



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL:**

*Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real para el registro y la
gestión del mantenimiento del sistema de ventilación del laboratorio de
medicina de alta complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit
Eva*

REALIZADO POR:

Kenneth Francisco Arce Poveda

COORDINADOR DE PRÁCTICA:

Ing. Sebastián Mata Ortega

I SEMESTRE 2025



Carrera evaluada y acreditada por: Agencia de Acreditación de programas de Ingeniería y de Arquitectura



Profesor guía

Ing. Juan José Montero Jiménez

Asesor industrial

Ing. Brayan Delgado Cairol

Profesor lector

Ing. Rosa Matarrita Chávez

Integrante jurado

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Hoja de Datos

Datos personales

Nombre completo: Kenneth Arce Poveda

Número de cédula: 208010119

Número de carné: 2018086155

Números de teléfono: +506 71296644

Correo electrónico: kenneth262000@estudiantec.cr ; kenneth262000@gmail.com

Dirección exacta de domicilio: Costa Rica, provincia de Alajuela, Candelaria de Naranjo, calle San Juan, 500 m al norte, casa a mano izquierda.

Datos de la empresa

Nombre: Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) .

Actividad principal: administración y provisión de los servicios de salud y seguridad social en Costa Rica.

Dirección: edificio Central de la Caja Costarricense de Seguro Social, Avenida 2, Calle 5, San José, Costa Rica.

Contacto: ccss@ccss.sa.cr

Teléfono: +506 2539 0000

Carta de aceptación de la empresa



CAJA COSTARRICENSE DE SEGURO SOCIAL
Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva
Servicio Ingeniería y Mantenimiento
Teléfono: 25235948 / 25235912
Correo electrónico bjdelgado@ccss.sa.cr / lcervant@ccss.sa.cr

HMACE-DAF-INGM-0247-2024
San José, 01 octubre 2024

Ingeniero
Sebastián Mata Ortega, Coordinador de Trabajo Final de Graduación
Escuela de Ingeniería Electromecánica
Tecnológico de Costa Rica

Estimado señor:

ASUNTO: VISTO BUENO TRABAJO FINAL GRADUACIÓN

En atención a documento de fecha 11 de setiembre de los corrientes y con delegación superior registrada en oficio HMACE-DG-1431-2024 esta jefatura brinda el visto bueno para que el estudiante Kenneth Francisco Arce Poveda con cédula 208010119 y carné 2018086155 realice su Trabajo Final de Graduación a nivel de Licenciatura en el este nosocomio.

Acorde con los datos institucionales, estos son los siguientes:

- **Nombre:** *Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, Caja Costarricense de Seguro Social.*
- **Actividad:** *Prestación de servicios de salud.*
- **Dirección:** *San José, Distrito Hospital, Contiguo a estación del Ferrocarril al Pacífico.*
- **Contacto:** *Ing. Brayan José Delgado Cairol, Jefatura Servicio Ingeniería y Mantenimiento – bjdelgado@ccss.sa.cr*
- **Teléfono:** *25235912.*

La propuesta presentada por el estudiante Arce Poveda quede momento se rige por el nombre de Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real para el registro y gestión de mantenimiento del sistema de ventilación del Laboratorio de Medicina de Alta Complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, viene a satisfacer un requerimiento regulatorio del ente rector de salud, así como, permitirá generar la data necesaria para establecer las condiciones preliminares para un mantenimiento basado en condición a los equipos de



CAJA COSTARRICENSE DE SEGURO SOCIAL
 Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva
 Servicio Ingeniería y Mantenimiento
 Teléfono: 25235948 / 25235912
 Correo electrónico bjdelgado@ccss.sa.cr / lcervant@ccss.sa.cr

HMAE-DAF-INGM-0247-2024
 San José, 01 octubre 2024

climatización que son de alta criticidad para los procesos de reproducción asistida de este centro asistencial.

En virtud de lo anterior, esta institución y quien suscribe, considera que esta propuesta se alinea con los objetivos estratégicos institucionales razón por la cual se extiende el aval, asimismo, cabe señalar que no es necesario la confidencialidad del proyecto. Solamente se solicita copia de este al contar con la aprobación final por parte del Tecnológico de Costa Rica.

Atentamente,

SERVICIO DE INGENIERÍA Y MANTENIMIENTO - 2105



Firmado digitalmente con agente GAUDI por:
Brayan José Delgado Cairo (FIRMA)
 Esto es una representación gráfica únicamente
 Verifique la validez de la firma

Brayan José Delgado Cairo
 Jefatura



BJDC/hjdc
 Anexos adjuntos:
 Copia(s): Archivo SIM - 2105
 Remitido vía digital: A todas las partes interesadas

Dedicatoria

A Dios.

A mis padres, por su apoyo incondicional y por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí, incluso en los momentos más difíciles. Por creer en mí, por estar presentes en cada paso y por brindarme todo lo necesario para completar mis estudios de la mejor manera posible.

A mi padrino, por su constante interés en mi vida académica y personal, y por estar siempre disponible cuando necesito orientación o ayuda.

A Nicole Orozco Sibaja, quien estuvo presente durante mi etapa universitaria. Por acompañarme y estar siempre presente y pendiente en el día a día de este proceso, así como su motivación en los momentos en que más la necesitaba y su fe en mí incluso cuando yo mismo dudaba.

A mis amigos de la universidad, quienes se convirtieron en un motor indispensable para sobrellevar cada día académico, y con quienes compartí momentos de crecimiento, esfuerzo y alegría.

Agradecimientos

A mis padres, gracias por creer en mí desde que era niño, por protegerme e impulsarme siempre por un camino de humildad y respeto. Gracias por enseñarme que las metas están para alcanzarse y que el único límite real somos nosotros mismos.

A mi padrino, quien siempre ha estado pendiente de mí, cuyas palabras y consejos han sido una guía constante, tanto para la vida como para mis estudios.

