

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

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Industrial

Director

Edwin Alberto Garavito Hernández

Magister en Ingeniería Industrial

Codirector

Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Magister en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios por darme las fuerzas, inspiración y sabiduría para llevar acabo este proyecto, ser el guía constante que me han permitido enfrentar cada desafío y alcanzar esta meta.

A mi madre Myriam por ser mi voz de aliento en cada momento de dificultad. Gracias por su esfuerzo, su dedicación y por ayudarme a culminar esta etapa de mi vida.

A mi amada Sofía Suárez, por acompañarme en esta etapa final de mi formación académica como profesional. Gracias por tu amor, tu paciencia y por ser mi apoyo incondicional en cada momento. Tu presencia y motivación han sido esenciales para alcanzar este logro.

Agradecimientos

Al profesor Edwin Alberto Garavito y a la profesora Laura Yeraldín Escobar, por su valioso acompañamiento y apoyo durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto. Gracias por cada recomendación y consejo brindado, que fueron fundamentales para alcanzar este logro.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme el espacio, los recursos y el conocimiento necesario para llevar a cabo este proyecto. Gracias por ofrecer un entorno académico que me permitió crecer tanto profesional como personalmente y hacer de esta experiencia un pilar fundamental en mi formación.

A los profesores que estuvieron involucrados en mi formación, por compartir sus conocimientos y experiencias, que han sido fundamentales en mi desarrollo académico y profesional.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General.....	16
1.1.1. Objetivos Específicos.....	16
2. Planteamiento del problema.....	17
3. Justificación	19
4. Metodología de investigación.....	23
4.1. Metodología para la revisión de la literatura	23
4.2. Metodología para la simulación.....	24
4.2.1. Formular problema.....	25
4.2.2. Establecimiento de objetivos	25
4.2.3. Modelo conceptual para el desarrollo de proyecto de simulación.....	25
4.2.4. Recopilación de datos	27
4.2.5. Construcción del modelo computacional.....	28
4.2.6. Verificación y validación del modelo	28
4.2.7. Diseños de experimentos	28
4.2.8. Ejecución y análisis de los resultados de la simulación.....	29
4.2.9. Documentación y reporte.....	29
5. Marco teórico	29
5.1. Simulación	30
5.2. Simulación de eventos discretos	31

5.3. Análisis CMD (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad).....	32
5.3.1. Confiabilidad.....	32
5.3.2. Mantenibilidad.....	33
5.3.3. Disponibilidad.....	34
5.4. Distribuciones de probabilidad	38
5.4.1. Distribución Normal.....	39
5.4.2. Distribución Log Normal.....	39
5.4.3. Distribución de Weibull.....	39
5.5. Sistema Kantiano de mantenimiento	40
5.5.1. Unidad de producción.....	41
5.5.2. Unidad de mantenimiento.....	42
5.5.3. Sistema integral de mantenimiento.....	43
5.6. Tipos de mantenimiento.....	44
5.6.1. Mantenimiento correctivo.....	44
5.6.2. Mantenimiento preventivo.....	44
5.7. Costos de mantenimiento.....	46
6. Revisión de literatura	47
6.1. Antecedentes: Aplicaciones de la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento.....	47
6.2. Conclusión de la revisión.....	52
7. Aplicación del marco metodológico para el desarrollo de modelos de simulación enfocados a sistemas de mantenimiento	53
7.1. Definición de objetivos.....	53

7.2. Modelo conceptual.....	55
7.2.1. Caracterización de entidades.....	55
7.2.2. Modelización de la simulación para el cálculo del cmd y costos	59
7.2.3. Estructuración del sistema para analizar la confiabilidad del sistema	60
7.2.4. Modelo conceptual en Microsoft visio	62
7.3. Determinación de los tiempos entre fallas, reparaciones y costos de cada mantenimiento...	63
7.4. Construcción del modelo computacional.....	65
7.4.1. Definición del modelo computacional en FlexSim.....	65
7.4.2. Configuración del tiempo de fallas, reparaciones y costos.....	73
7.4.3. Modelado de degradación de la máquina para Mantenimiento Correctivo y preventivo ...	78
7.4.4. Medidas de desempeño	81
7.4.5. Verificación	84
7.4.6. Definición y evaluación de escenarios.....	86
7.4.7. Evaluación de escenarios y análisis de resultados Modelo 1 y 2.....	87
7.4.8. Análisis de Indicadores de Mantenimiento Modelo 2.....	91
8. Conclusiones	103
9. Recomendaciones	105
Referencias bibliográficas.....	106

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos	15
Tabla 2. Metodología para la revisión de literatura.....	23
Tabla 3. Asignación de Máquinas por Operaciones y Trabajos	61
Tabla 4. Distribuciones de probabilidad de fallas y reparaciones de cada máquina.	64
Tabla 5. Costo en la simulación.	65
Tabla 6. Descripción de las columnas de la tabla global mantenimiento correctivo y preventivo	72
Tabla 7. Descripción de las columnas de la tabla global mantenimiento correctivo	73
Tabla 8. Estrategias de mantenimiento.....	87
Tabla 9. Resumen de resultados de la simulación para las 23 Maquinas CMD Modelo1	89
Tabla 10. Resumen de resultados de la simulación para las 23 Maquinas CMD Modelo2	89
Tabla 11. Definición de escenarios del tiempo entre mantenimientos preventivos.	91
Tabla 12. Porcentaje de variación del MTBMC de cada escenario.	94
Tabla 13. Diferencia de los costos totales entre escenarios	95
Tabla 14. Fallas ocurridas según los resultados de la simulación	96
Tabla 15. Comparacion de resultados de alternativas.	98
Tabla 16. Cálculo de confiabilidad de cada máquina.....	112

Lista de Figuras

Figura 1. Representación del estado de funcionamiento de una máquina a lo largo del tiempo.	34
Figura 2. Fórmula para el cálculo de la Disponibilidad genérica sin mantenimiento preventivo	35
Figura 3. Disponibilidad inherente o intrínseca.....	36
Figura 4. Disponibilidad alcanzada	37
Figura 5. Tiempo medio entre mantenimiento MTBM.	37
Figura 6. Tiempo medio de mantenimiento activo M^-	37
Figura 7. Comportamiento de $\lambda(t)$, $f(t)$ y $F(t)$ de algunas distribuciones.....	40
Figura 8. Unidades básicas de producción.....	42
Figura 9. Unidad elemental de mantenimiento.....	43
Figura 10. Sistema integrado de ingeniería de fábricas: Mantenimiento-máquinas-producción.	44
Figura 11. Características definidas para cada elemento	58
Figura 12. Diagrama de Flujo: Simulación para Cálculo de TBF, TTR y Costos de Mantenimiento	60
Figura 13. configuración en serie trabajo 1	62
Figura 14. Configuración en paralelo	62
Figura 15. Panel de propiedades del MTBF/MTRR FlexSim	69
Figura 16. configuración para la maquina 1 MTBF/MTTR	74
Figura 17. Panel de propiedades de las times tables.....	75
Figura 18. Panel de propiedades del Financial Analysis	76
Figura 19. Interfaz de configuración para el usuario	77
Figura 20. Diagrama Comparativo de la Lógica Implementada en FlexSim	78

Figura 21. Diagrama comparativo del estado de avería en FlexSim	79
Figura 22. Diagrama comparativo del estado de mantenimiento preventivo en FlexSim.....	80
Figura 23. Función de confiabilidad para un sistema con una política de MP de nivel crítico de confiabilidad	93
Figura 24. Evaluación del Costo Total Por Cada Escenario	95
Figura 25. Diagrama de bloques para la elaboración del conjunto de transmisión	101
Figura 26. Dispersión de fallas en relación con la confiabilidad de cada trabajo.....	102

Lista de Apéndices

- Apéndice A. Diagrama de flujo prisma
- Apéndice B. Estrategia de Búsqueda y Análisis Bibliométrico
- Apéndice C. Mapa Literario
- Apéndice D. Modelo conceptual Modelo 1
- Apéndice E. Modelo conceptual Modelo 2
- Apéndice F. Verificación del Modelo Computacional Modelo 1
- Apéndice G. Verificación del Modelo Computacional Modelo 2
- Apéndice H. Modelo base 1 escenario 1
- Apéndice I. Modelo base 2 escenario 1
- Apéndice J. Modelo base 2 escenario 2
- Apéndice K. Modelo base 2 escenario 3
- Apéndice L. Modelo base 2 escenario 4
- Apéndice M. Artículo

Resumen

Título: Simulación de Eventos Discretos Aplicada al Análisis de Escenarios de Mantenimiento: Medición de Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad (CMD) y Costos de Mantenimiento *

Autor: Nelson Eduardo Martínez Sarmiento **

Palabras Clave: simulación de eventos discretos, sistemas de mantenimiento, confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, costos de mantenimiento.

Descripción:

La relevancia del sector industrial colombiano, un componente clave para la sostenibilidad y competitividad de las empresas. A medida que la industria avanza hacia la modernización y la adopción de nuevas tecnologías, los costos de producción se convierten en un factor crítico que puede impactar directamente la rentabilidad y el crecimiento económico del país. En este contexto, las actividades de mantenimiento representan una proporción significativa de los costos operativos, oscilando entre el 15% y el 70% de los costos de producción, lo que subraya la necesidad de una gestión eficiente de estas actividades.

La gestión del mantenimiento se ha vuelto cada vez más compleja debido a la diversidad y complejidad de los sistemas productivos, lo que exige un enfoque estratégico que minimice los tiempos de inactividad y maximice la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. Sin embargo, muchas empresas, especialmente las pequeñas y medianas, no reconocen el impacto del mantenimiento en sus resultados financieros, lo que se traduce en niveles de madurez bajos en la aplicación de mejores prácticas.

Además, la toma de decisiones en situaciones de mantenimiento puede ser complicada por la necesidad de equilibrar múltiples criterios, como costos, confiabilidad y disponibilidad. Por lo tanto, es esencial contar con herramientas técnicas que faciliten la toma de decisiones. La simulación de eventos discretos se presenta como una solución viable para modelar y analizar diferentes escenarios de mantenimiento, permitiendo a las empresas evaluar el impacto de diversas estrategias en la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos, y así optimizar sus operaciones en un entorno industrial competitivo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Edwin Alberto Garavito Hernández, Magister en Ingeniería Industrial. Codirector: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez, Magister en Ingeniería Industrial

Abstract

Title: Discrete Event Simulation Applied to the Analysis of Maintenance Scenarios: Measurement of Reliability, Maintainability, Availability and Maintenance Costs*

Author: Nelson Eduardo Martinez Sarmiento**

Key Words: discrete event simulation, maintenance systems, reliability, maintainability, availability, maintenance costs.

Description: The relevance of the Colombian industrial sector as a key component for the sustainability and competitiveness of companies. As the industry progresses towards modernization and the adoption of new technologies, production costs become a critical factor that can directly impact the profitability and economic growth of the country. In this context, maintenance activities account for a significant proportion of operational costs, ranging from 15% to 70% of production costs, highlighting the need for efficient management of these activities.

Maintenance management has become increasingly complex due to the diversity and complexity of production systems, requiring a strategic approach that minimizes downtime and maximizes the reliability and availability of equipment. However, many companies, especially small and medium-sized enterprises, do not recognize the impact of maintenance on their financial results, resulting in low maturity levels in applying best practices.

Moreover, decision-making in maintenance situations can be complicated by the need to balance multiple criteria, such as costs, reliability, and availability. Therefore, it is essential to have technical tools that facilitate decision-making. Discrete Event Simulation presents itself as a viable solution for modeling and analyzing different maintenance scenarios, allowing companies to evaluate the impact of various strategies on reliability, maintainability, availability, and costs, thereby optimizing their operations in a competitive industrial environment.

* Bachelor thesis

** * Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Advisor: Edwin Alberto Garavito Hernández, M.Sc. Industrial Engineering. Co-advisor: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez, M.Sc. Industrial Engineering

Introducción

En Colombia, el sector industrial ha sido y sigue siendo un pilar fundamental en la economía del país. Según el índice de productividad industrial (IPI) publicado por el DANE, en el periodo comprendido entre marzo de 2022 y febrero de 2023, se registraron variaciones positivas en los cuatro subsectores que conforman la industria en Colombia. Se destaca la industria manufacturera, que presentó un aumento del 8,7 %; seguido por el de suministro de electricidad y gas con un 3,7 %; la captación, tratamiento y distribución de agua con un 1,4 % y la explotación de minas y canteras con un 0,4 %. Estos datos indican del dinamismo del sector y su aporte al crecimiento económico del país.

En la actualidad, con el rápido progreso de las tecnologías utilizadas en la industria, es cada vez más importante contar con herramientas que ayuden a la toma de decisiones en situaciones complejas. La función de mantenimiento se considera uno de los criterios más relevantes, ya que permite garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y maquinarias, aumentar su vida útil de los mismos y reducir los costos asociados a paradas no planificadas (Baqqal & El Hammoumi, 2018).

Una herramienta usada actualmente por muchas compañías es la simulación, la cual se utiliza con el fin de modificar los recursos, procesos, políticas, entre otros, sin necesidad de intervenir y modificar el sistema de producción actual (Mourtzis et al., 2014). La simulación tiene dos enfoques principales, continuo y discreto, los cuales dependen del comportamiento dinámico variable en el tiempo. En el enfoque continuo, los valores cambian gradualmente a lo largo de la ejecución de la simulación; mientras que, en el enfoque discreto, que utiliza la simulación de eventos discretos (DES), se basa en la suposición de que el tiempo solo existe en puntos

determinados y que los eventos solo tendrán lugar en estos puntos; por lo tanto, es más apropiado para sistemas de operaciones detalladas donde cada elemento debe rastrearse dentro de la dinámica organizacional (Robinson, 2004).

Por lo tanto, la industria realmente ha comenzado a apreciar los beneficios de aplicar metodologías de modelado y simulación como una función de apoyo para permitir la evaluación del comportamiento y predecir el resultado futuro de la gestión del mantenimiento. Ali et al. (2008) realizaron una evaluación del rendimiento de la fabricación automotriz, especialmente en el reconocimiento de los cuellos de botella y la elección de las políticas de mantenimiento mediante simulación y optimización. Roux et al. (2008) se apoyaron en un nuevo enfoque que combina algoritmos de optimización y métodos de simulación en el esfuerzo de evaluar la estrategia de rendimiento del mantenimiento para sistemas de fabricación. Finalmente, Oyarbide-Zubillaga et al. (2008) han optado por centrarse en la optimización del mantenimiento preventivo en el campo de la fabricación.

Dado lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un recurso experimental para evaluar el impacto de diversas estrategias de mantenimiento. Para ello, se creó un modelo de simulación que replicó el comportamiento de los procesos de mantenimiento bajo distintos escenarios. De esta manera, se evaluó su efecto en los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), así como en los costos asociados. Obtener una visión cuantitativa de su impacto, facilitando la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento y potencialmente optimizando los costos y el rendimiento del sistema.

En términos generales, este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: en el capítulo 1, 2 y 3, se presentan las especificaciones generales que enmarcan el desarrollo del presente proyecto; en el capítulo 4 se puede apreciar la metodología propuesta para la revisión de

literatura y la construcción del modelo a realizar; en el capítulo 5 se presenta el marco teórico. En el capítulo 6 se presenta la respectiva revisión de literatura donde se muestran aplicaciones de simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento. Posteriormente, en el capítulo 7 se aborda la aplicación del marco metodológico para el desarrollo de los modelos de simulación enfocados a sistemas de mantenimiento con su respectiva verificación y análisis de los escenarios planteados y finalmente en el capítulo 8 y 9 se realizan las conclusiones y recomendaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, el cumplimiento de los objetivos planteados para la presente investigación se presenta en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Cumplimiento de objetivos

Objetivos específicos	Cumplimiento
Identificar las aplicaciones de simulación discreta en mantenimiento, a partir de una revisión de literatura.	Capítulo 6
Diseñar los modelos conceptuales para la medición de CMD y costos de mantenimiento a partir de análisis matemáticos y probabilísticos.	Capítulo 7
Desarrollar el modelo de simulación a partir de los modelos conceptuales definidos.	Capítulo 7
Evaluar los escenarios de mantenimiento basados en la experimentación y el análisis de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.	Capítulo 7
Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.	Apéndice M

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

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.

1.1.1. *Objetivos Específicos*

- Identificar las aplicaciones de simulación discreta en mantenimiento, a partir de una revisión de literatura.
- Diseñar los modelos conceptuales para la medición de CMD y costos de mantenimiento a partir de análisis matemáticos y probabilísticos.
- Desarrollar el modelo de simulación a partir de los modelos conceptuales definidos.
- Evaluar los escenarios de mantenimiento basados en la experimentación y el análisis de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.

2. Planteamiento del problema

El sector industrial es uno de los componentes clave en la economía de cualquier país, debido a su contribución significativa al Producto Interno Bruto (PIB) y a la creación de empleo en diversas áreas. En particular, los costos de producción son factores cruciales que pueden impactar directamente en la rentabilidad de este sector, lo que a su vez puede afectar a la capacidad de dichos costos para contribuir al crecimiento económico del país.

En este contexto, es importante destacar que las actividades de mantenimiento pueden representar una proporción de los costos de producción, que pueden variar entre el 15% y el 70% (Bevilacqua & Braglia, 2000). En un mercado altamente competitivo, la gestión del mantenimiento se ha vuelto cada vez más relevante, ya que puede ayudar a reducir el tiempo de inactividad de los equipos y, por consiguiente, los costos asociados (Kothamasu & Huang, 2007). Entonces, claramente, lo mejor para estas organizaciones es tratar de minimizar los costos relacionados con el mantenimiento y; al mismo tiempo, maximizar la confiabilidad y disponibilidad de sus maquinarias, para mantener su rentabilidad y contribuir al crecimiento económico del país.

El mantenimiento, desde la perspectiva de la gestión de activos, ha ido aumentando su rol significativo en la actividad industrial, ha sido uno de los cambios más relevantes a nivel gerencial. Este cambio se debe a un entorno industrial altamente competitivo, donde el área de mantenimiento se vuelve relevante debido a la diversidad y la complejidad de los sistemas productivos que involucran una gran cantidad de activos físicos. Por lo tanto, el mantenimiento se convierte en un proceso crítico que se extiende a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, integrado en la estrategia operativa y de gestión de activos de la empresa. Además de los costos, también es importante considerar la contribución real del mantenimiento al negocio en términos de

disponibilidad, confiabilidad, mantenibilidad de los equipos e instalaciones y el aporte a la calidad de los productos y servicios (Arata & Furlanetto, 2005).

Por lo anterior, el mantenimiento es una actividad crítica en muchos sectores industriales, que busca garantizar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de los equipos y sistemas y reducir los costos asociados con fallos y reparaciones. Sin embargo, la gestión efectiva del mantenimiento puede resultar compleja debido a la necesidad de considerar múltiples criterios, a veces contradictorios, como el costo y la disponibilidad. Además, las situaciones reales pueden ser muy complejas y cambiantes, lo que puede dificultar la toma de decisiones. Por lo tanto, es esencial contar con herramientas técnicas que permitan tomar decisiones con criterio en situaciones complejas, en lugar de depender únicamente de la experiencia y el conocimiento previo (Baqqal & El Hammoumi, 2018).

Debido a la complejidad de los sistemas de mantenimiento en la industria, las técnicas de modelado analítico tienen una aplicabilidad limitada (Nowakowski & Werbińska, 2009). Es por esto por lo que la simulación, se ha convertido en una herramienta esencial, ya que proporciona una forma efectiva de modelar sistemas complejos y, gracias a la flexibilidad de la técnica de simulación de eventos discretos, esta permite modelar las interacciones entre diversas estrategias de mantenimiento y sus efectos sobre el sistema, teniendo en cuenta las restricciones y los parámetros de manera real (Alrabghi & Tiwari, 2016).

Ahora bien, la simulación se ha convertido en una herramienta clave para apoyar la toma de decisiones, ya sea en el ámbito operativo, táctico o estratégico. Al simular el comportamiento del sistema, permite evaluar diversos escenarios y realizar mejoras de manera segura y controlada, sin afectar el sistema real.

Para abordar este problema de investigación, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica existente sobre la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento. Se desarrollarán modelos de simulación de eventos discretos para sistemas de mantenimiento en base a la literatura y se utilizarán para evaluar diferentes escenarios de mantenimiento.

3. Justificación

Unas de las principales funciones del mantenimiento es proteger la funcionalidad de los equipos y máquinas en buen estado a través del tiempo. Esta función es clave para el logro de las metas y objetivos de las empresas pues contribuye a reducir costos, mejorar la calidad e incrementar la productividad. Por lo tanto, las palabras CMD, forman parte de la cotidianidad del mantenimiento. Es por esta razón que, la disponibilidad es un tema importante no solo para el departamento de mantenimiento, ya que permite extender la vida útil y mantener los equipos en funcionamiento; sino también, es importante para las finanzas de la empresa ya que ahorra costos de reposición o causa pérdidas en la producción debido al tiempo de inactividad innecesario del equipo (Mesa Grajalez et al., 2006). De esta manera, la gestión de activos toma la forma de un sistema de gestión de mantenimiento que permite conectar todos los departamentos de una empresa para trabajar de forma integral, con el fin de optimizar todos los activos y mejorar los procesos de producción (Arata & Furlanetto, 2005).

Dentro del proceso de gestión de activos también se adopta el concepto del ciclo de vida; es por esto por lo que uno de los principales retos de las empresas es garantizar la máxima rentabilidad de la inversión, aprovechando sus activos a lo largo de su ciclo de vida y adaptándolos

a las necesidades actuales y futuras, al tiempo que prolonga la vida útil de sus máquinas. Por tal motivo, el soporte proporcionado por la gestión de activos a lo largo del ciclo de vida maximiza el uso de recursos a lo largo del tiempo, permitiendo acortar los tiempos de realización de un proyecto, mantenimiento u operación. Esto garantiza el mayor retorno de la inversión en la gestión de operación y mantenimiento que representan una alta proporción del capital de trabajo total de la empresa (Portafolio, 2015).

La Asociación Colombiana de Ingenieros (ACIEM), con el apoyo de la Comisión de Gestión de Activos y Mantenimiento, viene impulsando en Colombia la realización de diagnósticos para conocer cómo las empresas están implementando las mejores prácticas de ingeniería en el campo de la gestión y mantenimiento de activos a nivel nacional en gestión, ejecución, costos, formación y entorno.

Es preocupante que un 50% de los encuestados no reconozcan en el Mantenimiento su impacto en el negocio, lo cual se refleja en niveles de madurez relativamente bajos en la aplicación de mejores prácticas. El impacto es diferencial con la gran empresa, pero aún hay un 25% de los encuestados que no perciben el impacto en los procesos de mantenimiento. El hecho de que la pequeña y mediana empresa le dé poca importancia al impacto del mantenimiento en los resultados de la compañía va de la mano con el desconocimiento de la magnitud de los costos de Mantenimiento (Medina et al., 2021, p. 79).

Por tal motivo, los costos de mantenimiento son un elemento importante en el balance de una empresa; por esta razón, la mayoría de los activos de la organización son las estructuras y equipos, que tienen un impacto directo en el patrimonio neto de la empresa y su manera de generar ganancias.

La forma en que se evalúa cada indicador de los sistemas de producción y servicios, como la confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad, es amplia y variada. Por lo tanto, una metodología CMD consiste en poder predecir el comportamiento del equipo en términos de falla o reparación, duración de uso, mantenimiento planificado y otras operaciones de programación de máquinas para establecer capacidades y horarios de trabajo específicos (Mora Gutiérrez, 2009).

Para realizar la predicción de la metodología CMD, se presentan diversas alternativas que son diferentes en metodología y fundamentación técnica pero que persiguen un mismo objetivo. Siguiendo a Mora Gutiérrez (2009) los modelos de predicción son los siguientes:

- Puntual: Métodos de cálculos puntuales o promedios: se basa en la aplicación de promedios de cada uno de los parámetros de fallas, reparaciones, tiempos útiles y otras variables por calcular; su utilización es simple y recomendada para aquellas empresas que no han practicado la metodología CMD, siendo sus resultados no muy aceptables, pero de gran utilidad para conocer los algoritmos de cálculo de cada opción de disponibilidad.

