

DESARROLLO DE UN APLICATIVO WEB PARA EL APOYO DE IDENTIFICACIÓN DE FALLAS COMUNES EN MÁQUINAS DE ANESTESIA EN UN HOSPITAL DE ALTA COMPLEJIDAD

DAVID LEONARDO GRACIA RAMIREZ

Trabajo Dirigido

Tutor

MSc PEDRO ANTONIO AYA PARRA



**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA
BOGOTÁ D.C
2022**

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es producto del esfuerzo en el que directa o indirectamente, fueron participes distintas personas, opinando, corrigiendo para el desarrollo correcto del mismo. Llegando así a cumplir los objetivos propuestos en el trabajo de grado.

En primer lugar, agradezco a Dios y a mi familia por acompañarme en este proceso educativo por brindarme el apoyo incondicional a la hora de realizarlo en especial a mi mamá y papá por la motivación constante, además del arduo trabajo realizado para brindarme las mejores oportunidades, lo agradezco mucho. A mi hermana **Angie** por creer siempre en mí y brindarme su apoyo incondicional. María José por el apoyo frente a las dificultades a lo largo del desarrollo del proyecto y por los aportes en la redacción del documento, **Christopher** y **Oksana** por el absoluto respaldo en situaciones difíciles en el exterior, además de la motivación reiterada. A mis amigos de la universidad **Federico Duque, Santiago Sánchez, Karol Sánchez, Mario Triana, Carlos Bolaños, Yersson López, Felipe Nieto y Anderson Colorado** por ser siempre personas de confianza e incondicionales conmigo en el desarrollo de toda la universidad.

A mi director de tesis el ingeniero y magister en ciencias **Pedro Antonio Aya**, por las horas dedicadas a mi trabajo de grado en conjunto con la excelente disposición a la hora de desarrollar el proyecto, además de las recomendaciones dadas para realizar el mismo. Al equipo de ingenieros de la clínica por la buena comunicación y disposición a la hora de la búsqueda de información acerca de las máquinas de anestesia. Además, al ingeniero y magister en ciencias **Oscar Perdomo Charry** por la ayuda en el desarrollo del algoritmo de identificación de fallas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
3. OBJETIVOS	11
3.1. GENERAL	11
3.2. ESPECÍFICOS	11
4. MARCO TEÓRICO	12
4.1. ANESTESIA GENERAL.....	12
4.2. MÁQUINA DE ANESTESIA	13
5. METODOLOGÍA	21
5.1 REVISIÓN DE LITERATURA	21
5.1.1 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA	22
5.1.2 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	22
5.1.3 FILTRADO Y SELECCIÓN	22
5.2 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	23
5.2.1 EXTRACCIÓN DE DATOS.....	24
5.2.2 FILTRAR Y DIGITALIZAR LOS DATOS	24
5.2.3 ORGANIZACIÓN DATOS.....	24
5.3 DESARROLLO ALGORITMO	26
5.3.1 ORGANIZACIÓN DATOS.....	27
5.3.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	27
5.3.3 DESARROLLO ALGORITMOS	29
5.4 DISEÑO WEB.....	31
5.4.3 MENÚ PRINCIPAL	32
5.4.4 PREDICCIÓN Y RECOMENDACIONES	33
6. RESULTADOS	34
6.1 RESULTADOS IDENTIFICACIÓN DE FALLAS POR FABRICANTE	34
6.2 RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS.....	35
6.3 RESULTADOS INTERFAZ WEB	40
7. DISCUSIÓN.....	43
8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	46
9. CONCLUSIONES	47
10. BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Indicaciones y dosis Benzodicepinas en anestesia [20]	12
Tabla II. Gases anestésicos más utilizados [19]	13
Tabla III. Fallas encontradas fabricante Datex Ohmeda. Fuente propia.....	25
Tabla IV. Fallas encontradas fabricante Drager. Fuente propia	26
Tabla V. Número etiqueta subsistema fabricante Drager	27
Tabla VI. Número etiqueta subsistema fabricante Datex-Ohmeda.....	27
Tabla VII. Puntaje modelos predictivos Machine Learning	35
Tabla VIII. Puntaje de validación cruzada algoritmos	40
Tabla IX. Fallas máquinas de anestesia en hospital	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Organización del sistema de reparto de anestesia general [26]	14
Figura 2. Sistema de alta presión de O ₂ [26]	16
Figura 3. Sistema de media presión [26].....	17
Figura 4. Sistema de baja presión [26].....	18
Figura 5. Sistema respiración máquina de anestesia [34]	19
Figura 6. Etapas desarrollo investigación. Fuente propia	21
Figura 7. Protocolo de búsqueda de información. Fuente propia	21
Figura 8. Diagrama búsqueda bibliográfica. Fuente propia.	23
Figura 9. Adquisición de datos sobre máquinas de anestesia. Fuente propia	23
Figura 10. Etapas del desarrollo del algoritmo identificación fallas. Fuente propia.....	26
Figura 11. Diagrama algoritmo. Fuente propia	30
Figura 12. Algoritmo de para fabricante Datex Ohmeda. Fuente propia.....	30
Figura 13. Algoritmo de para fabricante Dräger	31
Figura 14. Capas del Aplicativo. Fuente propia.....	31
Figura 15. Pestaña acceso personal al aplicativo Web. Fuente propia	32
Figura 16. Pestaña ingreso menú principal aplicativo Web. Fuente propia.	33
Figura 17. Pestaña de resultado de predicción y recomendaciones. Fuente Propia	33
Figura 18. Gráfico de fallas técnicas del fabricante Dräger	34
Figura 19. Gráfico de fallas técnicas del fabricante Datex- Ohmeda.....	35
Figura 20. Prueba del algoritmo Random Forest Dräger (16) incidentes.....	36
Figura 21. Prueba del algoritmo Decision Tree Dräger (16) incidentes.	37
Figura 22. Prueba del algoritmo Random Forest Datex Ohmeda (12) incidentes.....	38
Figura 23. Prueba del algoritmo Decision Tree (12) incidentes.	39
Figura 24. Check List vinculada con el algoritmo. Fuente propia	40
Figura 25. Recomendaciones sistema respiratorio Dräger. Fuente propia.....	41
Figura 26. Formulario web para la recolección de datos	42
Figura 27. Principal categories of equipment involved in incidents [6].....	43

LISTA DE ANEXOS.

Anexo I. Matriz Criterios de Selección Artículos..... 51

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estudio realizado por la Asociación Americana de Anestesiólogos (ASA, por sus siglas en inglés), en la última década se ha visto un aumento considerable en el uso de anestesia general para la mayoría de los procedimientos quirúrgicos debido a que el paciente se induce a un estado inconsciente donde no sentirá ningún tipo de dolor [1]. Sin embargo, el erróneo suministro de agentes anestésicos por parte del anestesiólogo o el mantenimiento deficiente o inadecuado de las máquinas de anestesia, pueden producir efectos secundarios (dolor de cabeza, náuseas, malestar general) o complicaciones graves en el paciente como pérdida de memoria, problemas respiratorios, hipoxia e incluso la muerte [2][3].

Con el paso de los años y el avance de la tecnología, el uso de la anestesia general se ha convertido en un procedimiento más seguro, ya que, según estudios, entre 1954 - 1989, el índice de mortalidad era de 189 pacientes inducidos a anestesia general por cada 10,000 anestesiados [4]. (aprox. 19x1.000) Mientras que entre los años 1990 – 2006 los índices de mortalidad se redujeron a 28 pacientes inducidos a anestesia general por cada 10,000 anestesiados [4]. (aprox. 3x1.000) Sin embargo, aún existen riesgos con relación a la administración errada en la concentración de gases anestésicos, lo cual puede generar toxicidad al paciente generando complicaciones graves al organismo [5].

Según estudio realizado por la Asociación de Anestesia de Gran Bretaña entre los años (2006 - 2008) se encontraron 195,912 incidentes médicos en el territorio británico de los cuales 15,457 incidentes (~8%) fueron debido a una falla del dispositivo o equipo médico, de los cuales, 1,029 incidentes (~0,5% del total de incidentes) fueron relacionados con la unidad de anestesia. Estos incidentes se categorizaron según el subsistema de la máquina de anestesia en el que se encontró la falla. De acuerdo con el estudio, las categorías con más porcentaje de incidencia fueron los problemas encontrados en el monitoreo, problemas en el ventilador, problemas en la monitorización de gases [6].

En cuanto al ámbito clínico han surgido diferentes reglamentaciones y protocolos desarrolladas por organizaciones internacionales como lo son: World Federation of Societies of Anaesthesiologists (*WFSA*), American Society of Anesthesiologists (*ASA*), The Association of Anaesthetists of Great Britain and Ireland (*AAGBI*), Food and Drug Administration (*FDA*). Donde establecen el correcto uso de la unidad anestesia en conjunto con los procedimientos necesarios a la hora de realizar el mantenimiento. Asimismo, estas organizaciones establecen la necesidad de poseer el stock de los componentes originales en inventario suficientes para asegurar los diferentes mantenimientos requeridos a las unidades de respaldo requeridas para mitigar la falla de la unidad en operación, evitando posibles complicaciones durante el procedimiento quirúrgico.

Por otra parte, se cuenta con diferentes cursos de capacitaciones de mantenimiento especializados, dados por las compañías fabricantes (Dräger, General Electric) [7][8], esto con el fin de mitigar el problema de una administración errada de agente anestésico causado por fallas técnicas de la máquina de anestesia. De esta manera se puede evitar la toxicidad al paciente la cual es consecuencia de una alta concentración de óxido nitroso u otro agente anestésico. Por otra parte, algunos investigadores han desarrollado protocolos

de chequeo (Checklist) para que el personal técnico pueda revisar cada uno de los subsistemas de la unidad de anestesia con el fin de disminuir los riesgos en el paciente. Sin embargo, este protocolo se enfoca más hacia la seguridad eléctrica del paciente dejando en un segundo plano el sistema neumático [9].

Como referencia, en Colombia según estadística realizada a partir de datos recopilados directamente de hospitales y de modelos estadísticos del mercado por Statista en colaboración con Global health intelligence se realizó el estudio “Installed base of select types of hospital equipment in Colombia in 2021” [10]. Donde se encontró que 2,502 unidades de anestesia fueron instaladas en el país en el año 2021 siendo el equipo médico con mayor número de unidades instaladas. Por lo que el resultado de la presente investigación materializada en el Aplicativo WEB se constituye en un apoyo de alto valor para el personal de Ingeniería Biomédica por la obtención del diagnóstico de posible falla de forma expedita con alta probabilidad de certeza y el consecuente beneficio en la toma de decisión oportuna y efectiva ante fallas comunes en Máquinas de Anestesia.

2. ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó una revisión de literatura existente acerca de las fallas comunes en la máquina de anestesia a través de bases de datos, buscando antecedentes de estudios, investigaciones, artículos que permitieron construir una base sólida para el desarrollo de la investigación; además, la exploración detallada del estado del arte se delimitó en los últimos seis (6) años para determinar los avances más recientes respecto a la identificación de fallas en las unidades de anestesia comparables.

La investigación inicial localiza el documento titulado *“An Evaluation of Anesthesiologists Present Checkout Methods and the Validity of the FDA Checklist”*. La importancia de este artículo radica en que es una de las primeras investigaciones realizadas en el ámbito de seguridad anestésica donde la Sociedad Americana de Anestesiólogos (ASA) puso en duda la efectividad de la Checklist realizada por la FDA en el año de 1991 [11]. Debido a que en la lista de chequeo no se tenían en cuenta, entre otros, aspectos como la revisión de sistema proporcional de oxígeno / óxido nitroso, las bajas presiones en el suministro de gases.

Por otra parte, se encontraron tres (3) artículos relacionados con el desarrollo de protocolos de chequeo de la unidad de anestesia: (i) El primero titulado *“Anaesthesia machine: checklist, hazards, scavenging”* [12], los investigadores definen un protocolo de chequeo para cada uno de los subsistemas de la unidad de anestesia para evitar posibles fallas durante algún procedimiento médico. (ii) El segundo titulado *“World Health Organization-World Federation of Societies of Anaesthesiologists International Standards for a Safe Practice of Anesthesia”*[13], donde la federación internacional de anestesiólogos propone protocolos de estandarización para el uso seguro de la máquina de anestesia en aspectos relacionados con el monitoreo de parámetros, el uso seguro de agentes anestésicos, así como la instrumentación necesaria de la unidad de anestesia. (iii) El tercero titulado *“Pre-use anaesthesia machine check; certified anaesthesia technician-based quality improvement Audit”* [14]., en esta investigación los autores se enfocan en el chequeo rutinario por parte de los técnicos a partir de los protocolos y si este influye en la identificación de fallas en la máquina de anestesia.

Asimismo, un grupo de investigadores de Bosnia en la Conferencia internacional médica de ingeniería del 2019 presentó el estudio titulado *“Expert System for Performance Prediction of Anesthesia Machines”* [15] el cual consta de un sistema predictivo del rendimiento de la máquina anestesia por medio de Artificial Neural Network and Fuzzy classifier. Con el fin de predecir posibles complicaciones al paciente, teniendo en cuenta parámetros como la concentración de gas, la medición del volumen, el promedio de utilización de la máquina de anestesia, mantenimientos preventivos y las inspecciones visuales de la máquina de anestesia.

