



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis para obtener el grado de PhD

**Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión
de mantenimiento de sistemas multi unidad, para la
selección de políticas de mantenimiento incluida la
canibalización evaluando fiabilidad en componentes**

ERMILSO DIAZ BENACHI

Julio 2024

Directores: PhD. Mariela Muñoz Añasco
PhD. Antonio Correcher Salvador

Instituto Universitario de Automática e Informática
Industrial

Agradecimientos

El autor del presente trabajo desea expresar su profundo agradecimiento a los orientadores de esta investigación, la Dra. Mariela Muñoz y el Dr. Antonio Correcher Salvador, así como al grupo de Automática, y los coordinadores del programa Doctorado en ciencias de la electrónica de la universidad del Cauca y del Programa de Doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial, por su invaluable colaboración y apoyo brindado a lo largo de todo el desarrollo de este proyecto.

Resumen

En los últimos años, el crecimiento y la complejidad de los sistemas multi unidad han planteado desafíos significativos en términos de mantenimiento y operación eficiente. Estos sistemas, compuestos por un conjunto de unidades independientes, como líneas de producción, redes de distribución, flotas de vehículos o infraestructuras complejas, requieren un enfoque estratégico para garantizar su funcionamiento óptimo y minimizar los costos asociados con el mantenimiento. El mantenimiento de los sistemas multi unidad implica la planificación y ejecución de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo en cada una de las unidades que los componen. Esta tarea se vuelve aún más desafiante debido a las interacciones entre unidades, el conjunto de componentes que les permiten realizar su función y la necesidad de coordinar las actividades de mantenimiento de manera efectiva, considerando las limitaciones de recursos, los tiempos de inactividad y la optimización de los costos.

En este contexto, los modelos de simulación se han convertido en una herramienta valiosa para el análisis y la optimización de sistemas multi unidad. Estos modelos permiten simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, teniendo en cuenta variables como el rendimiento, la confiabilidad, la disponibilidad y los tiempos de mantenimiento. Asimismo, brindan la capacidad de evaluar diferentes estrategias de mantenimiento y apoyar la toma de decisiones para mejorar la eficiencia y la rentabilidad del sistema. El objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo de simulación para la toma de decisiones sobre las políticas de mantenimiento en sistemas multi unidad, para lograr este objetivo se creó un simulador basado en sistemas de eventos discretos descrito formalmente en redes de Petri interpretadas y coloreadas de un sistema de flotas de unidades de componentes intercambiables y su gestor de mantenimiento. El simulador pretende analizar la interacción entre las unidades y evaluar el impacto de diferentes políticas de mantenimiento incluida la canibalización en el rendimiento global del sistema. Además, se buscará identificar las ventajas de esta política, su impacto en los tiempos de inactividad, disponibilidad y costos asociados.

Mediante el estudio y la aplicación de modelos de simulación en sistemas multi unidad, esta investigación contribuirá al desarrollo de un enfoque sistemático y eficiente para la gestión del mantenimiento en entornos complejos cuando se hace uso de la canibalización como política híbrida complementaria a las políticas que comúnmente son utilizadas en los sistemas de mantenimiento de flotas. Los resultados obtenidos podrán ser aplicados en diferentes sectores industriales, como la manufactura, el transporte, la energía y la logística, entre otros, con el fin de ser

más resiliente al retardo, carencia o sobre costo de componentes críticos de re-puesto de su flota y que permitan comprender operacionalmente los efectos de utilizar políticas de canibalización en busca de mejorar la eficacia operativa y optimizar los recursos disponibles.

Palabras clave: Sistemas multi unidad, Mantenimiento, Componentes intercambiables, Canibalización, Políticas de mantenimiento.

Summary

In recent years, the growth and complexity of multi-unit systems have posed significant challenges in terms of maintenance and efficient operation. These systems, composed of independent units, such as production lines, distribution networks, vehicle fleets, or complex infrastructures, require a strategic approach to ensure optimal operation and minimize the costs associated with maintenance. The maintenance of multi-unit systems involves the planning and execution of preventive and corrective maintenance activities in each of the component units. This task becomes even more challenging due to the interactions between units, the components that allow them to perform their function, and the need to coordinate maintenance activities effectively, considering resource constraints, downtime, and cost optimization.

In this context, simulation models have become a valuable tool for the analysis and optimization of multi-unit systems. These models allow for simulating the system's behavior in different scenarios, taking into account variables such as performance, reliability, availability, and maintenance times. Additionally, they provide the capability to evaluate different maintenance strategies and support decision-making to improve the system's efficiency and profitability. The objective of this thesis is to develop a simulation model for decision-making regarding maintenance policies in multi-unit systems. To achieve this objective, a discrete event simulator was created, formally described using interpreted and colored Petri nets for a fleet system of interchangeable component units and its maintenance manager. This model aims to analyze the interaction between the units and evaluate the impact of different maintenance policies, including cannibalization, on the overall system performance. Furthermore, it seeks to identify the advantages of this policy, its impact on downtime, availability, and associated costs.

Through the study and application of simulation models in multi-unit systems, this research will contribute to the development of a systematic and efficient approach for maintenance management in complex environments when using cannibalization as a hybrid policy complementary to the policies commonly used in fleet maintenance systems. The results obtained can be applied in various industrial sectors, such as manufacturing, transportation, energy, and logistics, among others, in order to be more resilient to delays, shortages, or overcosts of critical spare components in their fleet and to operationally understand the effects of using cannibalization policies in the pursuit of improving operational efficiency and optimizing available resources.

Keywords: Multi-unit systems, Maintenance, Interchangeable Components, Cannibalization, Maintenance policies.

Resum

En els últims anys, el creixement i la complexitat dels sistemes multiunitat han plantejat desafiaments significatius en termes de manteniment i operació eficient. Estos sistemes, compostos per un conjunt d'unitats independents, com a línies de producció, xarxes de distribució, flotes de vehicles o infraestructures complexes, requereixen un enfocament estratègic per a garantir el seu funcionament òptim i minimitzar els costos associats amb el manteniment. El manteniment dels sistemes multiunitat implica la planificació i execució d'activitats de manteniment preventiu i correctiu en cadascuna de les unitats que els componen. Esta tasca es torna encara més desafiadora a causa de les interaccions entre unitats, el conjunt de components que els permeten realitzar la seua funció i la necessitat de coordinar les activitats de manteniment de manera efectiva, considerant les limitacions de recursos, els temps d'inactivitat i l'optimització dels costos.

En este context, els models de simulació s'han convertit en una ferramenta valuosa per a l'anàlisi i l'optimització de sistemes multiunitat. Estos models permeten simular el comportament del sistema en diferents escenaris, tenint en compte variables com el rendiment, la confiabilitat, la disponibilitat i els temps de manteniment. Així mateix, brinden la capacitat d'avaluar diferents estratègies de manteniment i donar suport a la presa de decisions per a millorar l'eficiència i la rendibilitat del sistema. L'objectiu d'esta tesi és desenvolupar un model de simulació per a la presa de decisions sobre les polítiques de manteniment en sistemes multiunitat, per a aconseguir este objectiu es va crear un simulador a esdeveniments discrets descrit formalment en xarxes de Petri interpretades i acolorix-dones d'un sistema de flotes d'unitats de components intercanviables i el seu gestor de manteniment. El qual pretén analitzar la interacció entre les unitats i avaluar l'impacte de diferents polítiques de manteniment inclosa el canibalisme en el rendiment global del sistema. A més, es buscarà identificar els avantatges d'esta política, el seu impacte en els temps d'inactivitat, disponibilitat i costos associats.

Mitjançant l'estudi i l'aplicació de models de simulació en sistemes multiunitat, esta investigació contribuirà al desenvolupament d'un enfocament sistemàtic i eficient per a la gestió del manteniment en entorns complexos quan es fa ús del canibalisme com a política híbrida complementària a les polítiques que comunament són utilitzades en els sistemes de manteniment de flotes. Els resultats obtinguts podran ser aplicats en diferents sectors industrials, com la manufactura, el transport, l'energia i la logística, entre altres, amb la finalitat de ser més resilients al retard, manca o sobre cost de components crítics de recanvi de la seua flota i que permeten comprendre operacionalment els efectes d'utilitzar polítiques de caniba-

lisme a la recerca de millorar l'eficàcia operativa i optimitzar els recursos disponibles.

Paraules clau: Sistemes multiunitat, Manteniment, Components intercanviables, Canibalisme, Polítiques de manteniment.

Tabla de contenido

Resumen.....	3
Tabla de contenido.....	8
Tabla de Figuras	12
1 Introducción.....	16
1.1. Motivación	19
1.2. Objetivos	20
1.2.1. Objetivo General.....	20
1.2.2. Objetivos Específicos.....	20
1.3. Métodos	20
1.4. Resultados	22
1.5. Publicaciones.....	22
1.6. Contenido de la monografía.....	23
2 Revisión de Literatura	24
2.1. Sistemas multi unidad.....	24
2.1.1. Clasificación de los sistemas multi unidad.....	25
2.1.2. Flota	26
2.1.3. Niveles en la arquitectura de componentes de una unidad	29
2.2. Estrategias de Mantenimiento.....	30
2.2.1. Tipos de fallos, clasificación y distribución de Weibull	30
2.2.2. Estrategias y políticas de mantenimiento	32
2.2.3. Políticas de mantenimiento para sistemas de flotas.....	35
2.2.4. Indicadores de desempeño de mantenimiento	37
2.2.5. Análisis de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM).....	39
2.3. Sistemas a eventos discretos	40
2.3.1. Redes de Petri coloreadas.....	41
2.4. Estado del arte en el mantenimiento en sistemas multi unidad.....	42

2.4.1. Dependencia entre componentes	43
2.4.2. Estimación del tiempo de vida restante (RUL).....	44
2.4.3. Abastecimiento de repuestos.....	45
2.4.4. Uso de políticas de canibalización en sistemas multi unidad	46
2.4.5. Métodos y Aplicaciones del Análisis RAM	57
2.5. Uso de algoritmos de optimización en mantenimiento de sistemas multi unidad.	59
2.6. Conclusión del estado del arte.....	61
3 Modelado	63
3.1. Definición de requerimientos	63
3.1.1. Descripción de actividades.....	65
3.2. Modelo de simulación.....	66
3.2.1. Desarrollo de los componentes del modelo.....	67
3.2.2. Creación de unidades.....	67
3.2.3. Modelo de componente.....	69
3.2.4. Modelo de módulo.....	71
3.2.5. Modelo de unidad	73
3.2.6. Modelado de actividades del gestor de mantenimiento.....	75
3.2.7. Modelo básico de exploración del gestor de mantenimiento.....	80
3.2.8. Validación del modelo.....	93
3.2.9. Experimentación con la HCPN	97
3.2.10. Análisis de resultados.....	99
3.2.11. Limitaciones encontradas en esta etapa	101
3.3. Implementación del sistema multi unidad.....	102
3.3.1. Programación en LabVIEW	104
3.4. Pruebas de verificación	108
3.4.1. Verificación de creación de unidades y cambios de estado.....	109
3.5. Validación del modelo.....	111

3.5.1. Generación de fallos del sistema mediante un conjunto de datos conocido.....	112
3.5.2. Validación en LabVIEW – Raptor.....	114
4 Prueba de concepto.....	116
4.1. Descripción del caso de estudio.....	116
4.2. Pruebas sobre el modelo de simulación.....	121
4.2.1. Experimento 1. Observación de la tasa de unidades disponibles del sistema al aplicar un retardo variable en la entrega de componentes.....	122
4.2.2. Experimento 2. Observación de la tasa de unidades disponibles al aplicar distintas políticas de mantenimiento.....	124
4.2.3. Experimento 3. Observación de los tiempos de mantenimiento al aplicar distintas políticas de mantenimiento.....	126
4.2.4. Experimento 4. Observación de la disponibilidad operativa al aplicar distintas políticas de mantenimiento.....	127
4.2.5. Experimento 5. Observación de la tasa de cumplimiento del objetivo al aplicar distintas políticas de mantenimiento.....	129
4.2.6. Experimento 6. Observación del efecto sobre los costos del sistema frente a distintas políticas de mantenimiento.....	130
4.2.7. Experimento 7. Observación del efecto sobre la tasa de disponibilidad operacional de la variación del inventario inicial.....	131
4.2.8. Experimento 8. Observación del efecto sobre la tasa de disponibilidad operacional a la variación del número de unidades.....	134
4.2.9. Experimento 9. Comparación de transitorios del sistema cuando se aplican actividades de mantenimiento.....	137
5 Optimización y control óptimo.....	140
5.1. Proceso de optimización.....	140
5.1.1. Algoritmo de optimización.....	141
5.1.2. Descripción del caso de estudio.....	144
5.1.3. Pruebas de verificación y validación.....	145
5.2. Control óptimo del sistema de mantenimiento.....	155
5.2.1. Escenarios de estudio.....	157

6	Análisis de resultados.....	178
6.1.	Descripción de los datos.....	178
6.2.	Precedentes.....	179
6.3.	Acerca del modelo de simulación.....	180
6.4.	Análisis sobre el proceso de optimización.....	181
6.5.	Comparación con los objetivos de investigación	183
6.5.1.	Objetivo de investigación 1.....	183
6.5.2.	Objetivo de investigación 2.....	185
6.5.3.	Objetivo de investigación 3.....	188
6.6.	Discusión de aportes del trabajo.....	189
6.7.	Limitaciones del modelo.....	190
7	Conclusiones y trabajos futuros	192
7.1.	Conclusiones.....	192
7.2.	Trabajos futuros.	195
Anexo A	197
Bibliografía	203

Tabla de Figuras

Figura 2.1. Clasificación de los sistemas multi unidad. Fuente: (Petchrompo & Parlikad, 2019)	25
Figura 2.2. Clasificación de una flota	27
Figura 2.3. Jerarquía de fallos. Fuente: (Fitch, 2013)	30
Figura 2.4. Curva de la bañera. Fuente: (Bertsche, 2008)	31
Figura 2.5. Mantenimiento planificado y no planificado. Fuente: (Contreras, 2021)	33
Figura 2.6. Estrategias de mantenimiento aplicadas a flotas. Fuente: (EN, 2010)	33
Figura 2.7. Relación entre indicadores de desempeño. Fuente: (Márquez, 2007)	37
Figura 2.8. Relación entre MTBF, MTTR, MTTR. Fuente: (Márquez, 2007)	39
Figura 2.9. Proceso de canibalización en una flota.	48
Figura 2.10. Proceso de canibalización en una flota.	49
Figura 2.11. Condiciones que favorecen la aplicación de canibalización.	50
Figura 2.12. Concepto de Loci y Locus.....	51
Figura 2.13. Trabajos publicados sobre algoritmos de optimización para mantenimiento	60
Figura 3.1. Modelo ISA-95 – Parte 3. Fuente: (Scholten, 2007)	64
Figura 3.2. Diagrama de bloques del modelo.....	67
Figura 3.3. Jerarquía de componentes de una unidad.....	68
Figura 3.4. Diagrama de bloques funcional.....	68
Figura 3.5. Estructura serie de componentes.....	69
Figura 3.6. Red de Petri de un componente.....	69
Figura 3.7. Red de Petri de un módulo.....	71
Figura 3.8. Arquitectura de módulos en una unidad.....	72
Figura 3.9. Red de Petri de una unidad.	74
Figura 3.10. Actividades complementarias del gestor de mantenimiento. Fuente: (Ben- Daya et al., 2016)	76
Figura 3.11. Casos de uso de las actividades del gestor de mantenimiento.	77
Figura 3.12. Modelo de gestión de órdenes mantenimiento.....	79
Figura 3.13. Modelo CPN de la operación del sistema.....	84
Figura 3.14. Transición de sustitución Ejecutando.....	85
Figura 3.15. Puertos de entrada y salida - Históricos de uso.....	86
Figura 3.16. Históricos de uso.	87
Figura 3.17. Transición de sustitución Use_x.....	88
Figura 3.18. Transición de sustitución Conversión a Km_x.....	88
Figura 3.19. Transición de sustitución Contador U_x.....	89
Figura 3.20. Transición de sustitución Revisión_x.....	90
Figura 3.21. Red HCPN para el bloque de mantenimiento.....	91
Figura 3.22. Transición de sustitución Evaluando Fallo.....	92
Figura 3.23. Transición de sustitución Políticas Mantenimiento.....	92
Figura 3.24. Transición de sustitución mantenimiento imperfecto.	93

Figura 3.25 Diagrama de bloques de confiabilidad en RAPTOR.....	94
Figura 3.26 Comparación componentes consumidos C1.....	95
Figura 3.27 Comparación componentes consumidos C2.....	95
Figura 3.28 Comparación componentes consumidos C3.....	96
Figura 3.29. Tasa de disponibilidad con variación de la demanda.....	98
Figura 3.30. Consumo de componentes ante cambios en la demanda.....	98
Figura 3.31. Tasa de disponibilidad con variación de la capacidad.....	99
Figura 3.32. Consumo de componentes ante cambios en la capacidad.....	100
Figura 3.33. Vista general del modelo de simulación flota.....	103
Figura 3.34. Interfaz de VI package manager.....	105
Figura 3.35. Diagrama de clases de los componentes del bloque flota.....	107
Figura 3.36. Diagrama de secuencia entre el gestor de mantenimiento y la flota.....	108
Figura 3.37. Interfaz de parametrización del modelo.....	109
Figura 3.38. Verificación de creación de 10 unidades.....	109
Figura 3.39. Verificación de creación de 25 unidades.....	110
Figura 3.40. Verificación de creación de 40 unidades.....	110
Figura 3.41. Verificación de los estados, Ejecución y Ocioso de una unidad.....	111
Figura 3.42. Verificación de los estados, Ejecución, No disponible y mantenimiento de una unidad.....	111
Figura 3.43. Procedimiento de generación de fallos.....	112
Figura 3.44. Comparativa de fallos generados por el sistema simulado.....	112
Figura 3.45. Comparativa entre los indicadores MTBF y MTTR.....	113
Figura 3.46. Correlación entre los indicadores MTBF y MTTR.....	114
Figura 4.1. Disciplina de ruta.....	117
Figura 4.2. Diagrama de bloques de función de una unidad.....	118
Figura 4.3. Árbol de fallos de la unidad.....	118
Figura 4.4. Tasa de unidades disponibles en presencia de distintos retardos.....	123
Figura 4.5. Tasa de unidades disponibles frente a distintas políticas de mantenimiento.....	125
Figura 4.6. Comparativa de tiempos de mantenimiento.....	127
Figura 4.7. Tasa de disponibilidad del sistema.....	128
Figura 4.8. Tasa de cumplimiento del objetivo del sistema.....	130
Figura 4.9. Costos del sistema de mantenimiento.....	130
Figura 4.10. Costos del sistema de mantenimiento.....	131
Figura 4.11. Variación del número de componentes iniciales.....	132
Figura 4.12. Tasa de disponibilidad de distintos tamaños de flota.....	135
Figura 4.13. Cumplimiento de objetivo de distintos tamaños de flota.....	135
Figura 4.14. Respuesta transitoria de la disponibilidad del sistema.....	138
Figura 4.15. Respuesta transitoria del MTBF del sistema.....	139
Figura 4.16. Respuesta transitoria del MTTR del sistema.....	139
Figura 5.1. Interfaz con los parámetros de configuración de WAPTIA.....	142
Figura 5.2. Cromosoma del proceso de optimización.....	143
Figura 5.3. Disciplina de ruta caso de estudio.....	144
Figura 5.4. Tamaño de población inicial.....	146

Figura 5.5. Comportamiento de la función de ajuste.....	149
Figura 5.6. Iteración del algoritmo de optimización con respecto a la disponibilidad.....	150
Figura 5.7. Respuesta de la función de ajuste.....	151
Figura 5.8. Comparación de los indicadores resultado de una fase de optimización.....	152
Figura 5.9. Comportamiento de la función de ajuste a cambios en α y β	153
Figura 5.10. Valores de inventario inicial optimizado.....	154
Figura 5.11. Valores de personal de mantenimiento optimizado.....	154
Figura 5.12. Valores de umbral de mantenimiento preventivo optimizado.....	155
Figura 5.13. Sistema de control de una flota mediante el gestor de mantenimiento.....	156
Figura 5.14. Relación Costo - Objetivo Normalizado.....	158
Figura 5.15. Relación objetivo – Tasa de canibalización normalizado.....	159
Figura 5.16. Relación costos de componentes y canibalización normalizado.....	160
Figura 5.17. Variación de costos de mantenimiento y canibalización.....	161
Figura 5.18. Variación de la tasa de fallo durante los retardos evaluados.....	161
Figura 5.19. Tasa de disponibilidad a distintos retardos.....	163
Figura 5.20. Mediana de los componentes tipo 1 canibalizados.....	164
Figura 5.21. Mediana de los componentes tipo 2 canibalizados.....	164
Figura 5.22. Comparación de los costos con, sin canibalización y sin optimización.....	165
Figura 5.23. Comparación del cumplimiento de objetivo con y sin canibalización.....	166
Figura 5.24. Comparación MTBF para dos retardos.....	167
Figura 5.25. Comparación MTTR para dos retardos.....	168
Figura 5.26. Comparación MTTF para dos retardos.....	169
Figura 5.27. Comparación MLDT para dos retardos.....	170
Figura 5.28. Cumplimiento del objetivo y la utilización de canibalización.....	171
Figura 5.29. Presupuesto consumido y la utilización de canibalización.....	172
Figura 5.30. Comparación presupuesto consumido.....	172
Figura 5.31. Comparación cumplimiento objetivo.....	173
Figura 5.32. Valores de componentes iniciales a cambios en el precio.....	175
Figura 5.33. Valores óptimos de personal.....	175
Figura 5.34. Valores umbrales de mantenimiento.....	176
Figura 5.35. Valores óptimos para la aplicación de una política de canibalización.....	177
Figura 6.1. Tiempo de las unidades en cada uno de los estados modelados.....	185
Figura 6.2. Procedimiento seguido para la identificación de criterios.....	186

Tabla 2.1. Políticas aplicables a sistemas multi unidad. Fuente: (Ben-Daya et al., 2016)....	35
Tabla 2.2. Modelos de mantenimiento desarrollados con DES.....	58
Tabla 3.1. Estados del modelo de componente.	70
Tabla 3.2. Transiciones del modelo de componente.....	70
Tabla 3.3 Estados del modelo de módulo.....	72
Tabla 3.4. Transiciones del modelo de módulo.....	73
Tabla 3.5. Estados del modelo de la unidad.	74
Tabla 3.6. Transiciones del modelo de unidad	74
Tabla 3.7. Definición de los conjuntos color del modelo.....	77
Tabla 3.8. Bloques de función del modelo propuesto.....	80
Tabla 3.9. Definición del conjunto color.....	81
Tabla 3.10. Definición de funciones para las transiciones.....	83
Tabla 3.11 Conjunto de políticas de mantenimiento aplicadas al sistema.....	90
Tabla 3.12. Vi's más utilizados de la librería.	106
Tabla 3.13. Pruebas T-Student realizada a los datos.....	113
Tabla 4.1. Parámetros de las distribuciones de Weibull de los componentes.	117
Tabla 4.2. Parametrización del inventario y costos logísticos.	119
Tabla 4.3. Políticas de Mantenimiento propuestas.	119
Tabla 4.4. Variables evaluadas durante la simulación.....	120
Tabla 4.5. Características del sistema computacional.....	121
Tabla 4.6. Medidas estadísticas experimento 1.	123
Tabla 4.7. Prueba Kruskal-Wallis experimento 1.....	124
Tabla 4.8. Medidas estadísticas experimento 2.	125
Tabla 4.9. Medidas estadísticas experimento 2.....	126
Tabla 4.10. Medidas estadísticas experimento 4.	128
Tabla 4.11. Prueba Kruskal Wallis de las muestras tomadas.....	129
Tabla 4.12 Medidas estadísticas experimento 7.....	133
Tabla 4.13. Prueba Mann-Whitney U a las muestras del experimento 7.....	134
Tabla 4.14. Medidas estadísticas experimento 8.	136
Tabla 4.15. Prueba Mann-Whitney U a las muestras del experimento 7.....	136
Tabla 5.1. Descripción de los genes del algoritmo.	145
Tabla 5.2 Población inicial y resultados obtenidos de la simulación.	146
Tabla 5.3. Verificación de un conjunto de cromosomas generado por el algoritmo.	147
Tabla 5.4. Contraste de valores entregados al algoritmo.....	148
Tabla 5.5. Validación de los valores de la función de ajuste.	148
Tabla 5.6. Función de ajuste de un conjunto de generaciones.	149
Tabla 5.7. Parametrización obtenida del proceso de optimización.....	162
Tabla 5.8. Parametrización obtenida del proceso de optimización.....	174

1 Introducción

Un sistema de mantenimiento está diseñado para gestionar los recursos destinados al cuidado de los activos empresariales. Personal, estaciones de trabajo, herramientas, procedimientos y políticas deben ser coordinados eficazmente para mejorar la relación costo-beneficio del sistema. El gestor de mantenimiento debe ajustar y tomar decisiones que optimicen las tareas según las necesidades del sistema que administra. Para ello, el sistema de mantenimiento implementa un conjunto de políticas que definen estrategias específicas sobre el mantenimiento de los equipos.

Una política de mantenimiento comprende un conjunto de acciones administrativas, gerenciales, operativas y técnicas que guían la toma de decisiones en la gestión de recursos del sistema. Esta política detalla las acciones estratégicas planificadas para el mantenimiento. Un ejemplo de estas políticas es la canibalización, que consiste en intercambiar piezas entre dos sistemas cuando uno de ellos falla (Sheng & Prescott, 2019b). La importancia de estas políticas radica en su capacidad para complementar las estrategias de gestión del sistema de suministro de repuestos. Dicha política facilita la utilización de piezas usadas, que no están disponibles en inventario, extrayéndolas temporalmente de un dispositivo específico para instalarlas en otra unidad que requiera reparación de ese componente. Esta práctica resulta especialmente crucial en contextos de escasez, originados por la gestión de inventarios de materiales para reparación y mantenimiento (MRO por su sigla en inglés), especialmente ante eventos imprevistos.

La canibalización es una política híbrida de mantenimiento e inventario, implementada como medida de último recurso en situaciones críticas. Resulta particularmente útil cuando el tiempo requerido para extraer e instalar una pieza necesaria es menor que el tiempo que tomaría obtenerla a través del sistema de suministro (Fisher, 1990a). En el contexto de un sistema de gestión de mantenimiento (SGM, por su sigla en inglés) para operaciones multi unidad, es crucial coordinar las actividades de mantenimiento para que estén alineadas con los objetivos estratégicos a largo plazo. La disponibilidad operacional es un indicador clave del rendimiento del SGM. Por ello, es esencial evaluar cuidadosamente la relación costo-beneficio al implementar políticas de canibalización, considerando que estas políticas producen un conjunto de piezas usadas cuya condición e historial de uso frecuentemente son desconocidos.

Una acción de canibalización debería llevarse a cabo acorde a las siguientes condiciones (Fisher & Brennan, 1986);

- Solo canibalizar partes no disponibles mediante el sistema de suministro o cuando los tiempos de abastecimiento pueda afectar el indicador de disponibilidad; por lo tanto, las piezas que han hecho parte de un sistema descompuesto deben ser evaluadas previamente,
- Incluir y detallar los procedimientos con los cuales se realiza la canibalización de un componente
- Conocer si es mejor una canibalización completa o incompleta
- Planear los recursos necesarios para realizar las tareas requeridas por la actividad.
- Inventariar y registrar cada pieza o subsistema en su respectivo sistema.

La implementación de una política de canibalización que incluya todas las características mencionadas anteriormente puede conllevar los beneficios discutidos previamente. Sin embargo, la ausencia de una definición clara podría generar problemas que impacten negativamente en los indicadores de los sistemas de mantenimiento y de gestión de inventarios.

Las principales razones que impulsan la adopción de políticas de canibalización incluyen la ineficiencia del sistema MRO, la necesidad de mantener altos niveles de disponibilidad operacional y la obsolescencia de piezas y equipos (Morse, 2017). Sin embargo, la implementación de estas políticas puede tener repercusiones negativas como el aumento de la carga laboral para el personal de mantenimiento, una mayor tasa de fallos inducidos por mantenimiento, la reducción de la fiabilidad del sistema, el incremento de costos por la canibalización de piezas no costosas y la sub utilización de equipos costosos. A continuación, se describen cada uno de estos aspectos.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Incremento de la carga del personal de mantenimiento:

El proceso de canibalizar una pieza implica desmontarla del equipo que la cede y posteriormente instalarla en el equipo receptor. Este procedimiento puede aumentar significativamente las horas de trabajo, limitando la posibilidad de realizar otras actividades. En (Fisher, 1990b) se utiliza un modelo de Markov para sistemas de mantenimiento, calculando analíticamente el número de unidades inoperativas, teniendo en cuenta variables como las piezas de repuesto, la reparación, la canibalización y las limitaciones de personal. Este estudio concluye que la viabilidad de implementar una política de canibalización no depende únicamente de la disponibilidad de personal de mantenimiento.

- Incremento de la tasa de fallos inducidos por mantenimiento:

En los procesos de montaje y desmontaje en sistemas con numerosos componentes y espacio limitado, existe una alta probabilidad de causar nuevos fallos. Por lo tanto, es crucial considerar la destreza del técnico y seguir el procedimiento especificado para llevar a cabo la tarea. En (Moore et al., 2007) se introdujo una nueva métrica llamada "*quality assurance standing effectiveness*" y desarrollaron un método para calcularla, destacando que las tasas de canibalización tienen una relación negativa moderadamente fuerte con la efectividad del aseguramiento de la calidad de los equipos. Además, en (Salman et al., 2006) se propuso un modelo de simulación de eventos discretos que permite evaluar los daños inducidos por mantenimiento. Este modelo demuestra que los daños pueden reducir drásticamente los beneficios de la canibalización e incrementar los costos de mantenimiento.

- Disminución de la fiabilidad del sistema:

La fiabilidad se define como la probabilidad de que un sistema funcione correctamente sin fallos durante un período determinado. Sin embargo, en las tareas de canibalización, las condiciones y el método de ejecución del procedimiento pueden no permitir determinar cuál es la pieza más fiable para ser canibalizada. Esto introduce incertidumbre en la vida útil esperada de la pieza y del sistema en su conjunto. En (Morse, 2017) se indica que hay piezas que se canibalizan dos o más veces, lo que reduce la tasa de fiabilidad e incrementa la probabilidad de fallo de la pieza o de fallos inducidos por el mantenimiento durante las operaciones de canibalización.

- Costos elevados por canibalizaciones de piezas no costosas:

Una política de canibalización, al igual que una orden de mantenimiento, requiere la asignación de recursos para su implementación. Por ello, es crucial realizar una evaluación de costo-beneficio para asegurar que la tarea de intercambio se ajuste

al presupuesto establecido. En (Morse, 2017) se indica que el 71% de las piezas canibalizadas son de bajo valor, aunque no siempre es posible determinar si el costo de la canibalización supera el valor de la pieza intercambiada. En (N. de Oliveira & Ghobbar, 2014a) se propone una ecuación para evaluar el impacto de piezas similares y las políticas de canibalización en el costo del inventario, pero no evalúa su incidencia en el sistema de mantenimiento de manera igualitaria.

- Sub utilización de equipo que costosos:

Una política de canibalización puede ser descrita de diversas maneras, pero un aspecto común en todas ellas es la necesidad de definir claramente las unidades de las cuales se tomarán las piezas. Por ejemplo, una política podría permitir que todas las unidades intercambien piezas según sea necesario; en cambio, otra política podría especificar que solo un equipo específico sea seleccionado para extraer piezas (R. Zhang & Ghanmi, 2014a). Como resultado, siempre habrá al menos un equipo que no estará operativo al 100%. Considerando los contextos en los que se aplica la canibalización, este equipo inactivo conlleva costos adicionales por su no disponibilidad, y eventualmente, deberá ser reparado y reinstalado.

Como se ha demostrado, los beneficios de implementar políticas de canibalización conllevan varios efectos secundarios. Por ello, es crucial identificar los factores del sistema sobre los cuales se pueden aplicar estas políticas, de manera que se incremente la tasa de disponibilidad sin comprometer la fiabilidad. Además, es fundamental proporcionar herramientas al administrador del sistema de mantenimiento que le asistan en la toma de decisiones sobre cuándo emplear dichas políticas. A partir de esta necesidad, surge la siguiente pregunta de investigación. *¿Como definir los criterios que se deben considerar en un sistema multi unidad para la selección de estrategias de mantenimiento, incluida la canibalización, que lo hagan más reactivo a cambios en el contexto de su mercado?*

1.1. Motivación

Los sistemas multi unidad son fundamentales en diversos sectores, incluyendo la generación de energía eléctrica, el transporte de carga y pasajeros, y las líneas de producción en plantas de manufactura. Desarrollar herramientas que permitan a los gestores de mantenimiento optimizar el rendimiento de estos sistemas es crucial. Esta investigación se motiva por la necesidad de ampliar las herramientas disponibles para los gestores de mantenimiento. El objetivo es estudiar las consecuencias de implementar políticas de mantenimiento combinadas con políticas de canibalización, con el fin de abordar las eventualidades que pueden surgir en estos sistemas.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Proponer un modelo de toma de decisiones sobre políticas de mantenimiento, incluida canibalización ejecutado en un sistema de gestión de mantenimiento, que permita evaluar parámetros de fiabilidad en un sistema multi unidad.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características que posee un sistema multi unidad que posibilitan la aplicación de políticas de mantenimiento, incluida la canibalización.
- Establecer los criterios de selección sobre el sistema de gestión de mantenimiento de acuerdo con el estado y objetivos de mantenimiento del sistema multi unidad.
- Evaluar parámetros de fiabilidad sobre el sistema multi unidad al aplicar políticas de mantenimiento, incluida la canibalización.

1.3. Métodos

Dada la naturaleza selectiva de la pregunta de investigación del proyecto, se utilizará una metodología evaluativa mediante simulación (Modelo simulado) que oriente una decisión sobre cuándo es posible aplicar conjuntamente una política basada en canibalización con respecto a otras políticas de mantenimiento sobre sistemas multi unidad y los criterios para realizarla, debido a que la decisión puede afectar la tasa de disponibilidad, teniendo en cuenta los recursos del entorno. Basado en lo propuesto anteriormente, el desarrollo del proyecto será guiado por los siguientes pasos.

- *Paso 1. Delimitación del problema de investigación:* En este paso se identificó el problema mostrado en la sección anterior, el cual deja como resultado el objeto de estudio los sistemas multi unidad, específicamente las flotas que son un caso especial de los sistemas multi unidad.
- *Paso 2. Revisión de literatura:* Para familiarizarse mejor con el problema se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos científicas como Science Direct, Scopus, Emerald insight, IEEE explore, trabajos de eventos científicos fueron revisados también, como resultado de este paso se publicó el artículo "*Cannibalization policies: adoption in the maintenance of fleet sys-*

tems" en el Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.

- *Paso 3. Propuesta de modelo:* Se propone un sistema multi unidad estructurado en dos componentes principales: el sistema físico, que consiste en una flota de unidades con componentes idénticos e independientes, y un gestor de las funciones administrativas necesarias para gestionarlo. Estas últimas incluyen la disciplina de ruta, la gestión de órdenes de mantenimiento, el inventario y la generación de reportes, alimentándose de los datos producidos por el sistema de flota. Para modelar este sistema, se utilizó un enfoque jerárquico con redes de Petri, comenzando con componentes individuales, que se organizan en módulos y finalmente en unidades completas. La implementación se realizó en LabVIEW, seleccionado por su facilidad de programación mediante bloques funcionales (Vi's) y su interfaz gráfica interactiva. Además, se empleó la librería Actor Framework y colas de mensajes para la programación de las unidades, mientras que las funciones administrativas se programaron utilizando bloques de función que intercambian datos a través de colas de mensajes.
- *Paso 4. Experimentación:* En este paso se desarrollaron las pruebas sobre la capacidad de la simulación implementada: El objetivo de esta prueba de concepto fue validar la capacidad de la simulación para representar el comportamiento de una flota con enrutamiento, así como su comportamiento de fallo. El alcance de la simulación está dado para una flota de 25 unidades las cuales prestan un servicio de transporte cumpliendo una ruta determinada, la demanda del transporte se consideró un conjunto de rutas diarias y un periodo de estudio en el cual se espera el sistema tenga el suficiente uso que permita explorar la disponibilidad del sistema para prestar el servicio.
- *Paso 5. Método de optimización:* Lograr identificar los recursos del sistema para el gestor de mantenimiento es indispensable, para cumplir con los objetivos estratégicos. Por lo tanto, se propone la utilización de un algoritmo evolutivo denominado WAPTIA, el cual es un algoritmo de aplicación general, el algoritmo fue acondicionado para el objeto del problema normalizando las entradas que son los recursos de mantenimiento y los tiempos umbrales de la política de mantenimiento preventivo, de igual manera la salida es la función de ajuste que indica el grado de ajuste de las entradas como solución al problema de optimización.
- *Paso 6. Análisis de los resultados:* Con los datos recopilados se realizó un análisis estadístico mediante regresión lineal. Identificando si existe una re-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

lación significativa entre la disponibilidad operacional y la utilización de políticas de canibalización.

- *Paso 7. Conclusiones y trabajo futuros.*

1.4. Resultados

Este estudio ofrece contribuciones significativas a la literatura existente, destacándose los siguientes aportes principales:

- Desarrollo de un Modelo de Simulación Desacoplado: Utilizando redes de Petri convencionales y coloreadas e implementado en LabVIEW, este modelo representa efectivamente el comportamiento de sistemas multi unidad y su gestión de mantenimiento, proporcionando una visión clara y detallada de sus dinámicas operativas.
- Una adaptación de un algoritmo de optimización para la identificación de parámetros que optimicen un conjunto de políticas de mantenimiento, incluida la canibalización como política híbrida de mantenimiento e inventario de un sistema multi unidad.
- Una propuesta basada en optimización para sistemas de mantenimiento, desarrollada en dos pasos, la cual genera una herramienta que ayuda a acondicionar el funcionamiento óptimo de un sistema multi unidad ante cambios aleatorios del entorno en el sistema.
- Un estudio sobre la canibalización en sistemas de flotas, en el cual se investigan los aspectos que favorecen la utilización de la canibalización y se identifican criterios que determinan su impacto positivo en el desempeño del sistema. Este análisis proporciona un marco valioso para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de flotas.

1.5. Publicaciones

- Un artículo presentado en la revista Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, indexada en JCR como Q4. En el artículo se presenta una revisión sistemática del uso de la canibalización en sistemas de flotas.
- Un artículo publicado en la Revista Reliability Engineering and System Safety de Países Bajos, indexada en JCR como Q1. En el artículo se presenta una herramienta para la selección de políticas de mantenimiento en un sistema multi unidad.

- Un artículo presentado en International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), a realizar entre los días 3 y 6 de julio del 2023, En el cual se realiza un modelado de una flota de buses y un sistema de gestión de mantenimiento, para la selección de políticas de mantenimiento, descrito mediante redes de Petri coloreadas.

1.6. Contenido de la monografía.

El contenido de este documento está dispuesto en seis capítulos, cada uno de los cuales se describe a continuación:

- Capítulo 2. Revisión de Literatura

En este capítulo se presentan los conceptos acerca de los sistemas multi unidad y las generalidades de los Sistemas de mantenimiento y la utilización de políticas de mantenimiento, incluida la canibalización.

- Capítulo 3. Modelado

En este apartado del documento se establecerá los criterios sobre los Modelos de simulación y las herramientas de modelado utilizadas para el desarrollo del trabajo, así como la descripción de los modelos, desarrollados.

- Capítulo 4. Prueba de concepto

Este capítulo muestra los principales resultados obtenidos y el análisis de los mismos, incluyendo los casos de estudio planteados.

- Capítulo 5. Optimización y control óptimo

En este capítulo, se describe todo el proceso de optimización del sistema mediante un algoritmo genético, la experimentación con el algoritmo y los resultados obtenidos a distintas pruebas.

- Capítulo 6. Análisis de resultados

En este capítulo, se describe todo el proceso de optimización del sistema mediante un algoritmo genético, la experimentación con el algoritmo y los resultados obtenidos a distintas pruebas.

- Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuros.

Las conclusiones del presente estudio, problemas, recomendación y trabajos futuros son mencionadas en este capítulo.

2 Revisión de Literatura

Este capítulo tiene como objetivo ofrecer una revisión sistemática de la literatura existente sobre la gestión de mantenimiento en sistemas multi unidad. Se examinan en detalle las políticas de mantenimiento aplicadas, destacando el uso de la canibalización y la optimización de estas políticas para mejorar la toma de decisiones dentro del sistema. Esta revisión pretende identificar y analizar las estrategias utilizadas y el impacto en la eficiencia operacional, enfocándose en la exploración de investigaciones vinculadas a sistemas multi unidad, la gestión de su mantenimiento, así como en el empleo de políticas de canibalización y la aplicación de algoritmos genéticos para implementar tareas de mantenimiento adaptadas a las características del sistema.

En el capítulo se inicia con una fundamentación teórica de los temas que soportan la investigación, identificando la terminología necesaria para comprender los temas relacionados con sistema multi unidad; luego se presentan y analizan los estudios relacionados con el tema y la manera en cómo se ha estado abordando el tema de investigación.

2.1. Sistemas multi unidad

Los sistemas de multi unidad respaldan muchos servicios en la sociedad moderna, servicios públicos como sistemas de transporte masivo (autobuses, metro, bicicletas públicas, taxis, aviones comerciales, etc.), defensa (tanques, aviones de guerra, buques de guerra), equipos industriales (robots, máquinas, etc.), la generación de

energía (parques solares, parques eólicos, etc.), se implementan mediante estos sistemas. Un sistema multi unidad es una entidad conformada de múltiples unidades que comparten características o recursos comunes, y ejecutan en conjunto el cumplimiento de un propósito o la prestación de un servicio. En algunas ocasiones también es posible definir un sistema multi unidad como un sistema compuesto por múltiples componentes que operan juntos, formando un activo único (X. Zhang & Zeng, 2017)

2.1.1. Clasificación de los sistemas multi unidad

Los sistemas multi unidad se clasifican en dos categorías principales mostradas en la Figura 2.1. Los sistemas de activo único que se componen de una sola unidad funcional, capaz de proveer todas las funcionalidades necesarias para cumplir con el servicio específico para el cual fue diseñado. En contraste, los sistemas multi activos consisten en varias unidades o activos únicos, aunque operan de manera autónoma, se coordinan para alcanzar un objetivo común. En estos sistemas, la interacción entre las unidades se limita a la consecución de dicho objetivo, manteniendo cada una su individualidad e independencia dentro del conjunto (Petchrompo & Parlikad, 2019).

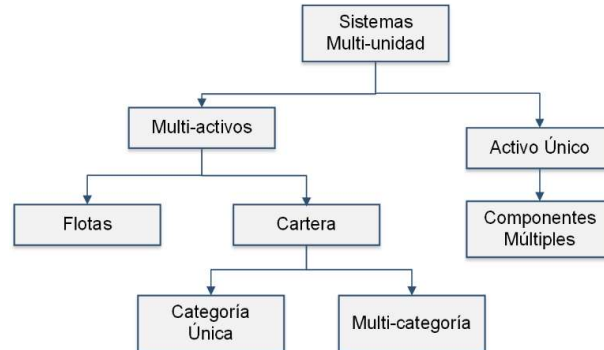


Figura 2.1. Clasificación de los sistemas multi unidad. Fuente: (Petchrompo & Parlikad, 2019)

Los sistemas multi activos se clasifican, a su vez, en sistemas de cartera, los cuales están compuestos por un conjunto de activos heterogéneos. Estos activos pueden agruparse en una o varias categorías, donde cada categoría representa un modo específico de clasificar los activos según su función dentro del servicio. Por último, los sistemas de flota son conjuntos de activos idénticos que se gestionan como una unidad colectiva, orientados a un enfoque en la disponibilidad y la optimización del uso de las unidades de acuerdo al servicio (Arnold et al., 2016). En los

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

sistemas descritos previamente, cada unidad se compone de diversos componentes que se organizan en una estructura de módulos, submódulos y componentes individuales. Esta jerarquía establece cómo los componentes individuales interactúan dentro de una configuración para llevar a cabo funciones más complejas, propias de los módulos y submódulos. Las conexiones entre componentes pueden ser en serie, en paralelo, o una combinación de ambas, dependiendo de las necesidades funcionales del sistema (Tam et al., 2006).

El enfoque de este trabajo se centra en los sistemas multi unidad tipo flota, conforme a la clasificación previamente establecida. Estos sistemas son ampliamente utilizados por empresas que ofrecen servicios a la comunidad. A continuación, se detallan las características más relevantes de este tipo de sistemas, resaltando los aspectos más importantes de este tipo de sistemas.

2.1.2. Flota

El término "flota" se deriva originalmente de la palabra sajona "fleet", que significa un grupo de embarcaciones flotantes. Actualmente, el término se extendió para abarcar grupos de otros vehículos. En este ámbito, este vocablo es aplicable, pero no limitado a un conjunto idéntico de aviones, autobuses, trenes y camiones que prestan un servicio (Rawat & Lad, 2018). A medida que la industria manufacturera ha evolucionado, el término "flota" se ha adaptado para describir conjuntos de elementos industriales que comparten características similares, como una flota de transformadores de potencia, una flota de máquinas en una fábrica o una flota de robots industriales.

Por lo tanto, el concepto que se seguirá en este proyecto para referirse a una flota es el siguiente: Una flota es un grupo de activos idénticos que comparten la realización de un objetivo global y que trabajan independientemente bajo las mismas condiciones de operación (Monnin et al., 2011). Así, una flota es un sistema multi unidad que trabaja de acuerdo a un propósito o misión en particular. Generalmente, las flotas están asociadas con la prestación de servicios de transporte de personas y carga, así como con la industria manufacturera y la generación de energía. Este contexto da lugar a una distinción importante en el estudio de los sistemas de flotas: por un lado, las unidades que requieren movilidad y, por otro, aquellas que son estacionarias.

Por ejemplo, si el sistema estudiado es un campo eólico, cada turbina pertenece a una flota debido a que como activo de un sistema de generación eléctrica, esta turbina debe ayudar a cumplir el objetivo de generación para ese campo. En este caso las unidades no presentan un desplazamiento, por lo tanto, se denominan flotas fijas. Por otro lado, si el sistema estudiado es un sistema de trenes, nuevamente cada unidad pertenece a una flota de transporte, y a su vez cada tren

ayuda a cumplir el objetivo del sistema medido, por ejemplo, en rutas. A diferencia del anterior caso las unidades requieren un desplazamiento para cumplir su objetivo, este tipo de flotas se denominan móviles, estas últimas se pueden dividir de acuerdo al recorrido que realicen, si el recorrido es conocido de antemano se denominan con enrutamiento como por ejemplo el sistema de trenes, de lo contrario se denominan sin enrutamiento, como por ejemplo un sistema de aviones de combate.

Finalmente, otro aspecto relevante para este proyecto es la distinción entre flotas homogéneas y heterogéneas. En las flotas homogéneas, todas las unidades comparten la misma arquitectura de componentes. Un ejemplo típico son las flotas formadas por un único modelo de vehículo, autobús o tren, lo que implica que todas las partes y rutinas de mantenimiento son idénticas. Por contraste, las flotas heterogéneas están compuestas por unidades con diversas arquitecturas de componentes. A pesar de estas diferencias, estas unidades trabajan conjuntamente para prestar el servicio, la Figura 2.2 muestra la clasificación mencionada.

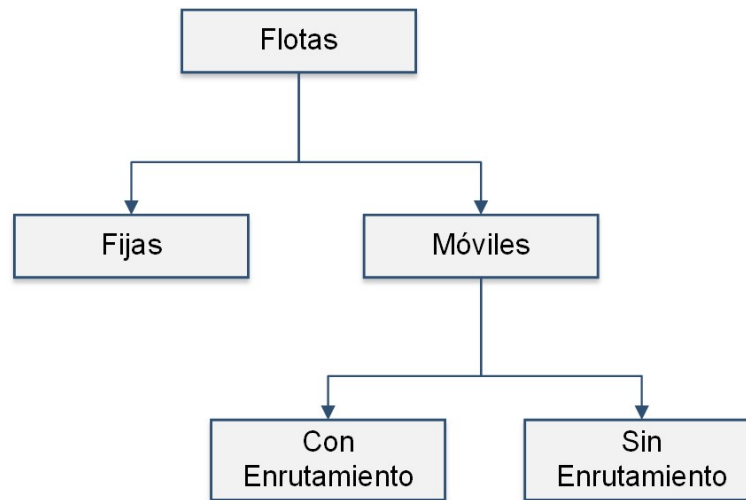


Figura 2.2. Clasificación de una flota

2.1.2.1. Características de una flota

Las flotas, como conjuntos organizados de unidades, desempeñan roles cruciales en múltiples sectores, de la vida diaria. Fundamentalmente, las características de una flota se derivan de las propiedades individuales de los vehículos que la inte-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

gran. Sin embargo, estas unidades no actúan de forma aislada, sino como parte de una entidad cohesiva que exhibe características distintivas relacionadas con su composición, su finalidad específica y su capacidad operativa global. Cada uno de estos aspectos es esencial para garantizar que la flota no solo cumpla con las exigencias operativas diarias, sino que también se alinee estratégicamente con las necesidades de la organización. De acuerdo a lo anterior, a continuación, se exponen las características más relevantes que definen una flota.

- Tamaño, escala y alcance del sistema.

Se refiere fundamentalmente al número de unidades que la conforman y a su capacidad de servicio. Una flota más amplia permite ofrecer un servicio de mayor escala, logrando simultáneamente un alcance geográfico extenso en términos de cobertura. El tamaño de una flota está determinado por el número n de unidades que la componen, las cuales pueden estar disponibles o no, estas últimas debido a mantenimiento o a su obsolescencia. Es importante destacar que la definición del tamaño de una flota no depende del tipo específico de unidad, sino más bien del servicio u objetivo que estas unidades están destinadas a cumplir (Liang et al., 2019). A continuación, la Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2 muestran la conformación del tamaño de una flota.

$$n = n_A + n_U \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$n_U = n_M + n_O \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

- n_A : Unidades disponibles.
- n_U : Unidades no disponibles.
- n_M : Unidades en mantenimiento.
- n_O : Unidades declaradas obsoletas.

- Propósito específico.

El objetivo principal de la flota, o su razón de ser, es fundamental para determinar su función específica. Este propósito generalmente se mide mediante indicadores de desempeño diseñados para evaluar la eficiencia de la flota (Zoutendijk & Mitici, 2024), por ejemplo, la capacidad de transportar diez mil pasajeros en un mes en una flota de autobuses. Asimismo, este propósito influye directamente en las características y necesidades de cada unidad de la flota. Esto incluye configuraciones y equipamientos especializados que son pertinentes y funcionales únicamente mientras la unidad forma parte de la flota.

- Estado de operatividad

La operatividad de la flota se refleja en el estado de sus unidades, lo cual es fundamental para la planificación, el mantenimiento y la funcionalidad del sistema. El estado de cada vehículo, ya sea nuevo, en uso medio o al final de su vida útil, determina necesidades específicas de mantenimiento que deben ser abordadas adecuadamente. Además, la disponibilidad de las unidades influye directamente en la capacidad de la flota para satisfacer las demandas del servicio de manera efectiva.

Otras características están relacionadas con el tipo de componentes que utilizan las unidades identificando si son reparables o no, la necesidad y forma del abastecimiento de los repuestos (Zheng et al., 2023). Finalmente, la arquitectura de componentes de cada unidad define distintos niveles entre módulos, submódulos y componentes, lo cual es necesario conocer para identificar qué tan complejo puede ser el mantenimiento, el concepto de niveles se describen en la siguiente sección.

2.1.3. Niveles en la arquitectura de componentes de una unidad

Una flota está compuesta de un conjunto de unidades, a su vez cada unidad está compuesta por subsistemas denominados módulos y estos pueden ser compuestos de otros submódulos o de un grupo de componentes. En efecto, en una flota de aviones, un avión es la unidad y este a su vez puede tener un módulo de aterrizaje, de propulsión o de refrigeración. El módulo de aterrizaje puede llevar por ejemplo un submódulo de medición de presión o un sistema de despliegue del sistema. Y cada uno de estos submódulos son un conjunto de componentes o piezas.

Cada uno de los niveles en que una unidad se compone de módulos y submódulos se denomina nivel de ensamblaje (*Indenture* por su término en inglés) (Ruan et al., 2012), este término indica que un módulo se puede componer de otros módulos, por lo tanto, las unidades generalmente poseen múltiples niveles de ensamblaje, luego el número de niveles incrementa la complejidad del sistema y su mantenimiento.

El concepto complementario de un sistema con varios niveles de ensamblaje, es el nivel de reparación (*Echelon* por su término en inglés), esto significa que si un módulo o componente de una unidad requiere ser reparado puede procederse a la reparación de la siguiente forma: si la reparación es simple se puede realizar en el sitio, de no ser así, se traslada a un depósito o taller y si la reparación aún no se puede realizar, es posible se requiera un taller más especializado y, por lo tanto, un nuevo traslado. A esta distribución de lugares de mantenimiento se denomina niveles de reparación (Cai et al., 2017), que indica la existencia de una jerarquía para realizar las reparaciones.

2.2. Estrategias de Mantenimiento

2.2.1. Tipos de fallos, clasificación y distribución de Weibull

Los componentes de una unidad sufren de degradación con el paso del tiempo, las condiciones del entorno, el desempeño en las labores de mantenimiento, los materiales son aspectos relacionados directamente con los fallos. Un fallo es la incapacidad de una unidad para realizar el propósito o función para la cual fue diseñada. La jerarquía de fallos ilustrada en la Figura 2.3 muestra varios tipos de fallos. Los condicionales que indican estados previos de algún componente que aún no afectan el rendimiento, pero pueden representar riesgo si no se manejan adecuadamente. Esto puede conducir a fallo incipiente, donde los signos de degradación en un componente son evidentes, pero no impiden la operación del sistema. Si no se atiende correctamente, este puede evolucionar a un fallo inminente, caracterizado por una degradación que comienza a afectar el desempeño de la unidad, que hasta este punto aún es capaz de realizar su función. Si no se corrige, esta condición puede degenerar en un fallo precipitado, que acelera la degradación del sistema y puede limitar o incluso impedir ciertas funciones y finalmente desencadenar en un fallo catastrófico, en el cual el sistema es incapaz de realizar su función (Fitch, 2013).

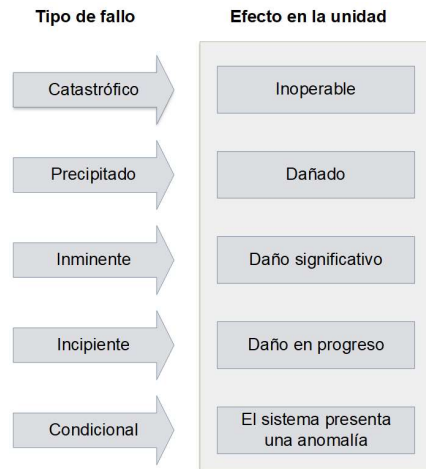


Figura 2.3. Jerarquía de fallos. Fuente: (Fitch, 2013)

Ahora, si bien los componentes presentan distintos tipos de fallos, estos son enmarcados dentro de tres zonas del tiempo de vida de un componente según la curva de la bañera (Bertsche, 2008), mostrada en la Figura 2.4. La zona 1 o de fallos

tempranos está relacionada con los fallos que se deben a la producción y logística misma del componente, esto es, problemas de fabricación, de ensamblaje, de materiales y del transporte hasta su lugar de uso final. Esta zona presenta una pendiente negativa y decrece rápidamente con el tiempo. La zona 2 corresponde a los fallos aleatorios, estos fallos son debidos al uso del componente en condiciones normales de funcionamiento. La tasa de fallos es constante y depende del mantenimiento y las condiciones de funcionamiento del componente. Por último, la zona 3 corresponde a los fallos por desgaste y envejecimiento, la tasa presenta una pendiente positiva alta.

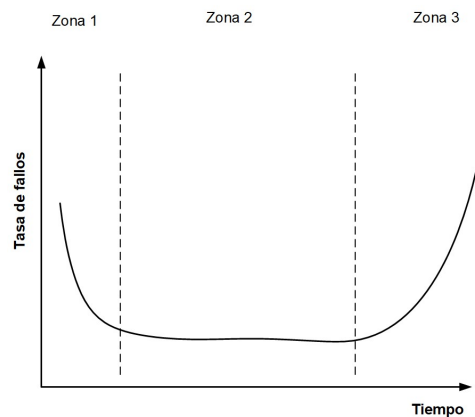


Figura 2.4. Curva de la bañera. Fuente: (Bertsche, 2008)

Para modelar el tiempo hasta el fallo de unidades y componentes existen distintas distribuciones estadísticas, tales como la distribución normal, uniforme, constante, exponencial, etc. Sin embargo, una de las más utilizadas es la distribución de Weibull [4]. Esta distribución se presenta en dos versiones, una de las cuales está conformada por dos parámetros. El parámetro de escala λ , que es una estimación media de la vida útil del componente, y el parámetro de forma β , que define el grado de concentración de los datos. Dependiendo de su valor, el parámetro de forma permite representar de manera sistemática las diferentes zonas de la curva de la bañera:

- Si β tiene un valor menor que 1: La tasa de fallo disminuye a medida que el componente es usado, esto se asemeja a la zona 1 de la curva de la bañera o fallos tempranos.
- Si β tiene un valor igual que 1: La tasa de fallo es constante, esto se asemeja a la zona 2 de la curva de la bañera o de fallos aleatorios.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Si β tiene un valor mayor que 1: La tasa de fallo se incrementa rápidamente con el uso, esto se asemeja a la zona 3 de la curva de la bañera o de fallos por desgaste.

