en la producción, y si se aplican todas las propuestas de mejora, generarían un incremento del 4.25% en la producción de la fábrica.

Palabras Clave: Simulación de eventos discretos, mantenimiento industrial, fallas de maquinaria, ProModel®, productividad.

Abstract

Corrective, preventive, and predictive maintenance of industrial machinery is key to improving operational reliability and reducing costs in industrial settings. This study analyzes equipment failures at a corrugated paper mill, considering historical failure data from its flexographic printing presses and digital printer. A total of 495 failure records gathered during four months are available. Based on this data, distribution density functions were fitted to determine the occurrence of failures and the time required for their repair. The function fitting was performed using the Statfit® software. An Ishikawa diagram was created to identify the possible causes of the high incidence of machine failures, which were leading to delays in fulfilling orders. ProModel® simulation software was used to develop the models and analyze the scenarios executed with the strategies with better positive impact aimed at reducing the incidence of failures on the production line. This study found that the strategy with the greatest positive impact on reducing failures is training production line operators, which results in a 2.51% increase in production rate; if all proposed improvements were implemented, they would lead to a 4.25% increase in factory production.

Keywords: Discrete event simulation, industrial maintenance, machinery failures, ProModel®, productivity.

1. Introducción

La transformación digital y la utilización de programas de simulación asociados a la industria 4.0 han modificado profundamente los modelos convencionales de operación y

*Autor para la correspondencia: jmedina@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: brayanwaldo300@gmail.com (Brayan Waldo-González), jmedina@uaeh.edu.mx (Joselito Medina-Marín), jseck@uaeh.edu.mx (Juan Carlos Seck-Tuoh-Mora), nhromero@uaeh.edu.mx (Norberto Hernández-Romero), maria_serna10342@uaeh.edu.mx (María Guadalupe Serna-Díaz).

Historial del manuscrito: recibido el 29/06/2026, última versión revisada recibida el 28/08/2026, aceptado el 18/09/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18247

mantenimiento en los diferentes sistemas industriales , dado que, la incorporación de sensores, sistemas cibernéticos y plataformas de análisis de datos entre otras herramientas inteligentes de análisis y presentación de datos ha permitido que las organizaciones y múltiples fábricas ocupen estrategias basadas en diferentes software para observar y analizar con mayor detalle los diferentes datos, ya que dentro de estas estrategias, el mantenimiento predictivo se ha posicionado como una de las aplicaciones más relevantes dentro de la industria debido a su capacidad para anticipar fallas antes de que estas se materialicen en eventos críticos que comprometan la continuidad operativa.

Tradicionalmente, el mantenimiento industrial se ha estructurado en tres enfoques principales: correctivo, preventivo y predictivo. La principal fortaleza del mantenimiento correctivo radica en su simplicidad y bajo costo inicial, características que lo hacen muy accesible para todo tipo de organizaciones. Esto permite optimizar los recursos económicos, evitando gastos constantes en revisiones o intervenciones que muchas veces resultan innecesarias.

Además, cumple una función esencial como fuente de información y mejora continua. Cada reparación realizada entrega datos precisos sobre cómo fallan los componentes, cuáles son las causas más frecuentes de averías, cuánto duran realmente las piezas y cuáles son los puntos débiles de las instalaciones. En este sentido, el mantenimiento correctivo es el punto de partida para aprender, planificar y evolucionar hacia sistemas más avanzados de gestión (Moubray, 2011).

Sin embargo, a pesar de los avances generales en simulación y mantenimiento predictivo, existe una brecha de investigación respecto a la falta de modelos para el diagnóstico y atención de fallas recurrentes en máquinas flexográficas dentro de la industria de papel corrugado. Aunque la literatura aborda la simulación industrial en escenarios adversos, se carece de esquemas adaptados a los distintos paros críticos propios del proceso de impresión y troquelado flexográfico.

Por lo cual, la hipótesis central que orienta esta investigación sostiene que la integración del software ProModel® enfocado en las diferentes condiciones de máquinas flexográficas y la implementación conjunta de acciones de capacitación, calibración, inspección y mantenimiento reduce la frecuencia simulada de fallas y aumenta la tasa de producción respecto del escenario operativo actual en fábricas de papel corrugado. Por lo cual, este trabajo tiene como objetivo analizar el efecto de distintas estrategias de reducción de fallas en la tasa de producción de una fábrica de papel corrugado, mediante un modelo de simulación de eventos discretos.

Estado del arte

El mantenimiento, con el paso del tiempo, ha dejado de ser una función auxiliar dentro de las líneas de producción para convertirse en un eje estratégico de las organizaciones. Su impacto trasciende los aspectos técnicos, ya que influye directamente en la competitividad de las fábricas, la satisfacción del cliente y la sostenibilidad del negocio. Por ello, resulta importante implementar estrategias de mantenimiento de acuerdo con las características y necesidades de cada sistema productivo.

Dentro de este campo, la disponibilidad de los equipos determina directamente la productividad. Ab-Samat y Muhammad (2025) explican que la simulación permite evaluar y comparar estrategias de mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y centrado en la confiabilidad. Estos modelos consideran variables como la vida útil de los activos, probabilidad de fallas, tiempos de reparación, disponibilidad de repuestos y asignación del personal técnico. Vaca (2025) destaca que la simulación también permite integrar la gestión del mantenimiento con la planificación de la producción, equilibrando la disponibilidad de las máquinas y el cumplimiento de los plazos de entrega.