- Distribuciones: Métodos de distribuciones: utiliza los mismos conceptos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad del modelo puntual y se basa en la utilización de diferentes distribuciones de probabilidad que permiten modelar mucho mejor que un método simple las variables CMD.

- HPP y NHPP: Métodos de modelos HPP o NHPP: permite la predicción de elementos o sistemas reparables (se puede recuperar después de sufrir la falla). Utiliza el proceso homogéneo de Poisson (HPP) y el proceso no homogéneo de Poisson (NHPP).

- Series temporales: Método de previsión con el uso de técnicas de series temporales: utiliza un modelo universal de pronósticos basado en tres etapas del método científico: análisis previo, lanzamiento de hipótesis y verificación.

- Otros: Combinaciones de los anteriores u otros: se puede realizar la combinación de dos o más métodos de predicción para lograr una modelación predictiva

Actualmente, la simulación es el proceso de representar un sistema en un computador y luego usar pruebas bien diseñadas (escenarios) para evaluar su desempeño. De esta manera, los sistemas se pueden analizar, planificar y diseñar. De aquí nace la pregunta de ¿Por qué es necesario construir modelos que representen la realidad de un sistema y que sean interpretables por computador? Mucha de las actividades, procesos o servicios, que existen en el mundo real a menudo se denominan sistemas y, para estudiarlos científicamente, se realizan algunas suposiciones sobre cómo funcionan. Estas suposiciones, toman una forma de relaciones matemáticas o lógicas, así forman un modelo que se utiliza para comprender cómo interviene en el sistema; si las relaciones entre los componentes que componen el modelo son lo suficientemente simples, se pueden utilizar métodos matemáticos (como el cálculo o la estadística) para obtener información precisa sobre los problemas de interés, lo que se denomina explicación analítica. Sin embargo, la mayoría de los sistemas reales son complejos, por lo que es necesario estudiarlos mediante simulación para hacer realidad estos modelos y poder evaluarlos analíticamente; en consecuencia, las aplicaciones en modelado son muchas y variadas; A menudo se utilizan en ingeniería, economía, producción y gestión. Lo cual es necesario construir un modelo artificial con objetos y probarlos dinámicamente antes de interactuar con el sistema real, así reducir el tiempo, el costo asociado con pruebas físicas dando lugar a soluciones que pueden mantener o mejorar la eficiencia al menor precio(Beaverstock et al., 2017).

Finalmente, se plantea un proyecto de simulación, como alternativa para comprender completamente los puntos clave que gobiernan un sistema de mantenimiento, con el fin de analizar el comportamiento del CMD y cada una de sus variables de cálculo.

4. Metodología de investigación

4.1. Metodología para la revisión de la literatura

En la fase inicial del proyecto, se busca profundizar en las investigaciones realizadas sobre la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento. Para llevar a cabo esta revisión, se empleará una metodología basada en la declaración PRISMA (Yepes-Nuñez et al., 2021), diseñada para mejorar la transparencia y calidad de las revisiones sistemáticas. Se utilizará un diagrama de flujo para detallar los criterios de exclusión aplicados, con el objetivo de seleccionar los artículos más relevantes. Además, se propone una ecuación de búsqueda para construir una base de datos sólida sobre el tema de interés. Con los resultados obtenidos, se realizará un análisis bibliométrico, eligiendo artículos en función de factores específicos para ampliar conocimientos y fundamentar la discusión sobre las aplicaciones de la simulación en diversos contextos de mantenimiento. Los principales pasos para considerar en el proceso de revisión de la literatura se incluyen en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Metodología para la revisión de literatura

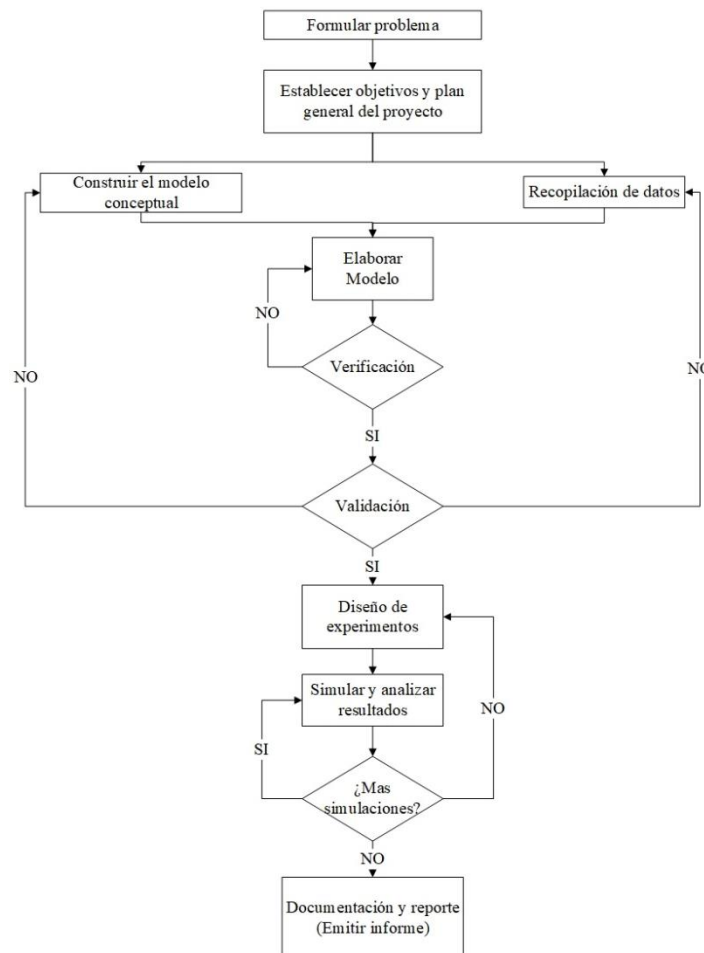
Fases		Descripción
Diseño de la estrategia de búsqueda	Fuentes secundarias y contenido Web	Búsqueda general en Google Académico, biblioteca virtual y catálogos de editoriales sobre los temas de interés con el fin de acercarse al tema en el cual se va a investigar
	Selección de los términos y estructuración inicial de la ecuación de búsqueda	Estructuración de la ecuación de búsqueda inicial en torno a los términos claves seleccionados
	Procedimiento de búsqueda	Digitalización de la ecuación de búsqueda preliminar y realización de la respectiva búsqueda en la base de datos
Presentación de los resultados de la búsqueda	Análisis bibliométrico (ver apéndice B)	Realización la descarga de los metadatos sobre los documentos clasificados para su análisis bibliométrico
	Revisión preliminar de literatura	Realización una revisión preliminar de la literatura encontrada para identificar las aplicaciones de simulación en mantenimiento

Continuación **Tabla 2**

Fases	Descripción	
Almacenamiento y registro de los resultados de la búsqueda	Almacenamiento de las referencias	Uso de un gestor de referencias bibliográficas (Mendeley)
Organización de los resultados de búsqueda		Diseño de un mapa conceptual de la literatura (Literature Map) (ver apéndice C)
Redacción y discusión de los resultados		Exposición crítica de lo conocido sobre la simulación de eventos discretos en mantenimiento

4.2. Metodología para la simulación

Se presenta un marco metodológico para el desarrollo del proyecto de simulación de sistemas de mantenimiento, que ofrece una guía para la construcción y evaluación del modelo, siguiendo las prácticas establecidas en el campo según Banks (1996).



4.2.1. Formular problema

En esta primera etapa, se define el problema a abordar. Para una formulación sólida, el analista de simulación debe desarrollar un conjunto de suposiciones que establecerán los parámetros y condiciones iniciales del estudio. Esta formulación inicial es crucial para definir los objetivos globales, las preguntas específicas que se responderán y las medidas de desempeño que se utilizarán para evaluar la efectividad de cada escenario planteado.

4.2.2. Establecimiento de objetivos

Los objetivos indican las preguntas que serán respondidas mediante el estudio de simulación. El plan del proyecto debe incluir una descripción de los diversos escenarios que serán investigados, el alcance que va a tener, el marco de tiempo, los recursos, el hardware y software que se va a emplear.

4.2.3. Modelo conceptual para el desarrollo de proyecto de simulación

En esta sección, se resalta los aspectos críticos necesarios para construir un modelo conceptual de simulación. Se describe de manera concisa las etapas involucradas y, al mismo tiempo, proporcionamos una descripción abstracta y clara de las propiedades esenciales que deben considerarse en el modelo. Esto permite especificar con precisión todos los detalles necesarios para el modelado.

4.2.3.1. Caracterización de las entidades

En la fase inicial del proceso de simulación, se definen las entidades con las que se trabajará en el modelo. Es importante resaltar que la caracterización de entidades en simulación consiste en representar grupos de elementos en lugar de modelar elementos individuales mientras se desplazan en un sistema. Este enfoque se vuelve particularmente útil cuando se maneja un gran volumen de elementos en movimiento en un sistema de salud. Además, se adapta fácilmente para modelar

situaciones en las que el número de elementos representados por una entidad cambia a medida que avanza la simulación. Este ajuste se logra mediante la modificación de un atributo asociado a la entidad, que refleja cuántos elementos representa en un momento dado.

4.2.3.2. Elementos del modelo conceptual

Después de haber definido las entidades que serán parte integral del modelo que estamos por construir, procedemos a establecer los elementos fundamentales que conformarán la estructura formal del modelo. Estos elementos incluyen eventos, atributos, variables de estado y medidas de desempeño. Cada uno de estos componentes desempeña un papel esencial al proporcionar una visión más completa del sistema y al permitir la integración de procesos clave durante el proceso de diseño y construcción del modelo computacional. Para una comprensión más detallada, aquí está lo que representan individualmente:

Eventos: Los eventos son sucesos que pueden tener lugar durante una simulación y que están vinculados al proceso que se está analizando. Estos eventos tienen la particularidad de ocurrir en momentos específicos y tienen la capacidad de alterar el estado del sistema, así como los atributos o variables que lo componen. Pueden clasificarse en dos categorías: endógenos, cuando se desencadenan debido a condiciones internas del modelo, y exógenos, cuando se originan por factores externos al sistema en sí. Ejemplos de eventos incluyen fallos y reparaciones en las máquinas, los cuales pueden afectar significativamente el flujo de trabajo en un sistema de producción.

Atributos: Los atributos son características que se utilizan para describir y distinguir entre las entidades dentro del modelo. Cada entidad posee atributos específicos con valores que pueden variar de una entidad a otra. Estos atributos desempeñan un papel crucial en la determinación del comportamiento y los procesos relacionados con las entidades.

Variables de estado: Las variables de estado son elementos que definen el modelo y reflejan características esenciales del sistema en cuestión. A diferencia de los atributos, los valores de las variables de estado pueden cambiar a lo largo de la simulación, independientemente de la cantidad de entidades definidas en el modelo. Estas variables pueden ser predefinidas por el software de simulación o configuradas por el usuario para adaptarse a las necesidades específicas de la investigación.

Medidas de desempeño: Las medidas de desempeño son métricas fundamentales para evaluar y comparar alternativas dentro de un sistema simulado. Estas métricas se centran en calcular valores que permiten realizar análisis estadísticos con el fin de determinar el escenario óptimo, medir el comportamiento del sistema y evaluar la eficiencia de los procesos. Algunos ejemplos de medidas de desempeño incluyen la confiabilidad, que evalúa la probabilidad de que un sistema funcione sin problemas; la mantenibilidad, que evalúa la facilidad de reparar y mantener el sistema; y la disponibilidad, que mide el tiempo en que el sistema está operativo y listo para su uso. Estas medidas son esenciales para tomar decisiones informadas en la gestión y mejora de sistemas complejos.

4.2.4. Recopilación de datos

Durante esta etapa, se obtienen y organizan los datos necesarios para alimentar el modelo y garantizar resultados precisos. Es fundamental asegurarse de que los datos recopilados sean representativos del sistema que se está estudiando. Además, se debe verificar la calidad de los datos y corregir los posibles errores o inconsistencias. La construcción del modelo y la recopilación de datos se presentan son procesos simultáneos.

4.2.5. Construcción del modelo computacional

En la construcción del modelo de simulación, se utilizará el software FlexSim, una poderosa herramienta que brinda la capacidad de modelar, analizar, visualizar y optimizar diversos procesos industriales. Mediante este software, se creará un modelo verificado que se ajuste a los parámetros definidos, basándose en la información previamente analizada y validada. En los resultados obtenidos a través de este modelo, se podrá reflejar de manera precisa el comportamiento del sistema, lo que permitirá una comprensión más detallada del mismo.

4.2.6. Verificación y validación del modelo

En esta etapa, la verificación del modelo se centra en su correcto funcionamiento operativo. Es muy recomendable llevar a cabo la verificación de manera constante, en vez de esperar que el modelo esté completamente construido. Por otra parte, la validación implica asegurarse de que el modelo conceptual refleje de manera precisa y fiel el sistema real en cuestión. Mediante la validación, se verifica si el modelo captura de manera adecuada los comportamientos, las interacciones y las características esenciales del sistema en estudio.

4.2.7. Diseños de experimentos

La etapa de diseño experimental implica tomar decisiones importantes para cada escenario que será simulado. Estas decisiones incluyen determinar la duración de la ejecución de la simulación, el número de ejecuciones o réplicas necesarias, así como el enfoque de inicialización que se utilizará. Se deben establecer criterios claros y definidos para cada escenario, considerando las particularidades del sistema y los objetivos del estudio. Al tomar estas decisiones de diseño experimental, se busca obtener información significativa y precisa que permita comprender y analizar adecuadamente el sistema en estudio.

4.2.8. Ejecución y análisis de los resultados de la simulación

Se lleva a cabo la simulación de los escenarios definidos, registrando datos relevantes sobre el rendimiento del sistema. Estos datos se utilizan posteriormente en el análisis para calcular y evaluar diferentes medidas de rendimiento, que proporcionan información importante sobre el desempeño del sistema en estudio. El análisis de estas medidas permite obtener conclusiones significativas y tomar decisiones en relación con los escenarios simulados.

4.2.9. Documentación y reporte.

Los resultados de todo el análisis deben ser informados de manera clara y concisa. Esto permitirá al usuario revisar la formulación final, las alternativas consideradas, los criterios utilizados para comparar los sistemas alternativos, los resultados de los experimentos y las recomendaciones del analista, en caso de que las haya. La documentación y los informes desempeñan un papel fundamental en la comunicación de los hallazgos de la simulación y garantizan una comprensión clara y completa de los resultados obtenidos.

5. Marco Teórico

Para lograr una ejecución óptima del proyecto de investigación, es fundamental definir con claridad los conceptos y enfoques que serán utilizados en el análisis de escenarios de mantenimiento mediante simulación de eventos discretos. Esto incluye, entre otros aspectos, la definición precisa de la simulación de eventos discretos como herramienta clave para modelar los procesos de mantenimiento, así como la comprensión de los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CMD). También se abordará la importancia de las distribuciones de probabilidad en la predicción de fallas y tiempos de reparación, y se revisarán los tipos de

mantenimiento y los costos asociados. Establecer estos términos desde el inicio proporciona un marco conceptual robusto, asegurando coherencia y rigor en el proceso investigativo, y facilitando la comunicación y comprensión del enfoque del proyecto.

5.1. Simulación

La simulación es el desarrollo de un modelo lógico matemático de un sistema, de tal forma que se tiene una imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo. La simulación comprende la creación de un escenario artificial (modelo) y el análisis de este para detectar los problemas que presenta el sistema operacional representado. La simulación es una herramienta indispensable para resolver muchos de los problemas que se presentan en la realidad (Banks et al., 2005).

De acuerdo con Thomas H. Taylor, la simulación se define como:

Una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesaria para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempos (Coss Bu, 2004, pp. 11–12).

De igual manera, Shannon (1988) la define por su parte como: El proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Finalmente, (Robinson (2004) define la simulación como: “experimentación con una imitación simplificada de un sistema de operaciones a medida que avanza en el tiempo, con el fin de comprender mejor y/o mejorar ese sistema.” (p. 3).

5.2. Simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos es la relación de modelos de sistemas en los cuales el estado de la variable cambia en intervalos discretos de tiempos. Estos cambios ocurren cuando sucede un evento; de esta manera, los valores de las variables que se manejan en el modelo se actualizan.

Según García Dunna et al. (2013), la simulación de eventos discretos es el conjunto de reacciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado. De esta manera, el objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema. Por esta razón, un sistema es un conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo; desde el punto de vista de la simulación, tales elementos deben tener una frontera clara para la construcción de lo que será su modelo de simulación; entre ellos se encuentran: entidades, estado del sistema, eventos actuales y futuros, localizaciones, recursos, atributos, variables y reloj de la simulación, los cuales a continuación se describen:

- **Entidad:** son los flujos de entradas y salidas del sistema
- **Estado del sistema:** es la condición que guarda el sistema bajo estudio en un momento de tiempo determinado.
- **Eventos:** eventos pueden ser de dos tipos, actuales y futuros. Eventos actuales son aquellos que producen un cambio en el sistema en un tiempo dado y los eventos futuros son cambios que se presenta después de un tiempo dado.
- **Localizaciones:** son los lugares en donde la entidad espera para ser procesada.
- **Recursos:** se refiere a los dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación.

- **Atributos:** son aquellas que están ligadas a la entidad y que resalta una característica única.
- **Variables:** es una cantidad cuyos valores pueden modificar el resultado de una ecuación matemática y guardar información numérica ya sea de forma continua o discreta.
- **Reloj de sumación:** es el encargado de contar el tiempo de simulación.

5.3. Análisis CMD (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad)

El análisis CMD (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad), conocido también como análisis RAM (Reliability, Availability and Maintainability) permite pronosticar, en un periodo determinado de tiempo que el sistema de mantenimiento esté en capacidad de cumplir su función (Disponibilidad). También, permite conocer la probabilidad de que el sistema sea reparado en condiciones normales de operación dentro de un tiempo dado (Mantenibilidad). Finalmente, indica la probabilidad de que el sistema desempeñe satisfactoriamente sus funciones por un espacio de tiempo y bajo un determinado conjunto de condiciones operativas (Confiabilidad) (Mora Gutiérrez, 2007).

5.3.1. Confiabilidad.

La Confiabilidad es la propiedad de un sistema (elemento, componente o parte) de cumplir las funciones previstas para él, manteniendo su capacidad de trabajo bajo los regímenes y condiciones de explotación prescritos y durante el intervalo de tiempo requerido. De igual manera, representa la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña, sin fallas durante un período de tiempo bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno (Mora Gutiérrez, 2009b). A su vez, la norma técnica colombiana GTC

62, define la confiabilidad como la capacidad de un activo o elemento para realizar una función requerida en condiciones específicas para un intervalo de tiempo dado (INCONTEC, 1999).

En términos estadísticos, la curva de confiabilidad es la representación gráfica del funcionamiento después de que transcurre un tiempo t en un período T total, si T es una variable aleatoria que define la vida útil de un componente con función de distribución, $F(t)$ corresponde a la función de probabilidad acumulada de falla (Mora Gutiérrez, 2009b).

De esta manera, la función de confiabilidad $R(t)$ del componente viene dada por:

$$R(t) = P [T > t] = 1 - F(t).$$

Donde:

$R(t)$ = función de confiabilidad del sistema.

$P[T > t]$ = probabilidad que el sistema falle en un tiempo t .

$F(t)$ = función de probabilidad acumulada de falla.

5.3.2. Mantenibilidad.

Según Mora Gutiérrez (2009), se denomina mantenibilidad a la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo puedan regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal después de una avería, falla o interrupción productiva (funcional o de servicio); esto se produce mediante una reparación que implica realizar unas tareas de mantenimiento para eliminar las causas inmediatas que generan la interrupción. La normalidad del sistema al restaurar su funcionalidad se refiere a su cuerpo y a su función.

Se representa por $M(t)$ que es la función de distribución de la variable aleatoria TTR (Time to repair). Esto significa que la probabilidad de la variable aleatoria tiene un valor igual o menor

que algún valor particular a t . La Mantenibilidad indica la probabilidad de que la función del sistema se recobre en el momento de mantenimiento o antes (Knezevic, 1996).

$$M(t) = P [TTR \leq t]$$

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt$$

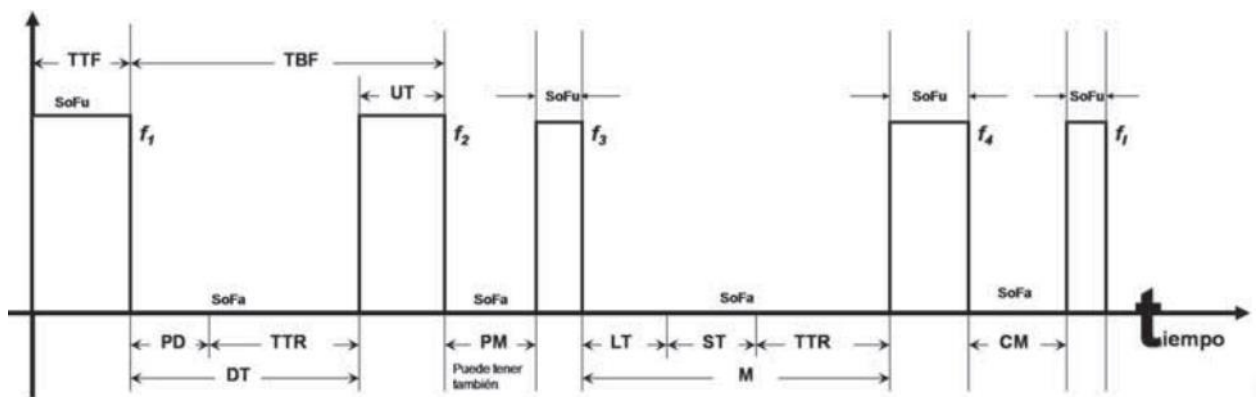
Donde $m(t)$ es la función de densidad de TTR.

5.3.3. Disponibilidad.

La Disponibilidad es una medida de la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables. El tiempo total considerado incluye los tiempos de operación, de reparación, de inactividad, de mantenimiento preventivo (en algunos casos) y administrativo, de funcionamiento sin producir y logístico.

Figura 1.

Representación del estado de funcionamiento de una máquina a lo largo del tiempo.



Nota. Tomado del libro Mantenimiento: Planeación, ejecución y control por Mora Gutiérrez (2009b, p.70)

Las siglas de la **Figura 1** corresponden a: TTF Tiempo hasta fallar. TBF Tiempo entre fallas. UT Tiempo útil en que el equipo funciona correctamente. DT Tiempo no operativo. f_i Falla i -ésima. TTR Tiempo que demora la reparación. CM Tiempo que demora la reparación correctiva o modificativa. PM Tiempo de mantenimientos planeados. LT Tiempos logísticos o administrativos. ST Tiempo de entrega de repuestos insumos o recursos humanos. NTTR Tiempo neto para reparar. PD retrasos de producción para informar y notificar a mantenimiento de la no funcionalidad del equipo (Mora Gutiérrez, 2009b).

El análisis de la disponibilidad requiere conocer cuáles son los datos que se deben tener en cuenta para su cálculo. Se crea un perfil de funcionalidad del equipo cuando sus datos de funcionamiento y parada llevan un registro. Se define SoFu como estado de funcionamiento y SoFa estado de falla.

5.3.3.1. Disponibilidad genérica. Se aplica a partir del uso de los UT y DT, es muy útil donde no hay un desglose de las pérdidas de tiempo que afectan el tiempo total de DT. Es una disponibilidad que suele ser usada para los inicios en procesos donde se quiere medir este parámetro (Mora Gutiérrez, 2009b).

Figura 2.

Fórmula para el cálculo de la Disponibilidad genérica sin mantenimiento preventivo.

$$A_c = \frac{\text{Media de los tiempos útiles con funcionamiento}}{\text{Media de tiempos útiles} + \text{Media de tiempos de no funcionalidad}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m}}{\frac{\sum_{i=1}^m UT_i}{m} + \frac{\sum_{j=1}^n DT_j}{n}}$$

En la **Figura 2**, donde: UT_i Tiempos útiles. DT_j Tiempos no funcionales de la máquina. m Número de eventos de UT; n Número de eventos de DT.