Por último, se encontraron dos (2) trabajos de investigación sobre incidentes críticos referentes a fallas técnicas en la unidad de anestesia: (i) el primero titulado *“Safety first: Checking the anaesthesia machine”* [16]. en el cual se realiza investigación acerca de los incidentes críticos por fallas técnicas en la máquina de anestesia debido a una insuficiencia

en el sistema de auto chequeo de la unidad anestesia. (ii) el segundo corresponde a un capítulo de un libro "*Anesthesia Equipment, Principles and Applications, Chapter: Hazards of the anesthesia System*" [17] en este capítulo del libro, el autor hace referencia a complicaciones respiratorias asociadas con fallas en la máquina de anestesia, haciendo énfasis en cada una de las patologías respiratorias (Hipoxemia, Hipercarbia, Hiperoxia, entre otras) en consecuencia a una falla en específico.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el ámbito hospitalario las complicaciones graves causadas a los pacientes que se someten a anestesia general por alguna falla técnica persisten, aunque menores con el estado del arte actual, independientemente de los algoritmos de auto chequeo implementados por los fabricantes y que se realicen los correspondientes mantenimientos; en ese sentido, se propone en este trabajo desarrollar un aplicativo web que provea la información necesaria al personal de ingeniería biomédica de los hospitales para la identificación de las principales fallas de las máquinas de anestesia y su relación entre los subsistemas en general.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Diseñar un aplicativo web que provea la información necesaria al personal de ingeniería biomédica de un hospital de cuarto nivel en Bogotá para la identificación de las principales fallas de las máquinas de anestesia.

3.2. ESPECÍFICOS

- a) Implementar el algoritmo de identificación de fallas en la interfaz Web a partir de la información sobre las intervenciones de mantenimiento reportadas.
- b) Diseñar un formulario web para la recolección de datos sobre los mantenimientos preventivos y correctivos de la máquina de anestesia en el hospital.
- c) Implementar una interfaz web de fácil uso con toda la información acerca de las fallas comunes de la unidad de anestesia en un hospital de cuarto nivel en Bogotá

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ANESTESIA GENERAL

La anestesia general es un procedimiento médico invasivo el cual evita que los pacientes sientan dolor durante procedimientos como una cirugía, pruebas de detección de enfermedad y diagnóstico, extracción de muestras de tejido (Biopsias) entre otros procedimientos. Además, la anestesia general afecta a todo el cuerpo, dejando al paciente en un estado inconsciente con efectos de analgesia, relajación muscular y depresión de los reflejos [18].

Los anestesiólogos administran la anestesia general, ya sea directamente en el torrente sanguíneo o por medio de gases inhalados. La anestesia general cuenta con tres (3) etapas (i) la primera etapa es la inducción de anestesia al paciente, (ii) la segunda es el mantenimiento del agente anestésico, (iii) la tercera es la recuperación del paciente [19].

4.1.1. ETAPA DE INDUCCIÓN

Esta etapa es el comienzo de la anestesia general y se obtiene por medio de anestésicos endovenosos (estos ofrecen un mayor confort al paciente), donde hay una rápida pérdida de consciencia e hipnosis en el paciente [20].

4.1.2. ANESTÉSICOS ENDOVENOSOS

Los anestésicos endovenosos son utilizados para la etapa inicial de la anestesia (inducción) donde el paciente alcanza un estado de relajación y somnolencia. Los anestésicos endovenosos más utilizados son las benzodiazepinas las cuales poseen efectos farmacológicos prominentes en la sedación, hipnosis, disminución de la ansiedad, relajación muscular, amnesia anterógrada y actividad anticonvulsiva. Las benzodiazepinas más utilizadas son el Diazepam, Midazolam y el Lorazepam. En la Tabla I se puede observar las respectivas etapas y dosis en la que se aplica cada analgésico con su correspondiente vida media [21].

Tabla I
INDICACIONES Y DOSIS DE BENZODIAZEPINAS UTILIZADAS EN ANESTESIA GENERAL [20]

Agente	Indicaciones	Dosis	Vida media (horas)
Diazepam	Premediación Sedación Inducción	0,2 - 0,5 mg/kg 0,04 - 0,2 mg/kg 0,3 - 0,6 mg/kg	20 - 40
Midazolam	Premediación Sedación Inducción	0,07 - 0,15 mg/kg 0,01 - 0,1 mg/kg 0,1 - 0,4 mg/kg	1 - 4
Lorazepam	Premediación Sedación	0,05 mg/kg 0,03 - 0,05 mg/kg 0,03 - 0,04 mg/kg	10 - 20

4.1.3. ETAPA DE MANTENIMIENTO

En esta etapa del procedimiento de anestesia, el paciente se encuentra en un estado anestésico adecuado, el cual permite el desarrollo de la intervención quirúrgica en su totalidad. Además, generalmente se usan los fármacos por vía inhalatoria o endovenosa para mantener al paciente en un estado inconsciente [22].

4.1.4. ANESTÉSICOS INHALATORIOS (AI)

Los anestésicos inhalatorios son utilizados para disminuir el nivel de conciencia y la potencia o profundidad de la anestesia, se alcanza con una dosis determinada que depende de la concentración alcanzada en el tejido cerebral y puede estimarse a partir de la Concentración Alveolar Mínima (CAM). Los anestésicos inhalatorios más utilizados con sus respectivas características se exponen en la Tabla II.

Tabla II
GASES ANESTÉSICOS MÁS UTILIZADOS [19]

Características	Óxido Nitroso	Halotano	Enflurano	Isoflurano	Desflurano	Sevoflurano
Peso molecular (g/mol)	44	197,5	184,5	184,5	168	200
CAM (%)	105	0,75	1,7	1,2	6,0	2,0
Analgesia	Buena	Escasa	Buena	Muy Buena	Buena	Muy Buena
Recuperación	Rápido	Rápida	Rápida	Rápida	Muy Rápida	Muy Rápida

4.1.5. ETAPA DE RECUPERACIÓN

En esta etapa se cesa la administración del anestésico inhalatorio y/o endovenoso al paciente, con el fin de producir una vuelta progresiva al estado vigil. Además, es importante que el paciente cuente con una buena analgesia al momento de despertar para evitar el dolor crónico donde se llevó a cabo el procedimiento [23].

4.2. MÁQUINA DE ANESTESIA

La máquina de anestesia (también llamada unidad de anestesia, aparato de anestesia, equipo de anestesia, mesa de anestesia o carro de anestesia) es un equipo médico de alta precisión con clasificación IIB y está compuesto por elementos mecánicos, neumáticos y electrónicos. Es utilizada en procedimientos médicos que requieran sedación y su finalidad es administrar de manera segura al paciente, por vía pulmonar, con ventilación espontánea o mecánica, gases como el oxígeno, el óxido nítrico, el aire

y vapores anestésicos (enflurano, halotano, isoforano, sevoflurano, desflurano) que permitan realizar una anestesia adecuada, monitorizando además todas sus funciones requeridas del paciente (ECG, Saturación de Oxígeno, EtCO₂, NIBP, Temperatura, etc.) [24][25].

La unidad de anestesia cuenta seis (6) grandes módulos como se puede observar en la Figura 1, el primero (M1) es el módulo de almacenamiento y suplemento de gases el cual suministra al equipo los gases medicinales; el segundo módulo (M2) está compuesto por los sistemas de alta, media y baja presión con sus respectivos componentes como lo es el regulador proporcional de gases en conjunto con los vaporizadores el cual es el encargado de regular la proporción de Óxido Nitroso (N₂O) y Oxígeno (O₂); el tercer módulo (M3) cuenta con el sistema de respiración; el cuarto consta de dos (2) módulos (M4 & M5) el ventilador mecánico o de la respiración manual; el sexto módulo (M6) corresponde a los desechos de gases [26].

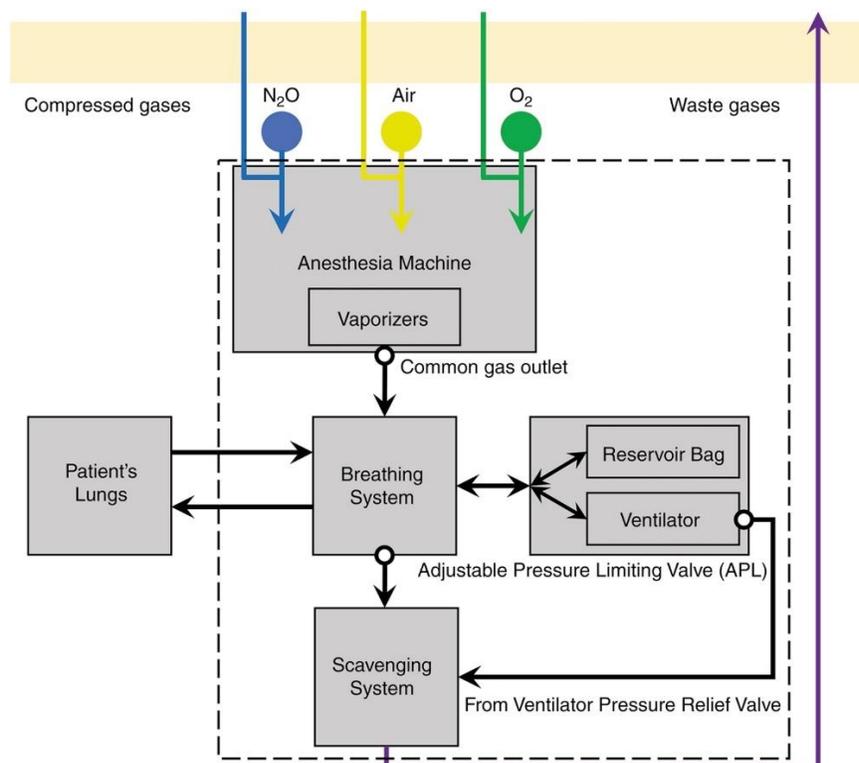


Figura 1. Organización del sistema de reparto de anestesia [26]

4.2.1. SUPLEMENTO DE GASES (M1)

El módulo de suplemento y de almacenamiento de gases medicinales son parte fundamental en el correcto funcionamiento de la máquina de anestesia, debido a que por medio de estos se suministra los diferentes gases al sistema neumático de la unidad de anestesia. Asimismo, regula las presiones de entrada de los diferentes gases para evitar daños al paciente.

Actualmente los únicos gases medicinales que son utilizados por los anestesiólogos a nivel mundial son el oxígeno (O_2), óxido nitroso (N_2O) y el aire medicinal. Además, por razones de seguridad los agentes inflables rara vez son utilizados en salas de operación (Ors) hoy en día. Sin embargo, el nitrógeno es usado exclusivamente para los equipos accionados por gas. Por otra parte, ocasionalmente en algunos casos clínicos se utiliza el Helio como en operaciones de laringe debido a las características de baja densidad [27].

Por otra parte, estos gases están almacenados en el depósito de gases medicinales de la institución médica y también en cilindros metálicos adjuntos a la máquina de anestesia.

4.2.2. SISTEMA DE ALTA PRESIÓN (M2)

Este sistema es el que recibe los gases medicinales de los cilindros de alta presión colocados en la parte trasera de la máquina de anestesia. Además, estos cilindros suelen ser el suministro de gas de la máquina de anestesia en casos de emergencia. Las máquinas disponen de tres o cuatro conexiones para los cilindros [28], además de que cada uno de los cilindros cuenta con sus respectivos componentes de medición, reguladores y válvulas.

Componentes del sistema de alta presión

- **Yugo:** Es una pieza del sistema de entrada de gases encargada de soportar los cilindros y de asegurar el flujo de entrada de los gases [29].
- **Válvula unidireccional:** Esta válvula permite que el gas de entrada de un cilindro ingrese a la máquina de anestesia en una sola dirección este componente se puede observar con el número 1 resaltada de color rojo en la Figura 2.
- **Manómetro:** Es el instrumento que mide la presión del gas de entrada de cada uno de los gases y están demarcados con su correspondiente color según el gas. El manómetro puede estar ubicado cerca al cilindro o en el panel frontal de la máquina de anestesia. El manómetro de O_2 es el número 2 resaltado de color amarillo en la Figura 2 [30].
- **Regulador de presión:** Dispositivo que disminuye una alta presión del gas de entrada y la convierte en una presión de salida constante. Normalmente la presión de los cilindros esta entre 1900 Psi – 2200 Psi y el regulador la disminuye a 45 Psi. El regulador se puede observar en la Figura 2 con el número 3 y resaltado de color azul [30].

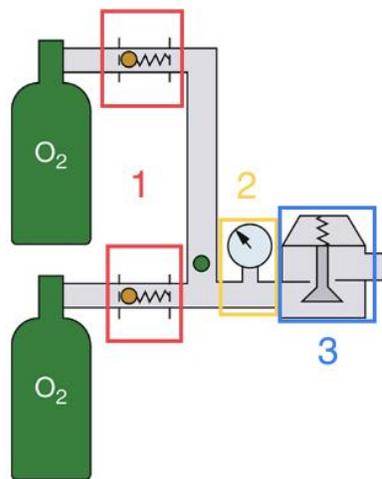


Figura 2. Sistema de alta presión de O₂ [26]

4.2.3. SISTEMA DE MEDIA PRESIÓN (M2)

El sistema de neumático de media presión es el encargado de mantener la presión y eliminar las fluctuaciones de cada uno de los gases en la presión entre 50-55 Psi con un flujo constante. Además, este cuenta con diferentes componentes de seguridad para evitar posibles complicaciones al paciente.