Supsomboon y Hongthanapach (2014) combinaron la metodología RCM con simulación de eventos discretos en una fábrica de semiconductores, donde una máquina de prueba presentaba defectos por desgaste de sus componentes. La identificación de fallas, el análisis de datos históricos, la optimización de intervalos y la validación del modelo permitieron reducir los defectos, mejorar la calidad y generar ahorros económicos.

Vásquez (2024) empleó ProModel® para analizar una planta de colchones con problemas de desequilibrio entre estaciones, tiempos no estandarizados y cuellos de botella. La simulación de diferentes escenarios permitió incrementar la producción, equilibrar la línea y optimizar los recursos.

En un taller de vehículos, García (2024) utilizó R y la librería Simmer para analizar el flujo de trabajo, los tiempos variables y el uso del personal. El modelo permitió obtener mayor visibilidad del sistema, dimensionar el equipo y reducir los tiempos de respuesta.

Por su parte, Vásquez (2024) integró ingeniería de métodos, Lean Manufacturing y ProModel® en otra planta de colchones. El análisis de los flujos y la eliminación de actividades sin valor permitieron aumentar el rendimiento, reducir costos y establecer procedimientos estandarizados.

En el ámbito de la distribución, Nazate (2024) aplicó modelos matemáticos de enrutamiento y simulación en SIMUL8 para analizar una fábrica de empaques con rutas extensas y gastos elevados. La comparación de alternativas permitió disminuir costos, mejorar el servicio y aprovechar mejor la flota.

López-Sánchez et al. (2019) desarrollaron un simulador en C# y R para una línea de ensamblaje que presentaba paradas por falta de contenedores. La evaluación de diferentes volúmenes permitió determinar la cantidad adecuada, eliminar detenciones y cumplir con la demanda.

En una planta de pulpa de fruta, Chango (2022) combinó pronósticos, programación lineal y SIMUL8 para atender problemas de planificación y costos. Los resultados mostraron una reducción de costos, mayor capacidad y mejor equilibrio operativo.

Saavedra (2025) integró simulación, gemelos digitales e inteligencia artificial para mejorar la toma de decisiones en sistemas de manufactura flexible. La conexión de datos en tiempo real permitió reducir desperdicios y mejorar la eficiencia.

Velázquez et al. (2024) integraron Lean Manufacturing, mapeo de flujo y simulación en Arena para atender cuellos de botella, tiempos sin valor y deficiencias de mantenimiento en la fabricación de cigüeñales. La propuesta permitió reducir tiempos, aumentar la producción y mejorar la calidad.

En el sector alimentario, Vicente (2024) combinó diseño de planta, Lean Manufacturing y simulación para optimizar la producción de chips de banano. La reorganización de maquinaria y eliminación de movimientos innecesarios favorecieron una mayor producción, un flujo continuo y viabilidad económica.
Finalmente, Cárdenas y Barahona (2024) diseñaron y simularon en Simulink un sistema automático para el mantenimiento de tuberías de presión de calderas industriales. El sistema permitió mantener una presión estable, reducir intervenciones correctivas y prolongar la vida útil de los equipos.
En la Tabla 1 se presentan los trabajos descritos previamente, organizados por eje temático.

Tabla 1. Clasificación de los trabajos relacionados con el presente estudio.

