

# SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS APLICADA AL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE MANTENIMIENTO: MEDICIÓN DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD, DISPONIBILIDAD (CMD) Y COSTOS DE MANTENIMIENTO

**Nelson Eduardo Martínez Sarmiento**

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander, Colombia.  
Correo electrónico: neduar27do@gmail.com

## Resumen

Esta investigación aborda la importancia del sector industrial colombiano en la sostenibilidad y competitividad empresarial, la relevancia de los costos de producción, afectando directamente la rentabilidad y el crecimiento económico del país. En particular, se señala que las actividades de mantenimiento representan entre el 15% y el 70% de dichos costos, lo que subraya la necesidad de una gestión eficiente. La creciente complejidad de los sistemas productivos ha planteado desafíos adicionales en la gestión del mantenimiento, exigiendo estrategias que minimicen tiempos de inactividad y maximicen la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Sin embargo, muchas pequeñas y medianas empresas aún no reconocen plenamente el impacto financiero que genera el mantenimiento, lo que conlleva una baja adopción de mejores prácticas. La toma de decisiones en este ámbito enfrenta el reto de equilibrar costos, confiabilidad y disponibilidad, lo que demanda herramientas técnicas que faciliten dichas decisiones. En este contexto, la simulación de eventos discretos se presenta como una solución efectiva. La metodología aplicada permite modelar y analizar diversos escenarios de mantenimiento, evaluando su impacto en la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos, optimizando así las estrategias de mantenimiento y potenciando la eficiencia operativa.

**Palabras clave:** Simulación de eventos discretos, sistemas de mantenimiento, confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, costos de mantenimiento.

## 1. Introducción

El sector industrial en Colombia ha sido y continúa siendo un pilar esencial en la economía nacional. Según el Índice de Productividad Industrial (IPI) reportado por el DANE, entre marzo de 2022 y febrero de 2023 se observaron variaciones positivas en los cuatro subsectores industriales. Sobresale el crecimiento del 8,7 % en la industria manufacturera, seguido por el

suministro de electricidad y gas con un 3,7 %, la captación y tratamiento de agua con un 1,4 % y la explotación de minas y canteras con un 0,4 %. Estos indicadores reflejan el dinamismo del sector y su impacto en el desarrollo económico del país.

Con el avance acelerado de las tecnologías industriales, se hace cada vez más necesario contar con herramientas avanzadas que faciliten la toma de decisiones en entornos complejos. Dentro de este marco, el mantenimiento

industrial juega un papel clave al asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y maquinarias, extender su vida útil y reducir los costos asociados con paradas no planificadas. La simulación, particularmente a través de enfoques continuos y discretos, ha emergido como una herramienta fundamental en la evaluación del comportamiento de los sistemas industriales. La simulación de eventos discretos (DES) es especialmente útil para sistemas que requieren un seguimiento detallado de cada elemento dentro de la dinámica organizacional. Diversos estudios han demostrado la efectividad de las metodologías de modelado y simulación en la optimización del mantenimiento. Por ejemplo, Ali et al. evaluaron el rendimiento de la industria automotriz para identificar cuellos de botella y mejorar las políticas de mantenimiento mediante la simulación. Roux et al. combinaron algoritmos de optimización con simulación para evaluar estrategias de mantenimiento en sistemas de fabricación, mientras que Oyarbide-Zubillaga et al. se centraron en la optimización del mantenimiento preventivo en el sector manufacturero. Estos enfoques subrayan la importancia de la simulación en la gestión eficiente del mantenimiento industrial.

## **2. Revisión de literatura**

Para llevar a cabo esta revisión, se utilizó la metodología basada en la declaración PRISMA [6], diseñada para mejorar la transparencia y calidad de las revisiones sistemáticas. El proceso comenzó con una exploración general en fuentes secundarias y contenido web, como Google Académico, bibliotecas virtuales y catálogos de editoriales, con el objetivo de obtener un panorama amplio sobre el tema. Posteriormente, se seleccionaron los términos clave y se estructuró la ecuación de búsqueda inicial, incorporando sinónimos y términos alternativos para garantizar una búsqueda completa. Esta ecuación se digitalizó y se ejecutó en la base de datos SCOPUS para identificar artículos relevantes sobre aplicaciones de simulación en sistemas de mantenimiento. Una vez obtenidos los resultados, se descargaron los metadatos de los documentos para realizar un análisis bibliométrico, lo que permitió examinar tendencias y redes de coautoría. Finalmente, se efectuó una revisión preliminar de la literatura con el fin de identificar las aplicaciones de simulación más relevantes en el ámbito del mantenimiento y seleccionar los estudios más adecuados para análisis posteriores.

