



**FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA BIOMÉDICA E INSTRUMENTACIÓN**

**ESTANDARIZACIÓN DE LOS SERVICIOS TÉCNICOS DE MANTENIMIENTOS
EN EQUIPOS BIOMÉDICOS EN EL INSTITUTO ONCOLÓGICO NACIONAL DE
PANAMÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE DECISIÓN Y
ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS**

Trabajo de graduación para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería
Biomédica e Instrumentación.

Autora:

Alexandra Marié Rivera Fossatti

C.I.P: 8-987-940

Director y Tutor de Tesis:

Mgtr. Alfredo Lescher Soto

Panamá, República de Panamá

2026

DEDICATORIA

La presente investigación está dirigida a muchas personas que formaron parte de este camino, pero especialmente a mis padres, Ileana Fossatti y Octavio Rivera, quienes con amor, esfuerzo y constancia me apoyaron hasta el final.

A mi hermano, Diego Rivera, por su compañía, motivación y consejos oportunos a lo largo de este camino. Sus ideas, su disposición para escuchar y su apoyo sincero fueron un impulso importante para mantener la claridad y la confianza durante el proceso académico.

A mi pareja, por su paciencia, comprensión y acompañamiento durante las etapas más exigentes de esta investigación. Su apoyo emocional, su disposición para ayudarme a resolver dudas y dificultades, así como su capacidad para brindarme tranquilidad en momentos de estrés, fueron esenciales para mantener el equilibrio y la motivación necesarios para culminar este proyecto.

Al profesor y director de esta tesis, el Mgtr. Alfredo Lescher, por creer en mis capacidades, impulsarme a asumir este reto y motivarme a atreverme a realizar esta investigación sin optar por el camino fácil. Su confianza y estímulo fueron determinantes para asumir el compromiso de desarrollar un trabajo exigente, retador y significativo, fortaleciendo mi crecimiento académico y profesional.

Y, por último, dedico este trabajo al esfuerzo, la constancia y la confianza en mis propias capacidades, porque esta experiencia fortaleció mi confianza profesional y personal, demostrando que, con esfuerzo, estudio y perseverancia, es posible alcanzar grandes resultados y cumplir los objetivos propuestos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la claridad y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa académica. Su guía fue fundamental para mantener la calma y la determinación durante los momentos de mayor exigencia y dificultad.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el Mgtr. Alfredo Lescher, por su acompañamiento constante, su orientación académica y su compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia, paciencia y capacidad para guiarme hacia soluciones prácticas y reales fueron determinantes para la correcta estructuración y ejecución del trabajo.

Agradezco a los docentes de la carrera de Ingeniería Biomédica, quienes a lo largo de mi formación académica contribuyeron con sus conocimientos y exigencia académica a fortalecer mi pensamiento crítico y mis habilidades técnicas, aportando bases fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

A mis compañeros y futuros colegas, con quienes compartí este camino académico, superando desafíos y aprendiendo en conjunto. El apoyo mutuo y el trabajo colaborativo hicieron de este proceso una etapa enriquecedora tanto en lo académico como en lo humano.

Agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso, brindándome apoyo, motivación y confianza, contribuyendo a la culminación de este trabajo y a la consolidación de mi formación profesional.

DECLARACIÓN JURADA



Universidad
LATINA *de Panamá*
SUMMUM DESIDERIUM SAPIENTIA

Yo, **Alexandra Marié Rivera Fossatti** con cédula de identidad **8-987-940** estudiante graduanda de la carrera (o programa) de **Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación**, declaro bajo la gravedad de juramento que el material que aparece en esta tesis de grado es de mi producción intelectual, debido a lo cual exonero a la Universidad Latina de Panamá de cualquier responsabilidad relacionada en este aspecto.

Para que conste firmamos la presente declaración el día 24 del mes de enero del año 2026.

Firma:

Cédula: **8-987-940**.

RESUMEN

La gestión del mantenimiento de equipos biomédicos en entornos hospitalarios requirió procesos estandarizados que garantizaran la trazabilidad, eficiencia y confiabilidad de las intervenciones técnicas. En el Instituto Oncológico Nacional de Panamá (ION) se identificó la ausencia de protocolos internos estandarizados para el registro de actividades de mantenimiento, lo que generó inconsistencias en la información técnica, limitó el análisis de desempeño y afectó la toma de decisiones.

La investigación tuvo como objetivo estandarizar los servicios técnicos de mantenimiento en equipos biomédicos mediante la aplicación de un algoritmo basado en árboles de decisión y análisis de conglomerados K-means. El estudio se desarrolló bajo un enfoque aplicado, cualitativo y descriptivo, con un diseño no experimental, transversal y de campo, en la modalidad de estudio de caso. Se utilizaron herramientas computacionales como Python, Streamlit y Ngrok para el desarrollo del algoritmo y la interfaz de usuario, además del software de simulación Arena para evaluar el impacto del modelo propuesto.

Los resultados obtenidos mediante simulación evidenciaron una mejora significativa en los tiempos de espera en cola, un aumento en el número de equipos atendidos y una mayor eficiencia del proceso de mantenimiento en comparación con escenarios no estandarizados. Se concluyó que la estandarización de los servicios técnicos fortaleció la trazabilidad de las actividades, optimizó la gestión del mantenimiento biomédico y apoyó la toma de decisiones técnicas en instituciones de salud.

Palabras clave: estandarización de procesos, mantenimiento biomédico, árboles de decisión, K-means, simulación.

ABSTRACT

The management of biomedical equipment maintenance in hospital environments required standardized processes to ensure traceability, efficiency, and reliability of technical interventions. At the National Oncology Institute of Panama (ION), the lack of standardized internal protocols for recording maintenance activities generated inconsistencies in technical information, limited performance analysis, and negatively affected decision-making.

This research aimed to standardize biomedical equipment maintenance services through the application of an algorithm based on decision trees and K-means cluster analysis. The study was conducted under an applied, qualitative, and descriptive approach, with a non-experimental, cross-sectional, field design, using a case study modality. Computational tools such as Python, Streamlit, and Ngrok were used to develop the algorithm and user interface, while the Arena simulation software was employed to evaluate the proposed model.

Simulation results demonstrated a significant improvement in queue waiting times, an increase in the number of serviced equipment units, and higher efficiency of the maintenance process compared to non-standardized scenarios. It was concluded that the proposed standardization strengthened activity traceability, optimized biomedical maintenance management, and supported technical decision-making in healthcare institutions.

Keywords: process standardization, biomedical maintenance, decision trees, K-means, simulation.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DECLARACIÓN JURADA	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I	1
EL PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes del problema de investigación	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación de la investigación	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo General.....	7
1.4.2 Objetivos Específicos	7
1.5 Alcance y límites de la investigación.....	7
1.6 Línea de investigación a la que pertenece el estudio	9
CAPÍTULO II.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema	11
2.2 Bases teóricas que sustentan la investigación.....	14
2.2.1 Estandarización	14
2.2.2 Mantenimiento	17

2.2.3 Equipos Biomédicos	21
2.2.4 Árbol de decisiones.....	25
2.2.5 Algoritmo K-means.....	28
2.3. Variables	29
2.3.1 <i>Variable dependiente: Variable 1: Estandarización de servicios técnicos biomédicos.</i>	30
2.3.2 <i>Variables independientes: Árbol de decisiones y Kmeans</i>	31
Variable 2: Aplicación del árbol de decisiones	31
Variable 3: Uso de KMeans para clasificación técnica	31
2.3.3 Mapa de variable (s)	32
2.4 Glosario de términos.....	34
CAPÍTULO III.....	36
MARCO METODOLÓGICO	36
3.1 Tipo y Diseño de investigación.....	37
3.2 Población y Muestra.....	40
3.3 Descripción del Instrumento de Recolección de Datos	41
3.4 Herramientas Digitales Aplicadas.....	44
3.5 Procedimiento de la Investigación	47
CAPÍTULO IV	50
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	50
4.1 Introducción al Capítulo IV.....	51
4.2 Métodos de Análisis	52
4.3 Análisis de Resultados	54
4.4 Discusión de Hallazgos.....	63
4.5 Limitaciones del Estudio.....	64
4.6 Conclusiones Parciales del Instrumento.....	65
CAPÍTULO V	66
DISEÑO DE LA PROPUESTA	66

5.1 Introducción de la Propuesta	67
5.2 Justificación de la Propuesta	67
5.3 Objetivos de la Propuesta	69
5.4 Metas a Alcanzar	70
5.5 Beneficios de la Propuesta	70
5.6 Cronograma de las Actividades	71
5.7 Diseño de la Propuesta	73
CAPÍTULO VI	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
6.1 Conclusiones	112
6.2 Recomendaciones	114
Referencias bibliográficas	116
Anexos	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mapa de Variables.....	33
Tabla 2. Comparación antes y después de la validación del instrumento.....	43
Tabla 3. Distribución de respuestas - Pregunta 1	54
Tabla 4. Distribución de respuestas - Pregunta 2	55
Tabla 5. Distribución de respuestas - Pregunta 3	55
Tabla 6. Distribución de respuestas - Pregunta 4	56
Tabla 7. Distribución de respuestas - Pregunta 5	57
Tabla 8. Distribución de respuestas - Pregunta 6	58
Tabla 9. Distribución de respuestas - Pregunta 7	58
Tabla 10. Distribución de respuestas - Pregunta 8	59
Tabla 11. Distribución de respuestas - Pregunta 9.....	60
Tabla 12. Distribución de respuestas - Pregunta 10	61
Tabla 13. Resumen estadístico de la encuesta.....	62
Tabla 14. Descripción de los Campos del Dataset.....	77
Tabla 15. Dataset en Colab, mostrando 10 registros como evidencia visual	78
Tabla 16. Clústeres representativos obtenidos mediante K-means	82
Tabla 17. Checklist estandarizado de mantenimiento preventivo	85
Tabla 18. Checklist estandarizado de mantenimiento correctivo	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mantenimiento, tipos y clasificación	19
Figura 2. Diagrama de Ishikawa.....	19
Figura 3. Proceso de gestión del mantenimiento.	20
Figura 4. Estructura jerárquica general de un equipo.....	22
Figura 5. Módulos operacionales de un equipo biomédico.	24
Figura 6. Árbol de decisiones.....	27
Figura 7. Resultados de la encuesta - Pregunta 1.	54
Figura 8. Resultados de la encuesta - Pregunta 2.	55
Figura 9. Resultados de la encuesta - Pregunta 3.	56
Figura 10. Resultados de la encuesta - Pregunta 4.	56
Figura 11. Resultados de la encuesta – Pregunta 5.....	57
Figura 12. Resultados de la encuesta - Pregunta 6.	58
Figura 13. Resultados de la encuesta - Pregunta 7.	59
Figura 14. Resultados de la encuesta - Pregunta 8.	59
Figura 15. Resultados de la encuesta - Pregunta 9.	60
Figura 16. Representación gráfica de resultados a pregunta 10.....	61
Figura 17. Cronograma de las Actividades de la Investigación	71
Figura 18. Estructura general de la propuesta	74
Figura 19. Construcción de la base de datos (DATASET).....	76
Figura 20. Funcionamiento del algoritmo K-means.....	79
Figura 21. Mapa 2D de 4 Clústeres Representativos.....	81
Figura 22. Flujograma del funcionamiento del árbol de decisiones.....	84
Figura 23. Construcción del Checklist preventivo mediante árbol de decisiones .	86
Figura 24. Construcción del Checklist correctivo mediante árbol de decisiones ...	87
Figura 25. Flujo del código de la interfaz gráfica	91
Figura 26. Interfaz de usuario – Selección del encabezado.....	93
Figura 27. Checklist preventivo estandarizado (4 clústeres)	94
Figura 28. Checklist preventivo estandarizado (12 clústeres)	94

Figura 29. Interfaz de configuración del checklist correctivo	95
Figura 30. Menú desplegable de componentes.....	96
Figura 31. Checklist correctivo con nivel de detalle bajo (4 clústeres).	96
Figura 32. Ajuste del nivel de detalle (12 clústeres).	97
Figura 33. Checklist correctivo con nivel de detalle alto (12 clústeres).	97
Figura 34. Modelo de simulación sin estandarización	100
Figura 35. Entidades procesadas sin estandarización	101
Figura 36. Clasificación de tiempos sin estandarización	102
Figura 37. Distribución del tiempo de atención sin estandarización	103
Figura 38. Utilización del recurso técnico sin estandarización	104
Figura 39. Modelo de simulación con estandarización.....	106
Figura 40. Equipos atendidos con estandarización	107
Figura 41. Distribución del tiempo de atención con estandarización.....	108
Figura 42. Clasificación de tiempos con estandarización.....	109
Figura 43. Tiempos promedio en cola con estandarización	109
Figura 44. Utilización del recurso técnico con estandarización	110

INTRODUCCIÓN

La gestión adecuada del mantenimiento de los equipos biomédicos constituye un pilar fundamental para garantizar la continuidad operativa, la seguridad del paciente y la eficiencia de los servicios de salud. Desde la ingeniería biomédica, este proceso no solo implica la intervención técnica sobre los equipos, sino la implementación de sistemas organizados que permitan registrar, analizar y optimizar dichas intervenciones de manera estructurada y verificable.

No obstante, en muchos entornos hospitalarios persisten limitaciones relacionadas con la falta de estandarización en los servicios técnicos de mantenimiento. La ausencia de protocolos homogéneos y de registros detallados dificulta la trazabilidad de las actividades realizadas, genera inconsistencias en la información almacenada y restringe la posibilidad de evaluar el desempeño real de las estrategias de mantenimiento implementadas. Estas deficiencias impactan negativamente en la toma de decisiones, en la planificación de recursos y en la gestión integral de la tecnología biomédica, especialmente cuando los registros se reducen a datos básicos como fechas y tipos de intervención, sin detallar las acciones ejecutadas.

Esta problemática adquiere una relevancia particular en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá (ION), institución en la que se dispone de cronogramas de mantenimiento que permiten identificar cuándo se realizan las intervenciones, pero que carecen de un sistema estandarizado que documente de forma estructurada las actividades técnicas efectuadas por el personal biomédico. La diversidad de equipos, el alto nivel de especialización requerido para su mantenimiento y la variabilidad en la forma de registrar la información según el técnico responsable, limitan el control efectivo de las intervenciones y afectan la capacidad de análisis del historial técnico de los equipos.

Ante este escenario, la ingeniería biomédica ofrece herramientas computacionales y metodológicas que permiten abordar estas limitaciones desde un enfoque sistemático. La aplicación de algoritmos de decisión y técnicas de análisis de conglomerados posibilita la organización, clasificación y estandarización de actividades de mantenimiento, aun cuando estas se encuentren redactadas de manera diversa en los manuales técnicos. Estas herramientas facilitan la generación de checklists técnicos estructurados, adaptables a diferentes niveles de detalle y orientados tanto al mantenimiento preventivo como correctivo, fortaleciendo la gestión documental y la toma de decisiones técnicas.

En este marco, la presente investigación propone la estandarización de los servicios técnicos de mantenimiento en equipos biomédicos del ION mediante la aplicación de un algoritmo basado en árboles de decisión y K-means. La propuesta integra criterios de ingeniería, gestión hospitalaria y análisis de datos, con el propósito de mejorar la trazabilidad de las actividades de mantenimiento, optimizar los tiempos de intervención y contribuir a una gestión más eficiente y sostenible de la tecnología biomédica en el entorno hospitalario.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1. Antecedentes del problema de investigación

La gestión eficiente del mantenimiento de equipos biomédicos constituye un pilar esencial para garantizar la calidad y seguridad de la atención sanitaria, ya que estos dispositivos desempeñan un papel crucial en el diagnóstico, tratamiento y monitoreo de los pacientes. De acuerdo con el Manual de gestión de mantenimiento del equipo biomédico (Espinosa, 2004), la planificación adecuada y la ejecución rigurosa de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo son fundamentales para minimizar los tiempos de inactividad de los equipos y asegurar su disponibilidad cuando más se necesitan.

Según López (2023), la falta de estandarización en los reportes de mantenimiento genera inconsistencias en la calidad de los datos, dificultando la trazabilidad de las intervenciones y la evaluación de su efectividad. Esta problemática no es exclusiva de Panamá; en países como México y Colombia, estudios como los de Murillo y Mancera (2013) han identificado desafíos similares en hospitales de segundo nivel, donde la variabilidad en los formatos de reporte limita la capacidad de planificación y optimización de recursos. La Asociación Colombiana de Hospitales y Clínicas (2017) también ha publicado guías orientadas a mejorar la gestión del mantenimiento en entornos clínicos con estos mismos desafíos.

La gestión del mantenimiento de equipos biomédicos ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de garantizar la seguridad del paciente y la eficiencia operativa en instituciones de salud. Estudios pioneros, como los realizados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2012), identificaron que la falta de protocolos estandarizados en el registro de intervenciones técnicas genera brechas críticas en la trazabilidad, lo que incrementa el riesgo de fallas en equipos esenciales. Este hallazgo fue corroborado por una investigación multicéntrica en hospitales de Argentina, Brasil y Colombia, donde el 68% de los incidentes reportados en equipos de diagnóstico se atribuyeron a mantenimientos inconsistentes o documentación incompleta (D. Rubio, G. Plattoni, M. Lencina, A. Valdez y S. Ponce (2016)).

Sin embargo, los desafíos en América Latina persisten. Un estudio en el Hospital Nacional de Costa Rica reveló que el 45% de los reportes de mantenimiento carecían de datos esenciales, como la fecha de la última calibración o el técnico responsable (E.S.E. Hospital La María. (2022)). Esto se agrava en contextos rurales, donde la escasez de personal capacitado y barreras como la falta de recursos tecnológicos (Ministerio de Salud de Chile, 2014) restringen el uso de sistemas avanzados como los Computerized Maintenance Management Systems (CMMS), ampliamente adoptados en Europa (Oropeza, A., Roman, R., & Parra, C. (2022)).

Los estudios comparativos entre regiones ofrecen insights valiosos. Mientras que en Singapur el 90% de los hospitales utilizan sistemas CMMS integrados con blockchain para garantizar la inmutabilidad de los registros (Tan et al., 2023), en África subsahariana, el 70% de las instituciones dependen de formatos en papel, exponiéndose a pérdidas de datos y errores humanos (Adeyemi et al., 2022). Estas disparidades subrayan la necesidad de soluciones escalables y culturalmente adaptables.

En Panamá, la variedad de marcas, modelos y procedencias de los equipos biomédicos sigue siendo un obstáculo importante para la gestión eficiente del mantenimiento. Esta diversidad complica la trazabilidad de las intervenciones técnicas y dificulta la implementación de formatos estandarizados de reporte. El Ministerio de Salud (MINSA, 2024) cuenta con un registro oficial de equipos que incluye dispositivos como camas eléctricas de Colombia, oftalmoscopios alemanes y monitores de signos vitales provenientes de Malasia, lo que refleja claramente la heterogeneidad del parque tecnológico actual. Frente a esta realidad, la estandarización de los reportes de mantenimiento surge como una estrategia clave para centralizar la información y facilitar la toma de decisiones dentro del departamento de biomédica.

Además, el propio MINSA ha destacado la importancia de actualizar los sistemas de vigilancia de dispositivos médicos, lo cual incluye el fortalecimiento de los mecanismos de reporte y gestión técnica. Esta necesidad de uniformidad también se enmarca en un esfuerzo más amplio por modernizar el sistema de salud panameño, como lo demuestra la reciente implementación de la CIE-11,

una medida que apunta hacia una mayor digitalización y estandarización en los procesos de salud (OPS, 2025).

En la gestión biomédica, los cronogramas de mantenimiento preventivo y correctivo son esenciales para garantizar la operatividad de los equipos médicos. Estudios han demostrado que una planificación adecuada no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también optimiza los recursos y reduce los costos asociados a reparaciones imprevistas (Ministerio de Salud de Argentina, 2010; Ministerio de Salud de Perú, 2013; Asociación Española de Ingeniería Hospitalaria, 2018). Por ejemplo, en el Hospital Regional de Moquegua, la sistematización del plan de mantenimiento permitió mejorar la operatividad de los equipos biomédicos, pasando de un 99.79% de equipos semioperativos a un 98.97% de equipos completamente operativos (Sanga Títalo, 2021).

Además, la implementación de herramientas de análisis de datos, como los árboles de decisión y el algoritmo K-means, ha demostrado ser eficaz en la estandarización y optimización de los procesos de mantenimiento. En particular, el algoritmo K-means ha sido utilizado para agrupar equipos según características similares, facilitando la identificación de patrones y la asignación eficiente de recursos (Díaz Lorenzo, 2018; Basave Torres, 2005). En complemento, los árboles de decisión permiten establecer criterios claros para el control de la gestión en mantenimientos, mejorando la toma de decisiones en el departamento de biomédica (Bouza & Santiago, 2014).

1.2 Planteamiento del problema

En el área biomédica hospitalaria, la falta de estandarización en los reportes de mantenimiento genera múltiples inconvenientes. Entre ellos, se encuentran inconsistencias en la calidad de los datos registrados, dificultad para realizar un seguimiento adecuado de las intervenciones y carencias en la capacidad para evaluar la efectividad de las estrategias de mantenimiento implementadas (Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica, 2019).

Este problema adquiere una mayor relevancia en instituciones como el ION, donde actualmente la institución cuenta con cronogramas de mantenimiento que permiten registrar cuándo corresponde realizar intervenciones a los equipos,

pero no detallan las acciones realizadas, limitándose a indicar si el mantenimiento fue preventivo o correctivo y la fecha de ejecución. La falta de protocolos estandarizados internos, independientes de procesos tercerizados, dificulta la trazabilidad de las actividades realizadas, especialmente considerando la diversidad de equipos y la variabilidad de la documentación según el técnico encargado. El alto grado de especialización de los equipos biomédicos requiere intervenciones técnicas regulares para mantener su precisión y confiabilidad. La carencia de un sistema estandarizado para registrar controladamente el mantenimiento de estos equipos puede derivar en un desgaste del equipo, ya que no se conocen con certeza las actividades de mantenimiento realizadas realmente por el técnico encargado, disminuyendo su capacidad operativa y posiblemente obligando a la institución a incurrir en gastos significativos para su reemplazo.

Con base en ello, surge la pregunta de investigación: ¿Podría la aplicación de árbol de decisiones y k-means estandarizar los servicios técnicos de mantenimiento en equipos biomédicos del ION, generando una trazabilidad completa de las intervenciones y garantizando la calidad y seguridad de los servicios, independientemente de los protocolos externos?

1.3 Justificación de la investigación

Ante esta realidad, la propuesta de integrar un modelo basado en árboles de decisión en el ION se justifica no solo por su simplicidad y adaptabilidad, sino también por su potencial para estructurar la toma de decisiones y generar evidencia cuantificable sobre el estado de los equipos. Esta estrategia permitiría desarrollar un enfoque innovador que no solo estandarice los reportes de mantenimiento, sino que también mejore la calidad y seguridad de los servicios brindados. Esto requerirá adaptar las mejores prácticas internacionales al contexto local, considerando las limitaciones tecnológicas y operativas de la institución como lo indican organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011; OPS, 2012).

El principal aporte de esta investigación consiste en la estandarización de los servicios técnicos de mantenimiento biomédico mediante la implementación de un modelo basado en árboles de decisión, orientado a estructurar y

homogeneizar el registro de las actividades realizadas. Este aporte resulta relevante, ya que distintos autores señalan que la ausencia de procesos estandarizados en el mantenimiento de equipos biomédicos genera información incompleta, dificulta el seguimiento de las intervenciones y limita la toma de decisiones técnicas fundamentadas (Arab-Zozani et al., 2021; Murillo & Mancera, 2013). El modelo propuesto contribuye a reducir la variabilidad en la ejecución de los mantenimientos y a mejorar la calidad de los registros técnicos.

Otro aporte del estudio es la integración de técnicas de minería de datos, específicamente árboles de decisión y el algoritmo K-means, como herramientas de apoyo a la gestión del mantenimiento biomédico. Esta contribución se respalda en investigaciones que destacan que los modelos de clasificación y agrupamiento permiten identificar patrones, priorizar intervenciones y optimizar recursos en sistemas complejos, incluidos los entornos hospitalarios (Bouza & Santiago, 2014; Barros et al., 2015; Basave Torres, 2005). La aplicación de estas técnicas fortalece el análisis objetivo del estado de los equipos y apoya la planificación del mantenimiento preventivo y correctivo.

La investigación aporta la generación de *checklists* estandarizados de mantenimiento preventivo y correctivo, lo cual facilita la trazabilidad de las actividades técnicas y el control de las intervenciones realizadas. Este aporte coincide con lo planteado por diversos autores, quienes sostienen que el uso de listas de verificación estructuradas mejora la organización de los procesos, reduce errores operativos y contribuye al aseguramiento de la calidad en la gestión del mantenimiento de equipos biomédicos (Asociación Colombiana de Hospitales y Clínicas, 2017; Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica, 2019; Adeyemi et al., 2022).

Desde una perspectiva institucional y estratégica, el estudio aporta un modelo práctico y escalable que puede ser replicado o adaptado en otras instituciones de salud con características similares. La literatura señala que la implementación de metodologías estandarizadas permite optimizar la gestión del mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa en entornos hospitalarios con recursos limitados (Costilla Díaz, 2023; Tafurt López, 2012). La propuesta desarrollada responde a una problemática local y ofrece una alternativa aplicable a contextos similares.

Desde el ámbito académico, la investigación aporta una metodología aplicada que integra la gestión del mantenimiento biomédico con el uso de herramientas computacionales y análisis de datos, lo que la convierte en un referente para estudios futuros en ingeniería biomédica y áreas afines. Autores como Flick (2015) y Hernández et al. (2014) destacan que este tipo de investigaciones favorece la vinculación entre teoría y práctica, contribuyendo al desarrollo de conocimiento útil y transferible. El estudio fortalece el marco metodológico para la gestión eficiente de equipos biomédicos.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estandarizar los servicios técnicos de mantenimiento en equipos biomédicos en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá aplicando un algoritmo basado en árbol de decisión y k-means.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Identificar los parámetros y atributos de las herramientas árbol de decisiones y K-means.
2. Establecer el estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico.
3. Diseñar un algoritmo de estandarización basado en árbol de decisiones y K-means.
4. Verificar la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena.

1.5 Alcance y límites de la investigación

El presente estudio se centra en la propuesta de estandarizar los servicios técnicos de mantenimiento mediante la aplicación de herramientas de agrupamiento y clasificación jerárquica como árbol de decisiones y k-means en el ION. El alcance incluye identificar las necesidades específicas de mantenimiento de estos equipos, analizar las prácticas actuales de gestión y desarrollar un sistema que permita centralizar, estructurar y organizar la información relacionada con las intervenciones realizadas. Además, se busca garantizar la trazabilidad de los datos, optimizar los recursos disponibles y mejorar la calidad y seguridad de los servicios de salud.

El estudio se desarrolla con el análisis documental de los manuales de servicio técnico de los equipos biomédicos disponibles, excluyendo aquellos que ya cuentan con protocolos tercerizados de mantenimiento establecidos. Los datos se recopilarán transversalmente mediante una encuesta dirigida específicamente al personal del departamento de ingeniería biomédica (DIB) en el ION para diagnosticar la gestión actual del mantenimiento.

En esta investigación, la variable dependiente corresponde a la estandarización de los servicios técnicos de mantenimiento, entendida como el proceso de unificación y optimización de las actividades preventivas y correctivas de los equipos biomédicos. Como variables independientes se consideran la aplicación de herramientas de análisis de datos, específicamente el árbol de decisiones y el algoritmo k-means, que permitirán identificar patrones, agrupar actividades similares y generar un checklist estandarizado.

Entre las principales limitaciones, se encuentra la dependencia de la disponibilidad y precisión de los datos actuales sobre los equipos biomédicos. La cantidad de fuentes bibliográficas en el campo de gestión del mantenimiento hospitalario es limitada y muy reducida ya que no existen muchos estudios referentes en este ámbito biomédico. Por lo tanto, se realizará la propuesta en base a desarrollos de estandarización de procesos en otros campos como lo son industriales, eléctricos y empresariales.

Los resultados del estudio se basarán en el análisis de datos existentes y en simulaciones de aplicación del modelo, sin realizar pruebas operativas en equipos reales. Esto puede restringir la aplicabilidad directa de los resultados a otras instituciones con contextos operativos diferentes y sus hallazgos no necesariamente serán aplicables a dispositivos bajo esquemas de mantenimiento formalizados. El impacto esperado incluye mejoras en el control del mantenimiento preventivo y correctivo, así como en la toma de decisiones estratégicas relacionadas con la sostenibilidad operativa de los equipos.

1.6 Línea de investigación a la que pertenece el estudio

El presente estudio pertenece a la línea de investigación en ciencias de la salud, específicamente en el área de ingeniería clínica y gestión de la tecnología biomédica, pertenecientes a la ingeniería biomédica, el cual trata de: Gestión de equipos biomédicos y optimización de servicios de salud mediante la aplicación de modelos de decisión y análisis de conglomerados en la planificación del mantenimiento hospitalario.

La presente investigación desarrolla una propuesta metodológica basada en modelos de análisis de conglomerados y toma de decisiones para la estandarización de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo en equipos biomédicos. El estudio integra datos provenientes de manuales técnicos, para estructurar un algoritmo capaz de homogenizar la información según tipo de mantenimiento. Esta herramienta se complementa con una interfaz digital que genera listas de verificación estandarizadas, orientadas a mejorar la trazabilidad del proceso y reducir variabilidad técnica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigaciones realizadas en el tema

La estandarización de los procesos de mantenimiento ha sido ampliamente abordada en distintas investigaciones debido a su impacto en la eficiencia operativa, la reducción de costos y la mejora de la calidad del servicio. Un claro ejemplo es el estudio realizado por Costilla Díaz (2023), quien propuso un modelo de estandarización para la gestión del mantenimiento en equipos de laboratorio de suelos en la empresa Iversa SAS. Su investigación identificó fallas operativas frecuentes debido a la ausencia de catálogos técnicos, fichas técnicas y protocolos de mantenimiento. Como respuesta, desarrolló un plan que incluye hojas de vida de los equipos, solicitudes de repuestos y guías para la capacitación del personal. Se observó una mejora del 35% en la reducción de errores humanos y del 28% en los tiempos de ejecución de pruebas.

En la misma línea, Tafurt López (2012) diseñó una estrategia de estandarización para los laboratorios de Ciencias de la Salud en la Universidad ICESI. Mediante el uso de un análisis de criticidad, se identificaron los equipos más vulnerables y se establecieron formatos unificados para mantenimiento preventivo y correctivo. La aplicación de este modelo permitió reducir el tiempo de respuesta en mantenimientos en un 40%, mejorando también la integración interdepartamental y el control documental.

Otra contribución relevante es la de Huallpa Condori (2020), quien desarrolló un manual de mantenimiento basado en checklists estandarizados para el sistema de iluminación de la empresa textil Kunan S.A. Aunque el enfoque fue diferente al biomédico, tras realizar un diagnóstico de equipos, se documentaron los procedimientos para un mantenimiento más eficaz. El impacto del manual se reflejó en un aumento del 32% en la disponibilidad operativa del sistema de iluminación y una disminución del consumo eléctrico del 15% gracias al reemplazo de tecnologías obsoletas. A través del análisis de fallas recurrentes y la documentación sistemática de cada intervención, se logró aumentar el cumplimiento de los protocolos en más de un 90%. Este enfoque evidencia que la documentación estructurada y estandarizada es un factor crítico para garantizar la trazabilidad y eficiencia de las operaciones técnicas, lo cual concuerda con los objetivos del presente estudio.

Por otro lado, la investigación de Bouza y Santiago (2014) profundiza en el uso de árboles de decisión en estudios médicos, presentándolos como herramientas eficientes para apoyar decisiones clínicas y administrativas. Los autores destacan cómo esta técnica permite establecer reglas de clasificación, segmentar poblaciones, reducir la dimensionalidad de los datos y predecir eventos, siendo de gran utilidad en contextos donde se requiere interpretar múltiples variables como en el mantenimiento técnico de equipos biomédicos. En un estudio de caso aplicado a procedimientos médicos, se alcanzó una precisión del 89% en la clasificación de eventos críticos.