De igual manera, también existe la distribución de Weibull de tres parámetros, que, a los dos parámetros mencionados previamente, agrega el parámetro denominado tiempo libre de fallo t_0 , este parámetro representa el tiempo en el cual no se espera que sucedan fallos, también es denominado parámetro de localización, la Ecuación 2.3 muestra la distribución de Weibull de tres parámetros.

$$f_X(x|t_0, \lambda, \beta) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{x - t_0}{\lambda} \right)^{\beta-1} e^{\left\{ -\left(\frac{x-t_0}{\lambda} \right)^\beta \right\}}, \quad x \geq t_0 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

2.2.2. Estrategias y políticas de mantenimiento

La estrategia de mantenimiento es un método sistemático para tomar decisiones sobre las actividades de mantenimiento que se deben realizar sobre las unidades a fin de asegurar que permanezcan operativas y disponibles la mayor cantidad de tiempo posible a un costo razonable. En un sistema multi unidad es posible aplicar mantenimiento planificado y no planificado. En el mantenimiento planificado se realiza un alistamiento de todos los elementos logísticos como alistamiento de piezas de repuesto, estaciones de trabajo, personal que serán los encargados de realizar el mantenimiento, y la gestión administrativa de la orden de mantenimiento, estas actividades se realizan mientras la unidad aún está disponible dentro de la flota. Por lo tanto, no genera tiempo muerto sobre la disponibilidad de las unidades.

Por el contrario, el mantenimiento no planificado trata de reaccionar a los eventos de fallo lo más pronto posible. Sin embargo, algunos aspectos incrementan los tiempos muertos de la unidad, entre ellos el transporte de la unidad al taller en el caso de flotas móviles o el desplazamiento de personal para atender el evento. También de la complejidad del sistema, la identificación y aislamiento del fallo puede retardar las decisiones sobre las medidas a tomar, posteriormente las actividades administrativas y logísticas que siendo de última hora también pueden incrementar el tiempo hasta llegar al mantenimiento. La Figura 2.5 muestra la línea de respuesta para un mantenimiento planificado y no planificado de una unidad de una flota (Contreras, 2021).

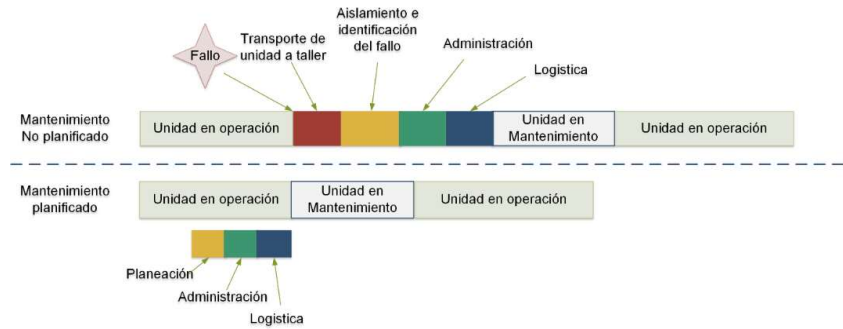


Figura 2.5 Mantenimiento planificado y no planificado. Fuente: (Contreras, 2021)

Por lo tanto, las decisiones cambian de acuerdo con el tipo de estrategia que se deba aplicar. En la literatura, la estrategia de mantenimiento que generalmente se encuentran en sistemas multi unidad para un mantenimiento no planificado es el mantenimiento correctivo (MC) o reactivo; Dentro del mantenimiento planificado se destacan el mantenimiento preventivo (MP) y el mantenimiento proactivo. A partir de este último, se desarrollan el mantenimiento basado en condiciones (MBC) (X. Zhang & Zeng, 2017) y el mantenimiento predictivo (Civerchia et al., 2017). El MBC, apoyado por el avance en tecnologías de telemetría y recolección de datos, facilita la toma de decisiones en el mantenimiento. Por su parte, el mantenimiento predictivo, al igual que el MBC, busca anticiparse a los fallos. Además, utiliza modelos estadísticos para estimar el momento en que probablemente ocurrirán estos fallos. La Figura 2.6 resume las estrategias mencionadas y a continuación, se revisan los aspectos generales de cada una de ellas.

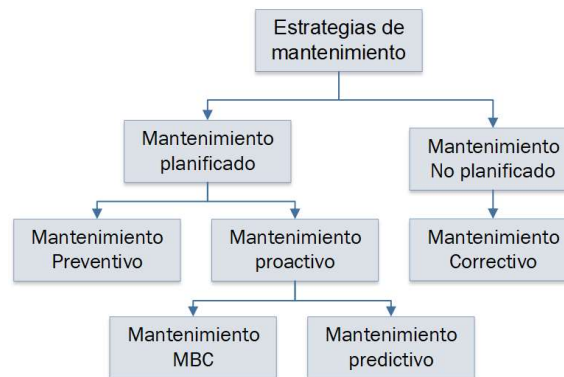


Figura 2.6. Estrategias de mantenimiento aplicadas a flotas. Fuente: (EN, 2010)

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

2.2.2.1. Mantenimiento correctivo o reactivo (CM)

El mantenimiento correctivo o reparación no programada realiza una actividad de mantenimiento después que un fallo ha ocurrido, también se denomina mantenimiento reactivo. Es una de las estrategias más utilizada, aunque la menos eficiente debido a que espera que el fallo suceda para tomar acción.

2.2.2.2. Mantenimiento preventivo (PM)

El mantenimiento preventivo es una evolución del mantenimiento correctivo, en el cual se busca que la unidad no llegue a presentar un fallo. Esto se logra mediante la utilización de inspecciones, ajustes, reparaciones, reemplazos planificados y coordinados (Akl et al., 2022). Esto hace posible planificar y programar el trabajo de mantenimiento sin interrupción en el objetivo de la flota y mejora la disponibilidad de las unidades. Esta inspección sistemática y extensa de cada elemento de la unidad se realiza a intervalos predeterminados.

2.2.2.3. Mantenimiento proactivo

Este tipo de mantenimiento es una tendencia emergente, consecuencia del incremento de la complejidad de los sistemas y la evolución de la electrónica que permite la creación de sensores y componentes electrónicos más pequeños y portables. A diferencia del mantenimiento correctivo y preventivo, el mantenimiento proactivo se enfoca en detectar causas que puedan generar fallos incipientes y que luego podrían convertirse en catastróficas, disminuyendo la disponibilidad del sistema (Fitch, 2013). Si bien la aplicación del mantenimiento proactivo trae beneficios sobre la vida útil y la disponibilidad de las unidades, también requiere mejor capacitación de los operadores, herramientas de análisis y una mejora continua en la tecnología de sensores, a continuación, se revisan dos implementaciones de este tipo de mantenimiento.

- **Mantenimiento basado en condiciones (CBM)**

Este tipo de mantenimiento se lleva a cabo en respuesta a un deterioro significativo en una unidad o sistema según lo indicado por un cambio en el desempeño de un indicador que representa la condición de la unidad (X. Zhang & Zeng, 2017). Para este propósito, es necesario un buen conocimiento de los datos de fallos para la implementación efectiva del mantenimiento basado en la condición. Este proceso implica la detección, diagnóstico y ejecución adecuada de la planificación del mantenimiento.

- Mantenimiento predictivo (MPD)

Utiliza herramientas de monitoreo para indicar qué tan bien está la unidad mientras realiza las tareas previstas. De modo que se incrementa el monitoreo continuo y el diagnóstico de la condición real de las unidades. El objetivo principal es predecir un fallo inminente en el tiempo, evitando así fallos que podrían causar altos costos por operación no servida (Civerchia et al., 2017). Posteriormente, un tratamiento de los datos permite aproximar intervalos de tiempo cuando el fallo se puede presentar.

Mientras la estrategia de mantenimiento define el marco general y los objetivos a largo plazo, las políticas detallan las acciones operativas específicas para implementarla. La estrategia prioriza actividades alineadas con los objetivos organizacionales y las limitaciones presupuestarias. En contraste, las políticas especifican procedimientos, técnicas y estándares para asegurar la coherencia y eficiencia en la ejecución del mantenimiento.

2.2.3. Políticas de mantenimiento para sistemas de flotas

Las políticas de mantenimiento son un conjunto de procedimientos que describen el cómo se deben realizar las acciones de mantenimiento (Ben-Daya et al., 2016). Una política de mantenimiento presenta un plan de acción deliberado proporcionando una guía para la gestión del mantenimiento (Gupta et al., 2009). Las políticas de mantenimiento implementan las estrategias de mantenimiento influyendo en la disponibilidad de la flota (H. Wang, 2002). Las ventajas y desventajas que ofrecen algunas de las políticas de mantenimiento utilizadas en flotas son presentadas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Políticas aplicables a sistemas multi unidad. Fuente: (Ben-Daya et al., 2016)

Política	Ventajas	Desventajas
Reemplazo por edad	<ul style="list-style-type: none"> • Se realiza un mantenimiento mínimo entre fallos intermedios • Propone mantenimiento entre misiones 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados • Confiabilidad baja antes del cambio total del activo
Mantenimiento periódico	<ul style="list-style-type: none"> • Realizan mantenimiento entre fallos • Reemplazo de componentes del activo • Reducción de la tasa de fallo del activo 	<ul style="list-style-type: none"> • Cadena de suministro alta.
Mantenimiento en bloque	<ul style="list-style-type: none"> • Confiabilidad alta 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos elevados • Ineficiencia en el uso de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Política	Ventajas	Desventajas
		componentes
Límite de fallo	<ul style="list-style-type: none"> Elegir el rango de fallo del activo para cada inspección 	<ul style="list-style-type: none"> Un riesgo alto en si el sistema presenta el fallo. Baja confiabilidad
Mantenimiento secuencial	<ul style="list-style-type: none"> Se considera la disponibilidad alta 	<ul style="list-style-type: none"> Cadena de suministros alta Costos altos
De reparación mínima	<ul style="list-style-type: none"> Garantiza la disponibilidad del sistema Costos bajos 	<ul style="list-style-type: none"> Confiabilidad baja Fallos recurrentes en el componente hasta su cambio.
Basado en fallos	<ul style="list-style-type: none"> Costos bajos 	<ul style="list-style-type: none"> Afecta la disponibilidad
Basado en tiempo	<ul style="list-style-type: none"> Costos moderados 	<ul style="list-style-type: none"> Ineficiencia en el uso de componentes Susceptibles a fallos intermedios
Basada en el uso	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidad alta Bajas horas de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Costos elevados Cadena de suministro
Basado en oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> Costos moderados 	<ul style="list-style-type: none"> Tener una cadena de suministro alta, generando que esta cadena llegue a caer en obsolescencia
Mantenimiento imperfecto	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidad media Bajos cotos 	<ul style="list-style-type: none"> Fallos recurrentes en el mismo componente Confiabilidad baja
Límite de costos de reparación	<ul style="list-style-type: none"> Bajos costos 	<ul style="list-style-type: none"> Cambio total del activo
Límite de tiempo de reparación	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidad alta 	<ul style="list-style-type: none"> Reparación mínima
Número de reparaciones y tiempo de referencia	<ul style="list-style-type: none"> Confiabilidad alta 	<ul style="list-style-type: none"> Costos elevados
Mantenimiento en grupo	<ul style="list-style-type: none"> Confiabilidad alta 	<ul style="list-style-type: none"> Costos altos

2.2.4. Indicadores de desempeño de mantenimiento

Los indicadores de mantenimiento son esenciales para evaluar la efectividad del sistema de gestión de mantenimiento, asegurando que se cumplan los objetivos a un costo razonable. La disponibilidad, fiabilidad y mantenibilidad son medidas importantes en la gestión del mantenimiento. La mantenibilidad describe la facilidad con la que una unidad puede ser reparada, la complejidad en la arquitectura de componentes puede disminuir esta característica. La fiabilidad es la probabilidad de que una unidad no presente fallo en un periodo de tiempo si se cumplen determinadas condiciones específicas. Se ocupa de en lograr que el sistema realice su función sin presentar algún tipo de interrupción. Por último, la disponibilidad evalúa la proporción de tiempo durante el cual una unidad permanece operativa o disponible para una tarea. La relación que se encuentra entre los indicadores mostrados permite la identificación de cada uno de los indicadores definidos previamente, la Figura 2.7 muestra un diagrama que relaciona los indicadores expuestos anteriormente.

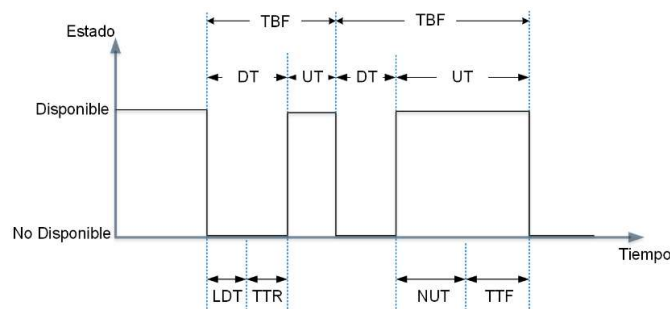


Figura 2.7. Relación entre indicadores de desempeño. Fuente: (Márquez, 2007)

La disponibilidad está relacionada con la fiabilidad y la mantenibilidad y se ve afectada por la logística del mantenimiento, la Ecuación 2.4 muestra la definición de la disponibilidad operacional, medida relevante en los sistemas multi unidad. Siendo el tiempo medio disponible (MUT, por su sigla en inglés) o la media de tiempos en los cuales la unidad ha permanecido operando realizando una tarea u ociosa esperando por la asignación de una. El tiempo medio no disponible (MDT, por su sigla en inglés), o la media de tiempos en los que la unidad ha estado en fallo, o en mantenimiento. Esta medida también es afectada por los retardos logísticos que pueden incrementar el tiempo que la unidad está en fallo.

$$A = \frac{MUT}{MUT + MDT} \times 100\% \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Para la medición del desempeño de la gestión del mantenimiento existen una serie de indicadores relevantes (Márquez, 2007). Sin embargo, algunos deben ser adecuados para que puedan representar el desempeño del mantenimiento de una flota. El tiempo medio entre fallos (MTBF, por su sigla en inglés) es un indicador positivo que representa el tiempo que transcurre entre un fallo y otro. Un MTBF alto indica un estado saludable de las unidades, de lo contrario indica que se deben mejorar la planeación del mantenimiento. La definición del MTBF es mostrada en la Ecuación 2.5.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Tiempo servicio} - \text{Tiempo de reparación}}{\text{Número de fallos}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Por otro lado, el tiempo medio de reparación (MTTR, por su sigla en inglés), es un indicador negativo que está relacionado con la mantenibilidad del sistema, describe el desempeño de las labores de mantenimiento. Por lo tanto, un MTTR bajo indica mayor eficiencia en las tareas de mantenimiento, un MTTR alto indica pobre desempeño del mantenimiento en la realización de reparaciones. La definición del MTTR es mostrada en la ecuación 2.6.

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Tiempo de reparación}}{\text{Número de fallos}} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

El tiempo de utilización de los activos se puede estudiar a partir del Tiempo medio para fallar (MTTF, por su sigla en inglés), es un indicador positivo, el cual muestra la fiabilidad de un activo mediante el tiempo que ha estado realizando una tarea antes del fallo. Un MTTF alto indica una fiabilidad alta del activo y lo contrario indica deficiencias en el mantenimiento. La definición del MTTF es mostrada en la Ecuación 2.7.

$$\text{MTTF} = \frac{\text{Tiempo de servicio}}{\text{Número de fallos}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

2.2.4.1. Relación entre el MTBF, MTTR y MTTF

En conjunto estos indicadores evalúan la salud del sistema tanto en la disponibilidad como en la fiabilidad, la relación que presentan muestra una dependencia entre estos indicadores y como el ajuste de uno implica cambios en el otro, insertando complejidad en la definición de su valor. La Figura 2.8 muestra la relación entre estos tres indicadores.

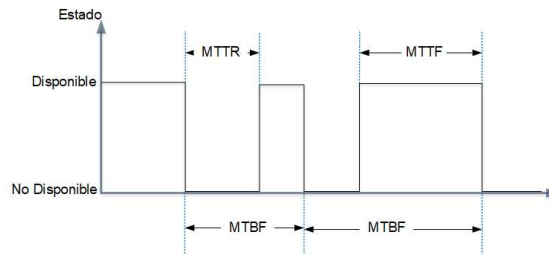


Figura 2.8. Relación entre MTBF, MTTR, MTTF. Fuente: (Márquez, 2007)

Una forma de medir los retardos que se pueden presentar en los retardos que se puedan presentar debido a la logística o tiempos administrativos en la gestión de las órdenes es mediante el tiempo medio de retardo logístico (MLDT, por su sigla en inglés). Este indicador negativo indica que entre mayor valor existe un mayor retardo en la atención a tareas de mantenimiento, por el contrario, un menor tiempo indica eficiencia en la gestión de los elementos para tareas de mantenimiento. La definición de este indicador es mostrada en la Ecuación 2.8.

$$\text{MLDT} = \frac{\text{Tiempo de espera logístico o administrativo}}{\text{Número de fallos}} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

2.2.5. Análisis de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM)

A continuación se relaciona un método que es utilizado actualmente para generar análisis sobre varios tipos de sistemas, e identificar los distintos recursos que permiten llevar a cabo el mantenimiento de manera confiable. El conjunto de software que permite llevar a cabo el análisis RAM es basado en bloques de confiabilidad.

Un bloque de confiabilidad, también conocido como diagrama de bloques de confiabilidad (RBD), es una representación gráfica utilizada en el análisis de confiabilidad de sistemas complejos (Jia et al., 2019). Este diagrama modela el sistema en términos de componentes individuales y sus interconexiones, permitiendo visualizar cómo los fallos en diferentes componentes afectan el rendimiento global del sistema. Por lo tanto, un análisis de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM, por sus siglas en inglés) es una metodología utilizada para evaluar y mejorar el desempeño de un sistema en términos de su confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Este tipo de análisis es esencial para sistemas de mantenimiento, ya que ayuda a identificar y mitigar los fallos, optimizar los intervalos de mantenimiento y mejorar la disponibilidad general del sistema (Pirbhulal et al., 2021). A continuación, se detallan los principales componentes de un análisis RAM.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

2.2.5.1. Fiabilidad

La fiabilidad mide la capacidad de un sistema para desempeñar su función requerida bajo condiciones establecidas durante un período de tiempo especificado. Su objetivo es evaluar la probabilidad que un sistema o componente funcione sin fallos durante un intervalo de tiempo dado (Ben-Daya et al., 2016). Generalmente se utilizan técnicas estadísticas y modelos matemáticos para analizar datos históricos de fallos y calcular métricas como el MTBF.

2.2.5.2. Disponibilidad

La disponibilidad es la proporción de tiempo que un sistema está operativo y funcional. Tiene como objetivo maximizar el tiempo durante el cual el sistema está disponible para su uso (Abdulgader et al., 2015). Para ello se analiza la relación entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total (incluyendo el tiempo de inactividad para reparaciones y mantenimiento).

2.2.5.3. Mantenibilidad

La mantenibilidad es la facilidad con la que un sistema puede ser mantenido para conservarlo o restaurarlo a un estado en el que pueda cumplir su función requerida. Tiene como meta, reducir el tiempo y los costos asociados con las tareas de mantenimiento (Ben-Daya et al., 2016). Por lo tanto, incluye el análisis de tiempos de reparación, procedimientos de mantenimiento, y la disponibilidad de repuestos y herramientas. Se busca optimizar el MTTR.

2.3. Sistemas a eventos discretos

Los sistemas a evento discretos (DES) presentan una ventaja frente a otras formas de modelado, una de ellas es conocer el comportamiento del sistema en cada estado alcanzado y, por lo tanto, saber cómo se llega al valor deseado. Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan para lograr realizar una funcionalidad o cumplir un objetivo. Un evento es un suceso que pasa un periodo corto de tiempo y hace cambiar de estado un sistema. Por ejemplo, el encendido de un vehículo cambia el estado del sistema de apagado a encendido. Por último, un estado describe el comportamiento de un sistema en un instante de tiempo, logrando que este comportamiento sea medible (Cassandras & Lafortune, 2017).

Una de las herramientas de modelado a eventos discretos más utilizada son las redes de Petri (PN) (David & Alla, 2010). Sin embargo, existe una limitación de este tipo de redes con respecto a la complejidad del modelo, una de ellas es no poder diferenciar entre las marcas que pertenecen a un lugar. Una forma de mejorar esta limitación es utilizar redes de Petri coloreadas (CPN), en la cuales las marcas pette-

necen a un conjunto color que permite identificarlas dentro de un lugar. A continuación, se trata brevemente la representación y características esenciales de las redes de Petri coloreadas.

2.3.1. Redes de Petri coloreadas

El desarrollo de las redes de Petri coloreadas (CP-nets o CPN, por su sigla en inglés) fue dirigido por la necesidad de desarrollar un lenguaje de modelado, que fuese teóricamente bien formado y lo suficientemente versátil para ser usado en sistemas prácticos, del tamaño y complejidad típicos de la vida real (Sheng & Prescott, 2019a). Una Red de Petri Coloreada combina las redes de Petri interpretadas con un lenguaje de programación de alto nivel, que permite una representación más variada de datos en un modelo. Una diferencia importante entre una PN y una CPN, son los colores que pueden tener un token alojado en un lugar, en una PN interpretada las marcas representan la misma entidad cuando pertenecen a un lugar y no es posible diferenciarlos. Por el contrario, una CPN tiene la opción de definir conjuntos coloreados a los cuales una marca puede pertenecer, esto se conoce también como marca coloreada.

Otra característica importante en una CPN, son las expresiones en los arcos muy semejantes condicionales de programación del tipo SI-NO-ENTONCES y las guardas o condiciones, que son las encargadas de restringir las condiciones de disparo de las transiciones. Los cambios de estados en una CPN son llevados a cabo mediante la activación y disparo de las transiciones como en una PN interpretada. Sin embargo, como ahora se tiene diferenciación entre las marcas de un lugar, es necesaria información adicional que permita conocer qué tipo de marca debe ser removida de un lugar de salida y qué tipo de marca debe ser agregada en un lugar de entrada teniendo en cuenta el color al que pertenece cada lugar. A continuación, se describe la definición formal de una CPN y los conceptos que permiten modelar un sistema mediante este tipo de herramienta (Jensen & Kristensen, 2009).

2.3.1.1. Definición de una Red de Petri coloreada

Una red de Petri (PN) es un conjunto compuesto por una tupla; El conjunto de lugares P representa los estados del sistema, el conjunto T representa los eventos que afectan a la matriz Pre y $Post$ del sistema que representa el arco de entrada/salida a los lugares. Por último, M_0 representa el marcado inicial, la Ecuación 2.9 describe una PN:

$$PN = (P, T, Pre, Post, M_0) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Una extensión de las PN son las redes de Petri coloreadas (CPN), las cuales son un lenguaje para el modelado y análisis de sistemas distribuidos. Una de las principales características es que tienen la capacidad de asociar valores (colores) a cada objeto (marca). Esta característica proporciona a las CPN la capacidad de modelar sistemas complejos, ya que combina las ventajas de las PN con capacidades de programación en lenguajes de alto nivel. Una CPN se describe mediante la expresión que se muestra en la Ecuación 2.10. Los primeros cinco componentes son similares a una PN convencional. Además, C es el conjunto de colores y C_d representa el mapa de colores del dominio, por lo que $PUT \rightarrow C$.

$$CPN = (PN, C, C_d) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Por otro lado, cuando la complejidad de un sistema es elevada, se logra una mejor descripción a través de un CPN jerárquica (HCPN, por su sigla en inglés), que se describe en la Ecuación 2.11. Compuesto por una CPN definida en la Ecuación 2.10, T_{sub} es un subconjunto de T y representa el conjunto de transiciones de sustitución, que son módulos similares a las rutinas de programación, y permiten el anidamiento de otra secuencia descrita también con una CPN. P_{port} es un subconjunto de P y representa los lugares de entrada y salida a las transiciones de sustitución. Por último, PT es la función que asigna el tipo de puerto a los elementos de P_{port} , de tres tipos posibles $PT = \{in, out, in/out\}$.

$$HCPN = (CPN, T_{sub}, P_{port}, PT) \quad \text{Ecuación 2.11}$$

2.4. Estado del arte en el mantenimiento en sistemas multi unidad.

La toma de decisiones en el sistema de mantenimiento de sistemas multi unidad representa un desafío considerable debido a la complejidad de estos sistemas y a las demandas de los servicios que soportan (Alrabghi & Tiwari, 2016). La abundante cantidad de interacciones entre las unidades y sus componentes, junto con los estrictos requisitos de desempeño necesarios para alcanzar los niveles de servicio exigidos, requiere que las decisiones sean extremadamente precisas y bien fundamentadas. De igual manera, la clasificación mostrada en la Figura 2.1 sobre sistemas multi unidad brindan un panorama para comprender la complejidad y desafíos asociados con la administración del mantenimiento de estos sistemas.

En las últimas décadas, la literatura ha enfocado su atención en abordar la optimización del mantenimiento en sistemas multi unidad, conceptualizándolo como un problema de selección de políticas de mantenimiento (Khatab et al., 2018), cada

estrategia es implementada mediante una o varias políticas de mantenimiento la cual define las reglas que guiaran las tareas de mantenimiento.

Las estrategias de mantenimiento deben seleccionarse en función de la evaluación del riesgo y las consecuencias de fallo. Al evaluar diversas estrategias de mantenimiento para distintos activos, las organizaciones deben establecer previamente los objetivos de mantenimiento, que servirán como criterios de comparación. Este problema implica determinar la estrategia de mantenimiento óptima que potencie la capacidad operativa del sistema al maximizar su disponibilidad (Santos et al., 2023). Dicha optimización se examina desde múltiples perspectivas que están estrechamente vinculadas con el buen funcionamiento y la interacción entre las unidades que conforman el sistema multi unidad.

2.4.1. Dependencia entre componentes

La dependencia entre componentes establece relaciones que se pueden identificar en la arquitectura de componentes de una unidad en beneficio de optimizar costos y tiempos de mantenimiento. En (Martinod et al., 2018), se mencionan tres categorías principales de dependencia entre componentes. La primera es la dependencia estructural, que se centra en los componentes críticos que influyen en la confiabilidad de la unidad, orientando así las prioridades en las actividades de mantenimiento (C. Zhang et al., 2022). Desatender esta dependencia estructural puede resultar en imprecisiones dentro de los programas de mantenimiento (J. Wang & Zhu, 2021). En este contexto, el trabajo de (Khatab et al., 2018) aborda la dependencia estructural y para realizar una predicción de la fiabilidad utilizando modelos de riesgo proporcional, subrayando cómo la complejidad en la estructura de la unidad puede influir en esta característica. De igual manera, diferenciar entre componentes primarios y secundarios puede influir significativamente en las decisiones de mantenimiento de un sistema multi unidad (Anisimov, 2005).

De forma análoga, se puede evaluar el impacto de la interacción entre componentes en función de los costos generados, concepto conocido como dependencia económica. Esta dependencia busca entender la relación entre los costos de mantenimiento de diversos componentes y determinar agrupaciones óptimas para minimizarlo (R. Zhao et al., 2002). En este sentido, la dependencia económica influye en las decisiones de mantenimiento, especialmente cuando ciertos componentes requieren atención y su relevancia dentro del sistema es limitada (Deng et al., 2021). También en (Grimm et al., 2022) se analiza cómo el desmontaje de componentes impacta directamente en los costos de mantenimiento, subrayando cómo una política de mantenimiento oportunista puede optimizar estos costos si se considera realizar mantenimiento a otras piezas en el mismo desmontaje. Este enfoque es paralelo al estudio descrito en (Cheng & Zhao, 2023), donde se examina el efec-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

to del desmontaje en la degradación de componentes vinculados a tareas de mantenimiento específicas. Por lo tanto, la dependencia económica sugiere la implementación de estrategias de mantenimiento oportunista para optimizar eficientemente los costos de mantenimiento de la flota (Jain et al., 2018).

La dependencia estocástica analiza el impacto que tiene el fallo de un componente en el deterioro o funcionamiento de otras partes del sistema, como se discute en (Benaggoune et al., 2018). En un contexto similar, el estudio presentado en (Moakedi et al., 2019) profundiza en la dependencia estocástica y su relevancia para la optimización del mantenimiento, proponiendo nuevas directrices de decisión que también potencian la eficiencia en términos de dependencia económica. Por último, en (Arnold et al., 2016) se investiga cómo el entendimiento de esta dependencia estocástica puede influir en políticas de mantenimiento diseñadas para evaluar el estado de las unidades dentro del sistema.

2.4.2. Estimación del tiempo de vida restante (RUL)

El Tiempo de Vida Restante (RUL, por su sigla en inglés) representa una estimación del periodo de funcionamiento restante de un componente antes de su fallo. Una estimación precisa del RUL facilita una gestión eficiente de los componentes, previene interrupciones no planificadas y optimiza los aspectos logísticos, administrativos y de mantenimiento (X. Zhao et al., 2022). La literatura actual ha identificado estrategias para mejorar la precisión del RUL, combinando enfoques tanto administrativos como operativos. Por ejemplo, en (Kamei & Taghipour, 2023) se introduce un método que compara fuentes de datos centralizadas con descentralizadas para estimar el RUL de un conjunto de componentes.

En (de Pater et al., 2022) se emplea una técnica de estimación probabilística del RUL para perfeccionar las decisiones relacionadas con componentes sujetos a políticas de mantenimiento preventivo. Además, (Chen et al., 2021) utiliza datos de vehículos y recurre a Redes de Memoria a Largo Plazo (LSTM, por su sigla en inglés), para realizar estimaciones probabilísticas del RUL. Este enfoque permite desarrollar un modelo de costos adaptado a estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo. Es crucial enfatizar que cualquier estimación de RUL debe alinearse con las políticas de mantenimiento potencialmente aplicables a un sistema multi unidad.

Una de las estrategias de mantenimiento más recurrentes a aplicar cuando se pretende identificar la RUL son las técnicas predictivas, como se evidencia en (del Castillo et al., 2023), donde se presenta un enfoque dinámico para evaluar la disponibilidad de componentes críticos. Por otro lado, (T. Jiang & Liu, 2020) introduce una política de mantenimiento selectivo que optimiza los periodos de inactividad

de ciertas unidades del sistema, permitiendo una identificación anticipada de los componentes a intervenir. Este enfoque reduce tanto el tiempo logístico como el administrativo. Una estrategia similar se describe en (Zeng & Liang, 2023), donde se combina con una política de mantenimiento a nivel de componentes. Además, en (Yan et al., 2020) propone una política que organiza las actividades de mantenimiento bajo un esquema de reemplazo de bloques, abordando tanto fallos catastróficos como no catastróficos. Finalmente, en (X. Jiang et al., 2022), se emplea una política de mantenimiento periódico alineada con estimaciones del RUL.

Desde una perspectiva operativa, los modelos fundamentados en el RUL demuestran la identificación de zonas de fallo basadas en las condiciones operativas de un sistema. En (Dash et al., 2023), se emplea este enfoque para determinar la tasa de degradación de los componentes, considerando variaciones en las condiciones operativas. Paralelamente, se examina la dependencia estocástica como el elemento que define el RUL. Por ejemplo, en (Q. Zhang et al., 2022), se analiza la estructura de componentes en configuraciones, serie o paralela para identificar los intervalos de fallo cuando interactúan entre sí.

Adicionalmente, el volumen de datos generados puede mejorar los métodos para la estimación del RUL. En (Zeng & Liang, 2023), se combina una estrategia de predicción en tiempo real con un análisis de degradación y dependencia estocástica para ofrecer una estimación dinámica del RUL de un sistema. Finalmente, en (Du et al., 2020), se introduce un modelo que estima el RUL al estudiar la relación de envejecimiento entre componentes en sistemas serie bajo diversas condiciones operativas.

2.4.3. Abastecimiento de repuestos

La gestión de repuestos desempeña un rol fundamental en la eficacia y eficiencia del mantenimiento. No obstante, mantener inventarios excesivamente grandes de repuestos puede resultar en una alta tasa de capital inmovilizado que requiere una cuidadosa administración para asegurar la rentabilidad del sistema de mantenimiento. El objetivo radica en establecer un equilibrio entre las necesidades de componentes y las características intrínsecas del sistema, como el número de unidades en funcionamiento.

En (Gao et al., 2021), se aborda la determinación del número mínimo de unidades defectuosas que justificarían una solicitud de repuestos o una intervención de mantenimiento conjunto, siempre y cuando existan componentes disponibles. Por su parte, en (Zhang, Wenyu), se examina la interacción entre la gestión de inventario de un sistema y la implementación de una estrategia de mantenimiento preventivo. Además, en (Afifi et al., 2024), se perfecciona el sistema de mantenimiento al sincronizar la operación, los costos asociados al almacenamiento y la logística de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

pedido, junto con una política de mantenimiento preventivo. En este contexto, se emplea un algoritmo mimético híbrido para facilitar decisiones informadas sobre aspectos de abastecimiento y las tareas críticas de mantenimiento a ejecutar.

En (Hongqing et al., 2022) se analiza cómo la adopción de dos fuentes de suministro puede conducir a una reducción de costos en el mantenimiento. Esta investigación implementa una estrategia de mantenimiento basada en condiciones junto con una política de abastecimiento dual. Cuando las tasas de rotación de un componente no alcanzan niveles elevados, se establecen umbrales mínimos de inventario para optimizar la rotación. En (Dendauw et al., 2021) se introduce una estrategia de mantenimiento basada en condiciones, complementada con la definición de umbrales críticos para ciertos componentes. Esta metodología se aplica específicamente a unidades que experimentan fallas imprevistas, desviándose de la tasa de fallos promedio del sistema. Adicionalmente, en (Yan et al., 2020), se aborda la optimización de inventarios en conjunto con una estrategia de mantenimiento imperfecto. Aquí, las acciones de mantenimiento imperfecto se modelan como variables aleatorias de mejora. A través de un modelo de costo total esperado, se perfeccionan los parámetros clave que determinan la eficiencia del mantenimiento.

En (Zheng et al., 2023), se examina el impacto de la calidad de los repuestos, los tiempos de entrega y posibles errores en su inspección sobre la disponibilidad y costos del mantenimiento. Se presenta un modelo de degradación que ayuda a determinar el momento óptimo para solicitar un conjunto específico de repuestos. De manera análoga, (Motahari et al., 2021) se enfoca en perfeccionar el suministro de repuestos utilizando la generación de eventos basados en datos. Utilizando sensores que capturan las condiciones del sistema, se introducen restricciones tanto en el abastecimiento como en las tareas de mantenimiento. El objetivo es identificar los parámetros ideales en términos de tiempo y cantidad de repuestos, optimizando así los intervalos de suministro y anticipando las necesidades de mantenimiento. Por último, el contexto operativo de un sistema también se considera como un factor crucial en la solicitud de componentes. En (C. Zhang et al., 2019) se modelan las condiciones climáticas aleatorias para evaluar su impacto en las operaciones de mantenimiento y la gestión de repuestos en sistemas de generación eólica. Este estudio combina una estrategia de mantenimiento oportunista con una política de inventario (s, S) , también denominada como política de stock mínimo-máximo.

2.4.4. Uso de políticas de canibalización en sistemas multi unidad

Los enfoques anteriores no consideran la posibilidad de que se produzcan retrasos o escasez en el suministro de repuestos durante los tiempos de mantenimiento, lo que puede afectar significativamente la disponibilidad del sistema. Sin embargo,

los sistemas multi unidad a menudo se encuentran inmersos en entornos inciertos que exigen continuamente cambios en la política de suministro de componentes y los cronogramas de mantenimiento. Un caso especial se refiere a los tiempos de logística de mantenimiento, que pueden aumentar desproporcionadamente por la falta o no disponibilidad de repuestos. Las estrategias presentadas en (J. B. Oliveira et al., 2019)(Tordecilla et al., 2021) ciertamente pueden fortalecer la cadena de suministro. Aun así, es importante señalar que las características específicas de los sistemas multi unidad, como la cantidad de unidades, la arquitectura de componentes y el tipo de servicio proporcionado, pueden presentar un riesgo latente que puede abordarse incluyendo políticas adicionales a las incluidas en trabajos previos.

Una forma de mitigar la escasez de componentes de repuesto en un sistema multi unidad es aplicar políticas de canibalización sobre el sistema de gestión de mantenimiento (Sheng & Prescott, 2019b).

En un sistema de mantenimiento, la acción de intercambiar dos componentes idénticos entre dos o más equipos similares, cuando existe escasez de repuestos disponibles, se define como canibalización (Morse, 2017). En este contexto, se tiene un subsistema denominado "donante" que alberga una pieza funcional y otro subsistema denominado "receptor" que presenta una falla en el mismo componente que impide cumplir su función (Curtin, 2001). La Figura 2.9 muestra un ejemplo de canibalización. Este sistema está compuesto por dos unidades homogéneas con componentes A, B, C en su arquitectura de componentes.

En el instante T_1 , el componente A de la unidad uno entra en fallo. Por lo tanto, mientras que la pieza de repuesto de A no está disponible en el inventario, la unidad uno estará deshabilitado, siendo en ese momento la disponibilidad global del sistema del 50%. Por otro lado, el componente B de la segunda unidad fallo en el tiempo T_2 , esto indica que ambas unidades no están disponibles en T_2 , y la disponibilidad global del sistema es del 0%. El tiempo de inactividad de cada unidad depende de las tareas de mantenimiento después de los tiempos T_1 y T_2 . Si la primera unidad alcanza el tiempo T_2 aún deshabilitada y no existen componentes A o B disponibles y la disponibilidad del servicio se limita, una política de mantenimiento basada en canibalización es una opción viable. En el momento T_3 , se habilita el intercambio del componente A de la unidad dos a uno o viceversa, logrando reparar al menos una unidad en T_4 , y así la disponibilidad global del sistema se eleva al 50%.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

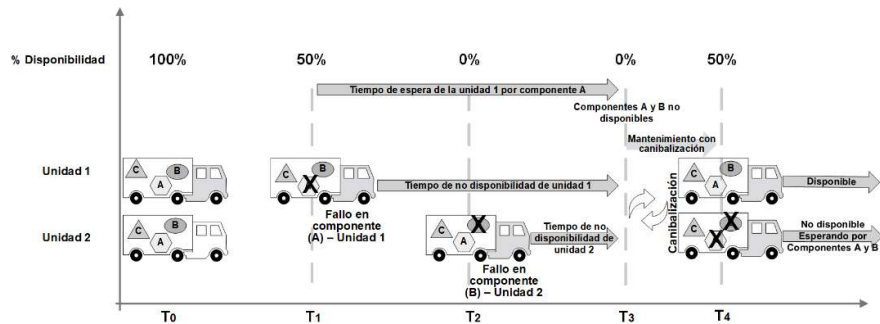


Figura 2.9. Proceso de canibalización en una flota

Por lo tanto, la canibalización puede aplicarse como una política de mantenimiento o coordinarse con otras políticas de mantenimiento tales como correctivas y preventivas, provocando que existan niveles de canibalización debido al grado de acciones de intercambio utilizadas. Por ejemplo, una política de canibalización total (Fisher, 1989) implica una restauración completa de los equipos solo a través de piezas canibalizadas. Sin embargo, suele ser más común utilizar políticas de canibalización incompletas en las que los componentes provienen tanto la tarea de canibalización como del stock de piezas, incluidos los artículos reparados (Park & Lee, 2014). La canibalización incompleta se puede utilizar tanto para el inventario de repuestos como para el sistema de mantenimiento. Por último, en (S. W. Ormon & Cassady, 2004) también se muestran diferentes niveles de canibalización. La Figura 2.10 resume cómo estas políticas pueden vincularse con otras políticas de mantenimiento.

Sin embargo, la canibalización incontrolada afecta negativamente a los recursos de mantenimiento (Curtin, 2001). Aun habiendo tenido en cuenta los aspectos mostrados en la Figura 2.11, los cuales permiten identificar oportunidades para aplicar canibalización. Por ejemplo, canibalizar un componente varias veces en diferentes unidades o usar componentes con un RUL cerca del final de su vida útil disminuye la efectividad de la canibalización.

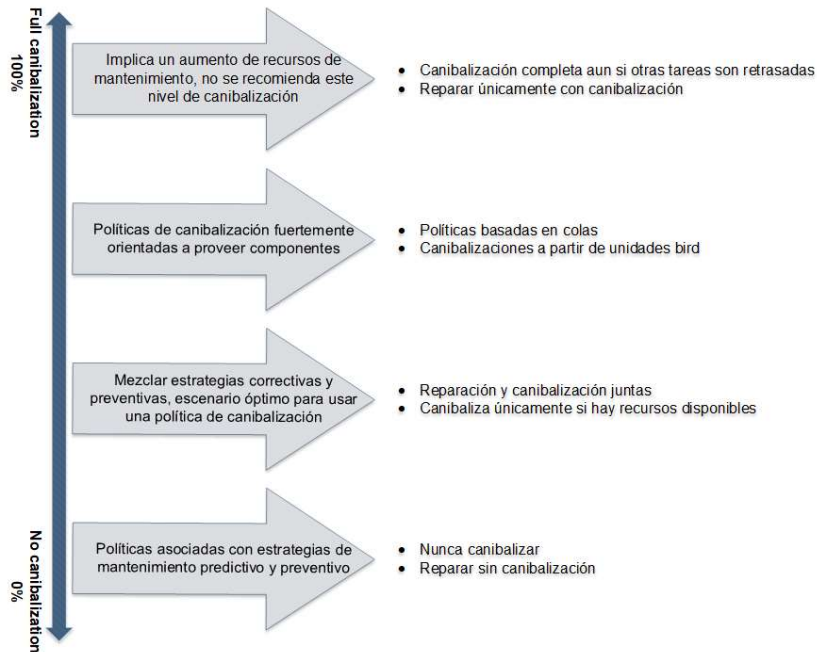


Figura 2.10. Proceso de canibalización en una flota

Así, trabajos tempranos como (Fisher, 1989, 1990b) proponen un modelo para comparar diferentes políticas de canibalización en una flota de aviones; Posteriormente, la investigación cambió al campo de las decisiones, como en (S. W. Ormon & Cassady, 2004; Salman et al., 2006) donde se explora uno de los primeros modelos de toma de decisiones que incorpora la canibalización y también una solución que introduce un modelo de simulación que permite evaluar cómo la canibalización afecta el rendimiento de un sistema multi unidad.

En los últimos años, se han explorado otras políticas de canibalización. Por ejemplo, en (Sheng & Prescott, 2017, 2019a), se estudia la política de canibalización *bird* que consiste en tomar una unidad funcional del sistema multi unidad, que será designada para suministrar componentes usados durante un periodo de tiempo planificado. El modelo propuesto se desarrolló con redes de Petri coloreadas jerárquicas (HCPN). Una limitación de los modelos encontrados es que no consideran el impacto de una política de mantenimiento con canibalización sobre la disponibilidad operativa del sistema, ni proporcionan herramientas de trazabilidad para monitorear la vida útil de los componentes canibalizados. Esto dificulta decidir qué componentes seleccionar para la canibalización y cómo esta práctica puede afectar la disponibilidad del sistema a largo plazo.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

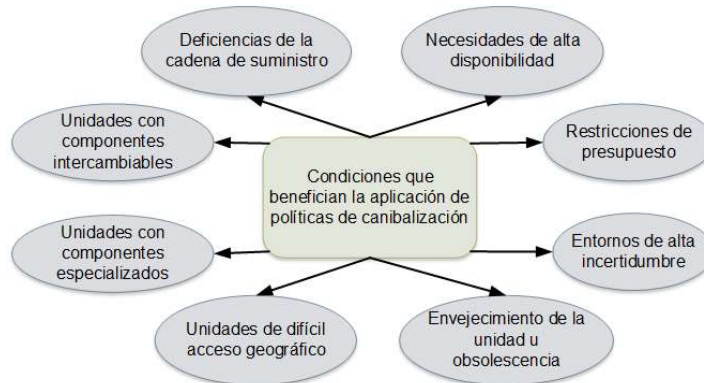


Figura 2.11. Condiciones que favorecen la aplicación de canibalización

2.4.4.1. Políticas de canibalización en los sistemas de mantenimiento de un sistema multi unidad

La forma de mantener un sistema con tareas de canibalización es un concepto que ha evolucionado desde sus inicios. Por ejemplo, los métodos iniciales interpretaron la canibalización como un intercambio de componentes entre ubicaciones de la misma unidad, tratándola como un sistema multi componente. El rendimiento de la pieza solo tenía dos valores, 1 para disponible y 0 para fallo. Posteriormente, los valores de rendimiento se fueron extendiendo a un rango entre 0 y 1. En trabajos recientes, la canibalización se concibió como componentes de intercambio entre diferentes plataformas, unidades o cualquier sistema.

Trabajos como (Hirsch et al., 1968a) usan la canibalización para restaurar un sistema usando partes de intercambio en la misma estructura formada por diferentes componentes. Siendo el conjunto de ubicaciones donde se puede instalar una pieza, el "locus" y "Locí" que resulta del producto entre un componente con un locus específico como se puede ver en la Figura 2.12. Inicialmente, se consideraban estados binarios limitados para piezas, "fallo total" (0) y "desempeño perfecto" (1). Esta característica fue mejorada por (Hochberg, 1973a) incluyendo la posibilidad de trabajar diferentes valores operativos intermedios entre 0 y 1 en componentes.



Figura 2.12. Concepto de Loci y Locus

Una propuesta similar se encuentra en (Baxter, 1988; Simon, 1970, 1972), considerando nuevamente las ubicaciones y la admisibilidad como características relacionadas con la canibalización óptima. De este modo, se propone que no siempre todos los intercambios posibles son convenientes para el sistema. Por lo tanto, es necesario incluir restricciones a la ecuación para describir esos eventos, midiendo el grado de desempeño obtenido para determinar la admisibilidad a la canibalización propuesta. En resumen, los autores mencionados caracterizan la canibalización como una transformación, cada uno representa un posible intercambio entre pieza-ubicación (n) de un sistema.

En (Khalifa et al., 1977) el concepto "Locus" se renombra como "orden del sistema", que de manera similar se refiere a todas las ubicaciones para instalar un componente. Por ejemplo, un equipo como el que se muestra en la Figura 2.12, se considera una unidad con 6 ubicaciones (posición de las ruedas), y una flota compuesta por 3 camiones tendrá un sistema de orden 18. Por lo tanto, el concepto de "orden del sistema" extiende el uso de canibalización de los sistemas multi componente a los sistemas de multi unidad. También se propone identificar cinco variables cuando se aplican políticas de canibalización: tamaño del sistema, número de ubicaciones, confiabilidad de los componentes, número de partes de tipos y configuración de la unidad. Por último, tres características de rendimiento fueron agregados, al indicador "Estado del sistema esperado", propuesto en trabajos anteriores (Hirsch et al., 1968b; Hochberg, 1973a), estos son: indicadores por defectos de máquina averiada, tiempo medio hasta la avería completa y canibalizaciones totales.

Las contribuciones anteriores son significativas porque sentaron las bases para una representación formal de la canibalización. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que todas las acciones de mantenimiento dependen de los recursos disponibles, y, considerando que estos componen alrededor del 40% del presupuesto de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

las industrias, es obligatorio que el mantenimiento sea rentable. Por lo tanto, trabajos como (Fisher & Brennan, 1986) comenzaron a incluir restricciones de recursos en los sistemas de mantenimiento, lo que permite evaluar cómo una política de canibalización se ve afectada por las limitaciones de recursos. La idea fue extendida en (Fisher, 1990c), utilizando un sistema complejo multi unidad como ejemplo e incorporando políticas de canibalización en los niveles mostrados en la Figura 2.10. En esta parte se identifica que la simulación, junto con modelos matemáticos, comienzan a permitir una mayor complejidad en los sistemas estudiados.

Dado que los recursos de mantenimiento son limitados, el gestor de mantenimiento debe tener suficientes elementos de información para decidir cuándo se aplica una política de mantenimiento. Sin embargo, las políticas de canibalización, hasta ahora, solo se utilizan en casos de último momento. Por ejemplo, en casos de deficiencias en el sistema de MRO por causas no controladas, agregando una complejidad considerable a la toma de decisiones para lograr rentabilidad y favorecer el sistema. En (R. Zhang & Ghanmi, 2014b) se estudia un escenario bélico, siendo el presupuesto de mantenimiento el principal criterio para tomar decisiones mostrando la conveniencia o no de canibalizar un componente. Y definiendo reglas para ejecutar diferentes políticas, entre ellas canibalización al igual que en (S. W. Ormon & Cassady, 2004) donde se introducen criterios como tiempos de intercambio para decidir la canibalización evaluando los costos.

Particularmente, las funciones de ajuste han tratado de evaluar la relación entre las canibalizaciones y los costos de realizarla; así, en (Salman et al., 2007) se propone una función de ajuste definida mediante cuatro parámetros que son: Coste de remoción (C_{rem}), Coste de reparación (C_{rep}), Coste de instalación (C_{inst}), y si se permite la canibalización, su coste se representa por el parámetro coste de canibalización (C_{cann}). Por otro lado, se ha estado estudiando la canibalización como fuente de componentes del sistema de inventario, en (Y. Wang et al., 2017) se explora el uso de la canibalización sobre el sistema k de n . Este sistema se compone de n componentes y el sistema entra en fallo si al menos k de n componentes fallan con $k < n$. El modelo utiliza indicadores de rendimiento como tasa de canibalización y tasa de unidades reemplazables en taller (SRU, por su sigla en inglés) para optimizar un indicador de coste mínimo de componentes.

Por otro lado, medir la efectividad, cuando en el sistema se ha aplicado una política de canibalización, es otro aspecto relevante para la toma de decisiones. Primero se estudió el desempeño del sistema en condiciones mínimas y luego se extendió a utilizar diferentes niveles de desempeño con diferentes canibalizaciones admisibles (Hirsch et al., 1968b) para finalmente medir el desempeño en sistemas complejos. El índice de similitud se introdujo en (N. de Oliveira & Ghobbar, 2014b; Van Houtum & Kranenburg, 2015), y puede catalogarse como una extensión de la

canibalización. Esta característica establece que hay componentes de intercambio que no necesariamente son iguales, pero que tienen la capacidad de cumplir la misma función. Junto con las políticas de canibalización, el autor evalúa métodos de control de inventario utilizando, tanto, la similitud como la canibalización.

La medida de rendimiento más utilizada ha sido la disponibilidad, teniendo en cuenta que la operatividad de las unidades influye en la calidad del servicio en un sistema multi unidad. Sin embargo, la confiabilidad del sistema también es un indicador relevante, en (Sheng & Prescott, 2017), se presentan cuatro indicadores para medir el desempeño en un sistema de flota, la capacidad para realizar misiones, tasa de canibalización, coste de mantenimiento y tasa de aborto de la misión. Este último indicador evalúa tanto la confiabilidad como la calidad del sistema de mantenimiento. El modelo se amplía en (Sheng & Prescott, 2019a, 2019b), incluyendo actividades para la optimización del inventario y el mantenimiento preventivo. Este autor también evalúa la política de canibalización *bird* o *Hangar queen*. El artículo busca identificar los parámetros precisos que definan una ventana de tiempo de suspensión óptima, así como el número mínimo de unidades suspendidas. Una política *bird* requiere una planeación singular, al exigir al sistema de producción unidades funcionales detenidas para tomar piezas usadas disponibles.

En (Dreyfuss & Stulman, 2018) se usa una versión del modelo METRIC (Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control) para un taller de reparación. Las entradas del modelo son el tiempo de espera, el presupuesto para repuestos y el arribo de clientes. El indicador es la ventana de llenado, que evalúa la demanda satisfecha (clientes) en el tiempo. Las propuestas complementarias incluyen reparación, reemplazo y piezas intercambiables (componentes de sistema intercambiables) como en (Dreyfuss & Stulman, 2019a, 2019b). De manera similar, (Mangara, 2017) utiliza el parámetro de tiempo de espera del cliente (CWT, por su sigla en inglés), que significa el tiempo máximo que un cliente (cliente, máquina, plataforma, etc.) espera para ser reparado. Se estudia el sistema K-line con componentes conectados en serie; el documento indica que a menor CWT más relevante puede ser una política de canibalización. Este documento evalúa aplicar la canibalización en el mantenimiento de una línea de producción, cada línea tiene la misma arquitectura de componentes, pero, solo cuando falla un sistema, las líneas restantes tienen $(n-1)$ componentes para canibalizar. Este trabajo es un modelo extendido de (Hoover et al., 2002) que propone un modelo para predecir las tasas de canibalización en una flota de aviones, aplicando una política de canibalización *bird*, y la tasa de capacidad de misión completa (FMC, por su sigla en inglés), es el parámetro para optimizar.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

2.4.4.2. Implementaciones en los sistemas de mantenimiento, incorporando políticas de canibalización

Existen diferentes métodos para aplicar políticas de canibalización en un sistema multi unidad. Sin embargo, en diversas propuestas los modelos son representaciones de sistemas demasiado restringidos. La experimentación con políticas de canibalización, encontrada en la literatura, se describe de dos maneras: modelos de simulación y combinación de un modelo de simulación y un sistema real. El modelo de simulación es el método más extendido porque limita el riesgo sobre el sistema (Alrabghi et al., 2017).

Los sistemas multi unidad son considerados sistemas complejos, ya sea bajo un enfoque de dependencia (económica, estocástica y estructural) entre componentes (Martinod et al., 2018), así como de la toma de decisiones sobre mantenimiento (Alrabghi & Tiwari, 2016; Eruguz et al., 2017; Fisher, 1988). Como se señaló anteriormente, la canibalización es una herramienta eficaz en sistemas complejos (aplicaciones militares, sistemas de fabricación a gran escala, etc.). Sin embargo, tal vez la rentabilidad se vea comprometida cuando no se controla la utilización de los recursos en los sistemas de mantenimiento. Así pues, se utilizan modelos de simulación como herramienta para evaluar indicadores de desempeño respecto a una política de canibalización que se prueba en un sistema multi unidad cuando no es posible acceder al sistema físico. Por ejemplo, los primeros trabajos desarrollan la técnica METRIC para determinar el número de inventario inicial de repuestos (Sherbrooke, 1971, 2006; Smidt-Destombes et al., 2011). Luego, las extensiones MOD-METRIC incluyen piezas de arquitectura jerárquica (*multi indenture*) junto con NORS para incluir canibalización (Muckstadt, 1973). Estos métodos se mezclaron en (Fisher, 1989), y produjeron un primer modelo de simulación sobre la canibalización, incluidas restricciones del personal de mantenimiento. El simulador utiliza FORTRAN como lenguaje de programación y modela las interacciones de los sistemas de mantenimiento logrando predecir las tasas de disponibilidad de los componentes.

Posteriormente, (R. Zhang & Ghanmi, 2014b) propone una simulación de un sistema de mantenimiento en entornos inciertos. El modelo ejecuta reglas de decisión con o sin canibalización. Además, modelos de simulación como (S. W. Ormon & Cassady, 2004) utilizan el software ARENA para ejecutar comparaciones entre políticas de canibalización. (Salman et al., 2006) utiliza el lenguaje Visual Basic para desarrollar un modelo de simulación para medir el rendimiento de los sistemas de flotas que utilizan la canibalización como política de mantenimiento. Estos últimos trabajos incluyen en simulación una característica de red cerrada. Eso significa que la cantidad de componentes reparados es constante y así mejoran la representa-

ción del sistema. Otro modelo de simulación estuvo presente en (Sherbrooke, 2006), cuyo enfoque se denomina DRIVE (Distribución y Reparación en Entornos Variables) e incluye un mecanismo para clasificar componentes con prioridad de reparación y buscar una mejor ubicación para almacenarlos. El modelo utiliza la canibalización junto con un sistema de inventario de artículos reparables de dos niveles. El software de simulación implementa la técnica Monte Carlo para evaluar la canibalización como una política de abastecimiento de componentes usados.

Un sistema de gestión de mantenimiento suficientemente estructurado permite realizar un seguimiento de las actividades de canibalización. Por ejemplo, en (Okyere-Boateng, 2015), se utiliza una recopilación de datos entre el período 2010-2015, a diferencia de trabajos anteriores, este estudio busca evaluar si hubo variaciones en la aplicación de actividades de canibalización para un mismo componente y cómo se alteró el desempeño flota de aeronaves MV22. Sobre este aspecto existen algunos informes que muestran cómo la canibalización es habitual en los sistemas de este tipo. Por ejemplo, (Hoover et al., 2002; Powell, 2007) estudiaron las actividades de canibalización en el período 2001-2006 y optimizaron la aplicación de la política de canibalización *hangar queen* en una flota de aviones F88W. Como indicador, se propone la tasa de canibalización mostrada en la Ecuación 2.12, el índice es la suma entre las canibalizaciones de aeronaves ($ACann$) y motores ($ENCann$) sobre el tiempo total de vuelo. En trabajos previos, los autores habían utilizado una flota de simuladores F-16 como caso de estudio para encontrar el número óptimo de simuladores disponibles para satisfacer la demanda por entrenamiento de pilotos utilizando políticas de canibalización (Byrkett, 1985).

$$CannRate = \frac{(ACann + ENCann)}{\text{Tiempo Total de vuelo}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Informes como (Curtin, 2001; Morse, 2017), muestran cómo la canibalización afecta el sistema de mantenimiento en la fuerza aérea y flotas navales de algunos países. Sin embargo, estos informes muestran que la canibalización es un procedimiento admitido, documentado y evaluado dentro de los sistemas y cómo su uso permitió mejorar la disponibilidad de la flota en presencia de restricciones presupuestarias. De manera similar, un informe mostrado en (Keating et al., 2008), estudia los efectos de la canibalización en aviones F-15 en el año 2004. Los datos reportados en este documento muestran que la media entre partes ganadas y pérdidas por canibalización fue de un 10%, y el componente no siempre era el mismo. Además, concluye que optimizar el uso de la canibalización podría tener beneficios para este tipo de sistema. Aplicaciones similares se encontraron en (Cassady et al., 2003).