5.3.3.2. Disponibilidad inherente o intrínseca. Se aplica a partir del uso del MTBF y el MTTR, es muy útil donde se desea controlar las actividades CM (Mantenimiento correctivo), tiene algunas restricciones, como son: los tiempos útiles (UT) deben ser mucho mayores que los tiempos no disponibles (DT); los tiempos de retrasos o demoras administrativas (LT) deben ser mínimos y/o tienden a cero. Solo tiene en cuenta daños, fallas o pérdidas de funcionalidad, por razones propias del equipo (Mora Gutiérrez, 2009b).

La **Figura 3** muestra la disponibilidad inherente o intrínseca.

Figura 3.

Disponibilidad inherente o intrínseca.

$$Disponibilidad\ inherente = A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

5.3.3.3. Disponibilidad alcanzada. Se aplica a partir del uso del tiempo medio entre mantenimiento (MTBM), tiempo medio entre mantenimiento correctivo (MTBMc), tiempo medio entre mantenimiento preventivo (MTBMp), tiempo medio entre reparación (MTTR), tiempo neto medio para ejecutar tareas proactivas de mantenimiento planeados (MP). Es muy útil cuando se desea controlar actividades de mantenimiento planeadas y las no planeadas por separado. No tiene en cuenta los tiempos logísticos, ni los administrativos y los de demora por suministro de repuestos. Esta es la disponibilidad que ha sido escogida para usar en el cálculo de parámetros CMD en este proyecto.

La disponibilidad alcanzada es la relación entre el tiempo medio entre mantenimientos (MTBM) y la suma del tiempo medio entre mantenimiento (MTBM) más el tiempo medio de mantenimiento (\bar{M}).

Figura 4.*Disponibilidad alcanzada.*

$$\text{Disponibilidad alcanzada} = A_1 = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}}{\frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} + \frac{MTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}$$

El tiempo medio entre mantenimientos MTBM es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos, es una función de la frecuencia de los mantenimientos planeados y no planeados, cuando no hay mantenimientos preventivos el MTBM se aproxima al MTBF (Blanchard et al., 1994).

Figura 5.*Tiempo medio entre mantenimiento MTBM.*

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

El tiempo medio de mantenimiento \bar{M} es el tiempo medio de mantenimiento activo que se necesita para efectuar una tarea de mantenimiento. Es función de los tiempos medios de mantenimiento correctivo y mantenimiento planeado; en sus funciones aplicadas, solo tiene en cuenta los tiempos activos de mantenimiento, no cuenta los tiempos administrativos ni los del tipo logístico (Blanchard et al., 1994).

Figura 6.*Tiempo medio de mantenimiento activo \bar{M} .*

$$\bar{M} = \frac{\frac{MTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}}$$

En la **Figura 6**, donde: MTBMc Tiempo medio entre mantenimientos no planeados. MTBMp Tiempo medio entre mantenimientos planeados. MTTR Tiempo neto medio para realizar la reparación. Mp Tiempo neto medio para ejecutar las tareas proactivas (Mora Gutiérrez, 2009b).

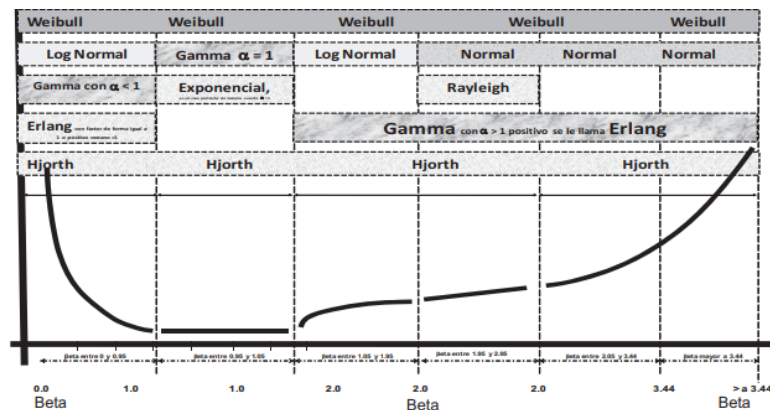
5.4. Distribuciones de probabilidad

Los conceptos de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad como probabilidades, son los tres más importantes indicadores del mantenimiento, su estudio se basa en función del tiempo, por lo que cualquier intento para su determinación en casos prácticos requiere de la medición del tiempo útil o de operación sin fallos y el inoperante o en fallo de los equipos. El fallo del equipo puede ser definido como un suceso cuya realización provoca, o bien la pérdida de capacidad para realizar las funciones requeridas o bien la pérdida de capacidad para satisfacer los requisitos especificados, independientemente de las razones de su aparición (Knezevic, 1996).

Como referencia del comportamiento de las máquinas se debe tener en cuenta la conocida curva de la bañera o Davies (ver **Figura 11**).

Figura 11.

Distribuciones más aplicadas en curva de Davies, tasa de fallas.



Nota. Tomado del libro Mantenimiento: Planeación, ejecución y control por Mora Gutiérrez (2009b)

Las distribuciones de tiempo de vida conocidas como tradicionales o clásicas de mayor aceptación y uso, en análisis de confiabilidad se describen a continuación:

5.4.1. Distribución Normal.

Se usa cuando se requiere describir algunos fenómenos de envejecimiento de equipos, modelos de fatiga, fenómenos naturales y cuando los equipos se afectan desde un comienzo por el desgaste, se ubica en la tercera fase de la curva de la bañera (Mora Gutiérrez, 2009b).

5.4.2. Distribución Log Normal.

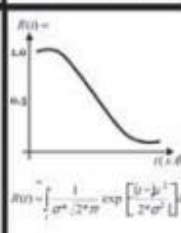
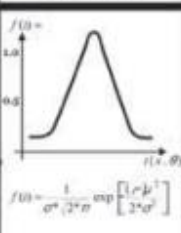
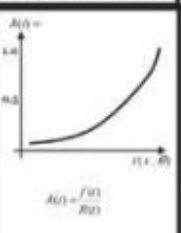
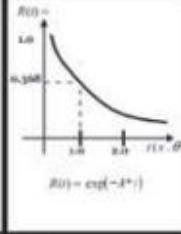
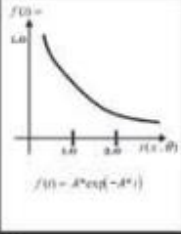
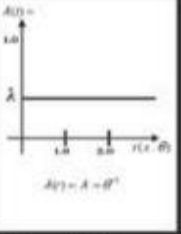
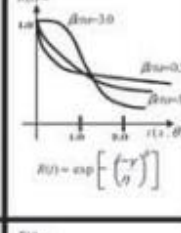
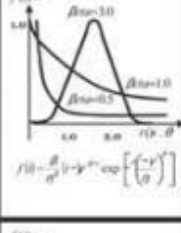
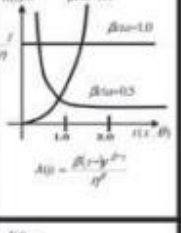
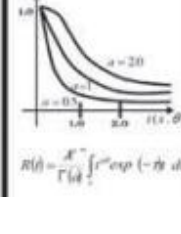
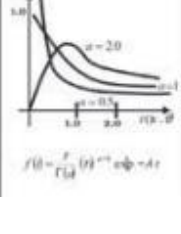
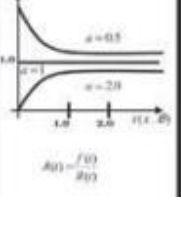
Se utiliza comúnmente como una distribución de tiempo de reparación, dado que la tasa de reparación se define análoga a la tasa de fracaso, por lo que cuando se modela el tiempo de reparación, es natural suponer que la tasa de reparación es cada vez mayor, por lo menos en una primera fase, lo que significa que la probabilidad de completar la acción de reparación dentro de un corto intervalo de tiempo aumenta con el tiempo de reparación transcurrido (Rausand & Høyland, 2004).

5.4.3. Distribución de Weibull.

Es la distribución de mayor aceptación para determinar CMD, su función de tasa de fallas se ajusta a cualquier fase de la curva de la bañera, es la única probabilidad que puede utilizarse para representar Confiabilidad y Mantenibilidad de cualquier tipo de equipo (Mora Gutiérrez, 2009b).

Figura 7.

Comportamiento de $\lambda(t)$, $f(t)$ y $F(t)$ de algunas distribuciones

Distribución	Parámetros	Función de Confiabilidad $R(t) = 1 - F(t)$	Función de Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$	Función de Tasa de Falla $A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	Sus usos son relevantes en
Normal	Media, μ Desviación estándar, σ	 $R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt$	 $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	 $A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	Distribución de vida de elementos o sistemas sometidos a grandes cargas o esfuerzos
Exponencial	MTBF, θ $\theta = \lambda^{-1}$	 $R(t) = \exp(-\lambda t)$	 $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$	 $A(t) = \lambda = \theta^{-1}$	Distribución de vida de elementos o sistemas complejos no reparables Distribución de vida de algunos elementos o sistemas en el periodo de rodaje, fase I o de mortalidad infantil
Weibull $f(t) = \frac{\gamma}{\Gamma(\gamma)} (\lambda t)^{\gamma-1} \exp(-\lambda t^\gamma)$	Posición, γ Escala, η Forma, β Las curvas de esta ilustración son con $\gamma = 0,0$	 $R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	 $f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$	 $A(t) = \beta \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	Elementos o sistemas con resistencia a la corrosión Distribución de vida de muchos elementos básicos: capacitores, relays, rodamientos, algunos motores, etc.
Gamma	$SD = \frac{\sqrt{\pi}}{\lambda}$ Cuando a es un número entero, se cumple que: $\Gamma(a) = (a-1)!$	 $R(t) = \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} \int_0^t x^{a-1} \exp(-\lambda x) dx$	 $f(t) = \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} \exp(-\lambda t)$	 $A(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	Distribución de tiempo de vida entre recalibración, ajuste o mantenimiento de equipos Distribución de tiempo de vida de elementos con sistemas paralelos o en stand-by

Nota. Tomado del libro Mantenimiento: Planeación, ejecución y control por Mora Gutiérrez (2009b, p.147)

5.5. Sistema Kantiano de mantenimiento

Según Mora Gutiérrez (2009), un sistema kantiano está compuesto básicamente por tres elementos: Las personas, los artefactos y el entorno. Las personas, ya que ellas son las que hacen

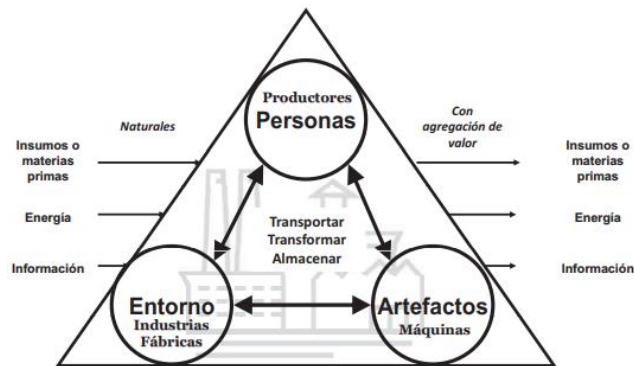
que el sistema exista y son las que le dan ese carácter real, en forma contextual, de forma mental. Los artefactos que, en el caso particular del mantenimiento, están constituidos por el conjunto de máquinas, los componentes, los sistemas de producción, las herramientas, los utensilios, las líneas de fabricación, los documentos como ordenes de trabajo o historias de equipos, los aparatos, las materias primas, los insumos, los repuestos, los sistemas de información, etc., los cuales son elementos reales requeridos para hacer el mantenimiento. El entorno, el cual es de carácter mental o intelectual y corresponde a todos aquellos sitios en donde se desenvuelve la naturaleza del sistema y en el cual se encuentran las máquinas que hacen posible la producción de bienes o servicios.

El modelo de la teoría de sistemas define a las áreas de las empresas como módulos administrativos independientes a los cuales los denomina unidades de mantenimiento y producción. De esta manera, pueden ser usados en un sistema integral industrial para que se pueda visualizar la interacción de ambas unidades y el sistema global unificado de mantenimiento empresarial. Un sistema es un conjunto de unidades recíprocamente relacionadas (Bertalanffy, 1994).

5.5.1. Unidad de producción.

Al utilizar el enfoque kantiano en un sistema básico de producción, se pueden reconocer tres elementos: los productores (personas), las fábricas (entorno) y las máquinas (artefactos) que interactúan y permiten la elaboración industrial de bienes y/o servicios.

La función propia de un sistema de producción es lograr la agregación de valor a partir de tres acciones básicas: transformación, transporte o almacenamiento que pueden estar presentes en forma combinada; es difícil encontrarlas puras en los procesos industriales. (Mora Gutiérrez, 2009) (Ver **Figura 8**).

Figura 8.*Unidades básicas de producción.***5.5.2. Unidad de mantenimiento.**

El enfoque sistémico puro, cuando se utiliza en mantenimiento, parece admitir el reconocimiento de tres elementos fundamentales: los mantenedores (personas), las máquinas o equipos industriales o de operación (artefactos) y los sitios físicos en donde se prestan los servicios de mantenimiento (entorno).

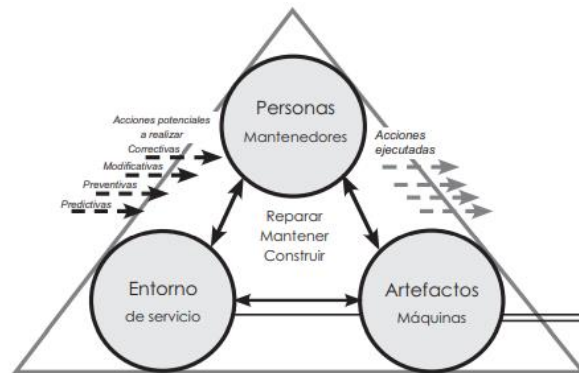
Para hallar la función básica de un sistema de mantenimiento, es posible utilizar la definición de ingeniería que se describe en la Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones (CIUO) de la OIT, donde se enuncia que algunas de las funciones de los arquitectos, ingenieros y afines son: la construcción, la reparación y el mantenimiento de edificios, obras públicas, etc., y en especial de aplicaciones industriales como máquinas y equipos, entre otras (OIT-CIUO 88, 1988). Con esta premisa, se entiende que el mantenimiento es una ciencia que se aplica en elementos, máquinas o sistemas productivos que genera el ser humano, y cuyo fin es preservar los equipos industriales mediante su construcción, reparación o mantenimiento.

El mantenimiento y la reparación son partes esenciales del objeto de estudio (mantenimiento) en ingeniería de fábricas, se entiende que la función de mantenimiento depende

del ciclo de vida de las máquinas en sus tres etapas: mantenimiento, reparación o sustitución. También, depende de la situación de reparación, como una especie de mantenimiento especializado en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo; es decir, con una mantenibilidad más reducida (Ávila Espinosa, 1992) (ver **Figura 9**).

Figura 9.

Unidad elemental de mantenimiento.

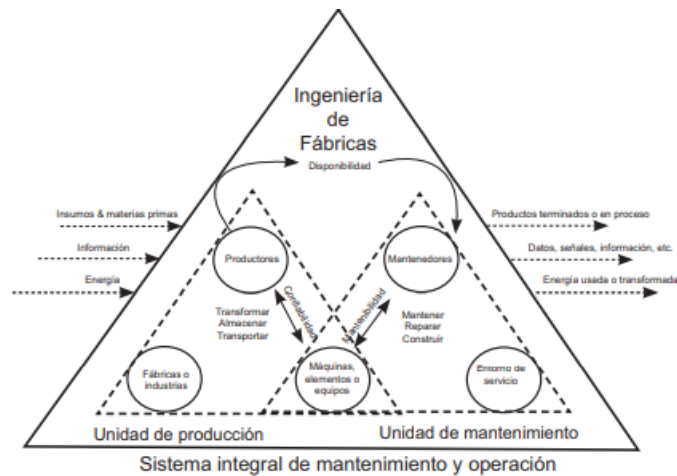


5.5.3. Sistema integral de mantenimiento.

El sistema kantiano de mantenimiento permite integrar a la unidad de producción con la unidad de mantenimiento y las máquinas. Se le conoce como ingeniería de fábricas y permite alcanzar un sistema integral de mantenimiento. Este proceso facilita entender la relación entre la producción y las máquinas que está gobernada por la confiabilidad; la correspondencia entre el mantenimiento y las máquinas se estipula por la mantenibilidad; la relación mantenimiento-máquina-producción se define por la disponibilidad que es el efecto integrado de la ingeniería de fábricas, en el cual se marca como el efecto o el parámetro más relevante del sistema (Ver **Figura 10**).

Figura 10.

Sistema integrado de ingeniería de fábricas: Mantenimiento-máquinas-producción.



5.6. Tipos de mantenimiento

5.6.1. Mantenimiento correctivo.

Al mantenimiento correctivo también se le denomina mantenimiento reactivo, este último término es utilizado en un alto porcentaje en nuestro país y otros países subdesarrollados. Este mantenimiento correctivo se aplica cuando la máquina deja de operar, porque se presenta la falla o avería y su objetivo es poner en marcha su funcionamiento, afectando lo menos posible la productividad; generalmente se repara o se reemplaza el componente del equipo o de la máquina, haciéndolo en el menor tiempo posible (Pérez Rondón, 2021).

5.6.2. Mantenimiento preventivo.

El mantenimiento preventivo se fundamenta en una serie de labores o actividades planificadas que se llevan a cabo dentro de periodos definidos, se diseña con el objetivo de garantizar que los activos de las compañías cumplan con las funciones requeridas dentro del entorno de operaciones para optimizar la eficiencia de los procesos, para prevenir y adelantarse a

las fallas de los elementos, los componentes, las máquinas o los equipos; también, hace referencia a diferentes acciones, como: cambios o reemplazos, adaptaciones, restauraciones, inspecciones, evaluaciones, etc., realizadas en períodos de tiempos por calendario o uso de estos (tiempos dirigidos) (Pérez Rondón, 2021).

Gaytán Reyes (2000), lo define como la actividad humana desarrollada en los recursos físicos de una empresa, con el fin de garantizar que la calidad de servicio que éstos proporcionan continúe dentro de los límites establecidos. Con esta definición se concluye que toda labor de conservación que se realice con los recursos de la fábrica, sin que dejen de ofrecer la calidad de servicio esperada, debe catalogarse como de mantenimiento preventivo.

Este tipo de mantenimiento siempre es programable y existen en el mundo muchos procedimientos para llevarlo a cabo, pero un análisis de éstos nos proporciona cinco tipos bien definidos, los cuales siguen un orden de acuerdo con su grado de fiabilidad:

- **Mantenimiento Predictivo:** Es el control constante para diagnosticar con anticipación una posible falla, cuando se presenta una disminución de calidad del funcionamiento de la máquina o equipo.
- **Mantenimiento Periódico:** Se aplica después de determinadas horas de uso del equipo, cuando se sabe que hay que realizar una serie de cambios de elementos que ya se han desgastado.
- **Mantenimiento Analítico:** Se aplica a los equipos fundamentales de la empresa a través de inspecciones frecuentes, cuando se analiza a profundidad la información que se obtiene de estas máquinas, con el fin de prevenir posibles sucesos que afecten el funcionamiento normal de la operación.

- **Mantenimiento Progresivo:** Se realiza por partes de acuerdo con los tiempos muertos del equipo.
- **Mantenimiento Técnico:** Se combina el mantenimiento periódico con el progresivo.

5.7. Costos de mantenimiento

El costo de las reparaciones es una parte más del precio final del producto. Independientemente de la buena o mala gestión del mantenimiento, siempre será un gasto que se debe asumir (Navarro Elola et al., 1997).

Estos costos se pueden clasificar en:

Costos fijos: son los que se refieren a todas las acciones planeadas. Están compuestos, principalmente, por la mano de obra y materiales necesarios para realizar el mantenimiento preventivo y predictivo.

Costos variables: se trata de los gastos generados por fallas o reparaciones no planeadas. Igual que la anterior, sus valores dependen de la mano de obra, repuestos, materiales, instrumentos de mantenimiento, etc., que se usan para hacer las reparaciones o modificaciones a los equipos.

Costos financieros: se deben tanto al valor de la inversión que se tenga en repuestos y/o materias primas de mantenimiento en almacenes, la duplicidad de maquinaria para elevar la confiabilidad (o disponibilidad).

Costos de la no disponibilidad por fallas: se refiere al valor que implica no poder utilizar una máquina, debido a reparaciones o modificaciones causadas por fallas imprevistas, es el rubro más importante en los costos de mantenimiento; normalmente es superior a los gastos tradicionales (costos fijos, costos variables y financieros).

6. Revisión de literatura

6.1. Aplicaciones de la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento

Esta revisión de literatura tiene como objetivo explorar los estudios existentes sobre la utilización de la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento. Se examinarán las diversas aplicaciones y los resultados destacados, brindando una visión general de cómo esta herramienta puede mejorar la eficiencia, la toma de decisiones y la rentabilidad de los sistemas de mantenimiento en diferentes entornos industriales. Adicionalmente, en el Apéndice B se presenta en detalle el diseño de la estrategia de búsqueda y el análisis bibliométrico efectuado.

En primera instancia, Yang et al. (2008) proponen un enfoque innovador para la programación de operaciones de mantenimiento en sistemas de fabricación. Utilizan la simulación de eventos discretos para evaluar los efectos de los programas de mantenimiento y emplean un procedimiento de optimización basado en algoritmos genéticos para encontrar soluciones rentables. El enfoque destaca la importancia de una estrategia de mantenimiento adecuada y cuantifica los efectos de costo de diferentes programas de mantenimiento, considerando la interacción entre las máquinas, los recursos de mantenimiento y los programas de producción. Además, se demuestra la viabilidad de mejorar los efectos de costo mediante la integración del rendimiento previsto de las máquinas.

Mas adelante, Lins & Droguett (2009) utiliza la simulación de eventos discretos (DES) que se combina con un algoritmo genético multiobjetivo (GA) para optimizar simultáneamente la disponibilidad media del sistema y el costo total del sistema. De esta manera, el GA y DES están acoplados en el proceso de evaluación de la aptitud del algoritmo genético. La disponibilidad del

sistema se estima mediante DES para cada individuo en una generación dada del algoritmo genético. Esto permite que el algoritmo genético evolucione y busque soluciones que maximicen la disponibilidad media del sistema y minimicen el costo total del sistema. El enfoque propuesto se muestra efectivo en ejemplos de aplicación y puede ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones.

Años más tarde, Mattila & Virtanen (2014) intentaron resolver un problema de programación de mantenimiento para una flota de aeronaves de tal manera que el modelo pudiera maximizar la disponibilidad del equipo y minimizar las desviaciones en los tiempos de inicio del mantenimiento. Se utilizó una simulación de eventos discretos para definir misiones de vuelo, programas de mantenimiento y reparaciones de fallas de equipos.

Más adelante, Azadeh et al. (2015) proponen en su investigación un modelo de simulación de eventos discreto Markovian para evaluar y comparar políticas de mantenimiento (mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento basado en la condición) en un sistema de generación de energía. El enfoque se centra en analizar la confiabilidad y el costo del sistema bajo las diferentes políticas, considerando las tasas de fallos de los componentes y el costo unitario promedio como indicadores de rendimiento. Los resultados demostrados por medio de los escenarios planteados permitieron comparar estas políticas y elegir la más destacada. De esta manera, los resultados enfatizan en la importancia de una implementación eficiente de la política de mantenimiento basado en la condición que puede reducir el costo y mejorar la confiabilidad.

También, Alrabghi & Tiwari (2016) realizaron una simulación de eventos discretos para optimizar las estrategias de mantenimiento de sistemas complejos que contienen unidades no idénticas donde el mantenimiento basado en condiciones, preventivo y correctivo puede ser

aplicables. La capacidad de optimizar simultáneamente las estrategias de mantenimiento y sus parámetros en un entorno de simulación permite una mejor comprensión de los sistemas de mantenimiento y abre nuevas oportunidades para la optimización del mantenimiento en la industria.

Más adelante, Alrabghi et al. (2017) optimizaron las políticas de mantenimiento de una fábrica de re-empanado de neumáticos y una planta petroquímica con un modelo de simulación de eventos discretos mediante el examen de múltiples estrategias. Este modelo se destaca porque optimiza simultáneamente varias estrategias de mantenimiento con sus parámetros en sistemas de fabricación industrial y tiene en cuenta la dinámica de la producción.