Componentes del sistema de media presión

- **Switch Maestro:** Es un switch electromagnético el cual enciende la máquina de anestesia, al activarlo se alimenta la válvula flush de O₂ y se comprime el fuelle de la unidad. Este componente se puede observar en la Figura 3 resaltado de color rosado con el número 1.
- **Válvula a prueba de fallos de presión O₂:** Dispositivos diseñados para enlazar el flujo del N₂O con respecto a la presión de O₂. Son capaces de interrumpir o decrementar proporcionalmente el flujo de N₂O u otros gases a medida que disminuye la presión O₂ [26]. Esta válvula se puede observar en la Figura 3 resaltada de color naranja con el número 2.
- **Manómetro de presión intermedia (50-55 Psi) y flujómetro auxiliar:** Estos dispositivos se encuentra en panel frontal de la máquina de anestesia y se encargada de indicar la presión del sistema de media presión y correspondiente flujo del gas. Este módulo se puede observar en la Figura 3 resaltado de color morado con el número 3.

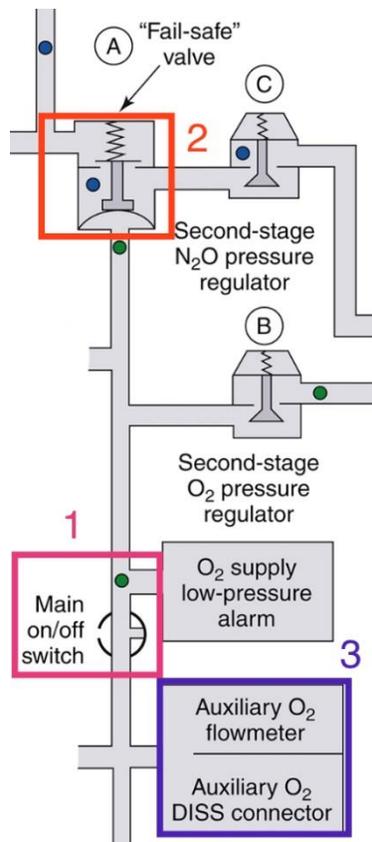


Figura 3. Sistema de media presión [26]

4.2.4. SISTEMA DE BAJA PRESIÓN (M2)

El sistema de neumático de baja presión es el encargado de mantener la presión y eliminar las fluctuaciones de cada uno de los gases en la presión entre 14-26 Psi. además, el flujo permanece constante.

- **Guarda hipóxica:** Este componente evita riesgos en la administración de una mezcla de gases. Asegura una mezcla segura de gases 75% N₂O y 25% O₂. El funcionamiento de la guarda hipóxica depende del fabricante [26]. Este componente se puede observar en la Figura 4 resaltado de color verde con el número 1.
- **Controlador de flujo:** El control de flujo está compuesto por un conjunto de válvulas mecánicas y electroválvulas capaces de regular el flujo de O₂, N₂O y Aire medicinal [30]. Esta válvula se puede observar en la Figura 4 resaltada de color azul con el número 2.
- **Flujómetros:** Es el componente encargado de medir el flujo del gas suministrado al paciente. En la Figura 4 resaltado de color naranja con el número 3 se puede observar los flujómetros de O₂ y N₂O respectivamente.

- **Vaporizadores:** La función de este componente es facilitar el cambio de un agente anestésico líquido a su fase de vapor y agregar una cantidad controlada de este vapor al flujo de gases que llega al paciente. Por otra parte, los vaporizadores son específicos para cada agente y permiten la suministración exacta de un gas anestésico [31]. Este componente se puede observar en la Figura 4 resaltado de color morado con el número 4.

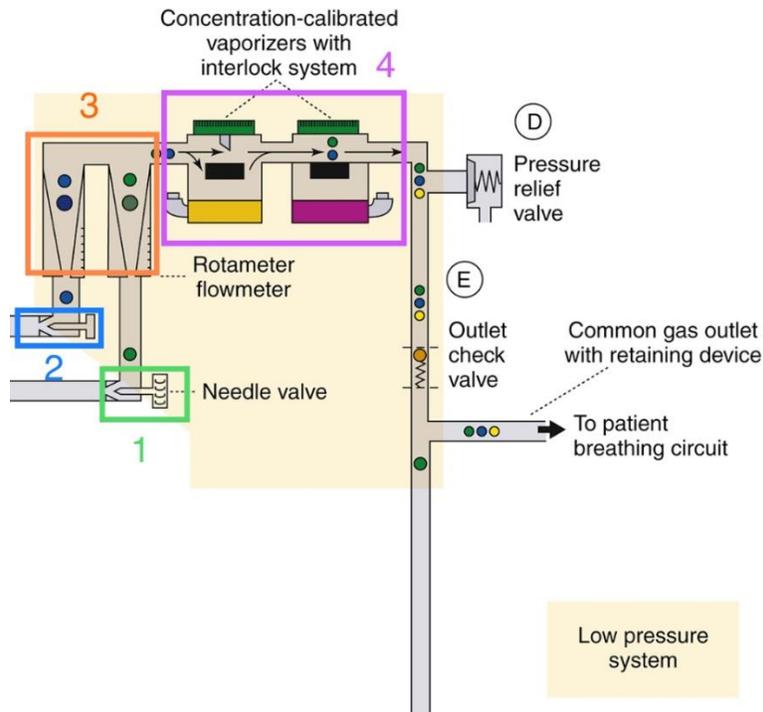


Figura 4. Sistema de baja presión [26]

4.2.5. SISTEMA DE RESPIRACIÓN (M3)

En el sistema de respiración es la última etapa en la cual la mezcla de gases anestésicos es suministrada al paciente. Esta cuenta con la etapa de espiración e inspiración dependiendo de la respiración y del modo de ventilación del paciente, como se puede apreciar en la Figura 5.

- **Sensor de oxígeno (Celda de oxígeno):** Es la encargada de medir la cantidad de O_2 que llega al paciente generando una alarma cuando el porcentaje de O_2 suministrado al paciente es bajo.
- **Sensor de flujo (Espiratorio e inspiratoria):** Este componente es el encargado de medir el flujo de los gases de la fase inspiratoria y espiratoria, mostrando el flujo en el monitor para verificar los parámetros de respiración del paciente [32].

- **Absorbedor CO_2 :** Es el encargado de absorber las partículas de CO_2 de la fase espiratoria del paciente, por medio de cal sodada. además, la cal sodada cambia su color como advertencia al personal biomédico para su correspondiente cambio.

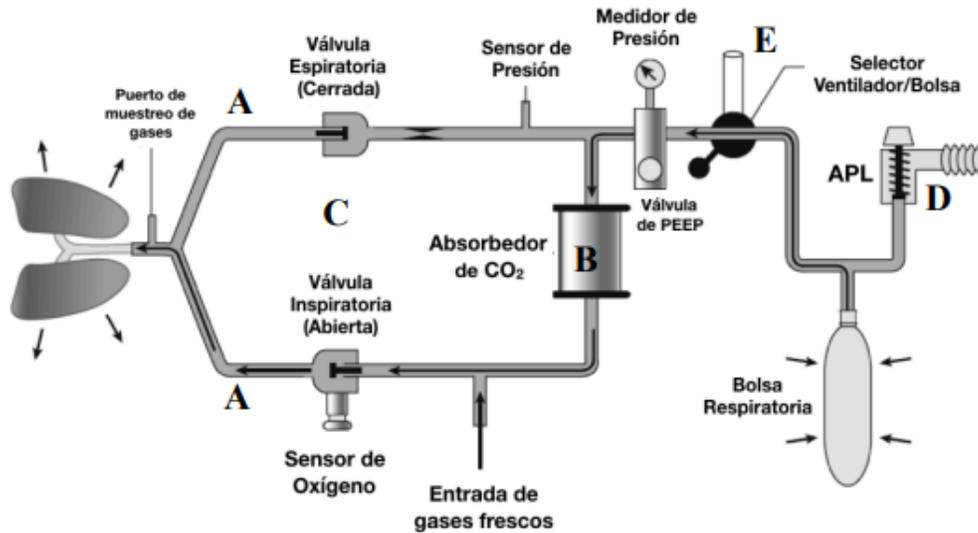


Figura 5. Sistema respiración máquina de anestesia [33]

4.2.6 VENTILACIÓN MECÁNICA (M4 & M5)

La ventilación mecánica es una ayuda artificial a la respiración que introduce gas en la vía aérea del paciente mientras se encuentra anestesiado por medio de un sistema mecánico externo. Tiene como principal objetivo mantener el intercambio gaseoso y disminuir o sustituir el trabajo respiratorio del paciente, para reducir el consumo de oxígeno de los tejidos [34].

Actualmente, en la práctica de la anestesia general se han incorporado nuevas tecnologías (sistemas neumáticos y eléctricos) a los ventiladores mecánicos, con diferentes modalidades para suplir las necesidades del paciente.

4.2.7 DESECHOS DE GASES (M6)

El módulo de desechos de gases en la máquina de anestesia es el encargado de recolectar y eliminar los gases anestésicos del circuito de respiración del paciente, con el fin de evitar contaminación del quirófano con gases anestésicos residuales. Los sistemas de evacuación son abiertos o cerrados. El abierto utiliza un depósito para recolectar los gases, que luego se succiona activamente del depósito. El depósito en estos sistemas abiertos se comunica

con la atmósfera, evitando así la transmisión de presión positiva o negativa a las vías respiratorias. Por otra parte, el sistema de evacuación cerrado, la evacuación puede ser activa por medio de succión o pasiva, dependiendo de gases anestésicos más pesados que el aire y presión para mover el gas residual a la evacuación. Estos sistemas deben tener válvulas de alivio de presión positiva y negativa para evitar que la presión se transmita a las vías respiratorias [35].

5. METODOLOGÍA

En el desarrollo de la investigación se plantea un estudio descriptivo ya que se van a analizar y clasificar los eventos reales relacionados con las fallas de máquina de anestesia. Esto con el fin de observar qué componentes son los que presentan mayores fallas en cada uno de los subsistemas de la unidad de anestesia.

La metodología se presenta en cuatro (4) etapas principales como se observa en la Figura 6. (i) La primera, es una revisión de literatura de las fallas comunes en los equipos de anestesia. (ii) La segunda, es la adquisición de información dentro de un hospital de cuarto nivel en la ciudad de Bogotá. (iii) La tercera, es el desarrollo de un algoritmo a partir de la información recolectada con el fin de facilitarle al usuario encontrar o identificar la falla en la unidad de anestesia. (iv) La cuarta consta del desarrollo de una interfaz web de fácil uso con la información de interés para el personal de ingeniería biomédica.



Figura 6. Etapas desarrollo investigación. Fuente propia

5.1 REVISIÓN DE LITERATURA

Durante esta etapa se realizó una revisión de literatura de tipo exploratorio acerca de las fallas comunes en máquina de anestesia. El propósito de esta revisión fue extraer información relevante de estas máquinas con el fin de identificar aspectos claves en el funcionamiento que aportaran a la investigación desarrollada en este trabajo.

Para la selección de los artículos científicos se siguió una metodología de búsqueda que se muestra en la Figura 7; consiste en tres (3) pasos: (i) en primer lugar, se definen las estrategias búsqueda; (ii) segundo, se seleccionan las fuentes de información; luego se realizó la ejecución de la búsqueda; (iii) posteriormente se lleva a cabo un proceso de filtrado y selección de los artículos relevantes y por último se realiza el análisis de la información obtenida.



Figura 7. Protocolo de búsqueda de información. Fuente propia

5.1.1 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Para la búsqueda de artículos científicos he investigaciones realizadas sobre fallas comunes en máquina de anestesia se utilizó la ecuación de búsqueda de tipo booleano con los operadores lógicos AND y OR.

- (“Anesthesia” OR “Anesthetic”) AND (“Equipment” OR “Machine” OR “Workstation”) AND (“Maintenance” OR “Hazards” OR “Safety” OR “Failure” OR “Checking” OR “Fault” OR “Checklist”).

5.1.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Los artículos se obtuvieron a partir de los repositorios y bases de datos de la Universidad del Rosario (CRAI) y de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Donde se seleccionaron 5 bases de datos debido a la calidad de las investigaciones de la información suministrada relacionada con el tema de investigación, las cuales fueron PUBMED, Google Scholar, Elsevier, Springer y IEEE Xplore.

5.1.3 FILTRADO Y SELECCIÓN

La selección de los artículos científicos se realizó a partir de una matriz donde se encontraban los criterios de inclusión y exclusión definidos [anexo1]. Además, se llevó una revisión profunda donde los artículos examinados fueron revisados con base al título y al resumen, conclusiones y las palabras claves, de esta manera se pudo identificar cuales tenían mayor relación con el objetivo de la investigación.

Como resultado, se encontraron treinta y siete (37) artículos relacionados con fallas en la unidad de anestesia, sin embargo, al realizar la lectura completa del documento se realizó una exclusión de artículos como se puede observar en la *Figura 8*, respecto a los siguientes parámetros: Fallas debido a un mal uso del usuario, fallas debido a inexperiencia del personal e incidentes relacionados a un mal suministro de agentes anestésicos, dejando únicamente veinte artículos relacionados directamente con la problemática sujeta a análisis como parte de la investigación.