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

2.4.4.3. Modelos de propuestas para representar las actividades de canibalización

Un modelo es una herramienta para extraer información de cualquier entidad física. Por ejemplo, un proceso industrial puede tener distintas representaciones de acuerdo con los interesados. Los sistemas de mantenimiento no son una excepción, trabajos como (Alrabghi & Tiwari, 2016) describen cómo lograr representaciones confiables. También, la literatura sugiere que la estrategia de Sistemas de Eventos Discretos (DES) es una forma eficiente de representarlos. Una parte de los sistemas multi unidad son aquellos compuestos por unidades similares (sistemas de flotas) si se aprovecha esta singularidad permite disminuir la complejidad del modelo desde el paradigma DES. La siguiente sección explica cómo algunos modelos representan tareas de canibalización en sistemas de mantenimiento. En los primeros trabajos (Fisher, 1990c; Simon, 1970) los modelos fueron representados con el proceso de Markov, y en (S. W. Ormon & Cassidy, 2004) se muestra cómo se da la evolución de un sistema discreto cuando un intercambio es admisible por canibalización.

La literatura existente sobre canibalización destaca que el modelado mediante DES ofrece una representación efectiva para actividades relacionadas con estas políticas, como se evidencia en (Salman et al., 2007). Además del enfoque DES, las herramientas de modelado gráfico enriquecen la comprensión de estos modelos. Por ejemplo, en un estudio preliminar, (Fisher, 1989) empleó una representación visual utilizando SLAMII (Lenguaje de simulación para modelado alternativo) para ilustrar un modelo de simulación de un sistema de mantenimiento con políticas de canibalización.

Luego (Sheng & Prescott, 2019b) usa redes de Petri Coloreada (CPN) y propone un modelo para representar un sistema multi unidad jerárquico completo, compuesto del sistema de flota, el sistema de mantenimiento (depósitos, programación de mantenimiento, políticas entre ellos canibalización), las plataformas (aviones) y los componentes se modelan utilizando un CPN jerárquico. Algunas de las referencias anteriores no utilizan herramientas gráficas, pero es evidente que utilizan el paradigma DES para modelar sistemas de mantenimiento que interactúan con políticas de canibalización.

2.4.4.4. Modelos de simulación que implementan canibalización

Una representación adecuada de un sistema multi unidad y su administrador de mantenimiento es compleja debido a la presencia de interdependencias entre las unidades, módulos y componentes, los objetivos operativos del sistema, la gestión de los recursos de mantenimiento y las políticas de mantenimiento correspondientes (Sheng & Prescott, 2017). Contrariamente, en muy pocos casos se pueden realizar cambios y experimentos en un sistema real de múltiples unidades. Debido a esto, algunos modelos analíticos pueden volverse complejos al intentar representar

adecuadamente el comportamiento de un sistema debido a la gran cantidad de variables que deben considerarse.

Los modelos de simulación limitan estos inconvenientes al facilitar el análisis y lograr una interacción más estrecha con el sistema real que con los modelos analíticos (Alrabghi et al., 2017; Alrabghi & Tiwari, 2016). Los primeros modelos de simulación de múltiples unidades con políticas de canibalización se muestran en (Fisher, 1989), donde se propone evaluar el desempeño de la política de canibalización a través del número de unidades listas para la misión. En (S. W. Ormon & Casady, 2004; Salman et al., 2007), se presenta un modelo de simulación de unidades paralelas para centrarse en la toma de decisiones sobre políticas de canibalización. Finalmente, en (Sheng & Prescott, 2019a), se propone un modelo de simulación descrito con una red de Petri jerárquica coloreada para estudiar la canibalización *bird*.

Por tanto, los modelos de simulación son herramientas valiosas para estudiar la canibalización en sistemas de unidades múltiples. Sin embargo, estos modelos deben ser altamente parametrizables y flexibles para adaptarse a diferentes situaciones. Además, se deben considerar las interdependencias entre unidades, módulos y componentes con los objetivos operativos y las políticas de mantenimiento. Luego, es fundamental que estos modelos se conviertan en herramientas de toma de decisiones para los responsables del mantenimiento y así mejorar la disponibilidad operativa del sistema.

Los sistemas a eventos discretos son la forma más práctica de representar sistemas de mantenimiento (Urbani et al., 2020), La metodología ha sido utilizado en una serie de trabajos a lo largo de los años y ha evolucionado para acercarse cada vez más a las necesidades de representación, la Tabla 2.2 muestra la relación de algunos trabajos que utilizan sistemas a eventos discretos para representar aplicaciones de mantenimiento.

2.4.5. Métodos y Aplicaciones del Análisis RAM

En la industria del petróleo y gas, el análisis RAM se utiliza para evaluar la disponibilidad y confiabilidad de sistemas complejos como compresores recíprocos. Según (Corvaro et al., 2017), los compresores recíprocos son evaluados no solo por su confiabilidad, sino también por su capacidad de mantenimiento bajo diferentes condiciones operativas. Este enfoque permite identificar y clasificar los equipos y subsistemas que más contribuyen a la indisponibilidad, facilitando la implementación de estrategias de optimización costo-efectivas. Además, en un estudio sobre la integración de modelos BIM (Building Information Modeling) con análisis RAM, (Morales et al., 2022) destacan la importancia de esta combinación para desarrollar activos confiables desde la fase de diseño hasta la operación.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 2.2. Modelos de mantenimiento desarrollados con DES.

Herramienta	Referencias	Observaciones
Modelo DES con funciones de transformación y estructura	(Hirsch et al., 1968b), (Simon, 1970), (Hochberg, 1973b)	Los modelos analíticos consideran diferentes propiedades del sistema. Sin embargo, su comprensión es limitada cuando se representan grandes sistemas.
Modelo de simulación DES con sistema MNT-MOD desarrollado en terminología SLAM y FORTRAN	(Fisher, 1990b), (Fisher, 1988)	Se incluyen diferentes configuraciones de módulos y submódulos, considerando diferentes niveles de ubicación para el mantenimiento, con restricciones de recursos.
Modelo DES con procesos continuos de Markov	(Fisher, 1990b), (Fisher, 1990a)	Una de las primeras propuestas que incorpora conceptos estrictos de los modelos DES que evalúan diversas políticas de canibalización.
Modelo de simulación DES con Arena Software y Visual Basic	(Salman et al., 2006), (R. Zhang & Ghanmi, 2014a)	Esta herramienta introduce el concepto de simulación de red cerrada. Se plantea el uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones.
Modelo de simulación DES con CPN y software Bespoke C#	(Sheng & Prescott, 2019b), (Sheng & Prescott, 2019a)	Esta herramienta presenta un CPN jerárquico para los modelos de sistemas de mantenimiento y flotas. La técnica de simulación de Monte Carlo ha sido ampliamente utilizada.
Modelo de simulación, fórmulas híbridas y Variables de Skellam, junto con la simulación de Monte Carlo	(Dreyfuss & Stulman, 2018), (Dreyfuss & Stulman, 2019a)	Los modelos de toma de decisiones de simulación pueden insertar retrasos debido al número de simulaciones requeridas.
Fórmulas y modelos de simulación (herramientas no especificadas)	(Hoover et al., 2002)	Se presentan ecuaciones basadas en parámetros como el tiempo medio de reparación (MTTR), el tiempo medio de respuesta de suministro (MSRT), la tasa de finalización de la misión (FMC) y el tiempo de espera del cliente (CWT).

La integración de estos modelos permite una comunicación bilateral entre las herramientas de software, mejorando la toma de decisiones en el diseño y gestión de activos. El análisis RAM no solo contribuye a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas, sino que también ofrece ventajas económicas y de seguridad. La implementación de un análisis RAM riguroso permite a las empresas reducir los costos de mantenimiento y mejorar la seguridad operativa. (Herder et al., 2008) demuestran cómo el modelado RAM puede integrarse en la práctica industrial para mejorar la confiabilidad de los productos y reducir el tiempo de inactividad.

En el contexto de la industria del petróleo y gas, el análisis RAM se aplica para desarrollar programas de mantenimiento basados en el riesgo, mejorando la seguridad y la disponibilidad de las plantas. (Eti et al., 2006) proponen un enfoque que integra el análisis RAM con la gestión de riesgos para guiar las políticas de mantenimiento y reducir los costos asociados. Sin embargo, se han encontrado, pocas aplicaciones de análisis RAM a flotas como sistemas susceptibles de análisis RAM.

2.5. Uso de algoritmos de optimización en mantenimiento de sistemas multi unidad.

La optimización del mantenimiento en sistemas multi unidad surge como respuesta a la complejidad inherente en la gestión del mantenimiento de estos sistemas. La presión sobre las flotas se traduce en la necesidad de alcanzar un objetivo global, requiriendo que cada unidad contribuya para su realización. Esta dinámica añade complejidad, especialmente considerando que muchas flotas consisten en numerosas unidades que, a su vez, representan sistemas multi componentes únicos. En la última década, se observa una tendencia ascendente en la investigación de algoritmos para optimizar las actividades de mantenimiento, como se ilustra en la Figura 2.13.

La optimización de un sistema de mantenimiento generalmente se centra en minimizar costos asociados con componentes, mano de obra y tiempos de inactividad, mientras se busca maximizar la disponibilidad y prolongar la vida útil del sistema. En el ámbito académico y literario, estos objetivos se entrelazan con la necesidad de integrar estos elementos en la operación continua y el desarrollo del sistema a lo largo de su vida útil. Por consiguiente, existen investigaciones dedicadas a mejorar las estrategias de mantenimiento y a seleccionar políticas adecuadas según el estado actual del sistema.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

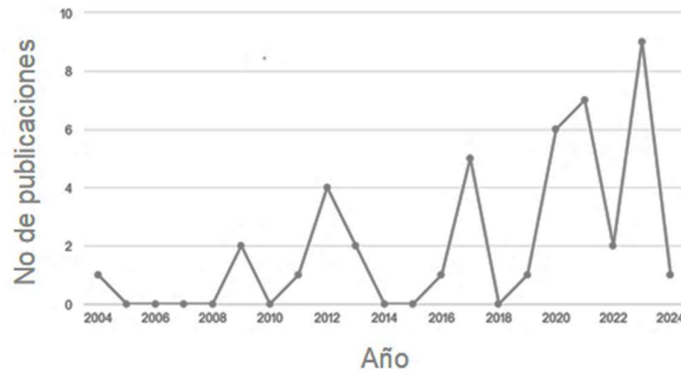


Figura 2.13. Trabajos publicados sobre algoritmos de optimización para mantenimiento

En (Rozas et al., 2024), se introduce un algoritmo predictivo basado en eventos que utiliza datos recopilados por sensores para optimizar las actividades de mantenimiento de una o varias unidades, garantizando al mismo tiempo la disponibilidad de componentes necesarios. La optimización también se puede alcanzar mediante técnicas de simulación. Por ejemplo, en investigaciones como (Li et al., 2023; Xu et al., 2021), se emplea un enfoque de optimización utilizando simulación Monte-Carlo. Este método permite identificar parámetros que mejoren una estrategia de mantenimiento preventivo oportunista al considerar variables como costos y momentos óptimos para ejecutar las actividades de mantenimiento.

En el ámbito de la optimización del mantenimiento, la inteligencia artificial, específicamente el aprendizaje automático, ha ganado importancia. En el estudio (Najafi & Lee, 2023), se emplea un algoritmo de aprendizaje por refuerzo profundo para perfeccionar una estrategia de mantenimiento basada en condiciones, particularmente en un sistema con dependencia económica y protocolos de inspección basados en la antigüedad de las unidades. Como se ha discutido en secciones previas, es frecuente abordar de manera integral tanto el mantenimiento como la gestión de inventarios de repuestos. Por ejemplo, en (Yan et al., 2023), se adopta un algoritmo basado en búsqueda de vecindario variable que simultáneamente optimiza una política de mantenimiento imperfecto y la gestión de piezas de repuesto. Además, la aplicación de algoritmos genéticos (De Jonge & Scarf, 2020) y sus variantes, como los algoritmos genéticos híbridos (Han & Yun, 2017), subraya la importancia de determinar los parámetros óptimos para mejorar el sistema. En (Tambe, 2023), se implementa un algoritmo genético para determinar los parámetros críticos necesarios para implementar una estrategia de mantenimiento selectivo.

En (R. Wang, Chen, Liang, & Huang, 2021; R. Wang, Chen, Liang, & Wu, 2021), se emplea un algoritmo genético para afinar el período de mantenimiento preven-

tivo en un sistema de gran envergadura cuyos componentes siguen una distribución de Weibull. De manera similar, los algoritmos genéticos ofrecen una vía para optimizar políticas de mantenimiento basadas en condiciones, como se ilustra en (Motahari et al., 2021), donde se perfeccionan modelos de agrupación dinámica de actividades de mantenimiento para reducir costos utilizando el algoritmo genético MULTIFIT. Además, en (Alamri & Mo, 2023), se recurre a los algoritmos genéticos para optimizar la reposición de repuestos en el contexto de una política de mantenimiento preventivo. Estos algoritmos también desempeñan un papel crucial en la gestión de recursos humanos, como se evidencia en (Gao et al., 2020), donde un algoritmo genético establece la correlación entre una política de reemplazo periódico y la disponibilidad del personal. Finalmente, en (Dias et al., 2021), se implementa un algoritmo genético co-evolutivo en combinación con una extensa red de sensores en campo para llevar a cabo un mantenimiento predictivo. Este modelo utiliza una degradación estocástica y considera múltiples modos de fallo para ofrecer una representación exhaustiva del sistema.

En (Mishra et al., 2021; Mishra & Shrivastava, 2020), se emplea un algoritmo de optimización basado en la enseñanza-aprendizaje (TLBO, por su sigla en inglés) para perfeccionar una política de mantenimiento grupal en unidades con dependencias tanto estocásticas como económicas. Un objetivo similar se aborda en (Chalabi et al., 2016), donde se utiliza un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO, por su sigla en inglés) con el mismo propósito. Por otro lado, en (Salari & Makis, 2020), se recurre a un algoritmo de programación dinámica para discernir características del sistema en estado estacionario que reflejen el costo promedio de implementar una política de mantenimiento basada en condiciones. En (Mishra et al., 2020), se emplea el algoritmo Jaya para afinar una política de mantenimiento oportunista por agrupamiento y una política de mantenimiento preventivo imperfecto. Asimismo, en (Li et al., 2020), se utiliza un algoritmo basado en biogeografía (BBO, por su sigla en inglés) para minimizar una función de coste centrada principalmente en los gastos de mantenimiento. En (Bi et al., 2020), se introduce un algoritmo evolutivo que busca identificar estrategias de mantenimiento viables, considerando aspectos como costos, recursos y consumo de energía. Finalmente, en (Pargar et al., 2017), se emplea la programación lineal entera para optimizar los costos de mantenimiento y la tasa de reemplazo de la flota.

2.6. Conclusión del estado del arte

El análisis de la literatura evidencia diversos modelos que describen la implementación inmediata de la canibalización, destacando sus efectos beneficiosos a corto plazo en el ámbito operativo. No obstante, estos modelos presentan una falta de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

claridad en su contexto de aplicación y se enfocan principalmente en aspectos operativos, descuidando consideraciones logísticas y administrativas. Esta limitación reduce su aplicabilidad general, ya que cada modelo ofrece soluciones específicas para el contexto particular que estudia, restringiendo su adaptabilidad a diferentes sistemas. Estratégicamente, para la planificación operativa de una flota, sería ideal contar con un modelo de mantenimiento más holístico que permita aplicar la canibalización en cualquier sistema multi unidad y evaluar sus repercusiones a corto y medio plazo.

La literatura revisada presenta algunos modelos de decisión sobre políticas de canibalización que solo abordan aspectos parciales del sistema. Son pocos los modelos que consideran entornos aleatorios que puedan afectar la disponibilidad operativa de la flota, o que traten temas de suministro y operación del sistema al mismo tiempo. Además, se ha observado que los modelos de simulación identificados suelen ser complejos para el gestor del mantenimiento. Hay una limitación de herramientas accesibles que ofrezcan un modelo de decisión integral, apoyado por la dinámica del sistema. Sin embargo, la revisión también revela que los modelos basados en redes de Petri son de gran utilidad, pues su enfoque gráfico y formal mejora la comprensión y descripción de la complejidad de los sistemas de mantenimiento. Esto proporciona una considerable flexibilidad para modelar actividades dentro de dicho sistema.

Se propone, por lo tanto, la implementación de un modelo de simulación que facilite la aplicación de políticas de canibalización en sistemas de flotas. Esto permitiría monitorear la operación del sistema y analizar los impactos a mediano y largo plazo de la canibalización cuando se combina con otras políticas de mantenimiento. Así, se podría establecer un marco de trabajo robusto para la toma de decisiones en relación con este tipo de políticas.

A pesar de que existe una gran cantidad de software comercial RAM para analizar las implicaciones de políticas de mantenimiento, la gestión de recursos y la gestión de mantenimiento, pocos de ellos ofrecen funcionalidades específicas para la implementación de políticas de canibalización. Estos programas generalmente solo permiten gestionar los retrasos en el suministro de componentes, pero no facilitan la evaluación de cómo la canibalización puede mejorar la operatividad de una flota en entornos aleatorios, como cambios en los precios o problemas en la cadena de suministro.

3 Modelado

Con el objeto de definir los criterios para seleccionar estrategias de mantenimiento en un sistema multi unidad, en la presente investigación se propone un diseño metodológico experimental que permita evaluar escenarios que orienten hacia la toma de mejores decisiones. Para ello, en primer lugar, se requiere definir las interacciones entre el sistema de gestión de mantenimiento y el sistema objeto de estudio, luego proponer un modelo que represente el comportamiento del sistema, simular el modelo para probar diferentes escenarios de políticas de mantenimiento y que a su vez brinden la información de entrada para optimizar un modelo de decisión. En este capítulo se presenta el procedimiento seguido para desarrollar el modelo propuesto.

3.1. Definición de requerimientos

Aunque existen estándares como ISO14224 e ISO55000 (ISO, 2014) relacionados con el mantenimiento y la gestión de los activos de una compañía, estos están enmarcados en el tratamiento de los datos y los sistemas de información requeridos para la gestión de activos. Sin embargo, para una especificación más detallada de las actividades de gestión del mantenimiento, el modelo propuesto en la parte 3 del estándar ISA SP95 ofrece una descripción más clara de cómo organizar la gestión del mantenimiento con el fin de apoyar las operaciones de la flota.

La familia de estándares ISA SP95 (Scholten, 2007) son un conjunto de recomendaciones para mejorar las interfaces entre los sistemas de control y gestión de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

los sistemas industriales. En su parte 3, define las categorías de administración, una de ellas es el Modelo de actividades de gestión de operaciones de mantenimiento de los activos de una empresa. Teniendo en cuenta la definición de esta categoría mostrada en la Figura 3.1, las actividades con tonalidad azul se escogieron para la aproximación del sistema de gestión de mantenimiento, debido a que implementar todas las actividades no aportaría mayor detalle al modelo y, por el contrario, si puede hacer que resulte más complejo de comprender y de implementar.

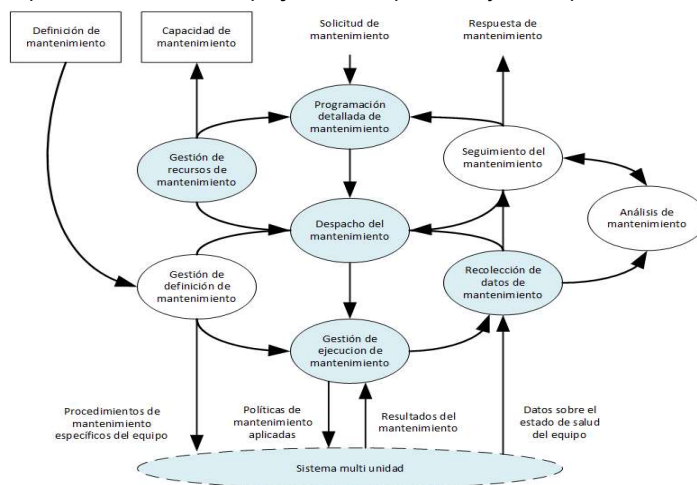


Figura 3.1. Modelo ISA-95 – Parte 3. Fuente: (Scholten, 2007)

Las actividades de la categoría seleccionadas se implementan parcialmente, principalmente por la generalidad que presenta la definición del estándar. El modelo de operaciones de mantenimiento proporciona un flujo de trabajo para responder a una *Solicitud de mantenimiento*. Si se trata de un mantenimiento preventivo, forma parte de la función de *programación detallada de mantenimiento*. Sin embargo, si se trata de una respuesta a un mantenimiento correctivo, la función de *despacho del mantenimiento* permitiría esta funcionalidad.

Para aplicar actividades de mantenimiento al sistema, se utiliza la función de *gestión de ejecución de mantenimiento*, que aplica las políticas de mantenimiento y luego recopila los resultados mediante la función de *recolección de datos de mantenimiento*. Cualquier actividad de mantenimiento está sujeta a los recursos disponibles en la función de *gestión de recursos de mantenimiento*. Como se mencionó anteriormente, las funciones son más complejas en su definición, pero para esta definición de requerimiento, las definiciones realizadas son adecuadas.

3.1.1. Descripción de actividades

Conforme se expuso en la sección 2.1, un sistema multi unidad, en particular una flota, se define por una colección de subsistemas autónomos conocidos como unidades. Por lo tanto, se describirán las actividades que normalmente realizan una flota y su gestión de mantenimiento. Esta descripción espera evaluar la disponibilidad operacional de la flota, representando un sistema de gestión de mantenimiento en la interacción con las unidades. El objetivo es observar cómo la gestión de mantenimiento influye en la disponibilidad operacional del sistema a través de la política de mantenimiento utilizada. Las actividades se enfocan en una flota de transporte con enrutamiento y los aspectos fundamentales del gestor de mantenimiento, incluidos los recursos siguiendo las especificaciones de la ISA SP95. Del mismo modo, imita el funcionamiento operacional del sistema mediante una disciplina de rutas y contempla un patrón de fallos en las unidades siguiendo una distribución de Weibull.

3.1.1.1. Actividades propuestas

Para generar un modelo que represente un sistema de gestión de mantenimiento de una flota, es necesario comenzar por identificar los procesos básicos que sustentan las actividades de mantenimiento. El modelo inicialmente debe diferenciar claramente entre mantenimiento correctivo y preventivo, dado que la gestión del mantenimiento preventivo se realiza a través de una planificación cuidadosa, mientras que el mantenimiento correctivo responde directamente a los eventos que causan fallos. Este último se alinea con la función de *Despacho de mantenimiento* de ISA-SP95 Parte 3, enfocándose en que la atención a este tipo de órdenes se lleve a cabo en el menor tiempo posible. Este proceso debe comenzar con la identificación del componente afectado y el traslado de la unidad al área de reparaciones, teniendo en cuenta que los eventos de fallo suceden exclusivamente durante la operación de la unidad, reflejando la naturaleza reactiva de una intervención. En cuanto al mantenimiento preventivo, apoyado en la función *Programación detallada de mantenimiento* de ISA-SP95 Parte 3, debe implementarse de forma proactiva, basándose en un registro histórico del uso de las unidades. El modelo debe monitorear la utilización de cada unidad y actualizar el registro de uso de los componentes. Además, el sistema debe programar el mantenimiento preventivo periódicamente cuando el uso de estos componentes supera un umbral predeterminado, con el fin de anticiparse a posibles fallos.

De igual manera, el sistema de gestión debe coordinar los recursos de mantenimiento disponibles de acuerdo a las políticas de mantenimiento establecidas, como dicta la función *Gestión de recursos de mantenimiento*. Posteriormente, la

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

función *Despacho del mantenimiento* requiere que el modelo genere una respuesta de mantenimiento que se ajuste tanto al evento como a la planificación, identificando la unidad, el módulo y el componente específicos a mantener. Finalmente, la ejecución de la respuesta de mantenimiento debe realizarse en la unidad designada según la función *Gestión de ejecución de mantenimiento*, y debe cumplirse dentro del tiempo que el operador necesite para llevar a cabo las acciones de mantenimiento sobre la unidad.

Respecto a la gestión de la operación de la flota, el modelo debe simular la disciplina de ruta que responde a las necesidades del servicio o demanda. Deberá incluir mecanismos para definir qué unidad realizará una ruta determinada y el espacio en el que operará. Además, es crucial que el modelo registre las misiones completadas y los eventos surgidos durante la operación, coordinando el mantenimiento correctivo, preventivo y canibalización con el estado de las rutas para asegurar que estas actividades solo se realicen cuando las unidades no estén en servicio.

Finalmente, el modelo debe representar cada una de las unidades que componen la flota. Es necesario que el modelo refleje los diferentes estados operativos de las unidades, como disponible o no disponible, y simule el comportamiento ante fallos de una arquitectura con componentes críticos. Además, debe permitir que las unidades puedan comunicar sus estados al gestor de mantenimiento para solicitar acciones de mantenimiento y proporcionar realimentación sobre el estado del sistema.

3.2. Modelo de simulación.

De acuerdo con la definición de requisitos previamente realizada, se hacen las siguientes apreciaciones iniciales sobre el desarrollo del modelo. La representación de un sistema multi unidad presenta desafíos para modelar el comportamiento de las unidades y sus interacciones con el sistema de mantenimiento y los procesos administrativos de la flota. Por ejemplo, el tamaño de la flota implica organizar un conjunto de sub modelos, que representen la relación entre los componentes de la unidad, esta relación puede ser tan compleja como componentes posea el sistema. De igual manera, la representación de las relaciones entre los componentes supone establecer conexiones que permitan describir el comportamiento de fallo derivado de la arquitectura de componentes. A su vez, el modelo debe mostrar como cada unidad se integra con la flota mediante el objetivo del sistema

Igualmente, el gestor de mantenimiento posee una serie de procesos administrativos que deben acoplarse para la generación de órdenes de mantenimiento e

inventarios y el seguimiento de costos, de cara a encontrar una forma de realizar una trazabilidad a las canibalizaciones realizadas. Por lo tanto, el objetivo de este modelo es representar un sistema multi unidad que interactúe con un sistema de mantenimiento permitiendo realizar una trazabilidad individual y global del sistema para tomar decisiones sobre la gestión del mantenimiento en condiciones de entornos aleatorio. Se espera que el modelo permita evaluar distintos indicadores tales como el MTTR y el MTBF, así como la disponibilidad operacional, indicadores que la bibliografía muestra como necesarios para medir el desempeño de un sistema. Por último, el modelo pretende dar respuesta acerca de tomar decisiones sobre aplicar canibalización o no y en qué condiciones su impacto es mejor.

3.2.1. Desarrollo de los componentes del modelo.

La arquitectura básica del modelo tiene dos componentes principales, por un lado, se modelan los aspectos operativos y por otro los administrativos. La Figura 3.2 muestra, el desarrollo de esta idea mediante un diagrama de bloques.

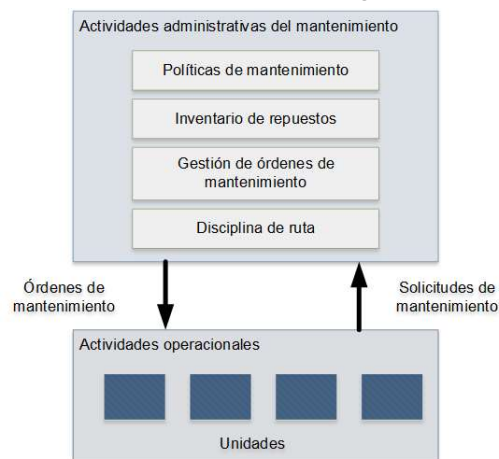


Figura 3.2. Diagrama de bloques del modelo

3.2.2. Creación de unidades

Como se presentó en secciones anteriores, una flota está compuesta por un conjunto de unidades iguales e independientes. Una unidad, por lo tanto, es un sistema multi componente y está compuesta por un conjunto de módulos, submódulos y componentes (*Indenture*). Estos elementos interactúan físicamente de acuerdo con la arquitectura de componentes que puede ser serie o paralelas o mixtas. Por lo tanto, la base para comenzar el modelo de una unidad, es mediante una jerar-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

quía entre los componentes de la unidad, este arreglo jerárquico es mostrado en la Figura 3.3.

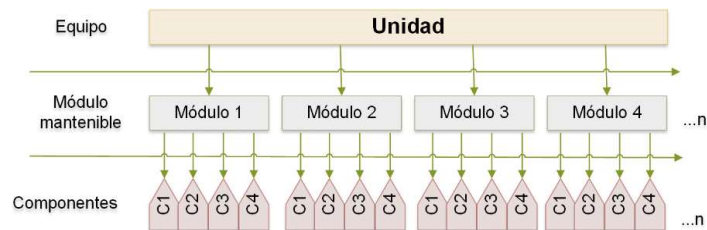


Figura 3.3. Jerarquía de componentes de una unidad

Esta jerarquía plantea una alta flexibilidad para definir la arquitectura de una unidad, permitiendo representar configuraciones serie, paralelo y serie paralelo, con un número n de componentes. De igual manera, de acuerdo a la complejidad se pueden modificar la cantidad de niveles para representar más atómicamente un comportamiento deseado y de igual manera las relaciones que entre componentes se presentan. Posteriormente, se definen las relaciones entre componentes mediante un diagrama de bloques función (Bertsche, 2008) como se muestra en la Figura 3.4. En este diagrama se presentan cuatro componentes C1, C2, C3, C4, acomodados así: C4 presenta una conexión de perno con la carcasa (BC), luego se tiene una unión de eje con dado (SH), entre los componentes C4 y C1, También hay un contacto por dientes (TC) entre los componentes C1 y C2, y por último C3 tiene una relación de eje con dado (SH) con el componente C2 y la carcasa.

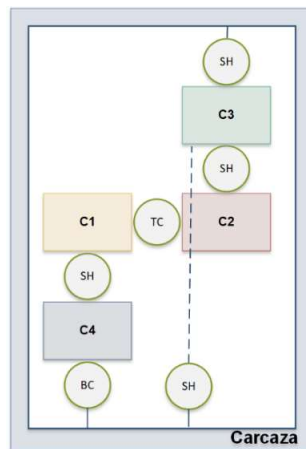


Figura 3.4. Diagrama de bloques funcional

Esta es una organización arbitraria que puede variar de acuerdo a la arquitectura de la unidad y solo representa un conjunto de relaciones que pueden existir en un módulo o submódulo. El diagrama de bloques presentado en la Figura 3.5 define la relación de componentes como una serie, en este caso la fiabilidad del sistema está dado por la Ecuación 3.1.

$$R_{sistema} = R_{C1} * R_{C2} * R_{C3} * ... * R_{Cn} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

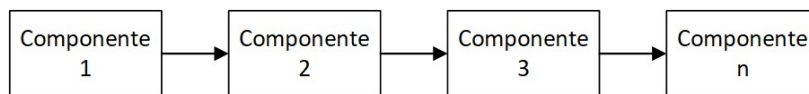


Figura 3.5. Estructura serie de componentes

3.2.3. Modelo de componente

Con la arquitectura y relaciones definidas se crea el modelo dinámico de un componente mediante una red de Petri temporizada y estocástica, como se muestra en la Figura 3.6. En ella se indican todos los estados que tendrá el comportamiento de un componente.

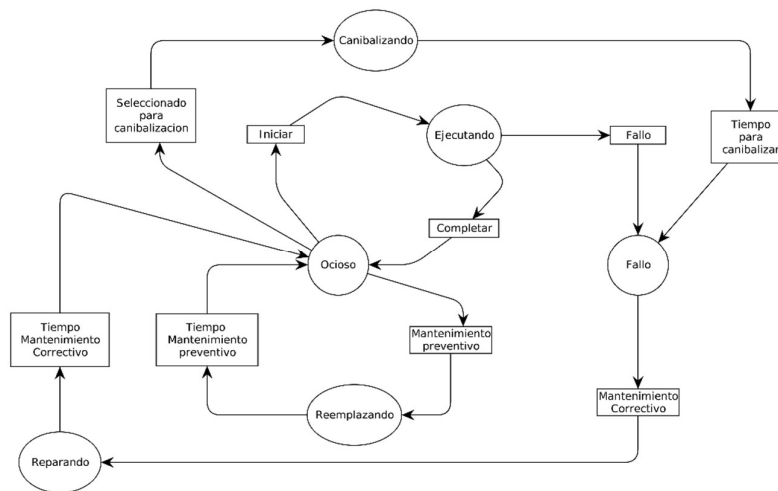


Figura 3.6. Red de Petri de un componente

La explicación de los estados es realizada en la Tabla 3.1 y las transiciones en la Tabla 3.2.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 3.1. Estados del modelo de componente.

Estados	Observaciones
Ocioso	Componente listo y libre de fallo. Solo en este estado puede estar un componente para que pueda ser canibalizado
Ejecutando	Componente participando de una misión
Fallo	Componente está en fallo
Reemplazando	Componente bajo una política de mantenimiento preventivo
Reparando	Componente bajo una política de mantenimiento correctivo
Canibalizando	Componente seleccionado para intercambio

Tabla 3.2. Transiciones del modelo de componente.

Transiciones	Tipo	Observaciones
Iniciar	Señal	Componente es activado (Unidad en misión)
Completar	Señal	Componente es desactivado
Fallo	Estocástica	Evento aleatorio generado de una distribución de Weibull de tres parámetros indicando un fallo.
Mantenimiento Preventivo	Señal	Componente será cambiado por mantenimiento preventivo
Mantenimiento Correctivo	Señal	Componente será cambiado por mantenimiento correctivo o canibalización.
Seleccionado Para canibalización	Señal	El componente es seleccionado para ser donado a otra unidad por canibalización.
Tiempo de Mantenimiento preventivo	Temporizada	Representa el tiempo que a un operador le toma aplicar una política de mantenimiento preventivo a uno o a un conjunto de componentes.
Tiempo de Mantenimiento Correctivo	Temporizada	Representa el tiempo que a un operador le toma aplicar una política de mantenimiento correctivo a uno o a un conjunto de componentes.
Tiempo para canibalizar	Temporizada	Representa el tiempo que le toma a un operador realizar una canibalización (Solo indica el tiempo de desinstalación)

3.2.4. Modelo de módulo

Un módulo es una agrupación de componentes para desarrollar una tarea específica de un sistema mayor. En una arquitectura de componentes los módulos pueden crear su propia jerarquía mediante módulos y submódulos. Sin embargo, un módulo depende del grupo de componentes asociados y su estado.

Por ello la red de Petri generalizada definida para el módulo es creado bajo esta dependencia de los estados de los componentes como se muestra en la Figura 3.7. Siendo $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ los componentes que integran el módulo. El alcance de un estado se logra mediante una agrupación lógica de los estados de los componentes, esto permite integrar el comportamiento de cada componente dentro del estado del módulo. Por otro lado, la interacción entre módulos también se definió mediante la arquitectura serie presentada en la Figura 3.8, pero el modelo permite de manera flexible acomodar estructuras paralelas o serie-paralela.

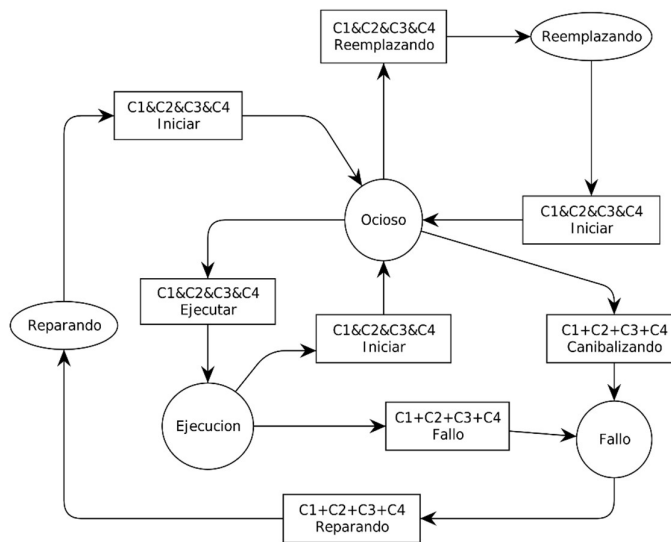


Figura 3.7. Red de Petri de un módulo

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

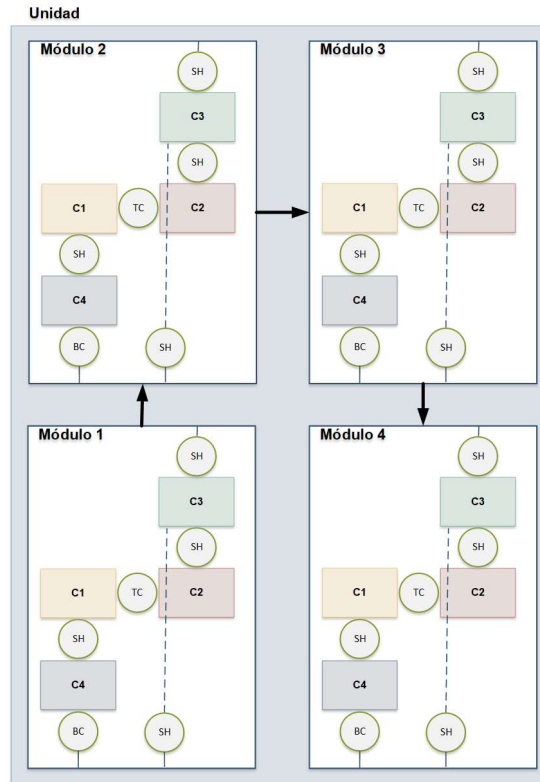


Figura 3.8. Arquitectura de módulos en una unidad

Por último, se explican los estados de la red en la Tabla 3.3 y las transiciones se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Estados del modelo de módulo.

Estados	Observaciones
Ocioso	Indica que todos los componentes en un módulo están listo y libre de fallo.
Ejecución	Indica que todos los componentes en un módulo están en estado ejecutando.
Fallo	Indica el fallo de uno o más componentes.

Estados	Observaciones
Reemplazando	Indica que uno o más componentes están bajo una política de mantenimiento preventivo. La operación lógica para esta transición, depende de la arquitectura de componentes subyacente.
Reparando	Indica que uno o más componentes están bajo una política de mantenimiento correctivo

Tabla 3.4. Transiciones del modelo de módulo.

Transiciones	Tipo	Observaciones
Iniciar	Señal	Señal generada cuando todos los componentes del módulo están listos.
Ejecutar	Señal	Señal generada cuando todos los componentes del módulo están en ejecución.
Fallo	Señal	Señal generada cuando uno o varios componentes ha fallado
Canibalizando	Señal	Señal generada cuando uno o varios componentes han sido seleccionados para canibalización
Reemplazando	Señal	Señal que uno o varios componentes serán reemplazados por política de mantenimiento preventivo.
Reparando	Señal	Señal que uno o varios componentes serán reemplazados por fallo con una política de mantenimiento correctivo.

3.2.5. Modelo de unidad

El modelo de la unidad está caracterizado por el comportamiento de los módulos, submódulos y componentes, esta característica permite definir que una unidad hereda todas las características de cada una de las partes que la integran y que la unidad se puede considerar como la interfaz de interacción entre el entorno y el conjunto de módulos, submódulos que componen la unidad.

La Figura 3.9 muestra la red de Petri generalizada propuesta para representar la unidad, como se puede observar las transiciones serán una operación lógica del estado de los módulos que compongan la unidad y que representan la dependencia de esta con cada uno de los módulos subyacentes. La explicación de los estados se muestra en la Tabla 3.5 y transiciones son explicados en la Tabla 3.6.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

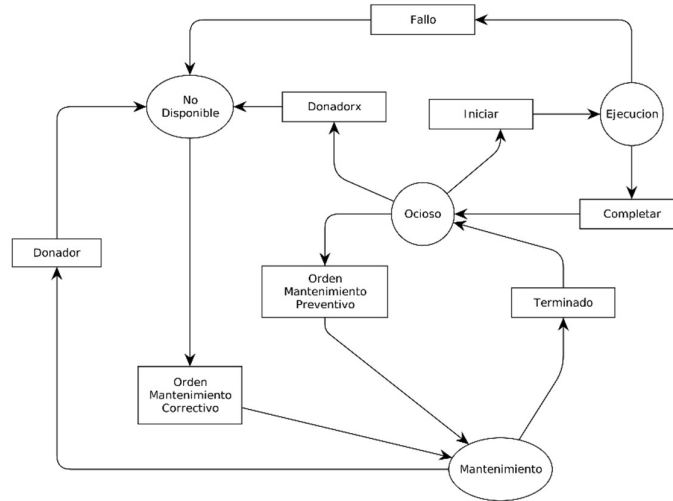


Figura 3.9. Red de Petri de una unidad

Tabla 3.5. Estados del modelo de la unidad.

Estados	Observaciones
Ocioso	La unidad está disponible para realizar una misión.
Ejecución	La unidad está realizando una misión
Mantenimiento	La unidad está en mantenimiento preventivo o correctivo.
No disponible	La unidad no está disponible debido a un fallo en un componente; O la unidad fue seleccionada como donadora, y espera que la orden de mantenimiento se complete.

Tabla 3.6. Transiciones del modelo de unidad

Transiciones	Tipo	Observaciones
Iniciar	Señal	Indica que la unidad comienza una misión.
Completar	Señal	Indica que la unidad terminó una misión.
Fallo	Señal	Indica que la unidad estando en el estado de ejecución un componente entro en fallo.

Donador	Señal	Indica que la unidad se ha seleccionado para donar piezas para canibalización.
Terminado	Señal	Indica que una actividad de mantenimiento ha sido realizada.
Orden de Mantenimiento preventivo	Señal	Indica que la unidad debe pasar a mantenimiento preventivo.
Orden de Mantenimiento correctivo	Señal	Indica que la unidad debe pasar a mantenimiento correctivo.

3.2.6. Modelado de actividades del gestor de mantenimiento.

Un gestor de mantenimiento es una herramienta diseñada para administrar y supervisar las actividades de mantenimiento en una organización. El objetivo principal de un gestor de mantenimiento es optimizar los recursos de mantenimiento de un sistema, asegurando su funcionamiento eficiente, prolongando su vida útil y minimizando los tiempos de inactividad no planificados. Así como proporcionar un medio para registrar, programar y realizar el seguimiento de las tareas de mantenimiento.

Como se indicó en el modelo de la categoría de mantenimiento de operaciones de mantenimiento ISA-95 parte 3, existen un conjunto de actividades encargadas en la gestión del mantenimiento. Funciones tales como *Gestión de los recursos de mantenimiento*, *Recolección de datos de mantenimiento*, y *Ejecución del mantenimiento* son prioritarias en un gestor de mantenimiento. Otras actividades son *despacho del mantenimiento*, *programación detallada del mantenimiento*, estas dos últimas son tratadas en el modelo mediante la gestión de órdenes de mantenimiento.

Otras características comunes que debe tener un sistema de gestión de mantenimiento son mostradas en la Figura 3.10.

Teniendo en cuenta las características mostradas previamente, la Figura 3.11 muestra los casos de uso del sistema de gestión de mantenimiento. El caso de uso Seleccionar políticas el cual representa las acciones que debe realizar el gestor de mantenimiento para elegir la política que aplicará al sistema, puntualmente esta elección será del tipo correctivo, preventivo y correctivo más canibalización.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

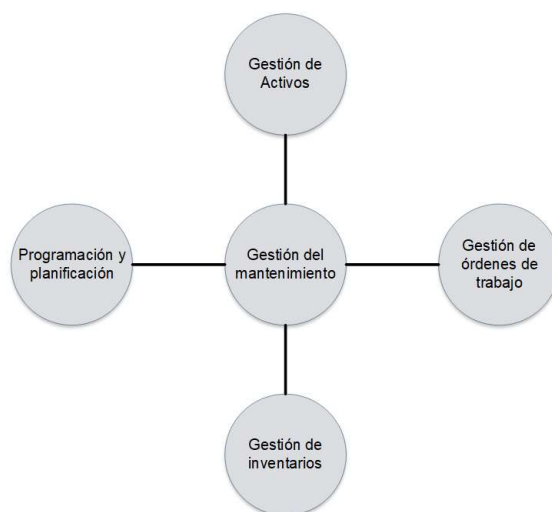


Figura 3.10. Actividades complementarias del gestor de mantenimiento. Fuente: (Ben-Daya et al., 2016)

De igual manera, el caso de uso *gestionar personal* interpreta las elecciones en cuanto a las horas de mantenimiento que se utilizan durante un período, conjugando la cantidad de personas y las horas que cada uno puede aportar. El caso de uso *Gestionar órdenes* toma en cuenta los fallos que se presentan en el sistema y los tiempos de uso para decidir acerca de la gestión de las órdenes de mantenimiento correctivo y preventivo también sobre el calendario para canibalización. El caso de uso *Gestionar almacén* relaciona la decisión del gestor acerca de la política de inventario, cantidad de componentes y tiempo de suministro que debe tener el sistema. Por último, el caso de uso *Aplicar disciplina de ruta*, el gestor no tiene la decisión total sobre estas actividades, pero sí apoya desde el conocimiento de la ruta, como podría ser la utilización del sistema, el número de misiones y las unidades asignadas a la misión.

Una de las funciones cruciales del gestor de mantenimiento es mantener un control riguroso sobre las órdenes de mantenimiento vigentes. Esto es esencial para asegurar la trazabilidad de las unidades que pueden ser canibalizadas y monitorear su estado. Al gestionar adecuadamente el estado de las órdenes de mantenimiento, se puede garantizar que, una vez disponibles los componentes necesarios, las unidades canibalizadas puedan ser reintegradas al servicio. Es importante comprender que algunas de estas unidades pueden haber cedido varios de sus componentes según las necesidades del sistema.

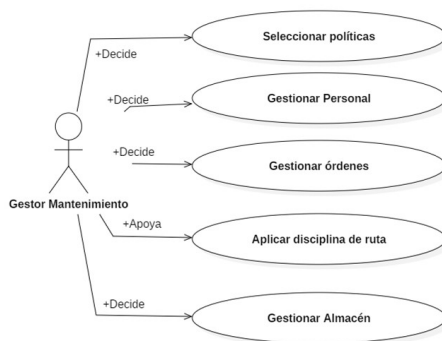


Figura 3.11. Casos de uso de las actividades del gestor de mantenimiento.

La formalización de estas actividades se realiza mediante un modelo de Red de Petri coloreada, el sistema está definido de la siguiente forma.

Tabla 3.7. Definición de los conjuntos color del modelo.

Conjunto color	Ítems	Tipo de conjunto
Componentes	$C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$	Básico
Módulos	$HB_1, HB_2, HB_3, \dots, HB_n$	Básico
Unidades	$B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$	Básico
Tipo de mantenimiento	$TM_1, TM_2, TM_3, \dots, TM_n$	Básico
Personal	$P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$	Básico
Liberación de recursos	$R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$	Básico
Solicitudes de mantenimiento	$C \times HB \times B \times Tm$	Conjunto producto de los conjuntos básicos, componentes, módulos, unidades y tipo de mantenimiento
Órdenes de mantenimiento	$C \times HB \times B \times Tm \times P$	Conjunto producto de los conjuntos básicos, componentes, módulos, unidades, tipo de mantenimiento y personal

La Figura 3.12 muestra la gestión de una orden de mantenimiento que está relacionada con un mantenimiento correctivo, preventivo o la decisión de canibalizar un componente en caso de no estar disponible.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

La gestión de la orden comienza en el lugar P1, si existe una solicitud de mantenimiento correctivo, una marca del tipo solicitud ($C \times HB \times B \times Tm$) se coloca en el lugar P1 después de un evento de solicitud de gestión de mantenimiento sobre T1, orden se gestiona identificando la unidad en mantenimiento que va al lugar P2, el componente que va a P5 y el tipo de mantenimiento y el módulo van a P4 y P3 respectivamente. La disponibilidad del componente se verifica en el lugar P6, pero es posible que el componente no esté disponible. Por lo tanto, la transición temporizada T2 también representa los retrasos logísticos que pueden ocurrir cuando los componentes no están disponibles. Si el componente está disponible, se ubica una marca de componente en el lugar P8 y se asignan recursos para el procesamiento de la solicitud de mantenimiento a través de la disponibilidad de horas de mantenimiento en el lugar P10.

Con los recursos asignados, T7 válida que los recursos asignados están completos para emitir la orden y de ser así agrega una marca del tipo orden de mantenimiento $C \times HB \times B \times Tm \times P$ al lugar P18 y se identifica la marca persona para que cuando termine la orden ingrese nuevamente a disponible esto pasa en el lugar P19, de esta manera se genera una marca de finalización de la gestión de la orden en P20, cuando esto suceda el recurso se libera después que la transición T8 ha sido activada. Cuando no hay ningún componente disponible en el almacén o lugar P6, la transición T5 se puede activar condicionalmente para emitir una posible solicitud de canibalización de un componente en el lugar P7. La transición T5 válida que la unidad que requiere el componente es diferente de las unidades canibalizables en P13. Si se valida como unidades diferentes, la transición T5 se activa y agrega una marca tipo unidad B_n con el identificador de la unidad donadora en P14 y una marca tipo componente C_n a canibalizar en el lugar P15. T6 válida que todos los requisitos de la orden de canibalización se cumplan y se activa generando una orden de mantenimiento para la unidad donadora y una marca tipo componente administrativamente asignable para el almacén o P6.

Finalmente, el planificador de mantenimiento preventivo puede comenzar una orden de mantenimiento agregando marcas en P17, P21 y P22, T9 es activada por la señal de solicitud de mantenimiento y la disponibilidad de personal y componentes. La transición T9 válida que todos los requisitos para la orden estén completos y de ser así se activa y coloca una marca tipo orden de mantenimiento $C \times HB \times B \times Tm \times P$ en P18. El resto del proceso es igual que para una orden de mantenimiento correctivo.

3.2.7. Modelo básico de exploración del gestor de mantenimiento.

Aunque la definición previa permite esbozar las generalidades que se requieran para representar el sistema de gestión de mantenimiento y las unidades, la integración de los dos sistemas aún no está bien definida. Para ello se explora el software *CPNTools* y se describe una HCPN que integre de manera básica las funciones del gestor y la flota. Este modelo fue presentado en el *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, realizado los días 3 y 6 de julio del 2023 en Roma – Italia.

Las HCPN emergen como una herramienta para la conceptualización y comprensión de sistemas de mantenimiento de gran complejidad y magnitud (Jensen & Kristensen, 2009). A través de la aplicación de la definición proporcionada por la Ecuación 2.11 en la Tabla 3.8, se articulan los bloques que implementaran los distintos requerimientos definidos en la sección 3.1.1.1. La HCPN fue desarrollada en el software *CPNTools*, propuesta por el CPN Group en la Universidad Aarhus entre los años 2000 a 2010. Este enfoque, centrado en una HCPN, facilita la interconexión de tres bloques esenciales para la gestión del mantenimiento y la operación de unidades: la disciplina de rutas, que se encarga de asignar rutas específicas a las unidades; el bloque de generación de fallos y la implementación de políticas de mantenimiento, el cual integra una serie de políticas de mantenimiento seleccionadas de la Tabla 2.1 y, finalmente, el bloque de seguimiento del estado de los componentes, que realiza la actualización de los tiempos de uso de los componentes. La descripción de este tipo de sistemas resalta la versatilidad de las HCPN en la representación de la complejidad inherente a los sistemas de mantenimiento, proporcionando una herramienta para la simulación y análisis de aspectos relacionados con el mantenimiento.

Tabla 3.8. Bloques de función del modelo propuesto.

Función	Descripción
Principal	Bloque que contiene las condiciones de entrada a todas las demás funciones del sistema.
Ejecutando	Lanza la ejecución de una ruta en una unidad asignada.
Evaluación de fallo	Función que clasifica la gravedad de un fallo de acuerdo a una función aleatoria.
Históricos de uso	Registro de tiempo de uso de las unidades para la definición de actividades de mantenimiento preventivo.
Uso_x	Contiene los elementos actualizar los tiempos de uso de las unidades.
Convertidor Km_x	Convierte las unidades de tiempo en kilómetros, esto debido

Función	Descripción
	a que en sistemas mecánicos la vida útil de los componentes se aplica en kilómetros.
Contador U_x	Evalúa si a un componente ya se le debe aplicar mantenimiento preventivo.
Inspección_x	Asigna componentes de repuesto a la política de mantenimiento preventivo.
Políticas de mantenimiento	Asigne componentes a la política de mantenimiento preventivo.
Políticas de reparación	Implementar políticas de mantenimiento perfectas e imperfectas

Ahora se requiere la especificación del conjunto color (C) y los dominios de estos conjuntos (C_d). Estos son esenciales para clasificar las variables asociadas a las marcas, permitiendo así una distinción útil de los recursos o representaciones contenidas en cada lugar de la red. Por ende, el concepto de color no solo enriquece la capacidad de diferenciación dentro del modelo, sino que también mejora significativamente la eficiencia en la identificación y gestión de los elementos representados. La Tabla 3.9 detalla estos conjuntos de colores y los dominios de cada uno, junto con las variables empleadas.

Tabla 3.9. Definición del conjunto color.

Conjunto color	Dominio	Variable	Descripción
Unidades	B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8...Bn	x	Representa las unidades que componen el sistema.
Rutas	D1, D2, D3, D4, ...Dn	y	Representa el conjunto de rutas que cubre el sistema.
Componentes	C1, C2, C3, ...Cn	w	Representa los tipos de componentes que hacen parte del stock de piezas.
INT	Número entero	m	Cuenta los pasos como una unidad a modo de obtener una representación del tiempo de uso.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Disciplina	Unidades *Rutas	(x,y)	Conjunto resultado del producto de los conjuntos, unidades y rutas. Representa las órdenes de trabajo para asignar una ruta a una unidad.
Daño	Unidades * Componentes	(x,w)	Conjunto resultado del producto de los conjuntos, unidades y componentes. Representa el evento de fallo sufrido por una unidad en servicio.
Severidad	Bajo, Medio, grave	s	Representa le grado de severidad de un fallo presentado por una unidad.
Tipo	Unidades * Severidad	(x,s)	Conjunto resultado del producto de los conjuntos, unidades y severidad. Representa la evaluación de severidad en la inspección del fallo presentado por una unidad.
Uso	INT* Unidades	(m,x)	Conjunto resultado del producto de los conjuntos entero y unidades. Representa el tiempo de uso de una unidad durante el servicio.
Función Evaluar Severidad	Esta función genera un evento aleatorio para definir la gravedad de un fallo.		
Función Tiempo fallo	Esta función genera un evento aleatorio de falla a partir de una distribución de Weibull de parámetros conocidos del sistema		

Las redes de Petri coloreadas permiten aplicar funciones de distribución como eventos de disparo, en el modelo algunas transiciones dependen para su evolución de funciones de distribución. Estas se implementan para insertar en el modelo el tiempo estimado que podría requerirse para completar una actividad específica. Para simplificar la aplicación del modelo, se optó por utilizar distribuciones uniformes. Esta elección permite una estimación equilibrada del tiempo, asumiendo una probabilidad constante a lo largo de un intervalo definido. Los parámetros aplicados a las funciones de las rutas fueron identificados mediante la utilización de

Google Maps. Por otro lado, los parámetros restantes fueron tomados mediante observaciones y toma de tiempos en un taller mecánico que presta servicios tercerizados a una empresa de transporte local, los parámetros de las funciones de distribución expresados en horas, son mostrados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Definición de funciones para las transiciones.

T	Función de distribución	Descripción
T1	Uniforme (12.0,16.0)	Tiempo de ruta D1
T2	Uniforme (16.0,20.0)	Tiempo de ruta D2
T3	Uniforme (20.0,24.0)	Tiempo de ruta D3
T4	Uniforme (14.0,18.0)	Tiempo de ruta D4
T5	Uniforme (5.0,7.0)	Tiempo de ruta D5
T6	Weibull ($\alpha=1.184$, $\lambda=996.9$)	Función de fallo en componentes
T7	Uniforme (1.0,3.0)	Tiempo de reparación mínima.
T8	Uniforme (1.0,3.0)	Prueba de funcionalidad
T9	Uniforme (1.0,2.0)	Tipo de severidad
T10	Uniforme (7.0,9.0)	Tiempo de reparación imperfecta
T11	Uniforme (12.0,14.0)	Tiempo de reparación perfecta
T12	Uniforme (1.0,2.0)	Tiempo de revisión C1
T13	Uniforme (1.0,2.0)	Tiempo de revisión C2
T14	Uniforme (2.0,5.0)	Tiempo de revisión C3
T15	Uniforme (4.0,6.0)	Mantenimiento preventivo
T16	Uniforme (1.0,3.0)	Prueba de funcionalidad

A continuación, se describen los bloques del modelo propuestos, representados mediante redes de Petri coloreadas.