A Nicole Orozco Sibaja, a quien Dios puso en mi camino al inicio de esta etapa universitaria. Gracias por creer en mí desde el primer día, por mostrarme una versión de mí que muchas veces no podía ver, y por motivarme siempre a superarme, no para competir con otros, sino para ser la mejor versión de mí mismo.

A mi profesor guía, Ing. Juan José Montero Jiménez, por su acompañamiento continuo y su compromiso durante el desarrollo de este trabajo final de graduación. Su orientación fue fundamental para que este proyecto llegara a buen puerto.

A los profesores e ingenieros Carlos Piedra Santamaría y Sebastián Mata Ortega, por mantener siempre la puerta abierta y estar dispuestos a ayudar con generosidad y disposición durante mi formación como estudiante.

Índice general

1. Capítulo I: Introducción	1
1.1. Reseña de la empresa	2
1.2. Antecedentes	4
1.2.1. Antecedentes teóricos	4
1.2.2. Antecedentes experimentales	5
1.3. Planteamiento del problema	7
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
1.5. Justificación	10
1.6. Alcance	12
1.7. Viabilidad	13
1.8. Administración del riesgo	14
1.9. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto	15
1.10. Metodología por seguir	16
2. Capítulo II: marco teórico	17
2.1. Laboratorios de reproducción asistida	17
2.2. Sistema de ventilación	17
2.2.1. Sistemas de ventilación en hospitales	17
2.2.2. Calidad del aire interior en hospitales	18
2.2.3. Filtración de partículas	19
2.2.3.1. Clasificación de los filtros de aire	20
2.2.3.2. Mecanismos de captura de partículas	20
2.2.3.3. Filtración de aire de alta eficiencia	23
2.2.3.4. Resistencia al flujo de aire	24
2.2.3.5. Sistemas de filtración tipo cielo	24
2.2.3.6. Filtros en unidades manejadoras de aire acondicionado	25
2.2.3.7. Filtros tipo bolsa MERV 14	26
2.2.3.8. Filtros plisados MERV 8	26
2.3. Análisis de modo y efecto de fallas (Amfe)	27
2.3.1. Modos de falla	30
2.3.2. Efectos de falla	30

2.3.3. Proceso para realizar un Amfe	31
2.4. Diagrama de Pareto	32
2.4.1. Fundamentos del diagrama de Pareto	32
2.4.2. Construcción y análisis del diagrama de Pareto	32
2.5. Análisis económico y el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	34
3. Capítulo III: Desarrollo de objetivos	36
3.1. Determinación de la variable de mayor impacto del proceso	36
3.1.1. Análisis AMFE	36
3.1.2. Diagrama de Pareto	39
3.2. Diseño del sistema de monitoreo	42
3.2.1. Determinación de las variables por monitorear	42
3.2.2. Arquitectura de sistema	43
3.2.3. Prototipo del sistema de monitoreo	47
3.3. Modelo de pronóstico para la vida útil remanente de filtros HEPA	52
3.3.1. Uso de lenguaje de programación Python	52
3.3.2. Código de simulación en Python	52
3.3.2.1. Configuración inicial e importación de bibliotecas	52
3.3.2.2. Funciones auxiliares del sistema	53
3.3.2.3. Simulación de variables físicas	53
3.3.2.4. Estimación de vida útil remanente del filtro	53
3.3.2.5. Visualización gráfica en tiempo real, alarmas visuales y sonora	54
3.4. Análisis técnico-financiero	58
3.4.1. Enfoque metodológico	58
3.4.2. Costos de implementación del sistema de monitoreo con componentes industriales	59
3.4.2.1. Costos directos de implementación	59
3.4.2.1. Costos indirectos de implementación	59
3.4.3. Cálculo del costo anual uniforme equivalente (CAUE) con equipos industriales	61
3.4.4. Análisis comparativo y beneficio económico actualizado	61
3.4.5. Propuesta de fases de implementación, capacitación y seguimiento del cambio	62
3.4.5.1. Fase 1: implementación técnica y validación en sitio	62
3.4.5.2. Fase 2: capacitación operativa y documentación técnica	63
3.4.5.3. Fase 3: seguimiento, evaluación del cambio y mejora continua	63
4. Conclusiones	64
5. Recomendaciones	65
6. Bibliografía	66
7. Apéndices	70

Índice de figuras

Figura 1. Organigrama general de la CCSS (2023).	3
Figura 2. Planteamiento del problema.	8
Figura 3. Cronograma proyectado para el desarrollo del proyecto.	15
Figura 4. Metodología por seguir para el proyecto.	16
Figura 5. Eficiencia de filtrado según ISO 16890 y penetración de partículas en el sistema respiratorio según su tamaño.	19
Figura 6. Composición típica de un sistema de filtración de aire.	20
Figura 7. Mecanismo de impacto inercial para la captura de partículas.	21
Figura 8. Mecanismo de intercepción para la captura de partículas.	21
Figura 9. Mecanismo de obstrucción para la captura de partículas.	22
Figura 10. Mecanismo de difusión para la captura de partículas.	22
Figura 11. Principio de Langmuir.	23
Figura 12. Composición del filtro HEPA.	24
Figura 13. Composición de la unidad manejadora de aire acondicionado.	25
Figura 14. Filtro tipo bolsa MERV.	26
Figura 15. Filtro tipo MERV.	27
Figura 16. Clasificación de la gravedad del modo de fallo según la repercusión en el cliente.	28
Figura 17. Frecuencia de ocurrencia del modo de fallo.	28
Figura 18. Clasificación de la detección del modo de fallo.	29
Figura 19. Matriz de evaluación de la frecuencia, gravedad y detectabilidad de fallos.	29
Figura 20. Secuencia del proceso para realizar un Amfe.	31
Figura 21. AMFE del proceso de sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.	38
Figura 22. Gráfico del diagrama de Pareto del sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.	40
Figura 23. Presiones diferenciales del filtro HEPA a distintas velocidades del ventilador.	42
Figura 24. Descomposición funcional del sistema de mantenimiento predictivo para el sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.	45
Figura 25. Arquitectura funcional del concepto del sistema de mantenimiento predictivo para el sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.	46
Figura 26. Sensor digital de presión diferencial.	47
Figura 27. Sensor compacto de flujo de aire.	48
Figura 28. Arduino Mega 2560.	48