Año	Autor	Sector	Herra-mienta	Variables	Método de valida-ción	Resultados
2025	Ab-Samat y Muhammad	Industrial	Simulación de Monte Carlo, la simulación de eventos	Tipo de mantenimiento de equipo, fallas, tiempos de intervención		Permite comparar estrategias de mantenimiento correctivo, preventivo, predictivo y centrado en confiabilidad para seleccionar la más adecuada.
2025	Vaca	Industrial	Mantenimiento	Disponibilidad de máquinas, mantenimiento, cumplimiento de plazos		Integrar la gestión del mantenimiento con la planificación de la producción y equilibrar la disponibilidad de máquinas con los tiempos de entrega.
2014	Supsomboon y Hongthanapach	Industrial	RCM y Simulación de eventos discretos	Fallas, desgaste de componentes, defectos, intervalos de mantenimiento.	Validación del modelo de simulación	Reducción de defectos, mejora de la calidad y ahorro económico.
2024	Vásquez	Industrial	ProModel®	Producción, tiempo de proceso, estaciones de trabajo, cuellos de botella	Validación del modelo y prueba de escenarios	Incremento de la producción, equilibrio de la línea y optimización de recursos.
2024	García	Taller de veiculos	R y Librería Simmer	Flujo de trabajo, tiempo de reparación, personal, procesos de mantenimiento	Ajuste de datos estadísticos y evaluación de alternativas	Mayor visibilidad del sistema, dimensionamiento adecuado del personal y reducción de tiempos de respuesta.
2024	Vasquez	Industrial	ProModel®	Flujo de producción, desperdicio, actividades sin valor, operaciones, tiempos de espera	Simulación y comparación de escenarios	Mayor rendimiento, reducción de costos y estandarización de procedimientos.
2024	Nazate	Industrial	Modelos matemáticos y SIMUL8	Distancias, rutas, costos, tiempos	Comparación de escenarios	Disminución de costos, mejora del servicio y mejor aprovechamiento de la flota.
2019	Lopez-Sanchez	Industrial	C# Y R	Paradas, producción, demanda	Ajuste de datos estadísticos y prueba de diferentes volúmenes	Determinación de la cantidad óptima de contenedores, eliminación de paradas y cumplimiento de la demanda.
2022	Chongo	Industrial	SIMUL8	Demanda, recursos, costos, capacidad, flujo de producción	Simulación y comparación de escenarios	Reducción de costos, aumento de capacidad y mejor equilibrio operativo.
2025	Saavedra	Industrial	Simulación, gemelos digitales	Datos en tiempo real, decisiones, eficiencia	Entrenamiento de algoritmos y simulación	Mayor autonomía, reducción de desperdicios y aumento de la eficiencia.
2024	Velázquez	Industrial	Mapeo de flujo y arena	Cuellos de botella, tiempo, mantenimiento y producción	Simulación y comparación de escenarios	Reducción de tiempos, aumento de la producción y mejora de la calidad.
2024	Vicente	Industrial	Lean manufacturing y simulación	Distribución de maquinaria, producción, flujo, rentabilidad	Evaluación mediante simulación	Mayor producción, flujo continuo y viabilidad económica.
2024	Cárdenas y Borahona	Industrial	Simulink y controlador PID	Vida útil, desgaste, mantenimiento	Simulación del comportamiento del sistema y ajuste de parámetros	Presión estable, reducción de intervenciones correctivas, mayor vida útil y seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, los antecedentes muestran que la simulación es una herramienta útil para analizar fallas, mantenimiento, productividad, distribución y uso de recursos. Sin embargo, los estudios revisados no abordan de manera específica la relación entre los tipos de fallas recurrentes en máquinas flexográficas, las acciones de mejora y su efecto en la producción dentro de la industria de papel corrugado. Esta situación representa una oportunidad para analizar, mediante ProModel®, diferentes estrategias de mejora y su posible efecto sobre la frecuencia de fallas y la tasa de producción.
Los antecedentes muestran que la simulación permite analizar fallas, mantenimiento, productividad, al igual que el uso de recursos, además de comparar alternativas antes de implementarlas. Las herramientas más utilizadas son ProModel®, SIMUL8, Simulink y R, aplicadas en sectores como manufactura, alimentos, autopartes, empaques y semiconductores.
En materia de mantenimiento, los estudios de Ab-Samat y Muhammad (2025), Vaca (2025), Supsomboon y Hongthanapach (2014) evidencian que la simulación permite evaluar estrategias, analizar su efecto sobre las fallas y la disponibilidad de los equipos. Por otro lado, los trabajos de Vásquez (2024), García (2024), Nazate (2024), López-Sánchez et al. (2019) muestran su utilidad para mejorar productividad, distribución y flujo de producción.

Descripción del proceso bajo estudio

En el presente trabajo se analiza una fábrica dedicada a la fabricación de láminas de papel ondulado, así como a la elaboración y distribución de cajas de cartón para diversos clientes. Su proceso productivo incluye varios procesos que son de interés en este análisis. En primer lugar, se reciben y adquieren entre 130 y 150 bobinas de papel semikraft al mes, las cuales se almacenan en el almacén principal. Allí se clasifican según sus características de longitud y gramaje, para posteriormente ser trasladadas mediante montacargas hasta la máquina principal: la corrugadora. Esta máquina es esencial en el proceso, ya que en ella se unen entre 3 y 5 bobinas de papel (según los requisitos y especificaciones del cliente); primero se unen una cara interna y un ondulado, para después ser pegada una cara externa; estas son sometidas a niveles de calor entre los 150 y 180 °C, para poder hacer el buen secado del adhesivo que los une, al igual que la correcta formación de ondulado, logrando así la formación de la lámina de cartón ondulado.
Una vez fabricadas las láminas, se apilan una sobre otra hasta formar pilas de entre 400 y 600 unidades cada una. Estas pilas son transportadas a las bandas de almacenamiento temporal o directamente hacia la siguiente etapa del proceso, conformada por un conjunto de cuatro máquinas: las impresoras flexográficas. Estas máquinas se encargan de aplicar el diseño, la impresión y los cortes necesarios, ajustándose totalmente a las indicaciones particulares de cada pedido.
Al finalizar esta etapa, el producto terminado se agrupa en paquetes de 30 a 50 cajas cada uno, los cuales se trasladan a la zona de embarque. En esta área, si así lo solicita el cliente, se realiza el proceso de emplayado para proteger la carga. Finalmente, los paquetes se bajan al nivel del piso y se cargan en los camiones de reparto, listos para su distribución y entrega al cliente final. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de los procesos involucrados en la fabricación de papel corrugado.