La utilidad de los árboles de decisión ha sido respaldada por estudios en el ámbito hospitalario e industrial. Por ejemplo, Arellano (2023), en su tesis aplicada al análisis financiero, demostró la efectividad del algoritmo CART (Classification and Regression Tree) como herramienta de clasificación y toma de decisiones. Aunque su aplicación se centró en la evaluación de riesgos crediticios, su metodología resulta altamente adaptable al contexto técnico. En su investigación, los árboles de decisión permitieron identificar las combinaciones de variables más significativas para predecir morosidad, utilizando una estructura jerárquica de decisiones binarias.

Los árboles de decisión destacan por su capacidad de traducir datos históricos en reglas lógicas de fácil interpretación. Según Galeano (2023), su implementación en herramientas digitales permite estructurar decisiones de mantenimiento con base en variables como el tipo de equipo, frecuencia de uso y registro de fallas, generando flujos lógicos que pueden complementarse con los manuales de servicio existentes para crear *checklists* estandarizados. En India, el uso combinado de árboles de decisión y análisis de Pareto permitió al All India Institute of Medical Sciences (AIIMS) priorizar intervenciones en equipos de alto riesgo, reduciendo un 40% las interrupciones clínicas (Mahfoud, H., Barkany, A. E., & Biyaali, A. E. (2016).

Desde una perspectiva tecnológica, la tesis de Díaz Lorenzo (2018) titulada: *“Desarrollo de una mejora al algoritmo K-means orientada al paradigma de Big Data”* enfocó su estudio en la mejora del algoritmo K-means para entornos de Big Data. Este trabajo propone una versión híbrida llamada H-Kmeans que, al

integrarse con sistemas de mantenimiento hospitalarios, podría ayudar a segmentar los reportes de los equipos de acuerdo con su criticidad, frecuencia de fallas o tipo de mantenimiento requerido. Se logró una mejora de hasta un 22% en la agrupación precisa de registros con base en pruebas de simulación con grandes volúmenes de datos.

En un tercer estudio, Zhu et al. (2023) presentan el algoritmo "Staleness-Reduction Mini-Batch K-means" (srmbatch), que combina la eficiencia computacional del Mini-Batch K-means con una mejora significativa en la calidad del agrupamiento mediante la reducción de la obsolescencia de los centroides. Según sus experimentos, srmbatch puede converger entre 40 y 130 veces más rápido que Mini-Batch K-means tradicional, alcanzando hasta un 1.7% de mejora en la pérdida final.

Este tipo de algoritmo puede utilizarse como paso previo a la construcción de árboles de decisión, ya que permite **agrupar descripciones técnicas similares** encontradas en los reportes históricos de mantenimiento (por ejemplo, "verificación del sensor", "chequeo del cable" o "inspección de electrodos"), estandarizando automáticamente su denominación. Estas agrupaciones pueden luego alimentar un árbol de decisiones, que utilizaría variables como tipo de equipo, clase de mantenimiento y frecuencia de fallas para sugerir automáticamente actividades estandarizadas en los reportes técnicos futuros.

Esta integración entre un modelo no supervisado como K-means y un modelo supervisado como el árbol de decisión permite estructurar flujos lógicos de decisión basados en patrones reales y recurrentes, mejorando la uniformidad de los reportes, la trazabilidad documental y la eficiencia operativa en los departamentos de ingeniería clínica.

En este sentido, el uso de modelos como el árbol de decisión para gestionar los mantenimientos se presenta como una herramienta para brindar una posible solución viable y eficaz. La data recopilada de los manuales de servicio permitiría centralizar y estructurar la información de manera eficiente, registrando en detalle las actividades globales registradas en los reportes durante los mantenimientos preventivos y correctivos.

2.2 Bases teóricas que sustentan la investigación

2.2.1 Estandarización

La norma ISO 9001:2015, orientada a sistemas de gestión de la calidad, establece un enfoque basado en procesos que requiere la documentación, control, medición y mejora de los procedimientos internos para asegurar resultados consistentes y conformes (ISO, 2015). En Panamá, esta definición ha sido adoptada por la Dirección General de Normas y Tecnología Industrial (DGNTI), amparada bajo la Ley N.23 del 15 de julio de 1997 donde se define en el artículo 92 el término -normalización técnica- como la actividad que proporciona soluciones a problemas, esencialmente dentro de la ciencia y la tecnología, dirigida a alcanzar el grado óptimo de orden.

Por su parte, la ISO 13485:2016, diseñada para la industria de dispositivos médicos, refuerza estos principios incluyendo requisitos específicos para la validación de procesos, trazabilidad, gestión de riesgos y cumplimiento regulatorio (ISO, 2016). Aunque ambas normas no definen explícitamente el término "estandarización", lo integran en su estructura a través de la exigencia de procedimientos repetibles, controlados y sujetos a auditorías internas y externas, contribuyendo a la uniformidad y confiabilidad operativa.

La estandarización es un enfoque del trabajo cuyo objetivo es hacer que los procesos sean menos variables, con lo que se reducen los errores, se mantienen las mismas condiciones y se producen sistemáticamente los mismos resultados. El aspecto más crucial de la estandarización de procesos es llevarla a cabo correctamente, satisfaciendo al mismo tiempo las necesidades de la empresa. (Costilla Díaz, 2023).

Aldas Santiago, en su tesis titulada "estandarización de procesos de la empresa "Textiles Técnicos", define la normalización como un conjunto de directrices para productos, herramientas, máquinas, equipos, métodos y procedimientos que se utilizan para realizar una tarea. Estas directrices tienen en cuenta el proceso en sí, así como las variables que pueden repercutir en la calidad del bien o servicio final, además de los elementos que garantizan el cumplimiento de la norma dentro de unos límites específicos y de la normativa nacional. (Aldas Santiago, 2014)

La normalización persigue fundamentalmente tres objetivos:

- Simplificación: se trata de reducir los modelos para quedarse únicamente con los más necesarios.
- Unificación: para permitir el intercambio a nivel internacional.
- Especificación: se persigue evitar errores de identificación creando un lenguaje claro y preciso.

Los beneficios de la normalización son múltiples, y apuntan, básicamente, a crear criterios mínimos operativos para un producto, proceso o servicio. Además, contribuye a la documentación y registro disminuyendo la variabilidad en la ejecución de tareas lo cual mejora la calidad del servicio. (Gallo Poma, J. N, 2013). En el marco de la estandarización de procesos, una herramienta ampliamente utilizada y de alto impacto es el *checklist* o lista de verificación. Según Becciu (2023), los *checklists* representan una forma sistemática de asegurar que todas las actividades requeridas en un procedimiento se ejecuten de manera coherente, sin omisiones y siguiendo un orden lógico. Su implementación se ha popularizado en sectores como la manufactura, la salud, la ingeniería y la gestión de calidad, convirtiéndose en una herramienta clave dentro de los sistemas normalizados.

Becciu (2023) señala que los *checklists* contribuyen a la estandarización al actuar como puentes entre las instrucciones de trabajo escritas y la ejecución operativa. Esto asegura que cada paso esté alineado con las normativas y los estándares de calidad internos o internacionales, tales como los establecidos en las normas ISO 9001 o ISO 13485. Además, cuando se digitalizan mediante plataformas tecnológicas, estos instrumentos también permiten recolectar datos en tiempo real, analizar cumplimiento y generar reportes automáticos, lo que amplifica su valor para la mejora continua.

De acuerdo con la definición propuesta por PDCA Home, un *checklist* es una herramienta de gestión que contiene un conjunto de ítems o actividades que deben verificarse, ejecutarse o cumplirse dentro de un proceso. Se utiliza como guía de control para asegurar que todos los pasos necesarios se han realizado y que los estándares establecidos se han cumplido correctamente. La finalidad

de un *checklist* es, por tanto, garantizar la calidad y consistencia de un procedimiento, evitar omisiones y facilitar la evaluación de conformidad.

Estudios como el de Arab-Zozani et al. (2021) evidencian que los *checklists* son instrumentos validados para evaluar la gestión del mantenimiento de equipos médicos, basados en la experiencia del sistema de salud iraní. La propuesta de *checklist* desarrollada permitió estandarizar prácticas y evaluar indicadores clave como la disponibilidad, la frecuencia de fallas y la eficacia de las intervenciones. Esto refuerza su aplicabilidad en contextos hospitalarios con infraestructura y recursos variables.

Por otro lado, investigaciones como la de Huallpa Condori (2020) demuestran que la implementación de manuales técnicos apoyados en listas de verificación en una empresa textil incrementó la disponibilidad del sistema de iluminación del 52% al 90%, reduciendo fallas recurrentes y elevando la eficiencia energética en más del 50%. El estudio evidencia cómo un *checklist* bien estructurado permite documentar actividades de mantenimiento preventivo y correctivo, aumentando la vida útil del equipo.

Además, Oshiyama et al. (2014) realizaron un análisis exhaustivo de datos de mantenimiento correctivo para desarrollar un sistema de clasificación de equipos médicos basado en la antigüedad del equipo y la frecuencia de fallas. El estudio propuso una estrategia para priorizar las intervenciones técnicas utilizando listas de chequeo que ayudaran a identificar rápidamente equipos con mayor tendencia a fallar. Esta clasificación permitió a los hospitales participantes establecer cronogramas de mantenimiento más eficientes, y concentrar recursos en los equipos de mayor criticidad. Según sus hallazgos, el 28% de los equipos de más de 10 años presentaban fallas recurrentes que no habían sido adecuadamente priorizadas, lo que evidencia la necesidad de herramientas sistemáticas como los *checklists* para mejorar la gestión técnica.

Arab-Zozani et al. (2021), por su parte, desarrollaron un *checklist* específico para evaluar la gestión del mantenimiento de equipos médicos en Irán, el cual incluyó 26 indicadores agrupados en áreas como planificación, recursos humanos, gestión de inventario, supervisión y documentación. El estudio aplicó este

instrumento en varios hospitales y encontró una mejora significativa en la identificación de fallas en los procesos de mantenimiento, con un aumento del 37% en la detección oportuna de equipos sin seguimiento técnico adecuado.

Este enfoque validó el uso del *checklist* como herramienta de auditoría interna y de mejora continua en entornos hospitalarios con estructuras administrativas complejas y evaluación de equipos médicos basada en datos de mantenimiento correctivo requiere el uso de herramientas como listas de chequeo, que permiten estandarizar las condiciones de revisión y priorizar acciones de acuerdo con la antigüedad del equipo, su criticidad y sus patrones de falla.

Como resultado, la incorporación de *checklists* dentro de una estrategia de estandarización se propone, no solo porque aporta claridad y control, sino porque maximiza la eficiencia, reduce la posibilidad de errores humanos y fortalece los sistemas de documentación y seguimiento técnico. Por ejemplo, en el mantenimiento biomédico, su uso resulta fundamental para garantizar la consistencia y la seguridad de los procesos operativos.

2.2.2 Mantenimiento

Según Mora Gutiérrez (2009), “el mantenimiento no solo tiene como objetivo prolongar la vida útil de los equipos, sino garantizar su funcionamiento confiable en las condiciones operativas previstas”. Por su parte, Medrano Márquez y González Ajuech (s.f.) afirman que “el mantenimiento debe ser considerado una inversión estratégica y no un gasto”, al permitir reducir los costos asociados a la inactividad operativa, evitar pérdidas productivas o incidentes técnicos, y disminuir la frecuencia de fallas graves. Montilla Montaña (2019) resalta además que el mantenimiento no solo mantiene el valor funcional del activo, sino que también actúa como una herramienta para la gestión de la calidad en la prestación de servicios, al asegurar condiciones controladas, equipos calibrados y procesos bajo supervisión técnica constante.

Podemos definir el mantenimiento como: “un conjunto de actividades técnicas, administrativas y de gestión destinadas a conservar o restablecer un equipo, sistema o instalación a un estado en el cual pueda desempeñar su función requerida de manera segura y eficiente.” El mantenimiento, de acuerdo con la normativa industrial y la literatura especializada, se define como el conjunto de

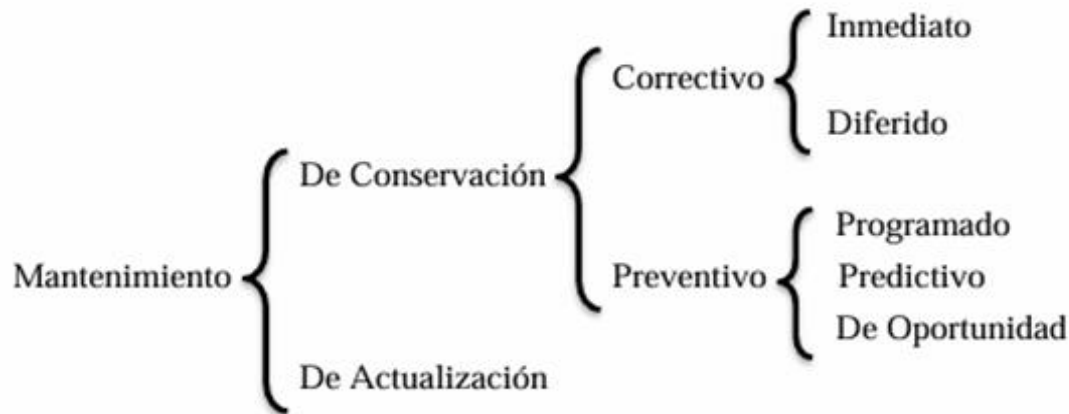
acciones técnicas, administrativas y de gestión que conducen a mantener o restaurar las condiciones de funcionamiento de un equipo o instalación, asegurando su disponibilidad, eficiencia y seguridad. Con el avance de las tecnologías y las nuevas demandas del sector industrial y biomédico, el mantenimiento ha evolucionado a través de distintas generaciones, adoptando enfoques más proactivos y predictivos, alineados con las tendencias de la Industria 4.0 y la integración de sistemas mecatrónicos. (José, Á., Medrano Márquez, V., & González Ajuech, V. M.). En sus orígenes, el mantenimiento se centraba en acciones correctivas, es decir, reparaciones tras la ocurrencia de fallas. Posteriormente, se incorporaron enfoques preventivos, de carácter planificado y periódico, con el objetivo de reducir la frecuencia y gravedad de las fallas. Más adelante, surgió el mantenimiento predictivo, que utiliza tecnologías avanzadas para detectar anomalías en etapas tempranas, permitiendo intervenciones antes de que ocurra una falla grave. En la actualidad, las modernas estrategias consideran el mantenimiento autónomo y el Total Productive Maintenance (TPM), donde los operadores participan activamente en tareas básicas de mantenimiento, fomentando la autogestión y la mejora continua. (Manczo, 2020).

Existen diversos tipos de mantenimiento clasificados según su enfoque preventivo o reactivo, como se muestra en la figura 1. Mora Gutiérrez (2009) y el Manual de mantenimiento del SENA (s.f.) coinciden en las siguientes categorías:

1. **Mantenimiento preventivo:** Consiste en la ejecución planificada de actividades como inspecciones, ajustes, calibraciones, limpieza y lubricación antes de que ocurra una falla. Su objetivo es prevenir interrupciones y garantizar la disponibilidad de los equipos.
2. **Mantenimiento correctivo:** Se refiere a las acciones ejecutadas una vez que ha ocurrido una falla. Puede ser correctivo programado (cuando se pospone la intervención sin riesgo) o no programado (cuando se trata de una emergencia técnica).
3. **Mantenimiento predictivo:** Se basa en la medición de variables físicas del equipo (vibraciones, temperatura, consumo eléctrico, etc.) para

anticipar una falla antes de que ocurra. Requiere instrumentación especializada y software de análisis.

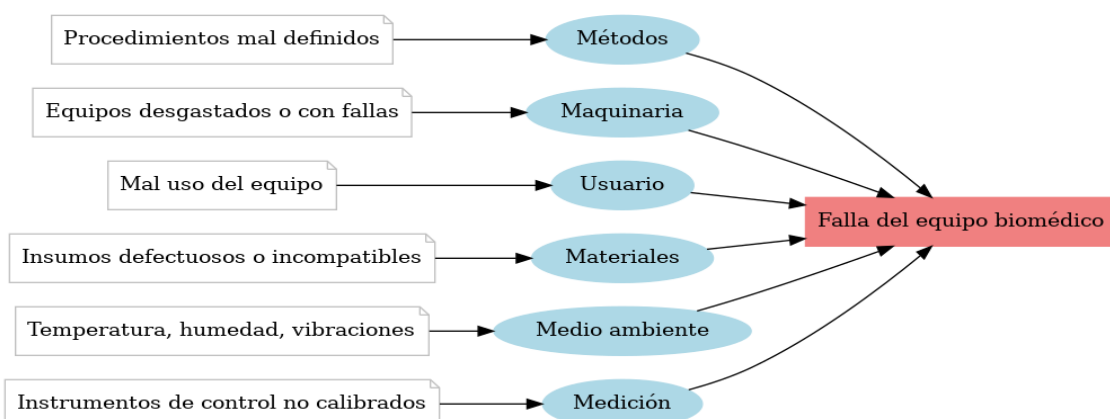
Figura 1 *Mantenimiento, tipos y clasificación*



Nota. Clasificación general del mantenimiento de acuerdo con su enfoque y tipo de intervención. Adaptado de Castillo S. (2015).

La planificación del mantenimiento preventivo es un proceso estructurado que, según Montilla Montaña (2019), debe contemplar la revisión del manual del equipo, inspección visual y pruebas funcionales del equipo, lubricación o limpieza, ajustes o calibraciones y registro del procedimiento. Por otro lado, el diagrama de Ishikawa o de causa-efecto permite representar gráficamente los factores que podrían contribuir a una falla. En la figura 2 se presenta un ejemplo de aplicación de esta herramienta, en un proceso de falla técnica.

Figura 2. *Diagrama de Ishikawa*



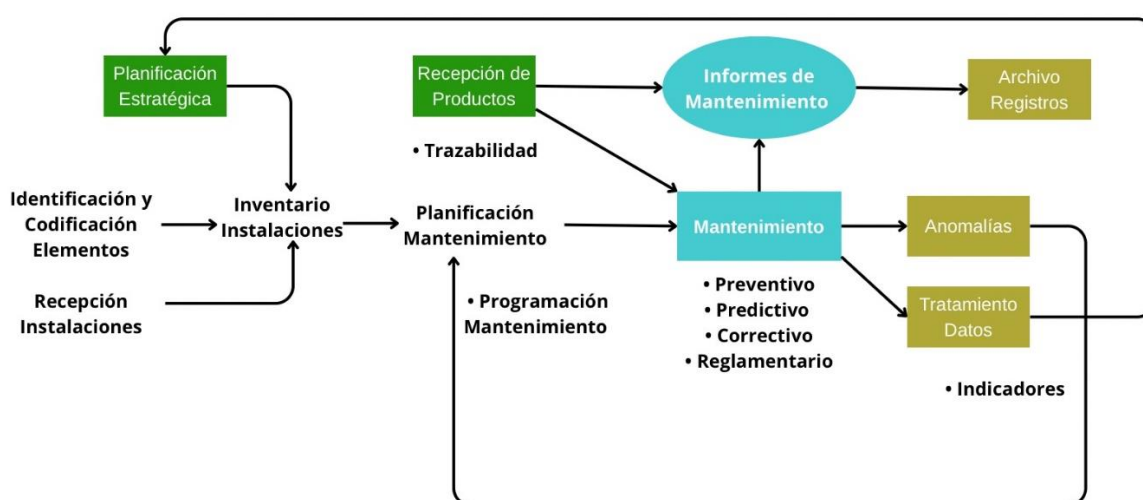
Nota. Diagrama causa-efecto utilizado como herramienta de análisis para la identificación de fallas y problemas en procesos técnicos. Adaptado de Rubio, Lencina, Valdez y Ponce (2016)

Rubio, Plattoni, Lencina, Valdez y Ponce (2016) aplicaron el modelo de Weibull en un estudio multicéntrico que analizó más de 3,000 reportes de fallas en equipos electromédicos en hospitales de América Latina. Identificaron que el 52% de las fallas se concentraban en tres tipos de equipos: monitores de signos vitales, bombas de infusión y electrocardiógrafos. Las principales causas fueron el mal uso por parte de los operadores, la falta de mantenimiento preventivo y el desgaste natural de los componentes. El modelo de Weibull permitió clasificar estas fallas según su comportamiento en el tiempo, facilitando la predicción de averías por envejecimiento y optimizando la programación del mantenimiento predictivo.

Las políticas de mantenimiento son directrices institucionales que establecen cómo, cuándo y con qué recursos se ejecutarán las tareas técnicas. Deben incluir procedimientos estandarizados, perfiles del personal responsable y frecuencia mínima de inspecciones (SENA, s.f.; Mora Gutiérrez, 2009).

La gestión eficiente del mantenimiento también implica definir roles y responsabilidades, establecer procedimientos claros de inspección y reparación, y documentar todos los procesos y resultados en reportes técnicos y administrativos. Esta documentación es esencial para auditorías, análisis de tendencias y toma de decisiones estratégicas. (Prieto García, C. 2010).

Figura 3. *Proceso de gestión del mantenimiento*



Nota. Esquema general del proceso de gestión del mantenimiento aplicado al contexto hospitalario. Adaptado de Prieto García (2010).

2.2.3 Equipos Biomédicos

La OMS, en la publicación de la *Serie de Documentos Técnicos de la OMS sobre Dispositivos Médicos*, define el concepto de equipo médico como: “un dispositivo médico que requiere calibración, mantenimiento, reparación, capacitación de los usuarios y retirada del servicio, actividades gestionadas normalmente por ingenieros clínicos. Los equipos médicos se usan con un fin determinado de diagnóstico y tratamiento de enfermedades o de rehabilitación después de una enfermedad o lesión; se los puede usar individualmente, con cualquier accesorio o consumible o con otro equipo médico. El término “equipo médico” excluye los implantes y los dispositivos médicos desechables o de un solo uso.” (OMS, 2011).

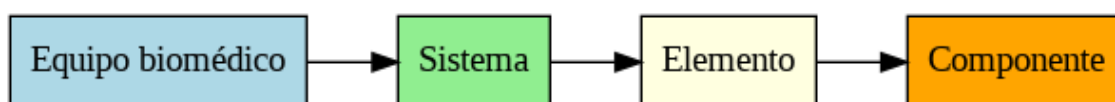
En Panamá, la definición oficial de *equipo biomédico* está establecida en el Decreto Ejecutivo No. 490 de 4 de octubre de 2019, que reglamenta la Ley 90 de 26 de diciembre de 2017 sobre dispositivos médicos y productos afines, conforme fue modificada por la Ley No. 92 de 12 de septiembre de 2019. En dicho decreto, publicado en la Gaceta Oficial No. 28875-A del Ministerio de Salud, se define equipo biomédico como: “Dispositivo médico operacional y funcional que reúne sistemas y subsistemas eléctricos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos, híbridos incluidos los programas informáticos que intervengan en su buen funcionamiento, destinado por el fabricante a ser usado en seres humanos con fines de prevención, diagnóstico, tratamiento o rehabilitación. No constituyen equipo biomédico aquellos dispositivos médicos implantados en el ser humano o aquellos destinados para un solo uso y a los cuales no se le realiza mantenimiento preventivo o correctivo.” (MINSA, 2019).

Tanto la OMS como el Ministerio de Salud de Panamá coinciden en que los equipos médicos, y específicamente los equipos biomédicos son dispositivos complejos que requieren no solo un propósito clínico definido, sino también una adecuada gestión técnica que garantice su funcionamiento seguro y eficaz. Cabe resaltar que, para organizar de forma lógica y funcional el análisis técnico de un equipo biomédico, es fundamental comprender su estructura jerárquica, que se compone de equipos, sistemas, elementos y componentes.

Un equipo se define como una unidad productiva completa que puede operar de manera autónoma o en conjunto con otros dispositivos, pudiendo incluso prestar servicio a varios equipos simultáneamente, lo que lo diferencia de un simple componente; un ejemplo de ello es una bomba de lubricación centralizada que alimenta a varios compresores. La figura 4 generaliza la estructura jerárquica de un equipo.

Dentro de cada equipo se distinguen sistemas, entendidos como conjuntos de elementos que cumplen una función específica, como los sistemas hidráulicos o eléctricos, cuya identificación facilita la organización de las actividades de mantenimiento de acuerdo con su función. A su vez, cada sistema está conformado por elementos, que corresponden a partes individuales que pertenecen exclusivamente a un solo equipo, como el motor de la bomba de lubricación de un compresor, lo cual resulta fundamental para una correcta identificación de activos en inventarios y planes técnicos. Finalmente, los componentes constituyen las subdivisiones más pequeñas de un elemento, como los rodamientos de un motor eléctrico o las juntas de un cilindro neumático, cuyo conocimiento detallado permite optimizar el mantenimiento predictivo y la reposición de partes críticas (OPS, 2011).

Figura 4. Estructura jerárquica general de un equipo



Nota. Representación de la estructura jerárquica de un equipo, mostrando la relación entre sistemas, subsistemas y componentes. Adaptado de Baura, G. D. (2011).

Los equipos, como hemos visto, se pueden dividir en sistemas, integrados por elementos que cumplen una función determinada dentro del equipo. Por definición nacional, los equipos biomédicos cuentan con diversos módulos funcionales que trabajan de forma coordinada. Dichos módulos pueden clasificarse en mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos y electrónicos, entre otros. (MINSA, 2019). En la figura 5 se esquematiza esta topología estándar. No obstante, no todos los equipos biomédicos necesariamente

contienen todos estos módulos; su estructura dependerá del propósito clínico y tecnológico para el cual fueron diseñados. Sin embargo, todos ellos, sin excepción, contarán con una fuente de alimentación, ya sea eléctrica, por batería u otra forma de energía, que permite su funcionamiento. (OMS, 2011).

El módulo mecánico está compuesto por los elementos responsables del movimiento físico y la transmisión de fuerzas dentro del equipo biomédico. Este módulo incluye componentes como motores, engranajes, poleas, ejes, estructuras metálicas, bisagras, sistemas de tracción y mecanismos de soporte. Por ejemplo, en una cama eléctrica hospitalaria, los actuadores mecánicos permiten el ajuste de la altura y la inclinación de las diferentes secciones del lecho.

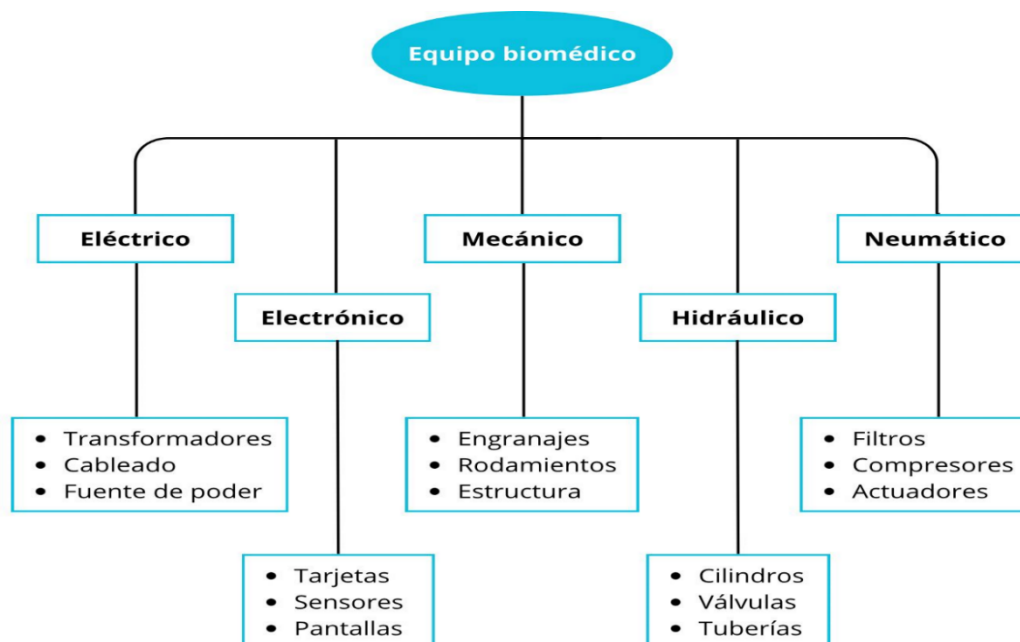
En contraste, el módulo hidráulico se basa en el uso de fluidos presurizados para generar movimiento o fuerza. Entre sus principales elementos se encuentran las bombas hidráulicas, cilindros, válvulas, mangueras, filtros, depósitos de aceite y sensores de presión. Este tipo de módulo es común en equipos como las mesas quirúrgicas, donde se requieren movimientos suaves, estables y precisos para el posicionamiento del paciente.

De manera similar, el módulo neumático emplea aire comprimido como medio de transmisión de energía para accionar mecanismos. Está conformado por compresores, cilindros neumáticos, válvulas reguladoras, acumuladores, filtros y tuberías. Aunque su uso es menos frecuente en equipos biomédicos de uso general, resulta especialmente útil en sistemas de sujeción automatizada o en unidades quirúrgicas que utilizan aire comprimido para herramientas especializadas. Desde el punto de vista del suministro energético, el módulo eléctrico cumple la función de proveer y distribuir la energía necesaria para el funcionamiento integral del equipo. Este módulo incluye transformadores, fuentes de alimentación, interruptores, cables, disyuntores, protectores de sobrecarga y conectores, garantizando una alimentación segura y estable.

El módulo electrónico integra los circuitos de control y procesamiento de información del sistema. Está compuesto por microcontroladores, sensores, pantallas, alarmas, tarjetas electrónicas y sistemas de comunicación. Este

módulo es el encargado de ejecutar las funciones inteligentes del equipo, procesar señales y coordinar el funcionamiento de los demás módulos, siendo esencial en equipos biomédicos modernos como monitores de signos vitales, ventiladores mecánicos y bombas de infusión. El diseño modular de estos equipos facilita su mantenimiento, permitiendo el acceso y reemplazo de componentes específicos sin afectar la totalidad del sistema. Además, los fabricantes proporcionan manuales, diagramas esquemáticos y fichas técnicas que describen las funciones y especificaciones de cada subsistema, elementos cruciales para la planificación del mantenimiento y la elaboración de reportes. Como se menciona en el libro Baura, G. D. (2011). *Medical device technologies: A systems-based overview using engineering standards*. Academic Press, la clasificación funcional también permite evaluar riesgos operativos, analizar modos de falla y correlacionar características de diseño con necesidades clínicas específicas. Esta estructura categórica estandariza el manejo del recurso tecnológico dentro del entorno hospitalario, optimizando seguridad, desempeño y disponibilidad operativa. (Khandpur, 2014)

Figura 5. Módulos operacionales de un equipo biomédico.



Nota. Clasificación de los módulos operacionales de un equipo biomédico. Adaptado de (Khandpur, 2014)

Desde la perspectiva de ingeniería expuesta por Baura (2011), la estructura documental es el eje sobre el cual se sustentan las decisiones de ingeniería clínica, trazabilidad operativa y evaluación de riesgo. La gestión tecnológica se fundamenta en inventarios completos y actualizados que incluyen parámetros de identificación, ubicación, vida útil, estado operativo y frecuencia de uso. Se explica que la trazabilidad de eventos técnicos permite reducir la incidencia de errores, mejorar el control del ciclo de vida y proyectar fallas futuras mediante análisis comparativos. El uso de listas de verificación garantiza la estandarización del procedimiento técnico, minimiza omisiones durante la intervención y fortalece el control sobre los parámetros críticos del dispositivo.

Por otro lado, la documentación de fallas, reparaciones y pruebas de funcionamiento provee un registro cuantificable del comportamiento operativo del equipo, permitiendo detectar patrones de deterioro y evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas. Estos registros constituyen un insumo para análisis estadístico y auditorías técnicas, al igual que los manuales del fabricante forman la base técnica de referencia para la operación y mantenimiento. *(Khandpur, 2014)*

2.2.4 Árbol de decisiones

El árbol de decisiones es una técnica de clasificación y análisis que organiza visualmente las decisiones posibles y sus consecuencias, representando de forma jerárquica las variables que influyen en una determinada salida. De acuerdo con Mitchell (1997), un árbol de decisión construye un modelo a partir de datos de entrenamiento mediante la partición recursiva del espacio de atributos, seleccionando en cada nodo la variable que mejor separa las instancias conforme a un criterio de pureza. Este enfoque permite transformar un conjunto complejo de datos en una estructura lógica interpretable.