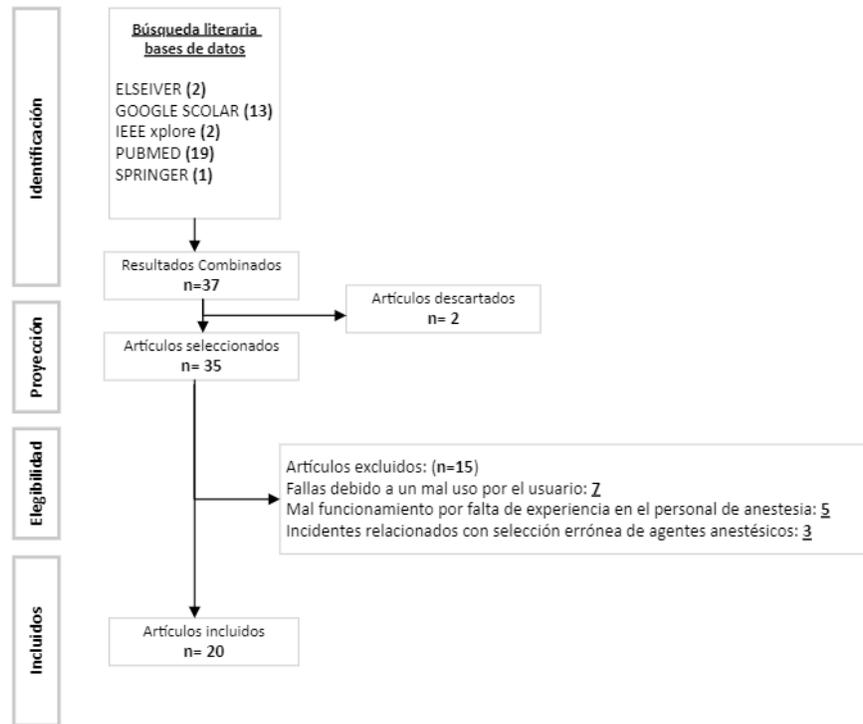


Figura 8. Diagrama búsqueda bibliográfica. Fuente propia.

5.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

En cuanto a la adquisición de información en el hospital de cuarto nivel, se contactó al ingeniero biomédico jefe dentro de la institución. Se le planteó la investigación acerca de fallas técnicas en máquina de anestesia y se llegó a un acuerdo de confidencialidad de datos respecto a los equipos de máquina de anestesia que se querían analizar y sus correspondientes hojas de vida. Seguido a esto, se dialogó con el personal encargado de los registros de mantenimiento de los equipos médicos dentro del hospital, el cual permitió el acceso al inventario del hospital. Se pudo observar que la institución únicamente cuenta con máquinas de anestesia de fabricantes Dräger y Datex Omeda.

La adquisición de datos se desarrolló en tres (3) pasos como se muestra en la Figura 9. (i) el primero es la extracción de la información a partir de las hojas de vida de los equipos de máquinas de anestesia, (ii) el segundo se basó en filtrar la información únicamente de interés y su digitalización, (iii) en el tercero se realizó la organización de los datos para el uso en el desarrollo del algoritmo.



Figura 9. Adquisición de datos sobre máquinas de anestesia. Fuente propia

5.2.1 EXTRACCIÓN DE DATOS

De primera mano se analizaron las hojas de vida físicas de los equipos de anestesia más antiguos dentro de la institución tanto de Datex Ohmeda como de Dräger, extrayendo características (metadatos) como: el fabricante, modelo de la máquina, registros (fecha) de mantenimiento correctivo realizados, número de serie, componente que presentaba la falla y los comentarios del personal encargado. Esta información se extrajo en una Base de datos (Excel) diseñada con cada una de las columnas es una característica ya antes mencionada, y en donde las filas es cada uno de los mantenimientos correctivos de las diferentes máquinas de anestesia.

Posteriormente, el personal del hospital facilitó el acceso a la base de datos de la institución donde se encontraban las hojas de vida digitales de los equipos separadas por fabricantes. Después, se realizó el respectivo análisis a las máquinas de anestesia de marca Datex Ohmeda, encontrando referencias como: Avance CS2, Módulo II plus, Excel 210, Aespire View, Aestiva. Seguido a esto, se realizó la revisión de las hojas de vida de los equipos de marca Dräger, donde se encontraron referencias de máquina de anestesia Fabius y Primus. De la misma manera se extrajo la información a la Base de datos (Excel) para realizar el respectivo análisis de las fallas técnicas encontradas.

5.2.2 FILTRAR Y DIGITALIZAR LOS DATOS

En esta etapa de la investigación se filtró y se digitalizó la información recolectada de las hojas de vidas de las máquinas de anestesia del hospital en una Base de datos (Excel), donde se tiene como parámetros principales (metadatos): el fabricante, el modelo, fecha del mantenimiento, falla encontrada, subsistema de la máquina que presentó la falla y los componentes involucrados.

5.2.3 ORGANIZACIÓN DATOS

Para la organización de los datos se separó la información por fabricante Dräger y Datex Ohmeda, delimitado por cada subsistema de la máquina de anestesia y los respectivos componentes que presentaron la falla con el número de incidencias como se muestra respectivamente en la *Tabla III, IV*.

Tabla III
FALLAS ENCONTRADAS FABRICANTE DATEX-OHMEDA. Fuente propia

Fabricante Datex Ohmeda			
Subsistema	Componentes	No. de Fallas	Total Subsistema
S. Respiración	Canister	8	36
	Sensor Flujo	10	
	Manómetro	1	
	válvula Unidireccional	2	
	Sensor Oxígeno	7	
	APL	2	
	válvula Pop off	2	
	válvula Flapper	4	
Ventilador	Turbina	3	9
	Eje rotación	1	
	Módulo ventilación	5	
Eléctrico	Batería	1	4
	Tarjeta de control CPU	1	
	Teclado	1	
	Fuente de poder	1	
Vaporizadores	válvula vaporizadores	3	3
Suministro de Gases	Acople Guaya O2	1	6
	Manguera Conexión	2	
	Manguera evacuación	1	
	válvula Flush	1	
	Módulo Gases	1	

Tabla IV
FALLAS ENCONTRADAS FABRICANTE DRÄGER. Fuente propia

Fabricante Dräger			
Subsistema	Componentes	No. de Fallas	Total Subsistema
S. Respiración	Sensor Flujo	5	19
	Trampa de Agua	2	
	Módulo ILCA	5	
	Sensor Oxígeno	7	
Ventilador	Válvula MV3	3	6
	Pistón	1	
	ILCA 3	2	
Monitoreo	Alarmas	1	3
	Módulo Capnógrafo	2	
Eléctrico	Batería	2	2
Software	Actualización TSB	1	1

Por otra parte, para el manejo de los datos recolectados de las fallas técnicas de la máquina de anestesia, se organizó en un archivo CSV (delimitado por comas) para posteriormente hacer uso de los datos para el desarrollo del algoritmo.

5.3 DESARROLLO ALGORITMO

El desarrollo del algoritmo de identificación de fallas se realizó en tres (3) etapas principales como se muestra en la *Figura 10*: (i) en la primera es la selección del lenguaje de programación en conjunto con la organización de la información en los archivos CSV; (ii) en la segunda se seleccionan los métodos de análisis de datos para el desarrollo del algoritmo según la naturaleza de los datos; (iii) en la tercera se realiza el entrenamiento de los algoritmos desarrollados.



Figura 10. Etapas del desarrollo del algoritmo de identificación de fallas. Fuente propia

5.3.1 ORGANIZACIÓN DATOS

Para el manejo de los datos recolectados de las fallas técnicas de la máquina de anestesia, se organizó en un archivo delimitado por comas (CSV) con las siguientes características: Fabricante, modelo del equipo, componentes según el fabricante y subsistema en el que se encontró la falla técnica. Asimismo, si el componente presentaba una falla se marcaba la columna con un uno (1) mientras que si no se encontraba ninguna falla en ese componente se marcaba con un cero (0); los subsistemas se etiquetaron / marcaron de la siguiente manera: (1) la falla se encontraba en el Sistema respiratorio, (2) Ventilador mecánico, (3) Monitoreo de parámetros, (4) Sistema eléctrico y (5) Software o suministro de gases, dependiendo del fabricante como se muestra en la *Tabla V* y en la *Tabla VI*.

Tabla V
NÚMERO ETIQUETA ASOCIADO AL SUBSISTEMA DEL FABRICANTE DRÄGER

Dräger	
Subsistema Maquina de Anestesia	Número Etiqueta
Sistema Respiratorio	1
Ventilador mecánico	2
Monitoreo de parámetros	3
Sistema eléctrico	4
Software	5

Tabla VI
NÚMERO ETIQUETA ASOCIADO AL SUBSISTEMA DEL FABRICANTE DATEX-OHMEDA

Datex Ohmeda	
Subsistema Maquina de Anestesia	Número Etiqueta
Sistema Respiratorio	1
Ventilador mecánico	2
Monitoreo de parámetros	3
Sistema eléctrico	4
Suministro de Gases	5

5.3.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para la identificación de fallas según el subsistema, este se desarrolló en el ambiente de programación de Python, mediante el método de inteligencia artificial Random Forest y con Decision Tree Classifier.

5.3.2.1 Decision Tree Classifier

Es un algoritmo de aprendizaje supervisado que se utiliza para problemas de clasificación. Esta técnica divide los datos en dos o más conjuntos homogéneos basados en el diferenciador más significativo de las variables de entrada con el fin de identificar la variable más significativa. Además, por medio de una serie de decisiones secuenciales puede alcanzar un resultado específico.

En cuanto a la implementación de este método para el desarrollo del algoritmo, se tiene en cuenta la naturaleza de los datos que se extrajeron y su respectiva organización. Estos datos fueron etiquetados según el componente y el subsistema que presenta la falla a partir de los diferentes mantenimientos correctivos. Por consiguiente, el método de Decision Tree Classifier al ser un método de aprendizaje con datos supervisados es óptimo para el desarrollo del algoritmo predictivo [36].

Los parámetros de Decision Tree Classifier utilizados para desarrollo del algoritmo fueron los siguientes:

- **Criterion:** Es la función elegida para medir la calidad de una división en la clasificación. En este caso se escogió “gini” ya que mide la frecuencia con la que cualquier elemento del conjunto de datos se etiquetará incorrectamente si se etiquetará al azar [37].
- **Splitter:** Es la estrategia que se utilizará para elegir la división en cada nodo del árbol de decisiones. En este caso se escogió “best” para que elija la mejor división.
- **Class_weight:** Es la función utilizada para saber el peso de cada clase. En este caso se escoge “None” por que no se tiene ningún peso establecido por clase.
- **random_state:** Controla la aleatoriedad del arranque de las muestras utilizadas al construir árboles.

5.3.2.2 Random Forest

Es un método de análisis de datos versátil de aprendizaje automático capaz de realizar tareas de regresión como de clasificación de datos basado en múltiples árboles de decisión aleatorios para tomar decisiones. Además, es un método de Machine Learning supervisado el cual genera arboles de decisiones aleatorios con diferentes muestras de datos para categorizar variables en una clasificación determinada. En este caso en el desarrollo del algoritmo las variables son las fallas de los diferentes componentes y la clasificación estará encaminada hacia que subsistema presenta la falla [38].

Los parámetros de Random Forest utilizados para desarrollo del algoritmo fueron los siguientes:

- **n_estimators:** Este parámetro define el número de árboles en el bosque para el algoritmo. En este caso se escoge el mismo número de fallas existentes por fabricante; Datex Ohmeda (38) y Dräger (25).
- **Criterion:** Es la función elegida para medir la calidad de una división en la clasificación. En este caso se escogió “gini” ya que mide la frecuencia con la que

cualquier elemento del conjunto de datos se etiquetará incorrectamente si se etiquetará al azar.

- **Bootstrap:** Este parámetro define si se quiere utilizar muestras de arranque al construir árboles o si se usa todo el conjunto de datos para construir cada árbol. En el caso del desarrollo del algoritmo se escoge “True” con el fin que se utilice muestras de arranque al construir los árboles.
- **random_state:** Controla la aleatoriedad del arranque de las muestras utilizadas al construir árboles.

5.3.3 DESARROLLO ALGORITMOS

A partir de la organización de los datos en los archivos CSV y de la elección de métodos de análisis de datos según la naturaleza de estos, se desarrolla la construcción de los algoritmos como se muestra en el diagrama de la *Figura 11*. La primera fase para el desarrollo de los algoritmos en Python es importar las librerías Pandas, Numpy DecisionTreeClassifier y RandomForestClassifier. Donde posteriormente a partir de Pandas será posible la lectura de los datos en los archivos CSV. Seguidamente, se convertirán los datos de Pandas a Numpy transformándolos a un array para una fácil manipulación de estos. Seguido a esto se seleccionan las variables de interés en el caso de Dräger: Sensor de flujo, trampa de agua, módulo ILCA, sensor de Oxígeno, válvula MV3, módulo ILCA3, alarmas, capnógrafo, módulo de Oxígeno, batería, celda de Oxígeno, módulo TSB.

Por otro lado, las variables (componentes) de interés para Datex Ohmeda son: Sensor de flujo, canister, manómetro, válvula unidireccional, sensor de oxígeno, válvula Pop-off, válvula Flapper, turbina, eje de rotación ventilador, módulo ventilación mecánica, batería, teclado, fuente de poder, vaporizadores, Guaya, manguera de conexión, módulo de evacuación, válvula flush y el módulo de evacuación de gases.