Figura 29. Módulo de comunicación inalámbrica.	49
Figura 30. Prototipo de la arquitectura funcional del sistema de monitoreo en tiempo real para filtro HEPA.	50
Figura 31. Propuesta de ubicación de sensores de presión diferencial y velocidad del aire en el sistema de ventilación.	51
Figura 32. Simulación en tiempo real del comportamiento del filtro HEPA.	55
Figura 33. Simulación en tiempo real de la caída repentina de presión del filtro HEPA.	56
Figura 34. Simulación en tiempo real del desprendimiento del filtro HEPA.	56
Figura 35. Simulación en tiempo real de llegada a 350 PA de diferencial de presión en el filtro HEPA.	57
Figura 36. Simulación en tiempo real de llegada a 400 PA de diferencial de presión en el filtro HEPA.	57

Índice de tablas

1	clasificación de requisitos del sistema de monitoreo de filtros HEPA	44
2	asignación funcional por módulo lógico del sistema.	46
3	desglose de inversión con componentes industriales, lo que incluye la instalación.	59

Índice de abreviaturas

- °C: grados Celsius.
- Amfe: análisis modal de fallos y efectos.
- Amfec: análisis de modos de fallos, efectos y criticidad.
- ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (American National Standards Institute).
- Ashrae: Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).
- CAUE: costo anual uniforme equivalente.
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- CBM: mantenimiento basado en la condición (Condition-Based Maintenance).
- COV: compuestos orgánicos volátiles.
- CPU: unidad central de procesamiento (Central Processing Unit).
- CSV: valores separados por comas (Comma-Separated Values).
- FIV: fertilización in vitro.
- GUI: interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface).
- HEPA: aire particulado de alta eficacia (High Efficiency Particulate Air).
- HVAC: calefacción, ventilación y aire acondicionado (Heating, Ventilation and Air Conditioning).
- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission).
- IoT: Internet de las cosas (Internet of Things).
- ISO: Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization).
- ITCR: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- CCSS: Caja Costarricense de Seguro Social.
- MERV: valor mínimo de reporte de eficiencia (Minimum Efficiency Reporting Value).
- MTBF: tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures).
- Pa: Pascal (unidad de presión).
- PdM: mantenimiento predictivo (Predictive Maintenance).
- PHM: pronóstico de fallas y gestión de la salud (Prognostics and Health Management).
- RAM: memoria de acceso aleatorio (Random Access Memory).
- RUL: vida útil remanente (Remaining Useful Life).
- UMA: unidad manejadora de aire.
- VUR: vida útil remanente.

Resumen

Este proyecto desarrolla un sistema de monitoreo en tiempo real para supervisar variables críticas del sistema de ventilación del laboratorio de medicina de alta complejidad del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, con énfasis en el filtro HEPA. Esto surge ante la falta de un mecanismo que registre el estado del filtro antes de la inyección de aire en áreas críticas como las salas de fertilización in vitro. En la actualidad, el mantenimiento se realiza de manera preventiva cada 12 meses, sin evaluar el desgaste real del filtro, lo que puede provocar reemplazos prematuros o riesgos inadvertidos.

Para esto se diseñó una simulación en Python que modela el aumento del diferencial de presión del filtro HEPA con el tiempo. El sistema muestra de forma gráfica los valores simulados en tiempo real, activa alarmas visuales y sonoras al superar los umbrales definidos y utiliza un modelo de regresión lineal para estimar la vida útil remanente. Además, registra semanalmente los datos que se generan, simulando una trazabilidad histórica.

Como complemento metodológico, se aplicó un Amfec (análisis de modos de fallos, efectos y criticidad) para identificar los componentes más críticos. Con base en esto, se definió la arquitectura lógica del sistema y se elaboró un análisis técnico-financiero para evaluar su viabilidad futura con equipos industriales. Los resultados indican que el monitoreo en tiempo real puede mejorar significativamente la gestión del mantenimiento hospitalario y que las simulaciones representan una herramienta eficaz para validar soluciones sin intervenir en entornos clínicos sensibles.

Palabras clave: simulación, monitoreo en tiempo real, filtros HEPA, presión diferencial, mantenimiento basado en condición, Python.

Abstract

This project involves the development of a real-time monitoring system to supervise critical variables of the ventilation system at the High-Complexity Medicine Laboratory of the Women's Hospital Dr. Adolfo Carit Eva, with emphasis on the HEPA filter. The initiative responds to the lack of a mechanism to continuously monitor the filter's condition before treated air is injected into sensitive clinical areas, such as in vitro fertilization rooms. Currently, maintenance is performed preventively every 12 months without assessing the actual condition of the filter, which can lead to premature replacements or undetected risks.

A simulation was developed in Python to model the progressive increase in differential pressure across the HEPA filter over time. The system provides real-time graphical visualization of simulated values, triggers visual and audible alarms when thresholds are exceeded, and uses a linear regression model to estimate the filter's remaining useful life. It also includes weekly data logging to simulate historical traceability.

As part of the methodology, a Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) was applied to identify the components with the greatest impact on the process. Based on this, the logical system architecture was designed and a technical-financial analysis was carried out to assess the feasibility of future implementation using industrial-grade components. The simulation results demonstrate that a real-time monitoring system is a viable solution to optimize maintenance management in hospital environments, and that simulations can be an effective tool for evaluating solutions without interfering with sensitive clinical operations.

Keywords: Simulation, Real-time monitoring, HEPA filters, Differential pressure, Condition-based maintenance, Python.