Según Kozak (2019), un árbol de decisión es un modelo representado por un grafo dirigido acíclico, donde los nodos internos corresponden a pruebas sobre los atributos (por ejemplo, “¿el valor de X es mayor que 5?”), las ramas representan el resultado de esas pruebas, y las hojas del árbol indican una clase o valor de salida. Además, Barros, de Carvalho y Freitas (2015) destacan que

los árboles de decisión son altamente comprensibles y eficientes desde el punto de vista computacional, lo que los hace muy atractivos para su aplicación en contextos donde la transparencia del modelo es crucial, como en el mantenimiento de equipos médicos. En estos escenarios, un árbol de decisión puede ayudar a determinar, por ejemplo, si una falla técnica debe derivar en una intervención preventiva, correctiva o de reemplazo, en función de variables como la frecuencia de uso, el tiempo transcurrido y el historial de fallas. En la figura 6 se ilustra un ejemplo.

Quinlan (1993), en el desarrollo del algoritmo C4.5, estableció las bases formales de los árboles de decisión modernos, introduciendo métricas como la ganancia de información y la ratio de ganancia para seleccionar los atributos óptimos en cada división. Este proceso de inducción descendente recursiva se fundamenta en principios de teoría de la información, donde el objetivo es reducir la entropía del sistema en cada partición. Tan, Steinbach y Kumar (2019) explican que este mecanismo permite generar subconjuntos progresivamente más homogéneos, hasta alcanzar nodos terminales que representan decisiones finales o clases definidas.

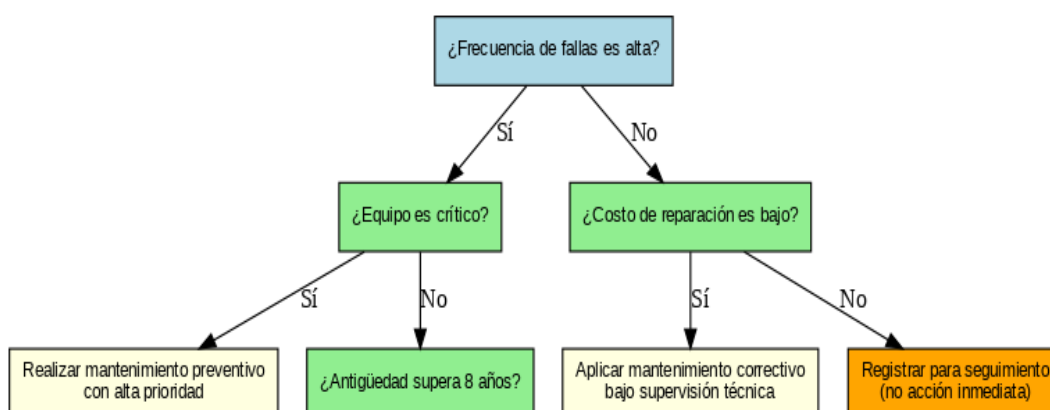
Desde el punto de vista estructural, los árboles de decisión presentan ventajas significativas frente a otros modelos predictivos, particularmente en términos de interpretabilidad y trazabilidad. James et al. (2013) señalan que, aunque pueden no alcanzar la precisión de modelos más complejos como redes neuronales profundas, su capacidad explicativa los convierte en herramientas idóneas en entornos donde la transparencia es esencial. En contextos hospitalarios y de gestión tecnológica, esta característica adquiere especial relevancia, dado que las decisiones técnicas deben poder justificarse y auditarse.

En el estado actual de la investigación, los árboles de decisión han evolucionado hacia métodos más robustos, como Random Forest y Gradient Boosting, los cuales combinan múltiples árboles para mejorar el desempeño predictivo y reducir el sobreajuste (Géron, 2022). No obstante, el árbol de decisión individual continúa siendo ampliamente utilizado cuando el objetivo principal es estructurar conocimiento y generar reglas comprensibles. Han, Pei y Kamber (2012)

destacan que estos modelos son especialmente útiles en minería de datos aplicada a procesos industriales, donde permiten identificar patrones recurrentes y formalizar criterios operativos. En términos de optimización de procesos, el árbol de decisión facilita la estandarización de criterios técnicos, al transformar información empírica en reglas sistemáticas. Según Tan et al. (2019), su aplicación en gestión de operaciones permite reducir variabilidad en la toma de decisiones, mejorar la coherencia entre procedimientos y optimizar la asignación de recursos. En el mantenimiento biomédico, este enfoque permite estructurar decisiones relacionadas con tipo de intervención, prioridad técnica o clasificación de fallas, reduciendo ambigüedades y fortaleciendo la uniformidad del proceso.

Estos algoritmos suelen construirse mediante un proceso denominado inducción descendente, en el que se seleccionan los atributos que mejor dividen el conjunto de datos (de acuerdo con medidas como la ganancia de información o el índice Gini), y se repite el proceso recursivamente hasta que se cumplen ciertos criterios de detención, como alcanzar un mínimo de datos por nodo o una pureza aceptable. En cuanto a su optimización, se han desarrollado enfoques bioinspirados como el uso de algoritmos de colonia de hormigas (ACO), que permiten explorar eficazmente el espacio de soluciones y construir árboles de decisión de manera más robusta. Kozak (2019) expone que esta técnica permite generar múltiples rutas de decisión, evaluarlas y reforzar aquellas que llevan a decisiones.

Figura 6. *Árbol de decisiones.*



Nota. Ejemplo de un árbol de decisiones utilizado como modelo de apoyo para la toma de decisiones técnicas. Adaptado de (Mahfoud, 2016)

Además de su capacidad predictiva, el árbol de decisiones puede facilitar el análisis de patrones recurrentes e identificar tendencias que sugieran necesidades específicas de mantenimiento. Según Kozak (2019), esta capacidad explicativa y estructurada convierte al árbol de decisiones en una herramienta altamente útil para entornos como el hospitalario, donde la trazabilidad, eficiencia y seguridad son esenciales.

2.2.5 Algoritmo K-means

K-means es un algoritmo de agrupamiento (clustering) perteneciente al aprendizaje automático no supervisado, cuya función principal es clasificar grandes volúmenes de datos en grupos homogéneos, denominados clústeres, sin requerir conocimiento previo sobre las etiquetas de clasificación. El algoritmo parte de un número definido de clústeres (k), que representan las categorías deseadas. A partir de este valor, K-means realiza iteraciones en las que asigna cada dato al clúster más cercano a partir de su distancia al centroide (promedio) de dicho grupo. Luego recalcula los centroides y repite el proceso hasta que no se producen cambios significativos en la asignación de los elementos. De acuerdo con Han, Pei y Kamber (2012), K-means opera mediante la minimización de la suma de los errores cuadráticos dentro de cada grupo, lo que garantiza que los elementos pertenecientes a un mismo clúster presenten alta similitud.

Este procedimiento permite descubrir patrones ocultos o estructuras internas dentro de conjuntos de datos multidimensionales. Cuanto más cercanos estén los datos a un mismo centroide, más homogéneo y significativo es el grupo creado. K-means es especialmente útil cuando se requiere organizar o segmentar datos en función de características comunes, lo cual es fundamental en escenarios donde se manejan múltiples variables técnicas o clínicas.

En el estado del arte, K-means continúa siendo ampliamente aplicado en minería de datos, análisis industrial y sistemas de gestión. Han et al. (2012) destacan su utilidad en segmentación de clientes, detección de anomalías y clasificación de patrones operativos. En entornos hospitalarios y de mantenimiento, la segmentación de equipos o actividades de acuerdo con características comunes permite optimizar recursos y priorizar intervenciones técnicas.

Desde el enfoque de optimización de procesos, la capacidad de K-means para agrupar elementos similares permite reducir redundancias, identificar patrones recurrentes y diseñar estrategias diferenciadas a partir de la naturaleza del grupo identificado. Tan et al. (2019) señalan que este tipo de segmentación contribuye a mejorar la eficiencia operativa, ya que facilita la asignación estratégica de recursos y la planificación basada en evidencia.

En el área del mantenimiento biomédico, su aplicación resulta clave para clasificar los equipos médicos según distintos criterios como: tipo de dispositivo, módulo funcional, frecuencia de fallas o historial de intervenciones. Esta segmentación técnica permite establecer prioridades de atención, optimizar la asignación de técnicos y personal especializado, y anticipar necesidades operativas. Como lo exponen Güçdemir e Ilgın (2023), el uso de K-means en hospitales permite diseñar estrategias de mantenimiento más eficaces y adaptadas a la complejidad de los equipos, reduciendo los tiempos de respuesta y mejorando la disponibilidad de recursos.

Por otro lado, el trabajo presentado por *Frontiers in Public Health* (2021) demostró que integrar K-means en un sistema de gestión del mantenimiento ayuda a desarrollar modelos predictivos robustos. Estos modelos no solo agrupan dispositivos similares, sino que también priorizan intervenciones según la criticidad y el desempeño histórico, lo cual fortalece la planificación estratégica del mantenimiento.

Además, HiveMQ (2023) señala que este algoritmo es utilizado ampliamente en entornos industriales y hospitalarios para tareas de mantenimiento predictivo y mejora del OEE (eficacia general del equipo). Gracias a la capacidad de K-means para identificar agrupaciones significativas, es posible diseñar procesos inteligentes que reduzcan fallas inesperadas, disminuyan costos operativos y mejoren la eficiencia global del sistema técnico.

2.3. Variables

1. **Variable dependiente** (objeto de estudio).
2. **Variables independientes** (factores controlables).

2.3.1 Variable dependiente: Variable 1: Estandarización de servicios técnicos biomédicos.

La estandarización de servicios técnicos de mantenimiento biomédico se define como el proceso mediante el cual se organizan, documentan y uniforman las actividades técnicas realizadas sobre equipos médicos, con el fin de asegurar la trazabilidad, reducir errores operativos y mejorar la calidad del servicio. Esta variable integra tres conceptos clave: estandarización, mantenimiento y equipos biomédicos. Según Juran y Godfrey (1999), la estandarización consiste en seleccionar y formalizar las mejores prácticas técnicas para garantizar su aplicación consistente, mientras que Feigenbaum (2005) sostiene que es un componente esencial de los sistemas de calidad, al permitir la repetibilidad y el control de los procesos.

En cuanto al mantenimiento, Mora Gutiérrez (2009) lo define como un conjunto de acciones técnicas y administrativas destinadas a conservar o restablecer un equipo en condiciones operativas seguras y eficientes. Cuando se trata de dispositivos biomédicos, tal como los define la OMS y el MINSA, es indispensable documentar toda intervención realizada, utilizando registros estructurados y validados técnicamente.

Por tanto, la estandarización de servicios técnicos de mantenimiento biomédico implica aplicar principios de calidad y control documental para unificar criterios técnicos, redacción semántica de las acciones ejecutadas, y establecer formatos consistentes en el registro de las intervenciones preventivas y correctivas.

La estandarización será medida mediante indicadores agrupados en tres categorías: cumplimiento documental, calidad técnica de la información y eficiencia operativa. Estos indicadores incluyen:

- Nivel de cumplimiento de los elementos mínimos en el reporte técnico (fecha, técnico responsable, tipo de intervención, equipo, diagnóstico, actividades realizadas, firma).
- Calidad de datos: Correspondencia entre el mantenimiento ejecutado y lo recomendado por el fabricante (de acuerdo con manual técnico). (% tasa de error)

- Eficiencia operativa: El grado de integración del árbol de decisiones como guía para la generación del reporte.

Cada dimensión será evaluada mediante rúbricas técnicas que asignarán un valor ordinal (bajo, medio, alto) a partir del porcentaje de cumplimiento observado en simulación de flujo de trabajo. De acuerdo con lo propuesto por Wireman (2005) y Prieto García (2010), se establece como criterio que un nivel de cumplimiento entre 0–50% será clasificado como bajo, entre 51–80% como medio y entre 81–100% como alto grado de estandarización.

2.3.2 Variables independientes: Árbol de decisiones y Kmeans

Variable 2: Aplicación del árbol de decisiones

Según Barros, de Carvalho y Freitas (2015), un árbol de decisiones es una estructura lógica jerárquica que organiza el conocimiento mediante pruebas secuenciales sobre atributos, generando ramas que conducen a decisiones específicas. En palabras de los autores, “un árbol de decisión es una estructura similar a un diagrama de flujo, en la que cada nodo interno representa una prueba sobre un atributo, cada rama representa el resultado de esa prueba, y cada hoja representa una clase” (p. 5). Esta estructura permite representar de forma clara y comprensible reglas de decisión complejas, lo que facilita su implementación en sistemas de mantenimiento inteligente.

La efectividad del modelo puede medirse a través de su precisión para clasificar adecuadamente los escenarios de mantenimiento, su simplicidad estructural y la facilidad con la que puede ser interpretado por personal técnico. Barros et al. (2015) afirman que “la efectividad de un modelo de árbol de decisiones puede evaluarse midiendo la precisión de clasificación, la simplicidad de su estructura y su interpretabilidad” (p. 3).

Variable 3: Uso de KMeans para clasificación técnica

KMeans es un algoritmo no supervisado de agrupamiento que permite segmentar en grupos equipos biomédicos según variables como módulo funcional, falla y tipo de mantenimiento, facilitando la priorización del mantenimiento y asignación eficiente de recursos técnicos (Güçdemir & Ilgın, 2023; Frontiers, 2021; HiveMQ, 2023).

Será considerada eficaz si los clusters generados optimizan la priorización del mantenimiento y si reduce el tiempo de ejecución técnica medido por análisis en simulación de flujo de trabajo mediante el software Arena. (Güçdemir & Ilgın, 2023; Frontiers, 2021; HiveMQ, 2023).

Las dimensiones permiten descomponer cada variable en componentes observables y relevantes para el análisis, mientras que los indicadores hacen operativa cada dimensión, facilitando la evaluación clara y objetiva de los resultados esperados en relación con cada objetivo planteado.

2.3.3 Mapa de variables

El mapa de variables se encuentra alineado con los objetivos específicos de esta investigación, los cuales responden a una secuencia metodológica propia de los estudios aplicados: diagnóstico, diseño y verificación. Las variables definidas — la estandarización de servicios técnicos biomédicos como variable dependiente, y la aplicación del árbol de decisiones junto con el uso de K-means como variables independientes— derivan directamente del título del estudio y del enfoque metodológico adoptado.

Esta estructura garantiza la coherencia metodológica del estudio y su pertinencia en el contexto de la simulación y mejora de procesos en mantenimiento técnico biomédico. En la tabla 1 se muestra el mapa de variables de esta investigación.

Tabla 1. Mapa de Variables

Objetivo específico	Variable	Dimensión	Indicador
1. Identificar los parámetros y atributos de las herramientas árbol de decisiones y KMeans.	Aplicación del árbol de decisiones	Sistematización de decisiones	% de equipos agrupados correctamente por módulo o tipo de falla.
	Uso de KMeans para clasificación	Segmentación técnica	Tiempo promedio de respuesta de acuerdo con cluster.
2. Establecer el estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico.	Estandarización de servicios técnicos biomédicos	Protocolización de procesos	Existencia de <i>checklist</i> /documentos normalizados.
		Homogeneidad de ejecución	% de coincidencia entre actividades ejecutadas y manual técnico.
			Nivel de estandarización observado (bajo, medio, alto).
3. Diseñar un algoritmo de estandarización basado en árbol de decisiones y KMeans.	Aplicación del árbol de decisiones	Reducción del error en decisiones.	N.º de decisiones correctas según tipo de mantenimiento.
	Uso de KMeans para clasificación	Priorización del mantenimiento.	Intervenciones realizadas en orden lógico
4. Verificar la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena.	Estandarización de servicios técnicos biomédicos	Trazabilidad optimizada	Cumplimiento de campos esenciales en simulación.
		Productividad / capacidad	N.º de equipos atendidos por jornada
		Calidad de servicio	Tiempo de espera en cola

2.4 Glosario de términos

1. **Estandarización:** Es el proceso por el cual se establecen criterios técnicos unificados para lograr uniformidad en productos, servicios o procesos. De acuerdo con Feigenbaum (2005), la estandarización permite mantener la calidad reduciendo la variabilidad operativa. (*Feigenbaum, A. V. (2005). Total Quality Control. McGraw-Hill.*)
2. **Clustering:** Técnica de agrupamiento que organiza datos en subconjuntos homogéneos sin supervisión previa. Es usado para reconocer patrones y segmentar datos. (*Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). Introduction to Data Mining. Pearson.*)
3. **Dataset:** Conjunto estructurado de datos almacenados electrónicamente que pueden analizarse con herramientas estadísticas o computacionales. (*Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). Data Mining: Concepts and Techniques. Elsevier.*)
4. **Base de datos:** Conjunto organizado de información estructurada almacenada electrónicamente y diseñada para ser consultada y actualizada de forma eficiente. (*Coronel, C., & Morris, S. (2015). Database Systems: Design, Implementation, & Management. Cengage Learning.*)
5. **Índice de Gini:** medida de impureza utilizada en modelos de clasificación (como árboles de decisión). Cuantifica cuán mezcladas están las categorías de clases en un conjunto de datos: valores cercanos a cero indican nodos más puros (datos homogéneos), mientras que valores más altos representan mayor impureza (mezcla de clases). Este criterio ayuda a seleccionar divisiones que reducen la impureza y mejoran la capacidad predictiva del modelo. (*Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2.^a ed.). Springer.*)
6. **Entropía:** medida de incertidumbre en la distribución de clases dentro de un conjunto de datos. En problemas de clasificación, describe la cantidad de información necesaria para determinar la clase de una observación: entropía

baja indica clases homogéneas (poca incertidumbre) y entropía alta indica clases más mezcladas (mayor incertidumbre). (Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2.^a ed.). Springer.)

7. Label Encoding: técnica de preprocesamiento en aprendizaje automático que convierte variables categóricas en valores numéricos asignando un número entero único a cada categoría distinta. Esta transformación permite que algoritmos que requieren entradas numéricas (como regresión o muchos métodos supervisados) puedan manejar datos originalmente no numéricos. (Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.)
8. Índice de Silhouette: métrica para evaluar la calidad de una partición de clustering. Para cada punto de datos, compara la distancia media dentro de su propio grupo con la distancia media al grupo más cercano diferente. Los valores del índice oscilan entre -1 y +1: valores cercanos a +1 indican agrupamientos bien definidos, valores cercanos a 0 sugieren coincidencias ambiguas y valores negativos indican posibles asignaciones incorrectas. (Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2.^a ed.). Springer.)
9. Criterio de Convergencia: condición que indica cuándo debe detenerse un algoritmo iterativo (como el entrenamiento de un modelo o un proceso de clustering). Generalmente, un algoritmo se considera “convergado” cuando los cambios entre sucesivas iteraciones (por ejemplo, en parámetros o en funciones objetivo) son menores que un umbral establecido, lo que sugiere que se ha alcanzado una solución estable y que las actualizaciones ya no producen mejoras significativas. (Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2.^a ed.). Springer.)
10. Nodos: Puntos de ramificación dentro de un árbol de decisión donde se evalúa una condición lógica. (Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011)).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y Diseño de investigación

De acuerdo con Sampieri, Collado y Lucio (2014), toda investigación requiere un enfoque metodológico que guíe de forma sistemática el proceso de recolección, análisis e interpretación de los datos. Los autores proponen que toda investigación puede clasificarse a partir de su finalidad (básica o aplicada), su enfoque (cuantitativo, cualitativo o mixto) y su alcance (exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo). De igual forma, Tamayo y Tamayo (2009) enfatiza que esta clasificación debe alinearse con los objetivos del estudio, ya que determina el rigor del proceso investigativo.

El tipo de investigación se refiere a la naturaleza general del estudio y puede clasificarse en varias categorías. En ese sentido, el presente trabajo se enmarca en la categoría de investigación aplicada, ya que, según Sampieri et al. (2014), se define como aquella que tiene como propósito resolver problemas prácticos, generando resultados que pueden ser aplicados de manera inmediata en un contexto específico. De igual forma, Hernández (2022) coincide en que la investigación aplicada busca transformar entornos concretos mediante soluciones técnicas fundamentadas, permitiendo la mejora directa de procesos operativos. En este sentido, el presente estudio tiene como propósito ofrecer una solución operativa al problema de la inconsistencia documental en los reportes de mantenimiento biomédico, por lo que es una investigación aplicada. Al diseñar una herramienta que permita estandarizar, la investigación genera un producto técnico aplicable directamente en el Instituto Oncológico Nacional, mejorando la calidad, trazabilidad y uniformidad del registro técnico en la mencionada institución.

En la misma línea, la investigación adopta un enfoque cualitativo, ya que, conforme con Sampieri et al. (2014), este tipo de enfoque se orienta a comprender e interpretar fenómenos desde una perspectiva holística, basándose en el análisis de datos no numéricos como textos, documentos u observaciones, con el propósito de capturar la complejidad de los significados presentes en un contexto determinado. En palabras de Flick (2015), el enfoque cualitativo es adecuado cuando el interés

está en comprender procesos, estructuras y relaciones antes que en medir magnitudes reales. En el caso de esta tesis, el carácter cualitativo radica en que el análisis se centra en documentos técnicos, específicamente manuales de servicio de equipos biomédicos, con el fin de identificar, estructurar y estandarizar las actividades técnicas. En consecuencia, este trabajo no busca probar hipótesis cuantitativas ni establecer relaciones numéricas entre variables provenientes de mediciones reales del hospital, sino caracterizar, analizar y estructurar la información existente, establecer parámetros y simular el funcionamiento del algoritmo propuesto. El uso de técnicas como árbol de decisiones y K-means se integrará como una herramienta analítica para la propuesta, no como un experimento con datos reales de campo.

A su vez, se clasifica como una investigación de tipo descriptiva, ya que, de acuerdo con Sampieri et al. (2014), este tipo de estudios tienen como objetivo especificar las propiedades, características y rasgos fundamentales de un fenómeno, recolectando información de manera sistemática para describir con precisión los conceptos involucrados. En la misma línea, Rodríguez Gómez, Gil Flores y García Jiménez (1996) explican que la descripción rigurosa de un fenómeno es fundamental para sentar las bases de cualquier propuesta de mejora o intervención. Por ende, la investigación describe de forma sistemática cómo se elaboran actualmente los reportes técnicos de mantenimiento en el entorno biomédico, identificando las principales debilidades y vacíos estructurales que afectan la calidad del servicio técnico biomédico, lo cual resulta fundamental para sustentar y contextualizar la propuesta de estandarización.

Por otro lado, el diseño de investigación hace referencia a la estructura metodológica que guía el desarrollo del estudio. Según Hernández (2022), el diseño metodológico constituye la planificación lógica y estructurada de cómo se recolectarán, analizarán e interpretarán los datos con el fin de responder a las preguntas de investigación. En este sentido, Sampieri et al. (2014) destacan que los diseños pueden ser experimentales, cuando se manipulan deliberadamente las variables, o no experimentales, cuando el investigador se limita a observar los

fenómenos tal como ocurren en su contexto natural sin intervenir directamente. Del mismo modo, Tamayo y Tamayo (2009) subraya que el diseño debe alinearse con el propósito investigativo y el tipo de datos disponibles, privilegiando la coherencia metodológica sobre la intervención.

En la presente investigación se adopta un diseño no experimental, dado que no se manipulan las variables del estudio, sino que se analiza información documental preexistente como los reportes técnicos de mantenimiento. Se trata, por tanto, de una investigación basada en la observación estructurada de registros y procesos tal como se presentan en la realidad hospitalaria, sin inducir modificaciones deliberadas. De acuerdo con Sampieri et al. (2014), el diseño no experimental se caracteriza porque el investigador no manipula intencionalmente las variables independientes, sino que observa los hechos en su contexto natural para analizarlos posteriormente. En consecuencia, la presente investigación se enmarca en esta estrategia metodológica, al enfocarse en estudiar el contenido documental del mantenimiento biomédico con base en registros ya elaborados, analizar sus estructuras y extraer patrones para luego construir un modelo de mejora.

Este diseño, a su vez, puede ser clasificado como transversal, ya que la recolección de datos se realiza en un único momento, sin seguimiento en el tiempo. Según Rodríguez Gómez, Gil Flores y García Jiménez (1996), los estudios transversales se centran en describir una situación específica en un punto determinado del tiempo, siendo útiles cuando se requiere un diagnóstico o caracterización puntual. En línea con esta perspectiva, Sampieri et al. (2014) indican que los estudios transversales tienen como objetivo recolectar datos en un solo momento, con el fin de describir variables y analizar su incidencia o interrelación en ese momento. Por lo tanto, los datos analizados en la presente investigación provienen de un corte único en el tiempo y no implican un seguimiento longitudinal, lo cual justifica plenamente esta clasificación.

Por otra parte, se reconoce también que el estudio responde a un diseño de campo. De acuerdo con Tamayo y Tamayo (2009), el diseño de campo implica la

recolección de datos directamente en el lugar donde ocurre el fenómeno, sin modificar sus condiciones naturales, empleando diversas fuentes de información para lograr una comprensión profunda del caso.

En este mismo sentido, Hernández (2022) sostiene que los estudios de caso permiten analizar a fondo una situación específica, explorando sus particularidades a partir de fuentes múltiples. En el marco de esta investigación, aunque el análisis documental es central, la aplicación de un instrumento de recolección de datos tipo encuesta a profesionales biomédicos del entorno hospitalario refuerza el carácter de investigación de campo, ya que se evalúa el escenario real donde se desarrolla el fenómeno de estudio. Al obtener los datos en una unidad específica de análisis, el ION, el estudio se enmarca en la subcategoría de diseño de campo bajo la modalidad de estudio de caso.

3.2 Población y Muestra

La población se define como el conjunto de individuos que comparten una o más características relevantes para un estudio determinado, y que constituyen el universo sobre el cual se desea obtener información. Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), la población corresponde al grupo total de casos que cumplen con ciertas especificaciones relacionadas con los objetivos de la investigación.

En el marco de este estudio, la población queda conformada por los profesionales del área biomédica que laboran en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá, ya que son los actores directamente involucrados en la gestión, ejecución y documentación del mantenimiento técnico de los equipos médicos. Dado que la finalidad de esta tesis es diseñar un algoritmo que contribuya a la estandarización de los procesos documentales del servicio técnico biomédico, resulta esencial obtener la perspectiva de quienes se enfrentan cotidianamente a dichas tareas.

Por su parte, la muestra es entendida como un subconjunto representativo de la población, seleccionado con base en criterios metodológicos que permitan garantizar la pertinencia y validez de la información recolectada. De acuerdo con Sampieri, Collado y Lucio (2014), una muestra adecuada debe ser suficiente,

accesible y pertinente con respecto al fenómeno estudiado, especialmente en investigaciones de enfoque cualitativo.

En este estudio se adopta un muestreo no probabilístico, específicamente por conveniencia, ya que la selección de los participantes consiste en función de su experiencia profesional, su cercanía al fenómeno en estudio y su disposición para colaborar. La muestra final está compuesta por 5 profesionales vinculados a la ingeniería biomédica, específicamente personal activo del DIB del ION.

3.3 Descripción del Instrumento de Recolección de Datos

En el presente estudio, el instrumento de recolección de datos seleccionado es una encuesta estructurada, diseñada específicamente para explorar aspectos clave del área de mantenimiento técnico biomédico. Este instrumento tiene el propósito de diagnosticar el estado actual de los procesos de estandarización interna dentro del hospital, sin considerar los procesos tercerizados, excluyendo aquellos gestionados por proveedores externos. Dicha encuesta se aplicará y analizará en el capítulo 4.

La encuesta está dirigida a 5 profesionales del área biomédica del ION con experiencia en ingeniería biomédica. La selección se realiza mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, con base en el juicio del investigador y criterios de experiencia técnica en mantenimiento y documentación de equipos médicos.

Cabe señalar que la validez del instrumento será revisada y avalada por el asesor de la investigación, quien supervisa metodológicamente todo el proceso investigativo, y por 3 expertos en el campo de biomédica, docentes y especialistas del ámbito académico con experiencia comprobada en gestión técnica, documentación y normativas asociadas al mantenimiento de equipos médicos. Para el proceso de validación se envía un informe a los expertos para su revisión. El formulario del informe se adjunta en el Anexo 1 de esta tesis.

El instrumento de recolección de datos es una encuesta de 10 preguntas con 2 escalas Likert, según la pregunta, de cinco niveles cada una: totalmente en desacuerdo, en desacuerdo, ni de acuerdo ni en desacuerdo, de acuerdo y totalmente de acuerdo o Siempre, Casi siempre, Regularmente, No realmente y

Nunca. Esto permitirá recoger valoraciones graduales de los encuestados, respecto a la existencia de protocolos documentales y la estandarización técnica actual. Las preguntas están alineadas con los objetivos específicos de la investigación y abordan directamente la variable dependiente del estudio: la estandarización de los servicios técnicos biomédicos.

Durante el proceso de validación del instrumento, los 3 expertos coincidieron en que el instrumento era válido. Como se muestra en la Tabla 2, dos de ellos lo calificaron como válido sin observaciones y uno como válido con observaciones (aportes de mejora para la aplicación). Esto implicó que el instrumento pudo ser aplicado sin modificaciones en las preguntas, pero, tomando en cuenta, las recomendaciones de claridad y precisión al momento de administrar la encuesta.

El validador 1 calificó todas las preguntas del cuestionario como pertinentes, sin realizar observaciones adicionales, lo que indicó que el instrumento cumplía adecuadamente con los objetivos del estudio y no requería ajustes sustanciales. De manera similar, el validador 2 consideró pertinentes todas las preguntas, destacando la relevancia del estudio para evaluar el cumplimiento de los parámetros de mantenimiento preventivo establecidos por los fabricantes en el ION, así como el impacto positivo del uso de tecnologías para optimizar tiempos de respuesta y reducir la inactividad de equipos críticos.

No obstante, señaló como posible limitación la falta de capacitación especializada del personal biomédico, observación que no implicó modificaciones estructurales al instrumento. Por su parte, el validador 3 también evaluó todas las preguntas como pertinentes, sugiriendo la ampliación de opciones de respuesta y la diferenciación entre mantenimiento preventivo y correctivo; estas recomendaciones no se incorporaron en las instrucciones de aplicación, manteniéndose intacta la estructura del cuestionario.