3.2.7.1. Bloque para la ejecución de las rutas

La HCPN implementada que representa la operación del sistema se muestra en la Figura 3.13. Los estados iniciales son *Rutas*, que contiene las marcas del conjunto color *Rutas* y representa los recorridos necesarios para cumplir el objetivo de la flota. El otro estado es *Unidades*, que contiene las marcas del conjunto color *Unidades*, que representa los activos disponibles para asignar una ruta.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

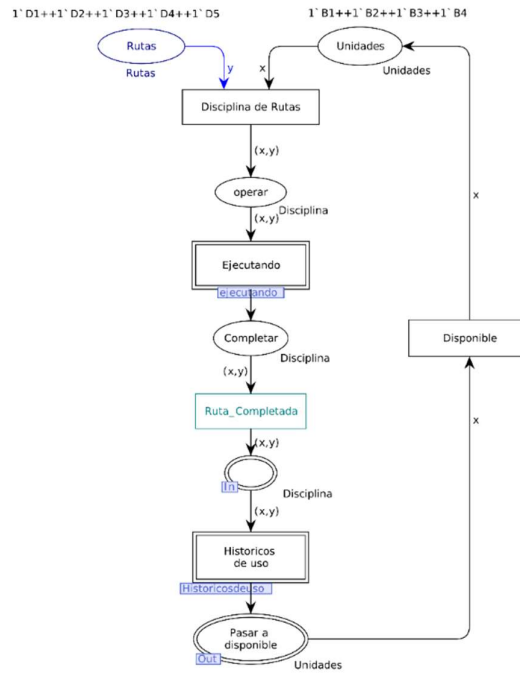


Figura 3.13. Modelo CPN de la operación del sistema

Al asignar una ruta a una unidad, se aplica la *disciplina de ruta*, marcando el inicio de un evento logístico caracterizado por la asignación de rutas específicas a las unidades. Este proceso induce una evolución del sistema hacia el estado de *operar*, momento en el cual la unidad comienza la ejecución de su ruta designada. La funcionalidad integral de la ruta se encapsula y se describe a través de la transición denominada *Ejecutando*, representando el tiempo que dura esta operación. En esta transición de sustitución, el sistema puede evolucionar a dos estados: si la ruta se completa, evoluciona al estado de *completar*, y una transición *Ruta_Completada*, se activa para que una unidad retorne a un estado disponible después de registrar esta tarea en la transición de sustitución *Historicos de uso*, a través de la transición disponible. La segunda opción es que la unidad presente un fallo durante la ejecución y la unidad pasa a mantenimiento.

Ahora se describirá la transición de sustitución *Ejecutando* en la Figura 3.14 que representa el tiempo empleado para realizar una ruta. Cuando hay un token presente en el lugar de entrada *Operar*, la transición *Generar Fallo*, es activada. Por otro lado, la función *TiempoFallo* genera números aleatorios derivados de una distribución de Weibull, esta función es descrita en *CPNTools* de la siguiente forma:

```

fun TiempoFallo(alfa: real,lamda:real) =
  let
    val rv = weibull(alfa,lamda)
  in
    floor (rv)
  end;

```

Una unidad entra en fallo si el valor generado es mayor al tiempo mínimo de fallo de una unidad, y la comparación de dos números aleatorios cumple condición del arco $f2 < f1$, si el fallo se concreta la unidad se declara en fallo y espera un tiempo para ser llevada al taller mediante la transición *Tiempo_Translado*, después de extraer una marca del lugar *RutaNoCompletada*. Si el fallo no se concreta, la unidad completa la ruta asignada y coloca una marca en el lugar *Completar*.

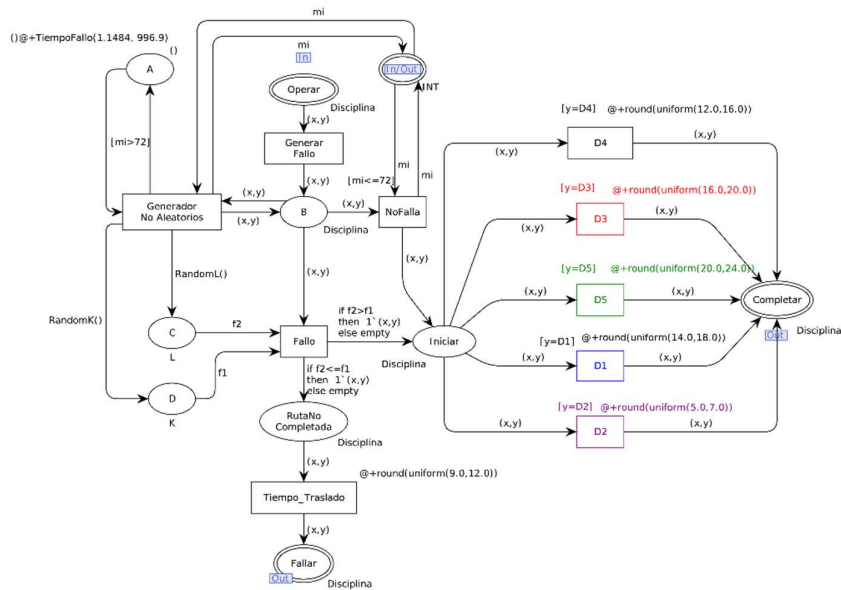


Figura 3.14. Transición de sustitución Ejecutando

3.2.7.2. Bloque de históricos

Una de las políticas más usuales utilizadas para implementar el mantenimiento preventivo es la política basada en tiempo de uso. Este proceso se apoya en los datos históricos para determinar los momentos adecuados para reemplazar ciertos

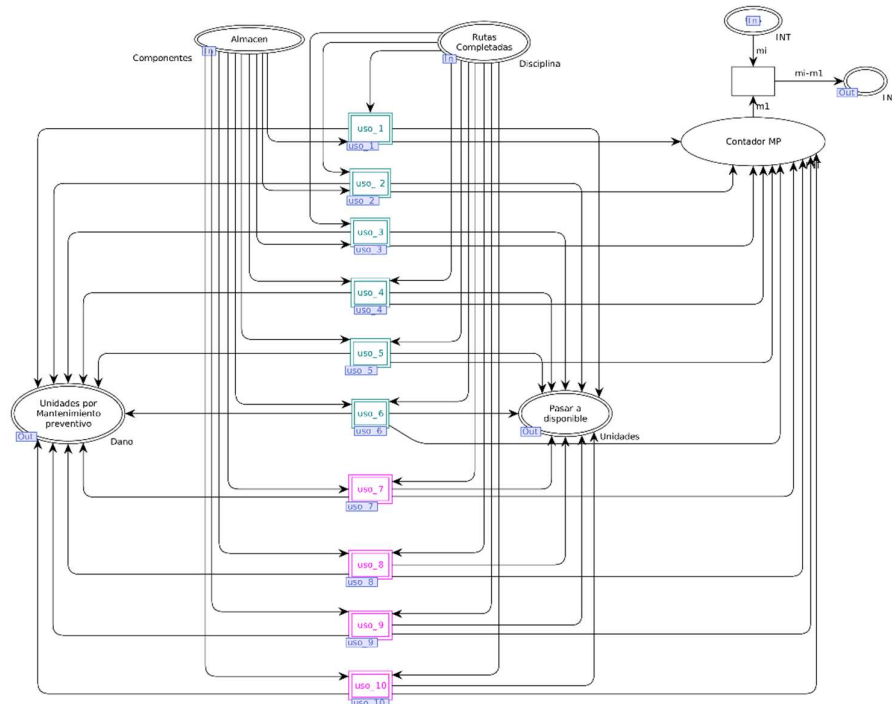


Figura 3.16. Históricos de uso

La Figura 3.17 Muestra el desarrollo de la transición de sustitución Use_x , la finalidad es actualizar los intervalos de uso de los componentes de las unidades para llevar un registro de uso de cada componente y así proponer un mantenimiento preventivo.

La transición se inicia cuando hay un token en el lugar *Rutas Completadas*, allí la transición de sustitución *Conversión a Km_x* realiza una conversión de unidades de tiempo a kilómetros para así comparar con el umbral de mantenimiento, esto se realiza en la transición de sustitución *Contador U_x* , donde se compara el valor de uso con el valor umbral. En esta transición se puede derivar en que no se haya cumplido el umbral y, por lo tanto, no sea necesario un mantenimiento preventivo, y que hará que la unidad pase a disponible después del chequeo mediante la transición *Regresar a disponible*. Por otro lado, si el umbral ha sido excedido se activa la transición *Asignación de Recursos* y se ubica un token en el lugar *Inspeccionar* activando la transición de sustitución *Inspección x* , esto genera una inspección sobre cuál es el componente a mantener y su posible mantenimiento preventivo.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

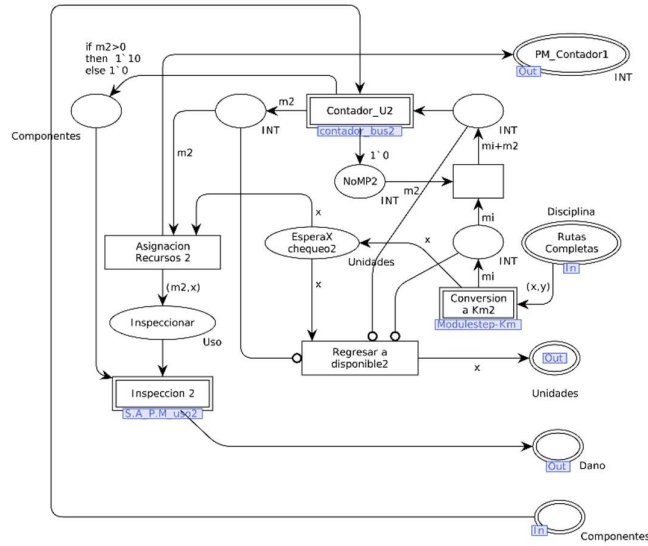


Figura 3.17. Transición de sustitución Use_x

De acuerdo con la información recolectada en talleres locales, la manera como se puede interpretar el tiempo de uso de un sistema, cuando no es posible medirlo, es inferirlo mediante la distancia recorrida, de esta manera se encuentra un mejor punto para tomar la decisión de llevar o no una unidad a mantenimiento preventivo. Para incluir esta característica se desarrolla la transición de sustitución *Conversión a Km_x*. Esta transición cuenta los pasos que realiza CPNTools por esta transición y los convierte a una unidad en kilómetros, la Figura 3.18 muestra la red que sustenta esta funcionalidad.

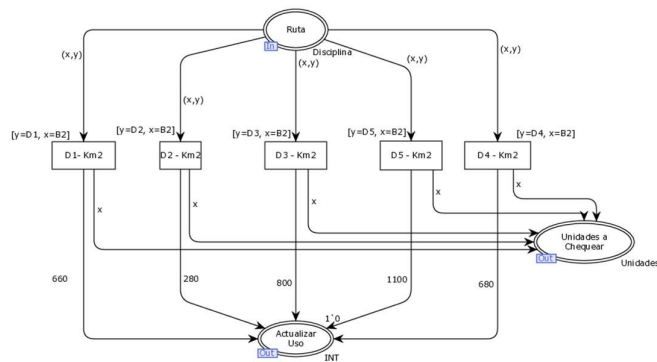


Figura 3.18. Transición de sustitución Conversión a Km_x

De manera similar, la transición de sustitución denominada *Contador U_x*, que se muestra en la Figura 3.19, compara y actualiza el uso en kilómetros después que una unidad ha terminado una ruta. Para ello se definieron los intervalos en los cuales un componente está en un umbral para mantenimiento preventivo. Las transiciones *Uso C1_Bx*, *C2_Bx* y *C3_Bx*, tienen en los pesos de los arcos de entrada los históricos de uso de cada componente en cada unidad, estos son comparados con las guardas que tiene cada una de estas transiciones y que representan los intervalos que por manual de usuario se indica como umbral de cambio o mantenimiento preventivo. Si no se requiere el mantenimiento la unidad se libera, de lo contrario pasará a una inspección.

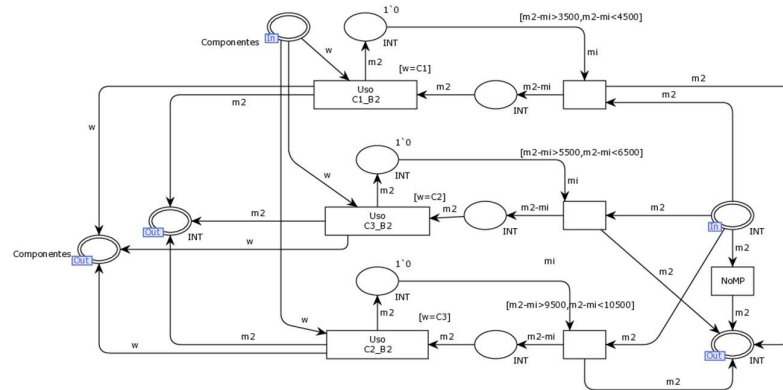


Figura 3.19. Transición de sustitución Contador U_x

La aplicación de políticas de mantenimiento preventivo se realiza a partir de inspecciones, en el cual, mediante el seguimiento de los tiempos de uso, se define de acuerdo al umbral qué elementos necesitan atención. La Figura 3.20, muestra la función de *Revisión* el cual evalúa el uso de los componentes e identifica el componente a ser cambiado y crear la orden de mantenimiento por el puerto de salida *Realizar Mantenimiento*, en este mismo bloque se gestionan los componentes requeridos desde el *Almacén* y se genera una orden que pasa a la transición de sustitución *política de mantenimiento* donde se realiza la labor de mantenimiento.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

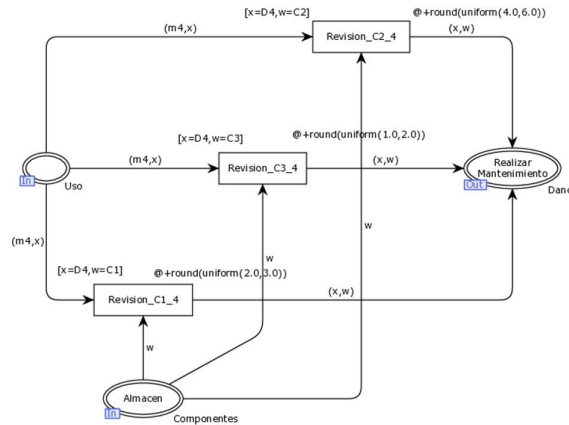


Figura 3.20. Transición de sustitución Revisión_x

3.2.7.3. Bloque de mantenimiento

Como se verificó en la Tabla 2.1, existe una gran cantidad de políticas de mantenimiento que pueden ser aplicadas a sistemas de flotas, en este bloque se han seleccionado tres políticas de mantenimiento para interactuar con las unidades, mediante el gestor de mantenimiento. La Tabla 3.11 muestra las políticas utilizadas.

Tabla 3.11 Conjunto de políticas de mantenimiento aplicadas al sistema.

Código	Tipo	Descripción
Rm	Correctivo	Política de mantenimiento de reparación mínima
Imp	Correctivo	Política de mantenimiento imperfecta.
Uso	Preventivo	Política de mantenimiento basada en uso
Imp_Uso	Correctivo + preventivo	Política de mantenimiento imperfecta junto con basada en uso
Rm_Uso	Correctivo + preventivo	Política de reparación mínima junto con política de mantenimiento basada en uso
Rm_Imp_Uso	Correctivo + preventivo	Todas las políticas de mantenimiento
Rm_Imp	Correctivo	Políticas de reparación mínima y mantenimiento imperfecto

Las acciones de mantenimiento correctivo inician debido a un fallo durante la operación de una unidad ejecutando una ruta y la transición de sustitución *Ejecu-*

tando coloca una marca en el lugar *Fallar*. La transición *fallo en ruta* libera la ruta no completada y coloca un token de unidad en el lugar *Evaluar*. Esto activa la transición de sustitución *Evaluando Fallo*, para definir la severidad del fallo y establecer si se requiere un cambio de componente. Con lo anterior se determina la política más adecuada en la transición de sustitución Políticas Mantenimiento que implementa las políticas descritas en la Tabla 3.11 esta secuencia se muestra en la Figura 3.21. Después de realizado el mantenimiento la unidad se traslada para quedar nuevamente disponible en el lugar *unidades*.

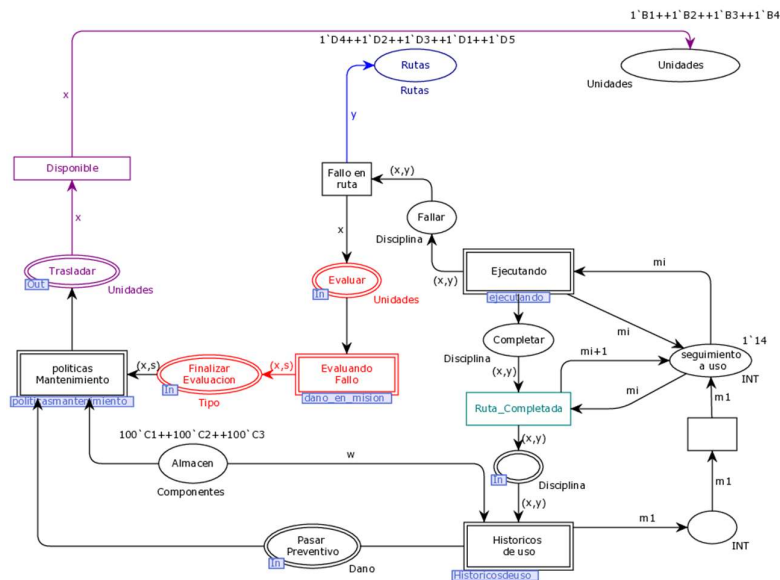


Figura 3.21. Red HCPN para el bloque de mantenimiento

La transición de sustitución *Evaluando Fallo* permite identificar la gravedad del fallo a través de la Función *EvaluarSeveridad*, mostrada a continuación:

```

fun EvaluarSeveridad (a: real, b: real) =
  let
    val ru = uniform(a,b)
  in
    floor (ru)
  end;
  
```

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Los fallos se clasificaron en tres niveles de severidad: alto, medio y bajo. Los fallos de severidad alta y media son considerados catastróficos y generalmente requieren un cambio de componente. Por otro lado, un fallo de severidad baja se considera un fallo inminente y solo necesita un ajuste mínimo según la clasificación mostrada en la Figura 2.3, la descripción de la función de transición se muestra en la Figura 3.22.

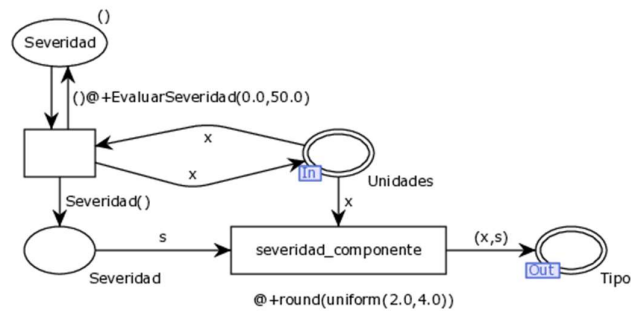


Figura 3.22. Transición de sustitución Evaluando Fallo

La transición de sustitución *Políticas mantenimiento* contiene el conjunto de políticas disponibles del gestor para aplicar a las unidades, la cantidad de políticas se define a partir de las necesidades de mantenimiento del sistema. La Figura 3.23 muestra el procedimiento para aplicar distintas políticas de mantenimiento de acuerdo a la severidad del fallo.

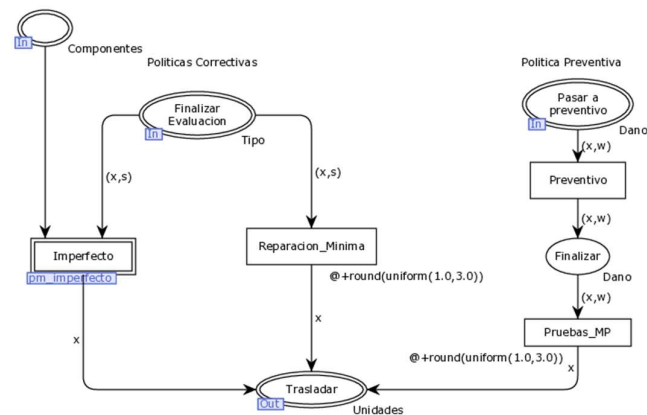


Figura 3.23. Transición de sustitución Políticas Mantenimiento

Finalmente, en la transición de sustitución pm_imperfecto se implementa la política mantenimiento imperfecto. En casos de severidad alta o media, se aplica una estrategia de reparación perfecta debido al cambio del componente, si la evaluación del componente es baja se aplica una política de mantenimiento imperfecto, ya que solo se ajusta mínimamente el sistema. La diferencia entre estas políticas se acentúa en el tiempo de pruebas después del cambio del componente, siendo mayor cuando el componente es más crítico y la severidad es alta, el desarrollo de esta transición se muestra en la Figura 3.24.

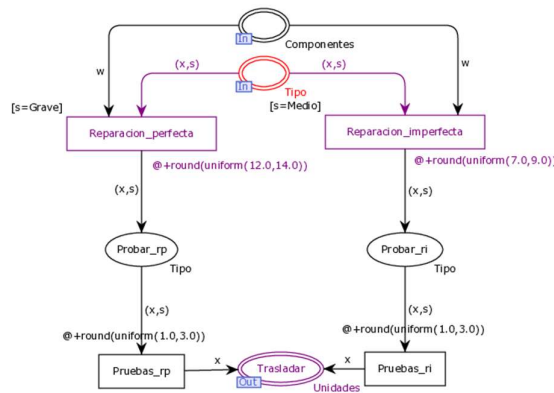


Figura 3.24. Transición de sustitución mantenimiento imperfecto

3.2.8. Validación del modelo.

Aunque existen numerosos programas de software RAM en el mercado, como ReliaSoft BlockSim de ReliaSoft, Simcenter de Siemens, e ITEM ToolKit de ITEM Software, para esta validación se ha utilizado RAPTOR, desarrollado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, para realizar análisis RAM mediante bloques de confiabilidad.

El procedimiento de validación se llevó a cabo comparando el consumo de componentes para una política de mantenimiento correctivo de reparación mínima, que implica el cambio de componente. Para ello, el modelo en CPN Tools fue configurado para que una sola unidad desarrollara todo el proceso de asignación de rutas y fallos durante la operación. Cada unidad en el modelo está compuesta por tres componentes en serie, cada uno con la misma tasa de fallos asignada mediante una distribución de Weibull, como se muestra en la Tabla 3.10, y distribuciones de reparación específicas para cada componente (C1, C2, C3), también indicadas en la tabla. En la prueba con CPN Tools se aplicaron 150 rutas que la unidad debía

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

completar, simulando hasta que la demanda de rutas se agotara. Este proceso se repitió 20 veces y se calcularon las medias de componentes consumidos y fallos. Posteriormente, con la media de fallos de cada muestra, se configuró en RAPTOR una representación de la unidad mediante bloques de confiabilidad, como se muestra en la Figura 3.25.

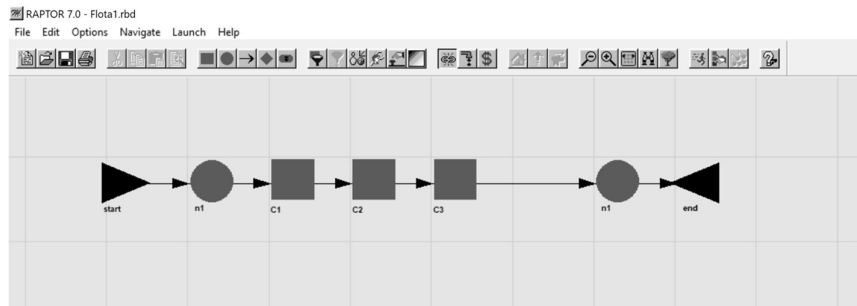


Figura 3.25 Diagrama de bloques de confiabilidad en RAPTOR

Se configuraron en RAPTOR las mismas distribuciones de fallos y de reparación de componentes que en CPN Tools, tal como se indican en la Tabla 3.10. Posteriormente, se desarrolló una simulación en RAPTOR utilizando los valores de fallos obtenidos en las simulaciones previas con CPN Tools como base. Se realizaron 20 simulaciones para cada una de las 20 muestras. Los resultados de componentes consumidos se muestran en la Figura 3.26 (componente C1), Figura 3.27 (componente C2) y Figura 3.28 (componente C3).

En la Figura 3.26, se puede observar en el eje x el número de muestras tomadas y en el eje y el número de componentes consumidos. La línea gris y azul muestra los valores máximos y mínimos de cada simulación, y la línea naranja presenta el valor medio. Estas medidas fueron obtenidas de RAPTOR. Por otro lado, la línea amarilla muestra el consumo de componentes obtenido de CPN Tools. Esta misma explicación se aplica para las Figura 3.27 y Figura 3.28.

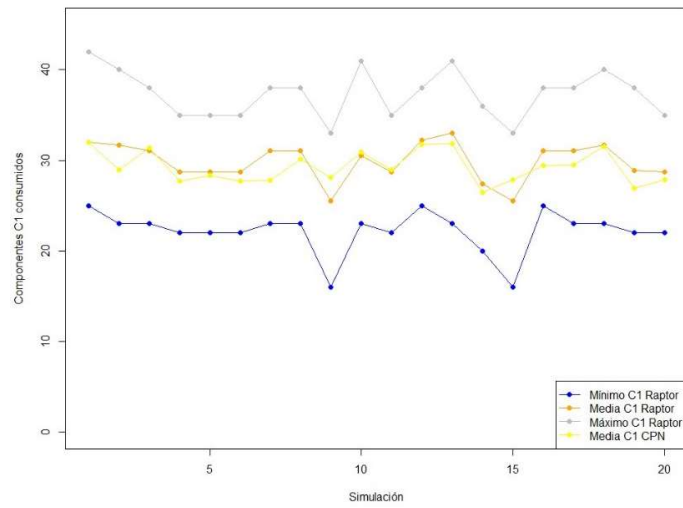


Figura 3.26 Comparación componentes consumidos C1

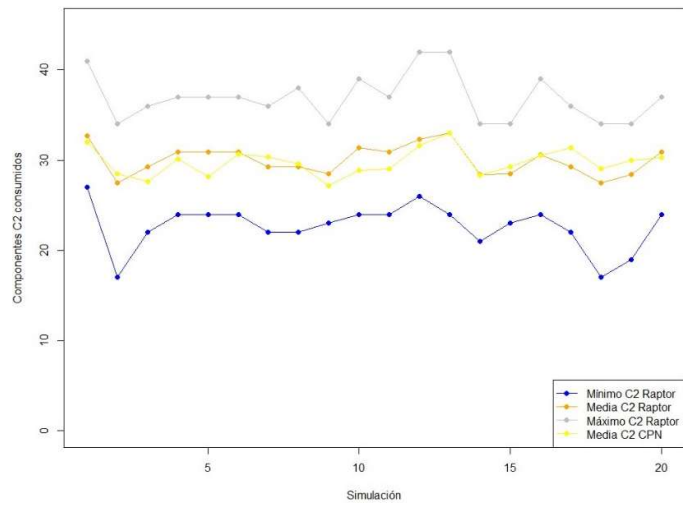


Figura 3.27 Comparación componentes consumidos C2

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

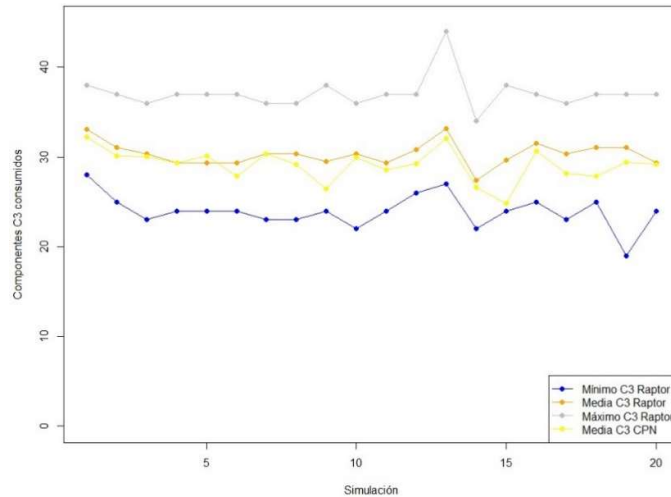


Figura 3.28 Comparación componentes consumidos C3

Como se puede observar, no existe una diferencia apreciable en el consumo de componentes entre CPN Tools y RAPTOR, para confirmar esta observación cualitativa, se calculó el error cuadrático medio para los valores de los componentes. El resultado arrojó un valor de 0.25%, 0.19% y 0.016% para los componentes C1, C2 y C3 consumidos respectivamente, lo cual valida el consumo de componentes y la tasa de fallos. Sin embargo, medidas como la disponibilidad no lograron ser comparadas entre los dos simuladores por las razones mostradas a continuación.

- Existen pausas durante las cuales la unidad está en modo ocioso, y los componentes no están activos ni consumiendo tiempo de vida.
- El carácter de flota con enrutamiento implica que cada unidad es un ente individual afiliado a la flota solo por el objetivo común, característica que no fue posible replicar en RAPTOR.
- CPN Tools no tiene una unidad de tiempo definida que permita medir y comparar los tiempos de uso de una unidad. La medida del tiempo en el modelo se hizo mediante guardas en las transiciones, pero como una función de conteo y no del tiempo de simulación.

De este modo, el modelo ha sido validado en cuanto a la logística del sistema y la tasa de fallos. Sin embargo, variables como el tiempo y la disponibilidad se dejarán para trabajos futuros, con el objetivo de completar la validación del simulador en el ámbito temporal.

3.2.9. Experimentación con la HCPN

La HCPN fue utilizada para representar una flota de autobuses con enrutamiento que presta un servicio intermunicipal en Popayán, Colombia. La flota consta de 12 buses tipo colectivo, con capacidades que varían de 20 a 30 pasajeros, las rutas conectan Popayán con cinco ciudades distintas. Cada autobús realiza al menos una ruta diaria, sumando aproximadamente 300 operaciones mensuales. En cuanto a las prácticas de mantenimiento consultadas, la flota adopta estrategias de reparaciones mínimas e imperfectas la mayor cantidad del tiempo, reservando el mantenimiento preventivo para circunstancias excepcionales.

Para el desarrollo de las pruebas se plantearon dos escenarios: en el primero la variable de entrada que se modifica es la cantidad de rutas a cubrir (Demanda), la variación en la demanda es muy común en estos sistemas dado su estacionalidad en ciertas temporadas del año. En el segundo escenario la variable de entrada modificada es el tamaño de la flota (Capacidad), este hecho se fundamenta en que en la visita al taller se encuentra que el factor humano y el método de conducción limita bastante la operabilidad de las unidades, otros factores como el envejecimiento, el mantenimiento programado, los accidentes, cambian continuamente la disponibilidad de las unidades. En los dos escenarios la variable de salida es la tasa de disponibilidad operacional, este indicador como se mostró en el capítulo anterior es un cociente entre el tiempo que las unidades están disponibles y el tiempo de no disponibilidad de ellas.

3.2.9.1. Escenario 1. Variación en la demanda.

El objetivo de este escenario es observar cómo se comporta la tasa de disponibilidad cuando se varía la demanda del sistema. La variable de entrada es la demanda, las políticas de mantenimiento, la disciplina de ruta. Para este escenario se seleccionó un tamaño de flota fijo de 12 unidades este número se toma del caso de estudio, el número de rutas varió de 50 a 500, el modelo se ejecuta hasta completar el total de rutas. La cantidad inicial de componentes es de 100 unidades para C1, C2 y C3, todas las unidades están disponibles y el sistema cubre cinco rutas definidas sus distancias mediante Google Maps. La hipótesis plantea que, a mayor cantidad de rutas por cubrir, la tasa de disponibilidad se puede ver afectada. Esta tasa se evalúa para las combinaciones mostradas en la Tabla 3.11, Los resultados son mostrados en la Figura 3.29.

El consumo de componentes para cada una de las políticas y sus combinaciones, cuando varía la demanda, se muestra en la Figura 3.30. Como se puede inferir, las políticas que incluyen mantenimiento preventivo (Rm_Uso, Rm_Imp_Uso, Uso) son más intensivas en el consumo de componentes en comparación con aquellas que solo aplican políticas de mantenimiento correctivo.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

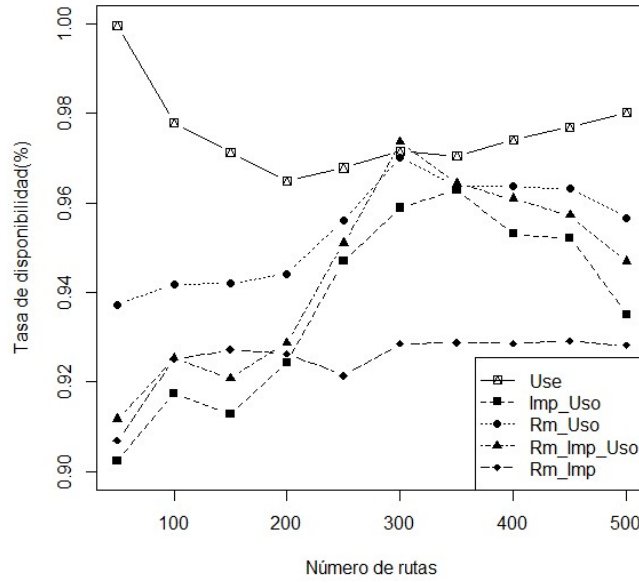


Figura 3.29. Tasa de disponibilidad con variación de la demanda

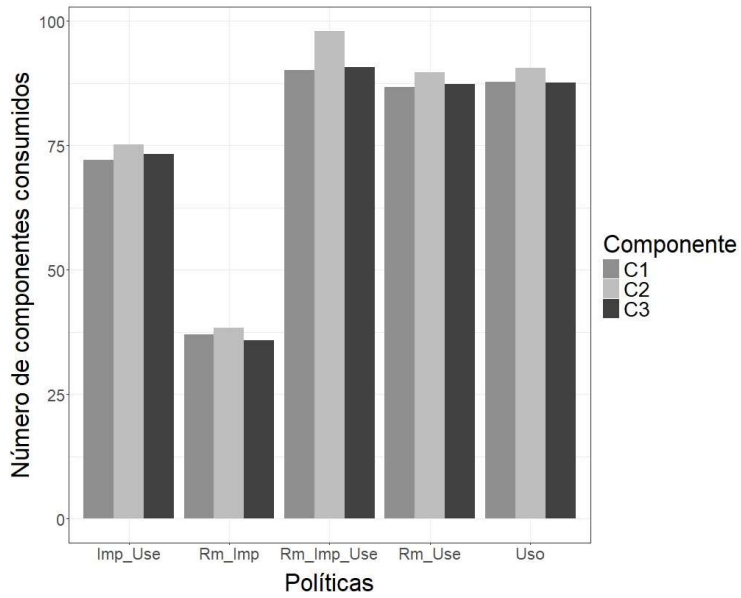


Figura 3.30. Consumo de componentes ante cambios en la demanda

3.2.9.2. Escenario 2. Variación en la capacidad.

El objetivo de este escenario es observar el comportamiento de la disponibilidad a cambios en el tamaño de la cantidad de unidades disponibles. Las variables de entrada son el número de unidades y las políticas de mantenimiento. La hipótesis plantea que, si se aumenta la cantidad de unidades disponibles, la tasa de disponibilidad tiene a incrementar su valor. Se fija un número de 360 rutas distribuidas equitativamente entre los cinco destinos más usuales y las distancias se toman mediante Google Maps, la capacidad del sistema varía entre cinco y veinte unidades. La cantidad inicial de componentes es de 100 unidades para C1, C2 y C3, todas las unidades están disponibles al comienzo de la operación. La simulación se ejecuta hasta completar el total de rutas. La tasa de disponibilidad se evalúa para las combinaciones mostradas en la Tabla 3.11, Los resultados son mostrados en la Figura 3.31.

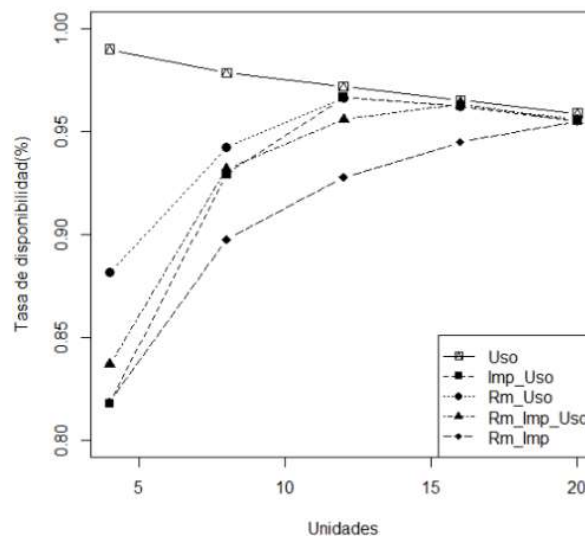


Figura 3.31. Tasa de disponibilidad con variación de la capacidad

El consumo de los componentes en cada una de las estrategias cuando se varía la capacidad es mostrado en la Figura 3.32.

3.2.10. Análisis de resultados

La tasa de disponibilidad operativa se encuentra directamente influenciada por la eficacia del mantenimiento y la disponibilidad de recursos en la flota para ofrecer el servicio. La adopción de estrategias de mantenimiento adecuadas por el sistema

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

tiene un impacto en la tasa de disponibilidad, particularmente al enfrentar variaciones en la capacidad y crecimientos en la demanda.

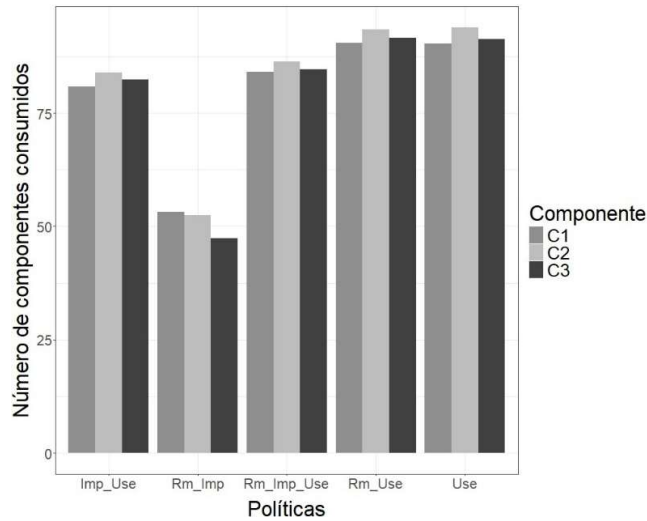


Figura 3.32. Consumo de componentes ante cambios en la capacidad

La Figura 3.29 muestra cómo aumenta la disponibilidad operativa a medida que aumenta el número de rutas para políticas basadas en reparación mínima. Sin embargo, sumando la política de mantenimiento correctivo, es posible alcanzar una tasa de disponibilidad cercana al 98%. De igual manera, se observa que es necesario utilizar más el sistema en el rango de [50-300] rutas. No obstante, alrededor de 300 rutas se encuentra un valor óptimo con una tasa de disponibilidad del 97,4% para diversas políticas. En este escenario, las políticas basadas únicamente en mantenimiento correctivo muestran el peor desempeño. Similarmente, la Figura 3.30 muestra que las políticas de mantenimiento correctivo consumen la menor cantidad de componentes, esto explicaría por qué él en el caso de estudio revisado, estas políticas son las más utilizadas. También se encuentra que las políticas que utilizan mantenimiento preventivo consumen más componentes, esto debido a que si se es estricto con los umbrales de mantenimiento de los componentes se pierde de alguna manera la probabilidad de que estos puedan funcionar bien durante un tiempo adicional a cruzar el umbral.

El análisis del cambio en el tamaño de la flota mostrado en la Figura 3.31, revela que la política de Uso es la más efectiva para un número específico de unidades, logrando una tasa de disponibilidad operativa de aproximadamente el 98,9%

cuando la flota está compuesta por 5 unidades. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que aplicar únicamente políticas de mantenimiento correctivo puede incrementar los costos debido a gastos adicionales en repuestos. Las políticas de reparación mínima pueden mitigar estos altos costos. Sin embargo, para mejorar la disponibilidad operativa, se complementa con un aumento en el número de unidades disponibles para realizar las rutas requeridas. De igual manera, se observa que a partir de 20 unidades y para la cantidad de rutas mensual definida, las políticas necesitan brindar beneficios adicionales en términos de disponibilidad, lo que sugiere que es opcional aumentar aún más el tamaño de la flota más allá de ese valor. En contraste, el consumo de componentes mostrado en la Figura 3.32 indica que, al igual que con la variación de la demanda, cuando se varía la capacidad, las políticas de mantenimiento correctivo consumen la menor cantidad de componentes. Sin embargo, también se encuentra que cuando se varía la capacidad la unión de políticas correctivas y preventivas tienen un mayor consumo de componentes, esto se explica en el hecho de que la variación de capacidad puede crear desbalances entre la carga que se asigna de una unidad a otra haciendo que no siempre el mantenimiento preventivo se haga a tiempo y que los fallos también sean mayores.

3.2.11. Limitaciones encontradas en esta etapa

La HCPN mostró ventajas en cuanto la formalidad y la descripción de las actividades asociadas a la gestión del mantenimiento de una flota mediante los bloques propuestos. De igual manera, presentaron resultados apropiados para identificar comportamientos y respuestas del sistema a variaciones en algunas variables de entrada. Sin embargo, el formalismo y la herramienta utilizada para describirlo, presentan algunas desventajas que limitan otras actividades de la flota y su sistema de gestión y que pueden complementar los ya encontrados en la HCPN, a continuación, se expresan algunas de estas limitaciones.

- La evaluación de la disponibilidad fue lograda comparativamente mediante la aplicación de distintas políticas de mantenimiento. Sin embargo, el seguimiento de la unidad de tiempo no es posible hacerse en esta versión de *CPNTools*, dificultando establecer, la medida del período de tiempo transcurrida en cada simulación.
- La descripción las actividades mediante una red de Petri coloreada permite utilizar la potencialidad del formalismo en la representación de los procesos operativos de la flota. Sin embargo, los procesos administrativos como la gestión de costos y la medición de indicadores como el MTBF o MTTR no son fáciles de medir.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Las flotas están constituidas por un conjunto de unidades que pueden ser a veces un gran número, el modelo permite hacer el seguimiento de flotas pequeñas, si se requiere generar un histórico de uso de las unidades.
- La HCPN presenta un acercamiento aceptable de la interacción entre la disciplina de rutas y las unidades, también permite evaluar el impacto de las políticas de mantenimiento en el sistema. Sin embargo, la generación de fallos es complicada de gestionar por cada unidad, ya que solo existe una función para cada una de las unidades y no se tiene en cuenta eventos pasados de las unidades.
- El seguimiento de los estados de los componentes de cara a lograr un intercambio efectivo desde la canibalización no es posible en la HCPN, esto debido a que como se ha mencionado anteriormente la trazabilidad de componentes o unidades muestra desafíos importantes de escalabilidad en la red descrita.

3.3. Implementación del sistema multi unidad

Con la experiencia del modelo de exploración y las limitaciones encontradas, se procedió a la implementación del modelo con la propuesta presentada en la Figura 3.2. Se propone una arquitectura desacoplada entre el conjunto de unidades y el sistema gestor de mantenimiento, esto con el fin de hacer la simulación del sistema multi unidad extensible a otro tipo de aplicaciones de estudio como, por ejemplo, análisis de rutas, tiempos de uso de cada unidad, combinación de distintas configuraciones de componentes de la unidad, y de igual manera la gestión de mantenimiento, que se pueda aplicar a distintos sistemas multi unidad, sin importar el tipo o tamaño.

Con la descripción de los modelos mostrada en secciones anteriores se procedió al desarrollo de las aplicaciones que implementan el sistema multi unidad y el sistema de gestión de mantenimiento, esta implementación es mostrada en la Figura 3.33. En la parte inferior se modelan las unidades físicas del sistema de acuerdo con la jerarquía y modelos presentados en la sección anterior, cada unidad se conforma un determinado número de componentes y cada componente tiene asignada una distribución de Weibull para generar los fallos aleatorios de la unidad. En la parte superior se describe el sistema de gestión de mantenimiento, en el cual se administran los recursos de mantenimiento, estas interacciones son guiadas en parte por la CPN mostrada en la Figura 3.12. Los recursos gestionados son los repuestos, las horas de mantenimiento, y la gestión de las políticas de mantenimiento. Una función adicional se agrega para crear la disciplina de rutas del sistema.

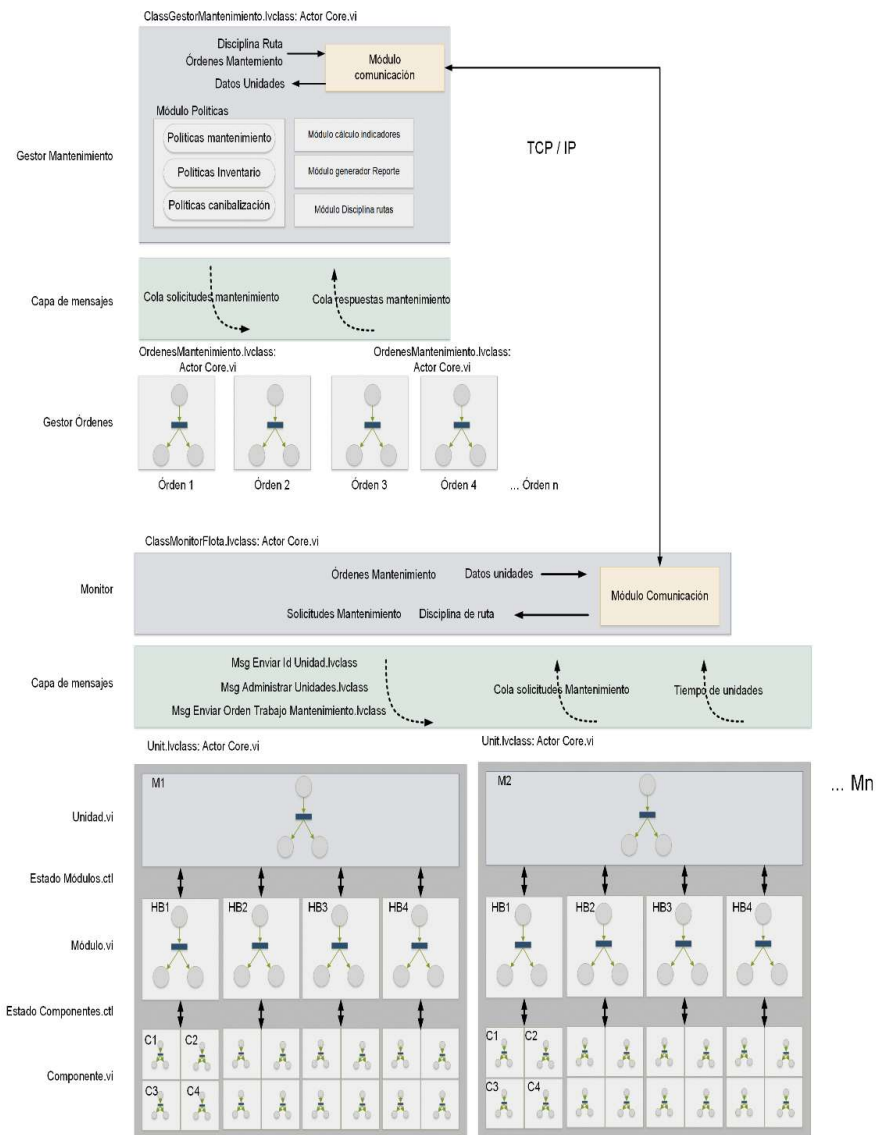


Figura 3.33. Vista general del modelo de simulación flota

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

De esta manera, Se crea un módulo de políticas que implementa los campos para la descripción de políticas de mantenimiento y canibalización, estas políticas pueden hacer parte de una estrategia de mantenimiento preventivo o correctivo. El módulo de políticas de inventario también permite describir distintas políticas de gestión de inventarios, entre ellas se tiene políticas de descripción mínima, porcentaje, etc. De igual manera, el módulo de políticas de canibalización permite describir las políticas que pueden ser aplicadas en conjunto con las otras políticas. El módulo de comunicaciones permite el intercambio de los datos del estado de las unidades y enviar la disciplina de ruta que debe cumplir cada unidad, así como las órdenes de mantenimiento generadas por el gestor de mantenimiento.

Por último, también se incluyeron el módulo de cálculo de indicadores, el cual desarrolla los indicadores para medir el desempeño del sistema, calculando algunos indicadores mostrados en la sección 2.2.4. El otro módulo es el de reportes que genera un conjunto de datos en Excel para el posterior tratamiento y realimentación del comportamiento del sistema durante la simulación.

3.3.1. Programación en LabVIEW

Para la simulación del modelo propuesto se eligió LabVIEW, dado su amplio campo de aplicación en la industria y la investigación en áreas como la automatización industrial, sistemas de control, instrumentación virtual, pruebas y mediciones, visión artificial, robótica y muchas otras aplicaciones donde se requiere una interfaz de usuario intuitiva y flexible para interactuar con hardware y software. LabVIEW es un entorno de desarrollo y sistema de programación visual creado por *National Instruments* (ahora conocido como NI) que se utiliza tanto para la automatización y control de sistemas, como para la adquisición y análisis de datos, diseño de sistemas embebidos y pruebas y verificaciones de hardware.

Por otro lado, la programación orientada a objetos (POO, por su sigla en inglés) es un paradigma de programación que organiza el código en torno a objetos, que son entidades que encapsulan datos y comportamientos relacionados. En POO, se modela el mundo real a través de la definición de clases, que son plantillas o moldes para crear objetos. La programación orientada a objetos proporciona ventajas como modularidad, reutilización de código, facilidad de mantenimiento, flexibilidad y escalabilidad. Es ampliamente utilizada en el desarrollo de software, ya que permite organizar el código de manera estructurada y facilita el trabajo en equipo en proyectos grandes y complejos.

Aprovechando las ventajas que ofrece LabVIEW como lenguaje de programación y el paradigma orientado a objetos en la reutilización de código y la herencia, el desarrollo del modelo se hizo mediante el paradigma POO (Programación Orientadas a Objetos), en LabVIEW. Ahora para que LabVIEW soporte POO es necesario

adicionar la librería ActorFramework.lib, para realizar esta adición se utiliza el software *VI package manager*, mediante este software es posible buscar e instalar distintas librerías que agregan funcionalidades al LabVIEW, la Figura 3.34 muestra la interfaz del software con el paquete ya instalado.

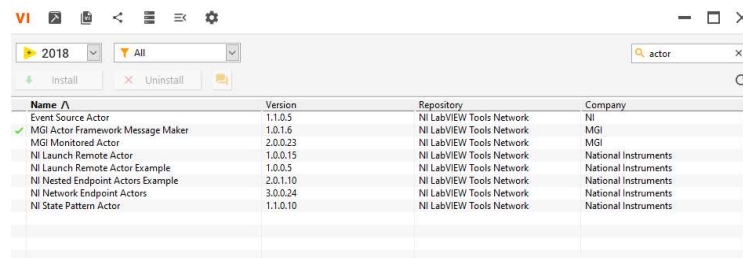


Figura 3.34. Interfaz de VI package manager

La biblioteca Actor Framework (AF) es una librería de LabVIEW que facilita la implementación de sistemas concurrentes y distribuidos utilizando el modelo de actores. El modelo de actores es una forma de programación concurrente donde los actores son entidades independientes que se comunican enviándose mensajes entre sí. El Actor Framework en LabVIEW proporciona una serie de clases, objetos y patrones de diseño que ayudan a estructurar y organizar el código en forma de actores. Cada actor representa un objeto que tiene su propio estado interno, puede recibir mensajes y realizar acciones en respuesta a esos mensajes. La comunicación entre actores se realiza a través del envío y recepción de mensajes.

El flujo básico de trabajo en el Actor Framework se puede resumir en los siguientes pasos:






- Definición de actores: Se crea una clase para cada actor que se desea implementar. Cada clase contiene el código asociado al comportamiento y las propiedades del actor.
- Creación de actores: Se instancian objetos de las clases de actores. Cada objeto representa una instancia independiente del actor en ejecución.
- Envío de mensajes: Los actores se comunican enviándose mensajes. Un actor puede enviar un mensaje a otro actor para solicitar una acción o compartir información.
- Procesamiento de mensajes: Cada actor tiene un bucle de mensajes que se encarga de recibir y procesar los mensajes entrantes. El actor decide qué hacer en función del contenido del mensaje recibido.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Actualización del estado: Los actores pueden modificar su estado interno en respuesta a los mensajes recibidos. Pueden realizar cálculos, actualizar datos y realizar otras acciones.
- Envío de mensajes de respuesta: Un actor puede enviar mensajes de respuesta a otros actores o al actor que originó el mensaje original.

El Actor Framework en LabVIEW proporciona mecanismos para gestionar la concurrencia, el enrutamiento de mensajes, la supervisión y la recuperación de errores. Además, facilita la implementación de sistemas distribuidos al permitir que los actores se ejecuten en diferentes computadoras y se comuniquen a través de la red. La librería Actor Framework presenta los siguientes VI para el desarrollo de programación orientada a objetos. La Tabla 3.12, presenta una descripción los VI más utilizados en esta aplicación de la librería.

Tabla 3.12. Vi's más utilizados de la librería

Icono	Descripción
 <p>Launch Root Actor.vi</p>	<p>Inicia un VI de ejecución asíncrona que realiza tareas y maneja mensajes para el Actor. Este VI devuelve una referencia a un encolado que puede usar para enviar mensajes al actor recién lanzado. El Launch Root Actor VI lanza el Actor sin una llamada. Se utiliza este VI para lanzar el actor raíz del árbol de actores.</p>
 <p>Launch Nested Actor.vi</p>	<p>Lanza un VI de ejecución asíncrona que realiza tareas y maneja mensajes para el actor anidado. Se utiliza este VI para lanzar actores que dependen de uno o más actores de llamada. Este VI devuelve una referencia al encolado que puede usar para enviar mensajes al actor recién lanzado.</p>
 <p>Read Caller Enqueue.vi</p>	<p>Es un vi de mensajería y devuelve la referencia que el actor necesita para enviar mensajes a su interlocutor.</p>
 <p>Read Self Enqueue.vi</p>	<p>Este vi complementa la funcionalidad del vi anterior, por lo tanto, se usa para devolver la referencia necesaria para que el actor se envíe mensajes a sí mismo.</p>
 <p>Send Normal Stop.vi</p>	<p>Envía un mensaje de detención a un actor, lo que hace que el actor ejecute su método Stop Core. Este mensaje tiene prioridad normal, lo que significa que el actor procesará este mensaje después de procesar los mensajes de prioridad alta o normal que ya están en la cola.</p>

Las clases *Actor.lvclass* y *Message.lvclass* son componentes fundamentales del *Actor Framework* en LabVIEW. Estas clases proporcionan la estructura y funcionalidad necesarias para implementar el modelo de actores en LabVIEW. La clase *Actor.lvclass* es una clase base que se utiliza para crear actores en el *Actor Framework*. Cada instancia de esta clase representa un actor individual. Los objetos de la clase

Actor.lvclass tienen un bucle de mensajes interno que se encarga de recibir y procesar los mensajes enviados al actor.

La clase *Message.lvclass* representa los mensajes que se envían entre actores en el *Actor Framework*. Cada instancia de esta clase contiene información específica del mensaje, como el remitente, el destinatario y el contenido del mensaje en sí. Los objetos de la clase *Message.lvclass* se utilizan para enviar información y solicitar acciones entre actores.

En conjunto, estas dos clases son esenciales para la implementación de actores en el *Actor Framework*. Los objetos de la clase *Actor.lvclass* se crean y se comunican entre sí mediante el envío de objetos de la clase *Message.lvclass*. Los actores utilizan los mensajes recibidos para tomar decisiones, actualizar su estado interno y enviar respuestas si es necesario. Por lo tanto, cada una de las clases y los objetos creados debe heredar de alguna de estas dos clases principales y con ello define su funcionalidad como actor o como mensaje dentro de la aplicación. La Figura 3.35 describe el diagrama de clases de la aplicación, y la Figura 3.36 muestra un diagrama de secuencia entre el gestor y las unidades cuando se envía una orden de mantenimiento.