## **3. Metodología para el desarrollo de modelos de simulación enfocados a sistemas de mantenimiento**

El marco metodológico basado en Banks [17] para la simulación de sistemas de mantenimiento. Ofrece una

guía estructurada para construir y evaluar modelos, asegurando su validez y aplicabilidad en distintos contextos, y garantizando una representación precisa del comportamiento del sistema. A continuación, se describen los componentes del marco.

### **3.1. Establecimiento de objetivos**

El desarrollo de un proyecto de simulación comienza con la definición clara de los objetivos que se desean alcanzar, ya que estos determinan el alcance, los entregables y las etapas a cumplir durante su ejecución. Es fundamental que los objetivos se enfoquen en maximizar el uso del modelo experimental, facilitando así la creación de escenarios que permitan evaluar alternativas de mejora. Esto asegura que el proyecto esté alineado con la identificación de soluciones y optimizaciones basadas en las simulaciones realizadas.

### **3.2. Modelo conceptual**

Se destacan los aspectos críticos del modelo conceptual, proporcionando una descripción abstracta de las propiedades esenciales del sistema que guían su construcción.

### **3.3. Caracterización de entidades**

Se definen grupos de elementos que representan el sistema, facilitando la modelización de grandes volúmenes, ajustando atributos según el progreso de la simulación.

### **3.4. Elementos del modelo**

Se identifican componentes clave del modelo, incluyendo eventos, atributos, variables de estado y medidas de desempeño. Estos elementos permiten capturar las dinámicas del sistema y evaluar su comportamiento.

### **3.5. Recopilación de datos**

Se obtienen y organizan datos relevantes para garantizar la precisión de la simulación, asegurando la calidad y representatividad de los datos en el sistema.

### **3.6. Construcción del modelo computacional**

Se implementa el modelo en FlexSim, verificando su funcionalidad y ajustándolo para reflejar el comportamiento del sistema de manera precisa.

### **3.7. Verificación**

La verificación asegura el correcto funcionamiento del modelo, mientras que la validación confirma que refleja adecuadamente el sistema bajo estudio.

### 3.8. Ejecución y análisis de resultados

Se ejecutan los escenarios simulados y se analizan los datos para evaluar el rendimiento del sistema, lo que permite tomar decisiones basadas en las conclusiones obtenidas.

## 4. Aplicación del marco metodológico

### 4.1. Objetivo

Evaluar escenarios de mantenimiento para la medición de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad (CMD) y Costos de mantenimiento a partir del desarrollo de modelos de simulación de eventos discretos realizado en FlexSim.

### 4.2. Modelo conceptual

El modelo conceptual es fundamental para facilitar la comunicación entre el usuario y la herramienta mediante un lenguaje especializado, y para identificar y definir los componentes clave del modelo abstracto del sistema en análisis.

### 4.3. Definición del sistema

Para la construcción del modelo, las máquinas se definen como entidades de recursos fijos en un entorno industrial representativo, adaptado de la división Soft Line de AVTEC Private Limited. Estas 23 máquinas, no paralelas, son responsables de ejecutar 49 operaciones de mecanizado necesarias para la fabricación de 11 componentes distintos.

### 4.4. Elementos del modelo formal

Tabla 3. Elementos del modelo formal

Evento	Atributos	Variables globales		Medidas de desempeño
		Disponibilidad inherente	Disponibilidad Alcanzada	
Instante en que ocurre una falla	Tiempo del inicio de la falla	Sumatoria del tiempo entre fallas	Sumatoria del tiempo entre mantenimiento correctivo	Confiabilidad Mantenibilidad Disponibilidad (Inherente y alcanzada) Costo total de mantenimiento
Reintegración del equipo mediante la acción correctiva	Tiempo final de la reparación	Sumatoria del tiempo entre mantenimientos	Número de tiempos útiles mantenimiento correctivo	
	Número de fallas		Sumatoria del tiempo entre mantenimiento preventivo	
			Número tiempos útiles mantenimiento preventivo	
Momento en que se realiza un mantenimiento preventivo	Tiempo del inicio de un mantenimiento preventivo		Sumatoria del tiempo de reparación correctivo	
Reintegración del equipo mediante la acción preventiva	Tiempo final de la reparación del mantenimiento		Número de reparaciones correctivo	
	Numero de mantenimientos preventivos		Sumatoria del tiempo de reparación preventivo	
			Número de reparación preventivo	