Tabla 2. Comparación antes y después de la validación del instrumento

Pregunta del Instrumento	Validador 1	Validador 2	Validador 3	Después de la validación
1. ¿Considera que la estandarización puede ayudar a reducir la ambigüedad en las actividades técnicas de mantenimiento?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, sugiere especificar “protocolos estandarizados” para reforzar el enfoque documental	Se mantiene la pregunta
2. ¿Ha observado variabilidad importante en los tiempos de respuesta observados actualmente en los reportes técnicos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, recomienda aclarar si la pregunta busca percepción del experto o datos objetivos de registros históricos	Se mantiene la pregunta
3. ¿Su institución posee actualmente protocolos internos estandarizados de mantenimiento para cada equipo, independientemente de los que entrega el proveedor?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, pertinente; sugiere añadir opción “parcialmente”	Se mantiene la pregunta
4. En su experiencia, ¿las actividades que se redactan como realizadas en los reportes durante los mantenimientos coinciden siempre con lo establecido en los manuales técnicos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, pertinente; recomienda precisar si se refiere a mantenimientos preventivos, correctivos o ambos	Se mantiene la pregunta
5. ¿La redacción en los reportes técnicos varía ampliamente entre técnicos y equipos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, sugiere definir qué se entiende por “variar ampliamente” para reducir subjetividad	Se mantiene la pregunta
6. ¿Ha observado errores en las decisiones técnicas que lleven a retrabajos en el departamento biomédico?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, sugiere especificar si se refiere a preventivo, correctivo o ambos, e incluir escala de frecuencia (nunca/siempre)	Se mantiene la pregunta
7. ¿Existe una escala de prioridad en la realización de los mantenimientos de acuerdo con criterios de criticidad de los equipos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, recomienda añadir referencia a criterios habituales (criticidad clínica, riesgo, disponibilidad) y ofrecer opciones cerradas con campo abierto	Se mantiene la pregunta
8. ¿Se hace seguimiento continuo de la eficiencia de los procesos de mantenimiento para optimizarlos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, recomienda mantener revisiones periódicas del algoritmo como parte de la trazabilidad	Se mantiene la pregunta
9. ¿Se mide la productividad por técnico y del departamento?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, sugiere evaluar variabilidad de carga de trabajo según tipo de equipo y complejidad	Se mantiene la pregunta
10. ¿Se hace seguimiento a los tiempos de espera o retardos de solución en los mantenimientos?	Sí, sin observaciones	Sí, sin observaciones	Sí, recomienda correlacionar con encuestas de satisfacción del cliente interno	Se mantiene la pregunta

Posteriormente, el instrumento de recolección de datos se aplicará por medio de una encuesta compuesta por las 10 preguntas previamente evaluadas y aprobadas, dirigida a los profesionales del DIB en el ION. La encuesta empleará una escala tipo Likert de cinco niveles; totalmente en desacuerdo, en desacuerdo, ni de acuerdo ni en desacuerdo, de acuerdo y totalmente de acuerdo o según sea la redacción de la pregunta; Siempre, Casi siempre, Regularmente, No realmente y Nunca, lo cual permitirá recoger valoraciones graduales por parte de los encuestados que será analizado en el capítulo 4 de esta tesis.

3.4 Herramientas Digitales Aplicadas

Las herramientas digitales utilizadas a lo largo de la presente investigación incluyeron desde librerías de programación orientadas al análisis y procesamiento de datos, hasta herramientas avanzadas como software de simulación de eventos discretos, las cuales permitieron abordar de manera integral el diseño, desarrollo, verificación de la optimización y evaluación de la propuesta de estandarización del mantenimiento biomédico.

El desarrollo de la propuesta se estructuró en cinco etapas metodológicas, en las cuales se emplearon herramientas digitales y librerías especializadas orientadas al análisis de datos, la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, el desarrollo de interfaces de usuario y la simulación de procesos de mantenimiento biomédico, garantizando coherencia técnica y trazabilidad de la información utilizada. En la Etapa 1: Análisis documental y construcción del dataset maestro, se utilizó el lenguaje de programación Python (Python Software Foundation, 2023), seleccionado por su versatilidad en el procesamiento de datos y su amplia adopción en aplicaciones de ingeniería. Python permitió automatizar la organización, limpieza y normalización de la información técnica extraída de manuales de mantenimiento biomédico. Para esta etapa se empleó la librería Pandas (McKinney, 2010), diseñada para la manipulación eficiente de estructuras de datos tabulares, la cual facilitó la consolidación de actividades preventivas y correctivas redactadas de

forma heterogénea en un único dataset estandarizado. Este proceso garantizó consistencia semántica y estructural, permitiendo la trazabilidad de la información técnica utilizada en el estudio.

En la Etapa 2: Análisis de conglomerados mediante el algoritmo K-means, se aplicaron técnicas de aprendizaje no supervisado con el propósito de identificar patrones y similitudes entre actividades de mantenimiento biomédico. Para la transformación del texto técnico en representaciones numéricas se utilizó TfidfVectorizer, herramienta perteneciente a la librería Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011), que convierte texto en vectores ponderados según la frecuencia e importancia de los términos. El algoritmo K-means, también integrado en esta librería, permitió agrupar actividades con características similares sin requerir etiquetas previas, favoreciendo la estandarización basada en similitud técnica. Para el análisis visual de los resultados se aplicó PCA (Principal Component Analysis) como técnica de reducción de dimensionalidad, junto con la librería Matplotlib (Hunter, 2007), utilizada para la representación gráfica de los clústeres generados.

La Etapa 3: Desarrollo del algoritmo basado en árboles de decisión se orientó a la clasificación estructurada de actividades de mantenimiento preventivo y correctivo. En esta fase se empleó DecisionTreeClassifier, modelo de aprendizaje supervisado perteneciente a Scikit-learn (Pedregosa et al., 2011), el cual permite representar reglas de decisión de forma jerárquica e interpretable. Para la codificación de variables categóricas se utilizó LabelEncoder, mientras que TfidfVectorizer permitió vectorizar componentes y fallas descritas en texto libre. Este conjunto de herramientas posibilitó la construcción de reglas técnicas reproducibles, orientadas a la generación automática de *checklists* estandarizados. La exportación de los resultados se realizó mediante la librería OpenPyXL (Clark & contributors, 2023), que permite la creación y edición de archivos en formato Excel, facilitando la interoperabilidad con los sistemas de gestión hospitalaria.

En la Etapa 4: Desarrollo de la interfaz de usuario, se implementó una aplicación interactiva mediante la librería Streamlit (Streamlit Inc., 2023), la cual permite el diseño de interfaces web orientadas a la visualización de datos y a la interacción del usuario sin requerir conocimientos avanzados de desarrollo web. La interfaz permitió seleccionar el equipo biomédico, el tipo de mantenimiento y el nivel de detalle de las actividades, ajustando dinámicamente la información presentada según los clústeres generados. Para la generación de reportes técnicos se empleó ReportLab (ReportLab Inc., 2023), librería especializada en la creación de documentos PDF, utilizada para estructurar *checklists* con encabezados normalizados, tablas técnicas y formato adecuado de subíndices y superíndices. La publicación de la aplicación se realizó mediante Ngrok (Ngrok Inc., 2023), herramienta que permite crear túneles seguros para exponer aplicaciones locales a través de una URL pública, facilitando el acceso remoto sin requerir infraestructura dedicada.

La Etapa 5: Simulación del proceso de mantenimiento biomédico se desarrolló utilizando el software Arena (Rockwell Automation, 2022), herramienta de simulación de eventos discretos ampliamente utilizada en la modelación y análisis de sistemas complejos. Arena permitió representar el flujo operativo del mantenimiento biomédico bajo escenarios con y sin estandarización, incorporando variables como tiempos de espera, disponibilidad de técnicos y cantidad de equipos atendidos. A través de esta simulación se evaluó el impacto de la propuesta sobre la eficiencia operativa, la productividad del servicio técnico y la reducción del tiempo de inactividad de los equipos, proporcionando evidencia cuantitativa para la toma de decisiones en la gestión hospitalaria.

La integración de estas herramientas digitales permitió articular el análisis computacional, la estandarización técnica y la evaluación operativa del mantenimiento biomédico, consolidando una propuesta orientada a mejorar la trazabilidad, eficiencia y calidad de los servicios técnicos en el entorno hospitalario.

3.5 Procedimiento de la Investigación

El procedimiento de esta investigación se estructuró en varias etapas secuenciales que permitieron abordar el problema planteado de manera sistemática. A continuación, se describen los pasos desarrollados:

Planteamiento del problema

Se identificó la falta de estandarización en los reportes técnicos de mantenimiento biomédico como una debilidad recurrente en el entorno hospitalario. Esta problemática fue delimitada específicamente al Instituto Oncológico Nacional de Panamá, justificando su abordaje desde una perspectiva aplicada orientada a la mejora operativa.

Revisión de literatura

Se llevó a cabo una revisión teórica exhaustiva sobre la estandarización de procesos, los árboles de decisión, los algoritmos de clasificación, como *K-means*, y la gestión documental aplicada a la ingeniería biomédica. En base a ello, se analizaron 11 tesis y trabajos académicos de pregrado, licenciatura, especialización y maestría, de alcance nacional e internacional, correspondientes a los estudios desarrollados por Arismendi Espinosa (2004), Basave Torres (2005), Costilla Díaz (2023), Dupouy Berríos (2014), Díaz Lorenzo (2018), Galeano López (2023), Gallo Poma (2013), Huallpa Condori (2020), Sanga Títalo (2021), Tafurt López (2012) y Aldas Santiago (s.f.), los cuales aportaron antecedentes metodológicos relevantes en planificación, estandarización y gestión del mantenimiento biomédico.

En complemento a lo anterior, se revisaron 14 artículos científicos publicados en revistas especializadas, entre ellas *Biomedical Engineering Online*, *Journal of Clinical Engineering*, *Frontiers in Public Health*, *IEEE Transactions* y la *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*. Estas publicaciones sustentan el uso de técnicas de minería de datos, árboles de decisión y algoritmos de agrupamiento aplicados a la optimización del mantenimiento y a la gestión de tecnologías en salud.

En paralelo, se consultaron 32 libros académicos, junto con manuales técnicos, normas y guías especializadas, publicados por editoriales como Springer, McGraw-Hill, Wiley, Pearson, Alfaomega e Industrial Press, además de estándares internacionales ISO y documentos emitidos por la OMS y la OPS.

Tipo y diseño de investigación

Se definió la investigación como aplicada, cualitativa, descriptiva y de diseño no experimental, con enfoque transversal y de campo, bajo la modalidad de estudio de caso. Esta definición metodológica se basó en la naturaleza interpretativa del análisis documental y en la finalidad de construir una herramienta técnica concreta sin manipular variables.

Selección de la muestra

La muestra seleccionada para este estudio corresponde a un grupo de 5 profesionales del área de ingeniería biomédica pertenecientes al DIB del ION, quienes se desempeñan directamente en actividades relacionadas con el mantenimiento técnico y gestión de equipos médicos. La selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, fundamentado en la accesibilidad, disposición y experiencia de los participantes, así como en la pertinencia de sus funciones respecto al objeto de estudio.

Recolección de datos

Se diseñó un instrumento tipo encuesta estructurada con 10 preguntas en escala Likert, previamente validada por 3 expertos. Su propósito es recoger información sobre el nivel de estandarización de los protocolos actuales y la percepción profesional sobre la propuesta.

Análisis de datos

Los datos provenientes de los resultados del instrumento tipo encuesta se analizarán bajo un enfoque descriptivo, ya que su objetivo es diagnosticar mediante

valoraciones expertas, el nivel de estandarización documental actual y la pertinencia técnica de la propuesta. Para ello, se utilizarán tablas de distribución de frecuencias y porcentajes que reflejen la tendencia general de las respuestas obtenidas en la escala tipo Likert. Este análisis permitirá observar de forma directa la opinión de los encuestados respecto a la existencia de protocolos internos, la claridad operativa de la propuesta, y su aplicabilidad dentro del entorno técnico hospitalario, sin recurrir a técnicas de inferencia estadística ni a interpretaciones subjetivas.

Diseño de la propuesta

La presente investigación tiene como objetivo la estandarización de los servicios técnicos de mantenimiento biomédico, mediante la integración del algoritmo de agrupamiento K-means y un árbol de decisiones. Su diseño metodológico se estructura en cinco fases: análisis documental de manuales técnicos, estandarización de actividades a través de K-means, clasificación jerárquica mediante árbol de decisiones, desarrollo de una interfaz de usuario y verificar la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena. El desarrollo completo del algoritmo y la demostración de su optimización serán abordados con mayor profundidad en el capítulo cinco.

Redacción del informe

Como última etapa, se desarrolla el informe de tesis, documentando todas las fases del proceso investigativo, desde la identificación del problema hasta la simulación de la propuesta. Se incluyen los análisis interpretativos, justificaciones teóricas y consideraciones prácticas derivadas del estudio.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Introducción al Capítulo IV

Tal como señalan Hernández, Fernández y Baptista (2014), el análisis e interpretación de los resultados constituye una etapa esencial en la investigación, ya que permite organizar y describir de manera sistemática la información recopilada, vinculando los hallazgos con los objetivos planteados. El presente capítulo tiene como propósito analizar los resultados obtenidos a través de la aplicación del instrumento de recolección de datos tipo encuesta al Departamento de Biomédica (DIB) del Instituto Oncológico Nacional (ION), con el fin de dar respuesta al segundo objetivo específico de diagnóstico de la investigación: *“Establecer el estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico”*. De acuerdo con Sampieri, Collado y Lucio (2014), el análisis descriptivo busca resumir la información en indicadores numéricos y gráficos que permitan identificar tendencias y patrones sin recurrir a técnicas inferenciales que trasciendan el tamaño de la muestra. En este sentido, se emplea la estadística descriptiva para resumir la información recolectada en la gestión actual del mantenimiento biomédico.

Tamayo y Tamayo (2009) destacan que el análisis de resultados no se limita a la simple exposición de datos, sino que debe garantizar claridad, coherencia y pertinencia frente a la problemática estudiada. Por ello, en este capítulo los resultados se presentan en dos momentos: primero, se analiza de manera objetiva la información recolectada, mostrando porcentajes y gráficos que reflejan las respuestas obtenidas, sin emitir interpretaciones en profundidad; y posteriormente, se reflexiona sobre los patrones identificados y las posibles discrepancias, respondiendo a las preguntas *¿Qué significan los resultados?* y *¿Cómo se relacionan con los objetivos de la investigación?* Según Flick (2015), el análisis de resultados debe atender tanto a la consistencia metodológica como a la utilidad práctica de los hallazgos, de modo que este capítulo no solo describa el estado actual de la gestión del mantenimiento biomédico en el Instituto Oncológico Nacional, sino que también sienta las bases para el diseño de la propuesta de estandarización que será desarrollada en el Capítulo 5.

4.2 Métodos de Análisis

El tratamiento de los datos obtenidos mediante la encuesta aplicada al DIB del ION se realizó con un enfoque cuantitativo, utilizando estadística descriptiva como técnica principal de análisis. De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la estadística descriptiva permite organizar, resumir y presentar los datos de manera clara para identificar tendencias y patrones, sin pretender inferir resultados a poblaciones más amplias.

El instrumento consistió en diez ítems estructurados bajo una escala Likert de 5 niveles (1 = Nunca, 2 = No realmente, 3 = Regularmente, 4 = Casi siempre, 5 = Siempre), donde 1 representó la valoración más baja (*totalmente en desacuerdo o nunca*) y 5 la más alta (*totalmente de acuerdo o siempre*).

Para el análisis, las respuestas textuales fueron transformadas a valores numéricos (1–5), lo que permitió calcular medidas de tendencia central (media) y dispersión (desviación estándar) por cada pregunta. Una vez codificadas, se aplicaron los procedimientos estadísticos propios del análisis descriptivo, tal como sugieren Hernández, Fernández y Baptista (2014), quienes destacan que este tipo de técnicas permiten resumir e interpretar la información obtenida en estudios con muestras pequeñas o exploratorias. En primer lugar, se calculó la frecuencia absoluta (f), que corresponde al número de veces que se repitió cada categoría de respuesta en cada pregunta. Posteriormente, se obtuvo el porcentaje (%), entendido como la proporción de respuestas en cada categoría, mediante la fórmula:

$$\text{Porcentaje} = \frac{f}{N} \times 100$$

donde N corresponde al total de encuestados ($n = 5$).

Adicionalmente, se aplicaron medidas de tendencia central recomendadas en estudios descriptivos (Rodríguez Gómez, Gil Flores y García Jiménez, 1996), entre las que destacan: la media aritmética ($\bar{x}$), calculada como:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i \cdot f_i}{\sum f_i}$$

donde x_i = valor de la respuesta (por ejemplo: 1, 2, 3, 4, 5) y, f_i = frecuencia de esa respuesta. La media es el promedio ponderado de los valores de respuesta según su frecuencia.

También, se calculó la desviación estándar (s), indicador de dispersión que señala cuánto se alejan las respuestas de la media, siguiendo lo propuesto por Levin y Rubin (2010) en el campo de la estadística aplicada. Su expresión matemática es:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

representa cada valor observado, $\bar{x}$ es la media aritmética de las observaciones y n es el número total de datos. El término $n - 1$ corresponde a los grados de libertad, que en estadística representan la cantidad de valores independientes que pueden variar en un cálculo sin que se altere el resultado de una restricción. En el caso de la desviación estándar muestral, se resta 1 al número total de observaciones para corregir el sesgo que se produciría si se utilizara directamente n , garantizando así una estimación más precisa de la variabilidad real de la población a partir de una muestra. (Montgomery & Runger, 2018).

Estos cálculos se realizaron para cada una de las diez preguntas de la encuesta. Los resultados se organizaron en tablas de distribución de frecuencias y porcentajes de las Tablas 3 a 12 y en un resumen estadístico en la Tabla 13, donde se incluyen las medidas de tendencia central y de dispersión.

4.3 Análisis de Resultados

El análisis de resultados corresponde a la presentación objetiva de los datos obtenidos en la encuesta aplicada al DIB del ION. Los hallazgos se muestran tal como fueron recopilados y procesados, empleando tablas y gráficos de distribución de frecuencias y porcentajes para cada ítem de la escala tipo Likert, sin emitir interpretaciones en profundidad. De esta manera, se responde a las preguntas básicas del análisis descriptivo: *¿Qué se encontró?* y *¿Qué muestran los datos crudos?*

Pregunta 1. *¿Considera que la estandarización puede ayudar a reducir la ambigüedad en las actividades técnicas de mantenimiento? (Ver Figura 7).*

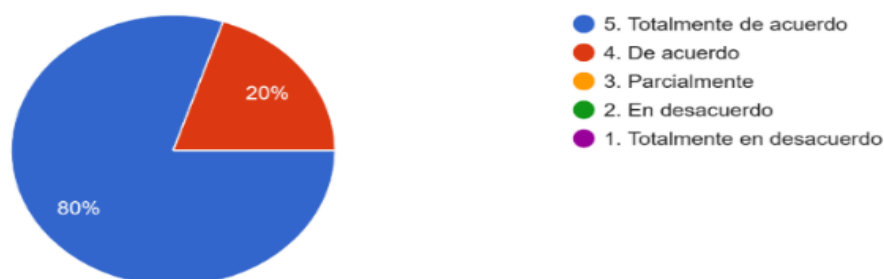
Tabla 3. Distribución de respuestas - Pregunta 1

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
5. Totalmente de acuerdo	4	80 %
4. De acuerdo	1	20 %

Figura 7. Resultados de la encuesta - Pregunta 1.

Pregunta 1 ¿Considera que la estandarización puede ayudar a reducir la ambigüedad en las actividades técnicas de mantenimiento?

5 responses



Nota. El 80 % de los encuestados seleccionó “Totalmente de acuerdo”, mientras que el 20% se ubicó en “De acuerdo”. Ningún participante se mostró en desacuerdo ni neutral. Esto refleja un apoyo generalizado hacia la utilidad de la estandarización.

Pregunta 2. *¿Ha observado variabilidad importante en los tiempos de respuesta actualmente en los reportes técnicos? (Ver Figura 8).*

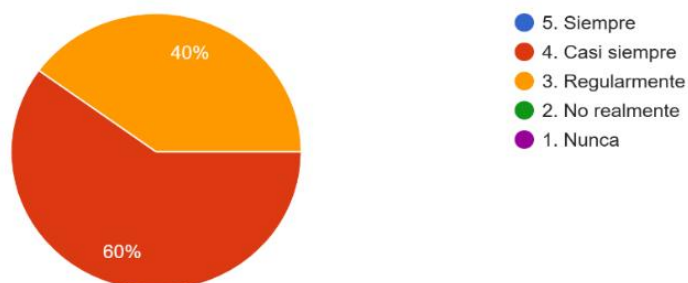
Tabla 4. Distribución de respuestas - Pregunta 2

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
4. Casi siempre	3	60 %
3. Regularmente	2	40 %

Figura 8. Resultados de la encuesta - Pregunta 2.

Pregunta 2 ¿Ha observado variabilidad importante en los tiempos de respuesta actualmente en los reportes técnicos?

5 responses



Nota. El 60 % de los encuestados indicó “Casi siempre”, mientras que el 40 % respondió “Regularmente”. No hubo respuestas en los extremos de la escala. Esto indica que la variabilidad en los tiempos de respuesta es percibida como frecuente.

Pregunta 3. *¿Su institución posee actualmente protocolos internos estandarizados de mantenimiento para cada equipo, independientemente de los que entrega el proveedor? (Ver Fig. 9).*

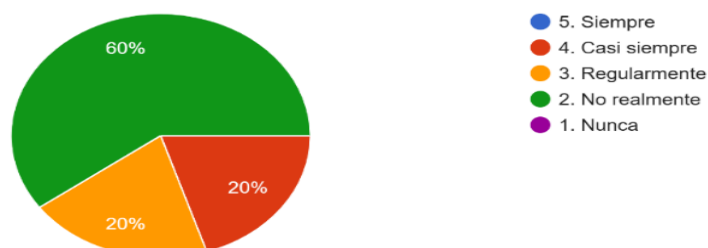
Tabla 5. Distribución de respuestas - Pregunta 3

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
4. Casi siempre	1	20 %
3. Regularmente	1	20 %
2. No realmente	3	60 %

Figura 9. Resultados de la encuesta - Pregunta 3.

Pregunta 3 ¿Su institución posee actualmente protocolos internos estandarizados de mantenimiento para cada equipo, independientemente de los que entrega el proveedor?

5 responses



Nota. El 60 % respondió “No realmente”, el 20 % “Regularmente” y el 20 % “Casi siempre”. Lo que sugiere que la mayoría no percibe la existencia de protocolos internos.

Pregunta 4. ¿Las actividades que se redactan en los reportes de mantenimiento coinciden siempre con lo establecido en los manuales técnicos? (Ver Figura 10).

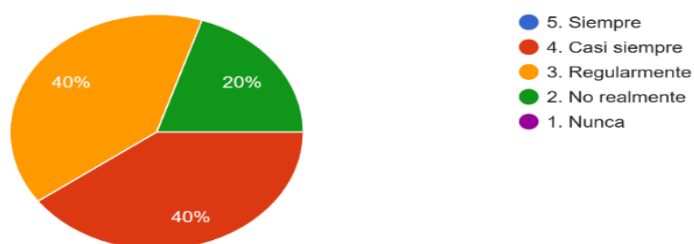
Tabla 6. Distribución de respuestas - Pregunta 4

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
4. Casi siempre	2	40 %
3. Regularmente	2	40 %
2. No realmente	1	20 %

Figura 10. Resultados de la encuesta - Pregunta 4.

Pregunta 4 En su experiencia, ¿las actividades que se redactan como realizadas en los reportes durante los mantenimientos coinciden siempre con lo establecido en los manuales técnicos?

5 responses



Nota. El 40 % indicó “Regularmente”, otro 40 % “Casi siempre” y el 20 % restante “No realmente”. Los datos reflejan que no existe una coincidencia plena entre lo reportado y lo indicado en los manuales técnicos.

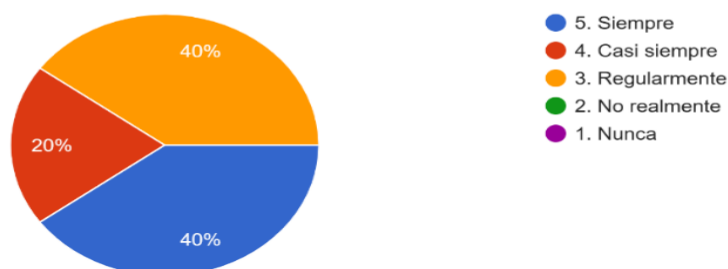
Pregunta 5. ¿La redacción en los reportes técnicos varía ampliamente entre técnicos y equipos? (Ver Figura 11).

Tabla 7. Distribución de respuestas - Pregunta 5

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
5. Siempre	2	40%
4. Casi siempre	1	20%
3. Regularmente	2	40%

Figura 11. Resultados de la encuesta – Pregunta 5.

Pregunta 5 ¿La redacción en los reportes técnicos varía ampliamente entre técnicos y equipos?
5 responses



Nota. El 40 % respondió “Siempre”, mientras que el 60 % seleccionó “Regularmente”. Esto muestra que la variabilidad en la documentación es una constante reconocida por los encuestados.

Pregunta 6. *¿Ha observado errores en las decisiones técnicas que lleven a retrabajos en el departamento biomédico? (Ver Figura 12).*

Tabla 8. Distribución de respuestas - Pregunta 6

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
3. Regularmente	3	60 %
2. No realmente	2	40 %

Figura 12. Resultados de la encuesta - Pregunta 6.

Pregunta 6 ¿Ha observado errores en las decisiones técnicas que lleven a retrabajos en el departamento biomédico?

5 responses



Nota. El 60 % de los encuestados indicó “Regularmente”, mientras que el 40 % seleccionó “No realmente”. Esto demuestra que los retrabajos son un fenómeno presente.

Pregunta 7. *¿Existe una escala de prioridad en la realización de los mantenimientos de acuerdo con criterios de criticidad de los equipos? (Ver Figura 13).*

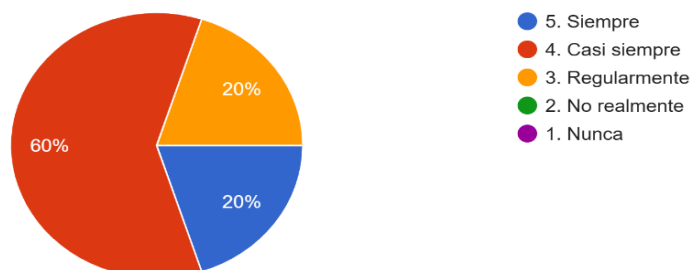
Tabla 9. Distribución de respuestas - Pregunta 7

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
4. Casi siempre	3	60%
3. Regularmente	1	20%
5. Siempre	1	20%

Figura 13. Resultados de la encuesta - Pregunta 7.

Pregunta 7 ¿Existe una escala de prioridad en la realización de los mantenimientos de acuerdo con criterios de criticidad de los equipos?

5 responses



Nota. El 60 % respondió “Casi siempre” y el 40 % “Siempre”. Esto refleja un consenso mayoritario en la existencia de un criterio aplicado a los mantenimientos.

Pregunta 8. ¿Se hace seguimiento continuo de la eficiencia de los procesos de mantenimiento para optimizarlos? (Ver Fig. 14).

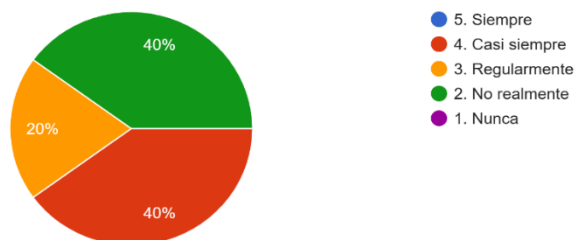
Tabla 10. Distribución de respuestas - Pregunta 8

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
4. Casi siempre	1	20%
3. Regularmente	2	40%
2. No realmente	2	40%

Figura 14. Resultados de la encuesta - Pregunta 8.

Pregunta 8 ¿Se hace seguimiento continuo de la eficiencia de los procesos de mantenimiento para optimizarlos?

5 responses



Nota. El 40 % señaló “No realmente”, el 40 % “Regularmente” y el 20 % “Casi siempre”. Esto evidencia que el seguimiento a la eficiencia es percibido como insuficiente.

Pregunta 9. ¿Se mide la productividad por técnico encargado del mantenimiento y del departamento? (Ver Figura 15).

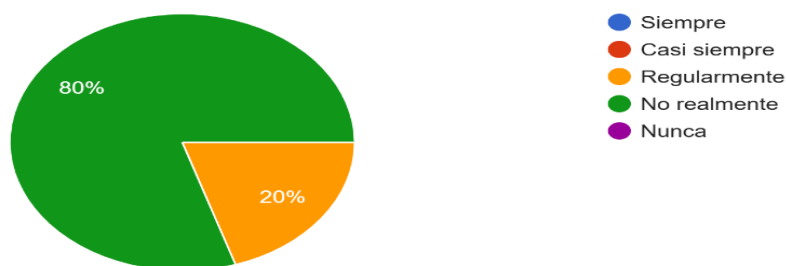
Tabla 11. Distribución de respuestas - Pregunta 9

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
3. Regularmente	1	20 %
2. No realmente	4	80 %

Figura 15. Resultados de la encuesta - Pregunta 9.

Pregunta 9 ¿Se mide la productividad por técnico encargado del mantenimiento y del departamento?

5 responses



Nota. El 80 % de los encuestados respondió “No realmente”, lo que indica que no se realizan mediciones formales de productividad sobre mantenimiento.

Pregunta 10. *¿Se hace seguimiento a los tiempos de espera o retardos de solución en los mantenimientos? (Ver Figura 16).*

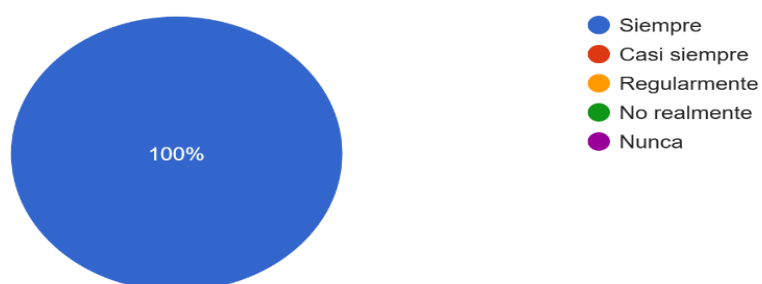
Tabla 12. *Distribución de respuestas - Pregunta 10*

Respuesta	Frecuencia	Porcentaje
5. Siempre	5	100 %

Figura 16. *Representación gráfica de resultados a pregunta 10.*

Pregunta 10 ¿Se hace seguimiento a los tiempos de espera o retardos de solución en los mantenimientos?

5 responses



Nota. El **100 %** de los encuestados respondió “*Siempre*”. Esto evidencia que el control de tiempos de espera es una práctica consolidada en el departamento.

Tabla 13. Resumen estadístico de la encuesta

Pregunta	Media	Desviación estándar
P1. Estandarización reduce ambigüedad	4.8	0.45
P2. Variabilidad en tiempos de respuesta	3.6	0.49
P3. Protocolos internos estandarizados	2.6	0.89
P4. Coincidencia con manuales técnicos	3.2	0.75
P5. Variación en redacción de reportes	4.0	1.00
P6. Retrabajos en decisiones técnicas	2.6	0.55
P7. Escala de prioridad por criticidad	4.0	0.63
P8. Seguimiento a la eficiencia	2.8	0.75
P9. Medición de productividad	2.2	0.40
P10. Seguimiento a tiempos de espera	5.0	0.00

La Tabla 13 presenta un resumen estadístico de las respuestas obtenidas en la encuesta, expresadas en términos de media, mediana, moda y desviación estándar sobre la escala Likert de 1 a 5. En esta escala, los valores cercanos a 5 reflejan un fuerte nivel de acuerdo con la afirmación planteada, mientras que los valores ubicados entre 1 y 2 representan desacuerdo o ausencia de la práctica evaluada.

Por otro lado, la desviación estándar permite observar el grado de consenso entre los encuestados: valores bajos, entre 0.00 y 0.55, indican homogeneidad en las

percepciones, mientras que valores superiores a 0.70 evidencian mayor variabilidad en las opiniones del grupo. Los resultados muestran un consenso casi absoluto en torno a la utilidad de la estandarización y al seguimiento de los tiempos de espera (Preguntas 1 y 10, con medias de 4.8 y 5.0 respectivamente, y desviaciones estándar mínimas), lo que refleja percepciones homogéneas entre los encuestados.

En contraste, se evidencian debilidades en la existencia de protocolos internos y en el seguimiento a la eficiencia de los procesos (Preguntas 3 y 8, con medias de 2.6 y 2.8), además de una ausencia de mediciones formales de productividad (Pregunta 9, media de 2.2). Se identificó dispersión en algunos ítems, como en la Pregunta 5 sobre la variación en la redacción de reportes, que alcanzó la desviación estándar más alta (1.00), lo que refleja percepciones diversas al respecto.

4.4 Discusión de Hallazgos

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada al DIB del ION permiten analizar la situación actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico y vincularla con los objetivos de investigación y la literatura revisada.