1. Capítulo I: introducción

En los hospitales de Costa Rica, como el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, se dispone de sectores de alta complejidad, como la Unidad de Medicina Reproductiva, donde la calidad del aire es fundamental para preservar un entorno seguro y estéril, especialmente en áreas críticas dedicadas a los tratamientos de medicina reproductiva. La calidad del aire no solo es crucial desde la perspectiva de la salud pública, sino también como un requisito normativo que garantiza la seguridad de los pacientes, del personal médico y de los procedimientos realizados en el hospital. Por ende, controlar adecuadamente este ambiente minimiza el riesgo de infecciones, contaminaciones y complicaciones durante los procesos de fertilización.

Este proyecto aborda la necesidad de desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real del sistema de filtrado de aire de la Unidad de Medicina Reproductiva de Alta Complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva. Dicha unidad es importante en el ámbito nacional para llevar a cabo procedimientos avanzados de reproducción asistida, como la fertilización in vitro (CCSS, 2020). El objetivo principal del proyecto consiste en mejorar la confiabilidad de los procesos realizados en la unidad, controlando el cumplimiento de las condiciones óptimas requeridas por la Norma ISO 17359:2018, así como reducir los costos de mantenimiento, los tiempos de inactividad y aumentar la eficiencia.

El sistema de filtrado de aire en la Unidad de Medicina Reproductiva está compuesto por cuatro etapas de filtración, cuyo funcionamiento correcto es esencial para cumplir con las normativas vigentes, como las ANSI/Ashrae 170-2021 y ANSI/Ashrae 62.1-2013, que establecen estándares rigurosos de calidad del aire en instalaciones médicas. Este sistema tiene la función de eliminar partículas contaminantes, bacterias y otros agentes patógenos que pueden comprometer la calidad del aire en ambientes controlados, además, de controlar variables como la temperatura y la humedad. Sin embargo, la gestión actual del sistema de filtración enfrenta desafíos, como la falta de monitoreo continuo, lo que puede generar retrasos al detectar fallas o en la disminución del rendimiento de los filtros. Esto afecta directamente la eficacia del sistema y pone en riesgo los procedimientos médicos de alta complejidad llevados a cabo en la unidad.

El presente proyecto plantea un sistema de monitoreo en tiempo real para el sistema de filtrado de aire, que permite el seguimiento continuo del estado de cada etapa de filtración y tiene la capacidad de almacenar los datos que se generan en la nube. Al estar vinculado a la nube, el sistema garantiza la conservación de un registro histórico del monitoreo, además, de generar y enviar reportes con base en ese historial. Esto facilita la trazabilidad de las condiciones de los filtros durante su operación. Asimismo, se documenta detalladamente el proceso, el análisis y el desarrollo realizados para cumplir con los objetivos que se plantearon, con el propósito de resolver el problema actual que enfrenta la Unidad de 4 Medicina Reproductiva de Alta Complejidad en cuanto al monitoreo del sistema de filtrado de aire. Además, de satisfacer el interés de la Unidad en mejorar la confiabilidad de los ambientes en los que se llevan a cabo los procedimientos de alta complejidad.

Este proyecto contribuye directamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible: el ODS 3 Salud y bienestar, el ODS 8 Trabajo decente y crecimiento económico, el ODS 9 Industria, innovación e infraestructura y el ODS 12 Producción y consumo responsables. Al garantizar un entorno libre de contaminantes en un área crítica de salud, el proyecto promueve la seguridad y el bienestar de los pacientes, reduce los riesgos de infecciones y aumenta la confiabilidad de los tratamientos médicos. Además, adoptar tecnologías avanzadas en monitoreo impulsa la innovación y mejora la eficiencia en el uso de recursos hospitalarios, lo que apoya la creación de infraestructuras resilientes y sostenibles. Al optimizar el mantenimiento y prolongar la vida útil de los sistemas de filtración, este proyecto también fomenta prácticas responsables y sostenibles, en línea con los principios de producción y consumo responsable. De este modo, el proyecto impacta positivamente en la calidad de los servicios médicos, lo que promueve prácticas de trabajo eficientes, seguras y sostenibles en el sector salud.

1.1. Reseña de la empresa

La Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) es una institución pública autónoma, fundada en 1941, con el objetivo de brindar atención médica y seguridad social a todas las personas ciudadanas costarricenses. A lo largo de su historia, la CCSS ha sido un pilar del sistema de salud en Costa Rica, garantizando el acceso universal a servicios médicos de calidad y contribuyendo significativamente a los altos estándares de salud del país.

La CCSS es responsable de la administración de los seguros de salud y pensiones, tanto para trabajadores del sector público como del privado. Esta responsabilidad abarca una amplia red de hospitales, clínicas y áreas de salud distribuidas por todo el país, lo que consolida su presencia en cada rincón de Costa Rica. Entre sus principales hospitales destacan el Hospital México, el Hospital Calderón Guardia y el Hospital Nacional de Niños, entre otros.

En términos de infraestructura, la CCSS cuenta con una red nacional de establecimientos de salud que incluye unidades de atención primaria, hospitales regionales y nacionales, así como clínicas especializadas. Esto le permite ofrecer servicios de alta complejidad en áreas como oncología, cirugía cardiovascular y medicina reproductiva, donde sobresale la Unidad de Medicina Reproductiva de Alta Complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva.

La misión de la CCSS es garantizar la protección social y la prestación de servicios de salud de forma eficiente, equitativa y solidaria, con un enfoque en el bienestar de toda la población. Su visión consiste en consolidar un sistema de salud moderno, accesible y de calidad, que sea un referente en el ámbito regional y global.

En el ámbito financiero, la CCSS se sustenta en un sistema contributivo de seguros sociales, en el cual, tanto empleadores como trabajadores aportan al financiamiento de los servicios de salud y pensiones. Además, la institución implementa políticas para garantizar la sostenibilidad financiera del sistema, asegurando la cobertura a generaciones futuras.

La CCSS también impulsa iniciativas de innovación en la atención médica, como implementar tecnologías que mejoran el acceso a los servicios, la digitalización de expedientes médicos y el uso de plataformas en línea para la gestión de citas y servicios. De esta manera, la CCSS continúa su esfuerzo por modernizarse y adaptarse a las necesidades cambiantes de la población.