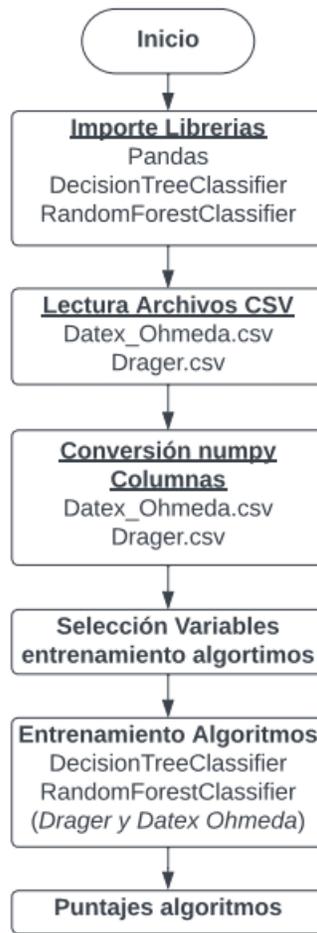


Figura 11. Diagrama algoritmo. Fuente propia

Una vez seleccionadas las variables se realiza el entrenamiento de los algoritmos con los dos (2) métodos ya antes mencionados de Machine Learning (DecisionTreeClassifier y RandomForestClassifier) tanto para los datos de fabricante Dräger como para Datex-Ohmeda con los parámetros que se muestran en la Figuras 12 y 13.

```

Random_Alg=RandomForestClassifier(n_estimators=38,random_state=(76),
                                  bootstrap= "true", criterion="gini" )
Classifier_Tree=DecisionTreeClassifier(random_state=38, splitter="best",
                                       class_weight= None, criterion="gini")
  
```

Figura 12. Algoritmo de para fabricante Datex Ohmeda con los parámetros establecidos. Fuente propia

```

Random_Alg=RandomForestClassifier(n_estimators=25,random_state=(50),
                                  bootstrap= "true", criterion="gini" )
Classifier_Tree=DecisionTreeClassifier(random_state=25, splitter="best",
                                       class_weight= None, criterion="gini")

```

Figura 13. Algoritmo de para fabricante Dräger con los parámetros establecidos. Fuente propia

Posteriormente se obtiene el resultado del puntaje de cada uno de los algoritmos con la respectiva predicción del subsistema que presenta la falla para cada fabricante.

5.4 DISEÑO WEB

El diseño web del aplicativo de apoyo al personal de ingeniería biomédica para la identificación de fallas en máquina de anestesia se desarrolla en cuatro (4) etapas como se puede observar en la *Figura 14*: (i) La primera es el entorno web donde se encuentra el código fuente para el correcto funcionamiento de la aplicación. (ii) La segunda etapa es el acceso y registro del personal de ingeniería biomédica del hospital. (iii) La tercera es la construcción del menú principal en donde se encuentran las diferentes opciones a realizar según las necesidades del personal. (iv) La cuarta etapa se muestra la predicción del algoritmo y las recomendaciones a la posible falla.

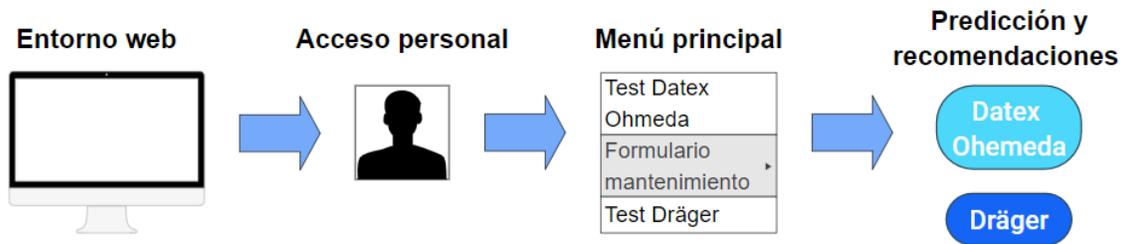


Figura 14. Capas del Aplicativo. (1) Entorno Web, (2) Acceso personal, (3) Menú principal, (4) Predicción y recomendaciones. Fuente propia

5.4.1 ENTORNO WEB

El entorno de desarrollo que se utilizó para el aplicativo Web fue Microsoft Visual Studio, debido a que en este entorno es posible la programación en Python en conjunto con HTML, Java Script, CSS. Por otra parte, para la iniciación del aplicativo web se utiliza el framework de Python Flask para poder ejecutar el entorno Web, facilitando el acople entre la programación en Python y los archivos HTML con diseño en CSS.

5.4.2 ACCESO PERSONAL

La pestaña Web de acceso como se muestra en la Figura 15, es diseñada con el fin de registrar el personal de ingeniería biomédica del hospital y brindar el acceso al aplicativo Web. Por otra parte, en el desarrollo de esta se hace uso de un Archivo CSV (valores separados por comas) con el fin registrar el personal, guardando en este el usuario y la contraseña, con el fin de validarlos al momento de que el personal desee volver a ingresar al aplicativo Web.

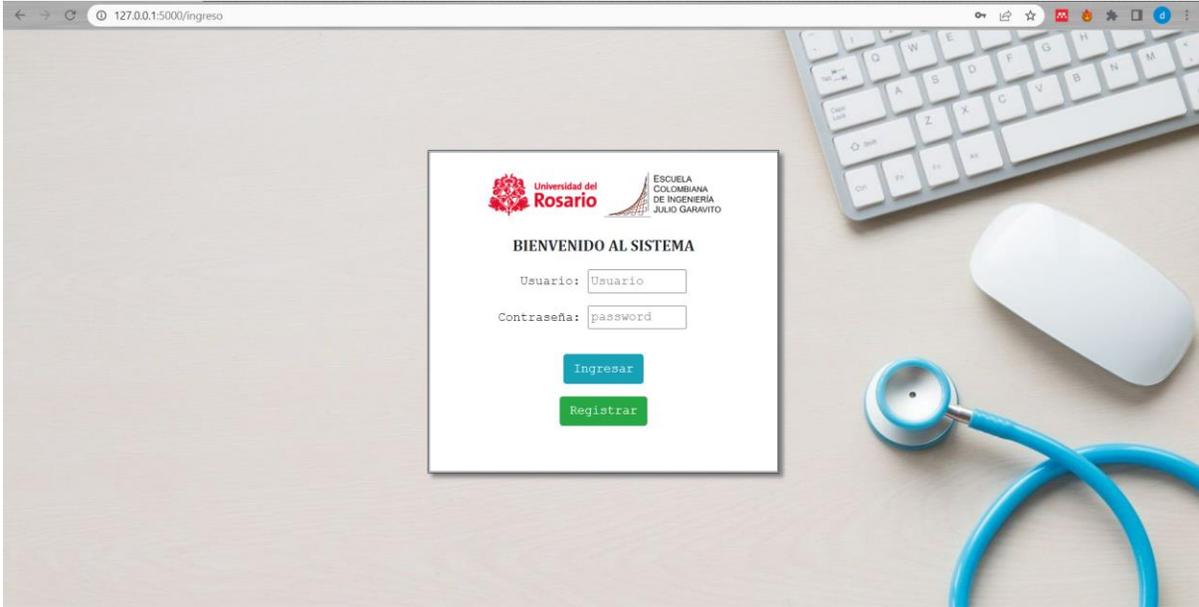


Figura 15. Pestaña acceso personal al aplicativo Web. Fuente propia

5.4.3 MENÚ PRINCIPAL

En la pestaña web del menú principal se encuentran las diferentes opciones que puede utilizar el personal de ingeniería biomédica del hospital como se puede observar en la Figura 16. En donde se encuentran el test de Dräger, el formulario de registro de mantenimiento y el test de Datex Ohmeda. Donde al seleccionar el botón se redirige a cada una de las páginas.



Figura 16. Pestaña ingreso menú principal aplicativo Web. Fuente propia.

5.4.4 PREDICCIÓN Y RECOMENDACIONES

En la pestaña de predicción y recomendaciones como se puede observar en la Figura 17 muestra el resultado que ha predicho el algoritmo acerca del posible subsistema en el que se presenta la falla. Donde posteriormente el personal de ingeniería biomédica del hospital debe seleccionar el subsistema de acuerdo con el resultado arrojado por el algoritmo. Al seleccionar el subsistema se mostrará la información de soporte más importante acerca de este.



Figura 17. Pestaña de resultado de predicción y recomendaciones. Fuente Propia

6. RESULTADOS

De la investigación realizada y teniendo en cuenta la información obtenida en la adquisición de datos en el hospital de cuarto nivel en la ciudad de Bogotá, se realiza un análisis del archivo de Excel del inventario en donde se encontró que el hospital únicamente contaba con máquinas de anestesia de los fabricantes Datex Ohmeda y Dräger. Por esta razón, se analiza cada fabricante de manera independiente ya que las máquinas de anestesia difieren en algunos componentes. Un ejemplo de esto es el fuelle en Datex Ohmeda y el pistón en Dräger los cuales cumplen la misma función, pero son componentes diferentes.

6.1 RESULTADOS IDENTIFICACIÓN DE FALLAS POR FABRICANTE

De los datos recolectados de los mantenimientos correctivos en el hospital en Bogotá se encontró, con respecto a las fallas del fabricante Dräger y sus diferentes componentes especializados, a partir la información de la *Tabla IV* donde se puede observar el número de incidencias de falla de cada componente y su respectivo subsistema; se encuentra (ver Figura 18) que, el 61% de los incidentes estaban relacionados con componentes del sistema de respiración de la máquina. Por otro lado, el 19% están relacionados al ventilador mecánico; el 10% de fallas fueron en componentes de monitoreo de parámetros; el 7% estaba asociado con fallas eléctricas y, por último, el 3% de los incidentes estaba ligado con fallas en el software de la máquina de anestesia.

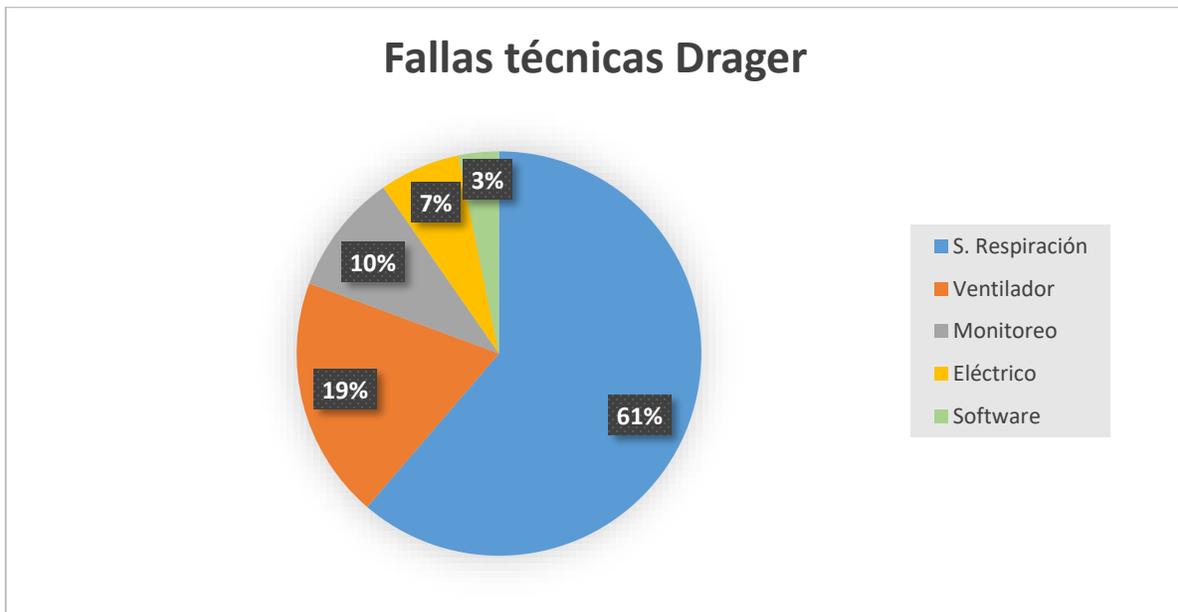


Figura 18. Gráfico de fallas técnicas del fabricante Dräger por subsistema

Del mismo modo, se categorizaron las fallas técnicas por subsistema de la máquina de anestesia de marca Datex Ohmeda y sus diferentes componentes especializados. A partir la información de la *Tabla III* donde se puede observar el número de incidencias de falla de cada componente y su respectivo subsistema.

A partir de la información se encontró que los incidentes técnicos en las máquinas de anestesia del fabricante Datex Ohmeda en su gran mayoría estaban relacionados con fallas en el subsistema de respiración con el 62% de incidencia. Seguido a esto, los subsistemas tanto del ventilador mecánico con el 16% seguido del suministro de gases con el 10% de incidencia cada uno. Las fallas relacionadas con el subsistema eléctrico fueron del 7% y por último, el subsistema con menor incidencia fue el de los vaporizadores con el 5%, como se puede observar en la *Figura 19*.