En primer lugar, los altos niveles de acuerdo observados en torno a la utilidad de la estandarización y al seguimiento de los tiempos de espera en los mantenimientos (media de 4.8 y 5.0 en las Preguntas 1 y 10, respectivamente) reflejan que el personal reconoce la importancia de contar con procesos unificados que garanticen trazabilidad y control. Estos resultados son consistentes con lo señalado por la Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica (2019), que identifica la estandarización como un elemento clave para reducir inconsistencias en los reportes técnicos y mejorar la calidad de los servicios, tal como se discutió en el marco teórico del capítulo 2 de este estudio.

Sin embargo, se evidencian debilidades importantes en la existencia de protocolos internos estandarizados (media de 2.6 en la Pregunta 3) y en la medición de productividad (media de 2.2 en la Pregunta 9). Esto confirma lo planteado en el

problema de investigación, donde se destacó que los cronogramas de mantenimiento del ION solo indican la periodicidad y el tipo de mantenimiento (preventivo o correctivo), sin detallar las actividades realizadas. Tal situación coincide con los hallazgos de Murillo y Mancera (2013) en hospitales de segundo nivel de Colombia, donde la falta de uniformidad en la documentación limitaba la capacidad de planificación y análisis estratégico.

Otro aspecto relevante es la variabilidad en la percepción de algunos ítems, como la Pregunta 5 sobre la redacción de reportes (desviación estándar = 1.00). Esto sugiere que, aunque existe consenso sobre la necesidad de estandarizar, la práctica actual presenta diferencias significativas entre técnicos, lo cual afecta la uniformidad de los registros. Esta problemática ha sido documentada por Rubio et al. (2016), quienes identificaron que gran parte de los incidentes en equipos electromédicos en Latinoamérica estaban relacionados con reportes incompletos o inconsistentes.

La identificación de patrones y la agrupación de actividades similares, como sugieren Díaz Lorenzo (2018) y Bouza y Santiago (2014), se alinean directamente con las debilidades encontradas en el ION, particularmente en lo referente a la ausencia de criterios homogéneos de priorización y a la dificultad de comparar reportes entre técnicos. De este modo, la implementación de estas herramientas no solo responde a los resultados de la encuesta, sino que también aporta una solución innovadora respaldada por experiencias internacionales.

Las implicaciones prácticas de estos resultados son claras: la falta de protocolos internos limita la capacidad de garantizar calidad y seguridad en los mantenimientos, mientras que la ausencia de mediciones de productividad impide evaluar objetivamente el desempeño del departamento.

4.5 Limitaciones del Estudio

El análisis de los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada al personal biomédico del ION presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al momento de interpretar los hallazgos. En primer lugar, el tamaño de la muestra es

reducido, ya que se limita únicamente a cinco participantes del departamento biomédico, lo cual restringe la posibilidad de generalizar los resultados a otras instituciones de salud o a contextos hospitalarios distintos.

Además, al tratarse de un instrumento de autorreporte, las respuestas están sujetas a la subjetividad de cada encuestado, lo que implica la posibilidad de sesgos asociados a la percepción individual o a la deseabilidad social, en los que el participante puede tender a dar respuestas socialmente aceptadas más que reflejar su experiencia real. A esto se suma la ausencia de datos longitudinales, ya que los resultados reflejan únicamente una fotografía en un momento determinado, sin capturar las posibles variaciones que podrían ocurrir a lo largo del tiempo en la gestión del mantenimiento biomédico.

4.6 Conclusiones Parciales del Instrumento

El análisis de resultados permitió dar cumplimiento al segundo objetivo específico de la investigación, orientado a establecer el estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico en el ION.

Los resultados del análisis evidencian que la gestión de mantenimiento biomédico en el ION presenta un desempeño intermedio, con fortalezas en la ejecución de tareas operativas, pero con deficiencias en la documentación y seguimiento de los procesos ya que, aunque existe reconocimiento de la necesidad de estandarizar los procesos de mantenimiento, actualmente predomina la variabilidad en la documentación y la dependencia de protocolos externos.

En términos prácticos, los resultados sugieren que el ION requiere fortalecer los mecanismos de registro, control y estandarización, ofreciendo un diagnóstico claro de la situación actual y confirmando la necesidad de un modelo que fortalezca la trazabilidad y reduzca la variabilidad en los procesos, sentando las bases para el diseño de la propuesta que se desarrollará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

DISEÑO DE LA PROPUESTA

5.1 Introducción de la Propuesta

A partir de los hallazgos obtenidos en el capítulo 4, se evidenció la necesidad de contar con un modelo metodológico que permita superar la ausencia de estandarización en la gestión documental de los procesos de mantenimiento biomédico en el ION. Este apartado responde al tercer objetivo específico de la investigación: *“Diseñar un algoritmo de estandarización basado en árbol de decisiones y K-means”*.

El desarrollo del presente capítulo presenta, en primer lugar, la justificación de la propuesta, donde se exponen las razones que respaldan su pertinencia y conveniencia frente a otras alternativas posibles; en segundo lugar, se formulan los objetivos de la propuesta, tanto general como específicos, orientados hacia resultados concretos; posteriormente, se establecen las metas a alcanzar y los beneficios esperados; También, se incluye el cronograma de actividades y, por último, se desarrolla el diseño de la propuesta, en el cual se detallan las etapas, algoritmos y procesos técnicos aplicados, así como la verificación de la optimización a través de la simulación. Se busca no solo plantear una solución metodológica integral al problema identificado, sino también demostrar por qué las herramientas seleccionadas constituyen la vía más adecuada para garantizar la calidad, seguridad y eficiencia en la gestión de los servicios técnicos de mantenimiento biomédico del ION.

5.2 Justificación de la Propuesta

La propuesta se justifica en función de la necesidad de superar la falta de estandarización en la gestión documental de los procesos de mantenimiento biomédico en el ION. Actualmente, la variabilidad de reportes entre técnicos y la dependencia de protocolos externos generan dificultades en la trazabilidad y en la evaluación de la efectividad de las intervenciones. Ante esta problemática, se plantea un modelo metodológico sustentado en técnicas de minería de datos, específicamente K-means y árboles de decisión, cuya pertinencia radica en su capacidad para organizar, clasificar y estructurar información heterogénea de manera objetiva y replicable, tal como lo señalan estudios sobre el uso de algoritmos de agrupamiento y modelos de clasificación para el análisis eficiente

de grandes volúmenes de datos y el apoyo a la toma de decisiones (Zhu et al., 2024; Kozak, 2019).

El algoritmo K-means se fundamenta en el aprendizaje no supervisado y es ampliamente reconocido por su eficiencia en la agrupación de datos con características similares, aun cuando presentan variaciones en su forma de presentación. Según Mitchell (1997), los métodos de aprendizaje automático como K-means permiten descubrir patrones latentes en los datos sin requerir etiquetas previas, lo que resulta especialmente útil en contextos donde las actividades de mantenimiento se describen de forma distinta en manuales técnicos y reportes de campo. De esta manera, K-means facilita la unificación de criterios al agrupar actividades equivalentes, constituyendo un paso fundamental para la estandarización.

Por su parte, los árboles de decisión representan una de las herramientas más utilizadas en la clasificación supervisada de datos, debido a su capacidad para estructurar la información de forma jerárquica y comprensible. Han y Kamber (2006) destacan que los árboles de decisión permiten establecer relaciones de dependencia entre variables y generar reglas de decisión claras, lo que en este caso posibilita jerarquizar las actividades de mantenimiento a partir de su criticidad, frecuencia o impacto en la operación hospitalaria. Este enfoque resulta particularmente valioso en la gestión biomédica, donde la correcta priorización de tareas asegura la continuidad operativa de los equipos y la seguridad de los pacientes.

En esta línea, Groover (2001) señala que la automatización de procesos y la integración de herramientas computacionales en la gestión técnica son esenciales para mejorar la eficiencia, reducir errores humanos y garantizar resultados reproducibles. En este sentido, la propuesta metodológica no se limita a digitalizar la documentación, sino que introduce un enfoque innovador que vincula minería de datos y simulación para transformar la información dispersa en conocimiento útil para la toma de decisiones.

En comparación con otras posibles soluciones, como la adopción de protocolos estandarizados de proveedores externos o la digitalización simple de reportes, la propuesta ofrece ventajas significativas: independencia institucional,

adaptabilidad a la realidad del ION, escalabilidad a otras instituciones hospitalarias del país y una base metodológica sólida que combina técnicas probadas en la literatura científica y en la práctica de la ingeniería biomédica. De esta manera, se configura como la alternativa más apropiada y sostenible para resolver el problema identificado en la investigación.

5.3 Objetivos de la Propuesta

Es importante señalar que los objetivos planteados en este capítulo no corresponden a los objetivos generales de la investigación, sino que están específicamente orientados al diseño de la propuesta metodológica desarrollada a partir de los hallazgos obtenidos en el capítulo 4. En este sentido, los objetivos de la propuesta se enfocan en las acciones necesarias para estructurar, diseñar y verificar que el modelo de estandarización de los procesos de mantenimiento biomédico sea optimizado para posteriormente implementar en el ION.

Objetivo General

Diseñar un modelo metodológico utilizando herramientas como K-means y árbol de decisiones, que permita estandarizar la documentación de los procesos de mantenimiento técnico biomédico en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá, con el fin de optimizar la trazabilidad de las intervenciones y garantizar la calidad y seguridad de los servicios ofrecidos.

Objetivos Específicos

1. Analizar los manuales técnicos de equipos biomédicos para identificar y organizar la información relevante sobre mantenimiento preventivo y correctivo que servirán como base del modelo.
2. Segmentar la información de los datos recopilados mediante la aplicación del algoritmo K-means, agrupando aquellas con similitudes semánticas y operativas.
3. Clasificar jerárquicamente las actividades previamente agrupadas mediante la construcción de un árbol de decisiones, estableciendo criterios como: tipo de mantenimiento, frecuencia y módulo del

componente afectado para la generación de un *checklist* estandarizado de mantenimiento.

4. Desarrollar una interfaz de usuario que permita generar automáticamente *checklist* estandarizados de mantenimiento, integrando los resultados obtenidos con K-means y el árbol de decisiones previamente programados.
5. Verificar la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena.

5.4 Metas a Alcanzar

Las metas de la propuesta se definen en correspondencia directa con los objetivos específicos, de modo que cada acción planteada se traduzca en un producto concreto y verificable. La tabla 13 evidencia cómo cada objetivo específico se traduce en un resultado verificable que aporta directamente al cumplimiento del objetivo general de la propuesta. En términos generales, las metas abarcan desde la construcción de una base documental inicial, pasando por el procesamiento y estandarización de actividades con técnicas de minería de datos, hasta llegar a la jerarquización y demostración de una mejora con de la presente propuesta mediante simulación.

5.5 Beneficios de la Propuesta

Los beneficios de la propuesta se expresan en cuatro dimensiones fundamentales: operativa, económica, social y académica, lo cual garantiza no solo la solución del problema identificado, sino también la creación de un marco sostenible y replicable que fortalezca la gestión biomédica en el contexto nacional.

En el ámbito operativo, el desarrollo del modelo permitirá mejorar la trazabilidad documental del mantenimiento mediante la estandarización de la documentación técnica. Este beneficio es coherente con lo señalado por la Universidad Autónoma de Occidente (s.f.), al destacar que la ausencia de procedimientos estandarizados limita la capacidad de seguimiento y control de las intervenciones técnicas, generando riesgos en la operatividad de los equipos biomédicos. Con la propuesta, se asegura una mayor consistencia y claridad en el registro de

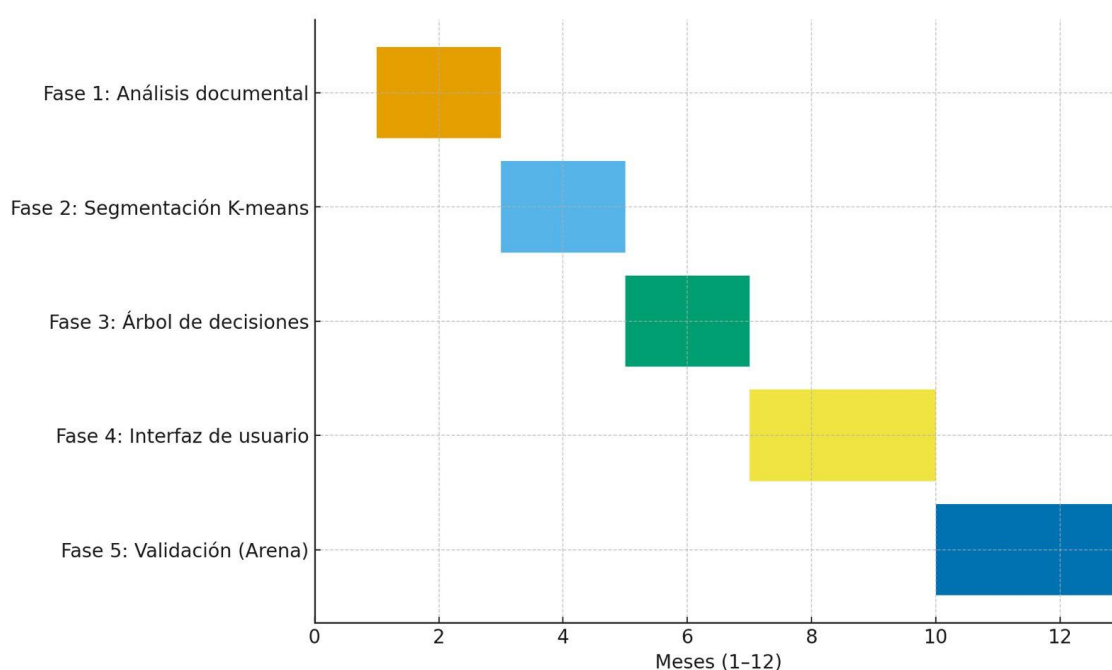
actividades, lo que impacta directamente en la eficiencia de la gestión hospitalaria.

Desde la perspectiva económica, la clasificación y jerarquización de las actividades de mantenimiento contribuye a la optimización de los recursos disponibles, reduciendo costos por duplicidad de tareas o por fallas no detectadas. Groover (2001) enfatiza que la integración de herramientas automatizadas en los procesos técnicos no solo disminuye la incidencia de errores humanos, sino que también promueve un uso más racional de los recursos, lo cual es particularmente relevante en instituciones de salud con limitaciones presupuestarias.

5.6 Cronograma de las Actividades

El diagrama de Gantt presentado en la *Figura 17. Cronograma de las actividades* resume la planificación temporal empleada para el desarrollo integral de la propuesta metodológica. Cada fase cuenta con un producto concreto, un tiempo estimado y los recursos necesarios para su ejecución. El cronograma se estructura en un periodo total de doce meses e integra las cinco fases principales del estudio, distribuidas de manera secuencial y estratégica para asegurar coherencia entre cada etapa y garantizar la obtención de resultados válidos y funcionales y la viabilidad de la propuesta para el ION.

Figura 17. Cronograma de las Actividades de la Investigación



La Fase 1: Análisis documental se desarrolla durante los dos primeros meses, periodo en el que se recopilan, organizan y comparan los manuales técnicos de los equipos biomédicos seleccionados. Esta etapa constituye la base informativa para todas las fases posteriores, ya que permite identificar y unificar las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo.

Posteriormente, entre los meses 3 y 4, se ejecuta la Fase 2: Segmentación mediante K-means, donde se preprocesan los datos obtenidos y se aplica el algoritmo para agrupar actividades similares. Esta segmentación facilita la reducción de redundancias y la organización de los procedimientos a partir de patrones de similitud, incluso cuando las actividades presentan variaciones en la redacción original.

Durante los meses 5 y 6, se desarrolla la Fase 3: Clasificación mediante árbol de decisiones, cuyo objetivo es estructurar jerárquicamente las actividades obtenidas en la fase anterior. En esta etapa se clasifican según el módulo del equipo y el tipo de mantenimiento, permitiendo generar una lógica de decisión que más adelante será integrada en la interfaz de usuario.

La Fase 4: Construcción de la interfaz de usuario, programada entre los meses 7 y 9, consiste en el desarrollo de la herramienta digital que automatiza la generación de *checklist* estandarizados. En esta etapa se implementa la programación en Python, se integra el modelo K-means y el árbol de decisiones, y se diseña la experiencia de usuario para facilitar su aplicación en entornos hospitalarios.

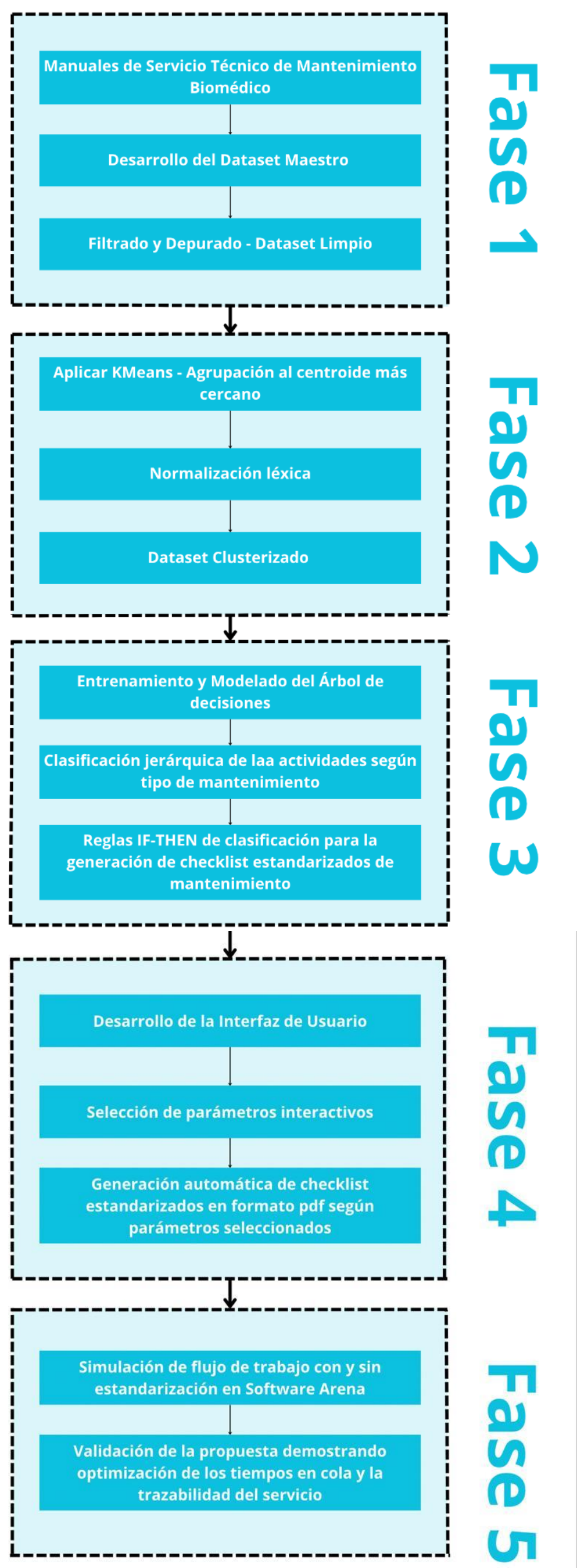
Entre los meses 10 y 12, se lleva a cabo la Fase 5: Verificación de la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena, donde se comparan dos escenarios: uno con los procesos actuales sin estandarización y otro aplicando la propuesta desarrollada. Esta etapa permite evaluar el impacto de la estandarización en términos de número de equipos atendidos, la mejora en la trazabilidad de los registros mediante un sistema digital y automatizado demostrando una mejora comparando tiempos en cola.

5.7 Diseño de la Propuesta

La propuesta se estructura en cinco etapas fundamentales: el análisis documental de los manuales técnicos, que permite recopilar y organizar las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos; la segmentación de los datos mediante el uso del algoritmo K-means, seleccionado por su capacidad de agrupar elementos similares incluso cuando presentan variaciones en su redacción; la clasificación jerárquica a través de un árbol de decisiones, que organiza las actividades según módulo del componente afectado y tipo de mantenimiento; el desarrollo de una interfaz de usuario, destinada a generar automáticamente *checklist* estandarizados a partir de los resultados obtenidos con K-means y el árbol de decisiones, facilitando así su aplicación práctica en entornos hospitalarios; y finalmente, la simulación del modelo con el software Arena, lo que garantiza que la propuesta sea factible en la práctica hospitalaria. En la *Figura 18 “Estructura general de la propuesta”*, se muestra el proceso estructurado con las 5 etapas descritas, que posteriormente serán detalladas a lo largo de este capítulo.

El uso de estas herramientas no es arbitrario, sino que responde a la necesidad de emplear métodos capaces de manejar datos heterogéneos y transformarlos en información organizada, objetiva, jerárquicamente estructurada y aplicable de forma sencilla, fortaleciendo la trazabilidad documental de mantenimiento y la independencia frente a protocolos externos.

Figura 18. Estructura general de la propuesta



Fase 1. Análisis documental y construcción del dataset maestro

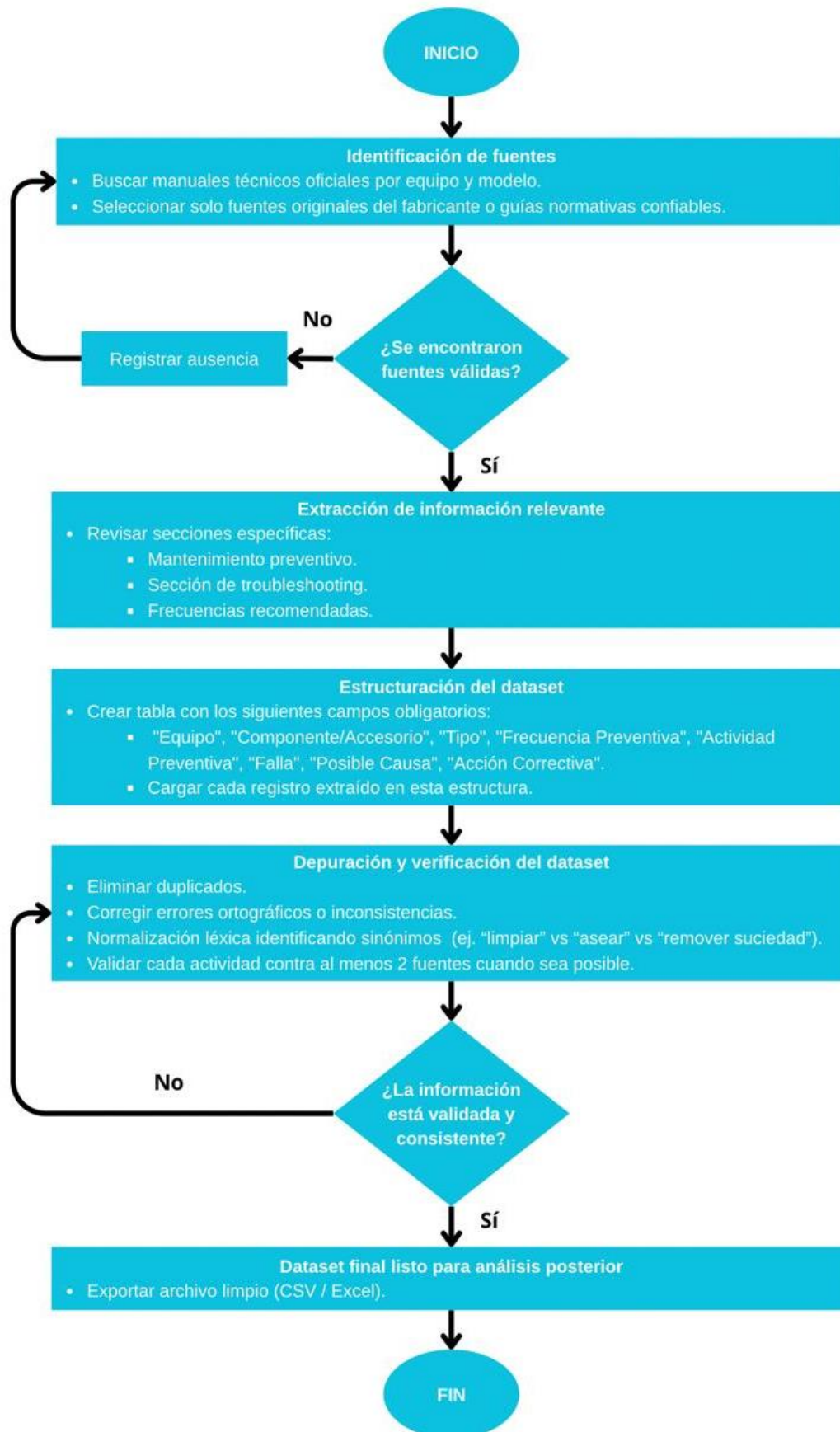
Objetivo. Recopilar, sistematizar y normalizar la información contenida en los manuales técnicos de servicio para los equipos seleccionados (monitor de signos vitales de diferentes marcas y modelos), con el fin de construir un dataset estructurado que sirva como fuente de conocimiento para las etapas posteriores.

El punto de partida para el desarrollo de la propuesta consistió en el análisis documental de los manuales técnicos correspondientes a tres modelos de monitores de signos vitales utilizados en entornos hospitalarios: GE CARESCAPE B650, GE CARESCAPE B850 y Mindray BeneView T5/T8/T9. En el diagrama mostrado en la *Fig. 19. Construcción de la base de datos (DATASET)*, se describe el proceso llevado a cabo para la construcción inicial del dataset que sirvió como base para el análisis posterior.

Este procedimiento comenzó con la identificación y selección de fuentes confiables, específicamente manuales técnicos oficiales y guías normativas por modelo y fabricante. Una vez obtenidas las fuentes válidas, se procedió a la extracción de información relevante relacionada con actividades de mantenimiento preventivo, correctivo, procedimientos de troubleshooting y frecuencias recomendadas.

Posteriormente, esta información fue organizada en una estructura tabular con campos definidos, permitiendo estandarizar la descripción de cada actividad. Luego, se llevó a cabo un proceso de depuración y verificación, en el cual se eliminaron duplicados, se corrigieron inconsistencias y se unificaron términos mediante normalización léxica. Finalmente, tras validar la consistencia y confiabilidad de los registros, se obtuvo un dataset limpio y estructurado, listo para ser utilizado en la fase de análisis mediante técnicas de minería de datos y agrupamiento.

Figura 19. Construcción de la base de datos (DATASET)



El dataset final quedó organizado en ocho columnas principales, que permiten una lectura comparativa entre los distintos modelos:

Tabla 14. Descripción de los Campos del Dataset

Campo	Descripción
Equipo Biomédico / Modelo	Modelo del monitor analizado.
Componente / Accesorio	Parte física o módulo implicado.
Tipo	Clasificación: componente, preventivo, calibración o correctivo.
Frecuencia Preventiva	Intervalo recomendado (diario, mensual, anual, etc.).
Actividad Preventiva	Procedimiento o verificación por ejecutar.
Falla detectada	Manifestación de la falla reportada.
Posible Causa	Origen probable del mal funcionamiento.
Acción Correctiva (Troubleshooting)	Procedimiento sugerido para la solución.

Como resultado, se obtuvo un total de **61 registros** estructurados, abarcando tanto actividades preventivas como correctivas, tal como se detalló en la *Tabla 15. Dataset en Colab, mostrando 10 registros como evidencia visual*, lo que evidencia la riqueza y diversidad de los procedimientos entre los distintos modelos de monitores.

Tabla 15. Dataset en Colab, mostrando 10 registros como evidencia visual

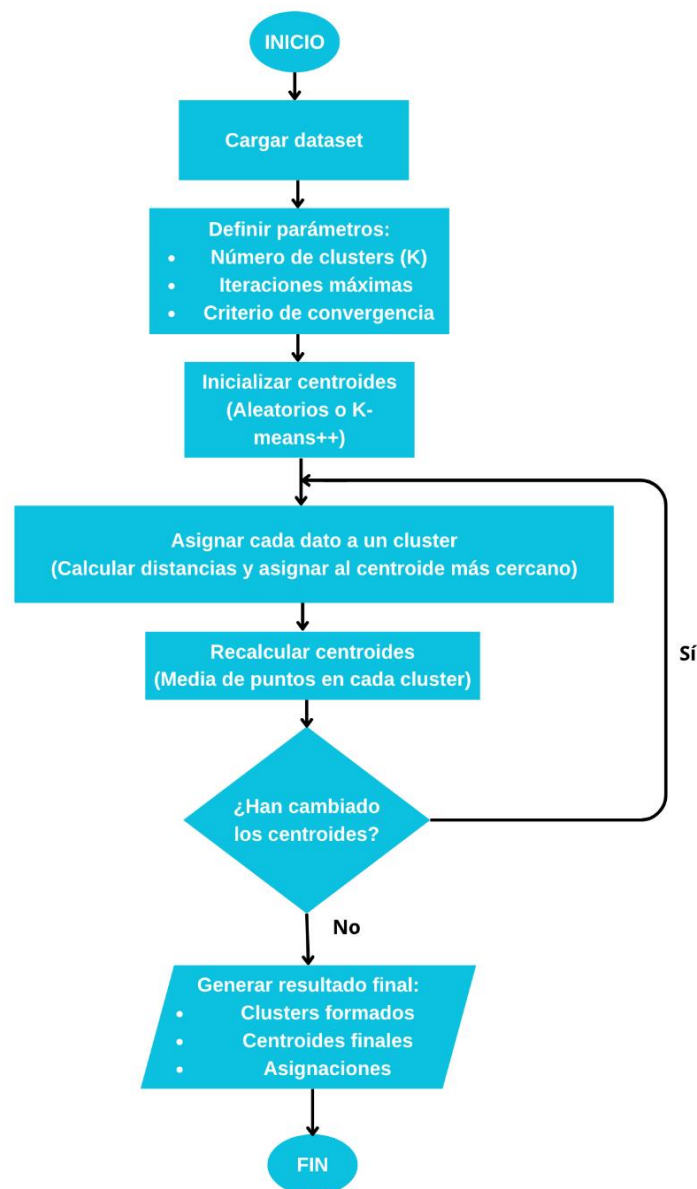
Equipo	Componente/Accesorio	Tipo	Frecuencia Preventiva	Actividad Preventiva	Falla	Posible Causa	Acción Correctiva
GE CARESCAPE B850	Pantalla de alta resolución	Componente	Diario	Limpieza e inspección	Pantalla congelada	Error de software	Reiniciar; actualizar software
GE CARESCAPE B850	Unidad principal y tarjetas internas	Componente	Anual	Revisión y prueba eléctrica	No arranca	Fuente de alimentación o batería dañada	Sustituir batería o fuente
GE CARESCAPE B850	Módulo ECG avanzado	Componente	Mensual	Prueba funcional con simulador	Señal ECG ausente	Electrodos mal colocados	Colocar electrodos nuevos
GE CARESCAPE B850	Módulo NIBP	Componente	Mensual	Verificación con simulador	Mediciones interrumpidas	Manguito flojo o válvula defectuosa	Ajustar o cambiar manguito; revisar válvula
Mindray BeneView T5/T8/T9	Pantalla táctil	Componente	Diario	Limpieza y prueba de alarma	Pantalla no responde	Congelamiento software / cable defectuoso	Reiniciar; sustituir cable o pantalla
Mindray BeneView T5/T8/T9	Unidad principal (CPU/tarjeta)	Componente	Anual	Revisión de tarjeta y prueba eléctrica	No enciende	Batería agotada / falla tarjeta	Sustituir batería; servicio técnico
Mindray BeneView T5/T8/T9	Módulo ECG	Componente	Mensual	Prueba funcional con simulador	Señal ECG ausente	Electrodos mal colocados	Colocar electrodos nuevos; sustituir cable si falla
GE CARESCAPE B650	Pantalla táctil	Componente	Diario	Inspección visual y limpieza	Pantalla congelada / sin imagen	Error de software o tarjeta gráfica dañada	Reiniciar monitor; actualizar software; reemplazar tarjeta si persiste
GE CARESCAPE B650	Módulo CO ₂	Componente	Anual	Calibración de módulo y prueba funcional	No hay lectura CO ₂	Trampa de agua en mal estado	Cambiar trampa de agua y tubos; verificar conexión
GE CARESCAPE B650	Módulo IBP	Componente	Anual	Calibración de presiones invasivas	Lectura incorrecta	Transductores obsoletos	Revisar transductores y líneas; sustituir si falla

Fase 2. Segmentación de datos mediante K-means

Objetivo. Agrupar las actividades del dataset en clústeres homogéneos que representen procesos equivalentes, pese a las variaciones en su redacción, para facilitar la estandarización.