Además, Sheng et al. (2017) utilizan la simulación de eventos discretos para programar operaciones de mantenimiento en sistemas de fabricación. Emplean un enfoque sistemático que incluye análisis del piso de producción, desarrollo de modelos de simulación, identificación de medidas de desempeño, diseño de experimentos y análisis de resultados. El estudio de caso se realizó en una empresa de fabricación de placas de circuito impreso (PCB) y se enfocó en el departamento de punzonado. Los resultados del estudio demuestran el uso de DES como herramienta para medir el rendimiento de la planta y predecir el desempeño futuro del taller en relación con los parámetros de mantenimiento. Esto permite a las empresas realizar diseños más rentables y abordar problemas imprevistos de manera sistemática.

Luego, Wang & Djurdjanovic (2018) proponen un proceso de toma de decisiones que optimiza conjuntamente los programas de mantenimiento preventivo (MP), los niveles de inventario de piezas de repuesto y las opciones de transporte de repuestos en una red geográfica dispersa de activos de varias piezas e instalaciones de mantenimiento. Para abordar la complejidad de este problema, se utilizó la simulación de eventos discretos como una herramienta clave.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad basado en diseño de experimentos para estudiar los beneficios y determinar los efectos estadísticos de los diferentes parámetros del sistema y sus interacciones en el proceso de toma de decisiones y su desempeño.

De otra parte Chiacchio et al. (2020), señalan que las herramientas asistidas por computadora, las plataformas de simulación múltiple son ampliamente utilizados en el campo de la ingeniería de confiabilidad para mejorar la precisión de los estudios y facilitar el análisis de confiabilidad. Se destaca la importancia de la simulación de eventos discretos para modelar comportamientos de sistemas complejos que surgen de la interacción entre variables continuas y discretas, escenarios que no pueden ser modelados con los enfoques clásicos de análisis de confiabilidad. El artículo también menciona que se han desarrollado diversas metodologías en el campo de la ingeniería de confiabilidad para modelar los procesos de operación y degradación de sistemas y evaluar sus atributos RAMS (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad). Se proporciona una tabla que muestra las principales características de los modelos estocásticos utilizados en el análisis de confiabilidad, incluyendo su capacidad para modelar procesos físicos.

Ahora bien, Hüseyin Turan et al. (2020) realizaron un estudio que se centra en la planificación de mantenimiento correctivo y en la optimización de la gestión de inventarios de piezas de repuesto en una red de mantenimiento. Se utiliza un enfoque de optimización basado en DES y una meta-heurística de búsqueda de vecindario de variables reducidas (IRVNS). El DES se utiliza para modelar y analizar la red de mantenimiento, mientras que el IRVNS busca los valores óptimos de las variables de decisión. Las contribuciones de este trabajo incluyen la formulación y resolución de un problema de optimización conjunta que considera decisiones estratégicas y operativas en la planificación del mantenimiento, la incorporación de la actitud de riesgo del

responsable de la toma de decisiones en el modelo de optimización, y el desarrollo de un enfoque de solución de optimización basado en simulación.

En ese mismo año, el estudio de investigación de Golbasi & Turan (2020) presenta un algoritmo de simulación de eventos discretos con un enfoque de optimización biobjetivo que busca maximizar la disponibilidad o minimizar el costo total de mantenimiento. Mediante la evaluación de diferentes escenarios de mantenimiento y la interacción estocástica entre las acciones de mantenimiento, el algoritmo optimiza la política de mantenimiento específica del sistema en diferentes intervalos de inspección. Por lo tanto, la simulación de eventos discretos ofrece una forma efectiva y eficiente de analizar los comportamientos de mantenimiento en los sistemas de minería, en los cuales el rendimiento es innegablemente crítico para la producción de materias primas.

Igualmente, Cacereño et al. (2021) presenta un estudio de caso que se centra en optimizar simultáneamente el diseño y la estrategia de mantenimiento preventivo de un sistema de inyección de fluido industrial, compuesto por válvulas de corte y bombas de impulsión. Los objetivos de optimización son maximizar la disponibilidad del sistema y minimizar el costo de operación debido a las fases improductivas del sistema. Para abordar este problema, se utilizó una metodología que combina un algoritmo evolutivo multiobjetivo y la simulación de eventos discretos. Cada posible solución del algoritmo representa una posible solución que se utiliza para modificar y evaluar las características y el comportamiento de un sistema en relación con su función a través de la simulación discreta.

Por otro lado, Orlov et al. (2021) proponen la utilidad de la simulación de eventos discretos basada en redes de Petri para estudiar y evaluar sistemas de producción en la industria. El enfoque jerárquico propuesto y el procedimiento de optimización-simulación ofrecen una forma efectiva

de abordar problemas de mantenimiento y optimización en sistemas flexibles de fabricación. Por otro lado, se destaca la importancia de la simulación de eventos discretos para el estudio de procesos tecnológicos y propiedades de equipos en la industria. Dado que muchos sistemas industriales presentan características estocásticas que hacen imposible calcular su rendimiento de manera determinística, se emplea el formalismo matemático de las redes de Petri para construir modelos de simulación y evaluar la mantenibilidad de los procesos de producción.

6.2. Conclusión de la revisión

En suma, a partir de la revisión literaria realizada sobre la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento, se puede concluir que es una herramienta eficaz y ampliamente utilizada para evaluar y optimizar programas de mantenimiento en diferentes contextos industriales. Se ha demostrado que puede mejorar la eficiencia y rentabilidad de los sistemas de mantenimiento al combinarla con algoritmos genéticos y modelos de optimización. Estos estudios destacan la importancia de una estrategia adecuada de mantenimiento, cuantificando los efectos de costo y mostrando cómo la simulación de eventos discretos puede mejorar la disponibilidad del sistema, optimizar las estrategias de mantenimiento y respaldar la toma de decisiones. Además, se utiliza para evaluar diferentes políticas de mantenimiento, como el correctivo, preventivo y basado en la condición, demostrando la importancia de implementar una política eficiente para reducir costos y mejorar la confiabilidad. También se destaca su utilidad en el diseño de experimentos, análisis de desempeño y toma de decisiones rentables en la industria.

7. Aplicación del marco metodológico para el desarrollo de modelos de simulación enfocados a sistemas de mantenimiento

En este capítulo, se aborda el análisis del modelado a través de la identificación de objetivos, el desarrollo del modelo conceptual para la simulación, la construcción del modelo computacional, y la evaluación de escenarios y resultados. Se emplea un entorno industrial genérico, basado en literatura (Kumar et al., 2019), para calcular la Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad (CMD) y los costos asociados.

7.1. Definición de objetivos

El desarrollo de un modelo de simulación es un proceso que comienza con la definición precisa de los objetivos que se desean alcanzar. Estos no solo actúan como la base sobre la cual se construirá todo el modelo, sino que también desempeñan el papel crucial de establecer los límites del alcance. Es esencial destacar que la formulación de estos objetivos debe realizarse con un alto grado de claridad y precisión. Deben ser redactados de manera que sean comprensibles y medibles, lo que significa que se deben poder evaluar de manera cuantitativa o cualitativa al final. Además, deben ser realistas y alcanzables dentro de las restricciones de tiempo, recursos y conocimientos disponibles, garantizando así la viabilidad.

En esencia, estos sirven como las preguntas que deben ser respondidas mediante el estudio de la simulación. En otras palabras, cada objetivo establecido representa un interrogante que la simulación se encargará de abordar y resolver. Esto proporciona una guía clara sobre qué aspectos del sistema o fenómeno se deben investigar y analizar a través de la simulación. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, se requiere un enfoque integral de planificación del modelo que

incluye la identificación de múltiples escenarios que serán objeto de investigación. Cada escenario representa una variante o una condición particular que se explora a través de la simulación, permitiendo así una comprensión más profunda y completa del sistema en estudio.

En conjunto, la definición precisa de los objetivos y la planificación de múltiples escenarios forman la base sólida sobre la cual se construye un modelo de simulación efectivo. Estos elementos garantizan que la simulación se enfoque en los aspectos más relevantes y significativos del problema, lo que aumenta las posibilidades de obtener resultados valiosos y contribuciones significativas al campo de estudio.

Por ejemplo, el propósito de este estudio es contribuir al avance del conocimiento en el campo de la gestión del mantenimiento a través del uso de herramientas de simulación, de este modo, el objetivo general a plantear es 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, de esta manera se encuentra respaldado por un conjunto de objetivos específicos que desglosan de manera detallada la secuencia de pasos necesarios para lograr el objetivo general. Que son los siguientes:

- Diseñar los modelos conceptuales para la medición de CMD y costos de mantenimiento a partir de análisis matemáticos y probabilísticos
- Desarrollar el modelo de simulación a partir de los modelos conceptuales definidos
- Evaluar los escenarios de mantenimientos basados en la experimentación de los resultados de las medidas de desempeño seleccionadas.

Por último, cabe destacar que la formulación de los objetivos se fundamenta en las necesidades identificadas por los autores y se ajusta a los recursos e información disponibles para llevar a cabo la investigación.

7.2. Modelo conceptual

El modelo conceptual desempeña un papel fundamental al mejorar la comunicación entre el usuario y la herramienta mediante un lenguaje específico. Además, contribuye a definir los elementos esenciales que conforman el modelo abstracto del sistema bajo estudio.

7.2.1. Caracterización de entidades

La caracterización de las entidades abarca varios elementos, cada uno de los cuales debe definirse cuidadosamente para lograr una representación precisa del sistema a simular. Estas entidades cambian de estado y afectan las métricas de desempeño seleccionadas. En la construcción del modelo, se definen como entidades fijas las máquinas de la empresa fabricante de automóviles AVTEC Private Limited (Kumar et al., 2019), especializada en la producción de conjuntos de transmisión. La operación se realiza a través de su división Soft Line, que cuenta con 23 máquinas encargadas de fabricar estos conjuntos.

7.2.1.1. Definición de Eventos durante el mantenimiento

Es esencial definir los tipos de eventos que estos procesos pueden implicar, ya que esto permite describir cómo se comportan con el tiempo, tanto en términos de costos como en el análisis del CMD. En un entorno industrial, los eventos que cumplen con estas características son los mantenimientos preventivos y las fallas. Las fallas, en particular, conllevan implícitamente la necesidad de un mantenimiento correctivo y su duración asociada.

Dado que los eventos de un equipo siguen un comportamiento estocástico, se caracterizan mediante distribuciones de probabilidad. Estas distribuciones se definen a partir de datos experimentales que recopilan la presencia y comportamiento de estos eventos a lo largo del tiempo. Por lo tanto, cada tipo de evento se describe de la siguiente manera:

7.2.1.1.1. Mantenimiento preventivo

Ocurrencia. Debido a que estos mantenimientos son planificados, suceden en momentos específicos del tiempo operativo del equipo o siguiendo un calendario. Por lo tanto, esta característica suele ser constante.

Duración. La ejecución del mantenimiento preventivo depende de diversas condiciones, como la disponibilidad de recursos. Esta duración puede ser constante o tratarse como una variable aleatoria que sigue una cierta distribución de probabilidad, para reflejar con precisión las condiciones reales. Los parámetros asociados con esta característica incluyen la distribución de probabilidad y sus respectivos valores.

7.2.1.1.2. Falla

Ocurrencia. Las fallas ocurren de manera aleatoria y siguen un patrón establecido por una distribución de probabilidad específica. Por lo tanto, los parámetros asociados son la distribución de probabilidad y sus respectivos valores.

Duración. Como se mencionó anteriormente, la duración de una falla está determinada por el tiempo requerido para llevar a cabo el mantenimiento correctivo. Esta característica es aleatoria y depende de varios factores. Al igual que la ocurrencia, los parámetros para esta característica incluyen la distribución de probabilidad y sus respectivos valores.

7.2.1.2. Atributos

- Tiempo del inicio de la falla y tiempo final de la reparación
- Tiempo del inicio y final de una reparación preventiva
- Numero de fallas
- Numero de mantenimientos preventivos

7.2.1.3. Variables globales

Disponibilidad Inherente

- Sumatoria del tiempo entre fallas
- Sumatoria del tiempo entre reparaciones
- Número de paradas correctivas
- Número de reparación correctivo

Disponibilidad alcanzada

- Sumatoria del tiempo entre mantenimiento correctivo
- Número de tiempos útiles mantenimiento correctivo
- Sumatoria del tiempo entre mantenimiento preventivo
- Número tiempos útiles mantenimiento preventivo
- Sumatoria del tiempo de reparación correctivo
- Número de reparaciones correctivo
- Sumatoria del tiempo de reparación preventivo
- Número de reparación preventivo

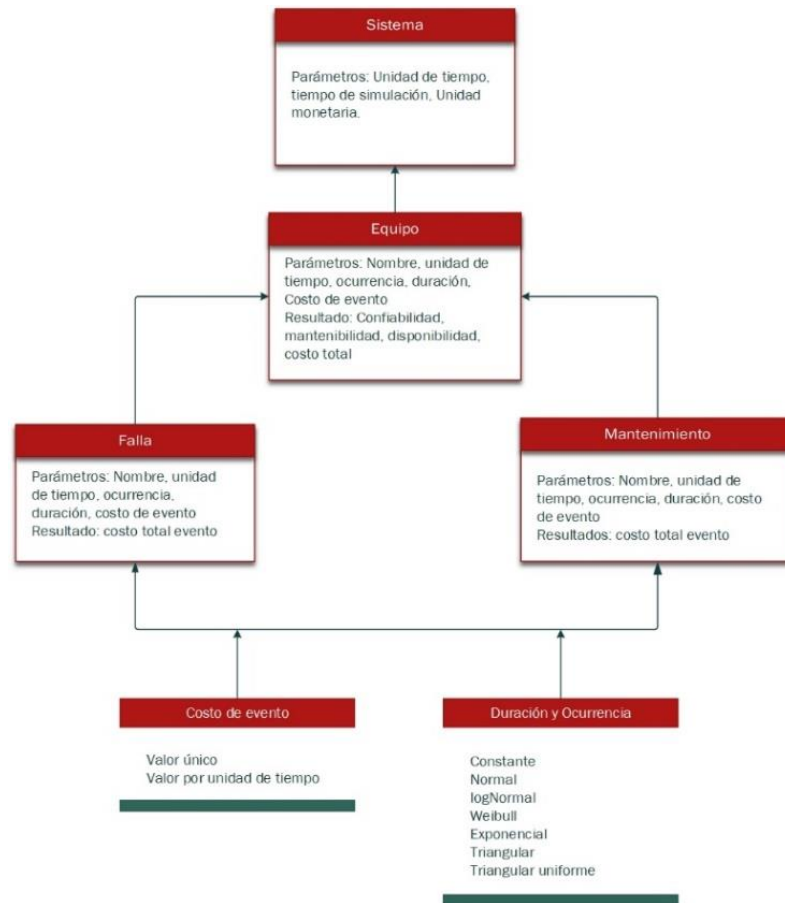
7.2.1.4. Medidas de desempeño

- Tiempo promedio entre fallas.
- Tiempo promedio para realizar reparaciones.
- Porcentaje de tiempo en el que la maquina este operando y disponible para su uso.
- Costo total de mantenimiento.

En la **Figura 11**, se detallan las características de cada uno de estos elementos, que incluyen el sistema en sí, compuesto por equipos descritos a su vez por eventos interrelacionados o no.

Figura 11.

Características definidas para cada elemento.



Por otra parte, el modelo conceptual proporciona una representación que facilita la interacción intuitiva del usuario, incluso para aquellos que no estén familiarizado con todas las entidades, procesos y recursos. A través de este, es posible visualizar claramente los atributos y variables globales del sistema, así como las medidas de efectividad. Esto proporciona una comprensión nítida de cómo está estructurado el modelo a simular y las relaciones entre sus componentes. Es importante destacar que el modelo conceptual representa de manera abstracta la realidad del sistema modelado, lo que amplía su relevancia y utilidad en el análisis y comprensión del sistema.

7.2.2. Modelización de la simulación para el cálculo del cmd y costos

La **Figura 12** presenta un algoritmo en forma de diagrama de flujo que facilita la simulación del sistema mediante programación de eventos. Este algoritmo se divide en dos pasos esenciales:

1. Desarrollar el modelo de simulación:

Este proceso comienza con la creación del modelo, por ejemplo donde se establecen las reglas que dictan los tiempos de falla de las máquinas. Se inicia el proceso de identificación de las estrategias de mantenimiento cruciales para cada equipo del sistema. Esto conlleva la especificación de los factores para las distribuciones estadísticas necesarias en cada estrategia de mantenimiento, con el propósito de representar la variabilidad en las Acciones de Mantenimiento (AM) al momento de suceder. Por ejemplo, en la estrategia de Mantenimiento Correctivo (CM), se necesita una distribución estadística para determinar el tiempo promedio entre fallos y otra para estimar el tiempo de reparación.

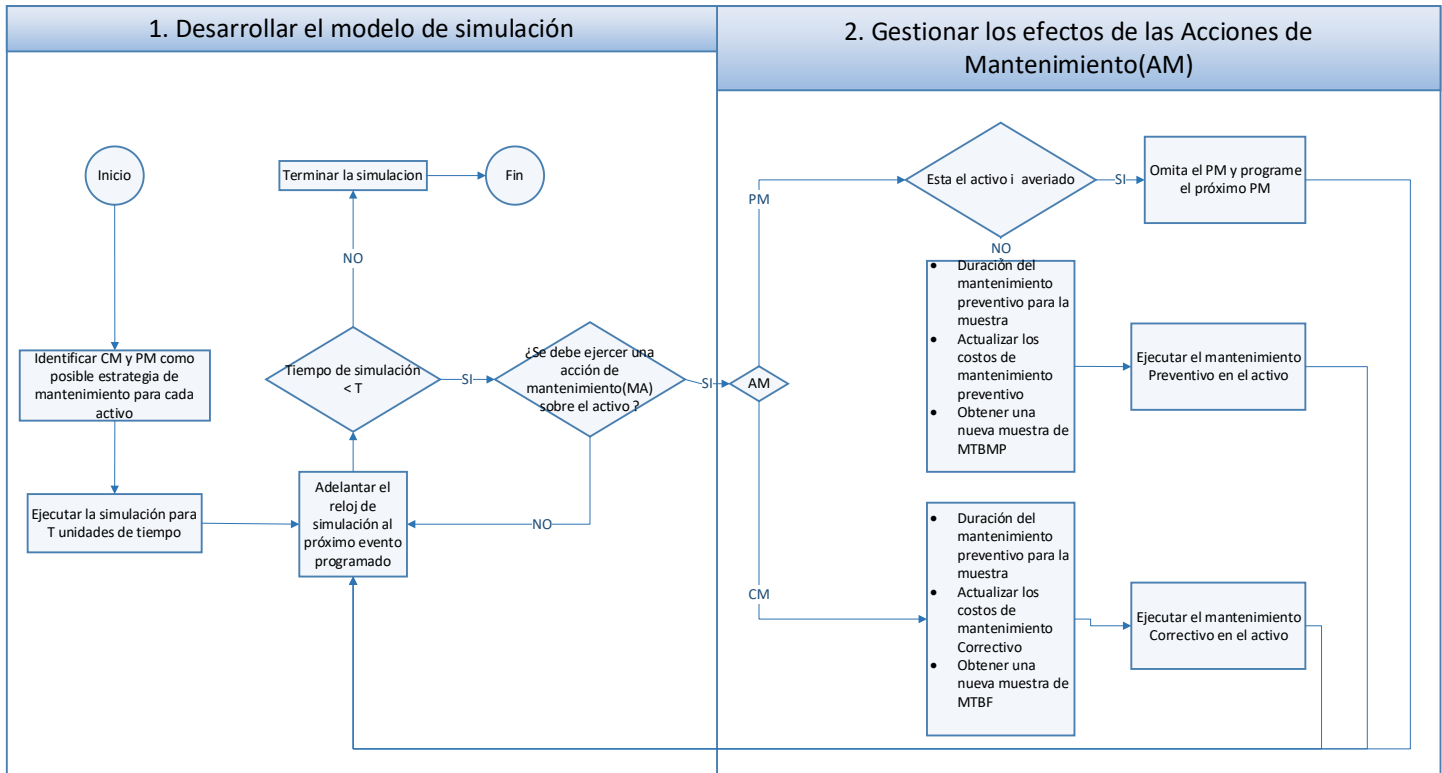
2. Gestionar los efectos de las acciones de mantenimiento en el mismo equipo:

Durante la simulación, cuando las máquinas experimentan averías no programadas, se toman muestras de la duración del Mantenimiento Correctivo (CM) para establecer el tiempo de reparación de CM. Posteriormente, se suman los costos asociados con el CM para el activo en cuestión, y se muestrea el tiempo entre fallos (TBF) para el MTBF. Durante el Mantenimiento Preventivo (MP), se sigue un procedimiento similar para calcular el tiempo de reparación del MP, agregar los costos correspondientes y ejecutar la acción de mantenimiento. Es importante notar que si la hora programada para el Mantenimiento Preventivo coincide con otro evento, se omite el MP actual y se pospone hasta el próximo evento programado.

Este algoritmo proporciona una estructura detallada para la simulación del sistema, permitiendo la gestión efectiva de las acciones de mantenimiento y sus impactos en el funcionamiento del sistema.

Figura 12.

Diagrama de Flujo: Simulación para Cálculo de TBF, TTR y Costos de Mantenimiento



7.2.3. Estructuración del sistema para analizar la confiabilidad del sistema

El sistema en estudio, basado en la literatura, no incluye un plano de distribución de las máquinas, pero proporciona detalles sobre las operaciones realizadas en las 23 máquinas involucradas en la fabricación de los trabajos del conjunto de transmisión. Se propone un diagrama de bloques que represente el sistema en serie y paralelo, donde se llevan a cabo 11 trabajos distintos a través de 49 operaciones de mecanizado antes de su ensamblaje final. De esta manera, un diagrama de bloques de confiabilidad ilustra cómo el estado operativo de una función específica de un sistema, compuesto por varios elementos (Máquinas), afecta su confiabilidad durante la

simulación. En la **Tabla 3** se muestra las asignaciones de operaciones que se realizan en cada una de las máquinas respecto a su trabajo.

Tabla 3.

Asignación de Máquinas por Operaciones y Trabajos

O _i	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	O ₆	O ₇	O ₈	O ₉
J ₁	M1	M3	M6						
J ₂	M1	M3	M6						
J ₃	M1	M3	M5						
J ₄	M1	M3	M5						
J ₅	M14	M3	M18						
J ₆	M14	M13	M6						
J ₇	M14	M3	M5						
J ₈	M4	M14	M3	M23	M5				
J ₉	M7	M8	M9	M12	M21	M22	M17	M10	M19
J ₁₀	M4	M20	M13	M22	M18	M19			
J ₁₁	M9	M2	M16	M11	M13	M15	M18	M19	

Nota. Información tomada de Integrated yet distributed operations planning approach: A next generation manufacturing planning system, por Kumar et al. (2019).

7.2.3.1. Diagrama de bloques de confiabilidad

A medida que un sistema adquiere mayor complejidad, se vuelve complicado evaluar su confiabilidad. Para hacerlo más manejable, es necesario descomponerlo en partes más simples cuya confiabilidad sea conocida. El resultado de esta descomposición es un diagrama de bloques de confiabilidad, que incluye solo los elementos que afectan la confiabilidad general del sistema.

7.2.3.2. Sistema en serie

En los sistemas en serie, la falla de un solo equipo o sub-sistema provoca la falla total del sistema. Por esta razón, la confiabilidad global del sistema será siempre inferior a la de cualquiera

de sus componentes, equipos o sub-sistemas. A continuación, se presenta un ejemplo de la configuración en serie del trabajo 1.

Figura 13.