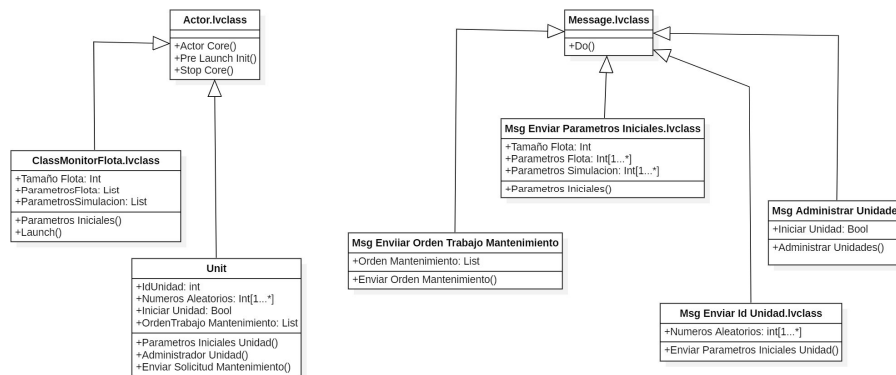


Figura 3.35. Diagrama de clases de los componentes del bloque flota

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

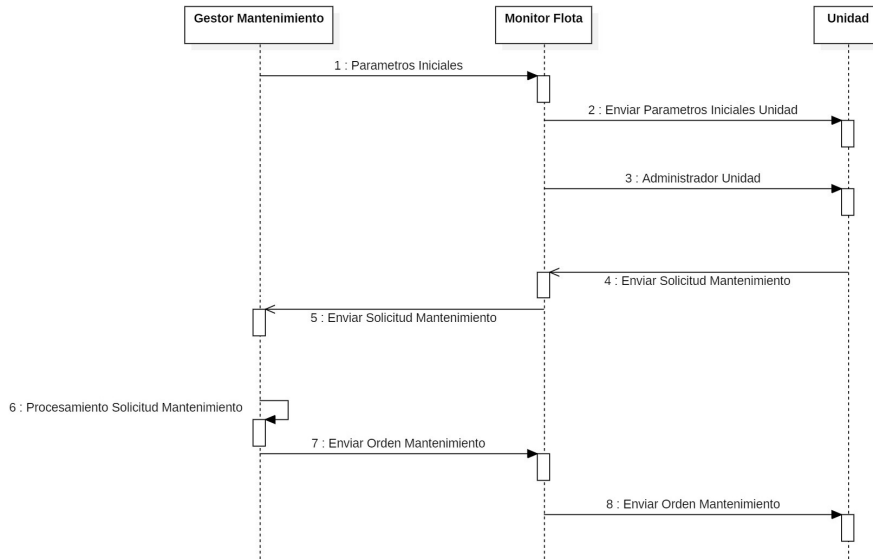


Figura 3.36. Diagrama de secuencia entre el gestor de mantenimiento y la flota

3.4. Pruebas de verificación

La verificación está orientada a reconocer si los requisitos planteados para el modelo son alcanzables y si existe una coherencia en el funcionamiento del modelo. Las pruebas creadas evaluaron si la lógica del sistema es correcta, y si las pruebas de funcionamiento arrojan resultados de acuerdo a lo esperado. En general se realizaron pruebas unitarias al modelo de las unidades, se evaluó la generación de órdenes de mantenimiento. Posteriormente, se realizaron pruebas de integración entre el sistema de unidades (Flota) y el gestor de mantenimiento. La interfaz diseñada para interactuar con el sistema consta de distintas secciones, la Figura 3.37 muestra los bloques de cada una de las secciones de la interfaz.

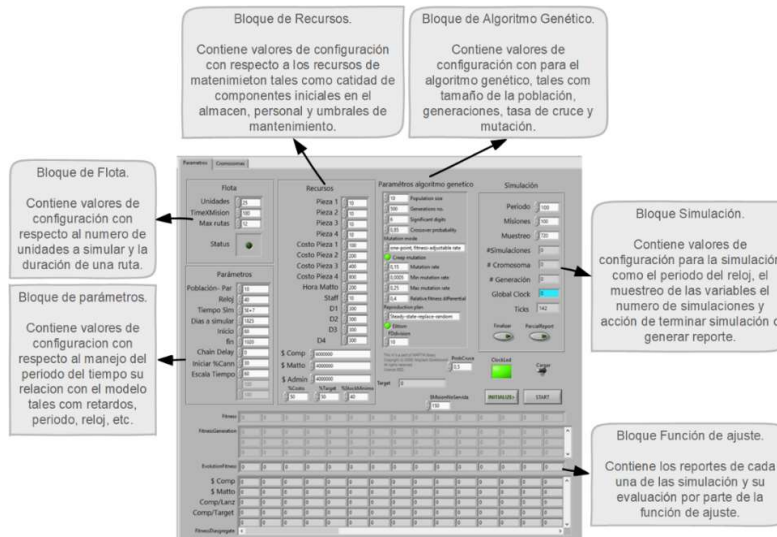


Figura 3.37. Interfaz de parametrización del modelo

3.4.1. Verificación de creación de unidades y cambios de estado.

Esta prueba, verifica la generación de un número específico de unidades simuladas. Para ello se configuran tres valores distintos de tamaño de flota, esperando que el simulador genere la cantidad de unidades requeridas. La verificación se realiza mediante el conteo de actores tipo unidad y comprobando su identificador. Los tamaños de flota seleccionados son 10 unidades para una flota pequeña, 25 para una flota mediana y 40 para una flota grande. La Figura 3.38 muestra el resultado obtenido para la creación de una flota pequeña de 10 unidades.

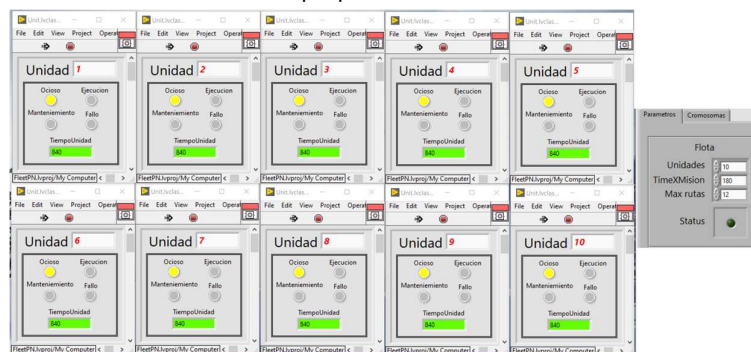


Figura 3.38. Verificación de creación de 10 unidades

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

La Figura 3.39 evidencia la creación de 25 actores tipo unidad para una flota mediana y la Figura 3.40 muestra los resultados para una flota grande de 40 unidades.

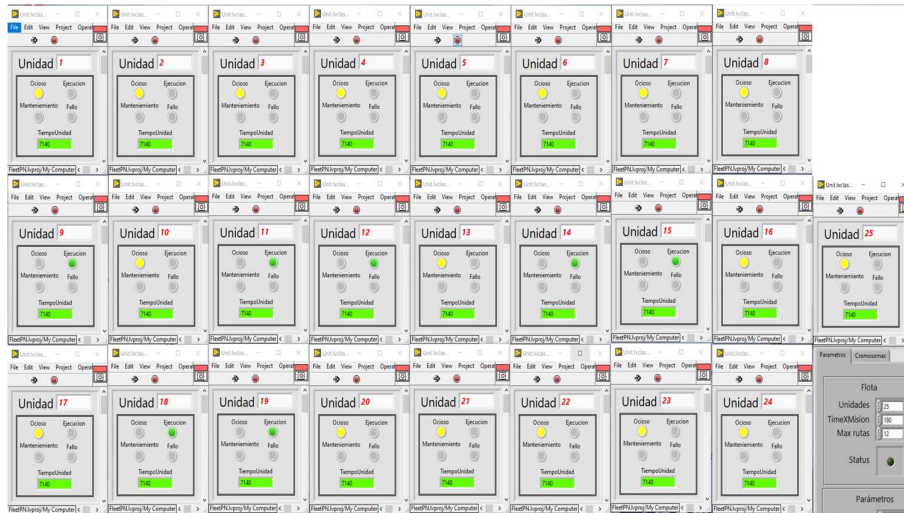


Figura 3.39. Verificación de creación de 25 unidades

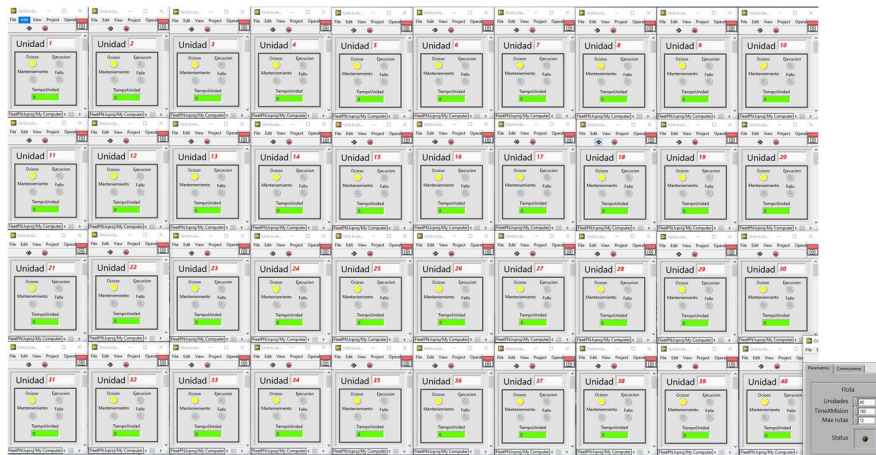


Figura 3.40. Verificación de creación de 40 unidades

A continuación, se realiza una prueba de verificación del modelo de unidad mostrado en la Figura 3.9. Consiste en observar los estados descritos en la Tabla 3.5 de la unidad y de acuerdo a las transiciones que se van activando observar los estados que toma la unidad. La Figura 3.41 muestra la evolución desde el estado

Ocioso al estado *Ejecución* mediante la activación de la transición *iniciar* y posteriormente su retorno al estado *Ocioso* después de la activación de la transición *completar*.

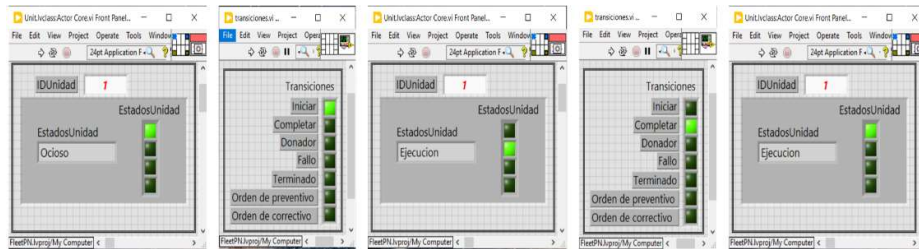


Figura 3.41. Verificación de los estados, Ejecución y Ocioso de una unidad

De igual manera, la Figura 3.42 describe la evolución de la unidad desde el estado *Ejecución* hacia el estado *NoDisponible* después que la unidad ha presentado un fallo y continua al estado de *mantenimiento* cuando la orden de mantenimiento ha llegado.

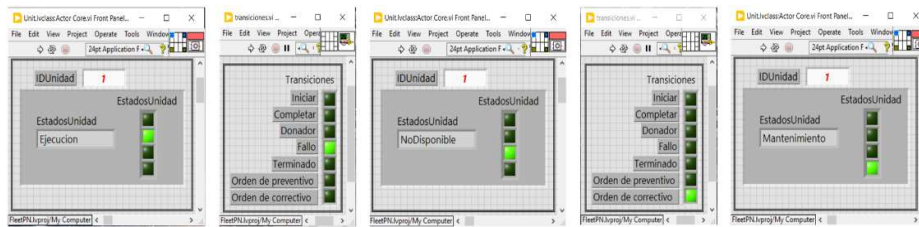


Figura 3.42. Verificación de los estados, Ejecución, No disponible y mantenimiento de una unidad

3.5. Validación del modelo

La validación busca evaluar si el modelo propuesto es una representación precisa del sistema, esta evaluación está guiada por los objetivos de la simulación debido a que a una simulación no es una representación completa del sistema. Para el sistema multi unidad hay dos características importantes que pueden afectar la validez del modelo. En primer lugar, está el historial de fallos que define el comportamiento de las unidades, este comportamiento define la disponibilidad de las unidades y afecta el conjunto de indicadores desempeño, lo cual limitaría la toma de decisiones. La segunda característica es el comportamiento de los dos indicadores más representativos del desempeño del mantenimiento del sistema, el MTBF y MTRR y su correlación negativa cuando el sistema funciona correctamente. Estas dos características fueron tenidas en cuenta para la validación del sistema.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

3.5.1. Generación de fallos del sistema mediante un conjunto de datos conocido.

El modelo de simulación fue evaluado teniendo en cuenta la capacidad del sistema para reproducir los fallos de un sistema real conocido, para tal fin se realizó una prueba en la cual se insertan una serie de datos que son tomados de una flota de vehículos que realiza operaciones de minería (Louit et al., 2009), el procedimiento mostrado en la Figura 3.43, describe como los datos fueron aplicados al modelo.



Figura 3.43. Procedimiento de generación de fallos

Los datos utilizados fueron tomados de una flota de 11 vehículos, para la simulación los tiempos de fallo fueron asignados a distintos tipos de componentes, se lanzó una simulación de 250 horas, periodo durante el cual habían sucedido los eventos de fallo. Una comparación gráfica es mostrada en la Figura 3.44 en la cual se presentan los datos reales con un recuadro en el instante que sucedieron y con un punto los datos simulados.

Posteriormente, se aplica una prueba T-Student para demostrar que no hay diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras, para ello en primer lugar se realiza una prueba de normalidad y posteriormente una prueba de homogeneidad de varianzas. Los resultados son mostrados en la Tabla 3.13.

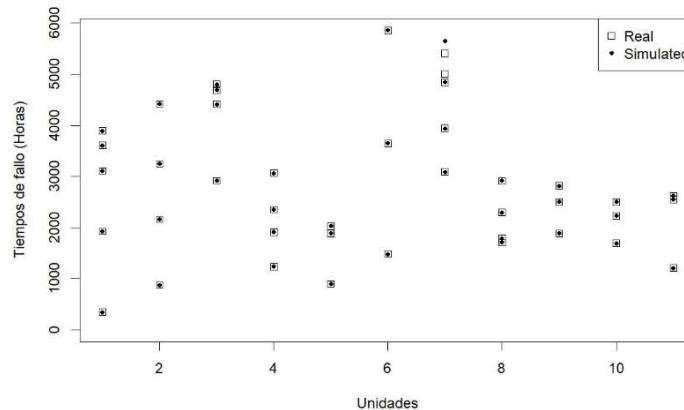


Figura 3.44. Comparativa de fallos generados por el sistema simulado

La hipótesis nula de la prueba de normalidad es que los datos poseen una distribución normal, analizando el p-valor tanto para los datos reales y simulados se encuentra que es mucho mayor que el nivel de significancia del 5% lo que indica que no hay razón para rechazar la hipótesis nula. En la prueba de Levene la hipótesis nula es que las varianzas de los datos de fallos reales y simulados son iguales, nuevamente evaluando el p-valor se encuentra que es mucho mayor que el nivel de significancia del 5% lo que sugiere que no hay diferencias significativas en las varianzas de las muestras. Cumpliendo los datos las pruebas de normalidad e igualdad de varianzas, se aplica la prueba T-Student, la hipótesis nula define que no hay diferencia significativa entre las dos medias, nuevamente evaluando el p-valor se observa que es mayor que el nivel de significancia del 5%, permitiendo concluir que no hay diferencias significativas entre los datos reales y simulados.

Tabla 3.13. Pruebas T-Student realizada a los datos.

Datos (n=41)	Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)	Prueba de Levene	Prueba T- Student
Reales	0.146	0.863	0.912
Simulados	0.295		

Posteriormente, se realiza un análisis de correlación entre dos indicadores relevantes en un sistema de mantenimiento, la hipótesis dice que, si el tiempo medio entre fallos incrementa su valor, contrariamente el tiempo medio de reparación debe disminuir, esto indica que al comienzo las paradas de las unidades por mantenimiento son mayores, pero que con el paso del tiempo el efecto de estas acciones hace que las unidades tengan menos fallos.

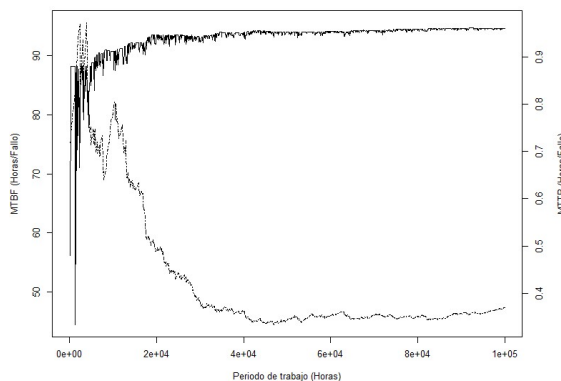


Figura 3.45. Comparativa entre los indicadores MTBF y MTTR

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Por lo tanto, existe una correlación negativa entre los valores de estos dos indicadores, la Figura 3.45 muestra la evolución de los indicadores en el tiempo para un periodo de un año para una flota de 25 unidades y políticas únicamente de mantenimiento correctivo. El valor de correlación para el conjunto de datos tiene un valor de -0.9351 , indicando una correlación negativa para los indicadores, confirmando la hipótesis realizada para esta prueba. La Figura 3.46 muestra la correlación entre los dos indicadores.

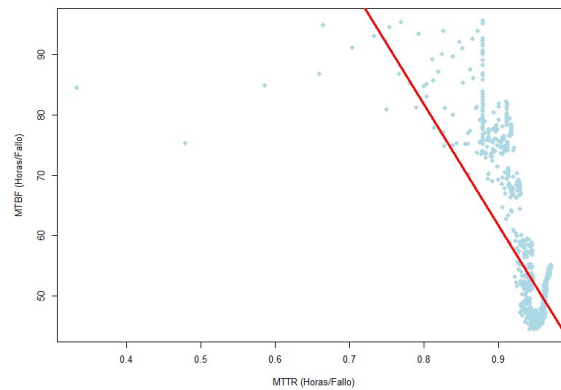


Figura 3.46. Correlación entre los indicadores MTBF y MTTR

3.5.2. Validación LabVIEW – Raptor

Esta validación se lleva a cabo utilizando el software RAPTOR para el análisis RAM. La variable de comparación es el número de fallos, complementando así las validaciones realizadas en la sección anterior. Para simplificar la prueba, se ha seleccionado un solo módulo de la unidad, compuesto por cuatro componentes en serie: C1, C2, C3 y C4. Las distribuciones de fallos de estos componentes se obtienen de las Tabla 3.10 y Tabla 4.1. El modelo desarrollado en RAPTOR mediante bloques de confiabilidad se muestra en la Figura 3.47.

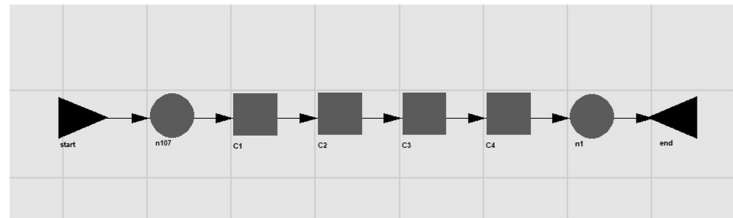


Figura 3.47 Diagrama Raptor módulo de unidad

La prueba se desarrolló durante un período de 180 días, comparando el número de fallos generados. Los resultados se presentan en la Figura 3.48.

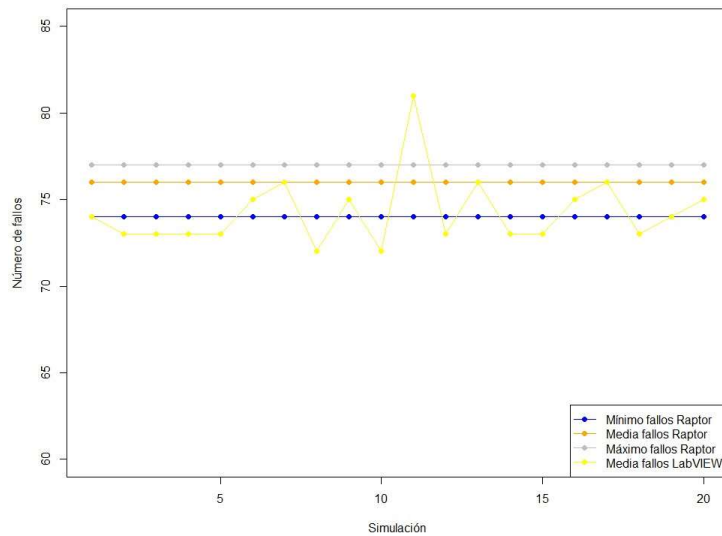


Figura 3.48 Comparación del número de fallos Raptor - LabVIEW

La Figura 3.48 muestra los valores máximos en gris y mínimos en azul proporcionados por RAPTOR, así como la media del número de fallos en gris. De igual manera, se presentan los valores de la media de fallos obtenidos con LabVIEW, en color amarillo. Los resultados permiten concluir que la media de fallos de LabVIEW parece ligeramente inferior a la de RAPTOR, pero se aprecia una buena similitud en los órdenes de magnitud. Para estimar la diferencia cuantitativamente, se calcula el error cuadrático medio entre los valores medios generados por cada simulador, obteniendo un valor de 0.11%, lo que indica una diferencia mínima entre los dos simuladores para la variable estudiada.

Otros valores, como el tiempo medio de reparación y la disponibilidad, también fueron estudiados, pero se encontró que aún es necesario comprender mejor el funcionamiento de RAPTOR y la forma en que define los estados de los componentes.

4 Prueba de concepto

Este capítulo expone la evaluación de diversas estrategias de mantenimiento aplicadas a una flota, incluyendo la canibalización. La evaluación se centra en situaciones de funcionamiento específicamente diseñadas para un caso de estudio particular. A través del uso de indicadores de desempeño, se examina la efectividad de cada estrategia en términos de disponibilidad y costos. El modelo de simulación propuesto facilita la configuración de una amplia gama de parámetros operativos y de mantenimiento, permitiendo simular variadas condiciones operacionales que impactan directamente en el sistema de flotas. Este modelo proporciona un entorno controlado para la experimentación.

Se han llevado a cabo múltiples experimentos para evaluar la capacidad del modelo de simulación de representar fielmente estos contextos operativos. Estos experimentos no solo validan la funcionalidad del modelo, sino que también aportan perspectivas sobre la aplicabilidad y eficacia de las estrategias de mantenimiento en condiciones reales. Este enfoque metódico garantiza que las decisiones adoptadas se fundamenten en análisis exhaustivos, ofreciendo una base sólida para futuras aplicaciones prácticas.

4.1. Descripción del caso de estudio

El caso de estudio es una flota de 10 unidades con enrutamiento, el tiempo de ruta (Tr) entre dos estaciones incluido el retorno es de 360 minutos (Ceder, 2016) Se define un tiempo de despacho (Td) igual a 36 minutos que permiten realizar 27

rutas diarias u 810 rutas mensuales, la disciplina de ruta con estas consideraciones es mostrada en la Figura 4.1.

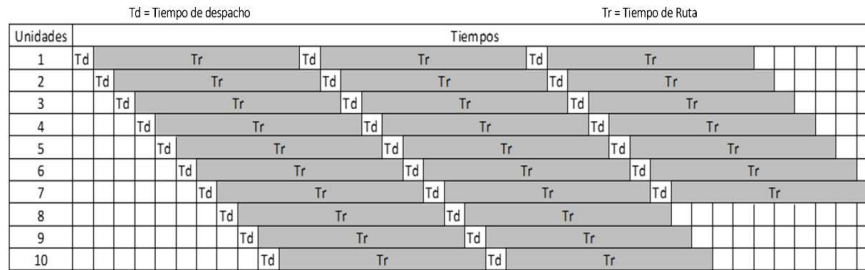


Figura 4.1. Disciplina de ruta

De igual manera, se define la arquitectura de componentes de una unidad del sistema propuesto. La Figura 4.2 muestra una unidad compuesta de 4 módulos mantenibles, cada módulo es un conjunto motriz compuesto de 4 componentes así: 1 engranaje de entrada (C1), Un engranaje de salida (C2), un eje de salida (C3), Un motor (C4), Las relaciones entre componentes son las mismas que las explicadas en la sección 3.2.4. Tanto los módulos como los componentes están en un arreglo serie, esto significa que, si un componente o módulo fallan, el módulo y la unidad pasarán a un estado de fallo también. Los fallos son considerados críticos al igual que los componentes y cada uno inhabilita la unidad para realizar una ruta, el árbol de fallos para la unidad propuesta se muestra en la Figura 4.3, e indica que por cada componente solo se considera un modo de fallo. Los fallos son generados mediante números aleatorios generados a partir de las distribuciones de Weibull de cada uno de los 4 componentes, mostrados en la Tabla 4.1, que son de la forma de la Ecuación 2.3.

Tabla 4.1. Parámetros de las distribuciones de Weibull de los componentes.

Componente	Parámetros
C1	$t_0 = 686, \lambda = 1070, \beta = 1.4$
C2	$t_0 = 1150, \lambda = 1850, \beta = 1.8$
C3	$t_0 = 3000, \lambda = 94000, \beta = 1.11$
C4	$t_0 = 5000, \lambda = 157000, \beta = 1.11$

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

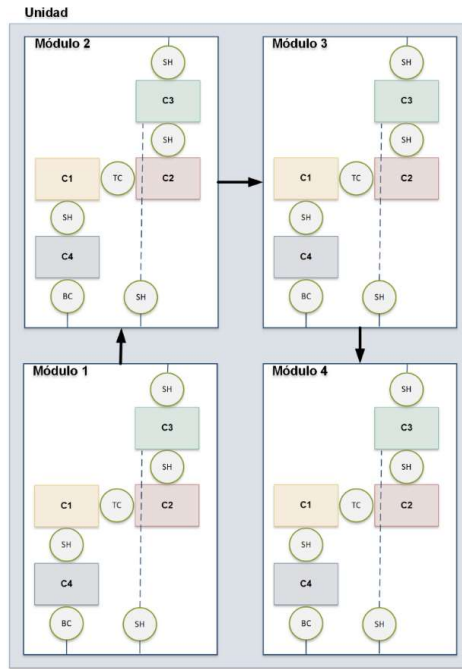


Figura 4.2. Diagrama de bloques de función de una unidad

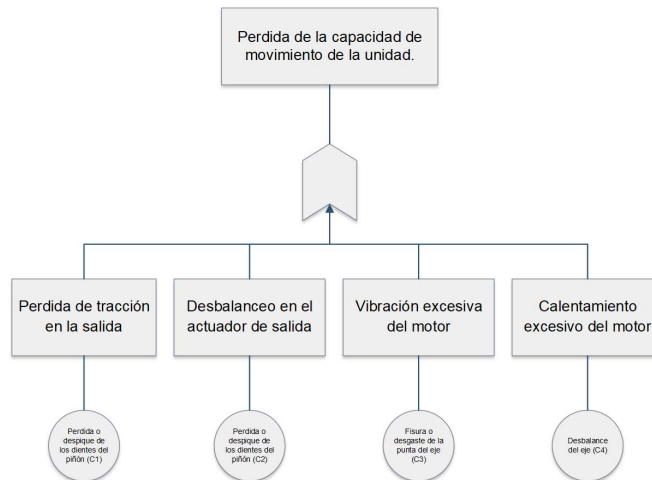


Figura 4.3. Árbol de fallos de la unidad

La política de inventario, se basa en los dos parámetros presentados en (Cavaliere et al., 2008), el primero es las condiciones que disparan la emisión de un nuevo pedido y segundo la cantidad de componentes solicitados. Para ello se toma en cuenta que el tiempo libre de fallo del componente 2 que es aproximadamente el doble del componente 1, con esto se determina una política mínima de inventario de 1 componente por unidad de cada tipo cuando el stock llega a 0, excepto el componente 1 que tendrá el doble del componente 2. Los parámetros iniciales de la simulación se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parametrización del inventario y costos logísticos.

Parámetro	Valores
Componentes iniciales	1 componente por tipo por unidad, excepto C1 con 2 componentes por unidad.
Costo de componentes (\$)	C1 (100\$), C2(200\$), C3(\$400), C4(800\$)
Costo Hora de mantenimiento	200\$

Para estresar al sistema se utiliza una tasa de fallos alta y las políticas seleccionadas son: mantenimiento correctivo una política de reparación mínima, mantenimiento preventivo una política basada en tiempo junto con una de reemplazo en bloque para un componente del mismo tipo y una política *Bird* que será evaluada junto con la política de mantenimiento correctivo, la Tabla 4.3 resume las políticas utilizadas.

Tabla 4.3. Políticas de Mantenimiento propuestas.

Estrategia	Política	Observaciones
Mantenimiento correctivo	Reparación mínima (MC)	Se restaura la unidad realizando las labores suficientes para retornarla a disponible en menor tiempo posible.
	Reparación mínima con canibalización (MC + Can)	Una política <i>Bird</i> , selecciona un grupo de unidades que servirán como respaldo por componentes cuando el suministro sea escaso. La asignación como plataforma <i>Bird</i> se hace por un calendario.
Mantenimiento preventivo	Basada en Tiempo + Reemplazo en bloque (MP-Tiempo)	Se aplica un mantenimiento después de que el componente pase de cierto umbral de tiempo. Se hace un recambio de componentes del mismo tipo (mantenimiento en bloque) dentro de la unidad.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

El sistema será evaluado en dos fases. En la primera fase, se llevará a cabo una evaluación incremental: se comienza aplicando una política de solo mantenimiento correctivo, luego se añade una política de mantenimiento correctivo más canibalización, y finalmente se evalúa una política de mantenimiento preventivo. En esta fase, la canibalización se utiliza junto con una política de mantenimiento preventivo de reparación mínima, que implica un cambio de componente. Por lo tanto, la política de canibalización no se aplica sola, sino como complemento de la política de mantenimiento correctivo cuando no hay componentes disponibles.

Por otro lado, dado que la política de canibalización *Bird* requiere conocer de antemano qué unidad está disponible para ser donante, se ha establecido una cola que alterna las unidades para que estén disponibles como unidades *Bird*. El tiempo de rotación es un parámetro que debe optimizarse para evitar la saturación de las unidades y garantizar que siempre haya componentes disponibles para canibalizar. El bloque define al menos tres unidades por periodo, de las cuales se tomarán los repuestos usados en caso de ser necesario realizar canibalizaciones. Cuando esto sucede, la unidad cuyo modelo se muestra en la figura 3.9 está en estado de fallo. Sin embargo, un componente descrito en el modelo de la figura 3.6 debe estar en estado 'ocioso' para poder ser canibalizado.

En la segunda fase, todas las políticas se activan y el algoritmo de optimización gestiona la utilización de una u otra según el estado del sistema. Nuevamente, la canibalización se emplea solo en una política de reparación mínima cuando hay carencia de componentes

Las variables de salida evalúan el desempeño del sistema propuesto. Se han seleccionado indicadores clasificados en cuatro grupos, desempeño, producción, costos e inventario. La Tabla 4.4 muestra los indicadores seleccionados.

Tabla 4.4. Variables evaluadas durante la simulación.

Grupo	Indicadores
Desempeño	MTBF
	MTTR
	Disponibilidad Operativa
Objetivo	Rutas completadas
Costos	Mantenimiento
	Componentes
Inventario	Consumidos

El Sistema computacional utilizado tiene las características presentadas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características del sistema computacional

Característica	Valores
Sistema Operativo	Windows 10
Procesador	Intel core i7 7 generación
RAM	32 Gb
Versión Labview	8.6 Patch 2.
Tiempo de simulación	3.75 segundos por día

Una política de reparación mínima implica realizar la menor cantidad de tareas de mantenimiento necesarias para devolver una unidad a funcionamiento. En el caso de estudio, esta política consiste en cambiar el componente de la manera más rápida posible, considerando los tiempos de reparación definidos en la Tabla 3.10. Durante el desarrollo operacional, las unidades en estado de ocio o fallo detienen el tiempo de uso de los componentes, ya que no están prestando servicio ni realizando operaciones para el sistema en estos estados. La periodicidad del mantenimiento preventivo se determina utilizando la distribución de Weibull para cada componente, estableciendo un intervalo de aplicación de la política entre el tiempo libre de fallos (T_0) y el parámetro de escala (λ). El tiempo de aplicación del mantenimiento preventivo también es uno de los parámetros que se deben optimizar

Por último, para aclarar el término "componentes usados" como resultado de la canibalización, un componente intercambiado e instalado en la unidad receptora mantiene el tiempo de vida que tenía al momento del intercambio. Sin embargo, el algoritmo dentro del simulador busca que, entre los componentes disponibles para canibalizar, se escoja el que tenga el menor tiempo de vida restante.

4.2. Pruebas sobre el modelo de simulación

En esta fase de validación el objetivo es comparar distintos parámetros de entrada - salida del sistema, entre ellos, los indicadores presentados en la sección 2.2.4, y de esta manera contrastar el desempeño de la flota y los costos asociados a su producción con esto se busca mostrar la capacidad del modelo ante distintas pruebas sobre un sistema.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

El modelo de simulación desarrollado proporciona un marco de decisión para la gestión del mantenimiento en sistemas multi unidad. Este modelo permite parametrizar y representar distintos contextos, incluyendo condiciones potencialmente adversas que de otro modo serían difíciles de estudiar. Entre estas condiciones se incluyen cambios en el entorno del sistema, como retrasos en la cadena de suministro, variaciones en las tasas de fallos y diferencias en la arquitectura de componentes. No obstante, para que el modelo funcione de manera eficiente, es necesario cumplir ciertas condiciones previas, las cuales se detallan a continuación.

- Solo unidades en estado ocioso pueden ser asignados a misión.
- El fallo de un componente genera un estado no disponible en la unidad.
- El mantenimiento preventivo se realiza cuando la unidad está ociosa.
- Existe un valor inicial de componentes de repuesto en el almacén.
- Existe una regla de suministro de piezas sobre el sistema mediante una política de inventarios.
- Todas las unidades inician en un estado ocioso y completamente funcionales.

4.2.1. Experimento 1. Observación de la tasa de unidades disponibles del sistema al aplicar un retardo variable en la entrega de componentes.

El objetivo de este experimento es evaluar la tasa de unidades disponibles del sistema cuando se presenta un retardo en la entrega de componentes al sistema de inventario. La hipótesis planteada indica que ante un retardo en el suministro de componentes, la tasa de unidades disponibles debe disminuir. Una restricción que se agrega a esta prueba es que solo se solicitan componentes cuando el tipo de componente se ha agotado en el inventario, representado deficiencias en la gestión de inventario. Las variables de entrada son el tiempo de suministro de componentes, los parámetros fijos son la tasa de fallos y una política de mantenimiento correctivo. La variable de salida es la tasa de unidades disponibles durante el periodo de un año.

La Figura 4.4 en su parte (a) muestra como el porcentaje de unidades operativas es elevado, cuando existe disponibilidad completa de respuestas en el almacén. En la parte (b) de la figura, se puede apreciar como un retardo medio (15 días) en el suministro de piezas implica algunos picos en el porcentaje de unidades disponible alcanzando en dos picos valores del 50% cerca del periodo evaluado, limitando en los mencionados periodos la capacidad del sistema a la mitad. Por último, la parte (c) de la figura, muestra un caso con un retardo alto (30 días), en este caso el

porcentaje de unidades disponibles cae hasta una tasa del 20% en dos períodos afectando seriamente la calidad del servicio.

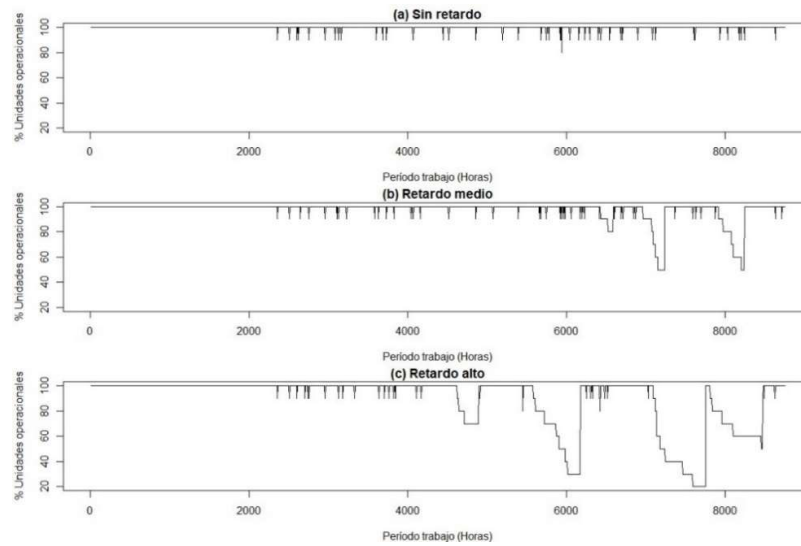


Figura 4.4. Tasa de unidades disponibles en presencia de distintos retardos

El análisis descriptivo muestra una diferencia en las medias. Sin embargo, esta medida es sensible a los valores atípicos. Por otro lado, el valor de las medianas es igual para las tres muestras, indicando la robustez de la mediana como medida de tendencia central. La Tabla 4.6 muestra los valores descriptivos de la muestra.

Tabla 4.6. Medidas estadísticas experimento 1

Medida	Sin retardo	Medio	Alto
N	1459	1459	1459
Media	99.7	97.5	88.9
Mediana	100	100	100
Varianza	3.06	73.1	454

El análisis descriptivo previo no permite afirmar que existe una diferencia entre las muestras tomadas. Por lo tanto, se aplicará una prueba Kruskal-Wallis para evaluar si existe diferencias significativas entre las muestras. La hipótesis nula indica que las medianas son iguales y se toma un nivel de significancia del 5% los resultados de la prueba son mostrados en la Tabla 4.7.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 4.7. Prueba Kruskal-Wallis experimento 1

Nombre	X^2	df	p	ε^2
Muestras	396	2	<.001	0.0905

El valor alto de X^2 indica que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las tres muestras, el p-valor sugiere que se debe rechazar la hipótesis nula y el valor de ε^2 aunque no es alto si deja ver un tamaño del efecto lo suficientemente apreciable para considerar las diferencias entre muestras. Con este resultado se puede concluir que los retardos sí afectan prácticamente las unidades disponibles de un sistema multi unidad, en presencia de una política de mantenimiento correctivo únicamente.

4.2.2. Experimento 2. Observación de la tasa de unidades disponibles al aplicar distintas políticas de mantenimiento.

Este experimento tiene como objetivo examinar los efectos de diversas políticas de mantenimiento sobre la tasa de unidades disponibles en una flota. Se implementaron dos políticas principales: una política de mantenimiento correctivo imperfecto y una política de mantenimiento preventivo de reemplazo en bloque de componentes. Además, se evaluó una estrategia combinada que integra mantenimiento correctivo con canibalización, para determinar su eficacia en comparación con las políticas convencionales. La hipótesis plantea que las políticas de mantenimiento preventivo incrementan la duración de operatividad de las unidades en la flota de transporte, manteniéndolas disponibles por periodos más prolongados en comparación con las políticas de mantenimiento correctivo. Esta última estrategia ha demostrado ser más vulnerable a las demoras en la entrega de componentes, según se observó en el experimento previo. Para contrastar este último aspecto se adiciona la política de canibalización esperando que la tasa de unidades operativas sea superior a la obtenida exclusivamente mediante mantenimiento correctivo, aunque sin igualar los niveles de eficacia asociados a una estrategia de mantenimiento preventivo. Las variables de entrada son las políticas de mantenimiento tomadas de la Tabla 4.3. Los parámetros fijos son el tiempo de suministro de componentes de 30 días, y la tasa de fallos. La variable de salida es la tasa de unidades disponibles durante el periodo de un año.

La Figura 4.5 en la parte (a) muestra como con una política de mantenimiento correctivo, la tasa de unidades disponibles cae en un 80% en dos periodos distintos de 100 horas esto afecta la prestación del servicio debido a las pocas unidades disponibles. Por otro lado, la parte (b) de la figura, muestra como la adición de una política de canibalización a la de mantenimiento correctivo disminuye el porcentaje

de unidades no operacionales solamente hasta un 30% durante un periodo de 1000 horas siendo comparativamente mejor la tasa de unidades disponibles que con una política de mantenimiento correctivo solamente. Por último, la parte (c) de la figura, muestra como la aplicación de una política de mantenimiento preventivo, como se esperaba mantiene una alta tasa de operatividad (90%) de las unidades de la flota durante el periodo de estudio.

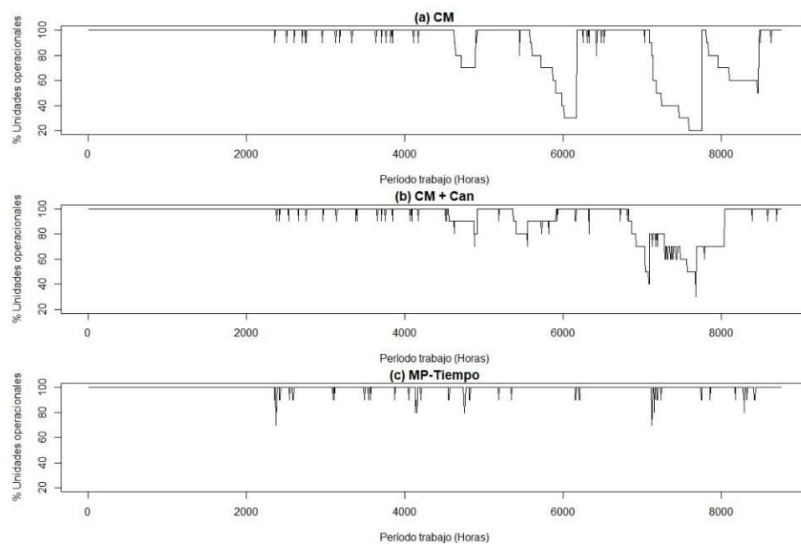


Figura 4.5. Tasa de unidades disponibles frente a distintas políticas de mantenimiento

El análisis descriptivo muestra una diferencia entre las medias de los datos estudiados. Sin embargo, la mediana es igual para las tres muestras que al igual que en el experimento anterior esta medida es mucho menos sensible a los valores atípicos de las muestras: Por otro lado, se puede observar una diferencia significativa entre las varianzas de las muestras, lo cual hace necesario aplicar otras pruebas para evaluar si hay alguna diferencia estadística significativa, la Tabla 4.8 muestra los valores descriptivos obtenidos de la muestra.

Tabla 4.8. Medidas estadísticas experimento 2

Medida	MC	MC + Can	MP-Tiempo
N	1459	1459	1459
Media	88.9	94.1	99.5
Mediana	100	100	100
Varianza	454	142	7.15

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Para complementar el análisis descriptivo se utiliza nuevamente la prueba de Kruskal-Wallis, en la cual la hipótesis nula es que las medianas son iguales, esta prueba se realiza con un nivel de significancia del 5%, los resultados de prueba son mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Medidas estadísticas experimento 2

Nombre	X^2	df	p	ϵ^2
Muestras	339	2	<.001	0.0775

Como se muestra en la tabla anterior, el p-valor es menor que el valor de significancia, lo cual permite asumir que existen diferencias estadísticamente significativas entre las muestras, el tamaño del efecto ϵ^2 a pesar de que no es un efecto grande es suficientemente significativo para concluir que las diferencias encontradas tienen aplicación práctica, indicando que las políticas aplicadas al sistema afectan significativamente el comportamiento de la tasa de unidades disponibles en una flota.

4.2.3. Experimento 3. Observación de los tiempos de mantenimiento al aplicar distintas políticas de mantenimiento.

El objetivo de esta prueba es observar los efectos que tienen un conjunto de políticas de mantenimiento preventivo, correctivo y correctivo más canibalización en los tiempos de mantenimiento. Los tiempos de mantenimiento como se mencionó en la sección 2.2.2 se dividen en logísticos, administrativos y mantenimiento. La hipótesis define que una política de mantenimiento preventivo tendrá una menor tasa de tiempos logísticos y administrativos. De igual manera, se espera que una política de canibalización con mantenimiento correctivo tenga una tasa de tiempo mayor de tiempo de mantenimiento, que solo aplicar una política de mantenimiento correctiva. Las variables de entrada son las políticas de mantenimiento, los parámetros fijos son la tasa de abastecimiento del inventario, el retardo de tiempo de suministro de componentes, y la tasa de fallos. La variable de salida son los tiempos de mantenimiento efectivo, logísticos y administrativos en el periodo de tiempo de un año.

La Figura 4.6 muestra que, con una política de mantenimiento correctivo, la cantidad de horas de tiempo logístico y administrativo es comparativamente mayor que con las otras políticas. Sin embargo, comparativamente estos tiempos se reduce en un 50 % cuando se aplica mantenimiento correctivo más canibalización. Aunque el valor de horas de mantenimiento se incrementa en promedio un 10 % para la política de canibalización, la capacidad del sistema se ve menos alterada por el retardo logístico del inventario, como se observó en el experimento 2. Por último,

los tiempos logísticos y administrativos en el mantenimiento preventivo son escasos, esto debido a que estos tiempos de preparación no implican que la unidad está detenida.

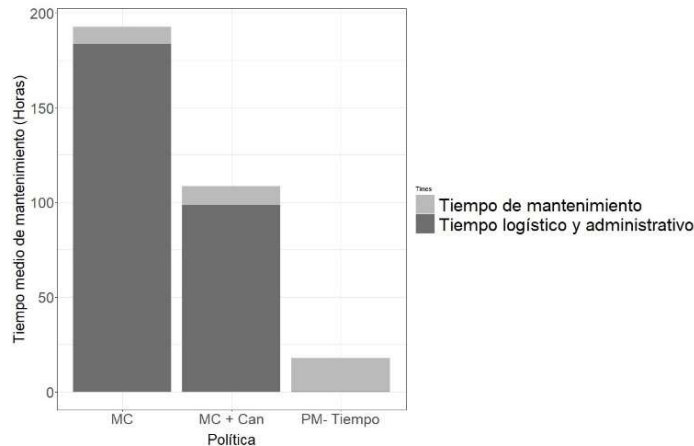


Figura 4.6. Comparativa de tiempos de mantenimiento

4.2.4. Experimento 4. Observación de la disponibilidad operativa al aplicar distintas políticas de mantenimiento.

La disponibilidad operativa mostrada en la Ecuación 2.4 relaciona el tiempo que las unidades permanecen disponibles y no disponibles. El objetivo de esta prueba es evaluar el efecto de un conjunto de políticas de mantenimiento, incluida la canibalización sobre la disponibilidad operacional de una flota. La hipótesis planteada indica que la disponibilidad operacional es menos afectada si se aplican políticas de mantenimiento preventivo. De igual manera, entre una política de mantenimiento correctiva y una política de mantenimiento correctivo más canibalización, la disponibilidad operativa se verá menos afectada por esta última. Las variables de entrada son las políticas de mantenimiento. Los parámetros fijos son la tasa de abastecimiento del inventario, el retardo en el tiempo de suministro de componentes, y la tasa de fallos. La variable de salida es la tasa de disponibilidad operativa en el periodo observada en el periodo de un año.

La Figura 4.7 muestra los efectos sobre la disponibilidad del sistema ante cambios en la política de mantenimiento. La tasa de disponibilidad con una política de mantenimiento preventivo basada en uso mantiene la tasa de disponibilidad en un valor aproximado 100% durante todo el periodo evaluado. Contrario a ello, la tendencia negativa en la tasa es apreciable con una política de mantenimiento correc-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

tivo. Sin embargo, la política de mantenimiento correctivo más canibalización muestra una tendencia negativa más suave que con una política de mantenimiento correctivo solamente. Esto demuestra como la disponibilidad operacional del sistema es sensible apreciablemente a la política de mantenimiento.

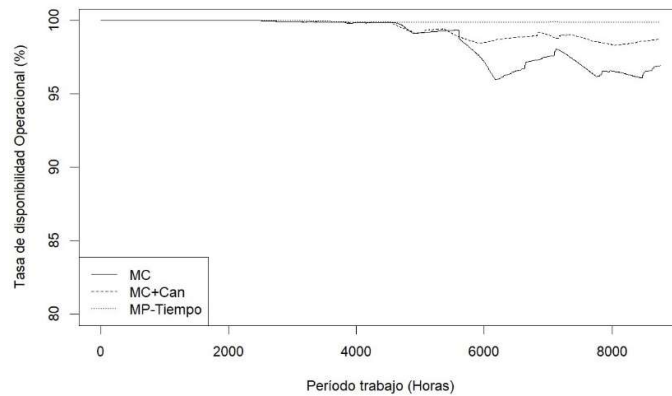


Figura 4.7. Tasa de disponibilidad del sistema

El análisis de la estadística descriptiva no muestra nada concluyente con respecto a diferencias observables entre las muestras las medias son similares en valor al igual que las medianas y en cada muestra la media y la mediana son similares indicando simetría en las muestras y que presentan poca dispersión dado el valor de la varianza. Estas medidas son mostradas en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. Medidas estadísticas experimento 4

Medida	MC	MC + Can	MP-Tiempo
N	1459	1459	1459
Media	98.4	99	99.4
Mediana	99	99	99
Varianza	2.34	0.611	0.234

Para completar el análisis descriptivo nuevamente se hace uso de la prueba Kruskal-Wallis en la cual la hipótesis nula indica que todas las muestras provienen de la misma distribución. Por lo tanto, no existe diferencia en sus medianas. El nivel de significancia de esta prueba es del 5%. Por lo tanto, observando el p-valor de la prueba, muestra que es menor al valor de significancia. Así, de esta manera la hipótesis nula se rechaza y se puede afirmar que las diferencias observadas en las muestras son estadísticamente significativas. Para efectos prácticos se evalúa el

valor de efecto ε^2 el cual tiene un valor de 0.119, este valor indica que si bien existen diferencias significativas las diferencias no son tan fuertes. Los resultados de la prueba son mostrados en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Prueba Kruskal Wallis de las muestras tomadas

Nombre	X^2	df	p	ε^2
Muestras	339	2	<.001	0.0775

Luego se concluye que la disponibilidad operativa, si es afectada por las políticas de mantenimiento, es posible que un retardo mayor tenga mayor efecto en las diferencias que se presentan cuando distintas políticas son aplicadas al sistema.

4.2.5. Experimento 5. Observación de la tasa de cumplimiento del objetivo al aplicar distintas políticas de mantenimiento.

El objetivo de una flota define la razón de ser de la unión de las unidades y la percepción que un usuario del sistema pueda tener del este. El objetivo de esta prueba es observar el efecto de un conjunto de políticas de mantenimiento sobre el cumplimiento de rutas o misiones del sistema. La hipótesis plantea que ante una cadena de suministro limitada, el mantenimiento del sistema se puede ver afectado de acuerdo a la política de mantenimiento, por lo tanto, una política de mantenimiento correctivo tendría una menor tasa de cumplimiento que una política de mantenimiento preventiva. Sin embargo, la canibalización podría ayudar a mejorar la tasa de cumplimiento si acompaña una política de mantenimiento correctivo. Las variables independientes son las políticas de mantenimiento. Los parámetros son la tasa de abastecimiento del inventario, el retardo de tiempo en el suministro de componentes, y la tasa de fallos. La variable de salida es la tasa de cumplimiento del objetivo de la flota en el periodo de un año.

La Figura 4.8 muestra que el porcentaje de cumplimiento del objetivo del sistema, para el periodo de tiempo evaluado. Se observa que la política de mantenimiento preventivo no cumple con el objetivo en un 5%, el mantenimiento correctivo en un 16% y la combinación de canibalización con correctivo en un 12%. Luego, el porcentaje de cumplimiento de la política de mantenimiento correctivo es comparativamente menor que con una política de mantenimiento preventivo alrededor de 11%. Sin embargo, también es apreciable que el porcentaje de cumplimiento es mayor en 4% con una política de mantenimiento correctivo más canibalización, teniendo en cuenta la presencia de un retardo en el suministro de componentes.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

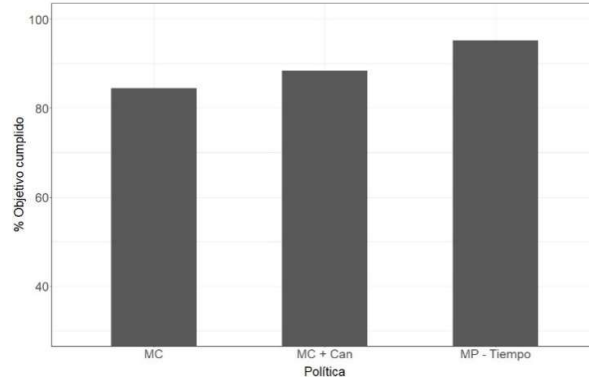


Figura 4.8. Tasa de cumplimiento del objetivo del sistema

4.2.6. Experimento 6. Observación del efecto sobre los costos del sistema frente a distintas políticas de mantenimiento.

El objetivo de este experimento es observar el efecto sobre los costos del sistema, a distintas políticas de mantenimiento. La hipótesis indica que para una política de mantenimiento preventivo los costos por componentes y mantenimiento serán mayores que para una política de mantenimiento correctivo, de igual manera una política de mantenimiento correctivo más canibalización tendrá mayores costos de mantenimiento, que una de solamente correctivo. Las variables de entrada son las políticas de mantenimiento, los parámetros fijos son la tasa de abastecimiento del inventario, el retardo de tiempo de suministro de componentes, y la tasa de fallos. Las variables de salida son los costos por componentes y horas de mantenimiento.

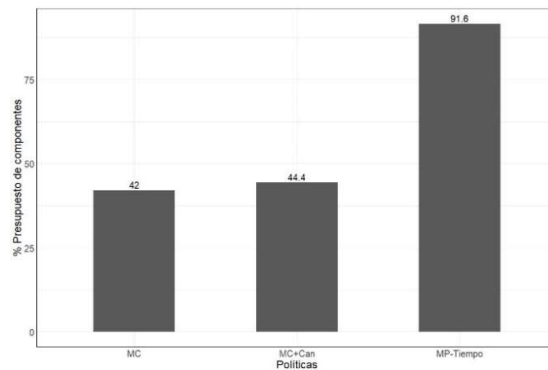


Figura 4.9. Costos del sistema de mantenimiento

La Figura 4.9 muestra una comparativa de los costos de mantenimiento. Se puede observar una diferencia apreciable entre los costos de utilizar una política de mantenimiento preventiva y las de correctivo de aproximadamente un 50% mayor. La gráfica muestra un incremento del 2% en el costo por componentes entre una política de mantenimiento correctivo y otra de correctivo más canibalización. Esto confirma que, al reutilizar componentes usados, los costos por componentes se deben mantener constante o crecer muy poco con respecto al consumo de componentes con solo mantenimiento correctivo.

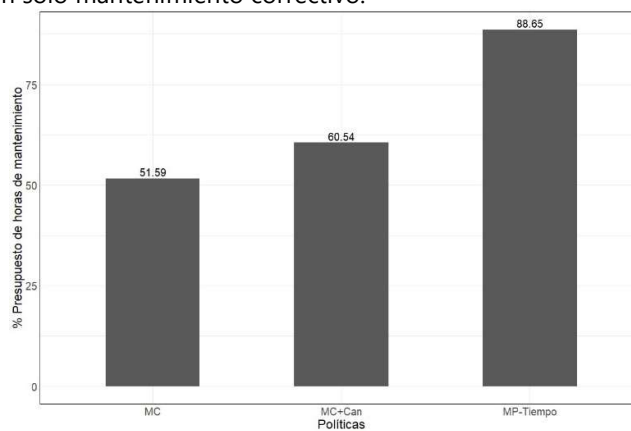


Figura 4.10. Costos del sistema de mantenimiento

De igual la Figura 4.10 muestra el costo del mantenimiento para las tres políticas de entrada. Como se esperaba el costo del mantenimiento preventivo es mayor en un 37% que la política de mantenimiento correctivo y un 28% mayor que la política de mantenimiento correctivo más canibalización. Sin embargo, es mucho más interesante la diferencia entre las políticas de correctivo y correctivo más canibalización habiendo una diferencia de un 13% más de costos cuando se aplica canibalización, validando el efecto acerca de que la canibalización incrementa la labor de mantenimiento.

4.2.7. Experimento 7. Observación del efecto sobre la tasa de disponibilidad operacional de la variación del inventario inicial.

La cantidad de componentes de repuesto incide en los tiempos logísticos de mantenimiento del sistema, como se observó en la sección 4.2.4. El objetivo de este experimento es observar el efecto sobre la tasa de disponibilidad de las políticas de mantenimiento correctivo y correctivo con canibalización ante una variación en el inventario de componentes inicial. La hipótesis indica que, si se tienen más compo-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

En el inventario inicial, el sistema va a ser más inmune a problemas en la cadena de suministros, de igual manera, si se tiene pocos componentes en el inventario el sistema va a tener una tasa de disponibilidad menor que se notará afectada cuando la canibalización esté presente. Las variables de entrada son el número de componentes inicial y las políticas. Los parámetros fijos son la tasa de abastecimiento del inventario, el tiempo de retardo de suministro de componentes, y la tasa de fallos. La variable de salida es la tasa de disponibilidad del sistema.

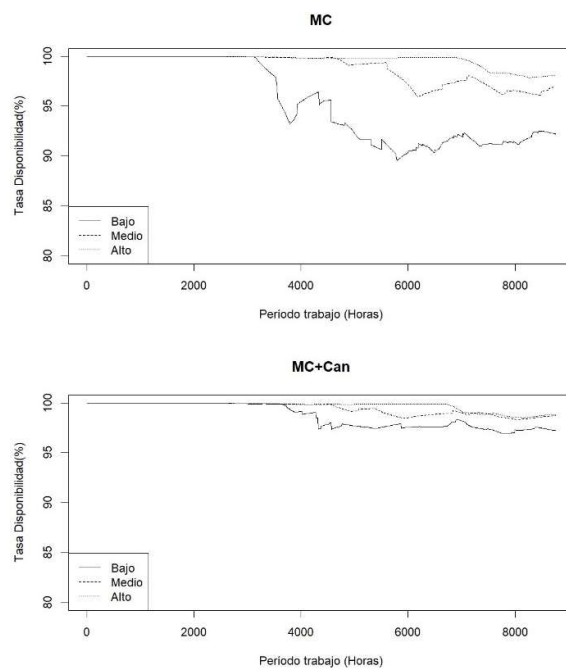


Figura 4.11. Variación del número de componentes iniciales

La Figura 4.11 muestra que la tasa de disponibilidad es menos afectada si el inventario inicial es mayor, tanto como si se aplica canibalización o sin ella. De igual manera, hay un mayor efecto negativo en la disponibilidad para inventarios bajos, aplicando solo mantenimiento correctivo. También se observa una mejora en la disponibilidad con políticas de canibalización haciendo la tendencia más suave aún en presencia de un bajo stock inicial, incrementando la resiliencia del sistema. Por otro lado, la figura inferior, muestra que cuando se disminuye la cantidad de componentes iniciales, el comportamiento de la disponibilidad tiende a decaer con el tiempo, esto debido a que se puedan realizar más tareas de canibalización en pe-

riodos de tiempo más cortos llegando a una saturación del sistema ante la escasez de componentes.