En esta fase se aplicó el algoritmo de agrupamiento K-means, con el propósito de identificar patrones comunes entre actividades que, aunque expresadas de forma distinta en los manuales, se refieren a procedimientos técnicos equivalentes. El proceso siguió la lógica operacional en el diagrama representado en la *Figura 20. Funcionamiento del algoritmo K-means*.

Figura 20. *Funcionamiento del algoritmo K-means*



La fase inició con la carga del dataset limpio y estructurado, compuesto por las actividades previamente extraídas y depuradas. Una vez disponible la información, se definieron los parámetros principales del modelo, entre ellos el número de clústeres a formar, el número máximo de iteraciones permitidas y el criterio de convergencia. La elección del número de clústeres no fue arbitraria: se aplicaron métodos de validación como el método del codo y el índice de silhouette, seleccionando el valor óptimo que equilibrara coherencia interna y diferenciación entre grupos.

Posteriormente, se procedió a la inicialización de los centroides, que representan los puntos centrales o prototipos de cada clúster. Estos centroides se establecieron de forma aleatoria o mediante el método K-means, que mejora la calidad de la agrupación al distribuir mejor los puntos iniciales.

Una vez ubicados los centroides, comenzó el ciclo iterativo principal del algoritmo. Cada actividad del dataset fue comparada con los centroides, y se determinó su distancia relativa para identificar cuál de ellos se encontraba más próximo. A partir de esta comparación, cada actividad fue asignada al clúster cuyo centroide mostraba mayor similitud con sus características descriptivas. Luego, el algoritmo recalculó los centroides de cada clúster, tomando como referencia la posición promedio o representativa de todas las actividades agrupadas en él.

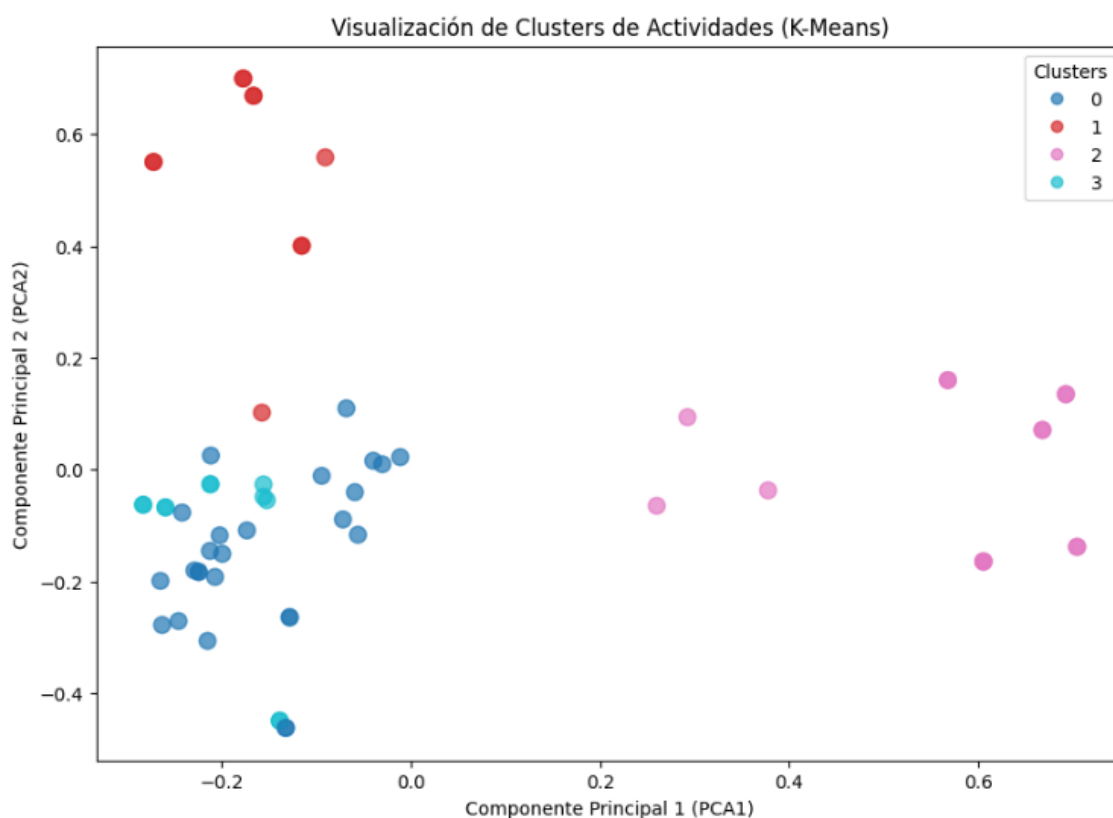
Este proceso de asignación y reasignación se repitió de manera iterativa, verificando en cada ciclo si los centroides habían cambiado de posición respecto a la iteración anterior. Mientras se observaban variaciones, el algoritmo continuó refinando los grupos. Una vez que los centroides permanecieron estables, es decir, cuando ya no se registraron cambios significativos, el proceso se consideró convergente y se finalizó la segmentación.

Al concluir la fase, se obtuvo un conjunto de clústeres interpretables, cada uno representando familias de actividades equivalentes, tales como limpieza externa, verificación de baterías, conexión de módulos, ajuste de alarmas, inspección de sensores y calibraciones de rutina.

Resultados obtenidos en la fase 2

1. Formación de clústeres homogéneos de actividades que representan procesos equivalentes.
2. Identificación de patrones comunes entre tareas descritas con redacciones distintas.
3. Reducción significativa de redundancias presentes en los manuales originales.
4. Bases consolidadas para la toma de decisiones en la Fase 3 (Árbol de decisiones).

Figura 21. Mapa 2D de 4 Clústeres Representativos



Nota. La reducción de dimensionalidad mediante PCA facilitó visualizar y validar que las actividades realmente forman grupos compactos y diferenciados. Esta segmentación permitió reducir redundancias, mejorar la organización de la información y establecer una base sólida para la clasificación jerárquica posterior en la Fase 3 para la regla de inclusión en el *checklist*.

Tabla 16. Clústeres representativos obtenidos mediante K-means

Clúster	Nombre interpretativo	Descripción general del tipo de actividades	Ejemplos de actividades incluidas	Frecuencia típica
Clúster 1	Limpieza y acondicionamiento externo	Agrupar actividades orientadas al mantenimiento básico exterior del equipo para asegurar higiene, conservación y presentación del dispositivo.	- Limpiar superficies externas con paño húmedo. - Desinfectar carcasa y panel frontal. - Verificar ausencia de fisuras o daños visibles.	Diaria / Semanal
Clúster 2	Verificación funcional y operativa	Incluye actividades de comprobación del estado y funcionamiento general del equipo sin intervención interna profunda.	- Encender equipo y verificar arranque correcto. - Confirmar funcionamiento del display y botones. - Probar alarmas visuales y auditivas.	Semanal / Mensual
Clúster 3	Componentes y conexiones del sistema	Reúne procedimientos relacionados con la revisión y aseguramiento de los módulos, sensores y conexiones críticas del sistema.	- Inspección de cables y conectores. - Comprobación del sensor SpO₂. - Revisión de integridad de la línea ECG.	Mensual / Trimestral
Clúster 4	Calibración y pruebas especializadas	Contiene actividades cuyo objetivo es asegurar precisión y exactitud de medición, requiriendo frecuentemente instrumentos o software adicional.	- Calibración de módulo de presión no invasiva (NIBP). - Ajuste de parámetros de lectura de SpO₂. - Pruebas de verificación contra equipos patrón.	Trimestral / Anual

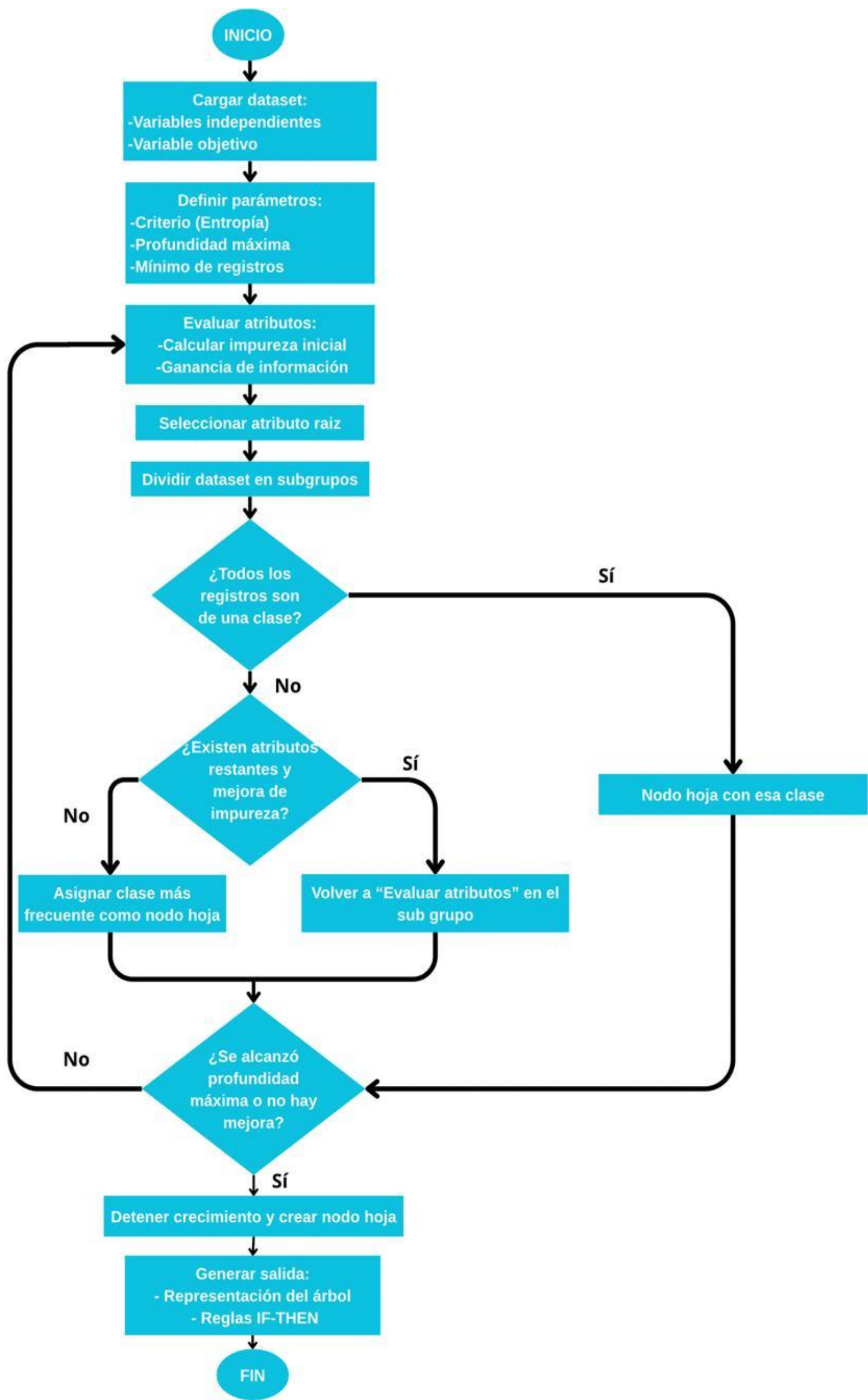
Fase 3. Clasificación jerárquica mediante Árbol de decisiones

Objetivo. Definir reglas objetivas y replicables que determinen qué actividades deben incluirse en el *checklist* estandarizado, estableciendo relaciones lógicas entre el tipo de mantenimiento, el componente afectado, la frecuencia recomendada y, en caso de mantenimiento correctivo, las fallas más comunes, sus posibles causas y la acción a realizar sugerida.

Tomando como referencia el dataset previamente depurado y clusterizado, se aplicó un árbol de decisiones para clasificar de manera jerárquica qué actividades debían incluirse en el *checklist* estandarizado de mantenimiento preventivo y correctivo. Para ello, el dataset se codificó mediante técnicas de etiquetado numérico (*Label Encoding*), permitiendo que las variables categóricas como “Frecuencia”, “Módulo” y “Componente” fueran interpretadas correctamente por el algoritmo. Posteriormente, se entrenó un árbol de decisión capaz de aprender los patrones de mantenimiento asociados a cada equipo y componente afectado.

El árbol se construyó de forma recursiva, utilizando métricas de pureza (índice Gini o entropía) para dividir los nodos y generar reglas de decisión claras y replicables. Para mantenimiento preventivo, el modelo permitió identificar las actividades más recomendadas considerando la frecuencia y el componente. Por ejemplo, si el usuario selecciona la opción *Mantenimiento Preventivo* y el componente *Pantalla*, el modelo sugiere actividades como limpieza periódica superficial, verificación de brillo, o revisión de conexiones, indicando además la frecuencia de ejecución sugerida según las recomendaciones técnicas recopiladas de los manuales. Por otro lado, para el mantenimiento correctivo, el árbol de decisión permitió relacionar las fallas reportadas con posibles causas y acciones correctivas sugeridas. Por ejemplo, ante la falla “la pantalla no enciende”, el modelo identificó causas recurrentes como: *daño en la fuente de poder* o *fallo en el display*, proponiendo soluciones como la verificación de conexiones, medición de continuidad en la fuente o reemplazo del módulo afectado. A partir de estas asociaciones, se generó automáticamente un *checklist* correctivo.

Figura 22. Flujograma del funcionamiento del árbol de decisiones



Resultados obtenidos.

1. Un árbol de decisión interpretable que genera reglas claras para la inclusión o exclusión de actividades en los *checklist*.
2. El árbol actúa como la capa de gobernanza del sistema: traduce la información agrupada por K-means en decisiones operativas reproducibles.

Tabla 17. Checklist estandarizado de mantenimiento preventivo

	Componente/Accesorio	Frecuencia Preventiva	Actividad Preventiva
0	Batería extraíble	Mensual	Verificar carga
1	Batería recargable	Mensual	Verificar duración
2	Cables ECG	Diario	Inspección visual
3	Cables de red / comunicación	Mensual	Revisar conexiones
4	Electrodos adhesivos	Diario	Verificar caducidad y adhesión
5	Fuente de alimentación y batería	Mensual	Verificar carga y respaldo
6	Impresora térmica	Mensual	Limpieza y prueba de impresión
7	Manguitos NIBP	Mensual	Verificación con simulador
8	Módulo CO ₂	Anual	Calibración de módulo y prueba funcional
9	Unidad principal (CPU/tarjeta)	Anual	Revisión de tarjeta y prueba eléctrica
10	Trampa de agua CO ₂	Mensual	Verificar nivel y limpieza
11	Transductores IBP	Mensual	Calibración y limpieza
12	Módulo IBP	Anual	Calibración

El *checklist* preventivo sistematiza las actividades de mantenimiento mediante la integración de tres elementos: componente, actividad preventiva recomendada y frecuencia de ejecución. Esta estructura permite planificar intervenciones de mantenimiento de forma ordenada, predecible y replicable, independientemente del fabricante del equipo.

Figura 23. Construcción del Checklist preventivo mediante árbol de decisiones

Árbol de Decisión - Mantenimiento Preventivo (Monitores de Signos Vitales)

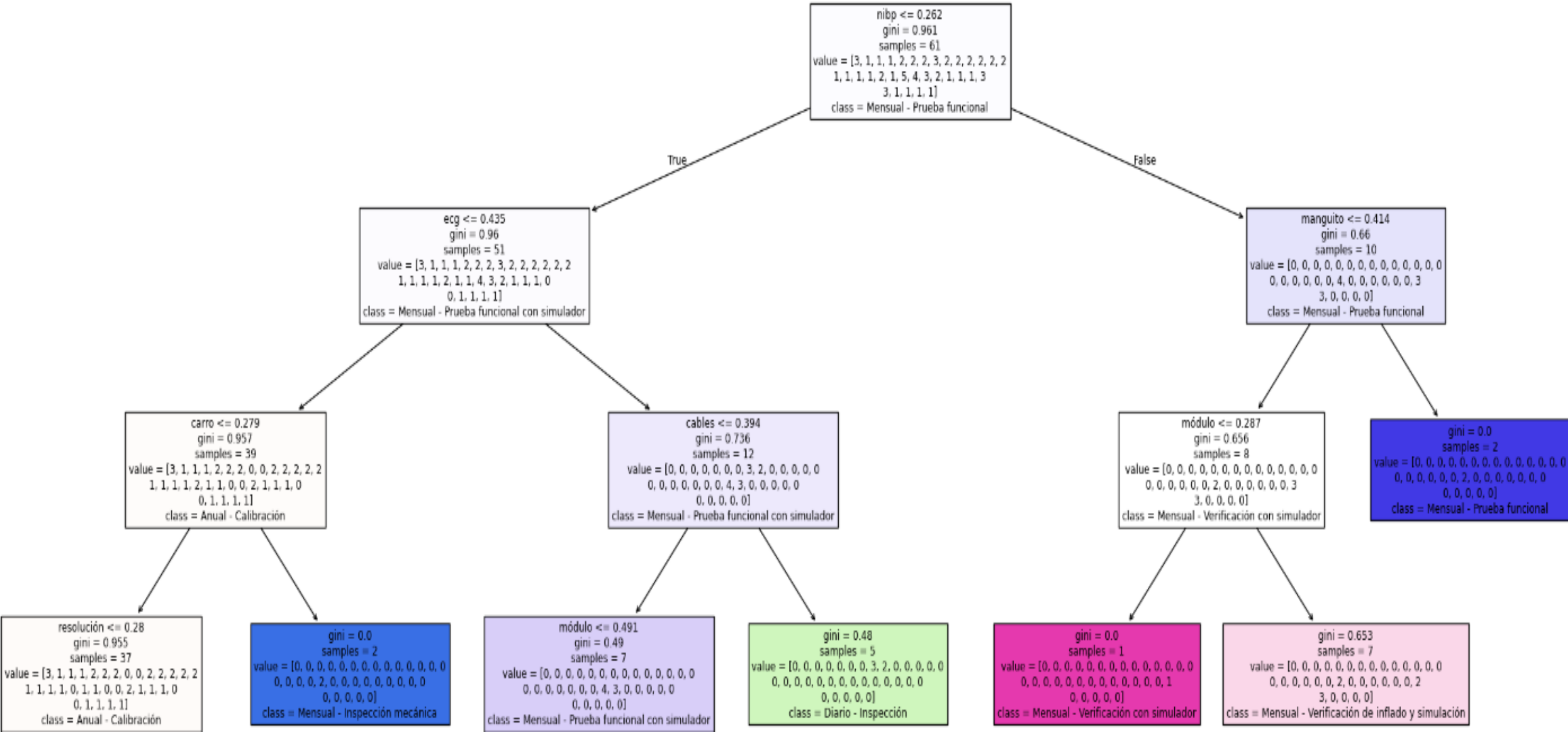


Tabla 18. Checklist estandarizado de mantenimiento correctivo

	Componente	Falla	Posible Causa	Acción Correctiva
0	Pantalla táctil	Pantalla congelada / sin imagen	Error de software o tarjeta gráfica dañada	Reiniciar monitor; actualizar software; reempl...
1	Unidad principal (CPU / tarjeta electrónica)	El monitor no enciende	Fuente de alimentación interna dañada o fusibl...	Revisar fusible; reemplazar fuente; enviar a s....
2	Módulo ECG	No hay señal ECG	Cable dañado o electrodos mal colocados	Sustituir cable; colocar electrodos nuevos; ve...
3	Módulo SpO ₂	Lecturas inestables	Movimiento del paciente o sensor mal colocado	Colocar sensor en sitio estable; cubrir sensor...
4	Módulo NIBP	NIBP no infla	Tubo desconectado, doblado o válvula defectuosa	Revisar conexión del tubo; cambiar manguito o ...
5	Cables ECG	Señal ECG ausente	Cable dañado o electrodos mal colocados	Sustituir cable; colocar electrodos nuevos
6	Manguito NIBP	NIBP no infla	Manguito o válvula defectuosa	Sustituir manguito o válvula; revisar conexión
7	Sensor SpO ₂	No da lectura	Sensor sucio o mal colocado	Limpiar sensor; probar otro sitio; sustituir s....
8	Pantalla de alta resolución	Pantalla congelada	Error de software	Reiniciar; actualizar software
9	Unidad principal y tarjetas internas	No arranca	Fuente de alimentación o batería dañada	Sustituir batería o fuente
10	Módulo NIBP	Mediciones interrumpidas	Manguito flojo o válvula defectuosa	Ajustar o cambiar manguito; revisar válvula
12	Pantalla táctil	Pantalla no responde	Congelamiento software / cable defectuoso	Reiniciar; sustituir cable o pantalla

El *checklist* de mantenimiento correctivo organiza la atención de fallas presentadas en el monitor de signos vitales, relacionando cuatro elementos fundamentales: falla reportada, componente afectado, posible causa y acción correctiva realizada. Este registro permite reconstruir el proceso de diagnóstico

y resolución de la avería, constituyéndose en una herramienta clave para la trazabilidad técnica del equipo biomédico.

A diferencia del mantenimiento preventivo, cuya ejecución sigue una periodicidad programada, las actividades correctivas se desarrollan en función de la aparición de eventos no planificados, lo cual genera un desfase temporal entre casos documentados. Es decir, la misma falla puede presentarse en momentos distintos o no presentarse durante largos periodos, dependiendo de factores como condiciones de uso, desgaste del componente, vida útil o entorno clínico.

De esta forma, el *checklist* correctivo no solo documenta la reparación realizada, sino que se convierte en un soporte para la toma de decisiones basada en evidencia. Su aplicación favorece la estandarización de criterios técnicos, reduce la variabilidad entre distintos profesionales y promueve la continuidad y calidad del mantenimiento en el ámbito hospitalario.

Los resultados de esta fase demostraron que el uso del árbol de decisión simplifica y estandariza el proceso de generación de actividades de mantenimiento, permitiendo que diferentes equipos y profesionales puedan acceder a un proceso homogéneo, trazable y replicable. A su vez, este modelo puede ser actualizado de manera dinámica si se incorporan nuevos manuales al dataset, experiencias del servicio técnico o mejoras en el criterio de mantenimiento institucional.

La fase 3 permitió convertir el dataset depurado en una herramienta inteligente de apoyo a la toma de decisiones, facilitando la elaboración inmediata de listas de verificación ajustadas a cada escenario real de mantenimiento preventivo o correctivo. Esto consolidó el proceso de estandarización al ofrecer una forma sistemática, objetiva y reproducible de generar recomendaciones y acciones asociadas a los distintos módulos del monitor de signos vitales.

A partir de estos resultados, la fase 4 se enfoca en el desarrollo de la interfaz de usuario y la automatización completa del proceso de generación de *checklist* permitiendo al técnico seleccionar los parámetros operativos relevantes (equipo, tipo de mantenimiento y nivel de detalle deseado).

Fase 4. Desarrollo de la interfaz de usuario: generación automática de *checklists*

Objetivo. Diseñar una interfaz de usuario que permita a los técnicos seleccionar el equipo, el tipo de mantenimiento a realizar y el nivel de detalle deseado, para generar automáticamente un *checklist* estandarizado basado en los resultados de las fases anteriores (segmentación mediante K-means y clasificación mediante árbol de decisiones).

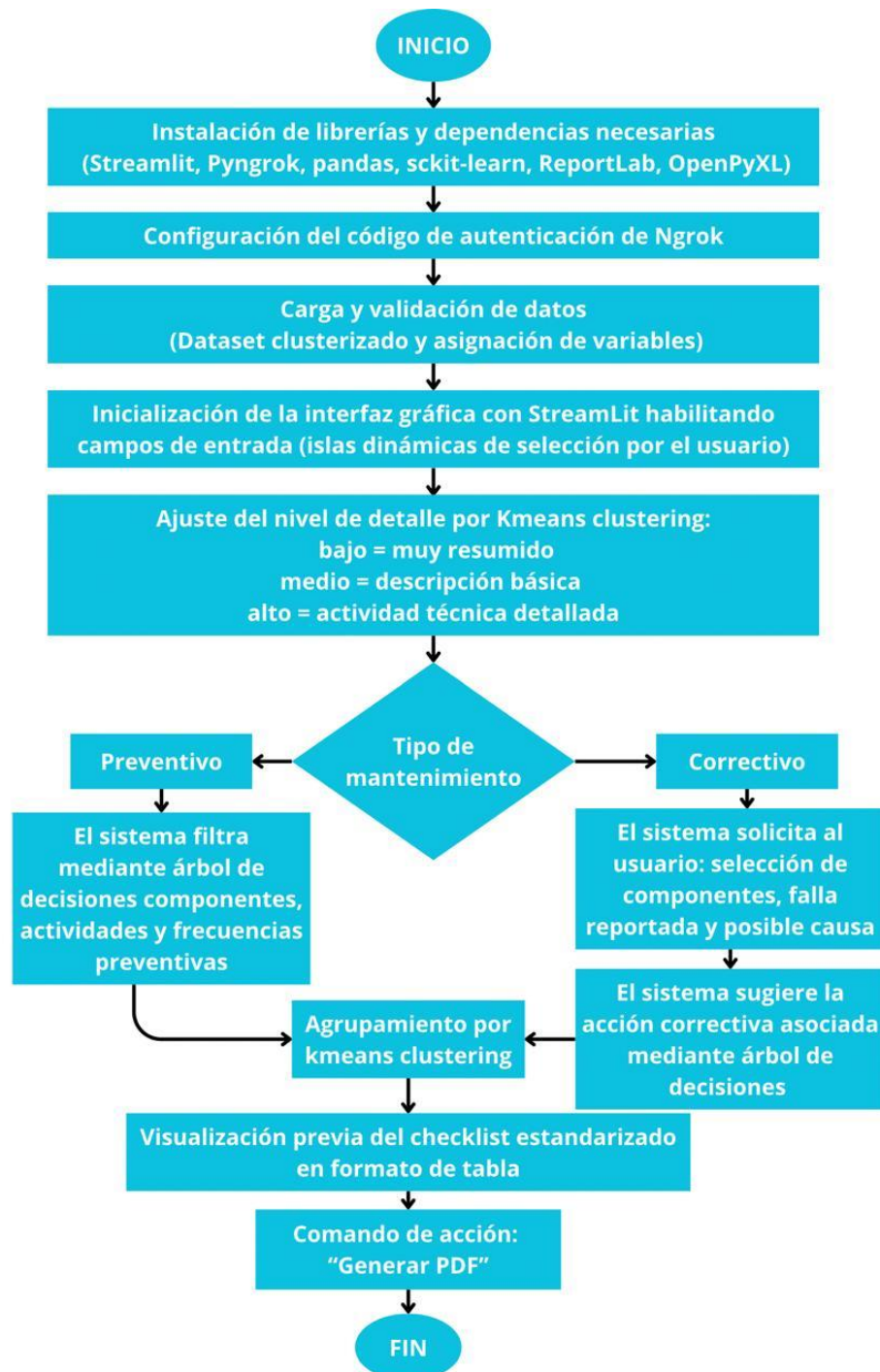
En esta etapa se construyó una interfaz interactiva que actúa como vínculo directo entre el modelo de clasificación desarrollado en la Fase 3 y el personal técnico encargado de ejecutar las actividades de mantenimiento. Su función principal es permitir que el sistema se utilice de manera práctica y accesible, evitando que el usuario deba manipular directamente el dataset o comprender la lógica interna del código. De esta forma, el proceso de estandarización se integra de manera intuitiva al flujo de trabajo habitual del técnico.

La interfaz permite seleccionar de forma guiada tres parámetros esenciales. En primer lugar, el equipo a intervenir; para el desarrollo de este proyecto se trabajó específicamente con monitores de signos vitales, aunque la arquitectura del sistema permite agregar nuevos equipos biomédicos en el futuro sin alterar su estructura base. En segundo lugar, el usuario define el tipo de mantenimiento que requiere: si se trata de mantenimiento preventivo, el sistema sugiere actividades en función de la frecuencia recomendada y el componente involucrado; mientras que, para mantenimiento correctivo, la interfaz recupera fallas registradas históricamente y las vincula con sus posibles causas y la acción correctiva aplicada. El tercer parámetro corresponde al nivel de detalle técnico deseado, el cual está asociado al número de clústeres seleccionados. Una selección de mayor cantidad de clústeres produce un *checklist* más específico y detallado, mientras que una menor cantidad genera un listado más general, orientado a la estandarización y simplificación de las tareas. Ver Figura 26. *Interfaz de usuario – Selección del encabezado.*

La lógica interna de funcionamiento de la interfaz se apoya en dos estructuras ya consolidadas en etapas anteriores: por un lado, el modelo K-means, responsable de agrupar actividades similares y definir el grado de detalle visible

y del árbol de decisiones, encargado de sugerir actividades preventivas o diagnósticos y acciones correctivas en función de los patrones encontrados en los registros previos. A partir de estas dos fuentes, el sistema organiza automáticamente la información seleccionada en un formato estructurado de *checklist*, listo para ser utilizado directamente en campo, impreso o registrado como evidencia dentro de la respectiva hoja de mantenimiento institucional.

Figura 25. Flujo del código de la interfaz gráfica



La *Figura 25* muestra el diagrama de flujo correspondiente a la Fase 4 del diseño de la propuesta, en la cual se describe el proceso de desarrollo e implementación de la interfaz de usuario destinada a la generación de *checklists* estandarizados de mantenimiento biomédico. El flujo inicia con la preparación del entorno de trabajo, que contempla la importación de librerías del entorno Python, la instalación de dependencias necesarias y la configuración de la conectividad externa para la ejecución de la aplicación web.

A continuación, se realiza la carga y validación del conjunto de datos, asegurando la correcta estructura y estandarización del dataset utilizado por la interfaz. Una vez verificados los datos, se inicializa la interfaz gráfica mediante Streamlit, habilitando los campos de entrada requeridos para la personalización del *checklist*, tales como información del técnico, tipo de mantenimiento, equipo biomédico y nivel de detalle deseado.

Posteriormente, el proceso incorpora una decisión central asociada al tipo de mantenimiento seleccionado por el usuario, lo que define dos rutas diferenciadas: mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. En función de esta selección, el sistema filtra y ajusta automáticamente las actividades o acciones correctivas, adaptando el nivel de detalle de la información presentada según los parámetros definidos por el usuario.

Como resultado del flujo descrito, el sistema genera un documento PDF estructurado que consolida la información del *checklist* bajo un formato técnico estandarizado, permitiendo su descarga por parte del usuario. El proceso concluye con la publicación de la interfaz web mediante un túnel seguro, facilitando el acceso remoto a la herramienta y garantizando la reproducibilidad del procedimiento.

Figura 26. *Interfaz de usuario – Selección del encabezado*

Generador de Checklist de Mantenimiento Biomédico

Nombre del técnico responsable:

Alexandra Rivera Fossatti

Fecha de generación del checklist:

2025/11/12

Seleccione el equipo biomédico:

Monitor de signos vitales

Tipo de mantenimiento:

Preventivo

Nivel de detalle (número de clústeres)

4

Nota. La interfaz permite seleccionar el técnico encargado del mantenimiento, la fecha, el equipo, el tipo de mantenimiento y el nivel de detalle de las actividades a desarrollar mediante la selección de clústeres. El encabezado del *checklist* incluye información esencial como el equipo biomédico, el técnico responsable y la fecha de generación, garantizando trazabilidad y formalidad en el registro del mantenimiento. Cada actividad fue ajustada de acuerdo con el nivel de detalle técnico definido por el número de clústeres seleccionados, lo que permite obtener descripciones más o menos específicas de las tareas según las necesidades operativas.