Con su enfoque en la mejora continua, la Caja Costarricense de Seguro Social es una institución clave para el desarrollo y el bienestar del país, brinda atención integral a millones de costarricenses y se destaca como un modelo de equidad en el acceso a la salud pública.

El organigrama de la Caja Costarricense de Seguro Social se presenta a continuación y en los anexos debido a su extenso tamaño. De igual manera, se puede visualizar de mejor forma mediante el enlace.

ORGANIGRAMA

Diciembre 2023

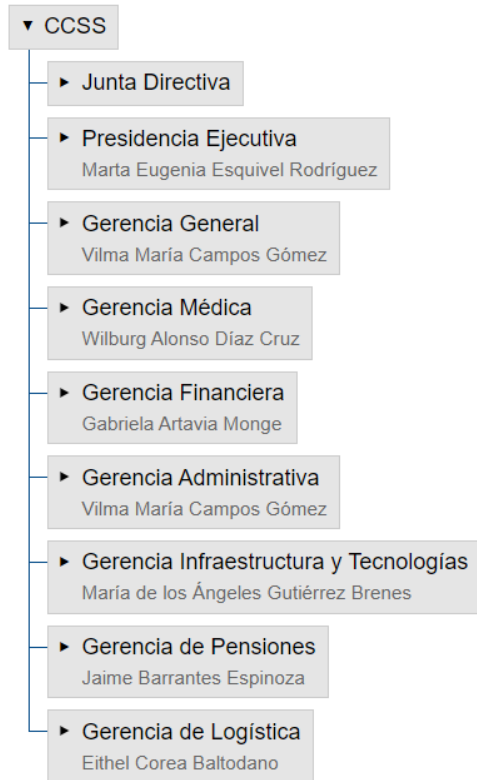


Figura 1. Organigrama general de la CCSS (2023).

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes teóricos

Para las empresas, la gestión eficiente del mantenimiento de equipos industriales constituye un factor crítico para la productividad y la competitividad. Un estudio realizado en Costa Rica destaca que una gestión efectiva del mantenimiento es esencial para maximizar la vida útil de los sistemas productivos y reducir los costos operativos. Se menciona que: “La adecuada gestión del mantenimiento minimiza los costos asociados a la producción y garantiza el funcionamiento seguro, confiable, eficiente y rentable de los equipos” (Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez, 2015, s.p.). Este enfoque se fortalece con la incorporación de tecnologías avanzadas como el Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial, que facilitan la recolección y el análisis de datos en tiempo real.

El mantenimiento basado en condición (CBM, por sus siglas en inglés) ha surgido como una solución avanzada que permite monitorear continuamente el estado de los equipos, lo que mejora la disponibilidad y la confiabilidad de las máquinas. El CBM se caracteriza por evaluar en tiempo real la condición de los equipos, lo que permite anticipar fallas antes de que ocurran. Carrasco et al. (2016) mencionan que, existen tres enfoques principales para este tipo de mantenimiento: basado en modelos, basado en conocimiento y basado en señales, cada uno con ventajas y desventajas según las características de los sistemas.

La integración de tecnologías como el IoT ha revolucionado el mantenimiento industrial, lo que permite la interconexión de dispositivos y la recopilación de datos en tiempo real desde ubicaciones remotas. Esto facilita el monitoreo de las condiciones de los equipos y da la posibilidad de tomar decisiones informadas para el mantenimiento preventivo. Según Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez (2015): “Disponer de información general y específica de los aspectos de la gestión de mantenimiento es el primer punto de partida para generar propuestas de mejora”(s.p.). Este conocimiento es valioso no solo para los departamentos de mantenimiento, sino también para las cámaras empresariales y los centros educativos.

La especialización en mantenimiento y la gestión correcta de la información son cruciales para optimizar las operaciones industriales. Como señalan Carrasco et al. (2016): “Todas las opciones tácticas en la ingeniería del mantenimiento industrial requieren una gran especialización, una adecuada gestión de la información y el conocimiento generado”(s.p.), lo que refuerza la importancia de la capacitación y gestión del conocimiento en el mantenimiento.

En Costa Rica, muchas empresas del sector manufacturero que emplean más de 100 trabajadores han comenzado a adoptar el CBM. Este enfoque permite: “Detectar cambios anormales en el funcionamiento de los equipos y anticipar fallas antes de que ocurran, mediante el monitoreo en tiempo real” (Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez, 2015, s.p.). Un ejemplo de éxito en la implementación del CBM se encuentra en la planta de Continental Tire Andina S.A., donde el uso de sensores y redes neuronales ha permitido una evaluación continua de los equipos, lo que facilita la toma de decisiones informadas para programar intervenciones de mantenimiento (Iglesias et al., 2020). Esta práctica se lleva a cabo bajo la Norma ISO 17359:2018, que establece un marco estandarizado para la puesta en funcionamiento del CBM y mejora la eficiencia operativa.

A pesar de los avances, todavía existen desafíos en la gestión del mantenimiento en Costa Rica. Entre ellos se destaca la necesidad de: “Educar a los ejecutivos sobre cómo el mantenimiento y la confiabilidad afectan a la empresa financieramente” (Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez, 2015, s.p.) y: “Desarrollar un proceso que promueva mejoras continuas en las prácticas de mantenimiento” (Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez, 2015, s.p.). Además, la falta de un plan de mantenimiento bien estructurado puede llevar a una disminución significativa en la disponibilidad y confiabilidad de los equipos, lo que aumenta los costos de reparación y reduce la producción

(Garrido, 2014).

En sectores como la minería, la aplicación del CBM ha sido especialmente valiosa. En la empresa Hudbay, la implementación de técnicas predictivas como el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja ha permitido una detección temprana de fallas, reduciendo de forma significativa el tiempo de reparación y aumentando el tiempo medio entre fallos (MTBF) (Huamani and Rodolfo., 2018). Estas mejoras son clave para mantener la competitividad en un entorno industrial global.