Las medidas descriptivas apoyan las apreciaciones realizadas anteriormente, para la política de solo mantenimiento correctivo existe una diferencia apreciable entre iniciar con un inventario alto o bajo. Esta diferencia es menor si se utiliza canibalización, dado su efecto de limitar la falta de inventario en la disponibilidad del sistema. También se observa una cierta simetría en la distribución de los datos debido a que las medias tienen el mismo valor que las medianas. Aunque en la política de correctivo con bajo inventario si existe una mayor diferencia, esto se debe a la dispersión de los datos indicando valores atípicos en la muestra, esto debido a una mayor cantidad de unidades que pueden entrar en fallo y quedarse por más tiempo en ese estado por falta de componentes. La Tabla 4.12 resume las medidas descriptivas obtenidas.

Tabla 4.12 Medidas estadísticas experimento 7

Medida	MC			MC + Can		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
N	1459	1459	1459	1459	1459	1459
Media	95.3	98.8	99.6	98.3	99	99.1
Mediana	94.1	99.8	99.9	98	99	99.9
Varianza	15.7	2.14	0.42	1.85	0.61	0.46

En este análisis, se recurre a la prueba Mann-Whitney U la cual permite indicar si existen diferencias significativas entre dos muestras. La hipótesis nula indica que las distribuciones de ambas poblaciones son iguales. Para esta prueba se ha utilizado un nivel de significancia del 5% y se mide el tamaño del efecto mediante el indicador *Rank Biserial correlation*, el cual brinda una estimación de la correlación entre las variables y permite interpretar la magnitud de las diferencias encontradas entre las muestras. Esta prueba se ha utilizado para identificar diferencias entre pares de muestras, comparando cada tipo de muestra bajo distintas políticas. Por ejemplo, se ha analizado cómo la tasa de disponibilidad responde a un inventario bajo de componentes, comparando entre las estrategias de mantenimiento correctivo y la combinación de mantenimiento correctivo con canibalización, los resultados para cada caso de inventario son mostrados en la Tabla 4.13.

Los resultados muestran que en los tres casos el p-valor es menor al nivel de significancia. Por lo tanto, la hipótesis nula debe ser rechazada, indicando que existen diferencias estadísticamente significativas. No obstante, la medida del efecto indica que hay una mayor magnitud en la diferencia cuando el inventario de componentes es medio, esto indica que, si bien la aplicación de canibalización genera

un cierto efecto sobre la tasa de disponibilidad, este efecto es mayor si se tiene un inventario medio. De igual forma, se puede concluir que para un inventario alto o bajo los efectos de la canibalización son menores.

Tabla 4.13. Prueba Mann-Whitney U a las muestras del experimento 7

Nombre	p	Tamaño del efecto
		Rank biserial correlation
Bajo	<.001	0.369
Medio	<.001	0.130
Alto	<.001	0.0664

4.2.8. Experimento 8. Observación del efecto sobre la tasa de disponibilidad operacional a la variación del número de unidades.

Esta prueba tiene como objetivo evaluar la tasa de disponibilidad ante cambios en el tamaño de la flota. Las flotas son utilizadas generalmente en sistemas de transporte de diferentes ámbitos (Carga, pasajeros, etc.), en ocasiones es necesario planear como los cambios en el tamaño de la flota presentan oportunidades de mejora en costos del sistema de mantenimiento. Las variables de entrada son el número de unidades y las políticas de mantenimiento correctivo y correctivo más canibalización. Los parámetros fijos son la tasa de abastecimiento del inventario, el tiempo de retardo en el suministro de componentes, y la tasa de fallos. La variable de salida es la tasa de disponibilidad del sistema.

La Figura 4.12 muestra que la disponibilidad del sistema es menor cuando solo se aplica una política de mantenimiento correctivo puro. Sin embargo, curiosamente se muestra como existe una disponibilidad cercana al 100% con solo 5 unidades para una política de mantenimiento correctivo, indagando más en esta respuesta se puede inferir que la tasa de disponibilidad refleja la operatividad del sistema desde el número de fallos esta consideración hace que con pocas unidades la cantidad de misiones disminuya y, por lo tanto, las unidades recorran menos distancias y el tiempo de uso sea menor, siendo este efecto bien reflejado por el modelo.

Para mostrar gráficamente este comportamiento, la Figura 4.13 presenta la tasa de cumplimiento del objetivo, donde se puede observar que con 5 unidades solo se alcanza un 50% del objetivo en los dos casos de las políticas. También se puede observar que la aplicación de la canibalización para el caso de 10 unidades ayuda a limitar los valores atípicos, mejorando la concentración de los datos, indicando un mejor cumplimiento del objetivo. De igual manera, el caso de 10 unidades refleja un mayor cumplimiento del objetivo y menos valores atípicos cuando se utiliza canibalización.

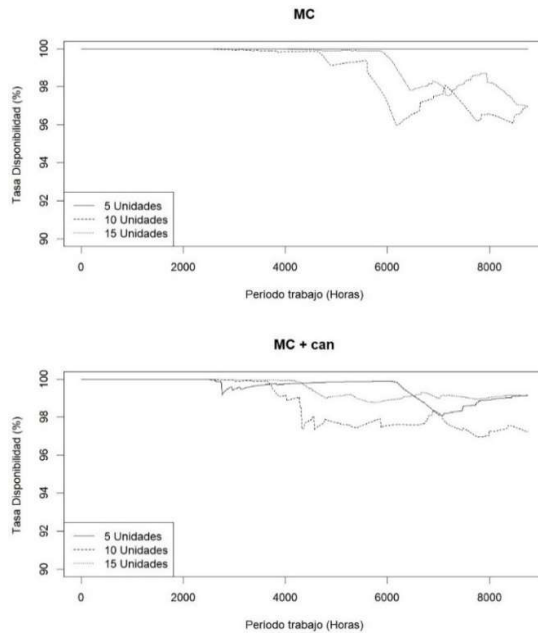


Figura 4.12. Tasa de disponibilidad de distintos tamaños de flota

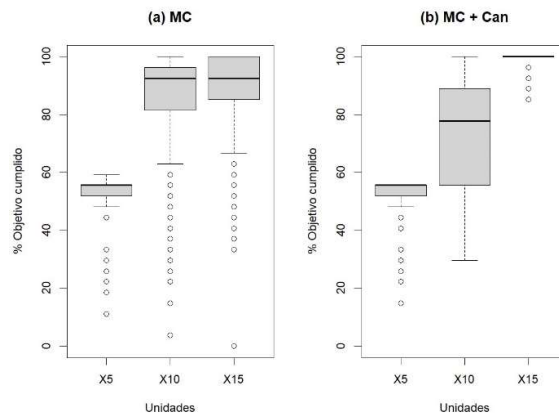


Figura 4.13. Cumplimento de objetivo de distintos tamaños de flota

Retomando la Figura 4.12 se muestra cómo una política de canibalización no es aplicable cuando hay pocas unidades que componen la flota, el comportamiento irregular de la tasa de disponibilidad muestra que comparativamente una flota podría tener una tasa de disponibilidad más baja cuando se tienen 10 unidades que cuando hay solo 5, esto conlleva interpretar que el efecto de la canibalización es sensible al número de unidades que componen el sistema.

Las medidas descriptivas muestran que, aunque las medias son muy cercanas a un valor máximo de disponibilidad, esta medida no debe ser tomada en este caso como un reflejo de un porcentaje mayor de cumplimiento del objetivo del sistema. Sin embargo, sí se observa una distribución de los datos muy cercana a los valores de la media, aunque presentando un mayor grado de dispersión para los datos tomados en la política de mantenimiento correctivo, indicando una mayor probabilidad que las unidades permanezcan en fallo por más tiempo. La Tabla 4.14 resume las medidas descriptivas obtenidas.

Tabla 4.14. Medidas estadísticas experimento 8

Medida	MC			MC + Can		
	5 uni	10 uni	15 uni	5 uni	10 uni	15 uni
N	1459	1459	1459	1459	1459	1459
Media	100	98.8	99.4	99.5	98.7	99.5
Mediana	100	99.8	99.8	99.8	98.3	99.7
Varianza	0	2.14	0.876	0.299	1.41	0.215

Sin embargo, las medidas de la Tabla 4.14 no son concluyentes ni permiten indicar una diferencia entre la aplicación de las políticas comparadas. Para complementar el análisis de nuevo se realiza una prueba Mann-Whitney U la cual tiene como hipótesis nula que no existe diferencia entre las distribuciones de dos muestras comparadas, se utilizara un nivel de significancia del 5%. Para medir la fuerza si existen diferencias se utilizará el indicador *Rank Biserial correlation*, el cual brinda una estimación de la correlación entre las variables y permite interpretar la magnitud de las diferencias encontradas entre las muestras. Los valores obtenidos son mostrados en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Prueba Mann-Whitney U a las muestras del experimento 7

Unidades	p	Tamaño del efecto
		Rank biserial correlation
5	<.001	0.713
10	<.0672	0.00895
15	<.015	0.0506

Con un p-valor de 0.672 se muestra que no existen diferencias significativas cuando el número de unidades es 10, esto indica poca sensibilidad en la tasa de disponibilidad operacional para este tamaño de flota. Por otro lado, para una flota de tamaño superior, el p-valor de 0.015 indica que, si hay una diferencia estadísticamente significativa, aunque la potencia de esas diferencias no es tan fuertes dado el valor del indicador de 0.0506. Esto podría sugerir que aún es necesario optimizar la canibalización para que tenga un mayor efecto en la tasa de disponibilidad. Por último, para un tamaño pequeño de flota, la prueba indica que hay una diferencia significativa, con un valor fuerte en esa diferencia. Sin embargo, este resultado debe ser contrastado con el porcentaje de misiones completadas, dado que un tamaño de flota pequeño solo permite alcanzar un 50 % del objetivo.

4.2.9. Experimento 9. Comparación de transitorios del sistema cuando se aplican actividades de mantenimiento.

La aplicación de políticas de mantenimiento sobre el sistema, hace que este reaccione a esas medidas, generalmente la toma de decisiones se realiza cuando las medidas se han asentado en el tiempo y el sistema está en un estado estable. Sin embargo, las acciones de mantenimiento también pueden ser evaluadas desde el transitorio que generan estas acciones. Estudiar como el sistema se ha ido acomodando a los cambios que se generan por el mismo funcionamiento inherente del sistema y las correcciones que realiza el sistema de mantenimiento, es posible mediante este modelo de simulación. El objetivo de este experimento es observar el comportamiento de los transitorios del sistema cuando se aplica una política de mantenimiento correctivo y correctivo más canibalización. Las variables de entrada son las políticas de mantenimiento estudiadas y las variables de salida la tasa de disponibilidad y los indicadores MTBF y MTTR. La hipótesis plantea que si se tiene una política de canibalización se puede mejorar la respuesta transitoria de la disponibilidad generando un menor sobre impulso en el sistema, de igual manera el MTBF tendrá un mayor sobre impulso debido a la actuación de la canibalización y también un mayor sobre impulso en el MTTR debido a su afectación en la cantidad de horas de mantenimiento que consume.

La Figura 4.14 ilustra la evolución temporal de la disponibilidad en una flota, durante un período de cinco años, bajo la aplicación de políticas de mantenimiento. Se contrasta la respuesta de una política de mantenimiento correctivo (MC) frente a una combinada de mantenimiento correctivo y canibalización (MC+Can). La respuesta transitoria, marcada por la actividad operativa del sistema y los procedimientos de mantenimiento, muestra que la implementación exclusiva de CM conduce a una caída inicial más pronunciada en la disponibilidad. Por otro lado, la

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

estrategia que incorpora la canibalización (MC+Can) limita esta caída, resultando en un perfil de recuperación más rápida.

En efecto, la política combinada (MC+Can) exhibe un sobre pico reducido aproximadamente en un 3% en comparación con el mantenimiento correctivo por sí solo, lo que implica que la canibalización contribuye a una menor fluctuación en la disponibilidad durante el espacio de tiempo que la política está siendo aplicada al sistema. Este efecto amortiguador es indicativo de una mejora en la resiliencia operativa del sistema, facilitando una recuperación más rápida cuando se ha aplicado la política de mantenimiento.

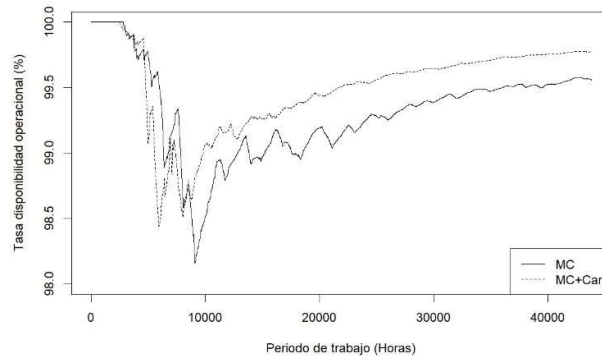


Figura 4.14. Respuesta transitoria de la disponibilidad del sistema

La Figura 4.15 ofrece una visualización del transitorio del Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) para una flota, al aplicar distintas políticas de mantenimiento. Se compara directamente el mantenimiento correctivo estándar (MC) con una política que integra el mantenimiento correctivo y la canibalización (MC+Can). La curva correspondiente al MC+Can revela un incremento en el MTBF de aproximadamente un 5% en comparación con la política de MC por sí sola, lo que indica un menor periodo de inactividad del sistema.

Este aumento del MTBF utilizando canibalización muestra una respuesta más ágil del sistema a los fallos. La política combinada no solo mejora la resiliencia del sistema frente a los contratiempos en el abastecimiento de componentes, sino que también refleja una recuperación operativa más eficiente. La rápida reincorporación de unidades canibalizadas minimiza el tiempo de inactividad, lo que se traduce en una mayor continuidad y confiabilidad en el servicio de la flota.

La mejora en el MTBF ilustra la eficacia de la canibalización, en términos de la disponibilidad inmediata de componentes, limitando los efectos de un entorno cambiante del sistema en un recurso tan crítico como son los componentes de repuesto.

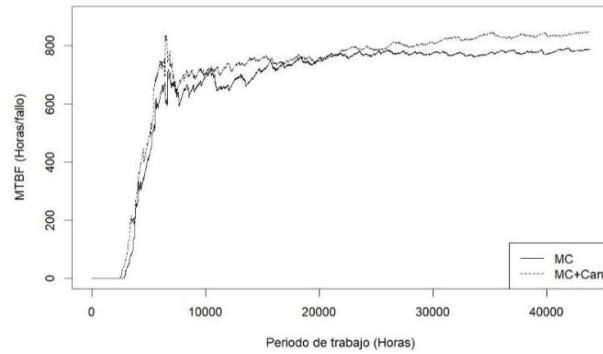


Figura 4.15. Respuesta transitoria del MTBF del sistema

El tiempo medio de reparación permite medir las habilidades y la eficiencia de las tareas de mantenimiento. La literatura indica que las tareas de canibalización incrementan los tiempos de mantenimiento. La Figura 4.16 refleja un mayor sobre impulso en el uso de una política de mantenimiento correctivo con canibalización. En comparación, con una política de mantenimiento correctivo, esta diferencia de menos un 20% se marca claramente cuando el sistema alcanza un estado estable y de un 30% durante el pico del transitorio.

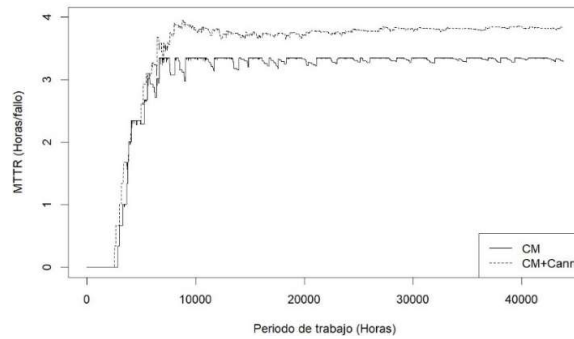


Figura 4.16. Respuesta transitoria del MTTR del sistema

5 Optimización y control óptimo

Esta etapa del diseño de experimentos se enfoca en utilizar el modelo como herramienta para la toma de decisiones. El proceso comienza con una optimización en dos fases. Inicialmente, el sistema se ajusta para operar con valores óptimos bajo condiciones normales de funcionamiento de la flota, utilizando una estrategia basada en modelos. En la segunda fase, se introduce aleatoriedad en el entorno del sistema para observar cómo se adapta a estas nuevas condiciones. Por lo tanto, los experimentos están diseñados para crear situaciones que desafíen al sistema a adaptarse, permitiendo así identificar parámetros que orienten al experto en mantenimiento sobre decisiones pertinentes respecto a los recursos de mantenimiento.

5.1. Proceso de optimización

Como se mencionó anteriormente, la optimización emerge como una herramienta fundamental en la mejora continua de los procesos de mantenimiento y en la eficiencia de la asignación de recursos. Los sistemas de mantenimiento de flotas enfrentan un desafío operacional complejo debido a la cantidad de unidades implicadas. La gestión efectiva de estas flotas requiere decisiones estratégicas que maximicen la disponibilidad de las unidades mientras mantienen los costos dentro de parámetros razonables y cumplen con los objetivos operativos establecidos. En este contexto, seleccionar políticas de mantenimiento adecuadas es crítico, ya que la variedad de opciones disponibles puede generar incertidumbre sobre cuál contribuirá más efectivamente al rendimiento del sistema. Además, la gestión del in-

ventario de componentes de repuesto juega un papel crucial en el desempeño eficiente de la flota, donde las deficiencias pueden resultar en períodos de escasez de componentes críticos, afectando directamente la disponibilidad de las unidades y, por ende, la calidad del servicio ofrecido.

En este escenario, la canibalización emerge como una estrategia potencialmente valiosa. No obstante, la decisión de implementar políticas de canibalización introduce nuevas incógnitas, especialmente respecto a cuándo y cómo aplicarlas óptimamente para no comprometer la integridad y eficiencia del sistema de mantenimiento. La aplicación de modelos de optimización permite parametrizar y analizar sistemáticamente los múltiples factores involucrados en la gestión de la flota, incluidas las políticas de mantenimiento, la gestión de inventarios y las estrategias de canibalización. Este enfoque ayuda a los gestores de mantenimiento a identificar soluciones que equilibren efectivamente la disponibilidad de las unidades, los costos operativos y el cumplimiento de los objetivos de la flota.

Este trabajo introduce un nuevo método de optimización en dos etapas. La primera etapa emplea un algoritmo de optimización para ajustar los parámetros del sistema a las condiciones estables del entorno, garantizando así la eficiencia de costos y una configuración inicial adecuada de inventario, mantenimiento preventivo y, en algunos casos, canibalización. La segunda etapa se centra en un control dinámico de la optimización, donde el sistema ya optimizado enfrenta condiciones externas cambiantes. Estos cambios pueden introducir perturbaciones que el sistema básico no puede gestionar adecuadamente, desencadenando una nueva ronda de ajustes por parte del controlador para adaptarse a estas variaciones. Este proceso de optimización continua permite una adaptación del sistema a entornos aleatorios, asegurando que el sistema mantenga su eficacia frente a cambios imprevistos y superando las limitaciones de las estrategias de gestión tradicionales. Este ciclo de optimización y readaptación puede repetirse indefinidamente para responder a las fluctuaciones del entorno, apoyando al gestor de mantenimiento a tomar decisiones más ajustadas al estado del sistema.

En consecuencia, en las secciones siguientes, se muestra cómo se llevó a cabo un proceso de optimización que evalúa la interacción de distintas políticas con una política de canibalización y encontrar posibles soluciones que sirvan a un gestor de mantenimiento como una herramienta de toma de decisiones.

5.1.1. Algoritmo de optimización.

La optimización utiliza un algoritmo genético llamado WAPTIA, el cual es una implementación en LabVIEW del algoritmo también genético llamado Pikaia propuesto por Paul Charbonneau y Barry Knapp. Este último estaba descrito en Fortran 77 y surgió como un algoritmo de búsqueda y optimización para resolver problemas de

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

optimización donde el espacio de soluciones es grande o complejo y no diferenciable, ya que no utiliza el método del gradiente, su simplicidad lo hace útil para trabajar con funciones complicadas o quizá mal definidas. Como se presentó anteriormente WAPTIA es una implementación de Pikaia propuesto por Wojciech Golebiowski, algunas de las características del algoritmo son mencionadas a continuación.

- Usa una codificación del genotipo en decimal
- Utiliza un operador de cruce de dos puntos, aunque mediante una función aleatoria puede usarse un operador de cruce de un punto.
- Es posible ajustar la tasa de mutación dinámicamente después de cada selección de una generación
- Se utiliza reemplazo completo de la población como plan de reproducción.
- Se aplica elitismo
- Tiene una función que detiene la optimización cuando el criterio de aptitud se cumple.

Las adaptaciones realizadas al código original fueron la normalización de los valores de los genes, requerimiento necesario para homogeneizar las distintas unidades de medida que presentan los genes, y también se modificó la forma en la cual el elitismo es llevado a cabo por el algoritmo, insertando el mejor cromosoma de la generación evaluada en una posición privilegiada de la siguiente generación antes del cruce, pero sin que vuelva a ser evaluado. La parametrización del algoritmo, se ha adaptado a los genes de la población inicial, el resto de parámetros son propuestos por el desarrollador de WAPTIA y en las pruebas realizadas aún no ha sido necesario modificarlos. La Figura 5.1 muestra la interfaz del sistema con los parámetros definidos para el algoritmo.

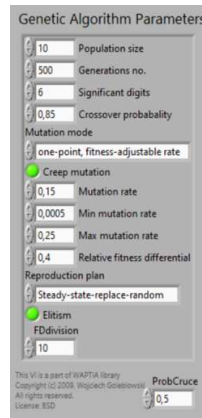


Figura 5.1. Interfaz con los parámetros de configuración de WAPTIA.

Los genes de un cromosoma contienen un conjunto de parámetros a los cuales se les quiere encontrar un valor óptimo o suficientemente bueno ante el problema en cuestión. En este caso, el vector de parámetros de interés pertenece a alguno de tres grupos: Optimizar el inventario inicial o número de componentes inicial incluido el personal, identificar los umbrales del mantenimiento preventivo y optimizar los parámetros asociados a la política de canibalización, la disposición de los genes en el cromosoma se muestra en la Figura 5.2.

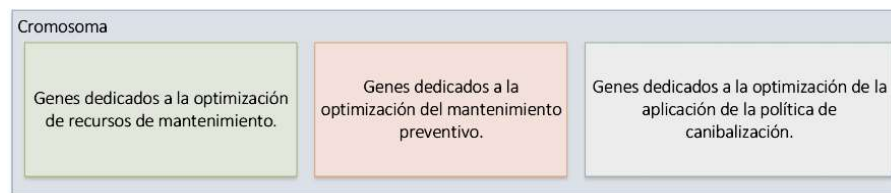


Figura 5.2. Cromosoma del proceso de optimización.

5.1.1.1. Función de ajuste

La función de ajuste fue diseñada para reflejar los objetivos fundamentales de un gestor de mantenimiento. Uno de ellos son los costos del sistema mencionados en la fase preliminar del modelo: los costos de mantenimiento y los costos de los componentes. Para mejorar la capacidad del modelo y proporcionar una perspectiva más completa, se incorporaron dos variables adicionales: el costo de almacenamiento de las piezas de repuesto y el costo de operación no servida. Este último se refiere a las pérdidas incurridas cuando una misión programada no se ejecuta o no se completa satisfactoriamente, afectando directamente la eficiencia en la prestación del servicio.

Estos costos se agruparon finalmente en dos categorías para facilitar su análisis y optimización: los costos directamente relacionados con la operación, que incluyen el mantenimiento y la adquisición de componentes de repuesto, y los costos administrativos, que abarcan aspectos relacionados con la gestión operativa y el almacenamiento de componentes. Este enfoque multidimensional permite a los gestores de mantenimiento tener una comprensión más amplia y detallada de los factores que influyen en la eficiencia y coste-efectividad del sistema de mantenimiento, facilitando la toma de decisiones estratégicas enfocadas en la optimización global del rendimiento y la reducción de costos. En consecuencia, la función de ajuste presentada en la Ecuación 5.1, tiene un componente orientado a maximizar la cantidad de rutas completadas (R_{com}) con relación al objetivo total del sistema (R_{obj}). De igual manera, se busca minimizar los costos del sistema tanto operativos (C_{op}) como administrativos (C_{adm}).

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

$$f_{(C,R)} = \alpha * \left(\frac{R_{com}}{R_{obj}} \right) - \beta * \left[\left(\frac{1}{C_{op}} \right) + \left(\frac{1}{C_{Adm}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 5.1}$$

El algoritmo WAPTIA utiliza una función Strictly Typed Vi o función estrictamente definida para inserta la función de ajuste del algoritmo, para este estudio la función original de WAPTIA fue redefinida para que los parámetros requeridos en la Ecuación 5.1 fueran agregados.

5.1.2. Descripción del caso de estudio

La arquitectura de la unidad es la misma que la mostrada en la Figura 4.2, como una lección aprendida de los resultados de la etapa anterior, se concluyó que la cantidad de unidades es un factor que favorece la canibalización, por esto, el sistema propuesto está conformado ahora de 25 unidades, y nuevamente representan una flota móvil con enrutamiento. Para el enrutamiento el sistema cumple con la disciplina de ruta mostrada en la Figura 5.3. La disciplina muestra la realización de un total de 100 misiones diarias, con un promedio de uso de 4 rutas por unidad durante el día. La duración de ruta (Tr) es de 180 minutos y la logística de carga o pasajeros (Td) es de 120 minutos.

Td = Tiempo de despacho Tr = Tiempo de Ruta

Unidades	Tiempos									
	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr
1	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
2	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
3	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
4	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
5	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
6	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
7	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
8	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
9	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
10	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr		
11		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
12		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
13		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
14		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
15		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
16		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
17		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
18		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
19		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
20		Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	
21			Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr
22			Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr
23			Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr
24			Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr
25			Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr	Td	Tr

Figura 5.3. Disciplina de ruta caso de estudio.

Posteriormente, se definieron los genes que conforman los cromosomas de acuerdo a la distribución mostrada en la Figura 5.2 conformando así la población inicial. La Tabla 5.1, describe un cromosoma con la definición de cada uno de sus genes.

Tabla 5.1. Descripción de los genes del algoritmo.

Gen	Descripción	Reglas
1	Componentes iniciales C1	Combinar factores multiplicadores por unidad, por ejemplo, dos componentes por tipo de pieza por unidad.
2	Componentes iniciales C2	
3	Componentes iniciales C3	
4	Componentes iniciales C4	
5	Personas Mantenimiento (Horas)	Con un tope máximo de una persona por 2 unidades
6	Umbral inicio de mantenimiento Componente 1	Valor adicional al valor mínimo de tiempo libre de fallo del componente.
7	Umbral de inicio de mantenimiento Componente 2	
8	Umbral de inicio de mantenimiento Componente 3	
9	Umbral de inicio de mantenimiento Componente 4	
10	Criterio de aplicación canibalización	Con un rango de 25 a 75 % porcentaje asociado al tamaño de flota en fallo.
11	Cadencia de la canibalización	Cada cuanto se aplica una canibalización (Horas)
12	Tiempo de rotación	Periodo de rotación de las plataformas <i>bird</i> en un rango de 30 a 180 días

Con los parámetros presentados se finaliza el proceso de configuración del algoritmo de optimización.

5.1.3. Pruebas de verificación y validación

Se llevaron a cabo una serie de pruebas de verificación y validación para asegurar un comportamiento óptimo del algoritmo. Cada prueba está diseñada para evaluar cómo los datos y las funcionalidades de los distintos componentes del sistema

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

operan correctamente. Este proceso es esencial para garantizar la eficacia y fiabilidad del algoritmo en su conjunto.

5.1.3.1. Verificación de la evaluación de un conjunto de cromosomas sobre el modelo de mantenimiento.

Esta prueba de verificación se centra en confirmar que el número de cromosomas evaluados, corresponde al número configurado en la entrada *población inicial*, y que es generado y evaluado por el algoritmo genético. Para ello, desde la interfaz de configuración de parámetros, se establece un valor específico de 8 cromosomas para la población inicial. Y posteriormente, se activa el proceso en el cual se espera que el algoritmo genético proceda con la generación de las simulaciones requeridas. En general esta prueba unitaria se realiza al algoritmo para observar su comportamiento con respecto al sistema y la integración con el modelo de simulación, la Figura 5.4 muestra la configuración del valor de la población inicial.

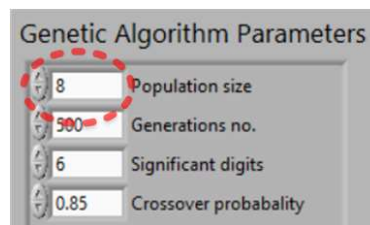


Figura 5.4. Tamaño de población inicial.

La Tabla 5.2 presenta en la parte superior los cromosomas que fueron evaluados y en la parte inferior los valores de los factores de la función de ajuste que ingresaron, tales como costo de los componentes, mantenimiento, almacenamiento y operación no servida, así como el número de misiones completadas.

Tabla 5.2 Población inicial y resultados obtenidos de la simulación.

Gen	Cromosomas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	373	1583	1483	1383	1283	1183	1083	983
2	302	2781	2581	2381	2181	1981	1781	1581
3	48	421	401	381	361	341	321	301
4	27	209	189	169	149	129	109	89
5	7	6	7	8	9	10	11	12
6	36	20	30	20	20	20	20	20
7	384	78	1180	3004	1935	2043	525	1269
8	705	5047	4100	5889	3440	590	2910	4223
9	164790	175832	171084	167786	174795	171454	173066	167955

Valores de los parámetros de la función de ajuste obtenidos								
Costo Componentes	646300	2222900	2263800	2379400	2167300	2232100	2115300	2215700
Costo Mantenimiento	483560	1035610	880856	1345700	1492360	1381030	1311270	1606460
Costo Almacenamiento	1242180	10702700	12127800	8520810	7484240	6374200	6736110	5931910
Cotos operación no servida	1412800	533440	912960	1177120	616160	883280	754400	1163280
Rutas completadas	165528	176600	171771	168329	175261	172157	173653	168062

A continuación, la Tabla 5.3 muestra una población generada donde se quiere confirmar que los valores de los genes en generaciones posteriores presentan valores de alelos aceptables.

Tabla 5.3. Verificación de un conjunto de cromosomas generado por el algoritmo.

Gen	Cromosoma							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	373	353	12	1483	950	980	173	173
2	302	302	5	2578	1381	7	302	302
3	48	48	5	418	321	5	52	48
4	27	27	222	209	109	229	27	27
5	7	6	5	6	11	7	6	7
6	384	384	377	1206	3562	343	421	384
7	705	705	2032	4100	2910	2035	705	705
8	202202	1840220	5460	0	0	0	202220	182200
9	337774	334734	0	0	91	152000	337774	337774

Por último, se verifica que los valores entregados a la función de ajuste se están insertando correctamente. Para ello se toman un valor de la Tabla 5.3 y se contrasta con los reportes generados de cada simulación. Para el parámetro costo de componentes se revisa en el reporte el número de componentes comprados y manualmente se calcula el costo. Esto se compara con el valor que ingresará en el algoritmo, siendo en este caso igual el valor. Esta comparación es mostrada en la Tabla 5.4.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 5.4. Contraste de valores entregados al algoritmo.

Parámetro	Cromosoma	Valor Tabla 5.3	Cálculo	Observaciones
Costo Componentes	7	211530 0	<p>La cantidad de componentes comprados por cada tipo es así.</p> <p>3249 C1 precio 100 = 324900 3562 C2 precio 200 = 712400 1605 C3 precio 400= 642000 545 C4 precio 800=436000 Total = 2115300</p>	Los precios de los componentes fueron definidos en la Tabla 8, este valor define el número de componentes adquiridos, no los consumidos.

5.1.3.2. Verificación del cálculo de función de ajuste y selección del mejor cromosoma.

Esta prueba verifica que el cálculo de la función de ajuste se está realizando satisfactoriamente, para ello se ha completado la simulación de una generación de 10 cromosomas y se han capturado los datos de los componentes de la función de ajuste, manualmente calculando el valor de la función de ajuste, la Tabla 5.5 muestra los resultados de esta prueba.

Tabla 5.5. Validación de los valores de la función de ajuste.

Genes	Cromosomas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costo Componentes	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Costo mantenimiento	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Costos Administrativos	0.85	0.80	0.81	0.85	0.82	0.81	0.80	0.83	0.85	0.85
Objetivo	0.97	0.95	0.96	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97	0.97
Valor de la función de ajuste										
Obtenida	0.94	0.93	0.93	0.95	0.94	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94
Calculada	0.94	0.93	0.93	0.95	0.94	0.93	0.93	0.94	0.94	0.94

Comparando los valores obtenidos y calculados se encuentra que a la función de ajuste se le están entregando los valores correctamente y esta realiza el cálculo de la función de ajuste correctamente. También se verificó que en este caso el algoritmo ubica que el mejor cromosoma es el número 4.

5.1.3.3. Verificación de la evolución de la función de ajuste para varias generaciones.

El objetivo de esta prueba es comprobar que el algoritmo es capaz de encontrar mejores soluciones a medida que van pasando las generaciones. Como variables de entrada se tiene una tasa de fallo muy alta para que las unidades interactúen más rápidamente con el sistema de mantenimiento, el inventario, la población inicial, los parámetros de optimización, como se ha indicado anteriormente y las políticas de mantenimiento correctivo y preventivo al mismo tiempo. La salida es el valor obtenido de la función de ajuste. El periodo de evaluación es de 10 días con una tasa de fallos alta. La hipótesis indica que, si el algoritmo está bien configurado y codificado, la función de ajuste arroja un mejor resultado en cada generación o en el peor de los casos el valor será el mismo que la última generación evaluada. La Tabla 5.6 muestra los valores de la función de ajuste para un conjunto de 20 generaciones.

Tabla 5.6. Función de ajuste de un conjunto de generaciones.

Generación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Función Ajuste	0,35	0,58	0,69	0,72	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
Generación	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Función Ajuste	0,76	0,76	0,76	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79

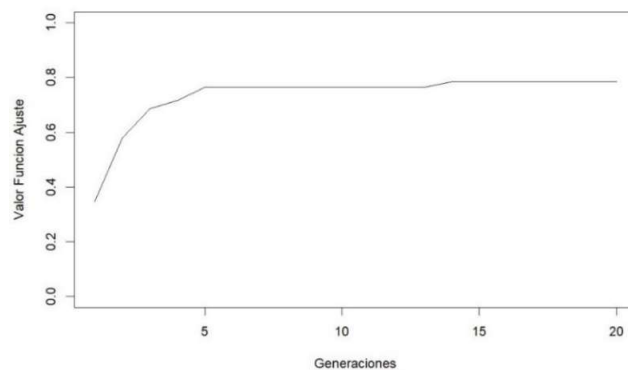


Figura 5.5. Comportamiento de la función de ajuste

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Como se puede observar, en los valores obtenidos para las generaciones evaluadas, el algoritmo ofrece un mejor ajuste, la Figura 5.5 muestra el comportamiento de la función de ajuste.

5.1.3.4. Evaluación del algoritmo con respecto a α y β .

Esta evaluación está orientada a observar el comportamiento del algoritmo de optimización a los pesos de la función de ajuste α y β con respecto a la disponibilidad, esta prueba se realizó para 18 generaciones, la cual evalúa 10 cromosomas por generación y los valores de α y β son de 0.5 cada uno. El objetivo es evidenciar la iteración del algoritmo en búsqueda de mejores cromosomas candidatos. La Figura 5.6 muestra como el algoritmo itera paulatinamente durante cada generación y el ajuste que se va generando a lo largo de las iteraciones, permitiendo observar como el sistema evoluciona hacia un estado más óptimo en concordancia entre los costos y la disponibilidad operativa.

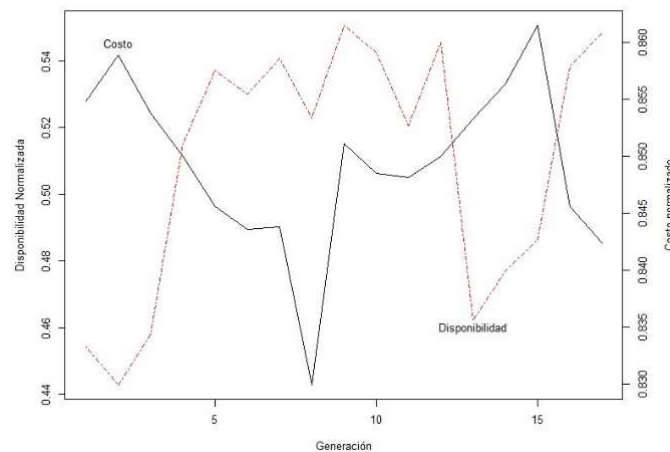


Figura 5.6. Iteración del algoritmo de optimización con respecto a la disponibilidad

5.1.3.5. Evolución de los Indicadores mediante la función de ajuste.

La función de ajuste para este caso fue orientada a prevalecer los costos sobre la cantidad de rutas generadas, con pesos de $\alpha=0.3$ y $\beta=0.7$ lo que indica un mayor ajuste sobre los costos y menos exigencia en el cumplimiento del objetivo.

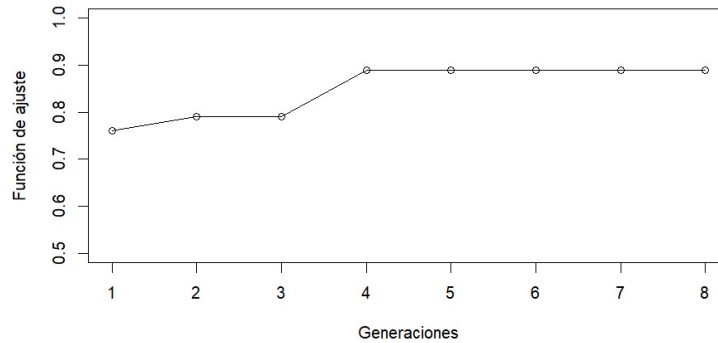


Figura 5.7. Respuesta de la función de ajuste

La respuesta de la función de ajuste es mostrada en la Figura 5.7. La función de ajuste con los pesos mencionados indica que con la población inicial se obtiene un valor de 70.3% en la evaluación de la función de ajuste. Sin embargo, con la búsqueda realizada por el algoritmo se logra que esta medida se mejore en un 20% manteniéndose así para las últimas generaciones.

5.1.3.6. Observación de los valores de los indicadores de desempeño de los mejores cromosomas.

La respuesta de cuatro indicadores de desempeño es mostrada en la Figura 5.8. Inicialmente, la curva de disponibilidad muestra un ascenso notable, pasando de un 13% a aproximadamente un 70%. Sin embargo, esta mejora no es constante; se percibe una disminución significativa durante la primera y tercera generación, donde la disponibilidad se reduce a su mínimo. Este comportamiento indica una posible búsqueda de mejores condiciones en los umbrales de mantenimiento preventivo. En cuanto al MTBF, se observa que alcanza su valor máximo en la segunda y tercera generación, sugiriendo una fase de funcionamiento más amplia de las unidades. No obstante, esta mejora es temporal y el MTBF se reduce posteriormente, lo que podría atribuirse a una mayor utilización del mantenimiento correctivo lo que genera una demanda incremental de mantenimiento.

Este supuesto se ve respaldado por el comportamiento del MTTR que muestra su pico más alto en las mismas generaciones donde el MTBF es más bajo, indicando un incremento en el tiempo de reparación. Tal correlación subraya la importancia de acciones preventivas y correctivas oportunas en el mantenimiento de la flota.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

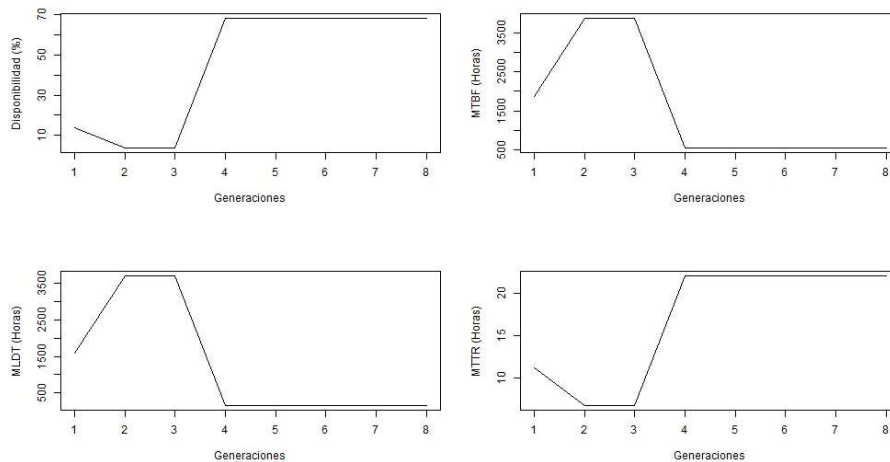


Figura 5.8. Comparación de los indicadores resultado de una fase de optimización

Finalmente, el MLDT inicialmente es elevado, lo cual puede interpretarse como una consecuencia de un inventario inicial insuficiente y retrasos en la cadena de suministro de componentes. A medida que avanzan las generaciones, se evidencia una mejora en este indicador, lo que refleja un ajuste exitoso en la gestión de inventarios en presencia de un retardo logístico, reduciendo así los tiempos de demora y contribuyendo a una mejor disponibilidad de la flota.

5.1.3.7. Comparación entre dos configuraciones de α y β

En el presente experimento, se examina la influencia de diferentes configuraciones de los parámetros ponderados, α y β , en la función de ajuste del algoritmo optimizador aplicado a un sistema de flotas. Con el propósito de evaluar la sensibilidad del algoritmo a estas variaciones, se establecieron dos configuraciones distintas: la primera con $\alpha=0.3$ y $\beta=0.7$, priorizando el ajuste en los costos operativos en detrimento del cumplimiento de los objetivos del sistema; y la segunda con $\alpha=0.7$ y $\beta=0.3$ dando mayor relevancia al logro de los objetivos de la flota mientras se flexibiliza la importancia asignada a los costos.

El propósito de este análisis es discernir cómo la alteración en la ponderación de α y β afecta la eficacia de la función de ajuste. Las variables de entrada son los pesos asignados a α y β , así como las políticas de mantenimiento implementadas. Por otro lado, la variable de salida es el valor obtenido de la función de ajuste. Se postula que deberían observarse discrepancias significativas entre las soluciones de optimización derivadas de estas dos configuraciones.

La Figura 5.9 ilustra la respuesta de la función de ajuste bajo las condiciones especificadas anteriormente, capturando el desempeño del sistema a lo largo de 10 días para cada simulación realizada.

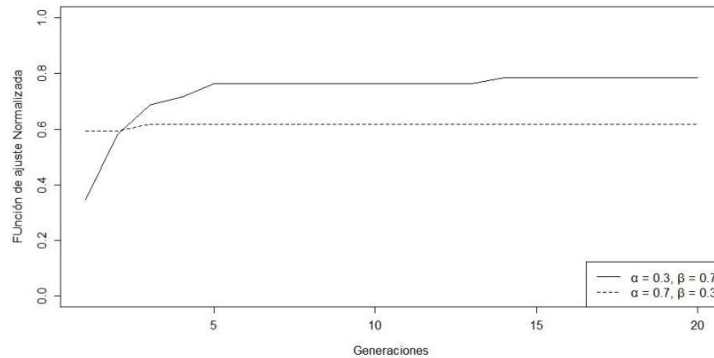


Figura 5.9. Comportamiento de la función de ajuste a cambios en α y β

Esta comparación es necesaria para determinar la capacidad del algoritmo para adaptarse y reflejar las prioridades operacionales y económicas en la gestión de mantenimiento de flotas.

A continuación, se presentan los resultados comparativos de los genes de los cromosomas, los cuales contienen valores óptimos para algunos parámetros del sistema, tales como el inventario inicial de componentes, la cantidad de personal de mantenimiento, y los umbrales de mantenimiento preventivo.

La Figura 5.10 ilustra los valores óptimos del número inicial de componentes del inventario. La gráfica revela que para el componente 1 (Figura 5.10, parte a.), que tiene la tasa de fallo más alta, el algoritmo asigna valores muy similares para ambas combinaciones. En contraste, para el componente 2 (Figura 5.10, parte b.), el valor óptimo varía notoriamente entre las estrategias de optimización; en el caso de optimización para misiones, el algoritmo selecciona un valor alto para asegurar una mayor disponibilidad de piezas, mientras que, para la optimización por costos, reduce drásticamente el número de piezas en el inventario. Para los componentes 3 y 4 (Figura 5.10, parte c y d), el algoritmo minimiza los valores de inventario, lo cual es coherente con el corto período de trabajo del sistema y las bajas tasas de fallo de estos componentes. Además, se debe considerar el efecto del mantenimiento preventivo, lo cual ayuda a limitar el número de fallos durante el periodo analizado.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

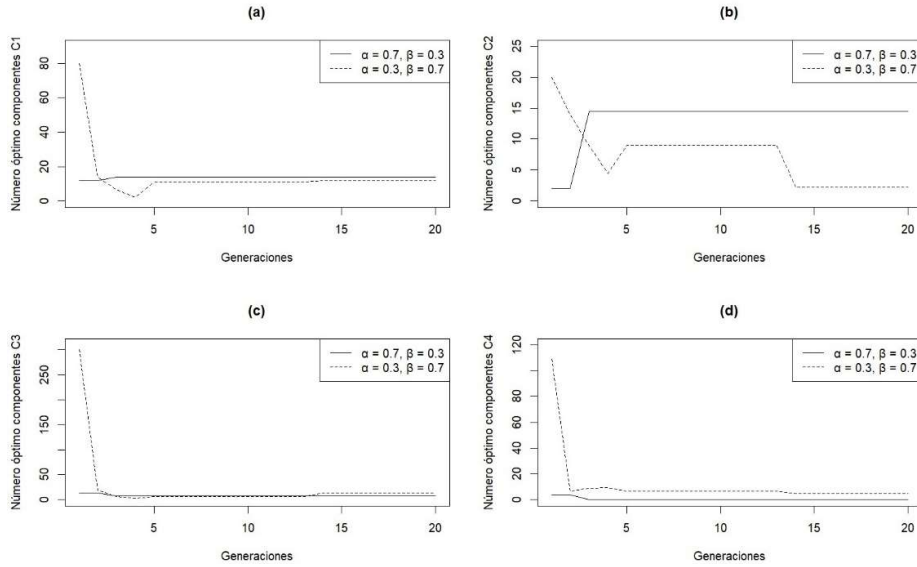


Figura 5.10. Valores de inventario inicial optimizado

La Figura 5.11 ilustra cómo el algoritmo optimiza el número de personas asignadas al mantenimiento de las unidades. En la estrategia de optimización para misiones, el algoritmo asigna un número mayor de personal, lo que resulta en más horas de mantenimiento y una densidad de mano de obra más alta por unidad de tiempo. Por el contrario, cuando la optimización se enfoca en reducir costos, el algoritmo reduce el número de personal y, por lo tanto, las horas de mantenimiento disponibles.

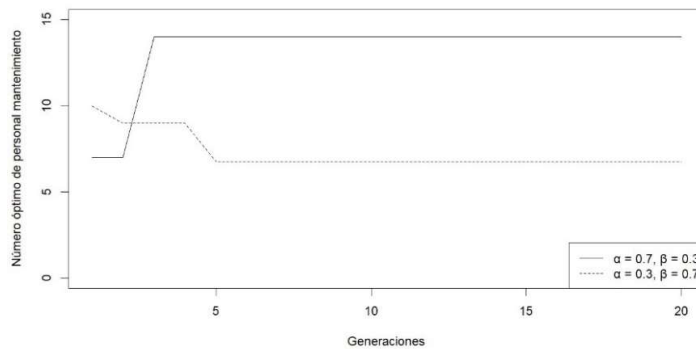


Figura 5.11. Valores de personal de mantenimiento optimizado

Por último, la Figura 5.12 muestra la optimización de los umbrales de mantenimiento para los componentes C1, C2, C3 y C4. Específicamente, para el componente C1 (Figura 5.12, parte a), se observa un aumento en el umbral para realizar mantenimiento correctivo en ambas estrategias de optimización, lo que sugiere que el algoritmo propone realizar menos mantenimiento preventivo durante el periodo simulado. Similarmente, esto se aplica a los componentes C3 y C4 (Figura 5.12, partes c y d). Resulta interesante notar que para el componente C2, el algoritmo reduce el umbral en ambas configuraciones, indicando la necesidad de más mantenimiento preventivo en el periodo estudiado, debido a su tasa media de fallo.

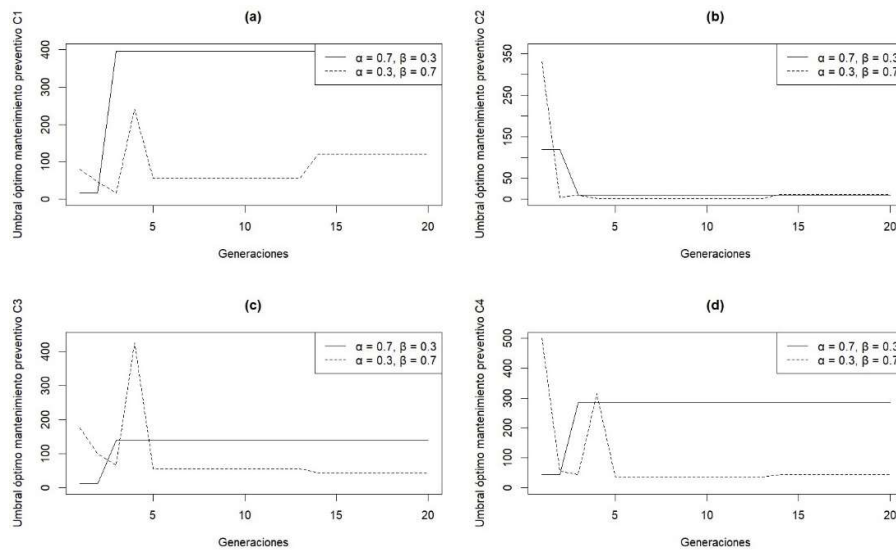


Figura 5.12. Valores de umbral de mantenimiento preventivo optimizado

5.2. Control óptimo del sistema de mantenimiento

En este apartado se muestra como el sistema optimizado en la sección anterior es sometido ahora a cambios en el entorno del sistema y considerando que las acciones convencionales de gestión no puedan hacer frente a estas perturbaciones, se lanza un proceso de optimización.

Para lograr este propósito, el sistema de gestión de mantenimiento de una flota ha sido conceptualizado como un sistema de control automático optimizado, diseñado para regular y mejorar el desempeño de la flota a través de la manipulación de diversas variables controladas. La flota, compuesta por múltiples unidades, actúa como la planta del sistema; cada unidad, aunque operativa de forma inde-

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

pendiente, se integra para cumplir con los objetivos establecidos, funcionando como un componente esencial de un sistema unificado. La realimentación es fundamental en un sistema de lazo cerrado, en el modelo de simulación esta acción se realiza mediante reportes que permiten reconocer el estado del sistema. Sin embargo, en un sistema real esto se lograría a través de tecnologías como el *internet de las cosas (IoT)*, *Big Data*, etc. permitiendo el monitoreo continuo de cada unidad. Esto incluye el seguimiento de componentes, rutas y comportamientos del conductor, proporcionando datos cruciales para evaluar el estado actual de la flota.

Los valores de referencia, en este contexto están definidos por la necesidad de mantener un equilibrio costo efectivo del sistema. Estos están influenciados directamente por dos variables críticas: el costo y el cumplimiento de los objetivos, los cuales deben alinearse con la demanda del servicio y adaptarse a cualquier perturbación en el entorno operativo. El control de este sistema recae inicialmente en el gestor de mantenimiento, quien toma decisiones basadas en el estado y rendimiento de la flota. Sin embargo, esta función también puede ser desempeñada por un algoritmo avanzado que integra una función de optimización, regulando las variables manipuladas para responder de manera efectiva a las necesidades del servicio y los costos implicados.

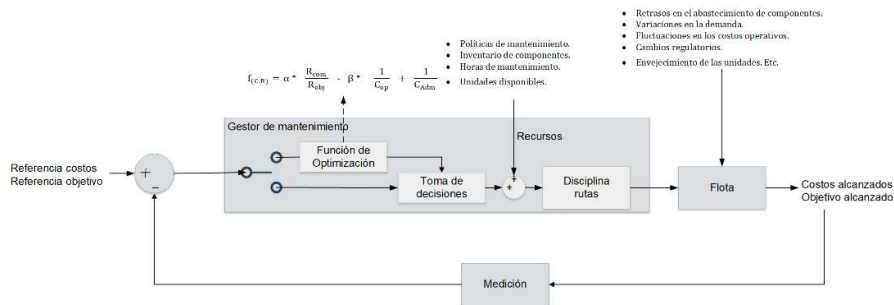


Figura 5.13. Sistema de control de una flota mediante el gestor de mantenimiento

El actuador en este sistema es el módulo de disciplina de rutas, que ajusta la utilización de las unidades disponibles según las directrices del controlador. Las variables manipuladas en este sistema incluyen políticas de mantenimiento, el inventario de componentes, las horas asignadas a mantenimiento y las unidades disponibles. Finalmente, el sistema debe estar preparado para enfrentar diversas perturbaciones, como retrasos en el abastecimiento de componentes, variaciones en la demanda, fluctuaciones en los costos operativos, cambios regulatorios y el envejecimiento de las unidades, etc. Estas perturbaciones pueden desviar las variables controladas de sus valores deseados, y la robustez del sistema de control automático es crucial para mantener la eficacia y eficiencia del mantenimiento de la

flota. La Figura 5.13 resume en diagrama de bloques como funcionaria automáticamente el sistema de control para la gestión del mantenimiento de una flota.

5.2.1. Escenarios de estudio

Este apartado analiza dos escenarios que podría enfrentar un sistema multi unidad, cuando opera bajo condiciones inciertas. El primer escenario está relacionado con las decisiones operacionales que se pueden presentar cuando no hay componentes para reparar el sistema. Este caso examina los retrasos en la entrega de componentes, los cuales pueden ocurrir debido a una gestión ineficiente del inventario, eventos no planificados, problemas en la cadena de suministros, etc. Este escenario también considera los costos asociados con el almacenamiento y la falta de servicio. El segundo escenario se relaciona con las decisiones administrativas que se deben tener cuando los precios de los proveedores varían súbitamente, o condiciones del entorno encarecen los costos del inventario. Esto puede conllevar que el gestor de mantenimiento requiera tener una idea más acertada sobre la disposición operacional del sistema.

5.2.1.1. Cambios en los tiempos de suministro

Como ya se había observado en el experimento 1 (Sección 4.2.1) los retardos en el suministro afectan la disponibilidad de las unidades. Los componentes son esenciales para cubrir las tareas de mantenimiento, un retardo en la disponibilidad de estos limita las actividades de órdenes de trabajo planeadas y no planeadas, de igual manera una deficiente gestión del inventario de componentes puede llevar a que se pidan componentes en exceso incrementando los costos de almacenamiento. Por lo tanto, es necesario optimizar el inventario inicial para lograr una mejor relación costo beneficio.

Este experimento analiza cómo diversos retardos en la cadena de suministro afectan el comportamiento del sistema. Utilizando un algoritmo de optimización, se ajustan los parámetros del sistema a través de la información genética de los cromosomas. Las variables de entrada incluyen la población inicial y los tiempos de retardo, que se definen en intervalos de 30 días hasta alcanzar el 50% de un periodo simulado de un año. La hipótesis sugiere que retardos excesivos en la cadena de suministro podrían comprometer los objetivos de la misión, reduciendo el alcance de forma proporcional al retardo. Además, se espera que los retardos prolongados incrementen los costos de mantenimiento, componentes, almacenamiento y los costos por operaciones no realizadas. Los parámetros fijos incluyen políticas de mantenimiento definidas previamente, entre ellas una política oportunista de mantenimiento en bloque para el mantenimiento preventivo, una política de mantenimiento correctivo imperfecto con reparaciones mínimas, y una política de canibali-

zación *bird*. La variable de salida incluye los valores optimizados del inventario inicial, los umbrales de mantenimiento preventivo y los parámetros de canibalización cuando se aplica. Se analiza inicialmente la relación entre los costos totales de operación del sistema y el porcentaje de objetivo alcanzado, lo cual se ilustra en la Figura 5.14.