Figura 27. Checklist preventivo estandarizado (4 clústeres)

Checklist de Mantenimiento - Preventivo		
Equipo biomédico: Monitor de signos vitales		
Técnico responsable: Alexandra Rivera Fossatti		
Fecha de generación: 2025-11-12		
Componente / Accesorio	Actividad Preventiva	Frecuencia Preventiva
Pantalla táctil	Inspección visual y limpieza del componente.	Diario
Unidad principal (CPU / tarjeta electrónica)	Revisión de tarjetas electrónicas y prueba de seguridad eléctrica del componente.	Anual
Módulo ECG	Prueba funcional con simulador ecg del componente.	Mensual

El documento visualizado en la Fig.27. presenta una lista estructurada de componentes del monitor de signos vitales, junto con sus actividades preventivas asociadas y la frecuencia recomendada para su ejecución mostrando 6 columnas representativas como evidencia visual. En contraste, el documento presentado en la Fig.28. contiene mayor nivel de detalle al generar el *checklist* seleccionando un nivel de agrupamiento de 12 clústeres, se muestran las 6 primeras columnas de datos como evidencia visual.

Figura 28. Checklist preventivo estandarizado (12 clústeres)

Checklist de Mantenimiento - Preventivo		
Equipo biomédico: Monitor de signos vitales		
Técnico responsable: Alexandra Rivera Fossatti		
Fecha de generación: 2025-11-12		
Componente / Accesorio	Actividad Preventiva	Frecuencia Preventiva
Pantalla táctil	Inspección visual y limpieza utilizando materiales adecuados para evitar daño y garantizar funcionamiento.	Diario
Unidad principal (CPU / tarjeta electrónica)	Revisión de tarjetas electrónicas y prueba de seguridad eléctrica utilizando materiales adecuados para evitar daño y garantizar funcionamiento.	Anual
Módulo ECG	Prueba funcional con simulador ecg utilizando materiales adecuados para evitar daño y garantizar funcionamiento.	Mensual

Por otro lado, también se habilitó la posibilidad de generar *checklist* correctivos completamente estandarizados para monitores de signos vitales, permitiendo que el técnico seleccione el componente afectado, así como la falla reportada y su posible causa. A partir de esta información, el sistema consulta el modelo previamente entrenado y genera automáticamente una acción correctiva sugerida, cuyo nivel de detalle varía según el número de clústeres seleccionados por el usuario. Esto convierte la herramienta en un asistente técnico adaptable, capaz de producir desde descripciones generales hasta instrucciones altamente específicas.

Figura 29. *Interfaz de configuración del checklist correctivo*

Nivel de detalle (número de clústeres)

4

Checklist Correctivo

Seleccionar componente:

Pantalla táctil

Seleccionar falla reportada:

Pantalla congelada / sin imagen

Seleccionar posible causa:

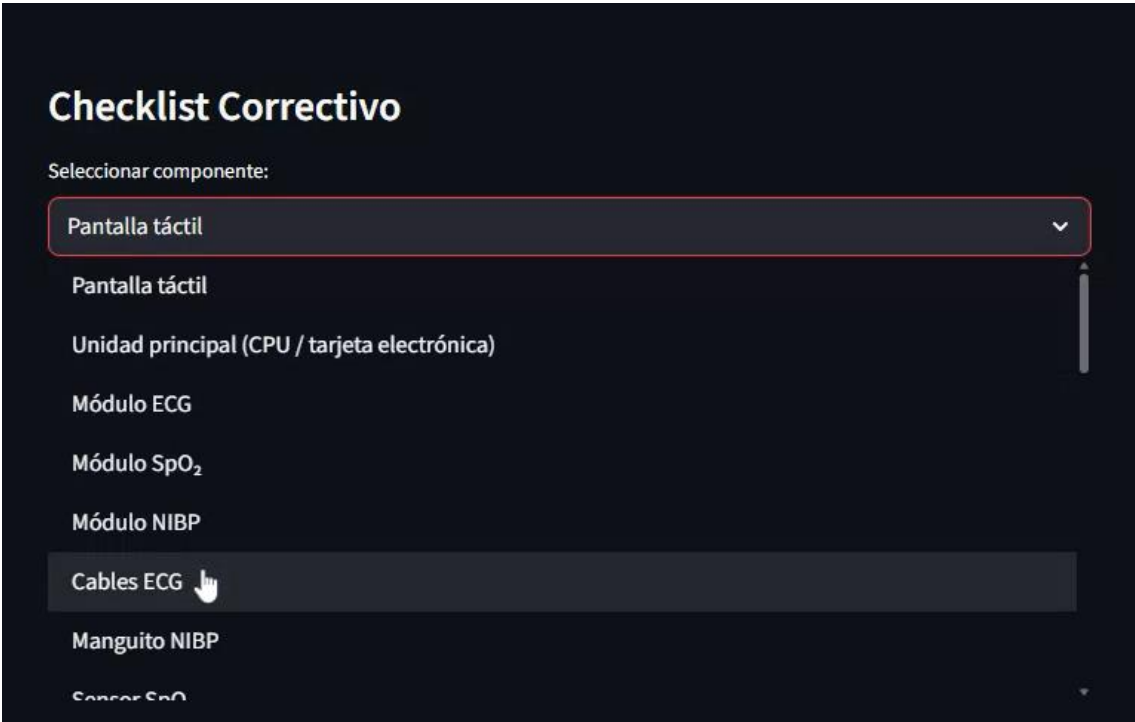
Error de software o tarjeta gráfica dañada

Acción correctiva sugerida: Reiniciar monitor; actualizar software; reemplazar tarjeta si persiste del componente.

Generar PDF

La *Figura 29* muestra la interfaz donde el técnico selecciona el componente afectado (en este caso, “Pantalla táctil”), la falla observada y la posible causa registrada en el histórico de eventos. Esta selección activa automáticamente el modelo de decisión, que genera la acción correctiva sugerida. El nivel de detalle está configurado en 4 clústeres, por lo que la recomendación presentada es concisa y enfocada en la solución principal.

Figura 30. Menú desplegable de componentes.



Nota. Se observa el listado de módulos y accesorios del monitor de signos vitales que pueden seleccionarse como origen del problema. Esta vista confirma la capacidad de la interfaz para adaptarse a cualquier componente documentado en el dataset, asegurando compatibilidad con toda la estructura del equipo.

Figura 31. Checklist correctivo con nivel de detalle bajo (4 clústeres).

Checklist de Mantenimiento - Correctivo			
Equipo biomédico: Monitor de signos vitales			
Técnico responsable: Alexandra Rivera Fossatti			
Fecha de generación: 2025-11-12			
Componente / Accesorio	Falla	Posible Causa	Acción Correctiva
Pantalla táctil	Pantalla no responde	Congelamiento software / cable defectuoso	Reiniciar; sustituir cable o pantalla del componente.

Nota. El *checklist* resultante incluye únicamente los elementos esenciales: componente afectado, falla, posible causa y una acción correctiva redactada de forma general. Con un nivel bajo de clústeres, el sistema prioriza la estandarización, generando frases breves y operativas como “Reiniciar” o “sustituir cable o pantalla”. Este formato es útil para protocolos rápidos o cuando se busca uniformidad en la ejecución de tareas.

Figura 32. Ajuste del nivel de detalle (12 clústeres).

Seleccione el equipo biomédico:

Monitor de signos vitales

Tipo de mantenimiento:

Correctivo

Nivel de detalle (número de clústeres)

2

12

Checklist Correctivo

Seleccionar componente:

Pantalla táctil

Seleccionar falla reportada:

Pantalla congelada / sin imagen

Seleccionar posible causa:

Error de software o tarjeta gráfica dañada

Nota. Se aprecia la selección del parámetro “Nivel de detalle”, configurado al máximo (12 clústeres). Al incrementar este valor, el sistema utiliza agrupamientos más específicos del modelo K-means, permitiendo generar instrucciones correctivas mucho más detalladas y descriptivas.

Figura 33. Checklist correctivo con nivel de detalle alto (12 clústeres).

Checklist de Mantenimiento - Correctivo

Equipo biomédico: Monitor de signos vitales

Técnico responsable: Alexandra Rivera Fossatti

Fecha de generación: 2025-11-12

Componente / Accesorio	Falla	Posible Causa	Acción Correctiva
Pantalla táctil	Pantalla no responde	Congelamiento software / cable defectuoso	Reiniciar; sustituir cable o pantalla utilizando materiales adecuados para evitar daño y garantizar funcionamiento.

Nota. El *checklist* final muestra la misma información que en el nivel de 4 clústeres, pero con una acción correctiva mucho más detallada. Con 12 clústeres, el modelo distingue subgrupos de acciones más específicos, lo que permite generar instrucciones mucho más técnicas y completas. Este nivel de detalle es ideal para documentación avanzada, capacitación o escenarios en los que se requiera una trazabilidad exhaustiva del proceso de intervención.

La interfaz constituye el elemento operativo clave que permite trasladar el modelo de estandarización desde el nivel teórico-analítico hacia su aplicación práctica en entornos hospitalarios. Esto garantiza que la estandarización no solo exista como propuesta metodológica, sino como herramienta **real, accesible y aplicable** para el personal técnico.

Como resultado, se obtuvo una interfaz funcional capaz de generar de manera automática un *checklist* preventivo organizado por componente, actividad y frecuencia, así como un *checklist* correctivo estructurado en relación con la falla, la posible causa, el componente afectado y la acción correctiva realizada. Además, se habilitó la posibilidad de ajustar dinámicamente el nivel de profundidad técnica mediante la selección del número de clústeres, permitiendo que el mismo sistema pueda adaptarse tanto a procedimientos altamente detallados como a modalidades de trabajo más estandarizadas. Esto contribuye a mejorar la trazabilidad del proceso de mantenimiento y a reducir la variabilidad entre técnicos, favoreciendo la uniformidad y la reproducibilidad de las intervenciones realizadas.

Resultados obtenidos.

1. Prototipo funcional de la interfaz que genera automáticamente *checklist* estandarizados basados en la combinación de clústeres y reglas del árbol.
2. La interfaz convierte el modelo analítico en una herramienta aplicable en terreno, acelerando la adopción y reduciendo la ambigüedad en los procesos de mantenimiento.

Esta integración tecnológica garantiza que el proceso de estandarización no dependa únicamente de la interpretación manual de los manuales, sino que sea un procedimiento sistemático, reproducible y eficiente, cumpliendo criterios de precisión, eficacia, seguridad y estabilidad, tal como exige la normativa de mantenimiento de equipos biomédicos.

Fase 5. Demostrar optimización del modelo mediante simulación con software Arena

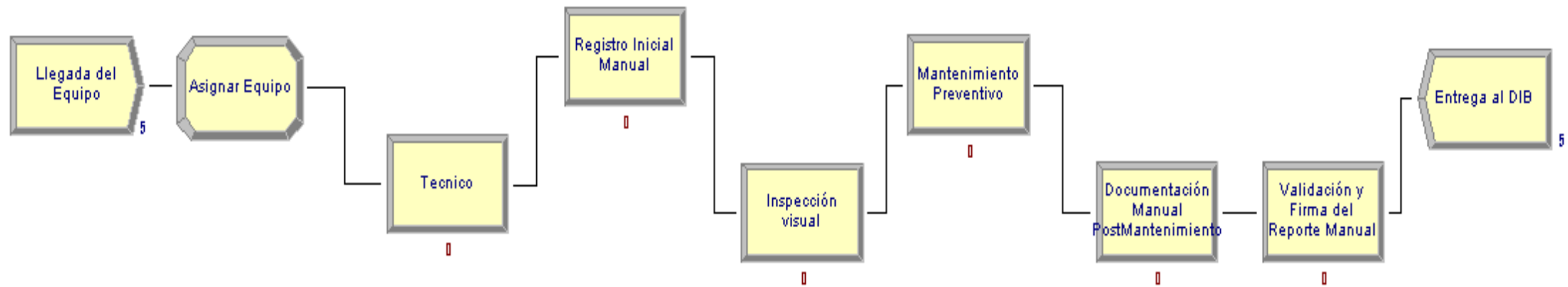
Esta última fase tiene como finalidad verificar la optimización del modelo propuesto mediante simulación de eventos discretos utilizando el software Arena. Esta fase permite evaluar el comportamiento del sistema a través de indicadores de desempeño tales como el número de equipos atendidos por jornada laboral, el tiempo total de atención por equipo, los tiempos de espera en cola y la variabilidad del proceso.

Para demostrar la optimización del del modelo propuesto se desarrollaron dos escenarios de simulación. El primer escenario (escenario A) corresponde al proceso de mantenimiento preventivo realizado sin estandarización, caracterizado por el uso de reportes manuales y la ausencia de procedimientos estructurados para el registro de las actividades realizadas. El segundo escenario (escenario B) incorpora la propuesta de esta investigación, basada en la estandarización del reporte de servicio técnico mediante una interfaz digital con *checklist*, orientada a reducir la variabilidad del proceso, mejorar la trazabilidad de la información y aumentar la productividad del técnico biomédico.

El escenario A representa el proceso tradicional de mantenimiento preventivo realizado por un técnico biomédico, desde la llegada del equipo al área de mantenimiento hasta la entrega del reporte manual al departamento de ingeniería biomédica. En la *Figura 34* se presenta el diagrama del modelo desarrollado en el software Arena para este escenario, donde se observa la secuencia de actividades que incluye el registro inicial manual, la inspección visual, la ejecución del mantenimiento preventivo, la documentación manual posterior al mantenimiento y la validación final del reporte. En este modelo se consideró un único recurso técnico, estableciendo como condición que el técnico no puede iniciar la atención de un nuevo equipo hasta haber finalizado completamente el reporte del equipo anterior, lo cual introduce tiempos de espera acumulados y limita la capacidad operativa del sistema.

Figura 34. *Modelo de simulación sin estandarización*

07:40:02



La llegada de los equipos al sistema fue modelada mediante una distribución exponencial, representando la naturaleza aleatoria de las solicitudes de mantenimiento preventivo en un entorno hospitalario. Los tiempos asociados a cada actividad del proceso fueron representados mediante distribuciones triangulares, lo que permitió modelar la variabilidad inherente al desempeño del técnico biomédico en ausencia de estandarización, particularmente en las actividades de inspección y documentación manual del mantenimiento. Tal como se observa en la *Figura 35*, correspondiente al resumen de entidades procesadas, el número de equipos atendidos es reducido, lo cual confirma que el proceso manual limita significativamente la capacidad del sistema para atender la demanda de mantenimiento preventivo.

Figura 35. *Entidades procesadas sin estandarización*



El análisis del tiempo total de atención por equipo muestra una alta variabilidad entre los valores mínimos y máximos registrados, como se presenta en la *Figura 36*. Esta dispersión refleja la falta de uniformidad en la ejecución del mantenimiento y en la elaboración de los reportes manuales, procesos que dependen en gran medida del criterio individual del técnico biomédico y de su experiencia, dificultando el control de los tiempos de mantenimiento.

Figura 36. Clasificación de tiempos sin estandarización

18:20:46

Category Overview

enero 15, 2026

Unnamed Project

Replications: 1

Time Units: Hours

Entity

Time

VA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.5210	(Insufficient)	0.5002	0.5677
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.6964	(Insufficient)	0.5350	0.9944
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	1.7202	(Insufficient)	0.5300	2.8190
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	2.9376	(Insufficient)	1.7058	4.0587

Por otro lado, el análisis de los tiempos clasificados por tipo de actividad, mostrado en la Figura 37, evidencia que una proporción considerable del tiempo total corresponde a actividades no agregadas de valor y a tiempos de espera en cola. Este comportamiento se asocia principalmente a las actividades administrativas manuales realizados después del mantenimiento, tales como la documentación del servicio y la validación del reporte, las cuales consumen tiempo del recurso técnico sin contribuir directamente a la mejora funcional del equipo biomédico.

Este tipo de distribución del tiempo ha sido identificado en procesos de mantenimiento tradicionales, donde la ausencia de estandarización y digitalización incrementa la carga administrativa y reduce la eficiencia operativa del personal técnico (Prieto García, 2010; Montilla Montaña, 2019).

Figura 37. Distribución del tiempo de atención sin estandarización

18:20:46

Category Overview

enero 15, 2026

Unnamed Project

Replications: 1

Time Units: Hours

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Documentación Manual	0.2541	(Insufficient)	0.00	0.5197
PostMantenimiento.Queue				
Inspección visual.Queue	0.3458	(Insufficient)	0.00	0.8226
Mantenimiento	0.3310	(Insufficient)	0.00	0.6806
Preventivo.Queue				
Registro Inicial Manual.Queue	0.3003	(Insufficient)	0.00	0.5456
Tecnico.Queue	0.2159	(Insufficient)	0.00	0.4733
Validación y Firma del Reporte Manual.Queue	0.2732	(Insufficient)	0.00	0.5852

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Documentación Manual	0.2087	(Insufficient)	0.00	1.0000
PostMantenimiento.Queue				
Inspección visual.Queue	0.2840	(Insufficient)	0.00	1.0000
Mantenimiento	0.2719	(Insufficient)	0.00	1.0000
Preventivo.Queue				
Registro Inicial Manual.Queue	0.2466	(Insufficient)	0.00	1.0000
Tecnico.Queue	0.1773	(Insufficient)	0.00	1.0000
Validación y Firma del Reporte Manual.Queue	0.2244	(Insufficient)	0.00	1.0000

El análisis de la utilización del recurso técnico, presentado en la *Figura 38*, muestra que el técnico biomédico permanece altamente ocupado durante la mayor parte de la jornada laboral, lo que confirma la existencia de un cuello de botella en el sistema. Esta situación limita la capacidad del proceso para absorber variaciones en la demanda o incrementos en los tiempos de ejecución, amplificando los efectos de la variabilidad y reduciendo la productividad global del sistema. La literatura señala que niveles elevados de utilización del recurso humano en procesos de mantenimiento suelen estar asociados a una menor flexibilidad operativa y a una mayor sensibilidad ante retrasos y reprocesos (Huallpa Condori, 2020).

En conjunto, los resultados obtenidos en el escenario sin estandarización permiten representar el proceso tradicional de mantenimiento preventivo. La simulación evidencia que la ausencia de estandarización en los reportes de servicio técnico genera mayores tiempos de espera, alta variabilidad en la

atención por equipo y una baja productividad del técnico biomédico. Estos resultados constituyen la línea base para la validación del escenario B, en el cual se evaluará el impacto de la propuesta de estandarización mediante una interfaz digital con *checklist* sobre la eficiencia, trazabilidad y desempeño del proceso de mantenimiento preventivo.

Figura 38. *Utilización del recurso técnico sin estandarización*

18:20:46

Category Overview

enero 15, 2026

Unnamed Project

Replications:1

Time Units:Hours

Resource

Usage

Instantaneous Utilization

Average

Half Width

Minimum Value

Maximum Value

Técnico

1.0000

(Insufficient)

0.00

1.0000

Number Busy

Average

Half Width

Minimum Value

Maximum Value

Técnico

1.0000

(Insufficient)

0.00

1.0000

Number Scheduled

Average

Half Width

Minimum Value

Maximum Value

Técnico

1.0000

(Insufficient)

1.0000

1.0000

Scheduled Utilization

Value

Técnico

1.0000

Total Number Seized

Value

Técnico

30.0000

User Specified

Counter

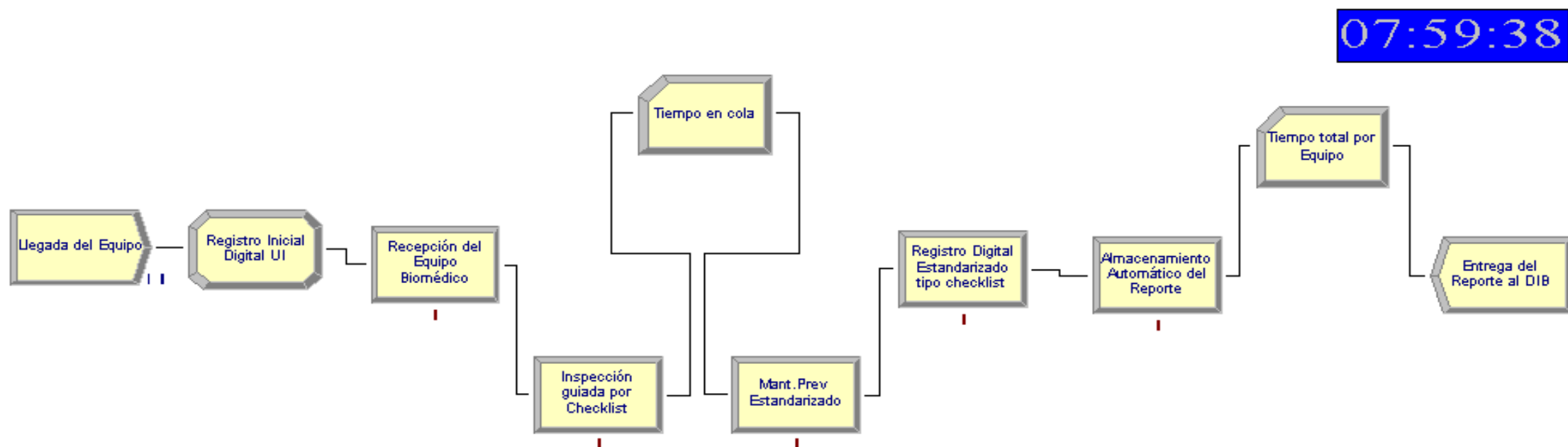
Count

Value

Counter 110.0000

En contraste, el escenario B corresponde a la simulación del proceso de mantenimiento preventivo incorporando la propuesta de estandarización mediante el uso de una interfaz digital con *checklist* estructurado para el registro del servicio técnico. La integración del registro digital dentro del flujo de mantenimiento elimina la fase de documentación manual posterior a la intervención, lo cual reduce tiempos improductivos y mejora la continuidad del proceso. Estudios previos han señalado que la incorporación de herramientas digitales y *checklists* estructurados contribuye a mejorar la trazabilidad del mantenimiento y a disminuir la variabilidad en la ejecución de las actividades técnicas (Arab-Zozani et al., 2021). En la *Figura 39* se presenta el diagrama del modelo desarrollado en el software Arena, donde se observa un flujo de trabajo continuo que integra la recepción del equipo biomédico, la inspección visual guiada por *checklist*, la ejecución del mantenimiento preventivo estandarizado, el registro digital del mantenimiento y el cierre automático del reporte de servicio, eliminando la fase de documentación manual posterior al mantenimiento presente en el escenario sin estandarización.

Figura 39. *Modelo de simulación con estandarización*



Los resultados de la simulación indican que, durante una jornada laboral simulada de ocho horas, el sistema procesa un total de diez equipos biomédicos, tal como se muestra en la *Figura 40*. Este valor refleja el comportamiento operativo del modelo bajo condiciones de estandarización del proceso y permite observar un incremento en la cantidad de equipos atendidos en el mismo periodo de tiempo, asociado a la reducción de los tiempos administrativos y a la integración del registro digital dentro del flujo de mantenimiento.

Figura 40. *Equipos atendidos con estandarización*



El tiempo total de atención por equipo biomédico presenta un valor promedio de 2.15 horas, con una distribución caracterizada por una dispersión reducida entre los tiempos mínimos y máximos registrados, como se observa en la *Figura 41*. Esta distribución evidencia un comportamiento más homogéneo del proceso, donde los equipos siguen una secuencia de actividades definida y tiempos similares para cada etapa, reduciendo la variabilidad en la duración total del mantenimiento preventivo. La clasificación de los tiempos por tipo de actividad, presentada en la *Figura 42*, muestra que la mayor proporción del tiempo total corresponde a actividades con valor agregado, principalmente asociadas a la inspección visual guiada y a la ejecución del mantenimiento preventivo estandarizado. El tiempo no agregado de valor se concentra en actividades administrativas de corta duración, relacionadas con el registro digital del mantenimiento y el cierre automático del reporte, mientras que los tiempos de espera presentan valores bajos, indicando que los equipos no permanecen largos periodos en cola antes de ser atendidos.

Figura 41. Distribución del tiempo de atención con estandarización

13:58:29

Category Overview

enero 17, 2026

Unnamed Project

Replications: 1

Time Units: Hours

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Inspección guiada por Checklist.Queue	0.1468	(Insufficient)	0.07293958	0.2810
Mant.Prev Estandarizado.Queue	0.3925	(Insufficient)	0.1195	0.7183
Recepción del Equipo Biomédico.Queue	0.1418	(Insufficient)	0.00	0.5892
Registro Digital Estandarizado tipo checklist.Queue	0.4097	(Insufficient)	0.1055	0.7641

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Inspección guiada por Checklist.Queue	0.04589372	(Insufficient)	0.00	2.0000
Mant.Prev Estandarizado.Queue	0.1227	(Insufficient)	0.00	1.0000
Recepción del Equipo Biomédico.Queue	0.04431979	(Insufficient)	0.00	2.0000
Registro Digital Estandarizado tipo checklist.Queue	0.1280	(Insufficient)	0.00	1.0000

El análisis de los tiempos promedio en cola, mostrado en la *Figura 43*, evidencia valores bajos y estables a lo largo del proceso, lo que indica una operación fluida del sistema y la ausencia de acumulaciones significativas de equipos en espera. Este comportamiento se relaciona con la disponibilidad oportuna del recurso técnico y con la eliminación de fases prolongadas de documentación que, en el escenario sin estandarización, generaban retrasos en el inicio del siguiente mantenimiento.

Figura 42. Clasificación de tiempos con estandarización

Entity				
Time				
VA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.8071	(Insufficient)	0.6711	0.8910
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.2474	(Insufficient)	0.2060	0.2725
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	1.0908	(Insufficient)	0.8530	1.6658
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Equipo	2.1453	(Insufficient)	1.8494	2.7237

Figura 43. Tiempos promedio en cola con estandarización

13:58:29

Category Overview

enero 17, 2026

Unnamed Project

Replications: 1Time Units: Hours

User Specified

Tally

Between	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
T_Cola_Técnico	3.3606	(Insufficient)	0.1195	14.6572
Interval	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
T_Tiempo_Total	2.1453	(Insufficient)	1.8494	2.7237

Figura 44. Utilización del recurso técnico con estandarización**Resource****Usage**

Instantaneous Utilization				
	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Técnico	0.3192	(Insufficient)	0.00	1.0000
Number Busy				
	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Técnico	0.3192	(Insufficient)	0.00	1.0000
Number Scheduled				
	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Técnico	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Scheduled Utilization				
	Value			
Técnico	0.3192			
Total Number Seized				
	Value			
Técnico	40.0000			

La utilización del recurso técnico biomédico, presentada en la *Figura 44*, muestra un valor aproximado del 32 %, lo que refleja que el técnico no se encuentra saturado durante la jornada laboral simulada. Este nivel de utilización permite observar que el proceso dispone de capacidad operativa suficiente para atender la demanda modelada sin generar cuellos de botella, manteniendo una distribución equilibrada entre los tiempos dedicados a actividades técnicas y administrativas.

Al contrastar los resultados obtenidos en ambos escenarios de simulación, se observa una diferencia clara en el desempeño del proceso de mantenimiento preventivo. El escenario con estandarización presenta un mayor número de equipos atendidos durante la jornada laboral simulada, acompañado de una reducción en el tiempo total de atención por equipo y de una menor variabilidad en los tiempos de ejecución de las actividades. Los tiempos en cola y los tiempos no agregados de valor se reducen de manera apreciable cuando el registro del mantenimiento se integra al proceso mediante una interfaz digital con *checklist*, mientras que la utilización del recurso técnico se mantiene en niveles que evitan la saturación del sistema. Estas diferencias permiten identificar el impacto operativo de la estandarización del proceso y del uso de herramientas digitales en la gestión del mantenimiento preventivo de equipos biomédicos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación permitió abordar la problemática asociada a la falta de estandarización en los servicios técnicos de mantenimiento biomédico en el ION, mediante la propuesta de un enfoque basado en la integración de herramientas de análisis de datos y modelos de decisión. A partir de la aplicación de algoritmos de árbol de decisiones y análisis de conglomerados K-means, se logró estructurar un modelo funcional orientado a la unificación y organización de las actividades de mantenimiento biomédico, dando cumplimiento al objetivo general planteado.

En relación con el primer objetivo específico, se logró identificar y estructurar los parámetros y atributos técnicos de las herramientas árbol de decisiones y K-means, determinando configuraciones adecuadas para el procesamiento de información técnica proveniente de manuales de mantenimiento. Se definieron criterios como número de clústeres, método de vectorización, variables de clasificación y estructura jerárquica de decisión, lo que permitió establecer reglas reproducibles para la agrupación y clasificación de actividades, cumpliendo así con el objetivo específico número uno.

El análisis del estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico en el Instituto Oncológico Nacional permitió identificar una dispersión significativa en la forma en que se documentaban las actividades preventivas y correctivas, así como diferencias en los criterios de redacción, secuencia de ejecución y nivel de detalle entre equipos biomédicos similares. A partir del estudio de los manuales técnicos utilizados por el servicio biomédico del ION y de la revisión de las actividades registradas en los procedimientos habituales de mantenimiento, se evidenció la ausencia de una estructura homogénea para la organización de componentes, fallas y tareas técnicas. Esta variabilidad generaba tiempos administrativos adicionales, duplicidad de descripciones y limitaciones en la trazabilidad de la información. La información recopilada constituyó la base para la construcción del dataset maestro, posteriormente procesado mediante técnicas de vectorización y agrupamiento con el algoritmo K-means, lo que permitió identificar patrones de similitud entre actividades

técnicamente equivalentes pero redactadas de forma distinta. De igual manera, el algoritmo basado en árbol de decisiones estructuró reglas de clasificación consistentes según tipo de mantenimiento, componente y nivel de detalle, transformando la información heterogénea del ION en una estructura técnica estandarizada, cumpliendo así con el objetivo específico número dos.

El diseño del algoritmo de estandarización basado en árbol de decisiones y K-means permitió generar *checklists* estructurados con distintos niveles de detalle, adaptables a las necesidades operativas del personal técnico del ION. La combinación de clasificación supervisada y agrupamiento no supervisado favoreció la construcción de reglas técnicas coherentes y la organización sistemática de componentes, fallas y actividades de mantenimiento. Esta etapa consolidó la propuesta metodológica planteada, cumpliendo así con el objetivo específico número tres de la investigación.

La verificación de la optimización lograda se realizó mediante la simulación del proceso en el software Arena, comparando escenarios con y sin estandarización dentro de un modelo representativo del flujo operativo del ION. Los resultados evidenciaron una reducción en los tiempos de espera en cola, una disminución de actividades no agregadas de valor, una mayor homogeneidad en los tiempos de atención por equipo y un incremento en la cantidad de equipos atendidos durante la jornada laboral simulada. Se observó además una utilización más equilibrada del recurso técnico biomédico, evitando condiciones de saturación y reduciendo cuellos de botella. Estos hallazgos permitieron visualizar el impacto operativo de la propuesta en términos de eficiencia y aprovechamiento de recursos, cumpliendo así con el objetivo específico número cuatro.

Desde la perspectiva de la ingeniería biomédica y la gestión de tecnología en salud, la propuesta representa un aporte metodológico al integrar aprendizaje automático, estructuración documental y simulación de procesos en un mismo esquema de intervención aplicado al contexto real del ION. Este enfoque fortalece la trazabilidad de las actividades de mantenimiento, mejora la coherencia en la documentación técnica y proporciona una base objetiva para la toma de decisiones en el entorno hospitalario.

El alcance de los resultados debe interpretarse considerando que el estudio se fundamentó en análisis documental y simulación de procesos, sin intervención directa sobre equipos clínicos reales. No obstante, estas condiciones permitieron evaluar de manera controlada el comportamiento del sistema bajo un esquema estandarizado y analizar su potencial impacto en la gestión del mantenimiento biomédico institucional.

En función de lo desarrollado, se concluye que la estandarización de los servicios técnicos de mantenimiento biomédico mediante un algoritmo basado en árbol de decisiones y K-means constituye una estrategia viable y técnicamente fundamentada para optimizar la gestión del mantenimiento hospitalario en el ION, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa, consistencia documental y alineación con principios de calidad y seguridad tecnológica.