Configuración en serie trabajo 1

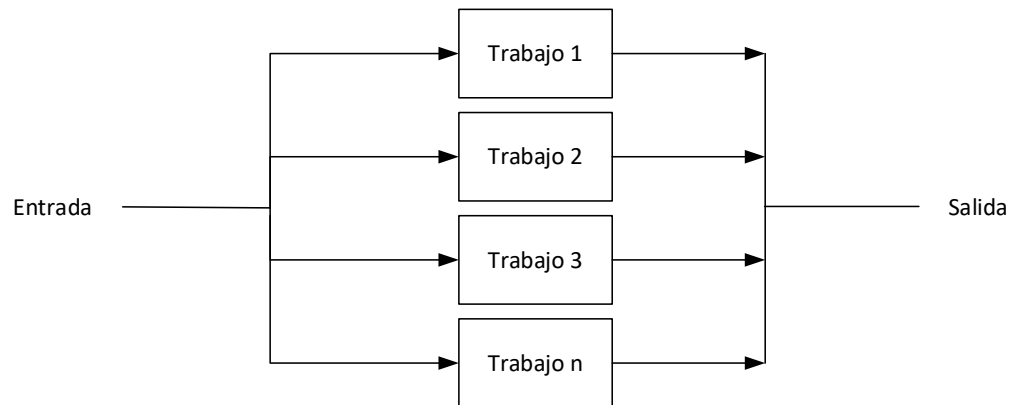


Sistema en paralelo

Los sistemas en paralelo se caracterizan por estar organizados de tal manera que la falla de un componente o equipo principal no causa la falla del sistema completo. Por lo tanto, se puede concluir que la confiabilidad del sistema será siempre superior a la de los componentes individuales. A continuación, se presenta un ejemplo de una configuración en paralelo.

Figura 14.

Configuración en paralelo



7.2.4. Modelo conceptual en Microsoft visio

Tras cubrir todos los elementos detallados en cada fase del modelo conceptual, se procede a consolidar la información en una herramienta que facilite la verificación y validación del modelo. Para ello, se realizará una representación gráfica del modelo formal en el software Microsoft Visio,

destacando las configuraciones y propiedades específicas del mismo. Esta representación permitirá comparar y revisar exhaustivamente todos los elementos definidos.

El modelo conceptual desarrollado en Visio no se limita a ser una simple representación gráfica de los elementos involucrados en el sistema. Va más allá, incorporando aspectos internos críticos como las configuraciones específicas, el planteamiento lógico y la codificación que subyace en el sistema. Este enfoque integral no solo facilita la comprensión técnica para aquellos familiarizados con el software de simulación FlexSim, sino que también mejora la comprensión del sistema para personas sin conocimientos previos del programa.

Es crucial entender la programación interna de cada actividad involucrada en el modelo. Este conocimiento garantiza que la estructura sea coherente con la configuración computacional, permitiendo una correcta transferencia y representación en el entorno gráfico de Visio.

Para facilitar la comprensión del modelo conceptual, se incluye en el Apéndice D y E, un esquema detallado que describe los elementos presentes en las configuraciones, la realización de la parte lógica, y el código utilizado durante la simulación. Este esquema visualiza cómo cada proceso configurado se relaciona mediante conectores, lo que permite un entendimiento detallado de la programación utilizada en cada área del flujo del proceso.

7.3. Determinación de los tiempos entre fallas, reparaciones y costos de cada mantenimiento

Para describir el comportamiento de una variable aleatoria, es esencial conocer la probabilidad de que esta tome un valor específico. Este conocimiento se basa en la ley de distribución de la variable, que define la relación entre los posibles valores que puede asumir y sus respectivas probabilidades. De esta manera, el sistema de producción considerado incluye “M” máquinas, cuya probabilidad de falla sigue una distribución de Weibull, caracterizada por los parámetros de forma (β_j) y escala (η_j). El tiempo de reparación del mantenimiento preventivo

(PM) se estima en 8 horas, mientras que el tiempo de mantenimiento correctivo (CM) sigue una distribución logarítmica normal, con una media de μ horas y una desviación estándar de σ horas. Los datos empleados fueron extraídos de un estudio sobre la empresa automotriz AVTEC Private Limited, obtenidos de la base de datos ORACLE, y se utilizaron para definir las distribuciones de probabilidad asignadas a cada máquina (Kumar et al., 2019) (ver **Tabla 4**).

Tabla 4.

Distribuciones de probabilidad de fallas y reparaciones de cada máquina.

Máquinas	TBF		TTR Correctivo		Preventivo
	Weibull		Log-Normal		MP
	$\beta(h)$	$\eta(h)$	$\mu(h)$	$\sigma(h)$	h
M1	2,3	700	30	10	8
M2	4	500	30	10	8
M3	2	600	30	10	8
M4	2	800	30	10	8
M5	3	540	30	10	8
M6	2,6	420	30	10	8
M7	2,6	480	30	10	8
M8	1,9	550	30	10	8
M9	2	800	30	10	8
M10	2,4	700	30	10	8
M11	2,3	500	30	10	8
M12	2,9	620	30	10	8
M13	1,8	460	30	10	8
M14	1,3	450	30	10	8
M15	2	800	30	10	8
M16	2,6	700	30	10	8
M17	2,1	850	30	10	8
M18	2,5	700	30	10	8
M19	2,4	500	30	10	8
M20	2,3	600	30	10	8
M21	1,5	380	30	10	8
M22	1,2	400	30	10	8
M23	2,7	600	30	10	8

Tabla 5.*Costos en la simulación*

Costos de mantenimiento correctivo (MU)	Costo de mantenimiento preventivo (MU)	Costo mano de obra (MU/t)
8000	2500	325

Nota. Información tomada de Integrated yet distributed operations planning approach: A next generation manufacturing planning system, por Kumar et al. (2019).

7.4. Construcción del modelo computacional.

Una vez descritos los elementos del modelo conceptual del sistema, se procede a desarrollar el modelo computacional con el software FlexSim. Se enfoca en la definición de las herramientas proporcionadas por FlexSim para la construcción del modelo. Entre las tareas abordadas se incluyen la asignación de atributos, la configuración de tiempos de falla, reparaciones y costos, así como la creación de un modelo de degradación de las máquinas. Este modelo permite evaluar tanto el mantenimiento correctivo como el preventivo. Finalmente, se destacan las medidas de desempeño a evaluar y verificación del modelo.

7.4.1. Definición del modelo computacional en FlexSim

En un modelo de simulación, los objetos representan los componentes estructurales del sistema, como máquinas, personas, elementos de trabajo, áreas operativas, etc. En FlexSim, estos objetos tienen atributos y comportamientos específicos que permiten una representación detallada del sistema. Para lograr una implementación efectiva, la transición de un modelo conceptual a un modelo computacional es crucial, ya que convierte los conceptos teóricos en una aplicación práctica. Este proceso se basa en un documento elaborado en MS Visio, que proporciona una

representación gráfica de los elementos y relaciones del sistema. El objetivo es convertir esta caracterización conceptual en un modelo funcional que permita simular y analizar el comportamiento del sistema en un entorno computacional.

7.4.1.1. Definición de las herramientas del modelo en flexsim. En el presente apartado, se detallan las herramientas esenciales empleadas en el desarrollo y análisis del modelo computacional. La precisión y efectividad del modelo dependen en gran medida de las herramientas utilizadas, cada una contribuyendo de manera única al análisis. A continuación, se presenta una visión general de las principales herramientas incorporadas en el modelo.

7.4.1.1.1. Processor/Procesador. El procesador en cuestión se ha empleado para representar el funcionamiento de 23 máquinas en el modelo simulado. En este contexto, el procesador se utiliza para calcular cuatro aspectos críticos: confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos asociados.

Este enfoque de simulación permite analizar la confiabilidad de las máquinas, proporcionando información esencial sobre su comportamiento en presencia de fallas. También ofrece datos importantes para evaluar la mantenibilidad del sistema, permitiendo un análisis detallado de los procedimientos de reparación y mantenimiento preventivo. Finalmente, al calcular la disponibilidad del sistema, se obtiene una visión clara de cuánto tiempo las máquinas están operativas y disponibles para el procesamiento, lo cual es crucial para mantener una producción eficiente en cualquier entorno industrial.

7.4.1.1.2. Global tables/Tablas globales. En el ámbito de los modelos de simulación, la gestión de datos se presenta como una tarea esencial. Para abordar este desafío, las tablas globales emergen como un recurso invaluable que permite a los modeladores almacenar, organizar y acceder a una vasta gama de información crucial para las simulaciones.

Las tablas globales de FlexSim tienen una versatilidad impresionante, ya que pueden contener una variedad de datos, como números, texto, punteros, matrices, código FlexScript, paquetes y variables rastreadas. Esta diversidad las convierte en herramientas adaptables, adecuadas para una amplia gama de aplicaciones y tipos de información dentro del contexto de simulación.

La interfaz de las tablas globales en FlexSim ha sido diseñada de forma intuitiva, similar a las hojas de cálculo familiares como Excel. Esta familiaridad simplifica significativamente la creación, edición y organización de datos, ya que las tablas se estructuran en filas y columnas. Esta estructura accesible permite a los modeladores manejar datos de manera eficaz, colabora en la comprensión y organización de información compleja.

Lo más notable es que cualquier elemento dentro del modelo de simulación tiene la capacidad de acceder a los datos almacenados en estas tablas globales. Esta accesibilidad brinda la flexibilidad de utilizar estos datos en diversas partes del modelo, permitiendo la toma de decisiones fundamentadas y la realización de cálculos precisos.

En el modelo, se creó una tabla global para analizar el rendimiento de las máquinas. En esta tabla, se ha organizado la información de manera que las columnas representan las diferentes variables de estudio, como tiempo medio entre fallas, tiempo medio entre reparaciones y disponibilidad, entre otras. Por otro lado, las filas de la tabla están dedicadas a cada una de las máquinas. Esta estructura permite comparar fácilmente el desempeño de cada máquina en relación

con las distintas variables. De esta manera, se puede visualizar y analizar de forma clara cómo cada máquina se comporta en función de los diferentes aspectos.

7.4.1.1.3. MTBF/MTTR. Los objetos MTBF/MTTR desempeñan un papel fundamental al establecer tiempos de avería y recuperación aleatorios para grupos de objetos en el modelo. Cada objeto MTBF/MTTR puede tener múltiples miembros y ser controlado por más de un objeto MTBF/MTTR. Este componente proporciona la flexibilidad de especificar en qué estado deben entrar los objetos cuando experimentan una avería y cómo deben comportarse en esa situación. Además, permite definir si los miembros conectados se descompondrán juntos o si los tiempos de avería se calcularán individualmente para cada objeto.

Es importante destacar la pestaña de **Functions** donde tiene las siguientes propiedades:

First Failure Time. Esta lista de selección devuelve la hora del primer fracaso o falla.

Down Time. Devuelve el tiempo medio de reparación de los objetos controlados, determinando cuánto tiempo permanecerán en estado de avería antes de reanudar las operaciones normales.

Up Time. Define cuánto tiempo durarán los objetos antes de entrar en un estado de avería. El tiempo de actividad se define como el intervalo entre el momento en que el objeto se reanuda desde su último período de inactividad y el momento en que comienza su próximo período de inactividad.

Down Behavior. Permite seleccionar un comportamiento específico cuando los objetos están en estado de avería, activando las funciones Down y Resume del comportamiento Down Behavior.

Down Function. Se ejecuta cuando los objetos dejan de funcionar y se especifica qué hacer para detener el objeto.

Resume Function. Se ejecuta cuando los objetos reanudan su funcionamiento y especifica qué hacer para reanudar el objeto.

OnBreakDown. Se activa inmediatamente después de la función Down, ejecutándose una vez para cada objeto.

OnRepair. Se activa inmediatamente después de la función Resume, ejecutándose una vez para cada objeto.

Figura 15.

Panel de propiedades del MTBF/MTRR FlexSim

The screenshot shows the 'MTBF/MTRR Properties' dialog box for an object named 'MTBFMTRR3'. The dialog is titled 'MTBF/MTRR Properties' and has a close button (X) in the top right corner. Below the title bar, there is a dropdown menu showing 'MTBFMTRR3' and a checked 'Enabled' checkbox. The dialog is divided into three tabs: 'Members', 'Functions', and 'Breakdowns'. The 'Breakdowns' tab is currently selected. Under the 'Breakdowns' tab, there are several fields and controls:

- 'First Failure Time': A text input field containing '80', followed by a unit dropdown set to 'hr' and a pencil icon for editing.
- 'Down Time': A text input field containing '20', followed by a unit dropdown set to 'hr' and a pencil icon.
- 'Up Time': A text input field containing '80', followed by a unit dropdown set to 'hr' and a pencil icon.
- 'Down Behavior': A dropdown menu set to 'Custom' with a small icon to its right.
- 'Down Function': A dropdown menu set to 'Stop Object' with a small icon to its right.
- 'Resume Function': A dropdown menu set to 'Resume Object' with a small icon to its right.
- 'On Break Down': A text input field containing 'Custom Code' with a small icon to its right.
- 'On Repair': A text input field containing 'Custom Code' with a small icon to its right.

At the bottom of the dialog, there are three buttons: 'Apply', 'OK', and 'Cancel'. There are also small icons for help and a toolbar at the bottom left.

7.4.1.1.4. *Financial analysis/Análisis financiero.* FlexSim ofrece herramientas avanzadas para realizar análisis financieros, lo que permite evaluar el impacto económico de diferentes escenarios en simulaciones de eventos discretos. Estas herramientas ayudan a modelar costos y beneficios asociados con procesos, permitiendo a los usuarios tomar decisiones más informadas. El gráfico financiero en FlexSim permite asignar datos de costos a los objetos y elementos de flujo en función de diversos parámetros y estados operativos. Esto facilita un análisis detallado de cada evento en el modelo, permitiendo rastrear eficazmente los costos generados durante la simulación, como los costos de mantenimiento correctivo y preventivo, los costos de mano de obra y los costos asociados con el tiempo de inactividad. Estas capacidades proporcionan una visión clara del impacto económico de las decisiones operativas, ayudando a mejorar tanto la eficiencia como la rentabilidad del sistema modelado.

7.4.1.1.5. *Procces Flow/Flujo de proceso.* El Process Flow en FlexSim es una herramienta avanzada que ha revolucionado la manera en que se construye y gestionan los modelos de simulación. Ya que, facilita el diseño de sistemas complejos de manera eficiente, reduciendo significativamente el tiempo necesario para desarrollar y ajustar modelos. Una de las principales ventajas del Process Flow es su interfaz gráfica de diagramas de flujo, que simplifica el modelado al reemplazar la codificación extensa con bloques de actividad predefinidos. Este enfoque visual e intuitivo permite construir la lógica del sistema de manera más abstracta y eficiente desde el principio, mejorando la comprensión y el ajuste del proceso.

Además, el Process Flow ofrece flexibilidad al permitir la expansión gradual del modelo. Se puede comenzar con un esquema general y añadir detalles a medida que avanza el proyecto, evitando la necesidad de reconstruir el modelo desde cero. Esta capacidad de escalabilidad es especialmente útil en las fases iniciales, donde los requisitos y las ideas pueden cambiar

rápidamente. Otra característica destacada es la centralización de toda la lógica del modelo en una ubicación única. Esto simplifica la depuración al permitir ajustes y correcciones de manera consolidada. La visualización del flujo de tokens facilita la identificación y resolución de errores, mejorando la eficiencia.

7.4.1.2. Asignación de atributos al modelo

Las etiquetas desempeñan un papel fundamental en la construcción lógica de un modelo en FlexSim, ya que sirven como mecanismos para almacenar información en flujos, tokens u objetos 3D. En esencia, son esenciales para el funcionamiento general de FlexSim, dado que permiten rastrear información crucial y alterar dinámicamente el comportamiento durante una simulación, en función de las condiciones del modelo.

En particular, estas etiquetas, conocidas como “labels” en FlexSim, son características inherentes de un objeto. A través de estas etiquetas, se conserva información relevante sobre un objeto, pudiendo ser numérica o textual. Además, permiten gestionar datos más complejos, ofreciendo una funcionalidad avanzada para manejar información detallada. Cabe destacar que estas etiquetas pueden ser consultadas desde cualquier parte del modelo y en cualquier momento durante la simulación.

En adición, estas etiquetas se pueden asignar tanto a recursos fijos como a ejecutores de tareas en el modelo 3D. Por ejemplo, cada “processor” recibe una etiqueta específica, lo cual es especialmente relevante para registrar la información deseada. En este contexto, se añade una etiqueta de tipo kinetic al procesador para rastrear el tiempo que tarda en ocurrir una avería, denominada “Tiempo_de_falla”.

Dada la flexibilidad que tienen las tablas globales para registrar los datos durante la simulación, se utilizan para asignar atributos y realizar los cálculos necesarios para obtención de

los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad; estos cálculos se ejecutan en momentos clave, como al ocurrir una avería, su reanudación, la intervención de un mantenimiento preventivo y su posterior reanudación. En las **Tabla 6** y **Tabla 7** se detallan las columnas utilizadas, junto con una descripción de cada una y las fórmulas aplicadas para el cálculo correspondiente. Cada columna está diseñada para capturar un aspecto específico del proceso.

Tabla 6.

Descripción de las columnas de la tabla global mantenimiento correctivo y preventivo

Nombre de la Columna	Descripción	Formula aplicada
MTBC	Tiempo acumulado entre mantenimientos correctivos	$\sum TBF$
TBMP	Tiempo acumulado entre mantenimientos correctivos	$\sum TBP$
TTR	Tiempo acumulado de reparaciones correctivas	$\sum TR$
MP	Tiempo acumulado de reparaciones preventivas	$\sum TRP$
BREAKDOWN C	Numero de averías	$\sum fallas$
BREAKDOWN P	Numero de mantenimientos preventivos	$\sum Preventivo$
MTBMC	Tiempo medio entre mantenimientos correctivos	$\frac{\sum TBF}{\sum fallas}$
MTBMP	Tiempo medio entre mantenimientos preventivos	$\frac{\sum TBP}{\sum Preventivos}$
MTTR	Tiempo promedio entre mantenimiento correctivo	$\frac{\sum TR}{\sum fallas}$
MP	Tiempo promedio entre mantenimiento preventivo	$\frac{\sum TBP}{\sum Preventivo}$
MTBM	Tiempo medio entre mantenimientos	$\frac{1}{\frac{1}{MTBMC} + \frac{1}{MTBMP}}$
M	Tiempo medio de mantenimiento activo	$\frac{1}{\frac{1}{MTBMC} + \frac{1}{MTNMP}}$
DISP AA	Disponibilidad alcanzada	$\frac{MTBM}{MTBM + M}$
P REFER 1	Tiempo del inicio de la falla	
P REFER 2	Tiempo final de la reparación	
P REFER 3	Tiempo final de la reparación preventiva	
P REFER 4	Tiempo de inicio del mantenimiento preventivo	

Tabla 7.*Descripción de las columnas de la tabla global mantenimiento correctivo*

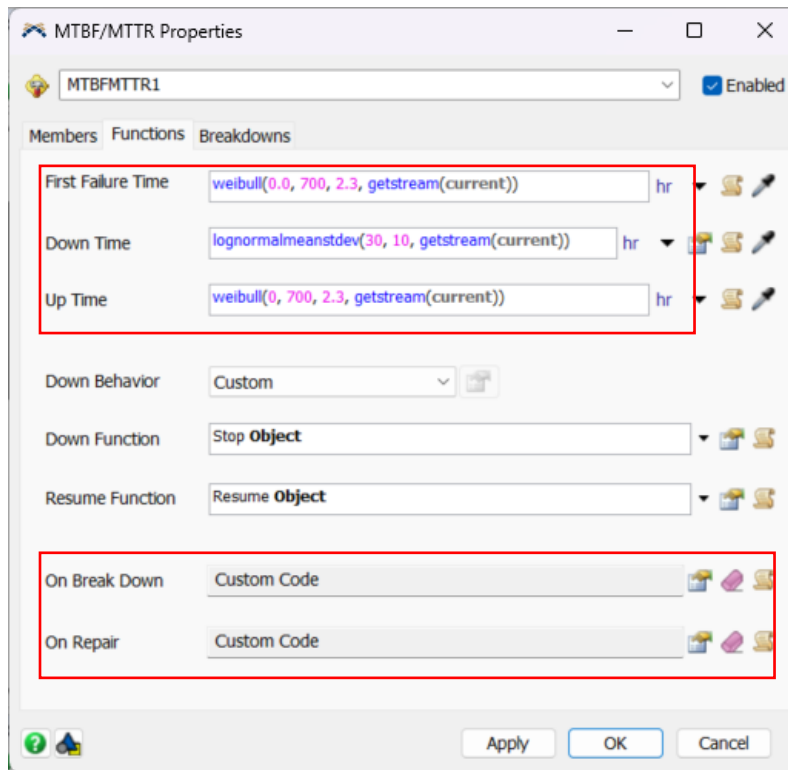
Columnas de la tabla global	Descripción	Formula aplicada
TBF	Tiempo acumulado entre fallas	$\sum TBF$
TTR	Tiempo acumulado de reparaciones	$\sum TR$
BREAKDOWN	Numero de fallas	$\sum fallas$
MTBF	Tiempo promedio entre fallas	$\frac{\sum TBF}{\sum fallas}$
MTTR	Tiempo promedio de reparaciones	$\frac{\sum TR}{\sum fallas}$
DISP AI	Disponibilidad inherente	$\frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$
P REFER 1	Tiempo del inicio de la falla	
P REFER 2	Tiempo final de la reparación	

7.4.2. Configuración del tiempo de fallas, reparaciones y costos

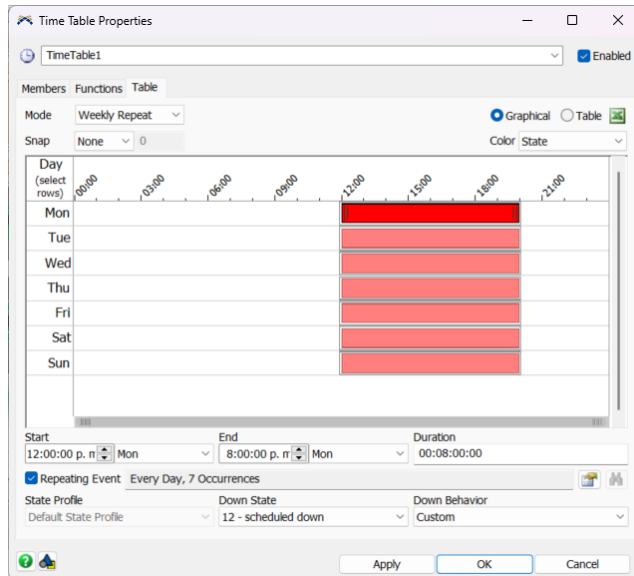
En la simulación, que incluye 23 máquinas, se configuraron los tiempos entre fallas mediante la herramienta MTBF/MTTR de FlexSim, la cual permite definir el Up Time (tiempo entre fallas) y el Down Time (tiempo de reparación) para cada máquina, utilizando las distribuciones correspondientes (**Tabla 4**). La herramienta también incluye activadores que ejecutan eventos de falla o reparación, lo que permite utilizar un código personalizado para realizar los cálculos de confiabilidad y mantenibilidad. "Además, cuenta con la opción de First Failure Time para unidades no reparables. Esta opción utiliza la misma distribución de fallas y se activa solo una vez durante la simulación. Al no utilizarlo, la simulación comenzará automáticamente con una reparación. Esta configuración se implementó a todas las máquinas, asegurando una representación precisa de los ciclos de falla y reparación en el modelo (ver **Figura 16**).

Figura 16.

Configuración para la maquina 1 MTBF/MTTR.



Por otro lado, el mantenimiento preventivo se gestiona mediante tablas de tiempos que permiten programar el tiempo de inactividad y los cambios de estado de los objetos en el modelo. Cada tabla de tiempos puede controlar múltiples objetos, y un objeto puede estar gestionado por varias tablas de tiempos. En el modelo, con una hora de inicio establecida a las 12:00 PM y una duración de inactividad de 8 horas, la tabla de tiempos programará automáticamente el mantenimiento preventivo de 12:00 PM a 8:00 PM. Durante este intervalo, el objeto estará en estado de inactividad, aplicando las funciones de mantenimiento preventivo configuradas. Cabe destacar que la hora de inicio del modelo no influye en este comportamiento siempre que la tabla de tiempos esté configurada para repetirse diariamente, asegurando una programación constante y efectiva del mantenimiento preventivo.