### 4.5. Recolección y análisis de datos

En la construcción de este tipo de proyectos, es fundamental definir los tiempos entre fallas de cada máquina y los tiempos de reparación. Para este estudio, los datos fueron extraídos de una investigación previa sobre la empresa automotriz AVTEC Private Limited y obtenidos de la base de datos ORACLE, lo que facilita la precisión y relevancia de los parámetros utilizados.

### 4.6. Construcción del modelo computacional

La modelización de la simulación para el cálculo del CMD y costos se presenta un algoritmo de flujo que comprende dos pasos clave: el desarrollo del modelo, que establece las reglas para los tiempos de fallas y las estrategias de mantenimiento, y la gestión de los efectos de las acciones de mantenimiento, donde se calcula el tiempo de reparación y los costos asociados tanto para el Mantenimiento Correctivo (MC) como para el Mantenimiento Preventivo (MP). Adicionalmente se realiza el modelo de la lógica de degradación de las máquinas, de acuerdo con su tiempo operacional cuando llega el umbral de la falla se detiene de acuerdo con su distribución de falla, para una reparación, reiniciando el contador de degradación.

### 4.7. verificación

El proceso de verificación puede incluir varias etapas clave:

- **Revisión Externa:** Se recomienda que un especialista en el software de simulación realice una revisión exhaustiva del modelo computacional. Esta revisión externa es fundamental para identificar y corregir posibles errores, garantizando la calidad del modelo.
- **Diagrama Detallado:** Es esencial crear un diagrama detallado que cubra todas las acciones y eventos posibles dentro del sistema. Este diagrama asegura un seguimiento riguroso de la lógica del modelo, permitiendo una implementación precisa y coherente en respuesta a los eventos del sistema.
- **Validación Probabilística:** En el caso de modelos probabilísticos, es importante ejecutar la versión determinística del modelo y comparar los resultados con datos preestablecidos de investigaciones anteriores. Esta validación ayuda a confirmar la precisión y coherencia del modelo al compararlo con datos históricos, fortaleciendo así su capacidad predictiva.

- **Depuración con Herramientas Especializadas:** Se deben emplear herramientas específicas como el “debug” de FlexSim para simplificar la depuración de la simulación. Estas herramientas facilitan la detección y corrección de errores mediante la monitorización continua, el enfoque en entidades o líneas de código específicas, y la observación de valores durante la simulación.
- **Verificación Lógica y Matemática:** Esta etapa se centra en asegurar la consistencia y exactitud de los algoritmos y reglas fundamentales del modelo. La verificación lógica y matemática ayuda a detectar y corregir errores como divisiones por cero o resultados incoherentes ante valores extremos, consolidando la robustez y confiabilidad del modelo.

#### 4.8. Análisis de resultados y experimentación

En este estudio, se desarrollaron y compararon dos modelos de estrategias de mantenimiento para evaluar su impacto en la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de las máquinas. A continuación, se presentan los resultados y el análisis de la experimentación realizada.

**Modelo 1: Mantenimiento Correctivo (CM),** se adoptó exclusivamente la estrategia de mantenimiento correctivo, donde las intervenciones se realizan únicamente en respuesta a averías. Este modelo resultó en paradas completas del sistema cada vez que se produce una falla. Los resultados de la simulación revelaron los siguientes valores: Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF), Tiempo Medio Entre Reparaciones (MTTR), Disponibilidad Inherente.