1.2.2. Antecedentes experimentales

La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real demuestra ser altamente efectiva en diversas industrias, mejorando tanto la confiabilidad operativa como optimizando los costos de mantenimiento. Un ejemplo claro es el desarrollo de sistemas para la detección de fallas en motores eléctricos, donde, como se menciona en (Méndez and Castillo, 2011, s.p.), “resultados experimentales demostraron la efectividad del modelo propuesto en la detección de la falla de cortocircuito en el estator en distintos niveles de severidad y carga, obteniendo una confiabilidad en la detección mayor al 95 % ”(s.p.). Este tipo de soluciones no solo es confiable, sino que también permite intervenciones tempranas, lo que contribuye de forma significativa a la reducción de tiempos de inactividad imprevistos.

Desde una perspectiva económica, Alvarado (2020) concluye que:

El costo asociado a la implementación y desarrollo del sistema experto es mucho menor al modelo de gestión de mantenimiento actual (\$69.54 totales respecto a los casi \$1,350 anuales), debido a la simplicidad y tipo de dispositivos empleados, y a los componentes y módulos del programa por ser código abierto o libre (s.p.).

Esta diferencia significativa resalta que los sistemas de monitoreo de condición no solo son efectivos, sino que también son considerablemente más económicos en comparación con las soluciones comerciales tradicionales.

La eficiencia de estos sistemas también se refleja en mejoras cualitativas, como la calidad del servicio. Un estudio sobre la implementación de un sistema de monitoreo en un enlace troncal de telecomunicaciones mostró que: “Según las evaluaciones, se muestra una disminución notable de 19,2% en las quejas hacia la empresa por parte de los clientes en este enlace troncal en específico” (Cumbe, 2021, s.p.). Este resultado subraya cómo estas tecnologías no solo impactan positivamente en la operación, sino también en la satisfacción de los usuarios, lo que genera beneficios para la reputación y la eficacia de la entidad.

Otro ejemplo de la viabilidad técnica y económica de estos sistemas se evidenció en Buendía (2023), donde se concluyó que:

Al comparar el coste inicial del prototipo con soluciones comerciales, el sistema de desarrollo propio es la de menor coste. Además, tras una evaluación que tomó en cuenta costo inicial, funcionalidad y escalabilidad, la alternativa del sistema de desarrollo propio se establece como la más ventajosa para el Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) (s.p.).

Este análisis destaca cómo las soluciones que se desarrollaron internamente pueden ofrecer mayores beneficios a largo plazo, superando a las comerciales en términos de costo y funcionalidad. Por otra parte, en el ámbito financiero, el uso de indicadores económicos para evaluar estos sistemas ha sido crucial, ya que tienen

la posibilidad de generar inversiones que se amortizan rápidamente, lo que genera beneficios financieros directos mediante la reducción de fallas y el mantenimiento no planificado. Como indica Salazar Duarte (2022):

Mediante el indicador financiero CAUE (costo anual uniforme equivalente), se demostraron las ventajas de instalar un sistema de monitoreo de la condición, como la disminución de costos en mantenimientos correctivos, lo cual provoca ahorros anuales equivalentes a ¢2.049.989,69, lo que es muy positivo para JASEC (s.p.).

1.3. Planteamiento del problema

El laboratorio de medicina reproductiva del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva cuenta con sistemas de monitoreo ambiental que permiten controlar variables críticas como la temperatura, la humedad relativa y la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos parámetros se supervisan mediante un sistema de alarmas que actúa de manera inmediata en caso de desviaciones, contribuyendo a la estabilidad del en el que se manipulan gametos y embriones humanos. Sin embargo, este monitoreo se limita exclusivamente a las condiciones internas del laboratorio, sin extenderse al sistema de ventilación que provee el aire tratado hacia estas áreas críticas.

El aire que está a punto de ser inyectado al laboratorio, es decir, antes de atravesar la última barrera de filtrado, no cuenta con un sistema de supervisión continua que permita verificar su pureza ni el estado de los filtros responsables de su calidad. En particular, el filtro HEPA, que constituye el último elemento de protección frente a partículas y agentes contaminantes, opera sin vigilancia técnica activa. Esto representa un punto ciego significativo dentro de un entorno que, por su naturaleza clínica y reproductiva, exige condiciones de operación altamente confiables y auditables.

Aunque existen mecanismos reactivos como las alarmas internas, que se activan en caso de condiciones inadecuadas dentro del laboratorio, estos no garantizan la detección oportuna de anomalías que puedan originarse antes del ingreso del aire tratado. En contextos tan sensibles como la fertilización in vitro, donde el margen de error es mínimo, la anticipación resulta clave. Tal como advierten Mortimer et al. (2018): “Se debe mantener una confiabilidad del 100 % en los parámetros ambientales requeridos” (s.p.), ya que incluso exposiciones breves a contaminantes o desequilibrios pueden afectar la biología de los gametos, interferir con el desarrollo embrionario o inducir alteraciones epigenéticas.

A esta limitación técnica se suma el modelo de mantenimiento actualmente aplicado al sistema de ventilación, basado exclusivamente en función del tiempo transcurrido desde la última intervención. A partir de este esquema, el filtro HEPA se reemplaza cada 12 meses sin considerar su condición real ni el grado de saturación acumulado durante su operación. Aunque esta práctica cumple con las normas internacionales (por ejemplo, ANSI/Ashrae 170-2021), ignora factores operativos clave como la carga de partículas y la eficiencia de filtrado residual, lo que puede provocar sustituciones prematuras y, en consecuencia, un aumento innecesario de costos.

Por otro parte, el estado funcional del filtro no puede ser inspeccionado físicamente sin interrumpir la operación del laboratorio, lo que hace inviable su evaluación periódica. Esta condición obliga a tomar decisiones con base en estimaciones conservadoras y reduce la capacidad del equipo técnico para anticipar fallas. Como resultado, persiste una brecha importante entre el monitoreo ambiental interno ya disponible y la supervisión continua del componente más crítico en la calidad del aire: el filtro HEPA.