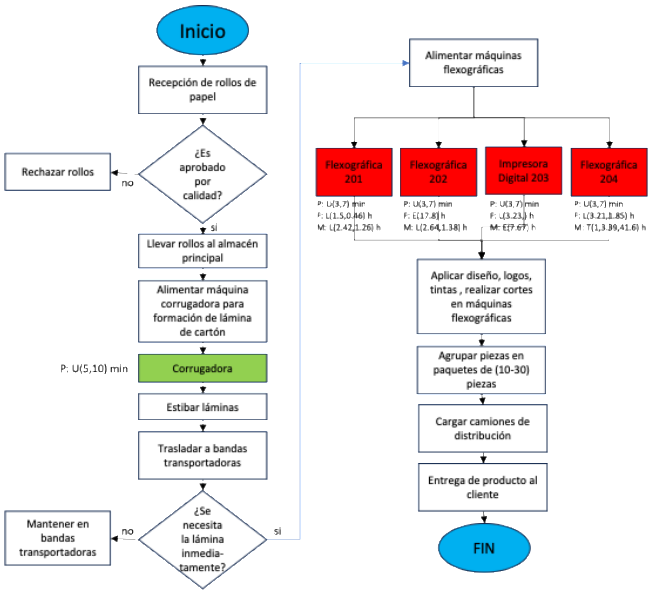


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de la planta de la fábrica de papel corrugado. Donde P: Tiempo de proceso, F: Tiempo en que volverá a ocurrir otra falla, M: Tiempo en realizar el mantenimiento correctivo.

Problemática

La fábrica objeto de este análisis presenta interrupciones operativas frecuentes originadas en distintos equipos industriales. Durante el estudio, se identificó que la mayor parte de fallas, detenciones y problemas técnicos se concentran en las máquinas flexográficas modelos 201, 202, 203 y 204. Estos equipos registran un promedio de 6 a 12 paros mensuales, registrados en una fuente de datos de la fábrica a lo largo de cuatro meses, una cifra considerablemente superior a la presentada por la máquina corrugadora, debido a que cada paro representa un tiempo estimado de 30 minutos. En este sentido, la Flexográfica 202 concentra el mayor porcentaje de paros, con 39 %, seguida de la Flexográfica 201, con 36 %; la Flexográfica 204 representa el 22 %, mientras que la impresora digital 203 registra el 2 %.

Las fallas recurrentes suceden debido a problemáticas relacionadas con la maquinaria, mano de obra, material que se está procesando, problemas ambientales y de método. Estos datos otorgados por el gerente de mantenimiento, Figura 4.

Esta situación representa una señal de alerta para la fábrica, ya que las detenciones no programadas generan pérdidas en la producción y reducen el rendimiento operativo por debajo de los niveles esperados. Como consecuencia, la fábrica no logra alcanzar las metas de producción establecidas; además, se hace necesario recurrir frecuentemente a horas extras para cumplir con los plazos de entrega pactados, lo que incrementa los costos de operación de la línea de producción.

Metodología

Recolección de datos

Se analizaron los datos históricos de ocurrencia de fallas en las máquinas flexográficas, a partir de los cuales se generaron las funciones de densidad de distribución para obtener la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los tipos de falla. Además, se obtuvieron las funciones para estimar el tiempo requerido en la reparación.

Las funciones que mejor se ajustaron a los datos fueron la lognormal (ecuación 1) y la función exponencial (ecuación 2).

$$Lognormal(\mu,\sigma^2) = f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(\ln x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

Donde μ es la media y σ^2 es la desviación estándar.

$$Exponencial(1/\lambda) = f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} \; si \; x \geq 0 \\ 0 \; en \; otro \; caso \end{cases} \quad (2)$$

Donde λ es el parámetro de tasa que define el número de eventos por unidad de tiempo.

Software de simulación

Para el desarrollo de los modelos de simulación se utilizó el software ProModel® versión 2014, una herramienta especializada de simulación, ampliamente reconocida en el ámbito industrial. Este programa permite construir diferentes escenarios o representaciones fieles a la realidad operativa, a partir del análisis del flujo de procesos del sistema, recursos utilizados, tiempos y restricciones propias de las líneas de producción.

Los elementos principales que se consideran en un modelo de simulación con ProModel® son los siguientes (Dunna, et al., 2006):

1. Entidades: Representan a todos los elementos que fluyen dentro del sistema, y a los que se les da un servicio o proceso (materia prima, piezas, pacientes, etc.).
2. Locaciones: Se utilizan para definir los servidores para atender a las entidades, y también pueden ser utilizados como espacios físicos para almacenar piezas (máquina de proceso, almacenes, bandas transportadoras, etc.).
3. Recursos: Estos elementos son utilizados para trasladar a las entidades entre locaciones (operarios, montacargas, camilleros de un hospital, etc.).
4. Redes de ruta: Define las rutas de desplazamiento de los recursos, conectando las locaciones por donde se estarían distribuyendo las entidades.
5. Arribos: Es donde se define la frecuencia de llegadas de las entidades al modelo.
6. Proceso: Se utiliza para definir la lógica de flujo de las entidades a través de las locaciones, de acuerdo con el diagrama de flujo de proceso del sistema que se esté modelando.
7. Variables: Se utilizan dentro del proceso para definir contadores o calcular algún valor de interés dentro de la simulación.