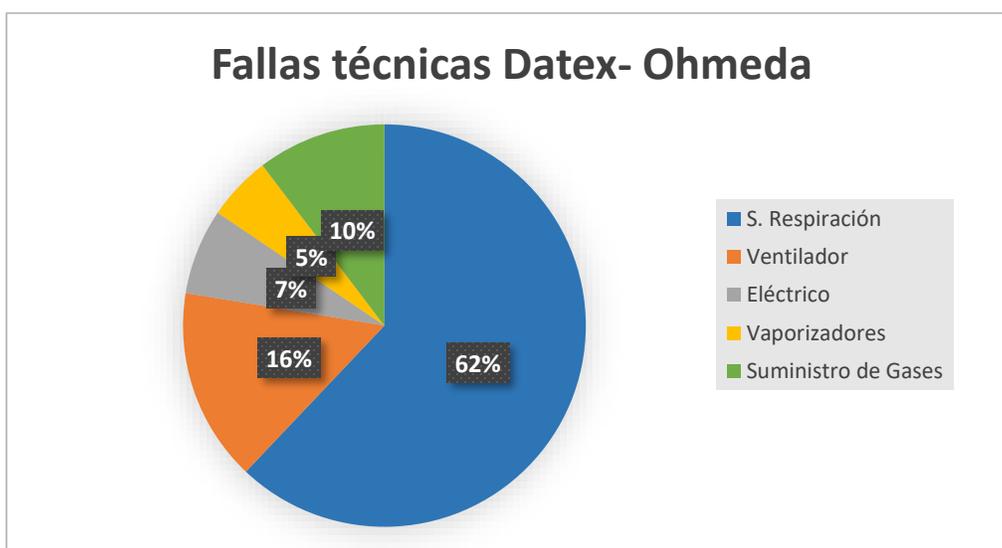


Figura 19. Gráfico de fallas técnicas del fabricante Datex- Ohmeda por subsistema

6.2 RESULTADOS DE LOS ALGORITMOS

A partir de la información obtenida en la adquisición de datos en el hospital de cuarto nivel en la ciudad de Bogotá, se logró la implementación del algoritmo para la identificación de fallas en máquinas de anestesia Dräger y Datex Ohmeda, donde se obtuvo como resultado a partir de los métodos de Machine Learning (*Random Forrest* y *Árbol de decisiones*) los siguientes puntajes para cada uno de los modelos predictivos como se muestra en la *Tabla VII*.

Tabla VII
PUNTAJE MODELOS PREDICTIVOS MACHINE LEARNING

Métodos Machine Learning	Dräger	Datex Ohmeda
Random Forest Classifier	0,88	1,0
Decision Tree Classifier	0,88	1,0

Al entrenar el algoritmo con todos los datos extraídos por medio de Random Forest y Decision Tree se obtiene resultado del 88% en ambos modelos para el fabricante Dräger, mientras que para el fabricante Datex Ohmeda el puntaje de predicción corresponde al 100% para cada uno de los dos (2) métodos de Machine Learning. Sin embargo, para poner a prueba el algoritmo se utiliza la función de validación cruzada en Python en donde este validará cada uno de los incidentes de fallas técnicas con el algoritmo desarrollado realizando cada una de las combinaciones. Esto debido a que las bases de datos cuentan con pocos datos es necesario el uso de la validación cruzada en Python donde el algoritmo se entrena con un dato menos y se realiza la prueba con el dato faltante.

En el caso del fabricante Dräger para la validación cruzada, se tienen veinticinco (25) incidentes por lo cual veinticuatro (24) serán para entrenar el algoritmo y uno (1) para el testeo. Sin embargo, para realizar un mayor número de pruebas de testeo es necesario desarrollar un ciclo o loop donde se cambie el dato de testeo. Como se puede observar en las Figuras 20 y 21 para cada uno de los métodos de Machine learnig, TRAIN son los incidentes que se utilizaron para el entrenamiento del algoritmo para el fabricante Dräger mientras que TEST es el incidente para realizar la validación del algoritmo. En la siguiente línea de código se encuentra (1.0) si es que el algoritmo acertó la predicción y si es (0.0) no predijo correctamente. Ahora bien, con estos datos se saca el promedio de los aciertos para comprobar la precisión del algoritmo en la predicción de fallas.

```

LeaveOneOut()
TRAIN: [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [0]
1.0
TRAIN: [ 0 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [1]
1.0
TRAIN: [ 0 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [2]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [3]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [4]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [5]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [6]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [7]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [8]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [9]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [10]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [11]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [12]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [13]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [14]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [15]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [16]
1.0

```

Figura 20. Prueba del algoritmo Random Forest Dräger (16) incidentes.

```

LeaveOneOut()
TRAIN: [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [0]
1.0
TRAIN: [ 0 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [1]
1.0
TRAIN: [ 0 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [2]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [3]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [4]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [5]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [6]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [7]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [8]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [9]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [10]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [11]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [12]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [13]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [14]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [15]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 17 18 19 20 21 22 23 24] TEST: [16]
1.0

```

Figura 21. Prueba del algoritmo Decision Tree Dräger (16) incidentes.

Como se puede observar en la Figura 20 al realizar la validación cruzada para el algoritmo de Random Forest para el fabricante Dräger se puede observar que en los al utilizar los incidentes 5, 9, 10 como datos de testeo, este predice incorrectamente el resultado. Sin embargo, en cuanto al algoritmo desarrollado con Decision Tree este es capaz de predecir correctamente los incidentes 2, 5, 9 como se puede observar en la Figura 21.

Por otra parte, del mismo modo se realiza la validación cruzada a cada uno de los algoritmos del fabricante Datex Ohmeda en donde se encuentran treinta y ocho (38) incidentes por lo que treinta y siete (37) serán para entrenar el algoritmo y uno (1) para testeo de este como se muestra en las Figuras 22 y 23. Ahora bien, con estos datos se saca el promedio de los aciertos para comprobar la precisión del algoritmo en la predicción de fallas de la máquina de anestesia.

```

LeaveOneOut()
TRAIN: [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [0]
1.0
TRAIN: [ 0 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [1]
1.0
TRAIN: [ 0 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [2]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [3]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [4]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [5]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [6]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [7]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [8]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [9]
0.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [10]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [11]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [12]
1.0

```

Figura 22. Prueba del algoritmo Random Forest Datex Ohmeda (12) incidentes.

```

LeaveOneOut()
TRAIN: [ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [0]
1.0
TRAIN: [ 0 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [1]
1.0
TRAIN: [ 0 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [2]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [3]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [4]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [5]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [6]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [7]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [8]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [9]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [10]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [11]
1.0
TRAIN: [ 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37] TEST: [12]
1.0

```

Figura 23. Prueba del algoritmo Decision Tree (12) incidentes.

Como se puede observar en la Figura 22, al realizar la validación cruzada para el algoritmo de Random Forest para el fabricante Datex Ohmeda se puede observar que en los al utilizar los incidentes 2, 5, 9 como datos de testeo, este predice incorrectamente el resultado. Sin embargo, en cuanto al algoritmo desarrollado con Decision Tree este es capaz de predecir correctamente los incidentes 2, 5, 9 como se puede observar en la Figura 23.

A partir de la validación cruzada de cada uno de los métodos para cada fabricante se encontró que el método de Random Forest y Decision Tree Classifier obtuvo el mismo promedio de predicción del 64% para el fabricante Dräger, mientras que para el fabricante Datex Ohmeda el método con mayor promedio en la predicción fue Decision Tree Classifier con el 74%, como se puede observar en la Tabla VIII.

Tabla VIII
PUNTAJE DE VALIDACIÓN CRUZADA ALGORITMOS

Método verificación validación cruzada	Dräger	Datex Ohmeda
Random Forest Classifier	0,64	0,71
Decision Tree Classifier	0,64	0,74

6.3 RESULTADOS INTERFAZ WEB

En el desarrollado de la interfaz Web se implementó una Check List a partir de las posibles fallas que podría presentar la máquina de anestesia según su fabricante como se puede observar en la Figura 24. La Check List está compuesta con preguntas de Si/No acerca de los posibles fallos que presenta la máquina de anestesia, la cual deberá ser diligenciada por el personal de ingeniería biomédica.

Posible Falla	Afirmativo	Negativo
¿ El sensor de flujo se encuentra en buen estado y funciona correctamente?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿La trampa de agua se encuentra en buen estado?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿ El monitor muestra algún error acerca del Módulo ILCA ?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿La unidad de anestesia reconoce el sensor de Oxígeno?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿El monitor muestra algún error respecto al módulo MV3 ?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿El monitor muestra algún error respecto al ventilador mecánico o pistón?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿El monitor muestra algún error respecto al módulo ILCA 3?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿ Las alarmas funcionan correctamente ?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿El módulo de capnografía muestra los valores correctos?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿La batería funciona correctamente?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No
¿El monitor muestra alguna falla de Software o de actualización?	<input type="radio"/> Sí	<input type="radio"/> No

Figura 24. Check List vinculada con el algoritmo de identificación de fallas. Fuente propia

Posteriormente al diligenciamiento de la Check list por parte del ingeniero biomédico. El algoritmo arroja una predicción respecto al posible subsistema que presenta la falla. De acuerdo con este resultado el aplicativo Web proveerá la información necesaria al personal biomédico, acerca del correspondiente subsistema con recomendaciones para tener en cuenta como se muestra, a manera de ejemplo, en la Figura 25; además, cuenta con acceso a los correspondientes manuales de servicio y la página principal de cada fabricante en caso de que el ingeniero necesite más información.

Recomendaciones Sistema Respiratorio

"Trabajando con la tecnología para un mejor mañana"

Dräger

Dräger es una empresa alemana fundada en 1889 con sede en Lübeck, que desarrolla, produce y comercializa equipos y sistemas en los campos de la tecnología médica y de seguridad industrial.

Mas info

Soluciones Aportadas



En apoyo con la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la Universidad del Rosario se ha creado esta app Web para identificar las posibles fallas de la máquina de

Sistema Respiratorio

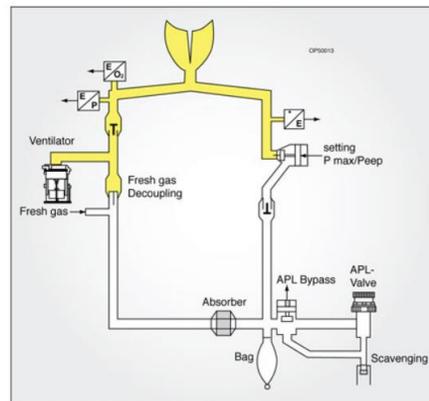


Figure 1. Fabius Tiro / Fabius GS Ventilator leak test.

El sistema de respiración es la última etapa en la cual la mezcla de gases anestésicos es suministrada al paciente. Esta cuenta con la etapa de espiración e inspiración dependiendo de la respiración y del modo de ventilación del paciente

Figura 25. Recomendaciones sistema respiratorio Dräger. Fuente propia

Por otra parte, con el fin de facilitar la adquisición de información y organizar la base datos de las máquinas de anestesia, se desarrolló formulario (ver Figura 26) para registrar los respectivos mantenimientos a las máquinas de anestesia en el hospital, que incluye los parámetros más importantes (metadatos) identificados en la extracción de datos como lo fue; (i) Fabricante, (ii) Modelo, (iii) Serie del equipo médico, (iv) Fecha del mantenimiento, (v) Tipo de mantenimiento, (vi) Ubicación del equipo, (vii) Componente que posee la falla.

Por consiguiente, a partir de la programación en HTML y Python se desarrolla el formulario con el fin de que el personal de ingeniería biomédica del hospital pueda registrar cada mantenimiento realizado y esta información se guarde en un archivo CSV para su respectiva organización y para el posterior uso de los datos en los algoritmos desarrollados.



Información del equipo



Fabricante del Equipo:

Modelo:

Serie del equipo:

Mantenimiento

Fecha del Mantenimiento:

Mantenimiento:

Ubicación:

Identificación de fallas técnicas

Subsistema: Componente:

Registrar

Volver



Figura 26. formulario web para la recolección de datos de los mantenimientos preventivos y correctivos de la máquina de anestesia

7. DISCUSIÓN

El aplicativo Web de soporte para la identificación de fallas en máquina de anestesia se logró implementar de forma exitosa ya que los resultados obtenidos en las pruebas funcionales y de integración tanto de los algoritmos como de la interfaz web, funcionan de manera correcta y se acoplan a las necesidades del personal biomédico.

Respecto a la literatura encontrada referente a la identificación de fallas en máquina de anestesia, se encontró el artículo [6], donde muestra el resultado de la investigación de los incidentes críticos relacionados con la unidad de anestesia en el sistema (NRLS) entre los años 2006-2008 (ver Figura 27), donde se encontraron 1029 incidentes, los cuales fueron clasificados según las principales categorías de la unidad de anestesia.

Monitoring*	272 (26.4)
Screen failure during anaesthesia	94 (9.1)
Failure of one monitoring modality	59 (5.7)
Some modalities missing	39 (4.0)
Failure to transfer data	28 (2.7)
Monitoring unavailable or substandard	27 (2.7)
Ventilator problems*	185 (17.9)
Sudden failure during anaesthesia	142 (13.8)
Sustained or increasing positive pressure	10 (0.9)
Gas monitoring*	138 (13.4)
Sudden failure	57 (5.5)
Malfunctioning	49 (3.8)
Not available or parts missing	14 (1.7)
Leak in circuit	99 (9.6)
Anaesthetic machine failing 'cockpit check' or condition of machine/ equipment unacceptable	54 (5.2)
Intravenous infusion pumps	53 (5.2)
Vaporiser problems	52 (5.1)
Bed/trolley problems	26 (2.5)
Patient warmer	20 (1.9)
Gas supply to machine	20 (1.9)
Alarm failure	14 (1.4)
Other	96 (9.3)
Total	1029 (99.8†)

Figura 27. Principal categories of equipment involved in incidents. Values are number (proportion) [6].