En consecuencia, el problema no solo radica en una posible falla operativa del sistema de ventilación, sino en la carencia de un sistema de monitoreo continuo que permita registrar en tiempo real variables como la presión diferencial del filtro y el estado del flujo de aire antes de su ingreso a las áreas críticas. Esta ausencia limita la gestión técnica, impide extender la vida útil de los filtros con base en criterios objetivos y compromete la trazabilidad de las condiciones ambientales en un entorno donde cada decisión influye directamente en la posibilidad de una gestación exitosa. Solucionar esta brecha permite no solo optimizar recursos, sino también elevar el estándar de seguridad en uno de los procesos clínicos más delicados: el inicio de una vida.

		Dato suministrado	Referencias bibliográficas
Debiera	Garantizarse una confiabilidad del 100 % en la calidad del aire en áreas de trabajo hospitalarias, según las condiciones requeridas.	Se debe mantener una confiabilidad del 100 % en los parámetros ambientales requeridos.	Mortimer et al. (2018)

Desviación (problema)	Al desconocerse la confiabilidad del aire en el laboratorio de reproducción asistida en el Hospital de las Mujeres Adolfo Carit, existe el riesgo de formación de microorganismos o contaminantes que puedan atentar contra la salud de los pacientes y el personal médico.
------------------------------	---

Realidad	Actualmente, no se dispone de un dato específico que permita cuantificar la confiabilidad de la calidad del aire en el edificio de reproducción asistida del Hospital de las Mujeres Adolfo Carit Eva.	Desconocido porcentaje de confiabilidad.	(Brayan Delgado Cairol, comunicación personal, 4 de Octubre de 2024)
-----------------	--	--	--

Figura 2. Planteamiento del problema.

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real basado en el pronóstico y evaluación del estado del sistema de ventilación, que permita el registro y la gestión eficiente del mantenimiento del sistema de ventilación en el laboratorio de medicina de alta complejidad del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis de modos de falla, efectos y criticidad (Amfec) para determinar los componentes críticos que deben monitorearse en el sistema de ventilación.

Indicador de logro: análisis de criticidad y Amfec del sistema de ventilación.

- Diseñar un sistema de monitoreo seleccionando las variables necesarias para el diagnóstico o pronóstico del estado del sistema de ventilación.

Indicador de logro: sistema de monitoreo.

- Elaborar un modelo de pronóstico o diagnóstico para que se evalúe la vida útil remanente del sistema de ventilación y predecir posibles fallas críticas.

Indicador de logro: modelo de pronóstico o diagnóstico.

- Elaborar un análisis técnico-financiero de la tecnología necesaria para el desarrollo del proyecto, que determine la factibilidad de su implementación, con base en los costos de puesta en funcionamiento a través del costo anual uniforme equivalente (CAUE).

Indicador de logro: costo anual uniforme equivalente (CAUE).

1.5. Justificación

La gestión eficiente del mantenimiento en equipos industriales es crucial para maximizar la productividad y la competitividad en el entorno empresarial actual. La adopción de un mantenimiento con sistemas de monitoreo en tiempo real, complementado con tecnologías avanzadas como el Internet de las cosas (IoT), se presenta como una estrategia efectiva para mejorar la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos.

Un estudio sobre el estado del mantenimiento industrial en Costa Rica subraya la importancia de una gestión efectiva del mantenimiento para reducir costos y garantizar el funcionamiento seguro y eficiente de los equipos. Según Valverde-Vega and Gómez-Gutiérrez (2015): “La adecuada gestión del mantenimiento, dirigida a fortalecer y contribuir con el proceso productivo, minimiza los costos asociados a la producción y garantiza el funcionamiento seguro, confiable, eficiente y rentable de los equipos”(s.p.). Este enfoque resulta esencial para las empresas que buscan mantenerse competitivas en un mercado cada vez más exigente.

La implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en CBM no solo mejora la capacidad de respuesta ante posibles fallas, sino que también proporciona una ventaja significativa en términos de eficiencia operativa. Iglesias et al. (2020) describen un caso exitoso de puesta en funcionamiento de CBM en la planta de fabricación de llantas de Continental Tire Andina S.A., donde el uso de sensores y redes neuronales para el procesamiento de datos ha permitido mejorar significativamente la disponibilidad y la confiabilidad de las líneas de producción. Este ejemplo ilustra cómo las tecnologías modernas pueden integrarse en los sistemas de mantenimiento para lograr un control más preciso y eficiente de los activos industriales.

Además, la adopción de tecnologías como IoT ha revolucionado la forma en la que se lleva a cabo el monitoreo de condiciones, lo que permite la interconexión de dispositivos y la recopilación de datos en tiempo real desde ubicaciones remotas. Iglesias et al. (2020) destacan que: “Sistemas de control y monitoreo en tiempo real son importantes en múltiples áreas y aplicaciones, gracias a que otorgan la habilidad de poder monitorear la eficiencia del sistema analizado, además de poder diagnosticar errores y fallas presentes en estos”(s.p.). La integración de estas tecnologías no solo mejora la capacidad de monitoreo, sino que también permite una gestión más eficaz de los activos mediante el análisis de datos históricos y en tiempo real.

La necesidad de adoptar CBM es aún más evidente cuando se consideran los desafíos actuales en la gestión del mantenimiento en el sector industrial. Según Quiroz and Suárez (2023): “Existe una desconexión entre el potencial tecnológico disponible y las prácticas actuales de mantenimiento”(s.p.), lo que demuestra la resistencia de algunas empresas a adoptar enfoques más avanzados que pueden mejorar significativamente su eficiencia y competitividad. Esta brecha entre la tecnología y la práctica sugiere una oportunidad significativa para implementar CBM como solución para optimizar las operaciones de mantenimiento.