Modelos de simulación

Para este estudio, y con la finalidad de analizar el impacto de las propuestas de mejora dentro del sistema, se desarrollaron dos modelos de simulación.

En el primer modelo se consideró la ocurrencia de las fallas que se presentan dentro de la línea de producción, lo cual genera una disminución en la tasa de producción de la línea. El segundo modelo parte del primer modelo, agregando las estrategias de mejora que permiten disminuir la ocurrencia de fallas, mejorando la eficiencia de la línea de producción.
En cada uno de los modelos se definieron las variables "Total" y "Tasa" para indicar el total de piezas producidas y la tasa de producción por hora de la planta, respectivamente.
La comparación permitió determinar el impacto de cada estrategia y de la aplicación conjunta de las propuestas sobre la productividad de la planta.

Para ambos modelos se establecieron las mismas condiciones generales de operación con el propósito de realizar una comparación entre escenarios. Cada corrida de simulación tuvo una duración de 16 horas, correspondiente al periodo de operación considerado para el análisis. Asimismo, se realizaron un total de 10 réplicas para cada escenario, con la finalidad de obtener resultados representativos del comportamiento del sistema y reducir la influencia de la variabilidad propia del proceso.

De esta manera, una estrategia se consideró favorable cuando generó un aumento en la producción total o en la tasa de producción respecto al escenario original, así como una disminución en la ocurrencia de las fallas.

Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos para cada escenario con el propósito de identificar cuál de las estrategias propuestas generaba el mayor impacto positivo en el sistema.

Resultados

Funciones de densidad de distribución

Para la recolección de datos se contó con el permiso de la fábrica para revisar sus fuentes de información. Se recopilaron un total de 495 registros de mantenimiento de diferentes máquinas, durante un periodo de 4 meses (https://github.com/jmedina0610/dataset_fab_corr.git). Estos datos fueron depurados, pasando por un proceso de limpieza y corrección de valores faltantes o capturados erróneamente. La información cuenta con los campos de la fecha de ocurrencia de la falla, la máquina que presentó la falla, la hora en que se detuvo la máquina y la hora en que volvió a funcionar, así como el tiempo total en que estuvo detenida. Se identificaron 9 tipos de fallas dentro de los datos analizados, como se muestra en la Tabla 2.

En la Figura 2 se muestra la distribución en la ocurrencia de los tipos de falla indicados en la Tabla 2. Como se muestra en las gráficas, la mayor proporción de fallas son las que están catalogadas como "Falla poco recurrente", pero que al agruparse en esta categoría se genera una cantidad considerable de este tipo de fallas, las cuales pueden ser fuga de aire en manguera del prefeeder, guía rota, falla de la banda transportadora, etc. Como se puede observar, estas fallas por separado son poco recurrentes; sin embargo, en conjunto presentan una proporción elevada en comparación con las otras categorías.

Tabla 2. Tipos de falla identificados en la línea de producción por parte del área de mantenimiento.

Clave	Descripción del tipo de falla
1	Falla poco recurrente
2	Soporte de uñas
3	Falla en ciclo de inicio
4	Posición de sensores
5	Empujador sin posición
6	Uña desalineada
7	Falta de limpieza
8	Posición de caja
9	Falla en elevador

Fuente: Elaboración propia.

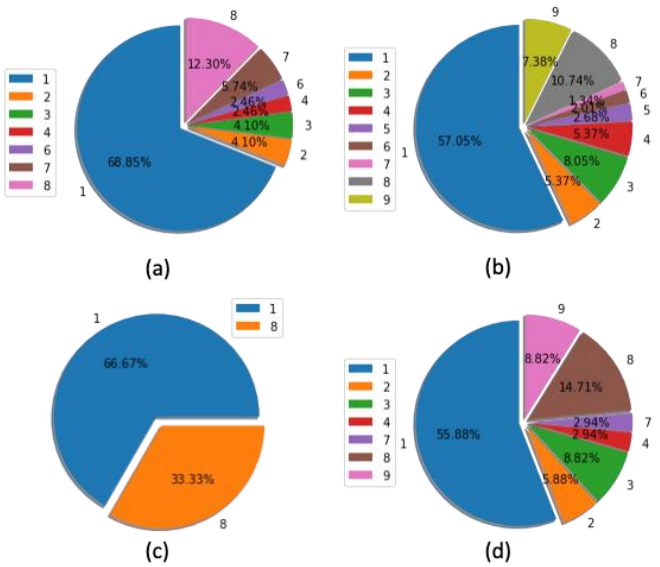


Figura 2: Ocurrencia de fallas por tipo para las máquinas a) Flexográfica 201, b) Flexográfica 202, c) Impresora Digital 203 y d) Flexográfica 204.

Con este mismo conjunto de datos se llevó a cabo el ajuste de las funciones de densidad de distribución para el tiempo de ocurrencia de la siguiente falla en cada maquinaria, así como el tiempo utilizado en su reparación. Este ajuste se realizó mediante el uso del software StatFit®, que se encuentra incluido dentro de las herramientas de ProModel®.
La Tabla 3 concentra las funciones obtenidas a partir de los datos proporcionados por la fábrica.

Tabla 3. Funciones de densidad de distribución por máquina.