**Modelo 2: Mantenimiento Preventivo,** se empleó una estrategia de mantenimiento preventivo programado, realizado después de un número específico de horas de operación. Tras cada intervención, el equipo se restauraba a un estado "como nuevo", eliminando el deterioro acumulado. Las métricas obtenidas incluyeron: Tiempo Medio Entre Mantenimientos Correctivos (MTBMC), Tiempo Medio Entre Mantenimientos Preventivos (MTBMP), Tiempo Medio Entre Reparaciones Preventivas (MP), Tiempo Útil Promedio Entre Mantenimiento Correctivo, Preventivo (MTBM) y Disponibilidad Alcanzada

#### Evaluación de Escenarios de Mantenimiento Preventivo

Para identificar la estrategia óptima de mantenimiento preventivo, se realizaron simulaciones en tres escenarios

adicionales con parámetros de confiabilidad Weibull (25%, 75% y 90%). Estos escenarios fueron comparados con el intervalo de mantenimiento preventivo establecido en el Modelo 1. Los resultados incluyeron la evaluación del Tiempo Medio Entre Mantenimiento Correctivo (MTBMC) y los costos asociados.

El Escenario 3 emergió como la opción más favorable en términos de costo-beneficio. Este escenario mostró una mejora del 48.03% en la confiabilidad en comparación con el escenario base y una reducción del 41.27% respecto al mantenimiento correctivo, alcanzando un tiempo promedio sin fallas de 1587.86 horas y reduciendo los costos en un 30%.

El Escenario 3 combina mantenimiento preventivo y correctivo, logrando una disponibilidad similar al Modelo 1 pero con una gestión más proactiva y una mayor confiabilidad

#### Impacto en Disponibilidad y Confiabilidad

Aunque la disponibilidad alcanzada fue del 96% en ambos modelos, el Modelo 2 (Escenario 3) mostró ventajas significativas en la gestión de fallas y costos. La disponibilidad en ambos modelos es equivalente, pero el enfoque proactivo del mantenimiento preventivo contribuye a reducir la incidencia de fallas inesperadas

**Análisis de Fallas y Comportamiento del Sistema:** El análisis de las 23 máquinas, utilizando la distribución de Weibull, mostró diferentes etapas en el comportamiento de las fallas. Las máquinas se clasificaron en varias fases de la curva de la bañera de la fase III, desde fallas con tiempos similares hasta fallas completamente predecibles. Los resultados sugieren que las máquinas con un mayor parámetro de escala (característica de vida útil) pueden operar por más tiempo antes de fallar, indicando una mayor resistencia y capacidad operativa.

#### 5. Conclusiones

La evaluación y comparación de diversas estrategias de mantenimiento mediante la simulación de eventos discretos, proporcionando un análisis exhaustivo de indicadores clave como Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD), así como de los costos asociados al mantenimiento. La metodología desarrollada para proyectos de simulación en sistemas de mantenimiento ha demostrado el valor de la simulación como una herramienta esencial para la toma de decisiones, permitiendo la evaluación de distintos escenarios y la implementación de políticas de mantenimiento preventivo en sistemas con fallas estocásticas. Los modelos formulados han identificado el nivel óptimo

para cada política, destacando la importancia de una estrategia de mantenimiento equilibrada para maximizar la eficiencia operativa y minimizar los costos.

Los resultados obtenidos evidencian que el escenario seleccionado ofrece la mejor relación costo-beneficio, con una mejora del 48.03% en comparación con el escenario base y una reducción del 41.27% respecto al mantenimiento correctivo, logrando un tiempo promedio sin fallas de 1587.86 horas. Además, se observó una reducción del 30% en los costos en comparación con el mantenimiento correctivo (modelo 1), mejorando la confiabilidad y reduciendo significativamente los costos totales.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de la simulación de eventos discretos como una herramienta crucial para diseñar sistemas de mantenimiento eficientes y competitivos, optimizando los programas de mantenimiento y apoyando la toma de decisiones estratégicas en diversos horizontes temporales. Se recomienda ampliar el estudio para incluir todos los componentes de las máquinas, ya que actualmente se analizó solo uno por máquina. Esto permitiría desarrollar políticas de mantenimiento más específicas y evaluar el impacto de las fallas en la confiabilidad de manera más integral. Asimismo, sería beneficioso analizar cómo las fallas afectan la producción total para identificar cuellos de botella y optimizar los tiempos de inactividad mediante un mantenimiento más estratégico.