6.2 Recomendaciones

El desarrollo de la presente investigación permitió identificar diversas limitaciones inherentes al alcance metodológico y a las condiciones de análisis establecidas. Entre ellas, se reconoce que el modelo propuesto se fundamentó principalmente en el análisis documental de manuales técnicos y en datos estructurados a partir de dichos documentos, lo cual limita la incorporación de variaciones propias de la ejecución real del mantenimiento en entornos hospitalarios. De igual forma, la evaluación del impacto de la estandarización se realizó mediante simulación de procesos, sin intervención directa sobre equipos biomédicos en operación, lo que restringe la observación de factores humanos, organizacionales y operativos que pueden influir en el desempeño del mantenimiento.

En este sentido, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el alcance del modelo mediante su implementación en contextos reales de operación, incorporando datos históricos de órdenes de trabajo, tiempos reales de intervención y registros de fallas provenientes de sistemas de gestión hospitalaria. La integración de esta información permitiría fortalecer el modelo propuesto y evaluar su comportamiento bajo condiciones dinámicas propias del entorno clínico.

Se sugiere también, extender la aplicación del algoritmo a un mayor número de equipos biomédicos y a diferentes categorías de dispositivos médicos, con el propósito de analizar la escalabilidad del sistema y su adaptabilidad a instituciones con distintos niveles de complejidad tecnológica. De igual forma, resulta pertinente explorar la incorporación de técnicas de mantenimiento predictivo y modelos de aprendizaje automático más avanzados, que permitan anticipar fallas y optimizar la planificación del mantenimiento a partir de patrones históricos.

Desde una perspectiva ética y profesional, se recomienda que cualquier implementación futura del modelo considere el uso responsable de la información técnica y operativa, garantizando la confidencialidad de los datos institucionales y el respeto por los criterios profesionales del personal técnico involucrado. La participación de expertos debe mantenerse como un elemento clave en la validación y ajuste de los modelos propuestos, asegurando que las decisiones automatizadas no sustituyan el juicio técnico, sino que lo respalden.

Como última recomendación, se sugiere que el desarrollo futuro de herramientas similares incorpore lineamientos claros de seguridad y gestión del riesgo tecnológico, de manera que la estandarización de los procesos de mantenimiento contribuya no solo a la eficiencia operativa, sino también al fortalecimiento de la calidad y seguridad de los servicios de salud.

Referencias bibliográficas

Adeyemi, O., et al. (2022). Paper-based maintenance systems in Sub-Saharan Africa: Risks and alternatives. African Journal of Health Sciences.

Aldas Santiago; "ESTANDARIZACIÓN DE PROCESOS DE LA EMPRESA TEXTILES TÉCNICOS". Edu.ec. Recuperado el 8 de junio de 2025, de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstreams/84412cb5-e91d-4765-a0e1-1ae5a3cc066f/download>

Arab-Zozani, M., Imani, A., Doshmangir, L., Dalal, K., & Bahreini, R. (2021). Assessment of medical equipment maintenance management: proposed *checklist* using Iranian experience. Biomedical Engineering Online, 20(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s12938-021-00885-5>

Arismendi Espinosa, I. C. (2004). Modelo gerencial para el mantenimiento de equipo biomédico [Monografía de grado, Universidad Industrial de Santander].

Asociación Colombiana de Hospitales y Clínicas. (2017). Guía para la gestión de mantenimiento de equipos biomédicos. https://achc.org.co/documentos/Guia_Gestion_Mantenimiento_Equipos_Bio medicos.pdf

Asociación Española de Ingeniería Hospitalaria. (2018). Guía de mantenimiento de equipos electromédicos. <https://www.aeih.org/documentos/guia-mantenimiento-equipos-electromedicos.pdf>

Barros, R. C., de Carvalho, A. C. P. L. F., & Freitas, A. A. (2015). Automatic design of decision-tree induction algorithms. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14231-9>

Basave Torres, R. I. (2005). Mejoramiento al algoritmo K-means estándar [Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].

<https://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/MC%20Rosy%20Ilda%20Basave%20Torres%202005.pdf>

Baura, G. D. (2011). *Medical device technologies: A systems based overview using engineering standards*. Academic Press.

Becciu, S. (2023, marzo 6). *Checklist: ejemplos y aplicación en empresas*. Full Audits. <https://fullaudits.com/%F0%9F%93%8Cchecklist-ejemplos-y-aplicacion-en-empresas/>

Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.

Bouza, C. N., & Santiago, A. (2014). La minería de datos: Árboles de decisión y su aplicación en estudios médicos. <https://www.researchgate.net/publication/268516570>

Carlos Coronel, S. M. (s/f). Database System Design, Implementation and Management (12th Edition) BY Carlos Coronel & Steven Morris. <https://archive.org/details/DatabaseSystemDesignImplementationAndManagement12thEditionBYBYCarlosCoronelStevenMorris/page/n223/mode/2up>

Clark, A., & contributors. (2023). *OpenPyXL: A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files*. <https://openpyxl.readthedocs.io>

Costilla Díaz, C. I. (2023). Modelo de estandarización en la gestión de mantenimiento para equipos de laboratorio de suelos en la empresa IVERSA SAS [Tesis de especialización, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS. <https://noesis.uis.edu.co/bitstreams/11bef0da-afce-42e0-8f83-7c9121cf65aa/download>

D. Rubio, G. Plattoni, M. Lencina, A.Valdez y S. Ponce (2016) Multicenter analysis of biomedical equipment failures in Latin America. Journal of Clinical Engineering, 43(2), 78-85. (PDF) Estudio del comportamiento de fallas en equipamiento electromédico

Dupouy Berríos, C. (2014). Aplicación de árboles de decisión para la estimación del escenario económico y la estimación de movimiento de la tasa de interés en Chile [Tesis de magíster, Universidad de Chile]. Repositorio Académico Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117556/Dupouy%20Berrios%20Carlos.pdf?sequence=1>

Díaz Lorenzo, A. (2018). Desarrollo de una mejora al algoritmo K-means orientada al paradigma de Big Data [Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México]. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5875>

E.S.E. Hospital La María. (2022). Plan de Mantenimiento de Equipos Biomédicos Año 2024. Recuperado de: <https://lamaria.gov.co/wp-content/contenido/Transparencia/planes/planes-institucionales/2024/PLAN%20DE%20MANTENIMIENTO%20DE%20LA%20PLANTA%20FISICA%20Y%20EQUIPOS%202024.pdf>

Espinosa, I. C. A. (2004). Modelo gerencial para el mantenimiento de equipo biomédico [Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/443c3fc1-94a2-4554-9f4a-81018e0b5904/content>

Farragher, M. (2021, octubre 5). *Easy K-means clustering with C# and ML.NET*. Medium. <https://mdfarragher.medium.com/easy-k-means-clustering-with-c-and-ml-net-7b154ccd219e>

Feigenbaum, A. V. (2005). Total quality control (4th ed.). McGraw-Hill. Total quality control: Feigenbaum, A. V. (Armand Vallin) : Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive

Flick, U. (2015). Introducción a la investigación cualitativa (4.^a ed.). Morata.

Frontiers. (2021). Prioritisation Assessment and Robust Predictive System for Medical Equipment: A Comprehensive Strategic Maintenance Management. Frontiers in Public Health. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.782203>

Galeano López, D. A. (2023). Desarrollo de herramienta digital para la gestión del mantenimiento de equipos biomédicos en la Subred Integrada de Servicios de Salud Norte [Tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2550>

Gallo Poma, Josselyn Natalia; Propuesta de estandarización de procesos productivos a una asociación de Mypes del sector de calzado en Lima. Universidad Peruana de ciencias aplicadas, 2013. Edu.pe. Recuperado el 8 de junio de 2025, de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/337020>

Géron, A. (2022). *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow*. O'Reilly.

Groover, M. P. (s/f). Automation, production systems, and computer integrated manufacturing (M. P. Groover, Ed.). Prentice-Hall. Automation, production systems, and computer integrated manufacturing: Groover, Mikell P., 1939- : Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive

Güçdemir, H., & Ilgın, M. A. (2023). A Clustering-based Approach for Maintenance Prioritization of Medical Devices in a New Hospital. Yüzüncü Yıl Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28(3), 993-1001.
<https://doi.org/10.53433/yyufbed.1294093>

Han and Kamber: Data Mining---Concepts and Techniques, 2nd ed., Morgan Kaufmann, 2006. (s/f). Illinois.edu. Recuperado de https://hanj.cs.illinois.edu/bk3/bk3_slidesindex.htm

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2.^a ed.). Springer.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.

HiveMQ. (2023). Machine Learning in IIoT: Using K-means Clustering for Predictive Maintenance and OEE. (hivemq.com)

Huallpa Condori, J. G. (2020). Diseño y elaboración de un manual para el mantenimiento del sistema de iluminación de la empresa industrial textil KUNAN S. A., Arequipa, 2018 [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Universidad Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9439/4/IV_FIN_108_TE_Huallpa_Condori_2020.pdf

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

International Organization for Standardization. (2004). ISO/IEC Guide 2:2004 - Standardization and related activities — General vocabulary. ISO.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001:2015 - Quality management systems — Requirements. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 13485:2016 - Medical devices — Quality management systems — Requirements for regulatory purposes. ISO.

José, Á., Medrano Márquez, V., & González Ajuech, V. M. (s.f.). Mantenimiento: Técnicas y aplicaciones industriales.

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). Juran's quality handbook (5th ed.). McGraw-Hill.

[https://books.google.com/books?id=moURDQAAQBAJ&q=Juran,+J.+M.,+%26+Godfrey,+A.+B.+\(1999\).+Juran%27s+quality+handbook+\(5th+ed.\).+McGraw-Hill.&dq=Juran,+J.+M.,+%26+Godfrey,+A.+B.+\(1999\).+Juran%27s+quality+handbook+\(5th+ed.\).+McGraw-Hill.&hl=es&newbks=1&newbks_redir=0&sa=X&ved=2ahUKEwiw9bz74_yNAxUcVTABHQrhI8wQ6AF6BAgGEAM](https://books.google.com/books?id=moURDQAAQBAJ&q=Juran,+J.+M.,+%26+Godfrey,+A.+B.+(1999).+Juran%27s+quality+handbook+(5th+ed.).+McGraw-Hill.&dq=Juran,+J.+M.,+%26+Godfrey,+A.+B.+(1999).+Juran%27s+quality+handbook+(5th+ed.).+McGraw-Hill.&hl=es&newbks=1&newbks_redir=0&sa=X&ved=2ahUKEwiw9bz74_yNAxUcVTABHQrhI8wQ6AF6BAgGEAM)

Kavinraj, M., Manivannan, K., & Bharathidasan, T. (s. f.). Standard list of medical equipment & their technical specifications [PDF]. Academia.edu. (PDF) STANDARD LIST OF MEDICAL EQUIPMENT & THEIR TS

Khandpur, R. S. (2014). *Handbook of biomedical instrumentation* (3rd ed.). McGraw Hill Education India. <https://zlib.pub/book/handbook-of-biomedical-instrumentation-2g1e159auplg>

Kozak, J. (2019). Decision tree and ensemble learning based on ant colony optimization. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93752-6>

Levin, R. I., & Rubin, D. S. (2010). *Estadística para administración y economía* (7.^a ed.). Pearson Educación.

Mahfoud, H., Barkany, A. E., & Biyaali, A. E. (2016). A hybrid decision-making model for maintenance prioritization in health care systems. *American Journal of Applied Sciences*, 13, 439–450.
<https://doi.org/10.3844/AJASSP.2016.439.450>

Mancuzo, G. (2020, septiembre 17). Evolución del Mantenimiento hasta la Actualidad. Comparasoftware.com.

<https://blog.comparasoftware.com/evolucion-del-mantenimiento/>

McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. En *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*

Ministerio de Salud. (2019, 4 de octubre). Decreto Ejecutivo No. 490, que reglamenta la Ley 90 de 26 de diciembre de 2017 sobre dispositivos médicos y productos afines, conforme fue modificado por la Ley No. 92 de 12 de septiembre de 2019 [Gaceta Oficial No. 28 875-A]. República de Panamá.
<https://vlex.com.pa/vid/decreto-ejecutivo-n-490-928082395>

Ministerio de Salud. (2024). Actualizan vigilancia de dispositivos médicos.
<https://minsa.gob.pa/noticia/actualizan-vigilancia-de-dispositivos-medicos>

Ministerio de Salud. (s.f.). Catálogo de Equipos Biomédicos.
https://appwebs.minsa.gob.pa/cct/Consultas/frmCRITERIOS_Criterios.aspx?IdArea=1

Ministerio de Salud de Argentina. (2010). Manual de mantenimiento preventivo de equipos médicos.
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_mantenimiento_preventivo_equipos_medicos.pdf

Ministerio de Salud de Chile. (2014). Manual de mantenimiento de equipos médicos.
<https://www.minsal.cl/portal/url/item/722c3a2a3a2b4f4de04001011f011398.pdf>

Mitchell, T. M. (1997). Machine Learning textbook. McGraw-Hill. (s/f). Cmu.edu.
Recuperado de <https://www.cs.cmu.edu/~tom/mlbook.html>

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied statistics and probability for engineers* (7th ed.). Wiley.

Montilla Montaña, C. A. (2019). Mantenimiento industrial y su administración. Universidad Tecnológica de Pereira.

Mora Gutiérrez, L. A. (2009). Mantenimiento: Planeación, ejecución y control. Alfaomega Grupo Editor.

Moubray, J. (2001). Reliability-centered maintenance (2nd [rev.] ed). Industrial Press. Reliability-centered maintenance: Moubray, John: Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive

Murillo, W., & Mancera, F. C. (2013). Caracterización de la gestión del mantenimiento de equipo biomédico en servicios de urgencia de clínicas y hospitales de Medellín en el período 2008–2009. *Revista Ciencias de la Salud*, 11(1), 35–44.
<https://doi.org/10.12804/REVISTAS.UROSARIO.EDU.CO/REVSALUD/A.2457>

Neovero Sistemas. (2018). IoT, Big Data e Inteligencia Artificial en la gestión del mantenimiento de equipamientos biomédicos y hospitalarios.
<https://es.neovero.com/iot-big-data-e-inteligencia-artificial-en-la-gestion-del-mantenimiento-de-equipamientos-biomedicos-y-hospitalarios/>

Ngrok Inc. (2023). *Ngrok secure tunnels*. <https://ngrok.com>

Organización Mundial de la Salud. (2011). Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos (Serie de Documentos Técnicos de la OMS sobre Dispositivos Médicos). https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44830/9789243501536_spa.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2011a). Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44830/9789243501536_spa.pdf

Organización Panamericana de la Salud. (2011). Organización y gestión integral de mantenimiento: Serie de documentos técnicos sobre dispositivos médicos. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44830/9789243501536_spa.pdf

Organización Panamericana de la Salud. (2012). Gestión de tecnologías en salud. Feb, 1. (s/f). Evaluación de tecnologías sanitarias aplicada a los dispositivos médicos [OMS 2012]. Paho.org. Recuperado de <https://www.paho.org/es/documentos/evaluacion-tecnologias-sanitarias-aplicada-dispositivos-medicos-oms-2012>

Organización Panamericana de la Salud. (2025, febrero 14). Panamá avanza en la transformación digital hacia la modernización de su sistema de salud. <https://www.paho.org/es/noticias/14-2-2025-panama-avanza-transformacion-digital-hacia-modernizacion-su-sistema-salud>

Oropeza, A., Roman, R., & Parra, C. (2022). CMMS IN MULTI-CULTURAL ENVIRONMENTS. Lessons learned from implementing a smart maintenance platform around the world. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15089.15205>

Oshiyama, N. F., Silveira, A. C., Bassani, R. A., & Bassani, J. W. M. (2014). Medical equipment classification according to corrective maintenance data: a strategy based on the equipment age. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 30(1), 64–69. <https://doi.org/10.4322/rbeb.2013.045>

PDCA Home. (s.f.). *Checklist* / Listas de chequeo: ¿Qué es un *checklist* y cómo usarlo? Recuperado el 10 de junio de 2025, de <https://www.pdcahome.com/check-list/>

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.

PRIETO GARCÍA, Carlos. Trabajo gestión de calidad en mantenimiento. Universidad de Sevilla. 2010 Gestion de La Calidad en Mantenimiento | PDF | Gestión de la calidad | Planificación

Python Software Foundation. (2023). *Python language reference*. <https://www.python.org>

Quinlan, J. R. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann.

República de Panamá. (1997). Ley 23 del 15 de julio de 1997. Gaceta Oficial. LEY No.23 DE 15-07-1997 (Nº23) POR LA CUAL SE APRUEBA EL ACUERDO DE MARRAKECH, CONSTITUTIVO DE LA ORGANIZACION MUNDIAL DE COMERCIO; EL PROTOCOLO DE ADHESION DE PANAMA A DICHO ACUERDO JUNTO CON SUS ANEXOS Y LISTA DE COMPROMISOS; SE ADECUA LA LEGISLACION.

ReportLab Inc. (2023). *ReportLab open-source PDF library*.
<https://www.reportlab.com>

Rockwell Automation. (2022). *Arena simulation software*.
<https://www.rockwellautomation.com>

Rodríguez Gómez, G., Gil Flores, J., & García Jiménez, E. (1996). Metodología de la investigación cualitativa. Aljibe.

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. B. (2014). Metodología de la investigación (6.^a ed.). McGraw-Hill.

Sanga Títalo, J. A. (2021). Sistematización del plan de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos biomédicos del Hospital Regional Moquegua, año 2019 [Tesis de licenciatura, Universidad José Carlos Mariátegui].
<https://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/1135>

Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA. (s.f.). Manual de mantenimiento completo. Sistema de Bibliotecas SENA. <http://biblioteca.sena.edu.co/>

Sociedad Española de Electromedicina e Ingeniería Clínica. (2019). Recomendaciones para la gestión del mantenimiento de equipos médicos.
[https://www.seeic.org/documentos/Recomendaciones Gestion Mantenimiento Equipos Medicos.pdf](https://www.seeic.org/documentos/Recomendaciones_Gestion_Mantenimiento_Equipos_Medicos.pdf)

State Council of Educational Research and Training, Kerala. (2020). Biomedical Equipment Technology [Manual técnico]. <https://scert.kerala.gov.in/wp-content/uploads/2020/06/05-bio-medical%20equipment%20technology.pdf>

Streamlit Inc. (2023). *Streamlit documentation*. <https://docs.streamlit.io>

- Tafurt López, A. M. (2012). Estandarización de los procesos del área de mantenimiento de los laboratorios de las facultades de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud de la Universidad ICESI [Tesis de pregrado, Universidad ICESI]. Repositorio Universidad ICESI. <http://hdl.handle.net/10906/68610>
- Tamayo y Tamayo, M. (2009). El proceso de la investigación científica (5.^a ed.). Limusa Noriega.
- Tan, P.-N., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). Introduction to data mining. Umn.edu. Recuperado de <https://www-users.cse.umn.edu/~kumar001/dmbook/index.php>
- Universidad Autónoma de Occidente. (s.f.). Manual de protocolos de mantenimiento de equipos. <https://red.uao.edu.co/bitstreams/35393bca-a894-49a8-82ac-2febac0eff97/download>
- Vidal Chaga, L. (2020). Herramienta de apoyo a la gestión de equipos biomédicos [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=kfes3eD-x2Q>
- Wireman, T. (2005). Developing performance indicators for managing maintenance (2nd ed.). Industrial Press. Developing Performance Indicators for Managing Maintenance - Google Books
- Zhu, X., Sun, J., He, Z., Jiang, J., & Wang, Z. (2024). Staleness-reduction mini-batch K-means. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 35(10), 14424–14436. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3279122>

Anexos

Anexo 1. Formulario de validación del instrumento tipo encuesta

INFORME DE VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO POR JUICIO DE EXPERTOS

1. INTRODUCCIÓN

Esta tesis titulada " **Estandarización de los Servicios Técnicos de Mantenimiento en Equipos Biomédicos en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá mediante la Aplicación de Algoritmos de Decisión y Análisis de Conglomerados**" tiene como objetivo general estandarizar los servicios técnicos de mantenimientos en equipos biomédicos en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá aplicando un algoritmo basado en árbol de decisiones y Kmeans.

El estudio emplea un enfoque aplicado, cualitativo y descriptivo, de diseño no experimental, de campo como estudio de caso y transversal. Para recolectar los datos, se ha desarrollado un cuestionario dirigido a 5 profesionales expertos en el campo biomédico. A continuación, se presenta el proceso de validación del instrumento mediante juicio de expertos.

2. DATOS GENERALES DEL EXPERTO EVALUADOR

Ítem	Información
Nombre completo	
Título académico más alto	
Área de especialización	
Institución de afiliación	
Correo electrónico	
Experiencia relevante	

3. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO Y DE LAS VARIABLES

3.1 Objetivo del instrumento

El presente instrumento de recolección de datos seleccionado es una encuesta estructurada, diseñada específicamente para explorar dos aspectos clave del área de mantenimiento técnico biomédico. En primer lugar, permite diagnosticar el nivel actual de estandarización de los protocolos internos utilizados en los procesos de mantenimiento, excluyendo aquellos gestionados por proveedores externos. En segundo lugar, permite recoger la percepción de expertos sobre la pertinencia y potencial de la propuesta del algoritmo basado en árbol de decisiones y KMeans como herramienta de mejora documental y operativa.

La encuesta está dirigida a 5 profesionales del área biomédica, incluyendo personal del Instituto Oncológico Nacional de Panamá y docentes universitarios con experiencia en ingeniería biomédica. La selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico intencional, con base en el juicio propio del investigador y criterios de experiencia técnica en mantenimiento y documentación de equipos médicos.

3.2 Definiciones conceptuales y operacionales de las variables del estudio

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Estandarización de servicios técnicos biomédicos <i>(Variable dependiente)</i>	Es el proceso mediante el cual se organizan, documentan y uniforman las actividades técnicas realizadas sobre equipos médicos para asegurar trazabilidad, reducir errores y mejorar la calidad. Se basa en los principios de calidad propuestos por Juran y Godfrey (1999) y Feigenbaum (2005), y en los criterios de mantenimiento definidos por Mora Gutiérrez (2009) y la OMS (2011).	Se mide a través de tres indicadores: (1) Cumplimiento documental (elementos mínimos del reporte técnico), (2) Calidad técnica de la información (coincidencia con manual del fabricante), (3) Eficiencia operativa (uso del árbol de decisiones). Se evaluará con rúbrica ordinal: bajo (0–50%), medio (51–80%), alto (81–100%).
Aplicación del árbol de decisiones <i>(Variable independiente 1)</i>	Según Barros et al. (2015), un árbol de decisiones es una estructura jerárquica que organiza el conocimiento en forma de reglas secuenciales para facilitar la toma de decisiones técnicas.	Se mide por la precisión de clasificación de escenarios de mantenimiento, la simplicidad del modelo y su interpretabilidad por personal técnico.
Uso de KMeans para clasificación técnica <i>(Variable independiente 2)</i>	KMeans es un algoritmo de agrupamiento no supervisado que permite segmentar equipos biomédicos en función de fallas, módulos y tipo de mantenimiento (Güçdemir & Ilgın, 2023; Frontiers, 2021).	Se considerará efectivo si: (1) permite priorizar las actividades de mantenimiento, y (2) reduce el tiempo de ejecución técnica, medido por simulación en Arena.

4. MATRIZ DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO APLICADO

Objetivo específico	Variable	Dimensión	Indicador	Ítem / Pregunta	¿Pertinente? (Sí/No)	Observaciones del experto
1. Identificar los parámetros y atributos de las herramientas árbol de decisiones y KMeans.	Aplicación del árbol de decisiones	Sistematización de decisiones	% de equipos agrupados correctamente por módulo o tipo de falla.	¿Considera que la herramienta propuesta puede ayudar a reducir la ambigüedad en las actividades técnicas de mantenimiento?		
	Uso de KMeans para clasificación	Segmentación técnica	Tiempo promedio de respuesta según cluster.	¿Esta herramienta contribuiría directamente a resolver debilidades observadas en la documentación técnica actual?		
2. Establecer el estado actual de la gestión de mantenimiento técnico biomédico.	Estandarización de servicios técnicos biomédicos	Protocolización de procesos	Existencia de <i>checklist</i> /documentos normalizados.	¿Su institución posee actualmente protocolos internos estandarizados de mantenimiento para cada equipo, independientemente de los que entrega el proveedor?		

		Homogeneidad de ejecución	% de coincidencia entre actividades ejecutadas y manual técnico.	En su experiencia, ¿las actividades que se redactan como realizadas en los reportes durante los mantenimientos coinciden siempre con lo establecido en los manuales técnicos?		
			Nivel de estandarización observado (bajo, medio, alto).	¿La redacción de los reportes técnicos varía ampliamente entre técnicos y equipos?		
3. Diseñar un algoritmo de estandarización basado en árbol de decisiones y KMeans.	Aplicación del árbol de decisiones	Reducción del error en decisiones.	N.º de decisiones correctas según tipo de mantenimiento.	¿El uso de la herramienta propuesta puede brindar claridad operativa y guiar adecuadamente al técnico en la redacción del reporte?		
	Uso de KMeans para clasificación	Priorización del mantenimiento.	Intervenciones realizadas en orden lógico	¿La clasificación de equipos por mantenimiento similar mediante KMeans permite intervenciones en orden lógico?		
4. Verificar la optimización lograda en los servicios técnicos con el algoritmo de estandarización propuesto mediante el software Arena.	Estandarización de servicios técnicos biomédicos	Trazabilidad optimizada	Cumplimiento de campos esenciales en simulación.	¿La propuesta es viable y oportuna para fortalecer la trazabilidad y coherencia en los procesos de mantenimiento interno?		
		Productividad / capacidad	N.º de equipos atendidos por jornada simulada.	¿Considera que un sistema estandarizado de reportes podría mejorar la productividad del personal técnico?		
		Calidad de servicio	Índice de satisfacción simulada (tiempo / calidad)	¿Visualiza beneficios en simular digitalmente los procesos de mantenimiento técnico antes de implementarlos en campo?		

5. OBSERVACIONES GENERALES DEL EXPERTO

Comentarios generales:

6. VALORACIÓN FINAL DEL INSTRUMENTO

Por favor, seleccione una opción:

- Válido sin observaciones ☐
- Válido con observaciones ☐
- No válido ☐

7. FIRMA DEL EXPERTO

Firma: _____

Nombre completo: _____

Fecha: _____

INSTRUCTIVO PARA EL EXPERTO EVALUADOR

Estimado/a experto/a, gracias por aceptar participar en el proceso de validación del instrumento de recolección de datos para la presente investigación. Este proceso es fundamental para garantizar la validez de contenido del instrumento. A continuación, le explicamos cómo llenar el formato:

SECCIÓN 1: INTRODUCCIÓN

Lea el resumen de la tesis para comprender el contexto del instrumento. No requiere completar nada en esta sección.

SECCIÓN 2: DATOS GENERALES

Complete sus datos profesionales relevantes. Estos se incluirán como respaldo del proceso de validación.

SECCIÓN 3: DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTO

Lea atentamente las definiciones conceptuales y operacionales de cada variable. Esto le permitirá valorar con mayor precisión la pertinencia de los ítems incluidos en el instrumento.

SECCIÓN 4: MATRIZ DE VALIDACIÓN

- Evalúe cada ítem (pregunta o enunciado del cuestionario) en función del **indicador** que pretende medir.
- Marque **"Sí"** si considera que el ítem es adecuado y pertinente.
- Marque **"No"** si considera que el ítem no refleja el indicador.
- En la columna de observaciones puede sugerir mejoras, indicar ambigüedades, redundancias, o recomendar eliminar el ítem.

SECCIÓN 5: OBSERVACIONES GENERALES

Incluya cualquier apreciación sobre la redacción general del instrumento, su estructura, claridad, longitud, organización, adecuación al público objetivo, etc.

También puede opinar sobre los objetivos, variables, dimensiones e indicadores, en el caso de encontrar oportunidades de mejora.

Sus observaciones serán consideradas.

SECCIÓN 6: VALORACIÓN FINAL

Seleccione una de las tres opciones disponibles:

- **Válido sin observaciones:** Si el instrumento es completamente adecuado.
- **Válido con observaciones:** Si el instrumento es adecuado, pero requiere pequeños ajustes.
- **No válido:** Si el instrumento requiere modificaciones mayores o rehacerse.

7: FIRMA

Firme, rellene su nombre completo y fecha en el documento para registrar formalmente su participación.

Anexo 2. Carta del Profesor(a) de español

Panamá, 19 de febrero del 2026.

Señores

UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ

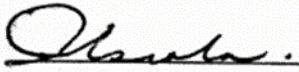
E. S. D.

Estimados Señores:

La suscrita notifica haber revisado por solicitud de la estudiante Alexandra Marié Rivera Fossatti, con cédula de identidad personal número: 8-987-940, el proyecto de Investigación Final de Graduación titulado:

“Estandarización de los Servicios Técnicos de Mantenimiento en Equipos Biomédicos en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá mediante la Aplicación de Algoritmos de Decisión y Análisis de Conglomerados”, y a su vez doy fe de que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Atentamente

 (2026-003)

Firma del Profesor (a) de Español

Nombre del o la profesora: Raquel Elida Escala Díaz

Cédula de identidad: 8-376-39

NOTA: Adjunto diploma y documento de identidad personal.

REPÚBLICA DE PANAMÁ
TRIBUNAL ELECTORAL

Raquel Elida Escala Diaz

NOMBRE USUAL:
FECHA DE NACIMIENTO: 27-MAY-1971
LUGAR DE NACIMIENTO: PANAMÁ, PANAMÁ
SEXO: F TIPO DE SANGRE:
EXPEDIDA: 06-JUN-2019 EXPIRA: 06-JUN-2029

5-376-39



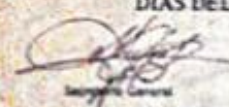
UNIVERSIDAD DE PANAMA
LA FACULTAD DE
Humanidades

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE

Raquel Elida Escala Diaz

HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR AL TITULO DE
**Licenciada en Humanidades
con Especialización en Español**

Y EN CONSECUENCIA, SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMA A LOS **tres**
DIAS DEL MES DE **Marzo** DE MIL NOVECIENTOS **noventa y siete**


Rector
Diploma: 54156
Identificación Personal: 5-376-39


Decano


Secretario





UNIVERSIDAD DE PANAMA



0004692

UNIVERSIDAD DE PANAMA

LA FACULTAD DE

Ciencias de la Educación

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE

Raquel Elida Escala Díaz

HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR, CON ALTOS HONORES, AL TÍTULO DE

**Profesora de Educación Media con
Especialización en Español**

Y EN CONSECUENCIA SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMÁ, A LOS *diecinueve*
DÍAS DEL MES DE *junio* DEL AÑO DOS MIL *siete*.

Diploma 148,376

Identificación Personal 8-376-39

Secretaría General

Decano

Rector

Anexo 3. Formulario de Entrega de Proyecto Final



SEDE CENTRAL

FORMULARIO DE ENTREGA DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Nota: Llenar este formulario a máquina de escribir. Entregar este formulario junto con el Proyecto Final de Graduación y los Paz y Salvo

Por este medio, notifico que el Proyecto

Titulado “**Estandarización de los Servicios Técnicos de Mantenimiento en Equipos Biomédicos en el Instituto Oncológico Nacional de Panamá mediante la Aplicación de Algoritmos de Decisión y Análisis de Conglomerados**”

Correspondiente al estudiante: **Alexandra Marié Rivera Fossatti**

De la carrera: **Ingeniería Biomédica e Instrumentación**

Doy fe que he revisado y autorizado la entrega del Proyecto Final de Graduación (Documento Final), a Secretaría Académica, por reunir los requisitos y acatamientos exigidos por la Universidad Latina de Panamá y sugiere se le asigne la fecha para su defensa oral (sustentación).

Autorización del Director del Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor Director: **Alfredo Enrique Lescher Soto**

Firma de Autorización

Teléfono: **6126-3467**

Autorización del Profesor responsable del Curso Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor: **Alfredo Enrique Lescher Soto**

Firma de Autorización

Teléfono: **6126-3467**

En caso de revisión de un Profesor de Español

Notifico que doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Nombre del Profesor de español: **Raquel Elida Escala Díaz**

Autorización

Firma del Estudiante

Fecha de Entrega _____

Recibido por _____ Fecha _____