Máquina	Tiempo entre fallas (horas)	Tiempo de reparación (min)
Flexográfica 201	Lognormal (1.5, 0.46)	Lognormal (2.45, 1.26)
Flexográfica 202	Exponencial (17.8)	Lognormal (2.64, 1.38)
Impresora Digital 203	Lognormal (3.23, 2.08)	Exponencial (7.67)
Flexográfica 204	Lognormal (3.21, 1.85)	Lognormal (41.6, 3.39)

Fuente: Elaboración propia.

Construcción del modelo

Tomando en cuenta el proceso descrito anteriormente, así como las funciones de densidad de distribución, se procedió al desarrollo del modelo de simulación, el cual fue implementado en el software ProModel®.

Para este modelo fue necesaria la definición de 20 locaciones. En la Tabla 4 se muestran las más importantes.

Tabla 4. Locaciones definidas en el modelo.

Nombre	Descripción	Capacidad
Almacén_rollos	Espacio para almacenar las bobinas de papel semikraft	600
Corrugadora	Equipo para hacer el corrugado del papel	2
Banda_transportadora 8 bandas	Espacio donde se almacenan las pilas de láminas corrugadas	16 pilas
Flexográfica_201	Máquina Flexográfica 201	1
Flexográfica_202	Máquina Flexográfica 202	1
Flexográfica_203	Impresora Digital 203	1
Flexográfica_204	Máquina Flexográfica 204	1
Emplayadora 2 equipos	Máquina emplayadora	1
Piso_PT	Espacio utilizado para almacenar el producto terminado	1000

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información proporcionada por la fábrica, se definieron horarios de trabajo para la máquina corrugadora y para las máquinas flexográficas. A la locación Corrugadora se le definió un horario de trabajo de 8 horas diarias. Mientras que a las máquinas flexográficas e impresora digital se les definió un horario de trabajo de 16 horas diarias.

Las entidades definidas en el modelo fueron: Rollo_de_papel, Pila_lámina_de_cartón_corrugadora y Caja_de_cartón.

Además, se contó con los siguientes recursos:

1. Montacargas. Para el traslado de los rollos de papel, desde su llegada a la planta, posteriormente trasladarlos al almacén de los rollos de papel, y finalmente, trasladarlos a la máquina corrugadora.
2. Transfer. Equipo requerido para el movimiento de las pilas de láminas de cartón corrugado a las bandas transportadoras; luego a las máquinas flexográficas y a la impresora digital; posteriormente a las emplayadoras; y, finalmente, al piso de producto terminado.

Para cada uno de estos recursos, se definieron las redes de rutas para establecer los caminos de desplazamiento y las locaciones entre las cuales se moverían las entidades.
Con la información recolectada y proporcionada por la fábrica y sus distintos colaboradores, se determina la distribución correcta de las distintas locaciones, entidades y recursos, al igual que su red de ruta y procesos. Como se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3: Distribución de planta al interior de la fábrica.

Adicionalmente, en el modelo de simulación se incorporaron las ocurrencias de las fallas en las máquinas flexográficas y en la impresora digital, así como el tiempo requerido de paro para su reparación. En este paso, se utilizaron las funciones de densidad de distribución mostradas en la Tabla 2.

Plan de mejora

Mediante el diagrama de espina de pescado (Figura 4) se llevó a cabo el análisis de la flejadora, que es parte de la máquina flexográfica. Se identificaron distintas fallas, entre las que se encuentran problemas en el soporte de uñas, el embrague y otros componentes esenciales. Para dar solución a estas situaciones y evitar que vuelvan a presentarse, se definieron diversas acciones de mejora. Primero, se considera fundamental brindar una capacitación más completa al personal de mantenimiento para el cuidado de los equipos, y que puedan actuar con mayor precisión y seguridad en cada intervención. Al igual que la capacitación al personal operativo de las flexográficas, es importante su calibración continua; por lo que se debe supervisar durante todo el proceso que los diferentes componentes sigan encontrándose en buen estado o colocados de manera adecuada para su buen funcionamiento. También es importante que, desde el momento en que se van a introducir las cajas, se verifique que estas entren en la posición correcta y no lo hagan torcidas o mal alineadas, ya que esto permite que la máquina cumpla su función adecuadamente y evita que piezas importantes sufran daños por

un manejo indebido. Asimismo, se estableció la necesidad de realizar un mantenimiento continuo, revisando al finalizar cada turno que el equipo se encuentre en buenas condiciones y manteniéndolo siempre limpio, una práctica que facilita detectar cualquier anomalía de forma temprana antes de que se convierta en una falla mayor. Por último, se debe revisar periódicamente la vida útil de cada pieza, para asegurar que no se estén utilizando más allá del tiempo recomendado, lo cual podría provocar desgaste excesivo o averías inesperadas que afecten el funcionamiento del equipo.

Estas medidas impactan directamente en la presencia de fallas en la línea de producción. Se identificó que la primera medida ayudaría a mitigar las fallas tipo 7 y 8; la segunda medida favorecería el control de las fallas tipo 3 y 5; la tercera medida reduciría las fallas tipo 2, 4 y 6; finalmente, las últimas medidas colaboran en la reducción de fallas tipo 1 y 9.