Como se muestra en la Figura 5.14, la acción de la flota se deteriora a causa de un creciente retardo en los suministros de componentes. Alrededor de un 5% en el cumplimiento del objetivo ha sido disminuido en el rango de retardo de 30 a 180 días. Esto se traduce en alrededor, 3100 rutas dejadas de realizar, lo cual implica una disminución de la calidad del servicio. Esto se contrasta con el incremento de los costos operacionales, los cuales se incrementan en alrededor de un 8% con una pendiente aproximada de 2% por cada incremento del retardo. Sin embargo, es importante apreciar que el uso de la canibalización en combinación con la optimización, permite sostener en varios valores de retardo una tasa aproximadamente constante. Para ello se contrasta en la Figura 5.15 el uso de canibalización con respecto al objetivo cumplido.

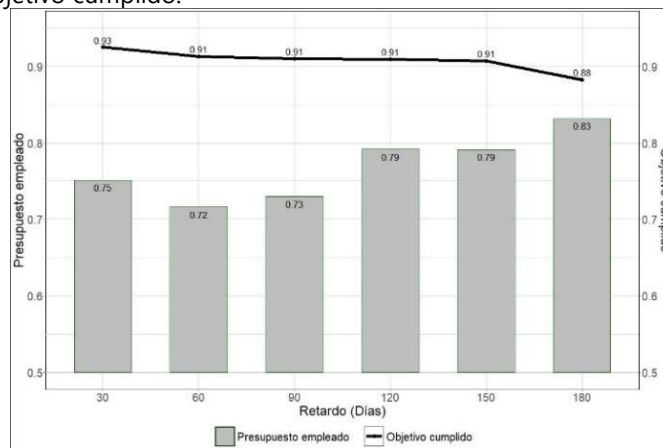


Figura 5.14. Relación Costo - Objetivo Normalizado

La Figura 5.15 refleja el aporte que se puede lograr con la aplicación de canibalización en combinación con la optimización, cuando existe un retardo apreciable en la reposición en el inventario de componentes. Se observa que para un periodo corto el algoritmo es capaz de optimizar el número inicial de componentes y tolerar el retardo sin hacer uso de la canibalización y logra una tasa de cumplimiento del objetivo de 93%.

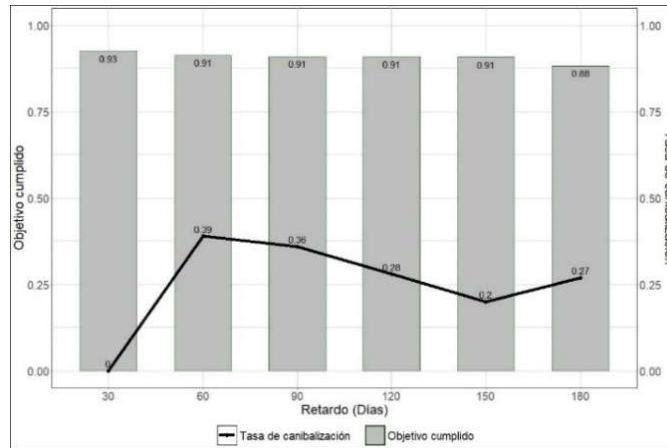


Figura 5.15. Relación objetivo – Tasa de canibalización normalizado

Por otro lado, para los retardos entre 60 y 120 días, la tasa de cumplimiento del objetivo se mantiene aproximadamente en el valor del 91% reflejando un aporte combinado entre la canibalización y la optimización en el desempeño del sistema. Sin embargo, es necesario contrastar que para un retardo de 60 días es donde la aplicación de la política de canibalización mejor aporta sobre el objetivo comparativamente que en el retardo de 150 días, donde hay menos canibalizaciones debido a la saturación de los donantes *bird* a causa del retardo. Para el último retardo estudiado de 180 días, aunque el porcentaje de canibalización se incrementa, esto no es suficiente para minimizar los efectos del retardo y la tasa de cumplimiento del objetivo desciende en un 3%.

Por otro lado, se afirma que la canibalización tiene efectos adversos en las horas de mantenimiento, pero que puede favorecer el costo de componentes dado que los componentes usados ya no generan un costo para el sistema (Curtin, 2001). A continuación, se muestra la relación de estos dos costos con respecto al número de canibalizaciones.

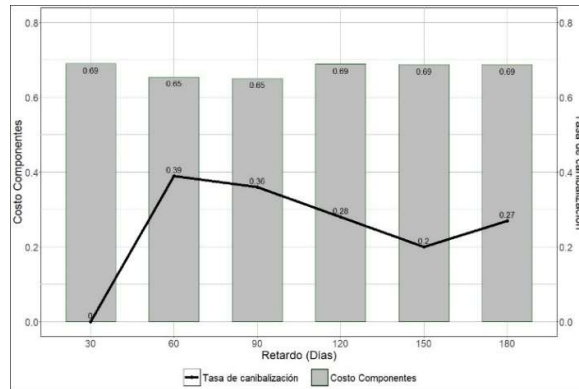


Figura 5.16. Relación costos de componentes y canibalización normalizado

La Figura 5.16 muestra la relación entre el porcentaje de canibalizaciones y el costo de los componentes. En la figura se puede observar como para los retardos altos los costos por componentes decrecen mínimamente. Por el contrario, en los retardos entre 60 y 90 se logra un beneficio sobre el costo de componentes, esto se debe principalmente a dos efectos. El primero es la reducción del número de componentes iniciales que el algoritmo ha decidido reducir en el inventario para estos dos retardos, este efecto se combina con una mayor cantidad de canibalizaciones lo cual ayuda a reducir el costo por componentes en un 4 %.

La Figura 5.17 muestra la relación entre el costo de las horas de mantenimiento utilizadas y el uso de la canibalización. En el retardo de 30 días se observa el costo de mantenimiento sin canibalización, contrastado con la cantidad de canibalizaciones del retardo de 60 días se advierte un incremento del 10% en los costos de las horas de mantenimiento. Contrariamente en el retardo de 90 días se evidencia una bajada de los costos de mantenimiento a pesar de haber una buena cantidad de canibalizaciones, esto básicamente se debe al efecto de una disminución en el número de canibalizaciones y a la decisión de algoritmo de incrementar el umbral de mantenimiento preventivo del componente 4, el cual utiliza un número alto de horas de mantenimiento. Para los retardos más altos se observa un decremento en las horas de mantenimiento en concordancia con la aplicación de canibalización, esto se debe a la disminución de la aplicación de la política preventiva aplicando mayormente mantenimiento correctivo con canibalización y una disminución del número de fallos durante el periodo, por saturación del sistema.

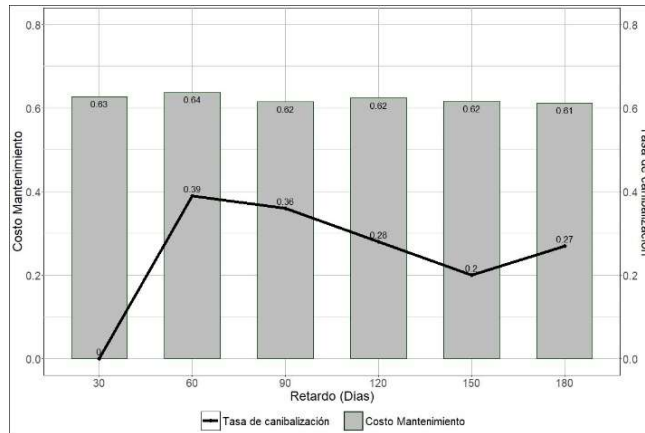


Figura 5.17. Relación de costos de mantenimiento y canibalización

Esta afirmación se corrobora con el estudio de fallos del sistema durante los periodos de retardo evaluados. La Figura 5.18 muestra la tasa de fallo de los retardos evaluados, se indica una tasa de fallo descendente directamente relacionada con el incremento del retardo, esto indica la sensibilidad de la tasa a los retardos de llegada de componentes. Aunque se puede apreciar que la tasa de fallos solo desciende en 1.4% entre el menor retardo y el mayor, los efectos de este cambio son advertidos por la tasa de cumplimiento del objetivo y de los costos. Es necesario aclarar que la tasa de fallo desciende debido a que las unidades se demoran más en ser reparadas. Por último, se muestra en la Tabla 5.7, los valores de los genes seleccionados por el algoritmo para los parámetros del sistema.

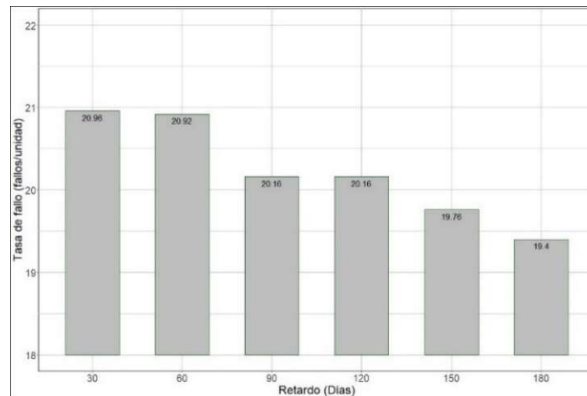


Figura 5.18. Variación de la tasa de fallo durante los retardos evaluados

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 5.7. Parametrización obtenida del proceso de optimización.

Gen	Retardo (días)					
	30	60	90	120	150	180
Componentes iniciales C1	5	10	7	6	8	6
Componentes iniciales C2	40	20	76	40	40	41
Componentes iniciales C3	104	10	39	105	100	105
Componentes iniciales C4	9	20	16	21	21	21
Personas Mantenimiento	6	8	6	8	8	8
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 1	384	57	45	57	60	57
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 2	413	8	71	78	78	78
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 3	19838	20500	9200	20500	20500	20800
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 4	22981	3160	33761	4528	4528	4535
Criterio de aplicación canibalización	31	15	31	15	15	16
Cadencia de la canibalización	13	12	13	13	13	13
Tiempo de rotación	30	22	30	42	42	40

5.2.1.2. Seguimiento a la tasa de disponibilidad

La Figura 5.19 ilustra la sensibilidad de la tasa de disponibilidad en respuesta a diferentes retardos en la cadena de suministro. Esta se define como la combinación del tiempo medio disponible y el tiempo medio no disponible, según la Ecuación 2.4, esta definición no tiene en cuenta la cantidad de rutas que la unidad haya podido realizar después de un intercambio. Aunque el modelo busca intercambios de componentes con el menor tiempo de vida, esto puede representar un problema para retardos muy grandes donde una unidad no alcance a tomar componentes con un tiempo de vida medianamente aceptable. En la figura se muestra como con un retardo de 30 días el sistema obtiene la tasa de disponibilidad más alta del con-

junto sin utilizar canibalización. Para retardos entre 90 y 150 días hay una tasa de disponibilidad creciente debido al efecto combinado de canibalización y optimización. Sin embargo, en el retardo de 60 días se puede apreciar una tasa del 91% este valor es interesante porque como se mencionó anteriormente en este valor de retardo es cuando desde los costos totales se observó un mejor efecto de la canibalización. Por último, para el retardo más alto la disponibilidad cae un 2% debido a una mayor limitación en el uso de la canibalización y el hecho que los componentes seleccionados tengan un tiempo de vida útil mayor a la hora del intercambio.

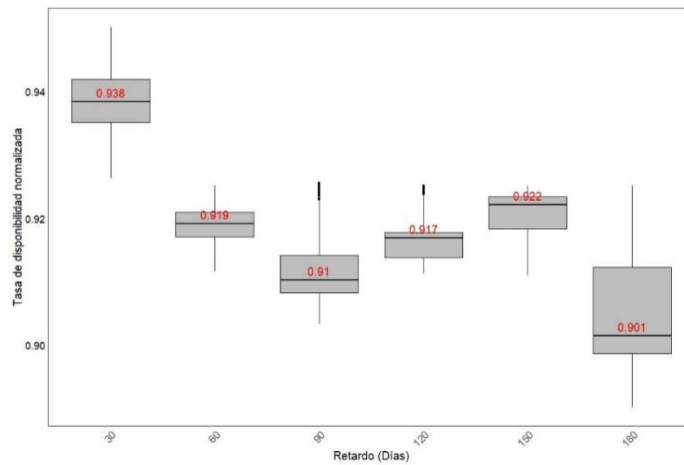


Figura 5.19. Tasa de disponibilidad a distintos retardos

Para complementar la interpretación anterior se realizará un sondeo sobre la distribución de tiempos de los componentes que fueron intercambiados. La Figura 5.20 muestra las medianas y la distribución de los tiempos del componente 1 intercambiados. Como se puede observar en la figura los tiempos están distribuidos aproximadamente en valores de 1800 y 3200 horas sobre un tiempo libre de fallo del componente 1 de 6860 horas, siendo en el retardo de 180 días donde la mediana de tiempo de los componentes es mayor cuando son canibalizados.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

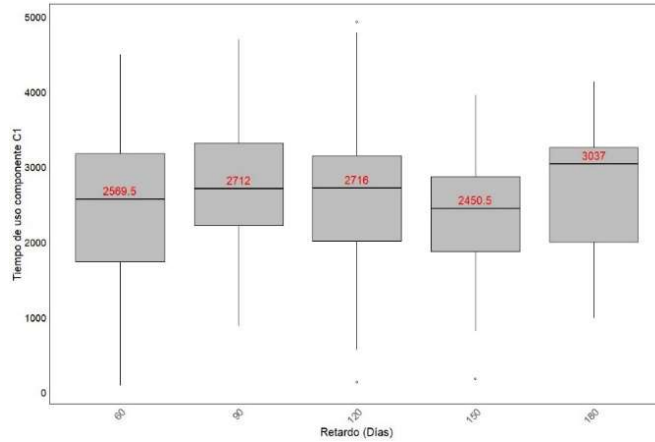


Figura 5.20. Mediana de los componentes tipo 1 canibalizados

Con respecto al componente dos, ya que la cantidad de canibalización de este tipo de componente es menor los tiempos de los componentes canibalizados es más amplia, la Figura 5.21 muestra que estos tiempos oscila en valores entre 300 y 4000 horas de vida útil.

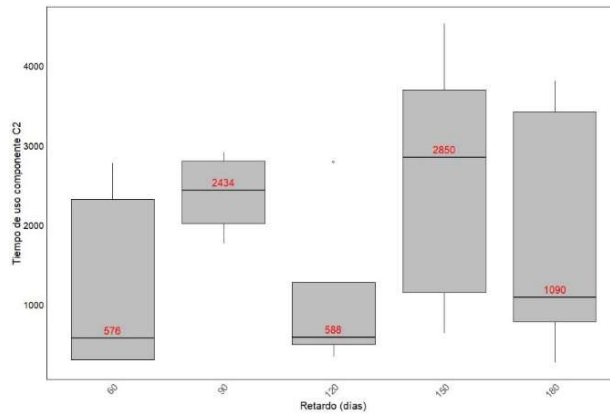


Figura 5.21. Mediana de los componentes tipo 2 canibalizados

5.2.1.3. Comparación de los efectos de la optimización y el uso de canibalización.

En los apartados anteriores se ha observado el efecto de la canibalización sobre los costos totales y el cumplimiento del objetivo. Sin embargo, este efecto no es único de la canalización, la optimización también está ayudando a que la canibalización tenga un mayor efecto positivo en el sistema. En este apartado se compara el efec-

to de la canibalización y la optimización sobre los costos totales y el cumplimiento del objetivo. La Figura 5.22 muestra el comportamiento de los costos totales ante distintos retardos y permite comparar el efecto de canibalizar, no canibalizar y optimizar. En esta figura, se muestra que aunque la optimización está presente, no se aplica la canibalización. Para esta comparación, se ha omitido intencionalmente el retardo de 30, ya que el algoritmo determinó que la mejor solución no incluía la canibalización. Se puede observar que en el retardo de 60 días la canibalización no favorece los costos del sistema en un margen muy pequeño. De igual manera, se observa un efecto apreciable sobre los costos por parte de la canibalización en los periodos de 60 y 90 días siendo de un 2% para el retardo de 60 días y poco apreciable en el retardo de 90 días. El gestor debe tomar la decisión de aplicar canibalización solo si los costos no son un limitante fuerte. Por otro lado, para los retardos entre 120 y 150 días los costos cuando se usa canibalización son mayores entre un 2 y 3%. El gestor de mantenimiento debe tomar la decisión sobre si considera que este sobrecosto se equilibra con la cantidad de misiones que pueda realizar derivado de los intercambios realizados. De igual manera, la figura permite dimensionar el efecto de la optimización sobre el sistema, para los retardos presentados y con un mayor efecto para los retardos después de 90 días, este beneficio está entre un valor de 6 y 10% para la mayoría de los retardos estudiados.

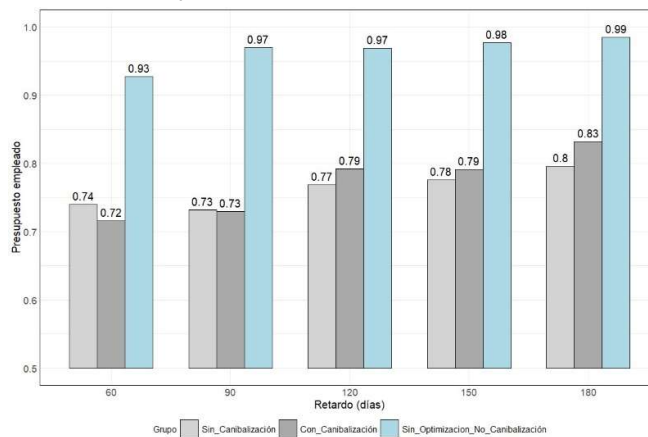


Figura 5.22. Comparación de los costos con, sin canibalización y sin optimización

Como se verificó en la sección anterior los costos por canibalización pueden estar en alrededor de 2 a 3% más sobre la operación del sistema, para los retardos después de 120 días. Ahora se compara el efecto de la canibalización y la optimización sobre el cumplimiento del objetivo de la flota. La Figura 5.23 muestra la com-

paración de distintos retardos cuando se aplica o no canibalización junto con la optimización. Para los retardos altos se observa que la canibalización incrementa el cumplimiento del objetivo en un 1 y 3% siendo el porcentaje más bajo cuando el retardo es el más alto, esto contrastado con los costos que para estos periodos es de entre el 2 y 5% más debe orientar al gestor de mantenimiento en sí es posible o no tomar la decisión de aplicar canibalización, en este contexto criterios como la operación no servida, la calidad del servicio y la operación misma sirven como variables para completar la decisión. Por otro lado, así como sucedió en los costos para el periodo de 90 días no se encuentra un beneficio en aplicar una política de canibalización, mientras que para un periodo de 60 días el impacto también es mínimo cuanto, al cumplimiento del objetivo, pero se debe recordar que esta misma cantidad de misiones es alcanzada a un 2% menos de coste como se analizó en la Figura 5.22. Con respecto a la optimización, su efecto se da en todos los valores de retardo y oscila entre un 10 y 13% mostrando un gran efecto sobre el sistema.

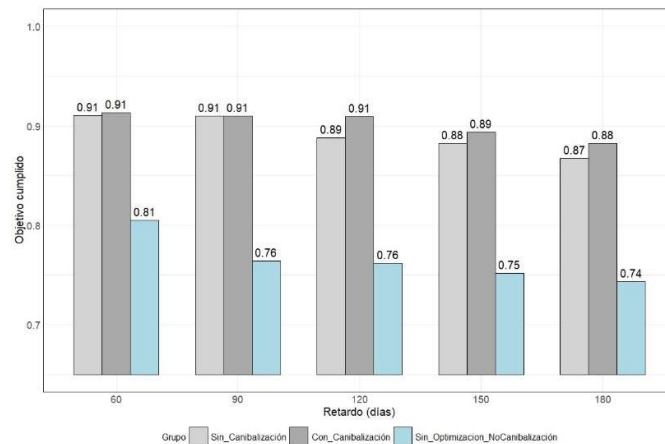


Figura 5.23. Comparación del cumplimiento de objetivo con y sin canibalización

Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de canibalización y optimización tiene un impacto significativo en el sistema de mantenimiento de la flota. Se observa que los costos asociados con retardos de entre 60 y 90 días no experimentan un aumento significativo. Sin embargo, para retardos más prolongados, específicamente de 120 a 150 días, es posible mantener la tasa de cumplimiento de los objetivos sin afectar considerablemente la disponibilidad operativa, aunque a un costo mayor, como se ilustra en la Figura 5.19 y Figura 5.23.

5.2.1.4. Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño miden el efecto de los cambios que un sistema experimenta. En este sentido se han evaluado los indicadores contemplados en la sección 2.2.4. La Figura 5.24 muestra los valores generados para estos indicadores. Comparativamente con la aplicación de la política de canibalización y optimización.

La Figura 5.24 muestra un comparativo del MTBF entre los retardos de 60 y 180 días, también se confrontan los efectos de la canibalización y la optimización para ello se crean los dos grupos con tres diagramas de caja por cada categoría. Como se puede apreciar, existe un menor MTBF entre cuando no se utiliza canibalización ni optimización, al ser un indicador positivo se refleja que las unidades tienen un menor tiempo entre fallos. Por otro lado, la mediana en el retardo de 60 días sin canibalización es mayor que con canibalización, esto indica si bien en el retardo de 60 días se puede lograr un mayor impacto sobre el cumplimiento del objetivo como se observó anteriormente, el sistema también reduce el tiempo medio entre fallos a causa de utilizar canibalización. A diferencia del efecto para el retardo de 180 días donde el MTBF cuando se aplica canibalización es un poco mayor que cuando no se aplica, si bien esto podría apreciarse como bueno, también debe contrastarse con el entorno que vive el sistema y es que su tasa de fallos decae debido a que las unidades tardan más en repararse.

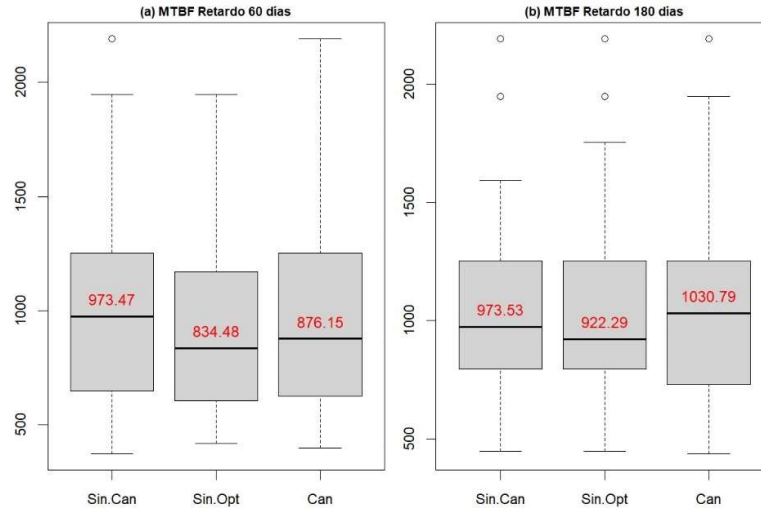


Figura 5.24. Comparación MTBF para dos retardos

A continuación, se revisa el MTTR o tiempo medio de reparación, la Figura 5.25 muestra la respuesta del sistema a los tres casos que se revisan, la aplicación de canibalización, optimización y la no utilización de estos. La figura muestra nuevamente que se tiene un menor MTTR cuando no se utiliza optimización ni canibalización. Esto se debe a la presencia de los retardos que limitan las actividades de reparación, por lo tanto, disminuye este indicador. También se puede notar que para el retardo de 60 días el MTTR de no usar canibalización es mayor que cuando se utiliza, por el contrario, en el retardo de 180 días el MTTR con canibalización es mayor que sin ella, indicando un incremento en la cantidad de horas de mantenimiento por canibalización sin que esto repercuta en la mejora del cumplimiento del objetivo como se ha expuesto anteriormente.

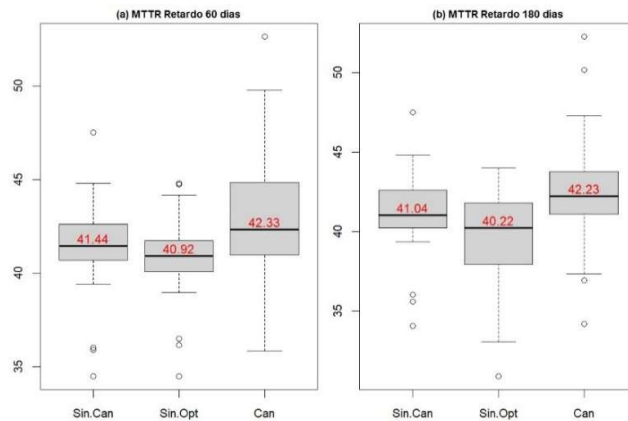


Figura 5.25. Comparación MTTR para dos retardos

La fiabilidad de los componentes se evalúa mediante el MTTF, el cual evalúa el tiempo que la unidad realiza actividades. Al igual que con los anteriores indicadores no se encuentran diferencias significativas entre los distintos retardos aplicando estrategias de optimización y canibalización. Sin embargo, en la Figura 5.26 se puede observar que nuevamente las muestras sin optimización y canibalización presentan los valores más bajos. En contraste, las muestras sin canibalización presentan mejores valores que con canibalización. Esto podría dar cuenta que, si bien se logra mejorar la cantidad de misiones cumplidas, esta mejora no modifica el comportamiento de fallo del sistema dado que los componentes usados pueden disminuir la capacidad de cumplir misiones completas.

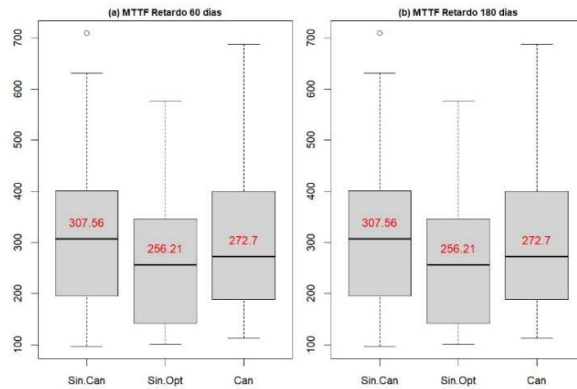


Figura 5.26. Comparación MTTF para dos retardos

Por último, se analiza el MLDT el cual presenta la forma en como el sistema está interpretando los retardos en el sistema. La Figura 5.27 muestra la comparación de este indicador aplicando canibalización, optimización y sin ellas. La figura muestra que para cada tipo de retardo existe una gran dispersión de los datos en cuanto al retardo, sin optimización ni canibalización se presenta la mayor dispersión y unos valores altos de este indicador, aunque con pocos valores atípicos. Por otro lado, sin canibalización y con retardo de 180 días existe una gran cantidad de valores atípicos, no tanto así en el retardo de 60 días para esta misma categoría. De forma análoga cuando se utiliza canibalización se presenta una menor dispersión que sin canibalización, pero el efecto del retardo hace que de igual manera la concentración de los datos se muestra afectada. En el retardo de 60 es donde menor dispersión se observa, presentado un valor de 13 horas cuando se aplica canibalización, aunque el periodo de tiempo sin canibalización es menor esto no repercute en la tasa de cumplimiento del objetivo.

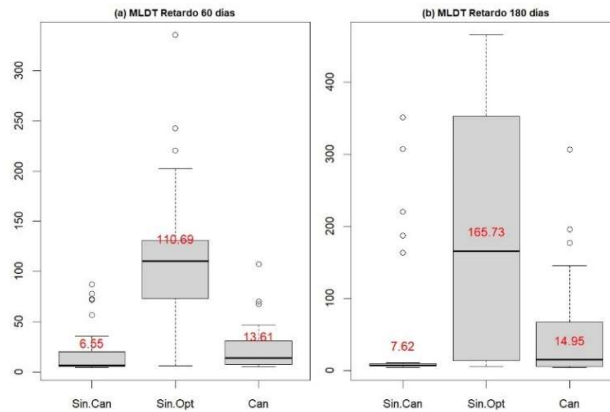


Figura 5.27. Comparación MLDT para dos retardos

En conclusión, Los indicadores de desempeño revelan que, cuando se utiliza adecuadamente, la canibalización no inserta cambios importantes en estos indicadores. Sin embargo, la combinación de canibalización y optimización ha demostrado ser beneficiosa para la operación, tanto en términos de cumplimiento de objetivos como en la reducción de costos de componentes. No obstante, también se observó que en algunos escenarios, esta estrategia puede incrementar moderadamente los costos de mantenimiento.

5.2.1.5. Cambios en los costos de suministro.

Los sistemas multi unidad requieren una cadena de suministro conveniente para optimizar su operación. Sin embargo, las condiciones del entorno a un sistema de este tipo varían continuamente, las decisiones sobre las políticas de mantenimiento y reposición del inventario generan desafíos desde la planeación estratégica que en ocasiones hacen que el sistema se vea limitado operacionalmente para cumplir con los objetivos del sistema. A continuación se utiliza el modelo de simulación para observar la respuesta del sistema a cambios en los precios de los componentes, eventualidad que requeriría ajustar los costos del sistema para seguir siendo eficiente. Las variables de entrada al modelo son una política oportunista de mantenimiento en bloque preventiva, una política de reparación mínima de mantenimiento correctivo, y una política de canibalización *bird*. Los costos cubren un rango bastante extenso en cuanto a los que pueda ser un cambio de precios y van desde un incremento del 50% del precio original hasta un valor de 15 veces el valor inicial del componente. En el experimento se contrasta el efecto combinado de la canibalización y la optimización, así como la no utilización de ninguno de estos dos

efectos. Como parámetro fijo se aplica un retardo de 90 días. La salida es la variación de los costos y el objetivo de misión cumplida ante estos cambios en los precios.

La Figura 5.28 muestra un gráfico combinado entre el porcentaje de cumplimiento del objetivo y la utilización de canibalización. Como se puede observar, la utilización de canibalización decidida por el algoritmo se realiza en la parte central de los incrementos de costos evaluados. Se refleja una variación del 5% entre el incremento más bajo y el más alto. Sin embargo, es posible ver que la combinación de la optimización más la canibalización permite mantener ligeramente estable la producción del sistema. En efecto, en el pico de utilización de la canibalización se tiene un cumplimiento de objetivo del 88% que incrementa en 1% el valor alcanzado en el costo anterior. Aunque este valor es pequeño si se tiene en cuenta el objetivo que es de 73 mil misiones, ese 1% se traduce en unas 730 rutas que se realizaron de más, lo que desde el punto de vista de la calidad del servicio puede ser más satisfactorio. Por último, con valores de costo muy altos el sistema, el sistema está decidiendo disminuir el cumplimiento del objetivo en la idea de sostener los costos, de hecho en este valor de costo la canibalización no es utilizada.

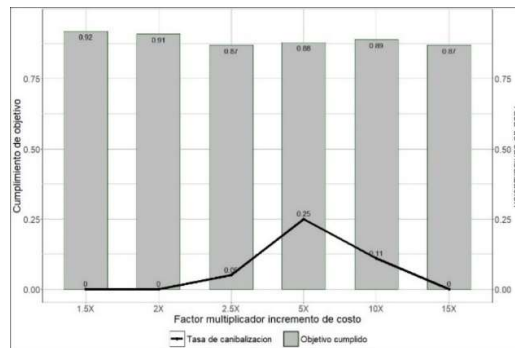


Figura 5.28. Cumplimiento del objetivo y la utilización de canibalización

Ahora se revisa el comportamiento de los costos ante el incremento de los precios de los componentes. La Figura 5.29 presenta una tendencia marcadamente al alza, esta tendencia es esperada dado el creciente valor de los costos. Para esta respuesta no es fácil identificar el efecto ni de la canibalización o la optimización, dada la fuerza de la tendencia. Sin embargo, este resultado sí sirve para fortalecer la validación del modelo, presentando un comportamiento esperado al efecto producido por las entradas, en este caso la variación de precios. Por lo tanto, es necesario agregar una variable más para poder determinar algún tipo de efecto de la canibalización o de la optimización sobre los costos de operación del sistema. Para ello se

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

muestra en la Figura 5.30, la comparación entre los costos del sistema cuando se utiliza canibalización y optimización juntas y cuando no se hace uso de ellos.

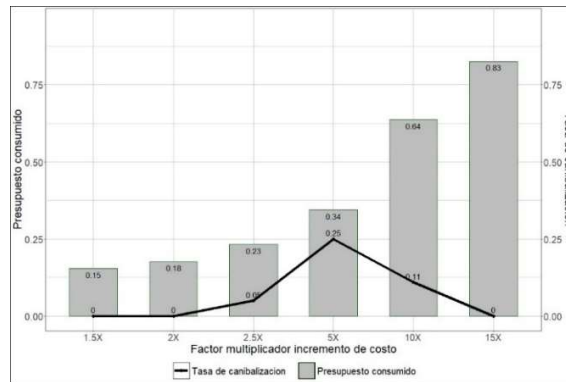


Figura 5.29. Presupuesto consumido y la utilización de canibalización

La Figura 5.30 muestra que hay un beneficio de aplicar optimización en todo el rango de valores de los costos. Este beneficio puede estar entre un 3 y 4%, presentándose la mejora caso cuando los componentes tienen el factor de subida mínimo y menor en el otro extremo. Sin embargo, nuevamente desde la utilización de la canibalización no es claro la identificación del aporte en los valores de costo donde tuvo influencia.

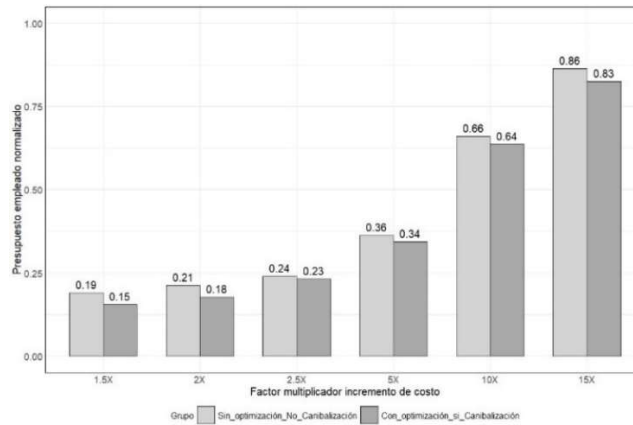


Figura 5.30. Comparación presupuesto consumido

Para observar mejor un posible aporte de la canibalización sobre el sistema se hace una comparación sobre el cumplimiento del objetivo, cuando se aplica o no

canibalización y optimización. La Figura 5.31 la respuesta del objetivo cumplido cuando se hace uso de la optimización y la canibalización y la compara con la respuesta cuando no se hace uso de ellas. El efecto de la optimización vuelve a ser evidente a lo largo de los distintos cambios de valor de los componentes, la tasa de mejora oscila entre un 7 y 14% lo cual refleja la importancia de la optimización. Sin embargo, para el valor de costo donde la canibalización presenta un pico, es posible confirmar que el 1% de mejora en el cumplimiento del objetivo es de la canibalización en la entrada 5X esto porque en la entrada de 2.5X el valor sin canibalización es de 0.77, igual al valor en 5X lo cual para un doblaje del costo se esperaría que el objetivo disminuyera, sin embargo, se sostiene y sube un 1%. En el resto de valores no es posible observar un efecto solamente de la canibalización, solamente de la optimización.

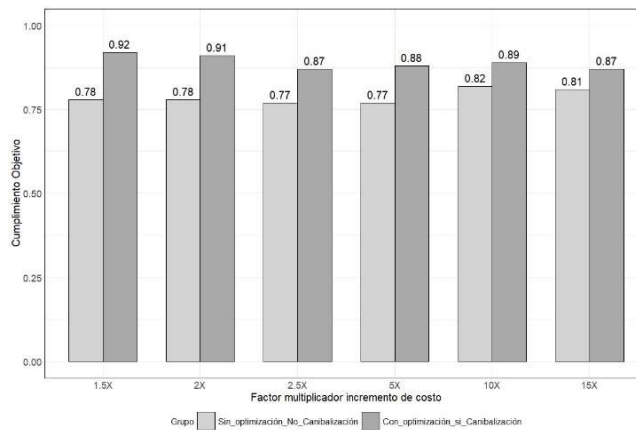


Figura 5.31. Comparación cumplimiento objetivo

5.2.1.6. Revisión de los valores de optimización de los cromosomas.

La optimización ha mostrado ser una herramienta con un efecto fuerte en el desempeño del sistema, en el siguiente apartado se observará como el algoritmo de optimización sugiere los parámetros del sistema y como estos pueden ser analizados para una mejor toma de decisiones sobre los componentes iniciales, el personal, los umbrales de mantenimiento y la canibalización. A continuación la Tabla 5.8 muestra los valores obtenidos de la optimización para cada uno de los valores de costo estudiados.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Tabla 5.8. Parametrización obtenida del proceso de optimización.

Gen	Variación de costo					
	X1.5	X2	X2.5	X5	X10	X15
Componentes iniciales C1	211	7	158	10	7	37
Componentes iniciales C2	20	76	50	20	76	21
Componentes iniciales C3	39	39	104	10	39	27
Componentes iniciales C4	4	11	9	20	16	16
Personas Mantenimiento	11	9	11	8	6	10
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 1	69	0	0	57	60	38
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 2	315	623	66	8	71	74
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 3	6764	19843	19845	20500	9200	25854
Umbral de inicio de mantenimiento Componente 4	9656	22981	22981	3160	17497	14848
Criterio de aplicación canibalización	65	36	33	15	31	55
Cadencia de la canibalización	13	12	13	13	13	13
Tiempo de rotación	30	22	30	42	42	40

A continuación, la Figura 5.32 muestra el comportamiento de las sugerencias dadas por el algoritmo para el conjunto de componentes iniciales del inventario, en especial se ve una disminución en el valor para el componente 1, una cierta oscilación para el componente 2 y un valor relativamente bajo para los componentes 3 y 4 los cuales son los más costosos de la arquitectura. De igual manera, la Figura 5.33 muestra la sugerencia en cuanto al personal de mantenimiento el cual se mantiene una variación y alrededor de 8 personas, el efecto sobre una mayor cantidad de personas se da en que dado que el sistema pretende ser eficiente puede hacer más tareas de mantenimiento mientras haya componentes. Y que los costos por mantenimiento serán menores que los de los costos por componentes.

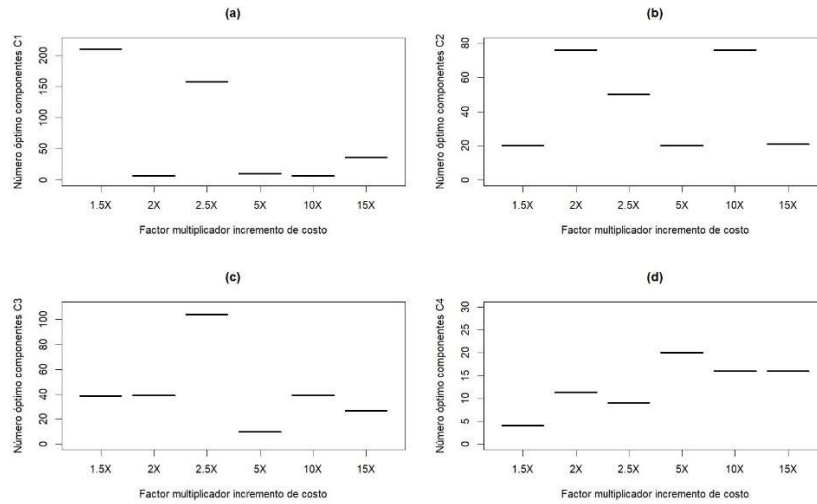


Figura 5.32. Valores de componentes iniciales a cambios en el precio

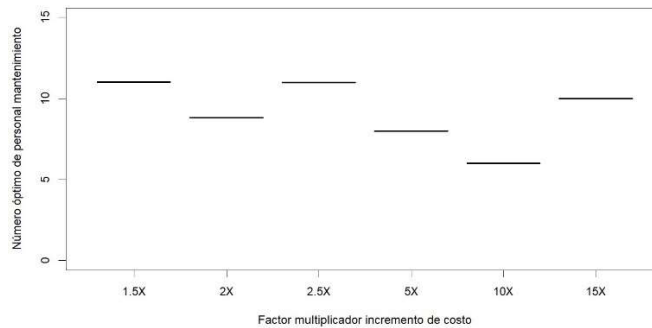


Figura 5.33. Valores óptimos de personal

En la Figura 5.34 se observa los umbrales de mantenimiento recomendados para los componentes, se puede observar que el algoritmo sugiere disminuir los umbrales para los componentes 1 y 2, y tratar de mover los componentes 3 y 4 a umbrales un poco más alejados. Esto se puede interpretar como si la optimización tiende a darle prioridad a los componentes con más rotación y los de mayor tiempo de vida limitarlos para que permitan sobrellevar los costos de cambiarlos. Sin embargo, es necesario aclarar que para el componente 4 su valor de umbral al final se deja en un valor intermedio.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

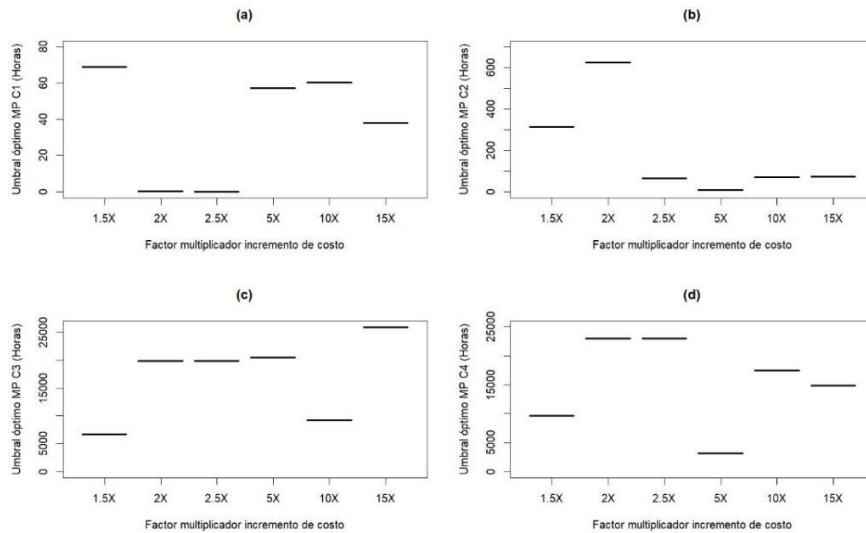


Figura 5.34. Valores umbrales de mantenimiento

Por último, se revisa los parámetros asociados a la canibalización, se puede observar como el porcentaje de unidades en fallo para que la canibalización se aplique se encuentra el punto más bajo en el costo de 5X. Sin embargo, en los extremos este valor se cambia a valores mayores, con esto se puede intuir que el modelo permite tomar decisiones sobre canibalización cuando se aplica optimización. Por lo tanto, es posible apoyarse en este cuando se requiera observar el peso de esta política y de las anteriormente tratadas. Por otro lado, la cadencia con la cual se aplica canibalización, se ha mantenido aproximadamente constante para todos los periodos, indicando quizá una baja sensibilidad del sistema ante este parámetro o quizá el rango de valores no es apropiado. Por último se observa el parámetro de rotación de las plataformas *bird*, el cual también presenta un valor medianamente constante con cambios en los valores de 2.5 y 5X. Esto puede sugerir lo mismo que para el parámetro anterior quizá un mal dimensionamiento, o quizá también esté relacionado con el hecho de que la política *bird* no se implementó estrictamente, esto es que una plataforma *bird* debe suspenderse durante el tiempo que este como reposición, en este caso el modelo implementa que solo cuando una unidad esté en modo ocioso puede ser seleccionada como *bird*.

Optimización y control óptimo

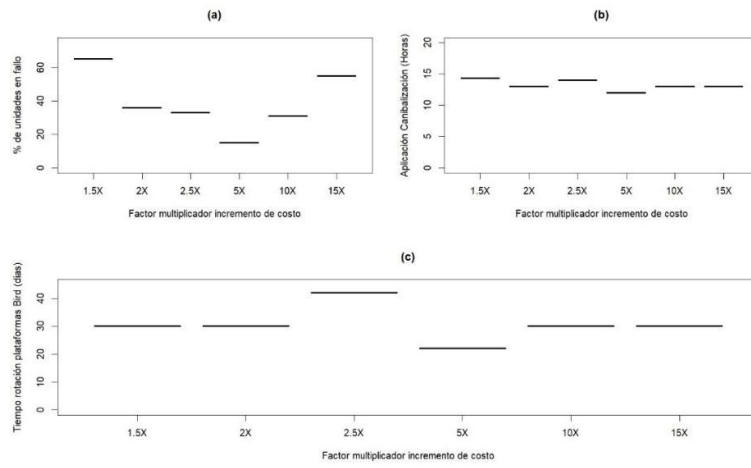


Figura 5.35. Valores óptimos para la aplicación de una política de canibalización

6 Análisis de resultados

En este capítulo, se realizan las consideraciones derivadas de los resultados obtenidos a partir de la experimentación sobre el modelo de simulación en el capítulo anterior. Se examinan las evaluaciones comparativas entre las políticas de mantenimiento seleccionadas, se analiza la influencia de la canibalización en dichas políticas y se presentan las contribuciones encontradas mediante la experimentación. Además, se establece un contraste entre la pregunta de investigación planteada y los resultados obtenidos, lo que permite una comprensión más completa del alcance y las implicaciones de los hallazgos.

6.1. Descripción de los datos.

Los datos recolectados son valores numéricos del estado de operación de flota, entre ellos se registran los tiempos de funcionamiento desagregado en cada uno de sus estados, esto mismo se realiza para los módulos y los componentes. En este mismo informe se registran también los valores de costos, realización de misiones y las órdenes de mantenimiento que se gestionaron. Por último, el reporte también contiene el conjunto de canibalizaciones realizadas permitiendo seguir las órdenes de canibalización identificando los donadores. El periodo seleccionado es de 365 días, tiempo en el cual se considera que los efectos de las tareas de mantenimiento se han desagregado en el sistema. Los datos son almacenados en hojas de Excel, una por cada simulación del periodo mencionado.

Por lo tanto, una hoja de datos tiene tres grandes bloques de datos: El bloque de datos relacionado con los indicadores. El bloque relacionado con la dinámica del sistema, como por ejemplo respecto a la operación, el comportamiento de fallo. Y el bloque de datos relacionado con los costos y gestión del sistema. Todos estos datos serán tratados estadísticamente en apartados posteriores.

6.2. Precedentes

Es común la implementación de políticas de mantenimiento correctivo y preventivo en sistemas multi unidad, dada su eficacia para alcanzar objetivos operacionales a un costo viable. No obstante, hay que reconocer que factores externos pueden exigir una mayor resiliencia del sistema. En este contexto, la canibalización emerge como una técnica adicional de resiliencia frente a imprevistos, suministrando componentes usados para mantener la continuidad del servicio.

El modelo de simulación desarrollado replica un sistema multi unidad de flota con enrutamiento, una estructura prevalente tanto en la industria como en los servicios de transporte. La independencia de cada unidad plantea retos significativos para la gestión del mantenimiento, especialmente en la búsqueda del equilibrio entre la fiabilidad individual y el rendimiento colectivo. Se destaca que la fiabilidad del sistema depende intrínsecamente de cada unidad individual, subrayando la importancia de altas tasas de disponibilidad.

A lo largo del proyecto, se investigaron los criterios que constituyen la toma de decisiones en el mantenimiento en un sistema multi unidad, incluyendo la gestión del personal, el inventario y la cantidad de unidades operativas, políticas de mantenimiento, la arquitectura de la unidad y los tipos de componentes. Además, se evaluó el impacto de diversas políticas de mantenimiento a través de experimentos que destacaron su influencia en la eficiencia de la flota. Los costos asociados, un factor limitante en la toma de decisiones, fueron analizados y cuantificados dentro del modelo de simulación. La complejidad de la gestión de recursos en entornos reales añade una capa de desafío al proceso.

Complementariamente, a las prácticas tradicionales de mantenimiento, se exploró la canibalización como una política híbrida que integra el mantenimiento y el inventario de repuestos usados. Los resultados confirmaron lo reportado en la literatura: la canibalización potencia la tasa de disponibilidad de un sistema multi unidad. El proyecto demostró que esta técnica no solo refleja mejoras en la disponibilidad, sino también en la prestación del servicio, particularmente en casos de alta incidencia de fallos y escasez de componentes.

Este análisis integral refuerza la viabilidad de la canibalización como estrategia para fortalecer la resiliencia y eficiencia de los sistemas de flota, asegurando que el mantenimiento preventivo y reactivo opere en sinergia para optimizar el rendimiento y la disponibilidad general.

6.3. Acerca del modelo de simulación.

Los experimentos propuestos mostraron resultados sobre la eficacia de la canibalización en sistemas multi unidad, particularmente si el número de unidades es alto. En los Experimentos 1 y 2, observamos un impacto de la canibalización en la disponibilidad de unidades para servicio. Este impacto se traduce directamente en una mejora de la disponibilidad operativa del sistema, tal como se detalla en el Experimento 4. Aunque la canibalización no alcanza las mismas tasas de disponibilidad que una política de mantenimiento preventivo, sí ofrece una mejora notable frente al mantenimiento correctivo solo. Esto puede brindar la herramienta necesaria para que el encargado de mantenimiento piense en utilizar canibalización.

Sin embargo, el Experimento 3 revela un criterio restrictivo al contrastar los costos de mantenimiento entre las políticas de mantenimiento correctivo solo y aquellas que integran canibalización. La implementación de la canibalización incrementa significativamente las horas de mantenimiento requeridas, planteando dudas sobre su rentabilidad. Al investigar más a fondo en el Experimento 6, se mostró que, aunque la canibalización incrementa los costos de mantenimiento, no afecta significativamente los costos de los componentes. Esto sugiere que, con una planificación adecuada, el aumento en el presupuesto de mantenimiento podría justificarse para aprovechar los beneficios en disponibilidad que la canibalización ofrece.

El impacto de la canibalización sobre la calidad del servicio se examina en el Experimento 5, demostrando una mejora en el número de rutas completadas con el uso de mantenimiento correctivo combinado con canibalización, en comparación con el mantenimiento correctivo solo. Este hallazgo subraya cómo, a pesar de los costos adicionales de mantenimiento, la canibalización puede contribuir positivamente a la operación del sistema, aumentando su capacidad para cumplir con las demandas del servicio.

En conclusión, los resultados confirman que la canibalización, bajo los criterios identificados, representan una técnica viable para mejorar la disponibilidad operativa de sistemas multi unidad. Aunque implica un incremento en los costos de mantenimiento, este enfoque mejora la capacidad del sistema para cumplir con sus

objetivos de servicio, justificando la inversión adicional. La clave radica en equilibrar cuidadosamente los costos y beneficios, considerando tanto el impacto en la disponibilidad como en la calidad del servicio ofrecido. Así, la canibalización emerge como una opción estratégica que, con una implementación y gestión adecuadas, puede optimizar la operatividad y el rendimiento de los sistemas multi unidad. La aplicación de esta técnica puede sobrellevar aspectos que afecten el sistema, Sin embargo, se requiere una cantidad de unidades altas para poder ser aplicada, si la cantidad de unidades es baja se nota cierta aleatoriedad en el comportamiento de la tasa.

6.4. Análisis sobre el proceso de optimización.

El método de optimización en dos etapas aporta un valor significativo a la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento. Inicialmente, la primera etapa de optimización estabiliza el sistema de manera eficaz conforme a las condiciones actuales, un escenario típico que cualquier flota podría enfrentar. No obstante, las flotas operan bajo una variedad de entornos que influyen en su rendimiento. Para abordar esto, el segundo paso del proceso introduce ajustes ante cambios extremos en variables críticas, como los tiempos de suministro y los costos. Este enfoque dual no solo refuerza la estabilidad inicial del sistema, sino que también lo prepara para adaptarse y responder de manera óptima ante fluctuaciones significativas en su entorno operativo.

Por lo tanto, el proceso de optimización del sistema de gestión de mantenimiento desde la perspectiva de la función de ajuste abre un conjunto de posibilidades en cuanto a la elaboración de escenarios, los dos estudiados en este proyecto plantean importantes ideas en la toma de decisiones del gestor de mantenimiento, resaltando que se presenta una idea en la cual complementario a los entornos convencionales que pueden rodear al sistema, es posible estudiar eventos que en determinados momentos se pueden presentar, esto con el fin de incrementar la resiliencia del sistema identificando en periodos donde la canibalización puede ayudar a sostener la disponibilidad en una tasa aceptable. Los componentes usados deben ser seleccionados cuidadosamente desde su tiempo de uso, procurando siempre generar intercambios que permitan alcanzar un cierto tiempo de uso efectivo en su nueva ubicación. Considerando lo anteriormente expuesto en los escenarios propuestos para el sistema, a continuación se realizan las siguientes apreciaciones.

El modelo permite crear un contexto sobre el sistema simulado, partiendo de un estado conocido, para ello se recomienda estudiar las tasas de fallo presentadas

por el sistema como criterio inicial, posteriormente dimensionar el sistema a partir de ese criterio inicial y modificar el entorno del sistema para observar su respuesta y acondicionamiento al nuevo entorno, esto presenta elementos nuevos que invocan conceptos de la literatura en la cual se indica que los modelos de simulación para sistemas complejos (Alrabghi et al., 2017), presentan ventajas sobre otro tipo de modelos considerando las nuevas tecnologías y capacidades de los sistemas computacionales.

En el escenario con cambios en los tiempos de la cadena de suministro, se encontró que un sistema multi unidad es sensible a los retardos en el suministro de componentes. El análisis del impacto de distintos periodos de retardo en el suministro de repuestos ha demostrado tanto el aporte de la canibalización como de la optimización en un efecto combinado para mejorar el desempeño del sistema. Específicamente, este efecto combinado ha tenido un impacto significativo en el retardo de 60 días, manteniendo la tasa de cumplimiento de la misión en aproximadamente un 3%, en comparación con un retardo de 180 días. Además, la presencia de canibalización durante estos retrasos ha mejorado positivamente la disponibilidad operacional del sistema. Por otro lado, los retardos entre 90 y 120 días también han mostrado mejoras en el cumplimiento de objetivos, aunque el efecto es menos pronunciado durante estos periodos, manteniendo la tasa de cumplimiento relativamente constante. Sin embargo, es importante destacar que estos beneficios vienen acompañados de algunos efectos indeseados, como el incremento en los costos de mantenimiento con rangos entre un 2 y 3% para los valores de retardo entre 120 y 180 días. Finalmente, la optimización ha sido esencial para ajustar los parámetros que mejoran la respuesta del sistema ante los retardos de mantenimiento. Ajustando los umbrales de mantenimiento y los parámetros de la canibalización de manera adaptativa a las condiciones que se le presentan al sistema. Por lo tanto, se ha podido evaluar tanto el efecto de la canibalización como de la optimización en el sistema multi unidad. Este enfoque permite una comprensión más precisa de cómo estos elementos interactúan para mantener la operatividad del sistema bajo condiciones de retardo.

De la misma forma, fue positiva la observación que se hizo sobre los componentes y la identificación de los tiempos en los cuales fueron intercambiados. Se encontró que efectivamente como se había planeado, los componentes son tomados siempre y cuando sea posible, con el menor tiempo de uso del donador, se encontró que los componentes generalmente son intercambiados en valores cercanos a la terminación de su tiempo libre de fallo, lo cual presenta conveniencia de cara a disminuir los efectos sobre parámetros como el MTBF y el MTTR. Esta afirmación ha sido confirmada cuando se ha hecho la observación de estos indicadores, mostrando diferencias poco significativas en el sistema. Se considera que el

hecho de no aplicar canibalización instantánea, permite impactar menos el desempeño y minimizar los efectos adversos sobre la canibalización. Complementario a ello, el impacto positivo de la optimización sobre los indicadores es más apreciable, lo cual se ha comprobado en la experimentación con el caso de estudio. Como se pudo comprobar y aislar, comparativamente la optimización del sistema tiene un impacto superior que el de la canibalización solamente, pero en conjunto los dos efectos aportan sobre el desempeño del sistema.

De igual manera en el escenario donde los precios de los componentes son modificados, se encontró que si bien la canibalización actuó, el efecto no es tan apreciable como en el escenario anterior. Así, cuando se estudiaron los costos de totales del sistema, se muestra que el efecto de la canibalización no presenta un valor apreciable a simple vista. Sin embargo, cuando se observa el comportamiento del cumplimiento del objetivo si es posible observar un efecto mínimo de la canibalización. Por otro lado, al igual que el escenario anterior la optimización sigue mostrando efectos positivos en cuanto a los costos y operación del sistema, este efecto es mucho más evidente en este escenario alcanzando tasas de un 13% de mejora sobre el cumplimiento del objetivo y hasta un 4% en los costos a diferencia de cuando no se utilizan.

En cuanto a la optimización de los parámetros de desempeño el algoritmo presenta ventajas en la presentación de valores que el gestor de mantenimiento puede agregar como variables para tomar decisiones y así impactar de mejor manera la flota. En conclusión, y como ha sido objeto de esta tesis, se evidencia que la canibalización es una política que debe ser sincronizada con otras políticas, no es una política que deba estar siempre presente, y el modelo ha permitido identificar qué criterios en cada uno de los escenarios estudiados es más beneficioso la utilización. También que el modelo apoyado en un algoritmo de optimización presenta ventajas en cuanto a dimensionar posibles efectos que se puedan tener sobre el sistema y que la optimización permite enfrentarlos de una mejor manera.

6.5. Comparación con los objetivos de investigación

En este proyecto se planeó el desarrollo de tres objetivos de investigación, esta sección contrasta los resultados obtenidos con cada uno de los objetivos propuestos buscando construir la base para dar cumplimiento de la hipótesis de investigación.

6.5.1. Objetivo de investigación 1

“Determinar las características que posee un sistema multi unidad que posibilitan la aplicación de políticas de mantenimiento, incluida la canibalización.”