Figura 17.*Panel de propiedades de las times tables*

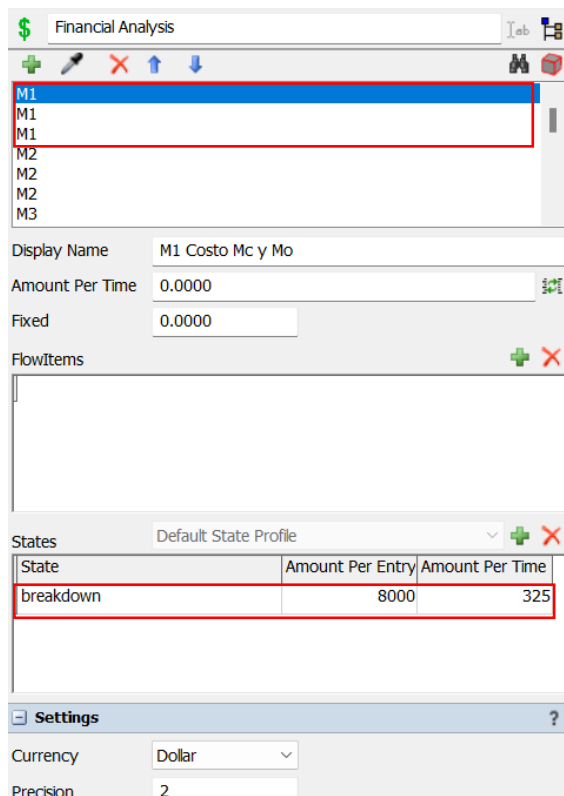
A continuación, en el análisis financiero realizado con FlexSim, calcula detalladamente los costos asociados al mantenimiento en el sistema modelado. Asignando los costos específicos a cada máquina, incluyendo mantenimiento correctivo, preventivo, mano de obra y tiempos de inactividad. Los parámetros se configuraron para recopilar datos precisos, lo que permitió un análisis detallado de los costos a lo largo del tiempo. Para acceder a esta herramienta, se debe seleccionar la opción "Toolbox", luego dirigirse a "Dashboards", y dentro de este menú, elegir "Library-General-Financial Analysis".

Para configurar los costos, se utilizó el panel de propiedades, asignando a cada máquina tres categorías: mantenimiento correctivo, preventivo y costos por indisponibilidad, con tres instancias de M1. En detalle, en la sección de estados, se configuró el valor de cantidad por entrada, que se aplica al entrar en el estado "Breakdown", y la cantidad por tiempo, que se acumula mientras el objeto permanece en ese estado. De igual manera, en la

Figura 18, el Display Name “M1 Costo MC y Mo” indica los costos del mantenimiento correctivo y la mano de obra. Este mismo procedimiento se aplicó para el mantenimiento preventivo, mientras que la indisponibilidad se calculó únicamente en función del tiempo que la máquina está en los estados de "Breakdown" y "Scheduled Down". FlexSim tiene la capacidad de exportar los datos generados durante la simulación a un archivo CSV, lo cual facilita el análisis en herramientas externas como Excel o software de análisis de datos.

Figura 18.

Panel de propiedades del Financial Analysis



Finalmente, se desarrolló una interfaz de usuario para la configuración de parámetros del modelo, permitiendo ajustes en los tiempos de fallas, tiempos de reparación, intervenciones de mantenimiento preventivo y sus respectivos tiempos. Este panel de control personalizado facilita

la modificación de variables clave antes de ejecutar la simulación, permitiendo a los usuarios gestionar estos parámetros sin necesidad de interactuar directamente con el modelo de simulación.

Para construir esta interfaz, se creó una tabla global denominada “Interfaz Configuración” que almacena los parámetros y se vinculó con las configuraciones internas del modelo. En el **dashboard**, se accedió a la sección **Library - Model Input** y se utilizó la opción “**Edit**” para enlazar los parámetros en la tabla global con su representación en el dashboard. Este enlace asegura que los parámetros sean visibles y modificables directamente en la interfaz, ofreciendo un control interactivo y eficiente del modelo (ver **Figura 19**).

Figura 19.

Interfaz de configuración para el usuario

Máquinas	Tiempo de fallas Unidad: horas		Tiempo de reparación para las 23 máquinas mantenimiento Unidad: horas		Tiempo de intervención Unidad: horas	Tiempo de reparación por cada intervención Unidad: horas
	Weibull		Log Normal			
	Parámetro de Forma	Parámetro de Escala	Mean	Std Dev		
M1	2.30	700.00	30.00	10.00	200.00	8.00
M2	4.00	500.00			500.00	
M3	2.00	600.00			300.00	
M4	2.00	800.00			300.00	
M5	3.00	540.00			200.00	
M6	2.60	420.00			600.00	
M7	2.60	480.00			900.00	
M8	1.90	550.00			600.00	
M9	2.00	800.00			800.00	
M10	2.40	700.00			120.00	
M11	2.30	500.00			500.00	
M12	2.90	620.00			10000.00	
M13	1.80	460.00			550.00	
M14	1.30	450.00			620.00	
M15	2.00	800.00			800.00	

La interfaz facilita una gestión intuitiva del modelo, permitiendo ajustes en los tiempos de fallas, reparación y mantenimiento preventivo. Este diseño hace el sistema accesible para usuarios sin experiencia en FlexSim, permitiendo una manipulación efectiva sin conocimientos técnicos avanzados.

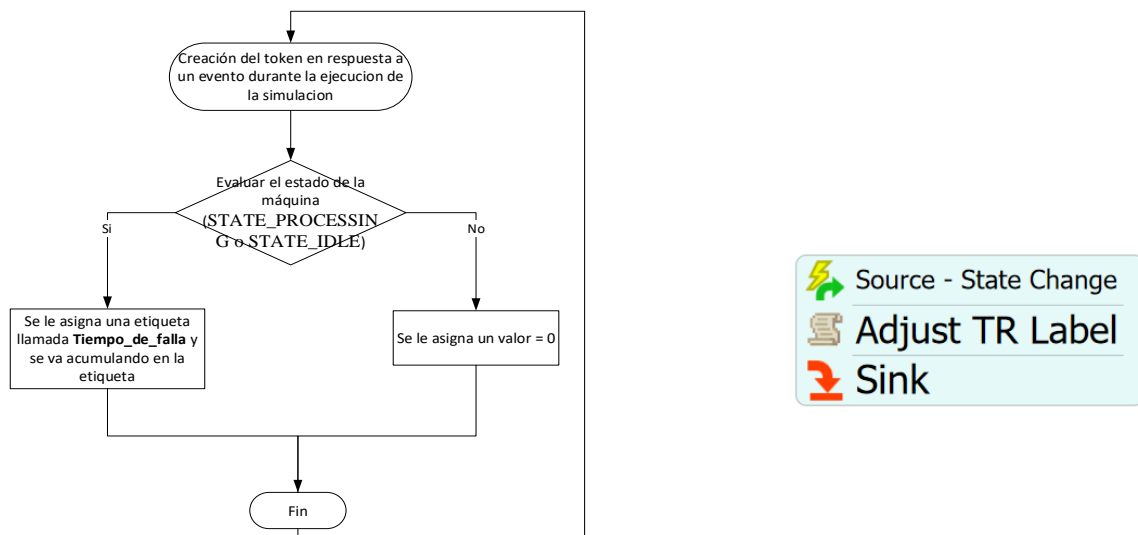
7.4.3. Modelado de degradación de la máquina para Mantenimiento Correctivo y preventivo

En FlexSim, la herramienta estándar para el análisis de MTBF/MTTR presenta ciertas limitaciones, especialmente cuando se trata de incluir el mantenimiento preventivo. Un problema notable es que, al ejecutar un mantenimiento preventivo durante la simulación, la herramienta adelanta el evento de fallo programado, lo que no refleja con precisión el impacto real del mantenimiento preventivo en el rendimiento de la máquina. Para superar esta limitación, se ha desarrollado una lógica específica que simula la degradación progresiva de las máquinas y permite que el mantenimiento preventivo restaure adecuadamente el estado de estas.

En la primera etapa de la estrategia, se modela la degradación de la máquina utilizando una etiqueta denominada *Tiempo_de_Falla*, que representa su condición de degradación. Esta etiqueta incrementa progresivamente en función del estado en el que se encuentra la máquina, por ejemplo, *STATE_PROCESSING* o *STATE_IDLE*. En la **Figura 20** se muestra la lógica implementada en FlexSim, la cual se compara con un diagrama para ilustrar claramente el proceso y su funcionamiento.

Figura 20.

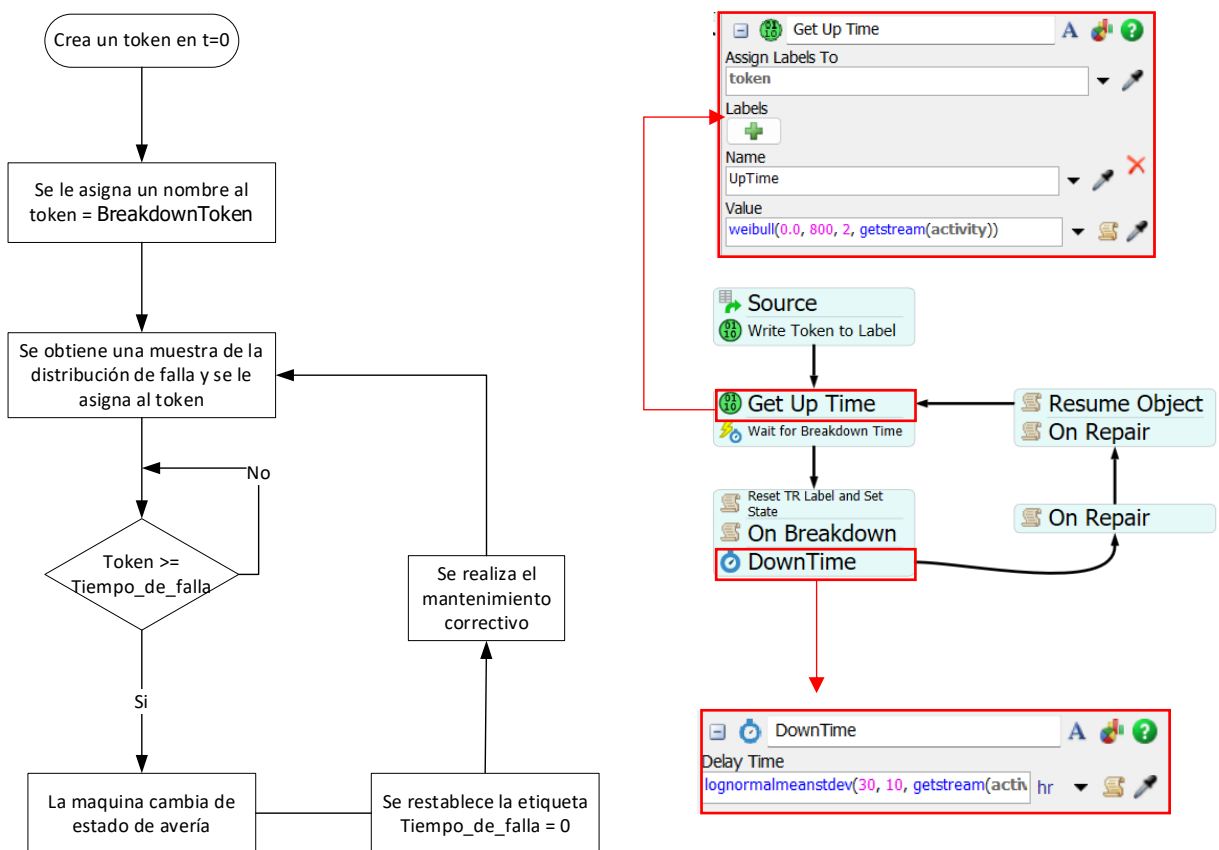
Diagrama Comparativo de la Lógica Implementada en FlexSim



Ahora, para gestionar el cambio de estado de la máquina a una avería, se implementa una lógica en la que, cuando el valor de la etiqueta Tiempo_de_Falla alcanza o supera la muestra de la distribución de fallas, la máquina se detiene automáticamente. Este evento desencadena la acción de reparación, la cual se ejecuta según los parámetros definidos para el mantenimiento. Esta restauración reinicia el contador de degradación, permitiendo que el proceso de deterioro comience de nuevo desde un estado óptimo. Además, se asegura que el sistema registre el tiempo de fallo y la duración de la reparación, como se ilustra en la **Figura 21**.

Figura 21.

Diagrama comparativo del estado de avería en FlexSim

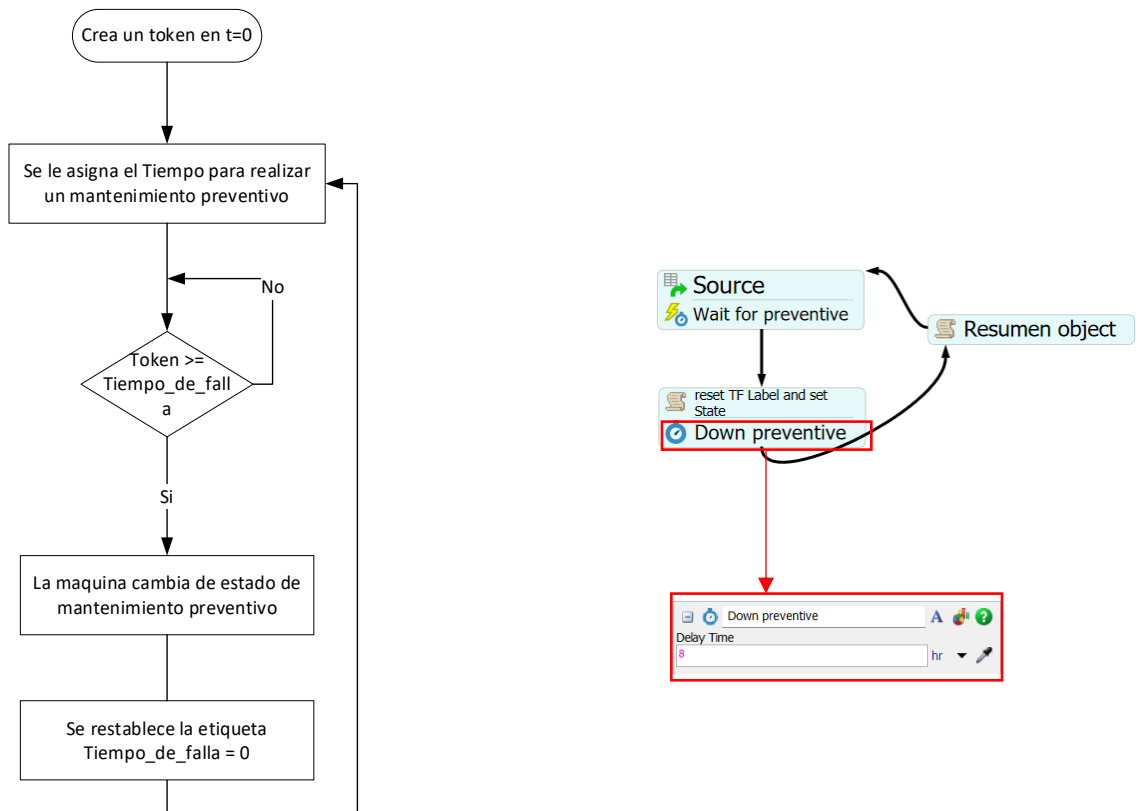


Por otro lado, la programación del mantenimiento preventivo se basa en la condición de degradación de la máquina, utilizando el tiempo transcurrido desde la última intervención, ya sea

correctiva o preventiva, como criterio principal. En consecuencia, cuando se alcanza el intervalo programado para el mantenimiento, la máquina cambia de estado a STATE_SCHEDULED_DOWN, lo que indica que se debe realizar dicha intervención y ejecutar el tiempo de reparación. Además, al llevar a cabo el mantenimiento preventivo, la etiqueta Tiempo_de_Falla se restaura a 0, reflejando el restablecimiento del estado de degradación de la máquina. De esta manera, cada intervención de mantenimiento refleja claramente su impacto en el rendimiento de la máquina y permite una evaluación precisa de la efectividad del mantenimiento preventivo, como se muestra en la **Figura 22**.

Figura 22

Diagrama comparativo del estado de mantenimiento preventivo en FlexSim



7.4.4. Medidas de desempeño

En el ámbito de la modelación y simulación, es esencial emplear medidas de desempeño y análisis de sensibilidad para evaluar la robustez y fiabilidad de los modelos creados. Estas medidas permiten evaluar el rendimiento del modelo en función de criterios específicos, proporcionando una comprensión clara de su precisión y utilidad en la toma de decisiones. Por otro lado, el análisis de sensibilidad desempeña un papel crucial al cuantificar los efectos de las variaciones de los parámetros en los resultados calculados. Su objetivo fundamental es determinar cómo las variaciones en los factores clave afectan los resultados del modelo. Estas técnicas son vitales para identificar qué variables tienen el mayor impacto en los resultados y ayudar a comprender las complejidades del sistema modelado.

En el dinámico mundo del mantenimiento industrial, donde cada segundo cuenta y cada fallo puede tener un impacto significativo en la productividad, el uso de modelos de simulación se ha convertido en una herramienta esencial. Estos modelos ofrecen una visión detallada de los sistemas y permiten analizar medidas cruciales de desempeño. En este caso, el propósito es profundizar en la confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos del mantenimiento. Analizar la confiabilidad garantiza que los equipos funcionen sin problemas durante períodos prolongados, mientras que evaluar la mantenibilidad se centra en la facilidad y rapidez con la que se pueden realizar las reparaciones. La disponibilidad se convierte en un indicador crucial de la eficiencia operativa, y los costos del mantenimiento son factores determinantes en la toma de decisiones financieras. Así, estos modelos no solo ayudan a prever posibles fallos, sino que también permiten a las empresas tomar decisiones informadas que pueden marcar la diferencia en un entorno industrial altamente competitivo y desafiante.

7.4.4.1. Indicador de Confiabilidad

El tiempo medio entre fallas (MTBF) representa el período de tiempo estimado entre el final de una falla y la ocurrencia de otra, lo que demuestra el lapso hasta que se presenta el próximo incidente de “falla”. En seguida se presenta la fórmula para este indicador.

$$MTBF = \frac{\sum TBF}{\text{Número de fallas}}$$

TBF = Tiempo entre fallas

Cuanto mayor sea el MTBF, mayor será la fiabilidad del equipo y, como resultado, se experimentarán menos interrupciones en su funcionamiento.

7.4.4.2. Indicador de mantenibilidad

El tiempo medio de reparación (MTTR) representa el tiempo promedio necesario para restaurar la funcionalidad de un equipo o proceso después de una falla. Este tiempo incluye el período dedicado a analizar y diagnosticar la falla, así como el tiempo de planificación necesario para llevar a cabo la reparación. En seguida se presenta la fórmula para este indicador.

$$MTTR = \frac{\sum TTR}{\text{Número de fallas}}$$

TTR = Tiempo para reparación.

7.4.4.3. Indicador disponibilidad

La **disponibilidad inherente** se calcula exclusivamente a partir de la frecuencia de fallas y del tiempo necesario para las reparaciones. En seguida se presenta la fórmula para este indicador.

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

MTBF = tiempo medio entre falla.

MTTR = tiempo medio entre reparación.

La **disponibilidad alcanzada** es la relación entre el tiempo medio entre mantenimientos (MTBM) y la suma del tiempo medio entre mantenimiento (MTBM) más el tiempo medio de mantenimiento (\bar{M}). En seguida se presenta la fórmula para este indicador.

$$A_A = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}}$$

7.4.4.4. Costos de mantenimiento

El indicador en términos Costo Total de Mantenimiento (CTM), que comprende tanto los costos de mantenimiento preventivo (PM) como los costos de mantenimiento correctivo (CM). Estos costos se determinan según las particularidades de las fallas y las reparaciones, los parámetros de costos y el programa establecido para el mantenimiento preventivo. En seguida se presenta la fórmula para este indicador.

$$CTM = \sum_i^n \sum_j^n N_{cm\ i} \times (TTR_{cm\ i} * C_{cm} + FC_{cm}) + N_{pm\ j} \times (TTR_{pm\ j} * C_{pm} + FC_{pm})$$

N_{cm} = Número de fallas.

TTR_{cm} = Tiempo para reparación mantenimiento correctivo.

C_{cm} = Costo mano de obra mantenimiento correctivo.

FC_{cm} = Costo para llevar a cabo el mantenimiento correctivo.

N_{pm} = Número de mantenimiento preventivos.

TTR_{pm} = Tiempo para reparación mantenimiento preventivo.

C_{cm} = Costo mano de obra mantenimiento preventivo.

FC_{cm} = Costo para llevar a cabo el mantenimiento preventivo.

7.4.5. Verificación

La verificación del modelo se centra en asegurar el apropiado desarrollo del modelo conceptual, su correcta implementación y ejecución sin inconvenientes en el entorno de simulación asignado. Este procedimiento incluye la revisión para confirmar la ausencia de errores en el software, siendo esencial para garantizar que la representación abstracta en el modelo conceptual se traduzca de forma precisa y coherente en el modelo computacional. Esto proporciona una base confiable para el diseño, desarrollo y evaluación del sistema bajo estudio.

En el transcurso del proceso de verificación, se pueden implementar diversas directrices. En primera instancia, se sugiere que un revisor externo, idealmente un especialista en el software de simulación lleve a cabo una revisión exhaustiva del modelo computacional.

En segunda instancia, con el propósito de asegurar la coherencia en cada fase del procedimiento, resulta imperativo crear un diagrama detallado que abarque meticulosamente cada acción lógicamente posible dentro del sistema. Este enfoque garantiza un seguimiento riguroso de la lógica del modelo ante cada acción y tipo de evento, asegurando así una implementación precisa y consistente en respuesta a la ocurrencia de eventos (ver **Figura 12**).

En tercera instancia, dentro del ámbito de los modelos probabilísticos, se introduce una fase adicional clave para fortalecer el proceso de validación. Esta fase consiste en la ejecución de una versión determinística del modelo, cuyos resultados se contrastan con valores previamente establecidos en investigaciones anteriores. En este caso, se emplearon datos provenientes del libro *Mantenimiento: Planeación, Ejecución y Control* (Mora Gutiérrez, 2009b), los cuales se

compararon con los resultados del modelo simulado, arrojando coincidencias en los datos, lo que refuerza la confiabilidad del modelo y la robustez de su estructura analítica. Este enfoque estratégico no solo posibilita la verificación meticulosa de la precisión, coherencia de las cifras y valores generados en el modelo, sino que también valida la robustez del mismo al confrontarlo con datos históricos ya establecidos. De esta manera, se consolida la confianza en la capacidad predictiva del modelo probabilístico, proporcionando una base sólida respaldada por la comparación directa con información previamente validada y aceptada.

En una cuarta instancia, se emplean herramientas específicas, como el “debug” de FlexSim, que simplifican la depuración de la simulación. Este recurso facilita la detección y corrección de errores a través de la monitorización continua de la simulación, el enfoque en entidades, líneas de código o procedimientos específicos, así como la observación de valores de componentes seleccionados al detener la simulación. Estas funcionalidades integrales aseguran un proceso de desarrollo robusto y libre de fallos en el modelo.

Una una quinta instancia, la verificación lógica y matemática desempeña una función crucial al asegurar la consistencia y exactitud de los algoritmos y reglas fundamentales dentro de un modelo de simulación. Su propósito principal radica en la detección y corrección de potenciales errores de índole lógica o matemática, como divisiones por cero, lógica parcialmente especificada o la obtención de resultados carentes de sentido ante variaciones extremas o valores atípicos. Este proceso crítico contribuye a consolidar la robustez y confiabilidad del sistema en desarrollo.

Finalmente, se destaca la práctica de recorrer sistemáticamente el modelo paso a paso. Este enfoque implica desplazarse a través del tiempo y eventos de manera metódica, o realizar una simulación manual del movimiento de un reducido número de entidades. La aplicación cuidadosa

de esta estrategia permite una evaluación exhaustiva del comportamiento del modelo, asegurando una verificación rigurosa mediante el análisis detallado de cada paso, evento y entidad involucrada.