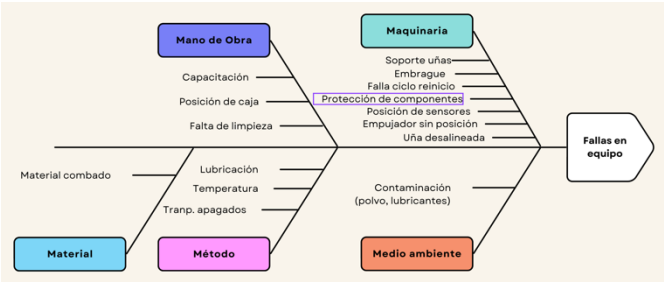


Figura 4: Diagrama de Ishikawa para identificar las causas de las fallas.

Resultados de simulación

Se ejecutaron 10 réplicas para cada uno de los escenarios modelados, llevando a cabo la simulación para un periodo de 168 horas, lo que equivale a una semana de trabajo en la planta. Para llevar a cabo la validación del modelo, se comparó la producción promedio diaria de la planta con el total reportado por la fábrica. Dado que la fábrica indica un total de 80,000 cajas por día en promedio, y el modelo de simulación arrojó en promedio un total de 78,600 cajas, se tiene una diferencia del 1.75%, lo cual indica que el modelo de simulación es aceptable.

Para verificar el impacto positivo de las propuestas de solución para reducir las fallas ocurridas en las máquinas flexográficas, se ejecutaron diversos escenarios, tomando en cuenta la aplicación de cada una de las propuestas por separado, y un escenario donde se considera la aplicación de todas las propuestas de mejora. El promedio de los resultados numéricos obtenidos de la simulación de estos escenarios se resume en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparativo de los escenarios de simulación.

Estrategia aplicada	Tasa de producción Piezas por hora	% de incremento	Incremento (Piezas por semana)
Ninguna	13,748.93		
Capacitación al personal	14,088.86	2.51%	55,200
Calibración continua	13,815.89	0.47%	10,400
Revisión constante de posición de la caja	13,822.42	0.55%	12,000
Mantenimiento constante	13,759.10	0.07%	1,600
Todas las anteriores	14,334.72	4.25%	93,600

Fuente: Elaboración propia.

Discusión de resultados

La Tabla 5 muestra el concentrado de los resultados numéricos obtenidos de la simulación de escenarios con la aplicación de estrategias para reducir la ocurrencia de los distintos tipos de fallas. Se puede observar que todas las estrategias propuestas tienen un impacto positivo en la mitigación de fallas, y que la aplicación de todas generaría un incremento en la producción del 4.25 %, lo que representa alrededor de 93,600 cajas adicionales por semana. Sin embargo, cabe resaltar que la estrategia que presenta mayor impacto en la reducción de la ocurrencia de fallas es la capacitación al personal operativo, generando un incremento en la producción del 2.51 %, equivalente a un total de 55,200 cajas adicionales por semana.

Estos resultados coinciden con lo planteado por Supsomboon y Hongthanapach (2014), quienes demostraron que la aplicación de estrategias de mantenimiento apoyadas en la simulación permite identificar alternativas capaces de disminuir las fallas y mejorar el desempeño de los equipos. En su investigación, la combinación del mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) con la simulación de eventos discretos permitió reducir los defectos y mejorar la calidad en una fábrica de semiconductores. Aunque ambos estudios se desarrollan en sectores diferentes, existe una coincidencia importante: la identificación y atención de las causas de las fallas puede generar mejoras en el desempeño de los procesos productivos. La diferencia principal radica en que, en la presente investigación, la estrategia con mayor impacto fue la capacitación del personal operativo, mientras que en el estudio de Supsomboon y Hongthanapach se priorizó el mantenimiento centrado en la confiabilidad.

De manera similar, los resultados obtenidos guardan relación con los hallazgos de Vásquez (2024), quien mediante la utilización de ProModel® y la evaluación de diferentes escenarios logró identificar alternativas para mejorar el rendimiento de una planta de colchones. En ambos casos, la simulación permitió analizar el comportamiento del sistema productivo y determinar qué estrategias podían generar mejores resultados antes de implementarlas directamente en la operación. Esto demuestra que la simulación constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones, ya que permite comparar diferentes alternativas y estimar su efecto sobre la productividad.

El incremento del 4.25 % en la producción al aplicar de manera conjunta las estrategias propuestas evidencia que la reducción de fallas puede tener un efecto directo sobre la productividad.

Además, el hecho de que la capacitación del personal por sí sola genere un incremento del 2.51 % permite considerar al factor humano como un elemento relevante dentro de la estrategia de mejora.

Los resultados obtenidos permiten considerar que la simulación constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento y la productividad. Sin embargo, estos resultados deben entenderse como proyecciones del modelo y no como efectos empíricamente comprobados, debido a que las propuestas no fueron implementadas ni evaluadas directamente en la operación real. Por ello, se recomienda considerar la capacitación como una primera alternativa de intervención y, posteriormente, evaluar de manera gradual las demás estrategias, tomando en cuenta su costo, factibilidad, interacción y efecto real sobre la frecuencia de fallas y la productividad. De esta manera, los resultados de la simulación pueden utilizarse como punto de partida para orientar futuras acciones de mantenimiento y validar en campo las mejoras proyectadas.