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

La literatura muestra que los sistemas multi unidad han sido tratados en trabajos previos. Sin embargo, la complejidad que presentan en la operación y la gestión requieren modelos y métodos que representen cada vez mejor las relaciones que se generan entre las unidades.

Mediante el desarrollo del modelo y la experimentación se logran identificar características de los sistemas multi unidad que permiten aplicar determinadas políticas de mantenimiento.

En el desarrollo del modelo de componente se logra evidenciar cómo la diversidad de tipos componentes, los comportamientos de fallos que cada uno presenta y la relación que presentan con respecto a otros componentes inciden en el comportamiento general de la unidad, Esta característica en se materializó en el proyecto mediante la propuesta de configuración de componentes presentada en la Figura 3.4. Esta arquitectura de componentes serie genera una valoración crítica de cada componente al no haber estados intermedios de funcionamiento de la unidad, y presenta una vista de la flota en su relación con el sistema de mantenimiento. Esta dependencia de la arquitectura de componentes o estructural presenta un desafío inherente desde las políticas de mantenimiento, incluida la canibalización porque las políticas deben ser más ajustadas para limitar los efectos sobre la operación. Esta última idea refuerza el hecho que la canibalización tenga un mejor desempeño en unidades con este tipo de dependencia.

De igual manera, el comportamiento autónomo que presenta cada una de las unidades del sistema debe ser coordinada con el resto de unidades que componen la flota. Esta característica fue estudiada en el modelo mediante la disciplina de ruta, la cual propende por utilizar al máximo el tiempo de uso del recurso disponible logrando completar de manera rentable los objetivos del sistema. Los experimentos 1 (Sección 4.2.1) y 2 (Sección 4.2.2) identifican como el cumplimiento de la disciplina de ruta, conlleva que la política de mantenimiento tenga un mayor efecto sobre el sistema. Desde este punto de vista, la disciplina de ruta afecta la tasa disponibilidad operacional como respuesta a la política de mantenimiento aplicada.

Sin embargo, una de las características identificada más relevante de un sistema multi unidad son la cantidad de estados que presentados por cada una de las unidades en un periodo de tiempo del sistema. El modelo de eventos discretos propuesto facilita el reconocimiento de estos estados, permitiendo realizar un seguimiento de los estados de cada unidad dentro del sistema. De esta manera, en el modelo propuesto se presenta un seguimiento a cada uno de los tiempos en los cuales ha estado la unidad, permitiendo al gestor de mantenimiento tomar decisiones sobre la disciplina de ruta, la cantidad de rutas y las unidades que mejor desempeño tengan. La Figura 6.1, muestra el resultado de la aplicación de una

disciplina de ruta como la mostrada en la Figura 5.3. En esta gráfica se identifican los estados de acuerdo al modelo de unidad mostrado en la Figura 3.9 de cada una de las unidades y el tiempo en el cual han estado en cada uno de esos estados.

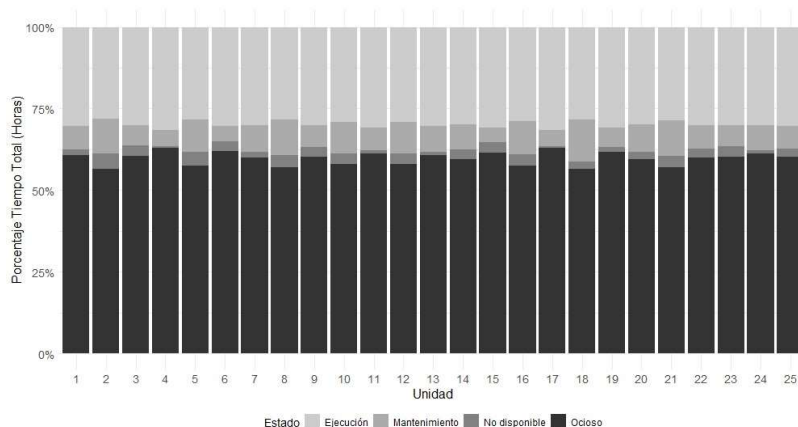


Figura 6.1. Tiempo de las unidades en cada uno de los estados modelados

Por último, el enfoque orientado a misión característico de los sistemas multi unidad, en especial las flotas, hace que la efectividad en la selección de la política de mantenimiento tenga un mayor efecto sobre la operación. Esta característica fue ampliamente cubierta en este proyecto, los experimentos 2 (Sección 4.2.2), 5 (Sección 4.2.5) y 7 (Sección 4.2.7), muestran los efectos de las políticas sobre el caso de estudio. Estos experimentos muestran como el bloque de políticas hace que la disponibilidad del sistema responda de una manera positiva o, por el contrario, su desempeño decaiga.

6.5.2. Objetivo de investigación 2

“Establecer los criterios de selección sobre el sistema de gestión de mantenimiento de acuerdo con el estado y objetivos de mantenimiento del sistema multi unidad.”

Un sistema multi unidad se conforma de una serie de relaciones entre las unidades, este trabajo se ha apoyado en la dependencia estructural para modelar una unidad con componentes críticos, estas relaciones han permitido indagar más sobre el comportamiento de una unidad dentro de una flota. Para el cumplimiento de este objetivo se planteó un procedimiento que rige la utilización del modelo de simulación. Este procedimiento es descrito mediante el diagrama de flujo mostrado en la

Figura 6.2, en primer lugar, se fijan unas necesidades del sistema mediante la disciplina de ruta, posteriormente se definen los recursos relacionados con el mantenimiento, entre ellos la cantidad de piezas inicial y las horas de personal disponible. También se establecen los parámetros de fiabilidad que se medirán cuando se realice el desarrollo de la simulación. Por otro lado, se han seleccionado un conjunto de políticas de mantenimiento que afectaran el sistema. Por último, se lanzan las simulaciones y se toman las mediciones correspondientes.

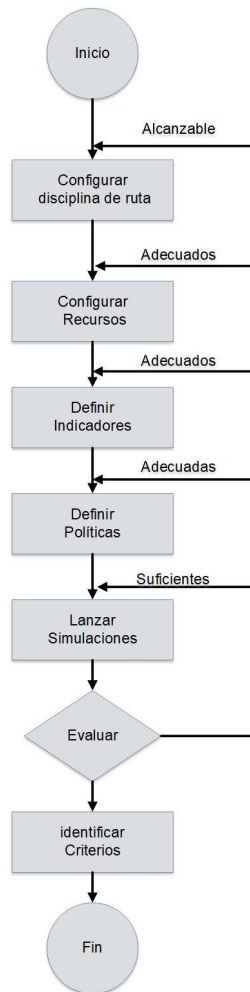


Figura 6.2. Procedimiento seguido para la identificación de criterios

Este procedimiento permitió identificar que con respecto al sistema de gestión de mantenimiento. El objetivo del mantenimiento indica las acciones que se deben tomar sobre las unidades, este proyecto planteó el estudio de un sistema compuesto de unidades con componentes críticos, en este caso el criterio identificado es la dependencia que se quiera estudiar sobre el sistema siendo para este estudio la dependencia estructural la más utilizada. Sin embargo, el sistema de gestión involucra múltiples variables que deben considerarse. Este estudio muestra que existe una dependencia económica entre algunas de estas variables, la cual influye en las decisiones respecto a las unidades. Si se apoya el sistema con políticas de canibalización, es crucial tener en cuenta el criterio económico que relaciona la disponibilidad operacional con el costo. Si bien esto ya ha sido estudiado con anterioridad, en este proyecto se presenta un resultado más preciso sobre los componentes canibalizados, dado que es posible identificar los tiempos en los cuales se están realizando los intercambios de componentes esto permite incluir tres criterios más sobre el sistema de gestión que no se habían tratado antes, el tiempo de inicio de las canibalizaciones, este criterio que ha sido tratado anteriormente como instantáneo, en esta investigación es resultado de ubicar un periodo donde la canibalización impacte más la tasa de disponibilidad sin incrementar demasiado los costos por mantenimiento.

Otro criterio identificado es la cadencia de la canibalización, que define la regularidad que se debe tener en la realización de un conjunto de intercambio, esto porque demasiadas canibalizaciones en la unidad de tiempo pueden disminuir la fiabilidad del sistema, así como los costos de mantenimiento y pocas pueden afectar la disponibilidad del sistema. Por último, el tiempo que una plataforma está disponible para intercambio, también puede representar un criterio a tener en cuenta cuando se realiza una selección de las políticas a utilizar, en este estudio se utilizó una política *Bird*, esta recomienda mantener un conjunto de unidades disponibles para tomar componentes. No obstante, el tiempo que ellas estén disponibles puede implicar mayores problemas en el momento que se quiera que estas unidades vuelvan a servicio.

De igual manera, si se enfoca el inventario de componentes, el criterio del número inicial de componentes marca un aspecto importante en el desarrollo del conjunto de políticas, este criterio complementa la dependencia económica que se da entre variables del gestor de mantenimiento esto porque un inventario inicial muy alto genera costos de almacenamiento considerables, pero poco inventario inicial quizá genere problemas durante la operación del sistema. Este último aspecto permite apreciar como este criterio influye en la aplicación de la canibalización esto porque con respecto a los costos, la canibalización no genera costos por componentes.

6.5.3. Objetivo de investigación 3

“Evaluar parámetros de fiabilidad sobre el sistema multi unidad al aplicar políticas de mantenimiento, incluida la canibalización”

La estructura de las unidades usada en este trabajo, desarrolla una dependencia estructural entre los componentes de las unidades y generó un sistema de componentes críticos. Esta relación fue estudiada de manera macro, mediante la evaluación de parámetros de fiabilidad que miden el comportamiento de la flota, la tasa de fallos, el MTTR y el MTBF fueron los indicadores identificados para evaluar la fiabilidad en la aplicación de políticas de mantenimiento y canibalización. El procedimiento para llegar a este resultado comienza por indagar la generalidad sobre los distintos indicadores que en los sistemas de mantenimiento se miden. Estos indicadores tratan de medir el desempeño del sistema de mantenimiento de un conjunto de sistemas. No obstante, el tiempo medio entre fallos y el tiempo medio de reparación permiten concentrar los esfuerzos en conocer específicamente cuál es la salud del sistema. En este proyecto estas variables fueron usadas en primera instancia para validar el comportamiento de la flota, y posteriormente en el modelo de optimización. Los resultados muestran que si la tasa de fallo tiene un valor medio, el MTBF logra mantener un valor alto por más tiempo a pesar de la presencia de perturbaciones en la cadena de suministro, esto debe estar acompañado de un inventario inicial óptimo. Por otro lado, el MTTR disminuye su valor si existe un inventario inicial alto. Para este indicador, los resultados muestran que se puede llevar a incrementar si existe una perturbación muy alta en la cadena de suministro, esto debido al incremento de tiempo logístico de las órdenes de mantenimiento.

Por otro lado, se encontró que la tasa de fallo juega un papel crucial en la aplicación de políticas de canibalización, esta medida de fiabilidad, mostró que, si la tasa de fallo es alta, las políticas de canibalización tienen un mayor efecto sobre la tasa de disponibilidad, una tasa media puede hacer que el sistema tienda a utilizar mejor políticas correctivas, por último, una tasa baja puede indicar mejor que el mantenimiento correctivo más preventivo sea más apropiado. Otro indicador que se midió durante esta fase del trabajo fue la tasa de canibalización, este contrasta el número de canibalizaciones con respecto al número de fallos, se busca evaluar la relación entre el número de fallos que han sido resueltos con canibalización, esta medida se contrastó con el MTTR para observar si este era afectado a medida que el indicador de canibalización era más alto o viceversa, el resultado arrojó que si la tasa es muy alta el MTTR tiende a aumentar, debido a que los componentes usados quizá tengan poca vida útil después del intercambio.

6.6. Discusión de aportes del trabajo

Las políticas de mantenimiento impactan significativamente en la tasa de disponibilidad de los sistemas, y el uso de políticas de canibalización también muestra un efecto considerable en este contexto. Investigaciones anteriores han explorado los efectos de la canibalización en aspectos como los costos (Salman et al., 2007) y tasas de abastecimiento de repuestos (Dreyfuss et al., 2018). Sin embargo, pocos estudios han examinado cómo los retrasos en la cadena de suministro afectan la disponibilidad operacional de un sistema multi unidad y cómo las políticas de canibalización pueden mejorar la operatividad de las unidades. Este estudio ofrece un análisis detallado de cómo y cuándo implementar una política de canibalización para maximizar los beneficios en la disponibilidad operacional del sistema, especialmente en condiciones de severos retrasos en la cadena de suministro. El trabajo presenta un modelo que ayuda a estimar parámetros de interés para los gestores de mantenimiento y a observar la respuesta del sistema ante cambios internos o externos en relación con los recursos y la operatividad. Esta herramienta ha demostrado ser de gran valor en entornos con restricciones severas de suministro.

Por otro lado, este trabajo también permitió indagar sobre el comportamiento de distintas políticas de mantenimiento a retrasos que afectan la operatividad del sistema. Los resultados permiten observar cómo estas políticas absorben y mitigan estos retrasos y como la disponibilidad operacional se ve afectada en el conjunto política de mantenimiento más retraso logístico. La implicación de este hallazgo es permitir a un gestor de mantenimiento adelantarse a posibles problemas que retrasen el suministro de componentes sin caer en el sobre abastecimiento que impliquen mayores costos de almacenamiento y de cara a mantener una tasa de disponibilidad operacional aceptable.

Según los resultados, se puede concluir que no es necesario recurrir a la canibalización cuando el sistema cuenta con un suministro fiable y costos razonables, ya que el conjunto de unidades es suficiente y el sistema alcanza una tasa de disponibilidad apreciable. En cambio, las políticas de canibalización resultan convenientes en los siguientes contextos según las simulaciones y resultados obtenidos: Primero, cuando hay un alto estrés en la cadena de suministro debido a cambios en los precios o en la cantidad de piezas disponibles. En este caso, el inventario de piezas no se puede reponer satisfactoriamente, lo que incrementa la tasa de fallos del sistema. Para mejorar la disponibilidad de las unidades, se requieren componentes, y la opción viable y recomendable es la canibalización. Segundo, en el contexto militar, donde no hay un problema en la cadena de suministro, sino un problema de velocidad o tiempo crítico para completar una misión. En este caso, se requiere que la unidad funcione en el menor tiempo posible. Esta situación puede

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

aplicarse a flotas civiles, como un sistema de baterías en zonas remotas. Si una batería falla y se puede recibir un repuesto en un tiempo razonable, es necesario realizar un intercambio de una batería por otra rápidamente. Por ejemplo, para alimentar un sistema crítico como un hospital que requiere suministro de energía de manera urgente. Por lo tanto, en sistemas donde existen factores críticos de funcionamiento, la canibalización también puede ser aplicable y ofrecer ventajas, incluso si los suministros se reciben en tiempos razonables.

Por último, el modelo gracias a su interacción con el algoritmo de optimización permite evaluar parámetros puntuales a entornos distintos a los aquí mostrados por ejemplo cambios en los costos de operación, disciplinas de ruta que exploten mejor las unidades para alcanzar objetivos más exigentes, y un marco de trabajo para evaluar distintas políticas de mantenimiento que tengan alguna implicación sobre un sistema multi unidad.

6.7. Limitaciones del modelo

La versatilidad presentada por el modelo de simulación propuesta y su utilidad a permitir la toma de decisiones a gestores de mantenimiento sobre la implicación de un determinado conjunto de políticas, presenta aún un conjunto de mejoras que pueden potenciar a futuro el modelo y permitir ajustar más finamente los resultados obtenidos, entre las limitaciones que actualmente presenta el modelo se tiene que:

- El modelo presenta aún algunas deficiencias en la escalabilidad, esto es el tamaño de flota que es capaz de simular, aunque la experimentación se hizo con un tamaño de flota aceptable, en la experiencia obtenida sobre el estudio de los sistemas multi unidad se encontraron sistemas con hasta 3000 unidades, esto se podría mejorar haciendo una mejor optimización del código y extendiendo el modelo a una simulación distribuida sobre distintos sistemas computacionales. Este aspecto ya tiene un principio dado que como se mostró en la descripción general del modelo, el sistema de unidades está desacoplado del sistema de gestión de mantenimiento, facilitando agregar otro tipo de enlaces mediante una conexión TCP/IP.
- La cantidad de componentes que componen la arquitectura de la unidad. Para este estudio se utilizó una arquitectura 4x4, esto significa 4 módulos cada uno con cuatro componentes, aunque los 4 componentes eran suficientes para plantear el problema del caso de estudio, lo cierto es que la cantidad de componentes y módulos en una unidad de un sistema real, difiere en gran manera de los trabajados en esta investigación, incrementar el número de módulos puede ayudar a mejorar los resultados del modelo.

- La unidad de tiempo para el modelo puede ser variada para alcanzar una mejor atomicidad en la captura de eventos del sistema. En efecto, el modelo es bueno en la representación del tiempo. Así, periodos de tiempo para planeación estratégica, táctica y operacional pueden ser realizados. Sin embargo, cuando se cambia la unidad de tiempo, se debe tener cuidado que el conjunto de datos de fallos sea adecuado para esta unidad de tiempo de lo contrario el sistema no tomará los eventos de fallo adecuadamente.
- Aunque el sistema se alimenta con las distribuciones de Weibull de los componentes, la cual según la literatura es una de las distribuciones más usadas para modelar comportamientos de fallos. El modelo aún no ha sido alimentado con datos reales de alguna flota en particular.
 - El algoritmo de optimización utilizado es de uso general, la revisión de la literatura ha mostrado que algoritmo como NSGA-II presentan también ventajas en la optimización de funciones multi objetivo. A pesar de esto, el modelo de simulación no presenta opciones en cuanto a la ampliación hacia otro algoritmo, esto debido a que para poderlo insertar se debería describirlo primero en el lenguaje gráfico de LabVIEW o utilizar una pasarela para describirlo en otro tipo de lenguaje.

7 Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

En este estudio se ha desarrollado un modelo de simulación de un sistema multi unidad con su respectivo sistema de gestión de mantenimiento, esto ha permitido crear distintos ámbitos de estudio alrededor del comportamiento y gestión de este tipo de sistemas. Adicionalmente, se ha realizado un proceso comparativo de políticas de mantenimiento para medir los efectos de estas en el desempeño de los sistemas multi unidad. De igual manera, se ha estudiado la canibalización como técnica híbrida entre mantenimiento y solución de problemas de inventario, agregando nuevos elementos para su aplicación y uso. A partir de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los sistemas multi unidad presentan complejidades en la dependencia estructural debido a las interacciones que presentan sus componentes, la variedad de tipos que se pueden encontrar y las relaciones mecánico-físicas que requieren para cumplir su función, estas dependencias fueron modeladas en este proyecto median una red de Petri interpretada, ofreciendo ventajas en cuanto a la capacidad de representación sobre los estados que un componente pueda tener, y relaciones jerárquicas con módulos o sub-módulos y otros componentes del mismo nivel.

Conclusiones y trabajos futuros

- El tamaño de una flota incide en su capacidad de servicio y la resiliencia que ante eventos internos o externos puedan afectar su disponibilidad operacional. Eventos como cambios en la demanda, en la disponibilidad de unidades, problemas en la cadena de suministro y cambios en las reglas de costos fueron estudiados en este trabajo.
- La explotación de los recursos de una flota con enrutamiento se da mediante la disciplina de ruta, esta define de acuerdo a la planeación de las operaciones que se realizarán sobre un activo. Por lo tanto, la planeación de la disciplina de ruta también incide sobre el desempeño del sistema y sus necesidades de mantenimiento.
- La gestión del sistema de mantenimiento de un sistema multi unidad, al igual que el sistema mismo entabla un conjunto de relaciones que son complejas de modelar, en este proyecto cuatro grandes bloques tuvieron que ser relacionados, las políticas de mantenimiento, la gestión de costos, el inventario y la disciplina de ruta, haber descrito esta funcionalidad mediante una HCPN facilitó la comprensión de las relaciones y su posterior inclusión dentro del modelo de simulación.
- Las políticas de mantenimiento mostraron tener una incidencia directa sobre el sistema multi unidad, se percibe un hecho real en la experiencia del autor con flotas de vehículos y los talleres la cual es en muchos casos obviar el mantenimiento preventivo y solo esperar a aplicar el mantenimiento correctivo, el modelo muestra efectivamente que la razón obedece a los costos. Sin embargo, también se puede observar que esto afecta la disponibilidad del sistema y su capacidad para cumplir con los objetivos. En este mismo ámbito, la canibalización muestra ventajas en la disponibilidad del sistema cuando se tienen problemas de suministro de componentes, su interacción con políticas correctivas es mucho más acertada que con políticas preventivas, esto porque la canibalización debe resultar más en toma de decisiones operacionales.
- La utilización de componentes usados genera impactos importantes en la disponibilidad de la flota. No obstante, se debe monitorear indicadores como el MTTR y el MTBF para evaluar si los intercambios han sido acertados o no, en este trabajo se utilizó el método de buscar siempre el componente de menor tiempo de vida en la unidad donadora, logrando hacer notar que estos no afectaban en gran manera los indicadores mencionados. Pero esto en la práctica puede requerir un sistema de medición distinto al tiempo de uso para identificar componentes óptimos para intercambiar.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Si bien los costos de mantenimiento son incrementados cuando se utilizan políticas de canibalización la optimización de su uso ayuda a mejorar el costo por operación no servida, y por ende una mejor percepción del servicio o actividad de la flota.
- La utilización de redes de Petri coloreadas jerárquicas e interpretadas han permitido visualizar de manera clara y concisa el flujo de actividades y eventos en el sistema, generando un insumo para el posterior modelado. Esto ha facilitado el análisis y la comprensión de los procesos de mantenimiento y suministro de piezas, así como la evaluación de su impacto en la disponibilidad y rendimiento del sistema.
- El proceso de optimización demostró ser crucial en la identificación de parámetros relevantes del sistema, tales como inventario inicial, umbrales de mantenimiento preventivo y aplicación de la canibalización, lo cual facilita y mejora la toma de decisiones por parte de los gestores de mantenimiento. Esta metodología permite abordar las decisiones de manera más precisa y eficiente, optimizando el rendimiento general del sistema.
- El proceso de optimización en dos etapas produjo resultados significativos en la gestión del sistema, al identificar los valores óptimos de los parámetros que influyen en el comportamiento del sistema bajo condiciones extremas o aleatorias. Este enfoque previene el deterioro del desempeño del sistema que podría ocurrir sin esta intervención estratégica.
- El uso de LabVIEW como herramienta de desarrollo del modelo de simulación ha demostrado ser efectivo y versátil, permitiendo una representación precisa y detallada del sistema multi unidad. La flexibilidad de LabVIEW ha facilitado la implementación de las reglas y condiciones necesarias para simular diferentes escenarios y políticas de mantenimiento.
- El uso de Waptia como algoritmo de optimización descrito en LabVIEW, a pesar de ser un algoritmo de uso general, ha permitido obtener buenos resultados realizando las configuraciones adecuadas.

En conclusión, el modelo de simulación propuesto, ha permitido analizar y evaluar el impacto de la canibalización como política híbrida de mantenimiento y suministro de piezas usadas en un sistema multi unidad. Los resultados obtenidos proporcionan una visión clara de los beneficios y desafíos asociados a esta estrategia. Junto con el proceso de optimización propuesto, pueden ser utilizados como base para la toma de decisiones informadas por parte de los responsables de mantenimiento.

7.2. Trabajos futuros.

Los modelos de simulación presentan una versatilidad enorme en la representación de cualquier tipo de sistema en este caso se utilizó su versatilidad para representar un sistema multi unidad integrando su sistema de mantenimiento siendo desarrollado en LabVIEW y redes de Petri coloreadas e interpretadas. Considerar una política de canibalización como estrategia de mantenimiento y suministro de piezas usadas, permitió observar aspectos que se mejoran cuando se utilizan. Por lo tanto, se proponen las siguientes directrices para futuros trabajos:

- Investigación de otras políticas de mantenimiento: Además de la canibalización, existen otras estrategias de mantenimiento que podrían ser exploradas, como el mantenimiento predictivo o basado en condiciones. Utilizando técnicas de monitoreo y análisis de datos. Comparar y evaluar estas políticas en presencia de canibalización, contrastando el rendimiento del sistema y eficiencia de los recursos podría ser un tema de interés para futuras investigaciones.
- Consideración de variaciones en la demanda y las condiciones operativas: En el modelo actual, se asumió una demanda constante y condiciones operativas estables. Sin embargo, en la realidad, estos factores pueden variar significativamente. Sería interesante estudiar cómo los cambios en la demanda de misiones y las condiciones operativas afectan el rendimiento del sistema y la eficacia de la política de canibalización, y cómo se pueden adaptar las decisiones de mantenimiento en respuesta a estos cambios.
- Optimización de la planificación de mantenimiento y suministro de piezas: En el modelo actual, se pueden explorar enfoques más avanzados para optimizar la planificación de las actividades de mantenimiento y el suministro de piezas usadas. El uso de algoritmos de optimización y técnicas de programación matemática puede ayudar a determinar la secuencia óptima de mantenimiento, la asignación de recursos y la gestión de inventarios, teniendo en cuenta las restricciones y objetivos específicos del sistema.
- Integración con sistemas de gestión de mantenimiento en tiempo real: El modelo de simulación desarrollado podría ser integrado con sistemas de gestión de mantenimiento en tiempo real para permitir una simulación continua y actualizada del sistema. Esto permitiría un monitoreo y control más efectivo de las actividades de mantenimiento, así como la toma de decisiones en tiempo real basada en los datos y eventos en curso.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

En general la canibalización puede ser insertada en conjunto con cualquier tipo de política de mantenimiento, luego la evolución y mejora continua de este modelo y su aplicación en escenarios más complejos y realistas puede generar nuevas perspectivas y contribuciones significativas en el campo del mantenimiento de sistemas multi unidad.

Anexo A

La tercerización del mantenimiento, en varios de las empresas consultadas, dificultó la obtención de un conjunto de datos de un solo sistema multi unidad. Para lograr identificar factores como repuestos, estrategias de mantenimiento y pautas de operación se recurrió a una encuesta, esto después que se hicieran varias solicitudes a empresas que tercerizan mantenimiento de flotas de autobuses de transporte integrado en ciudades como Cali y Bogotá en Colombia, sin llegar a obtener una respuesta positiva. Las encuestas se aplicaron a encargados de mantenimiento en empresas con flotas de transporte y en algunos talleres que prestan servicios como terceros a empresas locales e intermunicipales en la ciudad de Popayán – Colombia.

En primer lugar se aclara que las empresas de transporte en la ciudad funcionan mediante la figura de empresas asociadas, en la cual un conjunto de propietarios de buses crea una sociedad y esta empresa los agrupa como una entidad de transporte. Este detalle no es menos importante para este proyecto, debido a que el propietario puede llegar a tomar decisiones sobre el tipo de mantenimiento que se le aplicara al vehículo.

La encuesta aplicada contiene siete puntos que indagan sobre las directrices de mantenimiento de las empresas, el indicador de disponibilidad y los componentes más susceptibles de fallos. A continuación se muestran el cuestionario de la encuesta.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Encabezado

NOMBRE Y APELLIDOS:

FORMACION ACADEMICA:

AREA DE EXPERIENCIA PROFESIONAL:

TIEMPO:

CARGO ACTUAL:

INSTITUCION:

Cuestionario

Responda de manera concisa las siguientes preguntas.

1. La empresa terceriza el mantenimiento a la flota de buses?
2. Como evalúan el indicador de disponibilidad de la flota?
3. Realizan ustedes solicitudes de mantenimiento o esperan a que el activo entre en fallo?
4. Que características de flota poseen los buses que tiene la empresa?
5. Cuantos buses se designan para completar una ruta al día?
6. Que políticas de mantenimiento implementa actualmente la empresa?
7. Dentro de los buses que actualmente componen la flota. Qué sistema es el que presenta más fallos?
 - Sistema de transmisión (Transmisión, frenos, ruedas)
 - Sistema estructural (Carrocería, sillas, puerta)
 - Sistema eléctrico
 - Otro Cual?

A continuación se presenta la aplicación de encuestas de dos encargados de taller en dos empresas de transporte público de la ciudad.

NOMBRES Y APELLIDOS DEL JUEZ: Henry Villamora B
FORMACIÓN ACADÉMICA tecnico de motores Diesel
AREAS DE EXPERIENCIA 15 años
PROFESIONAL JEFE operativo TIEMPO _____
CARGO ACTUAL JEFE operativo y de servicios
INSTITUCIÓN Transpubesca Ltda

Responda de manera concisa las siguientes preguntas.

1. ¿La empresa terceriza el mantenimiento a la flota de buses?

Si

2. ¿Cómo evalúan el indicador de disponibilidad de la flota?

El operador avisa cuando se va para no programarlo

3. ¿Realizan ustedes solicitudes de mantenimiento o esperan a que el activo entre en fallo?

se realiza con la revisión preventiva del cotuario con los bimensuales o anual de revisiones

4. ¿Qué características de flota poseen los buses que tiene la empresa?

por marcas, nissan, chevrolet o por cantidad de sillas que son micros y los buses

5. ¿Cuántos buses se designan para completar una ruta al día?

de 10, 12, 17, 18 carros dependiendo de la ruta

6. ¿Qué políticas de mantenimiento implementa actualmente la empresa?

revisión bimensual y la preventiva cada mes

7. Dentro de los buses que actualmente componen la flota. ¿Qué sistema es el que presenta más fallos?

Sistema de transmisión (Transmisión, frenos, ruedas) x

Sistema estructural (Carrocería, sillas, puerta) _____

Sistema eléctrico y

Otro _____

¿Cuál? _____

Henry Villamora
Firma Henry V.
C.C. 76710701

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

NOMBRES Y APELLIDOS DEL JUEZ: Jorge E Narvaez B
FORMACIÓN ACADÉMICA Tecnico en sistemas
AREAS DE EXPERIENCIA
PROFESIONAL Asistente Rodamiento TIEMPO 10 AÑOS.
CARGO ACTUAL Asistente Rodamiento
INSTITUCIÓN Translibertad SAS.

Responda de manera concisa las siguientes preguntas.

1. ¿La empresa terceriza el mantenimiento a la flota de buses?

Si

2. ¿Cómo evalúan el indicador de disponibilidad de la flota?

Se Programa Semanal.

3. ¿Realizan ustedes solicitudes de mantenimiento o esperan a que el activo entre en fallo?

Si Mensualmente.

4. ¿Qué características de flota poseen los buses que tiene la empresa?

Non plus ultra (Nissan) 19 y 23
P252 series

5. ¿Cuántos buses se designan para completar una ruta al día?

1 a 015 carros por ruta.

6. ¿Qué políticas de mantenimiento implementa actualmente la empresa?

Mantenimiento Mensual por Medio
de inspeccion

7. Dentro de los buses que actualmente componen la flota. ¿Qué sistema es el que presenta más fallos?


Sistema de transmisión (Transmisión, frenos, ruedas) _____

Sistema estructural (Carrocería, sillas, puerta) _____

Sistema eléctrico X

Otro _____

¿Cuál?


Firma
CC 10591543 Mercedes

Ficha de Encuesta

1. Título de la Encuesta
Recolección de datos acerca de la gestión de mantenimiento en empresas de transporte público.
2. Objetivo de la Encuesta
Determinar las actividades de gestión de mantenimiento que se llevan a cabo en talleres de empresas con una flota de transporte.
3. Fecha de Realización
Del 9 al 25 de mayo de 2018
4. Población y Muestra
 - Población objetivo: Talleres relacionados con mantenimiento de empresas de transporte público, municipal e intermunicipal.
 - Tamaño de la muestra: 10
5. Metodología
 - Tipo de encuesta: Cuestionario estructurado
 - Modo de aplicación: Entrevista
 - Duración: Aproximadamente 10 minutos por participante
6. Instrumento de Recolección de Datos
Cuestionario con preguntas cerradas y abiertas sobre:
 - Políticas de mantenimiento
 - Tipos de unidades y promedio de unidades por rutas
 - Fallo en componentes
7. Resultados Principales
 - Políticas de mantenimiento: Se encontró que el 100% de las empresas terceriza actividades de mantenimiento. Realizan mantenimiento preventivo basado en inspecciones y se revisa la tasa de disponibilidad al menos una vez al mes.
 - Tipos de unidades: Se encontró que el 65% de las unidades son marca Nissan (Non Plus Ultra), 30% Chevrolet NPR, y otros un 5%.
 - Promedio de unidades por rutas: En promedio se envían entre 14 y 18 unidades por ruta.
 - Fallo en componentes: El 75% de fallos son en componentes de transmisión, frenos y ruedas. El 20% son fallos del sistema eléctrico y un 5% en carrocería y demás.
8. Conclusiones

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

La encuesta mostró, que existe una claridad sobre las actividades de mantenimiento en las unidades, las inspecciones generan necesidades de mantenimiento que en algunas ocasiones son reflejadas mediante formularios básicos a los cuales no se tuvo acceso. Sin embargo, en los talleres que tercerizan el mantenimiento se encontró, que generalmente los vehículos llegan por mantenimiento correctivo en mayor medida y se realiza una reparación mínima para continuar operando. Con respecto a las unidades que disponen los sistemas se encontró que son flotas heterogéneas con una media de 14 y 17 años de servicio. Por lo tanto, los fallos más comunes son del tipo mecánico.

Bibliografia

- Abdulgader, A. B. B., Ebishi, O. M. A., Mohammed, S. Y. A., & Ibrahim, T. S. E. (2015). *Factors affecting civil aircraft availability* [PhD Thesis]. Sudan University of Sciences and Technology.
- Afifi, S., Hrouga, M., Mjirda, A., & Allaoui, H. (2024). A memetic based algorithm for simultaneous preventive maintenance scheduling and spare-parts inventory management for manufacturing systems. *Applied Soft Computing*, *151*, 111161.
- Akl, A. M., Sawah, S. E., Chakraborty, R. K., & Turan, H. H. (2022). A Joint Optimization of Strategic Workforce Planning and Preventive Maintenance Scheduling: A Simulation–Optimization Approach. *Reliability Engineering & System Safety*, *219*, 108175. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108175>
- Alamri, T. O., & Mo, J. P. (2023). *Optimisation of Preventive Maintenance Regime and Spare Part Inventory based on Failure Mode System Modelling*.
- Alrabghi, A., & Tiwari, A. (2016). A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation. *Reliability Engineering and System Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.res.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.
- Anisimov, V. V. (2005). Asymptotic analysis of stochastic block replacement policies for multicomponent systems in a Markov environment. *Operations Research Letters*, *33*(1), 26–34.
- Arnold, R., Chukova, S., & Hayakawa, Y. (2016). Failure distributions in multicomponent systems with imperfect repairs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, *230*(1), 4–17.
- Baxter, L. A. (1988). On the theory of cannibalization. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, *136*, 290–297.
- Benagoune, K., Mouss, H., Abdessemed, A. A., & Bensakhria, M. (2018). Agent-based prognostic function for multicomponents system with stochastic dependence. *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, 1–5.
- Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy, D. N. P. (2016). *Introduction to maintenance engineering: Modelling, optimization and management* (1st ed.). John Wiley & Sons.

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

- Bertsche, B. (2008). *Reliability in automotive and mechanical engineering: Determination of component and system reliability*.
- Bi, L., Tao, F., Zhang, P., & Nee, A. (2020). Opportunistic maintenance for multi-unit series systems based on gated recurrent units prediction model. *CIRP Annals*, 69(1), 25–28.
- Byrskett, D. L. (1985). Units of Equipment Available Using Cannibalization for Repair-Part Support. *IEEE Transactions on Reliability*, R-34(1).
- Cai, Z., Jin, J., & Chen, Y. (2017). Optimization method of multi-echelon system equipment configuration under unsteady state and multi-constraint. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 43(1), 36–46.
- Cassady, C., Mendoza, A., Ormon, S., Schneider, K., Rainwater, C., Carrasco, M., Crawford, J., & Honeycutt, J. (2003). *Quantifying the Impact of Aircraft Cannibalization*. Arkansas University Fayetteville Department of industrial engineering.
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (2017). *Introduction to Discrete Event Systems* (springer, Ed.).
- Cavalieri, S., Garetti, M., Macchi, M., & Pinto, R. (2008). A decision-making framework for managing maintenance spare parts. *Production Planning & Control*, 19(4), 379–396.
- Ceder, A. (2016). *Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior*.
- Chalabi, N., Dahane, M., Beldjilali, B., & Neki, A. (2016). Optimisation of preventive maintenance grouping strategy for multi-component series systems: Particle swarm based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 440–451.
- Chen, C., Liu, Y., Sun, X., Cairano-Gilfedder, C. D., & Titmus, S. (2021). An integrated deep learning-based approach for automobile maintenance prediction with GIS data. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107919. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107919>
- Cheng, W., & Zhao, X. (2023). Maintenance optimization for dependent two-component degrading systems subject to imperfect repair. *Reliability Engineering & System Safety*, 240, 109581.
- Civerchia, F., Bocchino, S., Salvadori, C., Rossi, E., Maggiani, L., & Petracca, M. (2017). Industrial Internet of Things Monitoring Solution for Advanced Predictive Maintenance Applications. *Journal of Industrial Information Integration*. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.02.003>
- Contreras, J. (2021). *Planificación, programación y costos de mantenimiento*. Press.

Bibliografía

- Corvaro, F., Giacchetta, G., Marchetti, B., & Recanati, M. (2017). Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618. *Petroleum*, 3(2), 266–272.
- Curtin, N. P. (2001). *Cannibalizations Adversely Affect Personnel and Maintenance*. [Resreport]. United States General Accounting Office.
- Dash, B. M., Prakash, O., & Samantaray, A. K. (2023). Failure prognosis of the components with unlike degradation trends: A data-driven approach. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 237(6), 1132–1149.
- David, R., & Alla, H. (2010). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets* (2nd ed.). Springer.
- De Jonge, B., & Scarf, P. A. (2020). A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, 285(3), 805–824.
- de Pater, I., Reijns, A., & Mitici, M. (2022). Alarm-based predictive maintenance scheduling for aircraft engines with imperfect Remaining Useful Life prognostics. *Reliability Engineering & System Safety*, 221, 108341.
- del Castillo, A. C., Marcos, J. A., & Parlikad, A. K. (2023). Dynamic fleet maintenance management model applied to rolling stock. *Reliability Engineering & System Safety*, 240, 109607.
- Dendauw, P., Goeman, T., Claeys, D., De Turck, K., Fiems, D., & Bruneel, H. (2021). Condition-based critical level policy for spare parts inventory management. *Computers & Industrial Engineering*, 157, 107369.
- Deng, H., Shi, Q., & Wang, Y. (2021). Joint optimization of condition-based maintenance and inventory ordering based on status monitoring for multi-unit system. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 37(4). <https://doi.org/10.23967/j.rimni.2021.10.005>
- Dias, L., Leitao, A., & Guimaraes, L. (2021). Optimizing condition monitoring retrofitting decisions for interdependent multi-unit systems under dynamic uncertainty. In *Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference, ESREL 2021* (p. 3002). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135495555&partnerID=40&md5=d7ac3f501b8f8a18c5b560fb657cd4ad>
- Dreyfuss, M., Giat, Y., & Stulman, A. (2018). An analytical approach to determine the window fill rate in a repair shop with cannibalization. *Computers & Operations Research*, 98, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.05.018>
- Dreyfuss, M., & Stulman, A. (2018). Waiting time distribution for an exchangeable item repair system with two failed components. *International Journal of Operational Research*, 32(3), 380–396. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2614-0>

- Dreyfuss, M., & Stulman, A. (2019a). Cannibalisation in a repair/replacement inventory system. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 34(2), 139–153. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2019.102212>
- Dreyfuss, M., & Stulman, A. (2019b). Cannibalisation in a repair/replacement inventory system. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 34(2), 139–153. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2019.102212>
- Du, Y., Wu, T., Zhou, S., & Makis, V. (2020). Remaining useful life prediction of lubricating oil with dynamic principal component analysis and proportional hazards model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(6), 964–971.
- EN, B. (2010). 13306: 2010-Maintenance-Maintenance terminology. *British Standard Institution, London, UK*.
- Eruguz, A. S., Tan, T., & Houtum, G.-J. van. (2017). A survey of maintenance and service logistics management: Classification and research agenda from a maritime sector perspective. *Computers and Operations Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.03.003>
- Eti, M. C., Ogaji, S., & Probert, S. (2006). Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture. *Applied Energy*, 83(11), 1235–1248.
- Fisher, W. W. (1988). Analytic performance estimation for complex maintenance systems. *Simulation - The Society for Modeling and Simulation International*, 55(6), 222–226.
- Fisher, W. W. (1989). An improved simulation model for cannibalization policy performance comparisons in a complex maintenance system. *Simulation*, 52(4), 154–164.
- Fisher, W. W. (1990a). Issues and models in maintenance systems incorporating cannibalization: A review. *Information Systems and Operational Research*, 28(1), 67–88. <https://doi.org/10.1080/03155986.1990.11732119>
- Fisher, W. W. (1990b). Markov process modelling of a maintenance system with spares, repair, cannibalization and manpower constraints. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(7), 119–125. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(90\)90134-9](https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90134-9)
- Fisher, W. W. (1990c). Markov process modelling of a maintenance system with spares, repair, cannibalization and manpower constraints. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(7), 119–125. [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(90\)90134-9](https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90134-9)
- Fisher, W. W., & Brennan, J. J. (1986). The performance of cannibalization policies in a maintenance system with spares, repair, and resource constraints. *Naval*

Bibliografia

- Research Logistics Quarterly*, 33(1), 1–15.
<https://doi.org/10.1002/nav.3800330102>
- Fitch, E. C. (2013). *Proactive maintenance for mechanical systems*. Elsevier.
- Gao, W., Wang, Y., Yang, T., Ji, H., & Chen, Y. (2020). Quasi-Periodic Replacement Policy for a Two-Unit Production System. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 25, 398–406.
- Gao, W., Yang, T., Chen, L., & Wu, S. (2021). Joint optimisation on maintenance policy and resources for multi-unit parallel production system. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107491.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107491>
- Grimm, V., Sölch, C., & Zöttl, G. (2022). Emissions reduction in a second-best world: On the long-term effects of overlapping regulations. *Energy Economics*, 109, 105829. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105829>
- Gupta, S., Maiti, J., Kumar, R., & Kumar, U. (2009). A control chart guided maintenance policy selection. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 23(3), 216–226.
- Han, Y. J., & Yun, W. Y. (2017). SIMULATION-BASED RAM DESIGN OF A MULTI-UNIT SYSTEM WITH A HYBRID GENETIC ALGORITHM. *International Journal of Industrial Engineering*, 24(4).
- Herder, P. M., Van Luijk, J., & Bruijnooge, J. (2008). Industrial application of RAM modeling: Development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan® plant at GE Industrial, Plastics. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(4), 501–508.
- Hirsch, W. M., Meisner, M., & Boll, C. (1968a). Cannibalization in multicomponent systems and the theory of reliability. *Naval Research Logistics Quarterly*.
- Hirsch, W. M., Meisner, M., & Boll, C. (1968b). Cannibalization in multicomponent systems and the theory of reliability. *Naval Research Logistics Quarterly*, 15(3), 331–336. <https://doi.org/10.1002/NAV.3800150302>
- Hochberg, M. (1973a). Generalized multicomponent systems under cannibalization. *Naval Research Logistics Quarterly*.
- Hochberg, M. (1973b). Generalized multicomponent systems under cannibalization. *Naval Research Logistics Quarterly*, 19(4), 700–711.
<https://doi.org/10.1002/nav.3800200402>
- Hongqing, ye, huade, su, meimei, zheng, & tangbin, xia. (2022). Joint optimization of replacement and spare parts ordering with dual sourcing. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 56(10), 1359.
- Hoover, J., Jondrow, J. M., Trost, R. S., & Ye, M. (2002). *A model to Study. Cannibalization, FMC, and Customer waiting time*. CNA- Center for Naval Analyses.

- ISO, I. (2014). 55000: Asset Management-Overview, Principles and Terminology. *International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland*.
- Jain, N., Rathore, A. P. S., Jain, R., & Yadav, O. P. (2018). Maintenance planning based on reliability assessment of multi-state multi-component system. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 262–267.
- Jensen, K., & Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems*. Springer Science & Business Media.
- Jia, L., Ren, Y., Yang, D., Feng, Q., Sun, B., & Qian, C. (2019). Reliability analysis of dynamic reliability block diagram based on dynamic uncertain causality graph. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, 103947.
- Jiang, T., & Liu, Y. (2020). Selective maintenance strategy for systems executing multiple consecutive missions with uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106632.
- Jiang, X., Stephen, B., Chandarasupsang, T., McArthur, S. D., & Stewart, B. G. (2022). A Gaussian process based fleet lifetime predictor model for unmonitored power network assets. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38(2), 979–987.
- Kamei, S., & Taghipour, S. (2023). A comparison study of centralized and decentralized federated learning approaches utilizing the transformer architecture for estimating remaining useful life. *Reliability Engineering & System Safety*, 233, 109130. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109130>
- Keating, E. G., Resnick, A. C., Lored, E. N., & Hillestad, R. (2008). *Insights on Aircraft Programmed Depot Maintenance: An Analysis of F-15 PDM*. RAND Corp Santa Monica CA.
- Khalifa, D., Hottenstein, M., & Aggarwal, S. (1977). Cannibalization policies for multistate systems. *Operations Research*, 25(6), 1032–1039. <https://doi.org/10.1287/opre.25.6.1032>
- Khatab, A., Diallo, C., Venkatadri, U., Liu, Z., & Aghezzaf, E.-H. (2018). Optimization of the joint selective maintenance and repairperson assignment problem under imperfect maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 413–422.
- Li, Z., Chen, X., Li, J., & Huang, X. (2020). Opportunistic Group Maintenance Optimization of Multi-unit System Considering Dependency. *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 33–38.
- Liang, S., Ma, M., He, S., & Zhang, H. (2019). The impact of bus fleet size on performance of self-equalise bus headway control method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer*, 172(4), 246–256. <https://doi.org/10.1680/JMUEN.18.00026>

Bibliografía

- Louit, D. M., Pascual, R., & Jardine, A. K. (2009). A practical procedure for the selection of time-to-failure models based on the assessment of trends in maintenance data. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(10), 1618–1628.
- Mangara, B. T. (2017). Model Development for Reliability Cannibalization. *System Reliability*, 129. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69609>
- Márquez, A. C. (2007). *The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance*. Springer.
- Martinod, R. M., Bistorin, O., Castañeda, L. F., & Rezg, N. (2018). Maintenance policy optimisation for multi-component systems considering degradation of components and imperfect maintenance actions. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 100–112.
- Mishra, A. K., & Shrivastava, D. (2020). Integration of production scheduling and group maintenance planning in multi-unit system employing TLBO algorithm. *Procedia CIRP*, 93, 949–954.
- Mishra, A. K., Shrivastava, D., & Gupta, H. (2021). Group preventive maintenance model for multi-unit series system: A tlbo algorithm-based approach. *Recent Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ITME 2019*, 61–69.
- Mishra, A. K., Shrivastava, D., & Vrat, P. (2020). An opportunistic group maintenance model for the multi-unit series system employing Jaya algorithm. *Opsearch*, 57, 603–628.
- Moakedi, H., Seyedhosseini, M. S., & Shahanaghi, K. (2019). A block-based inspection policy for a multi-component system subject to two failure modes with stochastic dependence. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Moore, T. D., Johnson, A. W., Rehg, M. T., & Hicks, M. J. (2007). Quality assurance staffing impacts in military aircraft maintenance units. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(1), 33–48.
- Morales, J. M., Barbieri, G., Vargas, H. I., Villegas, J. S., & Parra, C. (2022). Integration of BIM Modeling and RAM Analysis: A Proof of Concept. *IFAC-PapersOnLine*, 55(19), 205–210.
- Morse, A. (2017). *Investigation into equipment cannibalisation in the Royal Navy*. National Audit Office.
- Motahari, R., Saeidi Sough, Y., Aboutorab, H., & Saberi, M. (2021). Joint optimization of maintenance and inventory policies for multi-unit systems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(3), 587–607. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01123-w>
- Muckstadt, J. A. (1973). Model for a Multi-Item, Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory System. *Management Science*, 20(4), 472–481.

- Najafi, S., & Lee, C.-G. (2023). A deep reinforcement learning approach for repair-based maintenance of multi-unit systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109179.
- Okyere-Boateng, K. O. (2015). *A between-squadron analysis of cannibalization on the MV-22*. Naval Postgraduate School Monterey United States.
- Oliveira, N. de, & Ghobbar, A. A. (2014a). Cannibalization: How To Measure and Its Effect in the Inventory Cost. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*.
- Oliveira, N. de, & Ghobbar, A. A. (2014b). Cannibalization: How To Measure and Its Effect in the Inventory Cost. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*.
- Oliveira, J. B., Jin, M., Lima, R. S., Kobza, J. E., & Montevechi, J. A. B. (2019). The role of simulation and optimization methods in supply chain risk management: Performance and review standpoints. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 92, 17–44. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2018.11.007>
- Ormon, S. (2003). Exploring the Effects of Cannibalization on Fleet Performance. *IIE Annual Conference. Proceedings*, 1.
- Ormon, S. W., & Cassady, C. R. (2004). Cannibalization policies for a set of parallel machines. *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004-RAMS*, 540–545.
- Pargar, F., Kauppila, O., & Kujala, J. (2017). Integrated scheduling of preventive maintenance and renewal projects for multi-unit systems with grouping and balancing. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.024>
- Park, C.-W., & Lee, H.-S. (2014). Approximation analysis of multi-class closed queueing maintenance networks with a parts inventory system and two-phase Coxian time distributions. *Computers and Operations Research*, 46, 23–37.
- Petchrompo, S., & Parlikad, A. K. (2019). A review of asset management literature on multi-asset systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 181, 181–201.
- Pirbhulal, S., Gkioulos, V., & Katsikas, S. (2021). A Systematic Literature Review on RAMS analysis for critical infrastructures protection. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 33, 100427.
- Powell, M. J. (2007). *The Effects of Consolidating F-16 Phase and Cannibalization Aircraft on Key Maintenance Indicators*. Army command and general staff coll fort Leavenworth.

Bibliografía

- Rawat, M., & Lad, B. K. (2018). Novel approach for machine tool maintenance modelling and optimization using fleet system architecture. *Computers & Industrial Engineering*, *126*, 47–62.
- Rozas, H., Basciftci, B., & Gebraeel, N. (2024). Data-driven joint optimization of maintenance and spare parts provisioning for deep space habitats: A stochastic programming approach. *Acta Astronautica*, *214*, 167–181.
- Ruan, M.-Z., Li, Q.-M., Peng, Y.-W., & Wang, S. (2012). Optimization and availability evaluation of spare parts project of multi-indenture system under incomplete cannibalization. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, *36*(5), 886–891.
- Salari, N., & Makis, V. (2020). Application of Markov renewal theory and semi-Markov decision processes in maintenance modeling and optimization of multi-unit systems. *Naval Research Logistics (NRL)*, *67*(7), 548–558.
- Salman, S., Cassady, C. R., Pohl, E. A., & Ormon, S. W. (2006). Evaluating the Impact of Cannibalization on Fleet Performance. *Quality and Reliability Engineering International*, *23*(4), 445–447. <https://doi.org/10.1002/qre.826>
- Salman, S., Cassady, C. R., Pohl, E. A., & Ormon, S. W. (2007). Evaluating the impact of cannibalization on fleet performance. *Quality and Reliability Engineering International*, *23*(4), 445–457.
- Santos, A. C. de J., Cavalcante, C. A. V., & Wu, S. (2023). Maintenance policies and models: A bibliometric and literature review of strategies for reuse and remanufacturing. *Reliability Engineering & System Safety*, *231*, 108983. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108983>
- Scholten, B. (2007). *The road to integration: A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing*. Isa.
- Sheng, J., & Prescott, D. (2017). A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation. *Reliability Engineering & System Safety*, *168*, 290–305.
- Sheng, J., & Prescott, D. (2019a). A coloured Petri net framework for modelling aircraft fleet maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *189*, 67–88. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.05.043>
- Sheng, J., & Prescott, D. (2019b). Using a novel hierarchical coloured Petri net to model and optimise fleet spare inventory, cannibalisation and preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *191*, 106579. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106579>
- Sherbrooke, C. C. (1971). An Evaluator for the Number of Operationally Ready Aircraft in a Multilevel Supply System. *Operations Research Operations Research*, *19*(3), 618–635.

- Sherbrooke, C. C. (2006). *Optimal inventory modeling of systems: Multi-echelon techniques* (Vol. 72). Springer Science & Business Media.
- Simon, R. M. (1970). Optimal cannibalization policies for multicomponent systems. *SIAM Journal on Applied Mathematics*.
- Simon, R. M. (1972). The reliability of multicomponent systems subject to cannibalization. *Naval Research Logistics Quarterly*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/nav.3800190102>
- Smidt-Destombes, K. S. de, Elst, N. P. van, Barros, A. I., Mulder, H., & Hontelez, J. A. M. (2011). A spare parts model with cold-standby redundancy on system level. *Computers & Operations Research*, 38(7), 985–991. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.09.006>
- Tam, A., Chan, W. M., & Price, J. W. H. (2006). Optimal maintenance intervals for a multi-component system. *Production Planning and Control*, 17(8), 769–779.
- Tambe, P. P. (2023). Optimization based on Genetic Algorithm for maintenance decision of multi-unit system. *2023 3rd International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)*, 1–5.
- Tordecilla, R. D., Juan, A. A., Montoya-Torres, J. R., Quintero-Araujo, C. L., & Panadero, J. (2021). Simulation-optimization methods for designing and assessing resilient supply chain networks under uncertainty scenarios: A review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 106, 102166. <https://doi.org/10.1016/J.SIMPAT.2020.102166>
- Urbani, M., Brunelli, M., & Collan, M. (2020). A comparison of maintenance policies for multi-component systems through discrete event simulation of faults. *IEEE Access*, 8, 143654–143664.
- Van Houtum, G.-J., & Kranenburg, B. (2015). *Spare parts inventory control under system availability constraints* (Vol. 227). Springer.
- Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.
- Wang, J., & Zhu, X. (2021). Joint optimization of condition-based maintenance and inventory control for a k-out-of-n: F system of multi-state degrading components. *European Journal of Operational Research*, 290(2), 514–529.
- Wang, R., Chen, G., Liang, N., & Huang, Z. (2021). Preventive maintenance optimization regarding large-scale systems based on the life-cycle cost. *International Journal of Performability Engineering*, 17(9), 766.
- Wang, R., Chen, G., Liang, N., & Wu, J. (2021). Preventive maintenance optimization for deteriorating large-scale systems in life-cycle perspective. *Control and Decision*, 37(9), 2360–2368.

Bibliografía

- Wang, Y., Chang, C., & Yang, J. (2017). Optimal Configuration Method of Block Spare Parts for k/N Systems Considering Cannibalization. *Journal of System Simulation*, 29(3), 654–661.
- Yan, T., Lei, Y., Li, N., Pintelon, L., & Dewil, R. (2023). Joint optimization of maintenance and spare parts inventory for multi-unit systems with a generalized structure. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 145(4), 041001.
- Yan, T., Lei, Y., Wang, B., Han, T., Si, X., & Li, N. (2020). Joint maintenance and spare parts inventory optimization for multi-unit systems considering imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106994.
- Zeng, J., & Liang, Z. (2023). A dynamic predictive maintenance approach using probabilistic deep learning for a fleet of multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, 109456.
- Zhang, C., Gao, W., Yang, T., & Guo, S. (2019). Opportunistic maintenance strategy for wind turbines considering weather conditions and spare parts inventory management. *Renewable Energy*, 133, 703–711.
- Zhang, C., Qi, F., Zhang, N., Li, Y., & Huang, H. (2022). Maintenance policy optimization for multi-component systems considering dynamic importance of components. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108705.
- Zhang, Q., Ye, Z., Shao, S., Niu, T., & Zhao, Y. (2022). Remaining useful life prediction of rolling bearings based on convolutional recurrent attention network. *Assembly Automation*, 42(3), 372–387.
- Zhang, R., & Ghanmi, A. (2014a). Detailed cannibalization decision making for maintenance systems in the military context. *8th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2014 - Proceedings*, 108–115. <https://doi.org/10.1109/SysCon.2014.68192>
- Zhang, R., & Ghanmi, A. (2014b). Detailed cannibalization decision making for maintenance systems in the military context. *8th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2014 - Proceedings*, 108–115.
- Zhang, X., & Zeng, J. (2017). Joint optimization of condition-based opportunistic maintenance and spare parts provisioning policy in multiunit systems. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 479–498.
- Zhao, R., Song, K., & Zhu, J. (2002). Block replacement for multi-component system with fuzzy lifetimes. *2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence. 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ-IEEE'02. Proceedings (Cat. No. 02CH37291)*, 1, 301–304.
- Zhao, X., He, Z., Wu, Y., & Qiu, Q. (2022). Joint optimization of condition-based performance control and maintenance policies for mission-critical systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108655. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108655>

Marco de trabajo para modelar sistemas de gestión de mantenimiento.

Zheng, M., Ye, H., Wang, D., & Pan, E. (2023). Joint decisions of components replacement and spare parts ordering considering different supplied product quality. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.

Zoutendijk, M., & Mitici, M. (2024). Fleet scheduling for electric towing of aircraft under limited airport energy capacity. *Energy*, 294, 130924.