7.4.6. Definición y evaluación de escenarios

El propósito central de definir y evaluar escenarios radica en descubrir opciones de mejora que permitan disminuir los valores de las medidas de desempeño preestablecidas. La confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y costos de mantenimiento representan aspectos cruciales para asegurar el óptimo rendimiento de cualquier sistema o equipo. Estas métricas desempeñan un papel fundamental en garantizar la eficiencia y efectividad a lo largo del ciclo de vida operacional de un equipo o sistema.

Estas medidas no solo actúan como indicadores clave para evaluar el funcionamiento de un sistema, sino que también resultan esenciales para identificar áreas de oportunidad y optimización. La confiabilidad, que denota la capacidad del sistema para llevar a cabo sus funciones sin fallos, y la mantenibilidad, que evalúa la facilidad y rapidez de las reparaciones, constituyen factores interrelacionados que influyen directamente en la disponibilidad y los costos de mantenimiento.

La disponibilidad, que mide la proporción de tiempo en que el sistema está operativo, se convierte en un indicador crítico para asegurar que el sistema o equipo esté listo para su uso cuando se requiera. Por último, los costos de mantenimiento, que comprenden tanto los recursos financieros como temporales, desempeñan un papel esencial en la gestión eficiente y sostenible del sistema a lo largo de su ciclo de vida operacional.

El desarrollo de Estrategias de Mantenimiento en el Software FlexSim. En el marco de la planificación, se presentan tres modelos distintos, detallados en la **Tabla 8**.

El modelo 1, adopta exclusivamente la estrategia de mantenimiento correctivo (CM), donde las intervenciones ocurren únicamente en respuesta a averías. Esta modalidad implica que la máquina se detiene completamente cada vez que se produce una avería en la máquina.

En el Modelo 2, se implementa una estrategia de mantenimiento preventivo periódico. Esta estrategia se aplica después de un número determinado de horas de operación del equipo, cuando se prevé que ciertos componentes clave ya han sufrido desgaste y necesitan ser reemplazados. Tras cada intervención, el sistema se restaura a un estado "como nuevo", eliminando todo el deterioro acumulado y devolviendo la maquinaria a su condición original de funcionamiento. Si bien el mantenimiento preventivo se programa tras un período específico de operación sin fallas, si ocurre una falla antes de dicho intervalo, el mantenimiento se reprograma una vez que se haya resuelto la falla. Para identificar la mejor estrategia, se analizan cuatro escenarios distintos, donde el intervalo inicial del mantenimiento preventivo se toma del Modelo 1 y se compara con los tiempos obtenidos en tres escenarios adicionales, utilizando la función de confiabilidad con parámetros Weibull para ajustar los tiempos de intervención (ver).

Tabla 8.

Estrategias de mantenimiento

	Mantenimiento Correctivo (CM)	Mantenimiento Preventivo (PM)
Modelo 1	SI	NO
Modelo 2	SI	SI

7.4.7. Evaluación de escenarios y análisis de resultados Modelo 1 y 2

En este análisis, el modelo 1 representa un escenario específico, con el fin de evaluar los indicadores de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD). Cada modelo ha sido

diseñado para simular condiciones operativas particulares, permitiendo un estudio detallado de cómo los indicadores CMD responden en cada escenario.

7.4.7.1. Indicadores de CMD de mantenimiento en el modelo 1 y 2. Una vez obtenidos los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de cada una de las máquinas de la simulación, se pueden analizar sus parámetros para realizar ciertas conclusiones y observaciones. Las 23 máquinas analizadas siguen una distribución de Weibull en sus diferentes etapas, el indicador Beta es una medida de dispersión del comportamiento de las fallas y es inverso a la duración promedio de ellas. Para las máquinas M22, M14, M21, M13, M8 se encuentran en la etapa I de la fase III, ya las fallas se vuelven muy similares en tiempo; M3, M4, M9, M15 se encuentran en la etapa II de la fase III, la duración de las fallas tiende a estabilizarse; M17, M1, M11, M20, M10, M19, M18, M6, M7, M16, M23, M12, M5, M2 se encuentran en la etapa III de la fase III, ocurren fallas totalmente predecibles y sus tiempos de duración se normalizan totalmente (Mora Gutiérrez, 2009b).

En el modelo 1, se utilizaron los valores correctivos para calcular la disponibilidad inherente con los datos obtenidos de la simulación. El análisis de las 23 máquinas ofreció una visión integral de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, destacando la variabilidad de los resultados debido a las características particulares de cada máquina.

La M21 y M22 presenta un MTBF de 351.5 horas, lo que indica una confiabilidad más baja y un número relativamente alto de fallas. A pesar de esto, su disponibilidad puntual es de 0.92.

Por otro lado, la M17 tiene un MTBF de 761.57 horas, indicando una confiabilidad sólida. Con un MTTR de 23.9 horas, su disponibilidad puntual es de 0.96, reflejando un alto nivel de eficiencia operativa. La combinación de un MTBF alto y un MTTR eficiente contribuye a esta alta disponibilidad.

Tabla 9.*Resumen de resultados de la simulación para las 23 Maquinas CMD Modelo1*

Máquinas	MTBF	MTTR	Disponibilidad Puntual
M1	608,62	28,47	0,96
M2	439,73	28,76	0,94
M3	486,91	29,37	0,94
M4	717,28	29,10	0,96
M5	473,56	31,26	0,94
M6	380,21	30,71	0,93
M7	430,15	30,42	0,93
M8	458,67	29,76	0,94
M9	720,99	31,42	0,96
M10	643,01	30,63	0,95
M11	461,54	29,90	0,94
M12	549,88	29,35	0,95
M13	395,19	29,47	0,93
M14	447,85	29,71	0,94
M15	756,82	30,42	0,96
M16	593,36	31,14	0,95
M17	761,57	29,80	0,96
M18	619,08	29,26	0,95
M19	444,22	29,15	0,94
M20	506,72	30,03	0,94
M21	351,5	31,00	0,92
M22	380,42	29,32	0,93
M23	553,41	29,58	0,95

En el modelo 2, se tuvieron en cuenta los valores tanto de mantenimiento correctivo como preventivo para calcular la disponibilidad alcanzada basada en los datos arrojados por la simulación.

Tabla 10.*Resumen de resultados de la simulación para las 23 Maquinas CMD Modelo2*

Máquinas	MTTR	MP	MTBMP	MTBMC	MTBM	M	A
M1	31,34	8	969,18	1071,32	508,85	19,09	0,96
M2	30,85	8	715,48	880,50	394,73	18,25	0,96
M3	28,56	8	681,94	1042,39	412,24	16,13	0,96
M4	29,97	8	1150,09	1084,31	558,12	19,31	0,97

Continuación **Tabla 10**

Máquinas	MTTR	MP	MTBMP	MTBMC	MTBM	M	A
M5	30,88	8	779,89	808,83	397,05	19,23	0,95
M6	30,48	8	673,22	583,22	312,50	20,05	0,94
M7	30,49	8	754,12	697,98	362,48	19,68	0,95
M8	31,14	8	784,03	662,16	358,98	20,55	0,95
M9	29,95	8	1453,62	889,24	551,73	21,62	0,96
M10	30,12	8	1266,87	855,36	510,61	21,21	0,96
M11	29,26	8	894,90	581,73	352,55	20,88	0,94
M12	29,40	8	922,14	950,18	467,97	18,54	0,96
M13	29,80	8	639,99	584,39	305,47	19,39	0,94
M14	29,68	8	802,53	492,82	305,32	21,43	0,93
M15	31,90	8	1186,86	1188,35	593,80	19,94	0,97
M16	29,86	8	894,08	1155,41	504,04	17,54	0,97
M17	31,06	8	1482,12	996,65	595,92	21,79	0,96
M18	29,20	8	1037,86	1005,40	510,69	18,77	0,96
M19	30,90	8	786,66	657,24	358,08	20,47	0,95
M20	29,58	8	804,82	914,22	428,02	18,10	0,96
M21	29,48	8	650,29	408,03	250,72	21,20	0,92
M22	29,15	8	657,62	434,13	261,50	20,74	0,93
M23	30,53	8	1123,22	750,59	449,93	21,51	0,95

De acuerdo con los resultados de la simulación, el MTBM indica que, en promedio, las máquinas operan sin necesidad de mantenimiento durante 15 horas. El MTBMC de la máquina M15 de 1188.35 horas el equipo tiene un intervalo prolongado entre fallas correctivas, lo que indica una alta confiabilidad entre las demás. El MTBMP el equipo tiene un intervalo entre mantenimiento preventivo para la máquina M17 de 595.92 horas y una disponibilidad de 0.96.

En el desarrollo de este análisis basado en simulación para el modelo 1 y 2 se pudo conocer y predecir el comportamiento de la gestión de mantenimiento correctivos y preventivo. La simulación permitió identificar tres indicadores de mantenimiento de clase mundial: el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio para la reparación (MTTR) y la disponibilidad de los equipos. Por lo tanto, la simulación facilita una comparación entre las máquinas. Esta comparación

se realizó considerando equipos con características diferentes en su tasa de fallas, estableciendo el comportamiento de cada uno a lo largo del tiempo.

7.4.8. Análisis de Indicadores de Mantenimiento Modelo 2

En el análisis para identificar la estrategia óptima de mantenimiento preventivo, se desarrollaron tres modelos de simulación. En el Modelo 1, se utiliza el tiempo medio entre fallas (MTBF) como criterio para establecer el intervalo de mantenimiento preventivo periódico. Este intervalo se toma como referencia y se compara con los tiempos determinados en tres escenarios adicionales. Estos tiempos se obtienen mediante la modelización de la función de confiabilidad utilizando parámetros Weibull, que describe el comportamiento del deterioro y se centra en las unidades que permanecen operativas dentro del intervalo de tiempo (ver **Tabla 16**). La comparación del intervalo del Modelo 1 con los resultados de los tres escenarios adicionales permite evaluar la eficacia de la estrategia de mantenimiento preventivo y los costos asociados, facilitando la selección de la opción más adecuada. Los escenarios se resumen en la **Tabla 11** para identificar el mejor rendimiento del sistema.

Tabla 11.

Definición de escenarios del tiempo entre mantenimientos preventivos.

Maquinas	Escenarios			
	Actual Modelo 1	2 25%	3 75%	4 90%
M1	609	800	400	260
M2	440	540	370	290
M3	487	700	320	190
M4	717	940	430	260
M5	474	600	360	250
M6	380	480	260	180
M7	430	540	300	200
M8	459	650	280	170
M9	721	940	430	260
M10	643	800	420	270

Continuación **Tabla 11**

Maquinas	Escenarios			
	Actual Modelo 1	2 25%	3 75%	4 90%
M11	462	580	290	190
M12	550	690	400	280
M13	395	550	230	130
M14	448	580	170	80
M15	757	940	430	260
M16	593	790	430	290
M17	762	990	470	290
M18	619	800	430	290
M19	444	570	300	190
M20	507	690	350	230
M21	352	470	170	90
M22	380	530	140	60
M23	553	680	380	260

7.4.8.1. Evaluación de escenarios y análisis de resultados Modelo 2 Costo – Confiabilidad

Teniendo en cuenta los escenarios propuestos, es esencial analizar los resultados de cada alternativa. El análisis se fundamenta en una simulación previamente desarrollada, donde se implementa cada opción de mejora en el modelo validado, siguiendo los parámetros establecidos. Primero, se evaluó el impacto de las intervenciones de mantenimiento preventivo en la confiabilidad del sistema, examinando cómo cada estrategia afecta su desempeño y estabilidad operativa. Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los costos asociados a los diferentes escenarios, con el objetivo de identificar la mejor opción.

La calidad de funcionamiento de un elemento se evalúa generalmente en función del tiempo durante el cual se espera que el elemento opere de manera satisfactoria. Este período de

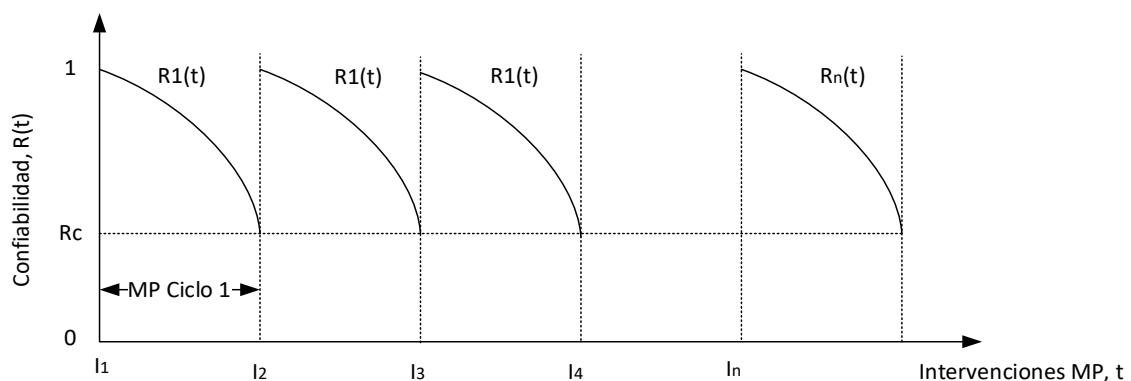
funcionamiento sin fallas refleja la confiabilidad del componente y su capacidad para cumplir con los requisitos operativos esperados.

7.4.8.2. Análisis de la Confiabilidad en Diversos Escenarios de Mantenimiento Preventivo. La confiabilidad de un sistema es fundamental para garantizar su desempeño y estabilidad operativa a lo largo del tiempo. En el contexto de la gestión del mantenimiento, la aplicación de estrategias efectivas puede significar una diferencia significativa en la capacidad del sistema para operar sin interrupciones.

Para evaluar la confiabilidad de una máquina o sistema, es crucial conocer en detalle las fallas específicas que estamos evaluando y controlar las condiciones de operación bajo las cuales se desarrollan. Es necesario establecer la duración del intervalo de tiempo, que puede expresarse en términos del número de ciclos u operaciones realizadas por el equipo en este caso tiempo en operación. En este sentido, las acciones de mantenimiento preventivo deben implementarse cuando se alcance un nivel de confiabilidad crítica aceptable, denotado como R_c , tal como se presenta en la Figura 23. Este nivel asegura que el sistema mantenga un funcionamiento constante en condiciones técnicas óptimas, con un costo operativo razonable por unidad de tiempo o una disponibilidad adecuada.

Figura 23.

Función de confiabilidad para un sistema con una política de MP de nivel crítico de confiabilidad



Este enfoque permite una evaluación de la confiabilidad, al integrar el conocimiento de las fallas, las condiciones operativas y los intervalos de tiempo, proporcionando una base sólida para el análisis y la toma de decisiones sobre el mantenimiento preventivo.

Una vez realizada las modificaciones y ajustes al modelo, se procede analizar los resultados obtenido de estos escenarios. Como se muestra en **Tabla 12** el porcentaje de variación del escenario actual en comparación con los otros escenarios, tomando como referencia el tiempo medio entre mantenimientos correctivos (MTBMC).

Tabla 12.

Porcentaje de variación del MTBMC de cada escenario.

Maquinas	Escenarios			
	1 Escenario Actual (h)	2 25%	3 75%	4 90%
M1	1071,32	-22,36%	48,03%	110,05%
M2	880,5	-26,06%	63,34%	210,32%
M3	1042,39	-9,76%	15,42%	90,92%
M4	1084,31	-11,44%	18,81%	130,43%
M5	808,83	-24,87%	82,96%	207,04%
M6	583,22	-15,64%	57,78%	232,13%
M7	697,98	-3,05%	127,23%	145,64%
M8	662,16	-10,87%	83,93%	118,50%
M9	889,24	-32,87%	63,25%	154,72%
M10	855,36	-12,70%	69,79%	158,46%
M11	581,73	-15,86%	74,59%	230,96%
M12	950,18	-27,28%	39,85%	140,71%
M13	584,39	-24,14%	45,31%	106,69%
M14	492,82	1,66%	14,93%	38,97%
M15	1188,35	-13,00%	17,21%	93,64%
M16	1155,41	-29,90%	80,15%	251,53%
M17	996,65	-16,99%	43,64%	222,40%
M18	1005,4	-11,71%	22,72%	185,70%
M19	657,24	-10,34%	64,20%	132,79%
M20	914,22	-28,51%	24,76%	144,47%
M21	408,03	12,22%	66,99%	76,50%
M22	434,13	-19,22%	10,48%	50,16%
M23	750,59	-9,69%	55,15%	195,96%

El mantenimiento preventivo busca disminuir la frecuencia y severidad de los fallos antes de que se presenten. En el escenario 2, los porcentajes negativos señalan una disminución en la confiabilidad, mientras que los porcentajes positivos indican un aumento, gracias a intervenciones preventivas más frecuentes. El análisis revela que el mantenimiento preventivo mejora significativamente la confiabilidad de diversas máquinas. Sin embargo, la respuesta de las máquinas varía según las intervenciones, lo que sugiere que el enfoque debe ajustarse a las condiciones operativas y necesidades específicas de cada máquina para optimizar su efectividad. En consecuencia, la **Figura 24** ilustra el costo total de las 23 máquinas, destacando la distribución de costos en cada escenario propuesto.

Figura 24.

Evaluación del Costo Total Por Cada Escenario

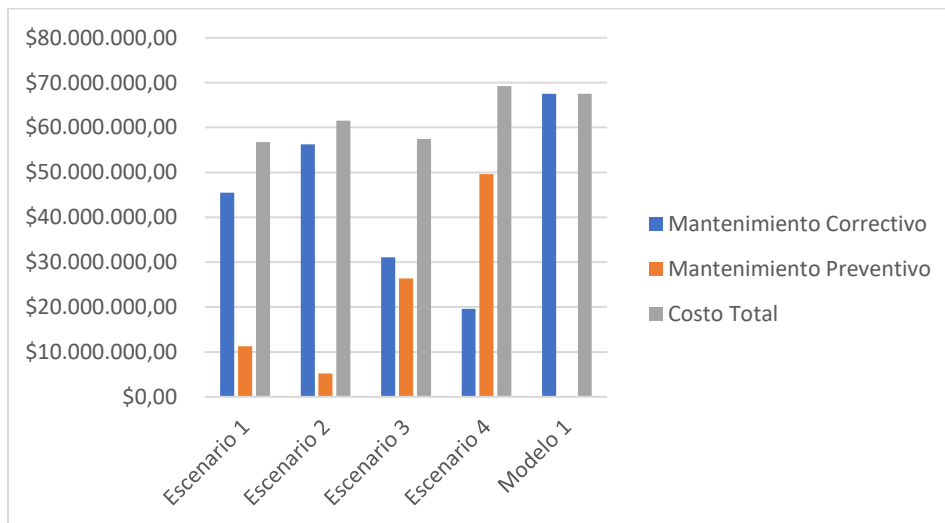


Tabla 13.

Diferencia de los costos totales entre escenarios

Escenario 3 vs 1	Escenario 3 vs 2	Escenario 3 vs 4	Escenario 3 vs Modelo 1
-1,18%	7,04%	20,52%	17,55%

Tras la simulación de los cuatro escenarios, se identifican el tiempo medio entre mantenimiento correctivo (MTBMC) asociado a la confiabilidad, y el costo total de cada uno. Estos resultados permiten seleccionar la opción más adecuada entre los escenarios evaluados. El objetivo es analizar la relación Costo-Confiabilidad, comparando los costos de mantenimiento con los indicadores de confiabilidad en cada escenario. Además, se evalúa cómo el incremento en los costos de mantenimiento preventivo impacta en la mejora de la confiabilidad del sistema y en la reducción de los costos de mantenimiento correctivo que se ve reflejado en el número de fallas que ocurren en cada uno de los escenarios (ver **Tabla 14**).

Tabla 14.

Fallas ocurridas según los resultados de la simulación

Maquinas	Numero de fallas correctivas			
	Escenarios			
	1	2	3	4
	Escenario Actual	25%	75%	90%
M1	78	101	56	38
M2	93	126	55	37
M3	100	111	67	53
M4	70	80	51	27
M5	89	117	58	31
M6	131	155	77	58
M7	124	128	78	44
M8	104	117	63	61
M9	65	96	44	40
M10	79	90	46	29
M11	118	141	75	45
M12	73	99	50	36
M13	117	155	84	58
M14	166	165	129	108
M15	79	90	45	39
M16	61	87	45	35
M17	59	70	38	34
M18	82	93	53	36
M19	109	121	74	47
M20	79	113	59	44
M21	181	163	126	97

Continuación **Tabla 14**

Maquinas	Numero de fallas correctivas			
	Escenarios			
	1	2	3	4
	Escenario Actual	25%	75%	90%
M22	152	187	159	135
M23	86	98	54	33

Para diseñar un sistema productivo eficiente y competitivo en el entorno industrial actual, es fundamental evaluar y cuantificar con precisión el impacto económico de la confiabilidad. Al mismo tiempo, es necesario establecer un equilibrio en los costos para alcanzar un costo óptimo en la gestión del mantenimiento.

Una administración eficiente debe centrarse en identificar el punto de menor costo, ajustando adecuadamente los tiempos de mantenimiento, de modo que el sistema se mantenga en un nivel óptimo de operación, maximizando la confiabilidad y minimizando los costos asociados. Según lo mostrado en la **Tabla 15**, el escenario 3 propuesto resulta ser la mejor opción en términos de costo-beneficio. En el caso de la máquina 1, se logró una mejora del 48.03% en comparación con el escenario seleccionado, alcanzando un tiempo promedio sin fallas de 1587.86 horas. Además, permitió una disminución del 35.28% en los costos en comparación con el mantenimiento correctivo (modelo 1), mejorando así la confiabilidad y reduciendo aún más los costos totales. La capacidad de medir la confiabilidad es clave para prever el impacto de fallos inesperados y evaluar su repercusión económica de las 23 máquinas. Seleccionar el escenario adecuado es esencial para minimizar los costos asociados al mantenimiento correctivo y reducir su impacto en la producción. Además, este enfoque facilita la estimación del costo de confiabilidad a lo largo del ciclo de vida operacional del activo y permite predecir su comportamiento en distintos escenarios simulados.

También establece la frecuencia óptima para realizar mantenimiento preventivo, maximizando así la relación costo-beneficio.

Aunque el mantenimiento preventivo se introduce para mejorar la confiabilidad del sistema, puede volverse costoso si no se gestiona adecuadamente. Por lo tanto, el objetivo es equilibrar el mantenimiento correctivo y preventivo para minimizar los costos totales. El modelo de degradación y restauración de la máquina presentado en este estudio analiza cómo el mantenimiento preventivo extiende la confiabilidad del sistema y evalúa el impacto de las fallas a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión integral para optimizar la gestión del mantenimiento.

Tabla 15.

Comparación de resultados de alternativos.

Maquinas	Mejor Estratégica de mantenimiento preventivo (h)	Variación % MTBMC			Reducción % del Costo
		Escenario 1	Escenario 3	Modelo 1	Modelo 1
M1	400	1071,32	48,03%	-41,27%	30%
M2	370	880,5	63,34%	-50,55%	44%
M3	320	1042,39	15,42%	-48,41%	36%
M4	430	1084,31	18,81%	-40,24%	32%
M5	360	808,83	82,96%	-39,58%	24%
M6	260	583,22	57,78%	-34,99%	20%
M7	300	697,98	127,23%	-38,58%	26%
M8	280	662,16	83,93%	-26,34%	7%
M9	430	889,24	63,25%	-21,40%	6%
M10	420	855,36	69,79%	-27,84%	14%
M11	290	581,73	74,59%	-26,32%	15%
M12	400	950,18	39,85%	-41,23%	32%
M13	230	584,39	45,31%	-30,21%	14%
M14	170	492,82	14,93%	-19,80%	5%
M15	430	1188,35	17,21%	-39,39%	30%
M16	430	1155,41	80,15%	-45,99%	32%
M17	470	996,65	43,64%	-24,10%	10%
M18	430	1005,4	22,72%	-39,73%	29%
M19	300	657,24	64,20%	-35,60%	24%
M20	350	914,22	24,76%	-43,47%	33%
M21	170	408,03	66,99%	-18,62%	4%

Continuación **Tabla 15**

Maquinas	Mejor Estratégica de mantenimiento preventivo (h)	Variación % MTBMC			Reducción % del Costo
		Escenario 1	Escenario 3	Modelo 1	Modelo 1
M22	140	434,13	10,48%	-17,93%	1%
M23	380	750,59	55,15%	-28,63%	16%

En primer lugar, las acciones de mantenimiento preventivo deben implementarse con el fin de alcanzar un nivel de confiabilidad aceptable, el cual resulta esencial para mantener el sistema en un estado técnico adecuado y asegurar una disponibilidad acorde a los estándares establecidos. En este sentido, es importante destacar que la disponibilidad de cada máquina no depende únicamente del tiempo, sino de su confiabilidad y mantenibilidad. A medida que la mantenibilidad aumenta, su impacto sobre la disponibilidad se vuelve más significativo. Asimismo, mejorar la confiabilidad del sistema incrementa el tiempo de operación, lo que, en última instancia, mejora la disponibilidad. En consecuencia, la disponibilidad cuantifica el nivel de funcionamiento de una máquina y se convierte en un criterio clave para la toma de decisiones. Por ejemplo, si una máquina A presenta mayor confiabilidad y una máquina B destaca en mantenibilidad, se requiere integrar ambos factores para tomar una decisión objetiva. Por lo tanto, la disponibilidad ofrece una visión más integral del rendimiento global de la máquina.