Se puede observar que las categorías con más incidentes en la máquina de anestesia fueron las relacionadas con fallas en el monitoreo de parámetros con el 26%, seguido de problemas en el ventilador con un 17,9%; Monitoreo de gases 13,4% y el sistema de respiración 9,6%. Mientras que en la investigación realizada se encontraron 89 incidentes relacionados con fallas en máquina de anestesia, donde los subsistemas que presentaron mayor incidencia de fallas como se puede observar en la Tabla IX fueron: el sistema de respiración con 61,8%, seguido el ventilador con un 16,85%; Fallas eléctricas y suministro de gases con un 6,7% respectivamente. Al comparar los resultados encontrados con los

del artículo se pueden encontrar diferencias en el porcentaje respecto a la incidencia de fallas en el monitoreo de parámetros con el 26,4% en el artículo, mientras que en la investigación realizada fue del 3,37%.

Independientemente del número de incidentes considerado tanto en la presente investigación (89) como en la investigación realizada por la Asociación de Anestesia de Gran Bretaña (1029), los datos estadísticos muestran diferencias sustanciales en las fallas predominantes, como el caso de la falla del Sistema de Respiración (61,8% vs 9,6% respectivamente). Las diferencias obedecen a estados del arte que las hacen no comparables: (i) diferencias tecnológicas debido a las fechas en que se realizan las investigaciones 2008 vs 2022, (ii) actualización tecnológica que incorpora mejoras en los sistemas de monitoreo consecuencia de los hallazgos de dicha investigación, (iii) incorporación de nuevas tecnologías en sistema de respiración, de mayor seguridad, complejidad e integridad por la sensibilidad y criticidad que tiene la interfaz con el paciente.

Tabla IX.
FALLAS DE MAQUINA DE ANESTESIA EN HOSPITAL

Subsistema máquina de anestesia	Número de incidentes	Porcentaje (%)
Sistema respiración (Circuito cerrado)	55	61,80
Ventilador mecánico	15	16,85
Monitoreo de parámetros	3	3,37
Eléctrico	6	6,74
vaporizadores	3	3,37
Suministro de gases	6	6,74
Software	1	1,12

Por otra parte, al comparar la investigación desarrollada con el artículo más afín (“Expert System for Performance Prediction of Anesthesia Machines” [15]) en la identificación de fallas en máquina de anestesia a partir de métodos de machine Learning. Se encuentra diferencia en los parámetros de entrada y en los métodos de Machine Learning utilizados. Ya que como variables de entrada se utilizaron las diferentes mediciones en los parámetros de monitoreo de paciente como; (i) medición de Volumen (300mL, 400mL, 500mL), (ii) medición de concentración de gas anestésico (al 2%, 3%, 4%) e (iii) inspección visual del equipo. Mientras que, como parámetros de entrada en la investigación desarrollada, las variables de entrada fueron las fallas de cada componente según el subsistema al que pertenecen. Además, los métodos de Machine Learning utilizados en el artículo fueron Artificial Neuronal Network y Fuzzy Classifier, con el fin de determinar y estimar los intervalos de mantenimiento preventivo y el número de piezas propensas a la degradación según el tiempo de uso.

Finalmente, al realizar las pruebas de implementación del aplicativo Web, se identifican los siguientes aportes respecto a otros estudios realizados, el desarrollo de aplicativo funcional desarrollado a partir de Python, HTML, Java script, el cual le permite al personal de ingeniería biomédica: (i) soporte a la hora de identificar las posibles fallas en la máquina de

anestesia según cada subsistema, (ii) organización de los respectivos mantenimientos en una base de datos, (iii) revisión de catálogos y documentación específica de la máquina de anestesia en falla, (iv) identifica deficiencia en esta área de investigación en Colombia, ya que la información de proyectos de investigación, artículos u otros documentos es nula en el país.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para trabajos futuros se recomienda la recolección de mayor volumen de información sobre mantenimientos correctivos para cada fabricante. Por lo que es necesario realizar convenios con otros hospitales o instituciones prestadoras de salud, que cuenten con máquinas de anestesia de los respectivos fabricantes para la respectiva extracción de información. Lo anterior, permite mejorar la predicción en la identificación de fallas por medio de los algoritmos desarrollados.

Por otra parte, al obtener mayor cantidad de datos de mantenimientos correctivos es posible el desarrollo de más algoritmos predictivos, por medio de la utilización de otros métodos de Machine Learning. Con la finalidad de compararlos y contrastarlos con los utilizados en la presente investigación. Pudiendo así identificar y definir cuál método es el óptimo para la identificación de fallas en máquina de anestesia según el fabricante.

En cuanto al aplicativo Web de soporte en la identificación de fallas en máquina de anestesia. Se puede extender el portafolio de fabricantes, así como la cantidad de componentes, añadiendo información más específica según el modelo del equipo médico, fecha de fabricación, tiempo de operación continua o acumulada, necesidad de reposición o actualización tecnológica, obsolescencia, etc.

Se puede implementar una interfaz más robusta de soporte al personal de Ingeniería Biomédica, incluyendo otros equipos biomédicos.

De forma colateral la investigación identifica como hallazgo, independientemente de la marca de la máquina, el alto porcentaje de falla que se presenta en los Sistemas de Respiración, que no siendo el propósito de la investigación, requeriría estudio de causa raíz por parte de los fabricantes que permita establecer mejoras en la configuración, diseño o renovación tecnológica de algunos de los componentes, con la consecuente mejora en el desempeño, la disponibilidad (a través de incrementar los tiempos entre mantenimientos preventivos) y consecuentemente reduciendo los costos de mantenimiento de las máquinas.

9. CONCLUSIONES

Del anterior trabajo de investigación y desarrollo se puede concluir que, el algoritmo desarrollado para la identificación de fallas en máquina de anestesia para los fabricantes Dräger y Datex Ohmeda por medio de los métodos de Machine Learning (*Random Forest Classifier* y *Decision Tree Classifier*), obtuvo un resultado positivo ya que la predicción para el fabricante Dräger por medio de ambos métodos es del 88%, mientras que para el fabricante Datex Ohmeda el resultado de predicción es del 100%. Sin embargo, al realizar la validación cruzada se encontró que este puntaje se reduce para cada uno de los fabricantes, en el caso del fabricante Dräger al 64% en ambos métodos, mientras que para el fabricante Datex Ohmeda se obtuvo un resultado mediante el método de *Random Forest* del 71% y para *Decision Tree Classifier* 74%.

En cuanto al desarrollo del formulario Web para el registro de los mantenimientos en máquinas de anestesia y a partir de la extracción de datos en el hospital. Se encontró que los parámetros más importantes a la hora de realizar el respectivo informe de mantenimiento del equipo fueron; Fabricante, modelo del equipo, número de serie, fecha del mantenimiento, ubicación y componente que presentaba la falla. Estos se implementaron en el formulario Web mediante herramientas de fácil uso para el registro y lectura de los datos por parte del personal de ingeniería biomédica. Además, este organiza de manera óptima en un archivo CSV para posteriormente facilitar la extracción de datos para mejorar la predicción de los algoritmos desarrollados.

Por último, la interfaz Web se desarrolló de manera exitosa con su propio entorno Web. Esta cuenta con sus respectivas pestañas Web de ingreso y registro del personal, brindando al personal de ingeniería biomédica un menú principal con las diferentes utilidades como las Check List para cada uno de los fabricantes (Dräger y Datex Ohmeda) la cual está enlazada con los métodos de Machine Learning para el soporte en la identificación de fallas al personal de ingeniería biomédica, donde también se le brinda la información necesaria del subsistema donde posiblemente se encuentra la falla.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Anestesia general.” [https://www.news-medical.net/health/General-Anesthesia-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/health/General-Anesthesia-(Spanish).aspx) (accessed Jan. 12, 2022).
- [2] “General anaesthesia - NHS.” <https://www.nhs.uk/conditions/general-anaesthesia/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [3] “Continuum of Depth of Sedation: Definition of General Anesthesia and Levels of Sedation/Analgesia | American Society of Anesthesiologists (ASA).” <https://www.asahq.org/standards-and-guidelines/continuum-of-depth-of-sedation-definition-of-general-anesthesia-and-levels-of-sedationanalgesia> (accessed Jan. 12, 2022).
- [4] L. G. Braz, D. G. Braz, D. S. da Cruz, L. A. Fernandes, N. S. P. Módolo, and J. R. C. Braz, “Mortality in anesthesia: a systematic review,” *Clinics (Sao Paulo)*, vol. 64, no. 10, pp. 999–1006, 2009, doi: 10.1590/S1807-59322009001000011.
- [5] R. J. AMOS, J. A. L. AMESS, D. G. NANCEKIEVILL, and G. M. REES, “PREVENTION OF NITROUS OXIDE-INDUCED MEGALOBlastic CHANGES IN BONE MARROW USING FOLINIC ACID,” *BJA: British Journal of Anaesthesia*, vol. 56, no. 2, pp. 103–107, Feb. 1984, doi: 10.1093/bja/56.2.103.
- [6] C. J. Cassidy, A. Smith, and J. Arnot-Smith, “Critical incident reports concerning anaesthetic equipment: analysis of the UK National Reporting and Learning System (NRLS) data from 2006-2008*,” *Anaesthesia*, vol. 66, no. 10, pp. 879–888, Oct. 2011, doi: 10.1111/j.1365-2044.2011.06826.x.
- [7] “Entrenamiento sobre equipos médicos – Nuestro conocimiento, su éxito.” https://www.draeger.com/es_csa/Hospital/Medical-Device-Training#training-courses (accessed Jan. 11, 2022).
- [8] “Treinamentos GE.” <https://educacaoge.com.br/Calendario/TechnicalTraining> (accessed Jan. 11, 2022).
- [9] J. A. Dorsch and S. E. Dorsch, Eds., “Hazards of Anesthesia Machines and Breathing Systems,” *Practical Approach to Anesthesia Equipment*, A. Lippincott Williams & Wilkins PP - Philadelphia, pp. 218–229, 2011.
- [10] “• Hospital equipment by type in Colombia 2021 | Statista.” <https://www.statista.com/statistics/1249007/installed-base-hospital-equipment-type-colombia/> (accessed Feb. 06, 2022).
- [11] M. G. March and J. J. Crowley, “An Evaluation of Anesthesiologists’ Present Checkout Methods and the Validity of the FDA Checklist,” *Anesthesiology*, vol. 75, no. 5, pp. 724–729, Nov. 1991, doi: 10.1097/00000542-199111000-00002.
- [12] U. Goneppanavar and M. Prabhu, “Anaesthesia machine: checklist, hazards, scavenging,” *Indian J Anaesth*, vol. 57, no. 5, pp. 533–540, Sep. 2013, doi: 10.4103/0019-5049.120151.
- [13] A. W. Gelb *et al.*, “World Health Organization-World Federation of Societies of Anaesthesiologists (WHO-WFSA) International Standards for a Safe Practice of Anesthesia,” *Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d’anesthésie*, vol. 65, no. 6, pp. 698–708, 2018, doi: 10.1007/s12630-018-1111-5.
- [14] M. al Suhaibani, A. al Malki, S. al Dosary, H. al Barmawi, and M. Pogoku, “Pre-use anesthesia machine check; certified anesthesia technician based quality improvement audit,” *Anesth Essays Res*, vol. 8, no. 3, pp. 354–360, 2014, doi: 10.4103/0259-1162.143142.