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] Y. Baqqal and M. El Hammoumi, "State of the art in maintenance modelling and simulation approaches for maintenance systems," *2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions, ICTMOD 2018*, pp. 214–218, Jul. 2018, doi: 10.1109/ITMC.2018.8691152.
- [2] S. Robinson, *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. 2004. Accessed: May 01, 2023. [Online].
- [3] A. Ali, X. Chen, Z. Yang, J. Lee, and N. Jun, "Optimized maintenance design for manufacturing performance improvement using simulation," *Proceedings - Winter Simulation Conference*, pp. 1811–1819, 2008, doi: 10.1109/WSC.2008.4736270.
- [4] O. Roux, M. A. Jamali, D. A. Kadi, and E. Châtelet, "Development of simulation and optimization platform to analyse maintenance policies performances for manufacturing systems," <https://doi.org/bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1080/09511920701574214>, vol. 21, no. 4, pp. 407–414, Jun. 2008, doi: 10.1080/09511920701574214.
- [5] A. Oyarbide-Zubillaga, A. Goti, and A. Sanchez, "Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-objective evolutionary algorithms,"
- [6] J. J. Yepes-Núñez, G. Urrútia, M. Romero-García, and S. Alonso-Fernández, "Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas," *Rev Esp Cardiol*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.RECESP.2021.06.016.
- [7] Z. Yang, D. Djurdjanovic, J. Ni, Z. M. Yang, D. Djurdjanovic, and J. Ni, "Maintenance scheduling in manufacturing systems based on predicted machine degradation," *J Intell Manuf*, vol. 19, pp. 87–98, 2008, doi: 10.1007/s10845-007-0047-3.
- [8] I. D. Lins and E. L. Drogue, "MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF AVAILABILITY AND COST IN REPAIRABLE SYSTEMS DESIGN VIA GENETIC ALGORITHMS AND DISCRETE EVENT SIMULATION," vol. 29, no. 1, pp. 43–66, 2009.
- [9] V. Mattila and K. Virtanen, "Maintenance scheduling of a fleet of fighter aircraft through multi-objective simulation-optimization," *Simulation*, vol. 90, no. 9, pp. 1023–1040, Jul.
- [10] A. Azadeh, S. M. Asadzadeh, N. Salehi, and M. Firoozi, "Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system-A combined Markovian simulation model," 2015, doi: 10.1016/j.res.2015.04.009.
- [11] A. Alrabghi, A. Tiwari, and M. Savill, "Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies," *J Manuf Syst*, vol. 44, pp. 191–206, Jul. 2017.
- [12] L. W. Sheng, E. I. Basri, and S. Kamaruddin, "SCIENCE & TECHNOLOGY Analysis on the Effect of Shop Floor Parameters on the Effectiveness of Preventive Maintenance through Discrete Event Simulation," *Pertanika J. Sci. & Technol*, vol. 25, no. 1,
- [13] K. Wang and D. Djurdjanovic, "Joint Optimization of Preventive Maintenance, Spare Parts Inventory and Transportation Options for Systems of Geographically Distributed Assets," 2018, doi: 10.3390/machines6040055.
- [14] H. Hüseyin Turan, M. Atmis, F. Kosanoglu, S. Elsayah, and M. J. Ryan, "A risk-averse simulation-based approach for a joint optimization of workforce capacity, spare part stocks and scheduling priorities in maintenance planning," 2020, doi: 10.1016/j.res.2020.107199.
- [15] S. P. Orlov, S. V. Susarev, and R. A. Uchaikin, "Application of hierarchical colored petri nets for technological facilities' maintenance process evaluation," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, Jun. 2021.

- [16] S. Kumar, V. Manjrekar, V. Singh, and B. K. Lad, “Integrated yet distributed operations planning approach: A next generation manufacturing planning system,” 2019,
- [17] J. Banks, J. S. Carson II, and N. Barry L, *Discrete-Event System Simulation* , Fourth. 2005. [Online]. Available: [https://pavandm.files.wordpress.com/2017/03/discrete-event-system-simulation-jerry-banks\\_2.pdf](https://pavandm.files.wordpress.com/2017/03/discrete-event-system-simulation-jerry-banks_2.pdf)
- [18] A. Mora Gutiérrez, *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*. 2009.