Conclusiones

En este estudio se analizaron los datos históricos de las fallas que se han presentado en una fábrica de papel corrugado. Dentro de la línea de producción, los equipos implicados que tienen mayor frecuencia de fallas son las máquinas flexográficas y una impresora digital. Se desarrollaron modelos de simulación con la herramienta ProModel® para verificar el impacto en la reducción de fallas de la aplicación de estrategias de mejora en la planta. Como se observa en los resultados, la estrategia que mejores resultados ofrece es la capacitación al personal operativo de las máquinas que se encuentran en la línea de producción. Por lo que la fábrica, puede tomar decisiones a partir de los resultados numéricos obtenidos de los modelos de simulación desarrollados, proponer las estrategias a seguir para incrementar la producción de la planta y dar el seguimiento para tener resultados más exactos. Las mejoras analizadas fueron evaluadas mediante un modelo de simulación, por lo que es necesario que sean implementadas en la planta de producción y darles un seguimiento para confirmar su impacto real.

Con este estudio, se hace una contribución al conocimiento orientada a la modelación de las fallas de máquinas que se encuentran dentro del proceso de producción de una fábrica de papel corrugado, así como el análisis de las propuestas de solución mediante escenarios de simulación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron la plataforma de Language Tool llevar a cabo la corrección gramatical y mejora de redacción. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Álvarez, O. V., & López, P. P. R. (2023). Aplicación de un modelo de simulación discreta para mejorar la productividad del proceso de producción en una empresa manufacturera. *Industrial Data, 26*(1), 303-332.

Cárdenas Caamaño, P. E., & Barahona Bustamante, J. A. (2024). *Automatización del mantenimiento de tuberías de presión de calderas industriales a través de un controlador PID (Simulación en Simulink)* (Bachelor's thesis).

Chango Hinojosa, D. R. (2022). *Incremento de la productividad en empresas de manufactura, mediante la optimización de procesos con modelos y simulación por computadora. Caso práctico aplicado a Proalva, una empresa nacional dedicada a la elaboración de pulpa de fruta: optimización de procesos productivos en planta* (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022).

Dunna, E. G., Reyes, H. G., & Barrón, L. E. C. (2006). *Simulación y análisis de eventos discretos con ProModel*. Pearson Educación.

Ecuador, I. I., Vaca, C. S. A., Quito, R. F. O., & Ecuador, I. I. (2022). Importancia de la implementación de mantenimiento preventivo en las plantas de producción para optimizar procesos. *E-IDEA Journal of Engineering Science*. https://doi.org/10.53734/esci.vol4.id240

García, E. M. (2024). *Modelo de simulación de un taller de mantenimiento*.

Hernández-Lopez, H., Rivera-Gómez, H., Corona-Armenta, J. R., & Montaño-Arango, O. (2017). Determinación de estrategias de producción y reemplazo a través de un modelo de simulación. *Conciencia Tecnológica*, (53).

Liu, P. S., Chin, J. F., Ab-Samat, H., & Muhammad, N. A. (2025). Simulation-based maintenance systems: A systematic review. *Journal of Simulation*, 1-39. https://doi.org/10.1080/17477778.2025.2579125

López-Sánchez, A. Y., González-Lara, A. L., & Alcaraz-Corona, S. (2019). Simulación para la optimización de la producción de ejes en la línea de ensamblaje de una empresa de manufactura. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, 20*(1), 0-0.

Moubray, J. (s. f.). *Mantenimiento centrado en la confiabilidad*. https://es.scribd.com/document/399048691/1-Libro-RCM-J-Moubray-pdf

Nazate Ponce, D. N. (2024). *Mejora de la productividad en empresas de manufactura y servicios, mediante la optimización de procesos con modelos y simulación por computadora. Caso práctico aplicado a una empresa dedicada a la fabricación de empaques tejidos en polipropileno: optimización de procesos correspondientes a la logística y distribución de productos*.

Saavedra Sueldo, C. (2025). *Desarrollo e integración de un sistema de toma de decisiones basado en simulación e inteligencia artificial para sistemas de manufactura flexible en la industria 4.0*. https://digital.cic.gba.gob.ar/items/e0c3eace-f907-4f3f-965e-dfb5204c52d5

Supsomboon, S., & Hongthanapach, K. (2014). A simulation model for machine efficiency improvement using reliability centered maintenance: Case study of semiconductor factory. *Modelling and Simulation in Engineering, 2014*(1), 956182.

Vásquez Álvarez, O. (2024). *Optimización de mejora de procesos para incrementar la productividad de empresas de manufactura mediante simulación de sistemas*.

Velázquez, J., Rivera-Gómez, H., Reyna, S. B. R., & Quintanilla, L. R. (2024). Mejora de la eficiencia en la producción de autopartes a través de manufactura esbelta y simulación. En *Engenharias em perspectiva: ciência, tecnologia e inovação 5* (pp. 101-120). Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.9642414107

Vicente, C. P. A. (2024). *Diseño y simulación del proceso de una planta de manufactura para optimizar la producción de chips de banano*. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28968

.