- [15] L. Hadžić, A. Fazlić, O. Hasanić, N. Kudić, and L. Spahić, "Expert System for Performance Prediction of Anesthesia Machines," in *CMBEBIH 2019*, 2020, pp. 671–679.
- [16] L. Grüßer, S. Staender, and R. Rossaint, "Safety first: Checking the anaesthesia machine.," *European journal of anaesthesiology*, vol. 37, no. 10. pp. 837–838, 2020. doi: 10.1097/EJA.0000000000001170.
- [17] J. Ehrenwerth, J. B. Eisenkraft, and J. M. Berry, "Anesthesia Equipment E-Book : Principles and Applications." 2021. [Online]. Available: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsebk&AN=2568735&site=eds-live>
- [18] "La anestesia." <https://www.nigms.nih.gov/education/fact-sheets/Pages/anesthesia-spanish.aspx> (accessed Aug. 17, 2022).
- [19] J. F. Butterworth, D. C. Mackey, J. D. Wasnick, and M.-H. Education. W. pbl, *Morgan & Mikhail's clinical anaesthesiology / John F. Butterworth IV, David C. Mackey, John D. Wasnick.* 2018. [Online]. Available: <http://katalog.nukat.edu.pl/lib/item?id=chamo:4440566&theme=nukat>
- [20] "Anestesia general: fases, fármacos y secuencia de intubación básica - Revista Electrónica de Portales Medicos.com." <https://www.revista-portalesmedicos.com/revista-medica/anestesia-general-fases-farmacos-y-secuencia-de-intubacion-basica/> (accessed Aug. 18, 2022).
- [21] R. Rodríguez Carranza, "Diazepam: Sedantes hipnóticos y ansiolíticos • Antiepilépticos," in *Vademécum Académico de Medicamentos*, New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. [Online]. Available: <accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?aid=1113054105>
- [22] "Etapas de la anestesia general - Anestesia Entre Ríos Anestesia Entre Ríos." <http://www.anestesiaentrieros.org.ar/etapas-de-la-anestesia-general/> (accessed Aug. 18, 2022).
- [23] E. Soler, M. Faus, and P. Mula, "Anestesiología".
- [24] "Máquinas de Anestesia – Malbo Ecuador." <https://malboecuador.com/portfolio/maquinas-de-anestesia/> (accessed Aug. 27, 2022).
- [25] "Esta es la importancia de las máquinas de anestesia | Promedco." <https://www.promedco.com/noticias/importancia-de-las-maquinas-de-anestesia> (accessed Aug. 27, 2022).
- [26] R. G. Loeb and J. B. Eisenkraft, "2 - The Anesthesia Machine and Workstation," in *Anesthesia Equipment (Third Edition)*, J. Ehrenwerth, J. B. Eisenkraft, and J. M. Berry, Eds. Philadelphia: W.B. Saunders, 2021, pp. 25–65. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-67279-5.00002-9>.
- [27] J. R. Jacobs, J. G. Reves, and P. S. A. Glass, "Automated Drug Delivery in Anesthesia," *ASA Refresher Courses in Anesthesiology*, vol. 19. pp. 127-127–137, 2008. [Online]. Available: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=doi_dedup___:6036c4be216de986318aaa51c77bab25
- [28] U. Srivastava, "Anaesthesia Gas Supply: Gas Cylinders.," *Indian J Anaesth*, vol. 57, no. 5, pp. 500-500–506, 2013, doi: 10.4103/0019-5049.120147.
- [29] K. H. Shelley and A. A. Alian, "Understanding Anesthesia Equipment, 5th Edition," *Anesthesiology*, vol. 109. pp. 754-754–755, 2008. [Online]. Available: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=doi_____:b91d55d09aa0b5e85a04e06dc497b01c

- [30] S. Nini Malayaman, G. Mychaskiw, J. M. Berry, and J. Ehrenwerth, “1 - Medical Gases: Storage and Supply,” in *Anesthesia Equipment (Third Edition)*, J. Ehrenwerth, J. B. Eisenkraft, and J. M. Berry, Eds. Philadelphia: W.B. Saunders, 2021, pp. 3–24. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-67279-5.00001-7>.
- [31] J. B. Eisenkraft, “3 - Anesthesia Vaporizers,” in *Anesthesia Equipment (Third Edition)*, J. Ehrenwerth, J. B. Eisenkraft, and J. M. Berry, Eds. Philadelphia: W.B. Saunders, 2021, pp. 66–99. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-67279-5.00003-0>.
- [32] S. G. Walker, S. Packiasabapathy, G. Sheplock, and M. A. Acquaviva, “4 - Breathing Circuits,” in *Anesthesia Equipment (Third Edition)*, J. Ehrenwerth, J. B. Eisenkraft, and J. M. Berry, Eds. Philadelphia: W.B. Saunders, 2021, pp. 100–124. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-67279-5.00004-2>.
- [33] J. Pablo Bouchacourt Agdo, J. Riva, A. Beatriz, and A. Ana Rodríguez, “Maquinas de Anestesia para ventilación mecánica prolongada.” [Online]. Available: <https://www.fda.gov/media/136318/download>
- [34] J. López-Herce and Á. Carrillo, “Ventilación mecánica: indicaciones, modalidades y programación y controles,” *Anales de Pediatría Continuada*, vol. 6, no. 6, pp. 321–329, 2008, doi: 10.1016/S1696-2818(08)75597-5.
- [35] J. Duke, “The anesthesia machine and vaporizers,” *Anesthesia Secrets*, pp. 130–136, 2011, doi: 10.1016/B978-0-323-06524-5.00018-0.
- [36] “sklearn.tree.DecisionTreeClassifier — scikit-learn 1.1.2 documentation.” <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.tree.DecisionTreeClassifier.html> (accessed Oct. 16, 2022).
- [37] “Decision Trees: Gini vs Entropy | Quantdare.” <https://quantdare.com/decision-trees-gini-vs-entropy/> (accessed Nov. 13, 2022).
- [38] “sklearn.ensemble.RandomForestClassifier — scikit-learn 1.1.3 documentation.” <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html> (accessed Nov. 13, 2022).

ANEXOS

Anexo I. Matriz Criterios de Selección de los artículos

criterio	Título	Título de la revista o conferencia	Autores	Año de publicación	Base de Datos	Objetivo del estudio
Fallas	Morbidity and mortality related to anaesthesia outside the operating room.	Current Opinion in Anesthesiology	Missant, Carlo	2004	PUBMED	Trata acerca de los posibles riesgos del uso de la máquina de anestesia respecto a las fallas técnicas
Checklist	Checking the anaesthetic machine: avoiding equipment error by initiating a twice-daily checking routine	JOURNAL OF PERIOPERATIVE PRACTICE	Wicker, P Smith, B	2006	GOOGLE SCHOLAR	Investiga la importancia del chequeo periódico de la máquina de anestesia antes del procedimiento (Checklist) IMPORTANTE
Fallas	Anaesthetic machine checking guidelines: have we improved our practice?	EUROPEAN JOURNAL OF ANAESTHESIOLOGY	Langford, R Gale, T C E Mayor, A H	2007	PUBMED	Estudio detección de fallas de máquina de anestesia teniendo en cuenta los años de experiencia (IMPORTANTE) Referencias históricas 1987-1994
Fallas	A prospective study on anesthesia machine fault identification	Anesthesia and Analgesia	Larson, Eric R. Nuttall, Gregory A. Ogren, Brian D.	2007	PUBMED	Estudio de fallas comunes de máquina de anestesia
Fallas	Critical incident reports concerning anaesthetic equipment: analysis of the UK National Reporting and Learning System (NRLS) data from 2006-2008*	Anaesthesia	Cassidy, C J Smith, A Arnot-Smith, J	2011	PUBMED	Es una investigación (2006-2008) en UK según (National Reporting and Learning System) donde se buscan incidentes relacionados a equipos de anestesia y se categorizan sus fallas más comunes IMPORTANTE
Mantenimiento	Safety Features in Anaesthesia Machine.	Indian Journal of Anaesthesia	Subrahmanyam, M Mohan, S	2013	PUBMED	Mejoras realizadas (Partes nuevas y especializadas) a la unidad de anestesia para hacerlas más seguras al momento de utilizarlas

Criterio	Título	Título de la revista o conferencia	Autores	Año de publicación	Base de Datos	Objetivo del estudio
Checklist	Anaesthesia machine: checklist, hazards, scavenging	Indian journal of anaesthesia	Goneppanavar, Umesh Prabhu, Manjunath	2013	GOOGLE SCHOLAR	Es una investigación realizada acerca de las Checklist FDA y las posibles fallas enmarcadas por subsistemas
Mantenimiento	Failure mode and effects analysis applied to the maintenance and repair of anesthetic equipment in an austere medical environment	INTERNATIONAL JOURNAL FOR QUALITY IN HEALTH CARE	Rosen, Michael A Lee, Benjamin H Sampson, John B Koka	2014	GOOGLE SCHOLAR	Estudio relacionado al ambiente en el que se desarrolla el mantenimiento por parte del ingeniero a cargo. Considerando análisis de falla y sus consecuencias.
Checklist	World Health Organization-World Federation of Societies of Anaesthesiologists (WHO-WFSA) International Standards for a Safe Practice of Anesthesia	Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d'anesthésie	Gelb, Adrian W Morriss, Wayne W Johnson, Walter Merry	2018	Springer	WHO-WFSA realizó un estudio para estandarizar las prácticas seguras de uso de la máquina de anestesia en conjunto con las respectivas instalaciones y manteniendo, checklists.
Fallas	Human Factors Evaluation of the Universal Anaesthesia Machine: Assessing Equipment with High-Fidelity Simulation Prior to Deployment in a Resource-Constrained Environment.	Journal of the National Medical Association	JB, Sampson BH, Lee Koka, R AM, Chima EV	2019	ELSEVIER	Evaluación del componente humano frente a una simulación de fallas críticas a la unidad de anestesia. Para evaluar la respuesta del personal a cargo
Fallas	Safety first: Checking the anaesthesia machine.	European journal of anaesthesiology	Grüßer, L Staender, S Rossaint, R	2020	GOOGLE SCHOLAR	Estudio de casos relacionados con incidentes relacionados fallas de la máquina de anestesia y las estadísticas con referencia a la ASA (UK, USA, GERMANY)

criterio	Título	Título de la revista o conferencia	Autores	Año de publicación	Base de Datos	Objetivo del estudio
Fallas	Total Productive Maintenance: A Safety Approach to Optimize the Anesthesia Device Outcomes	2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)	Mkalaf, K A	2020	IEEE Xplore	Una investigación respecto al ratio de fallas, el tiempo entre fallas y el tiempo promedio de reparación de las unidades de anestesia. Respecto al estudio realizado por Inglaterra y Irlanda
Fallas	Common Hazards Anesthesia Machine	Anesthesia Equipment E-Book : Principles and Applications	Ehrenwerth, Jan Eisenkraft, James B Berry, James M	2021	ELSEVIER	Es un capítulo respecto a las fallas comunes de máquina de anestesia respecto a los diferentes subsistemas y que patología le genera al paciente
Checklist	Anesthesia Checkout - 2008 ASA Recommendations for Pre	American Society of Anesthesiologists (ASA)	Brockwell, Russell C Dorsch, Jerry Holland, Carolyn G Aana, M S N Driscoll, Chad	2008	PUBMED	Es una lista de chequeo administrada por la asociación de anesthesiólogos americanos, donde se establece un estándar y mejoras respecto a la lista de chequeo suministrada por las FDA – 1987
Checklist	Preanesthesia detection of equipment faults by anesthesia providers at an academic hospital: Comparison of standard practice and a new electronic checklist	Journal of the American Association of Nurse Anesthetists	Blike, G Biddle, C	2000	GOOGLE SCHOLAR	Se realizó un estudio donde se observó que el checklist generado por la FDA. Se desarrollo una checklist mediante métodos usados en la aviación y equipo militar para la detección de fallas. Mejoro respecto a la FDA, pero no detectaba gran cantidad de fallas
Checklist	An Evaluation of Anesthesiologists' Present Checkout Methods and the Validity of the FDA Checklist	Anesthesiology	March, Mollyann G. Crowley, J. Jay	1991	PUBMED	El estudio verifica la efectividad de la checklist emitida por la FDA en 1987 con métodos propios de los anesthesiólogos. En algunas fallas se vio un cambio notable respecto a los propios conocimientos del anesthesiólogo Ratio proporción O2-NO2 (IMPORTANTE)

criterio	Título	Título de la revista o conferencia	Autores	Año de publicación	Base de Datos	Objetivo del estudio
Mantenimiento	Pre-use anesthesia machine check; certified anesthesia technician based quality improvement audit.	Anesthesia: Essays & Researches	Al Suhaibani, Mazen Al Malki, Assaf Al Dosary, Saad Al Barmawi	2014	PUBMED	Se realiza un estudio respecto al antes y después de una auditoria técnica acerca del correcto chequeo de máquina de anestesia - Resultados Positivos
Fallas	Detection of Anesthesia Machine Faults	Anesthesia & Analgesia	Buffington, Charles W Ramanathan, Sivam Turndorf, Herman	1984	PUBMED	Estudio realizado por un anestesiólogo para observar el número de fallas encontradas al realizar el chequeo a la máquina de anestesia. Deficiencia a la hora de encontrar las fallas 1984
Fallas	Anesthesia Machine Failure: A Case Study.	ANA Journal	Wren, Kathleen	2020	PUBMED	Es un caso de estudio, acerca de un incidente relacionado con el mal funcionamiento de la unidad de anestesia
Fallas	Malfunction of adjustable pressure limiting valve	Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology	Chaturvedi, Apoorv Upendra Potdar, Meenoti Pramod	2017	GOOGLE SCHOLAR	Es un artículo relacionado con el mal funcionamiento, de la maquina de anestesia en la válvula ajustable de presión. Analizando las causas de esta falla.
Fallas	Ventilatory failures with the Datex-Ohmeda 7900 SmartVent	Anesthesiology	Mitton, M	2002	PUBMED	Investigación realizada acerca de las fallas comunes del ventilador mecánico de la máquina de anestesia de referencia SmartVent
Fallas	Flow sensor fault causing ventilator malfunction	Anaesthesia	Hari, M S Jennings, M	2005	PUBMED	Artículo relacionado con las fallas en el sensor de flujo y el mal funcionamiento del ventilador mecánico
Fallas	Automated checkout routines in anesthesia workstations vary in detection and management of breathing circuit obstruction.	Anesthesia and analgesia	MP, Dosch	2014	PUBMED	Realiza un checkout de la máquina de anestesia para verificar el buen funcionamiento del circuito respiratorio
Fallas	A Failure of the Chain-Link Mechanism on the Ohmeda Excel 210 Anesthetic Machine	Anesthesia and analgesia	Cheng, Christine J C Garewal, Davinder S	2001	PUBMED	Falla en el sistema proporcional de O2 y N2O en máquina de anestesia Datex Ohmeda