Por otro lado, en el contexto del mantenimiento industrial, los costos asociados representan una parte considerable del costo total del producto. Dichos costos incluyen no solo reparaciones y mantenimiento preventivo, sino también sus implicaciones indirectas sobre la competitividad y rentabilidad de la empresa. Aunque es imposible eliminar todos los gastos vinculados al mantenimiento, una estrategia bien diseñada puede, en efecto, reducir los costos variables, lo que

a su vez impacta positivamente en la rentabilidad de la empresa al reducir el costo final del producto y mejorar su competitividad en el mercado.

En este contexto, surge el desafío de equilibrar la reducción de costos con la necesidad de mantener la calidad y la eficiencia operativa. En este sentido, una gestión proactiva y estratégica del mantenimiento no solo busca minimizar los costos de reparación, sino también optimizar los costos operativos, lo que se traduce en una mayor rentabilidad. Así, para las organizaciones industriales, la gestión eficiente del mantenimiento resulta crucial para minimizar costos, mejorar la competitividad y garantizar el éxito a largo plazo. En conclusión, aunque siempre existirán gastos inevitables asociados al mantenimiento, una estrategia bien ejecutada puede reducir significativamente estos costos, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa y competitividad en el mercado.

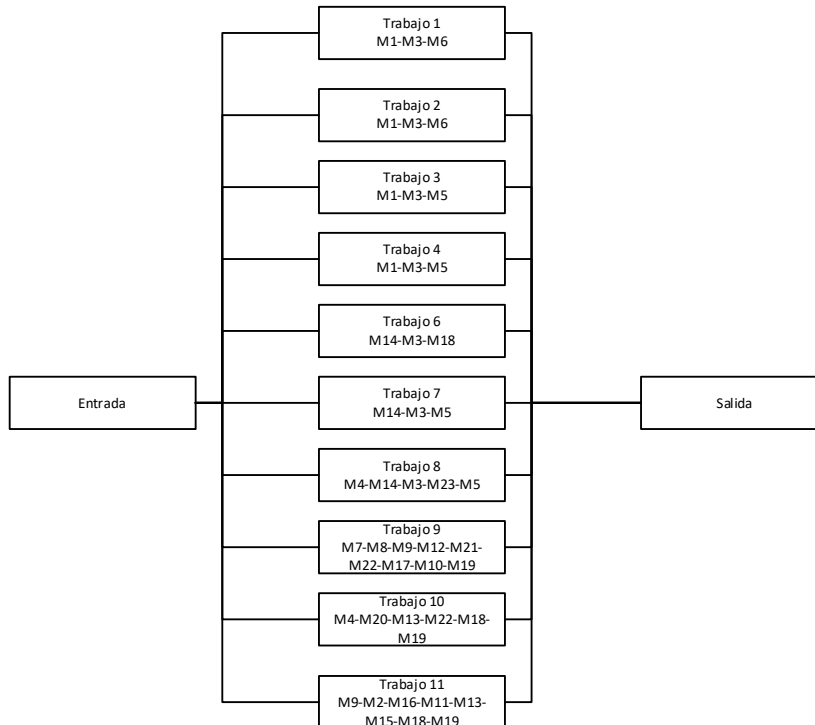
7.4.8.3. Confiabilidad del sistema. El diagrama de bloques es una herramienta gráfica fundamental en el análisis y modelado de sistemas industriales, especialmente en la evaluación de la confiabilidad en entornos complejos. A medida que los sistemas aumentan en complejidad, resulta más difícil evaluar su comportamiento global. Para hacerlo más manejable, se descomponen en partes más simples cuya confiabilidad puede ser analizada. Este proceso da lugar a un diagrama de bloques de confiabilidad, que se enfoca en los elementos que afectan directamente el desempeño del sistema, facilitando la identificación de puntos críticos.

El sistema en estudio involucra 23 máquinas distribuidas en 49 operaciones de mecanizado para la fabricación de 11 componentes que conforman un conjunto de transmisión. Se propone un diagrama de bloques que combina configuraciones en serie y paralelo. En los sistemas en serie, la falla de una máquina puede detener todo el sistema, lo que significa que la confiabilidad total es siempre menor que la del componente más confiable. En contraste, en los sistemas en paralelo, la

falla de una máquina no detiene la operación, lo que aumenta la confiabilidad global del sistema (ver **Figura 25**).

Figura 25.

Diagrama de bloques para la elaboración del conjunto de transmisión

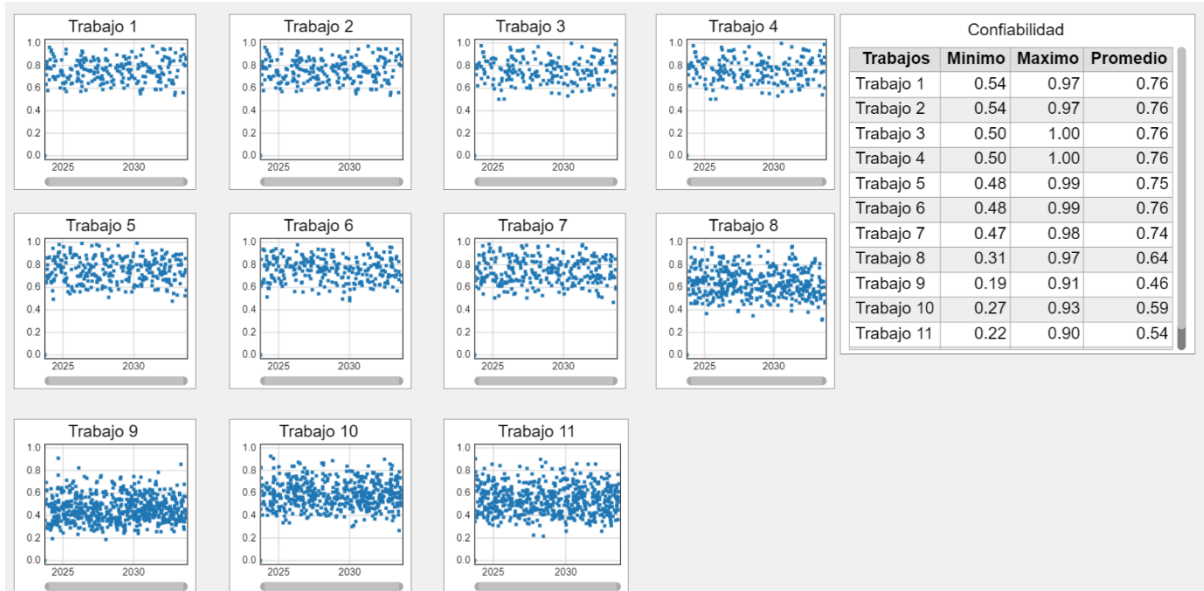


La simulación realizada proporciona una visión detallada de la confiabilidad del sistema a lo largo del tiempo, resaltando el impacto de las fallas en el rendimiento global. La etiqueta *tiempo_de_falla* permite rastrear el tiempo activo de cada máquina y calcular su confiabilidad en el momento de la falla, facilitando así una evaluación precisa del comportamiento del sistema. En el Trabajo 1, por ejemplo, la operación continua de las máquinas M1, M3 y M6 es esencial para la producción del componente. El análisis de las fallas combinadas de estas máquinas a lo largo del tiempo permite identificar su impacto en la confiabilidad general del sistema. Además, considerando la configuración del mantenimiento preventivo, se pueden determinar los rangos de confiabilidad mínima y máxima del sistema, ofreciendo una visión clara de su desempeño. Esto, a

su vez, facilita la toma de decisiones para optimizar la estrategia de mantenimiento, como se ilustra en la figura.

Figura 26.

Dispersión de fallas en relación con la confiabilidad de cada trabajo



Esta representación gráfica permite observar la ocurrencia de fallas y determinar que el Trabajo 1 alcanza una confiabilidad mínima del 54% bajo la configuración del Escenario 3, así como para los demás trabajos. En consecuencia, los resultados muestran que los trabajos con un número menor de máquinas, como el Trabajo 1 y el Trabajo 2, presentan una alta confiabilidad promedio. Por el contrario, los trabajos que incluyen más máquinas, como el Trabajo 9 y el Trabajo 10, revelan una menor confiabilidad. Esto se debe a que la inclusión de un mayor número de máquinas tiende a aumentar la complejidad, reduciendo así la confiabilidad en la elaboración del componente. En resumen, los valores mínimos y máximos de confiabilidad obtenidos durante la simulación reflejan el desempeño de las máquinas involucradas, delimitando el rango operativo del sistema durante su ciclo de vida operacional.

Finalmente, el análisis realizado demuestra que la simulación de eventos discretos es una herramienta crucial para la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento industrial. Este modelo permite evaluar cómo diferentes estrategias de mantenimiento afectan la confiabilidad de las máquinas antes de su implementación. La disponibilidad, que no depende únicamente del tiempo, sino de la confiabilidad y mantenibilidad, se mejora mediante una evaluación detallada de estos factores. Aunque el modelo ha sido diseñado específicamente para un entorno de manufactura con características particulares, su flexibilidad permite adaptarlo a otros contextos industriales con diversas condiciones de confiabilidad y mantenibilidad. De esta manera, se asegura que las decisiones se basen en una evaluación completa y precisa de los resultados, mejorando la eficiencia operativa y la competitividad general.

8. Conclusiones

En conclusión, este estudio ha permitido evaluar y comparar diversas estrategias de mantenimiento mediante la simulación de eventos discretos, proporcionando un análisis detallado de indicadores clave como Confiabilidad, Mantenibilidad, Disponibilidad (CMD) y los Costos de mantenimiento. Además, se ha presentado una metodología específica para proyectos de simulación enfocados en sistemas de mantenimiento, destacando la simulación como recurso experimental clave para apoyar la toma de decisiones.

La metodología aplicada ha facilitado la evaluación de escenarios y la implementación de políticas de mantenimiento preventivo en sistemas sujetos a fallas estocásticas en diferentes máquinas. Los modelos formulados han permitido determinar el nivel óptimo para cada política, subrayando la importancia de una estrategia de mantenimiento bien equilibrada para maximizar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados.

A partir de la revisión literaria sobre la simulación de eventos discretos en sistemas de mantenimiento, se puede concluir que esta herramienta es eficaz y ampliamente utilizada para evaluar y optimizar programas de mantenimiento en diversos contextos industriales. La simulación, en combinación con algoritmos genéticos y modelos de optimización, ha demostrado mejorar la eficiencia y rentabilidad de los sistemas de mantenimiento.

Para lograr un sistema productivo eficiente y competitivo en el entorno industrial, es fundamental evaluar el impacto económico de la confiabilidad. La disponibilidad es un indicador clave que integra tanto la confiabilidad como la mantenibilidad de una máquina, ofreciendo una perspectiva integral de su desempeño. En el análisis de escenarios, se observó que el Escenario 3 alcanzó una disponibilidad del 96%, valor comparable al modelo basado en mantenimiento correctivo (Modelo 1).

En el Escenario 3, cada avería dura aproximadamente 30 horas, mientras que el mantenimiento preventivo toma alrededor de 8 horas, lo que permite realizar tres mantenimientos preventivos por cada falla prevenida. La disponibilidad se consolida así como un criterio crucial para evaluar la eficacia de las estrategias de mantenimiento y su impacto en la productividad.

Los resultados muestran que el escenario seleccionado ofrece la mejor relación costo-beneficio. En el caso de la máquina 1, se logró una mejora del 48.03% en comparación con el escenario seleccionado y una disminución del 41.27% con el correctivo, alcanzando un tiempo promedio sin fallas de 1587.86 horas. Además, en el Escenario 3, los costos se redujeron en un 17.55% frente al mantenimiento correctivo (Modelo 1), mejorando tanto la confiabilidad como los costos.

Finalmente, estos hallazgos refuerzan la importancia de la simulación de eventos discretos como herramienta clave en el diseño de sistemas de mantenimiento eficientes y competitivos. No

solo optimiza los programas de mantenimiento, sino que también apoya la toma de decisiones estratégicas a lo largo del tiempo, contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones.

9. Recomendaciones

De acuerdo con el presente proyecto, se presentan las siguientes recomendaciones para el fortalecimiento del área de interés en los sistemas de mantenimiento.

Una limitación de este estudio es que no se basó en un caso de estudio real, lo que limita un análisis más profundo de las políticas de mantenimiento. Esto impidió modelar estrategias implementadas para buscar alternativas de mejora de manera más detallada.

Se recomienda ampliar el estudio para incluir más componentes de las máquinas, dado que en esta investigación solo se analizó un componente por máquina. Al considerar la totalidad de los componentes que pueden fallar, se podrían desarrollar políticas de mantenimiento más adaptadas a las características y fallas específicas de cada componente, evaluando también cómo estas fallas impactan en la confiabilidad y disponibilidad.

Se sugiere evaluar el impacto de las fallas en la producción total, ya que el estudio actual se centró en la medición de los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad, se podría obtener una visión más integral sobre cómo las fallas afectan la eficiencia productiva, permitiendo identificar cuellos de botella y optimizar los tiempos de inactividad en función de un mantenimiento más estratégico.

El modelo de degradación de este estudio puede adaptarse a condiciones operativas específicas, como la carga de trabajo, el tipo de producto a producir etc, ya que estos factores influyen significativamente en el desgaste de las máquinas.

Referencias bibliográficas

- Ali, A., Chen, X., Yang, Z., Lee, J., & Jun, N. (2008). Optimized maintenance design for manufacturing performance improvement using simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 1811–1819. <https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736270>
- Alrabghi, A., & Tiwari, A. (2016). A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 154, 160–170. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2016.06.003>
- Alrabghi, A., Tiwari, A., & Savill, M. (2017). Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies. *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 191–206. <https://doi.org/10.1016/J.JMSY.2017.05.008>
- Arata, A., & Furlanetto, L. (2005). *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento*.
- Ávila Espinosa, R. (1992). *Fundamentos del mantenimiento. Guías económicas, técnicas y administrativas*.
- Azadeh, A., Asadzadeh, S. M., Salehi, N., & Firoozi, M. (2015). *Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system-A combined Markovian simulation model*. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.009>
- Banks, J. (n.d.). Introduction to simulation. *2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No.00CH37165)*, 1, 9–16. <https://doi.org/10.1109/WSC.2000.899690>
- Banks, J., Carson II, J. S., & Barry L, N. (2005). *Discrete-Event System Simulation (Fourth)*. https://pavandm.files.wordpress.com/2017/03/discrete-event-system-simulation-jerry-banks_2.pdf

- Baqqal, Y., & El Hammoumi, M. (2018). 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*, 214–218. <https://doi.org/10.1109/ITMC.2018.8691152>
- Beaverstock, M., Greenwood, A., & Nordgren, W. (2017). *Applied Simulation Modeling and Analysis using FlexSim*. www.flexsim.com
- Bertalanffy, L. (1994). *Teoría general de los sistemas*. Fondo de cultura económica limitada.
- Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8)
- Blanchard, B. S., Verma, D., & Peterson, E. (1994). *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management* (Primera).
- Cacereño, A., Greiner, D., & Galván, B. J. (2021). Multi-Objective Optimum Design and Maintenance of Safety Systems: An In-Depth Comparison Study Including Encoding and Scheduling Aspects with NSGA-II. *Mathematics 2021, Vol. 9, Page 1751*, 9(15), 1751. <https://doi.org/10.3390/MATH9151751>
- Chiacchio, F., Aizpurua, J. I., Compagno, L., & D'urso, D. (2020). SHyFTOO, an object-oriented Monte Carlo simulation library for the modeling of Stochastic Hybrid Fault Tree Automaton. *Expert Systems With Applications*, 146, 113139. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113139>
- Coss Bu, R. (2004). *Simulación: Un enfoque práctico*.
- García Dunna, E., García Reyes, H., & Cárdenas Barrón, L. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel* (Segunda).

- Gaytán Reyes, A. (2000). *Administración del mantenimiento* [División de Estudios de Postgrado , Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/750/1/1020148008.PDF>
- Golbasi, O., & Turan, M. O. (2020). *A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106514>
- Hüseyin Turan, H., Atmis, M., Kosanoglu, F., Elsayah, S., & Ryan, M. J. (2020). *A risk-averse simulation-based approach for a joint optimization of workforce capacity, spare part stocks and scheduling priorities in maintenance planning*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107199>
- INCONTEC. (1999). *SEGURIDAD DE FUNCIONAMIENTO Y CALIDAD DE SERVICIO. MANTENIMIENTO. TERMINOLOGIA*. (Primera). <https://ecollection-icontec-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/normavw.aspx?ID=247>
- Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad*.
- Kothamasu, R., & Huang, S. H. (2007). Adaptive Mamdani fuzzy model for condition-based maintenance. *Fuzzy Sets and Systems*, 158, 2715–2733. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2007.07.004>
- Kumar, S., Manjrekar, V., Singh, V., & Lad, B. K. (2019). *Integrated yet distributed operations planning approach: A next generation manufacturing planning system*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.001>
- Lins, I. D., & Droguett, E. L. (2009). *MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF AVAILABILITY AND COST IN REPAIRABLE SYSTEMS DESIGN VIA GENETIC ALGORITHMS AND DISCRETE EVENT SIMULATION*. 29(1), 43–66.
- Mattila, V., & Virtanen, K. (2014). Maintenance scheduling of a fleet of fighter aircraft through multi-objective simulation-optimization. *SIMULATION*, 90(9), 1023–1040.

https://doi.org/10.1177/0037549714540008/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0037549714540008-FIG8.JPEG

Medina, D. E., Oviedo De Cuevas, L. M., Navarro, P. R., Carlos, J., & Vera, V. (2021). *Diagnóstico de la Gestión de Activos y del Mantenimiento en Colombia - 2021*.

Mesa Grajalez, D. H., Ortiz Sánchez, Y., & Pinzón, M. (2006). *Vista de La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento*.

<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6513/3787>

Mora Gutiérrez, A. (2007). *Mantenimiento estratégico empresarial* (Primera).

Mora Gutiérrez, A. (2009a). *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*.

Mora Gutiérrez, A. (2009b). *Mantenimiento Planeación, ejecución y control*.

Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25(C), 213–229. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2014.10.032>

Navarro Elola, L., Pastor Tejedor, A. C., & Mugaburu Lacabrera, J. M. (1997). *Gestión integral de mantenimiento*. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/45905?page=44>

Nowakowski, T., & Werbińska, S. (2009). On problems of multicomponent system maintenance modelling. *International Journal of Automation and Computing*, 6(4), 364–378.

<https://doi.org/10.1007/S11633-009-0364-4/METRICS>

OIT-CIUO 88. (1988). *CIUO, Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones*.

Orlov, S. P., Susarev, S. V., & Uchaikin, R. A. (2021). Application of hierarchical colored petri nets for technological facilities' maintenance process evaluation. *Applied Sciences*, 11(11).

Oyarbide-Zubillaga, A., Goti, A., & Sanchez, A. (2008). Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-

- objective evolutionary algorithms. *Https://Doi-Org.Bibliotecavirtual.Uis.Edu.Co/10.1080/09537280802034091*, 19(4), 342–355.
<https://doi.org/10.1080/09537280802034091>
- Pérez Rondón, F. A. (2021). *CONCEPTOS GENERALES EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL*.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Portafolio. (2015). *Mantenimiento y gestión de activos: futuro de las empresas | Opinión | Portafolio*. <https://www.portafolio.co/opinion/redaccion-portafolio/mantenimiento-gestion-activos-futuro-empresas-33150>
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications* (Segunda).
- Robinson, S. (2004). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*.
https://lmsspada.kemdikbud.go.id/pluginfile.php/123916/mod_label/intro/simulation-the-practice-of-model-development-and-use.9780470847725.21800.pdf
- Roux, O., Jamali, M. A., Kadi, D. A., & Châtelet, E. (2008). Development of simulation and optimization platform to analyse maintenance policies performances for manufacturing systems. *Https://Doi-Org.Bibliotecavirtual.Uis.Edu.Co/10.1080/09511920701574214*, 21(4), 407–414. <https://doi.org/10.1080/09511920701574214>
- Shannon, R. E. (1988). *Simulación de sistemas: Diseño, desarrollo e implementación*.
- Sheng, L. W., Basri, E. I., & Kamaruddin, S. (2017). SCIENCE & TECHNOLOGY Analysis on the Effect of Shop Floor Parameters on the Effectiveness of Preventive Maintenance through

Discrete Event Simulation. *Pertanika J. Sci. & Technol*, 25(1), 1–16.
<http://www.pertanika.upm.edu.my/>

Wang, K., & Djurdjanovic, D. (2018). *Joint Optimization of Preventive Maintenance, Spare Parts Inventory and Transportation Options for Systems of Geographically Distributed Assets*.
<https://doi.org/10.3390/machines6040055>

Yang, Z., Djurdjanovic, D., Ni, J., Yang, Z. M., Djurdjanovic, D., & Ni, J. (2008). Maintenance scheduling in manufacturing systems based on predicted machine degradation. *J Intell Manuf*, 19, 87–98. <https://doi.org/10.1007/s10845-007-0047-3>

Yepes-Nuñez, J. J., Urrútia, G., Romero-García, M., & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/J.RECESP.2021.06.016>

Tabla 16.*Cálculo de confiabilidad de cada máquina*

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23
Forma	2,3	4	2	2	3	2,6	2,6	1,9	2	2,4	2,3	2,9	1,8	1,3	2	2,6	2,1	2,5	2,4	2,3	1,5	1,2	2,7
Escala	700	500	600	800	540	420	480	550	800	700	500	620	460	450	800	700	850	700	500	600	380	400	600
Tiempo (h)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)	R(t)
0	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
100	99%	100 %	97%	98%	99%	98%	98%	96%	98%	99%	98%	99%	94%	87%	98%	99%	99%	99%	98%	98%	87%	83%	99%
200	95%	97%	89%	94%	95%	86%	90%	86%	94%	95%	89%	96%	80%	71%	94%	96%	95%	96%	90%	92%	68%	65%	95%
300	87%	88%	78%	87%	84%	66%	74%	73%	87%	88%	73%	89%	63%	55%	87%	90%	89%	89%	75%	82%	50%	49%	86%
400	76%	66%	64%	78%	67%	41%	54%	58%	78%	77%	55%	76%	46%	42%	78%	79%	81%	78%	56%	67%	34%	37%	72%
500	63%	37%	50%	68%	45%	21%	33%	43%	68%	64%	37%	59%	31%	32%	68%	66%	72%	65%	37%	52%	22%	27%	54%
600	50%	13%	37%	57%	25%	8%	17%	31%	57%	50%	22%	40%	20%	23%	57%	51%	62%	51%	21%	37%	14%	20%	37%
700	37%	2%	26%	47%	11%	2%	7%	21%	47%	37%	11%	24%	12%	17%	47%	37%	51%	37%	11%	24%	8%	14%	22%
800	26%	0%	17%	37%	4%	0%	2%	13%	37%	25%	5%	12%	7%	12%	37%	24%	41%	25%	5%	14%	5%	10%	11%
900	17%	0%	11%	28%	1%	0%	1%	8%	28%	16%	2%	5%	4%	9%	28%	15%	32%	15%	2%	8%	3%	7%	5%

Nota. La ecuación de función de confiabilidad utilizada para realizar los cálculos se toma de la **Figura 7**