La importancia de estandarizar las prácticas de mantenimiento mediante la adherencia a normas internacionales también constituye un aspecto clave para la implementación exitosa de CBM. La Norma ISO 17359:2018 proporciona directrices claras para el monitoreo y diagnóstico de las condiciones de las máquinas, estableciendo un marco para la integración de tecnologías avanzadas como IoT y técnicas de análisis de datos (Iglesias et al., 2020). Esta norma es fundamental para asegurar que las prácticas de mantenimiento se alineen con las mejores prácticas globales, mejorando la consistencia y la calidad de los procesos de mantenimiento.

La implementación de un sistema de mantenimiento basado en condición mediante monitoreo en tiempo real representa una oportunidad crucial para las empresas que buscan mejorar su eficiencia operativa y reducir costos. Al adoptar tecnologías avanzadas y adherirse a normas internacionales, las compañías pueden asegurar una gestión de mantenimiento más proactiva y eficaz, que no solo optimiza el uso de recursos, sino que también mejora

la confiabilidad y la seguridad de sus operaciones. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo continuo en esta área son esenciales para promover la adopción de mantenimientos con sistemas de monitoreo en tiempo real a una mayor escala y maximizar los beneficios potenciales para la industria.

1.6. Alcance

El presente proyecto tiene un enfoque exploratorio-descriptivo, ya que su fin es diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real para el registro y gestión del mantenimiento del sistema de ventilación del laboratorio de medicina de alta complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, un área crítica que actualmente no cuenta con un sistema de mantenimiento basado en condición. Este sistema permite identificar los parámetros clave que se relacionan con el rendimiento de los filtros, evaluando su eficiencia y estado. La implementación de sensores y la recolección de datos resulta un proceso complejo que requiere tiempo para la calibración precisa de los dispositivos. Además, no todos los componentes del sistema de filtración necesitan monitorearse. Por ende, se priorizarán los elementos más críticos, tanto por su importancia funcional como por los costos asociados en caso de fallos o reparaciones.

Este proyecto incluye el desarrollo de un prototipo que permita la recolección y simulación de datos a través de sensores colocados en puntos estratégicos de las nueve etapas del sistema de filtración. El sistema detectará posibles fallos y generará alertas automáticas, además de crear una base de datos con los parámetros clave del estado de los filtros. Sin embargo, debido a limitaciones de presupuesto y tiempo, no se contempla instalar el sistema de monitoreo en las fases de ventilación del laboratorio. El objetivo es mostrar cómo pueden llevarse a cabo la instalación y la programación del sistema, así como destacar las ventajas que este tipo de monitoreo y registro aportaría a la gestión de mantenimiento del hospital.

La migración hacia un sistema de monitoreo basado en la condición representa un cambio en los enfoques tradicionales de mantenimiento, acercando al hospital a la adopción de tecnologías de la Industria 4.0. Con el uso de datos en tiempo real y la capacidad de predecir fallos, se busca mejorar significativamente la seguridad y la eficiencia operativa. Sin embargo, al igual que otros sistemas avanzados, la implementación total de estas tecnologías no se contempla, debido a las considerables inversiones y al tiempo necesario para el ajuste adecuado de los sensores.

1.7. Viabilidad

El desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real, como el que se plantea en este proyecto, requiere una programación avanzada y el uso de bibliotecas y programas que permitan la escritura de códigos capaces de gestionar grandes volúmenes de datos de forma simultánea. El proyecto propone el uso de un prototipo inicial de bajo costo que permite comprobar la capacidad de recopilar datos de las diferentes etapas del sistema de filtración de aire. Sin embargo, si las bibliotecas o programas necesarios para la implementación no están disponibles de manera gratuita, la complejidad del proyecto puede aumentar considerablemente, lo que representaría un desafío adicional.

En cuanto a las competencias técnicas, como estudiante, el autor del presente documento posee conocimientos en lenguajes de programación como Python y en el manejo de herramientas como Microsoft Excel para el análisis de datos. Además, tiene experiencia práctica en la programación de sistemas y en el uso de dispositivos como Arduino. No obstante, la falta de experiencia en la implementación de estos conocimientos en un entorno real puede ser una limitante, que posiblemente se mitigará con el apoyo de asesores técnicos experimentados.

Respecto a los recursos materiales, se dispone de una computadora portátil, software de programación como Python y equipos electrónicos como Arduino, los cuales son esenciales para el desarrollo del prototipo. Aunque no se prevé la necesidad de adquirir más equipos en esta fase, si surgiera la necesidad de nuevos recursos, esto puede incrementar la complejidad y el costo del proyecto.

El financiamiento del proyecto depende principalmente de recursos personales, debido a que no se cuenta con un presupuesto institucional asignado. El apoyo económico proveniente de fuentes familiares es suficiente en circunstancias normales, sin embargo, en caso de que surjan gastos adicionales significativos, como la adquisición de hardware especializado, esto puede convertirse en una limitante importante si la empresa no ofrece financiación.

En cuanto al tiempo disponible, se cuenta con un plazo de 12 semanas para ejecutar el proyecto, con una dedicación de 36 horas por semana. En la actualidad, no se identifican restricciones temporales que puedan afectar el desarrollo, lo que garantiza el cumplimiento de los plazos estipulados.

En términos de recursos humanos, se cuenta con el apoyo de un ingeniero encargado del sistema de ventilación del hospital y del profesor guía del proyecto. Ambos proporcionan asesoría técnica y apoyo en la toma de decisiones, asegurando que el desarrollo se haga conforme a los estándares del hospital y a las normativas aplicables.

El acceso al hospital donde se realiza el proyecto no presenta mayores restricciones, por lo que se pueden realizar las visitas necesarias para la recolección de datos y las pruebas del sistema de filtración. La única limitante es la coordinación de permisos y la disponibilidad del personal encargado de acompañar las visitas, lo cual se gestiona previamente. Además, en la actualidad, el hospital enfrenta dificultades en la última etapa del sistema de filtración de aire, lo que puede requerir un rediseño en esa área y aumentar la complejidad del proyecto.

En cuanto a la infraestructura del hospital, se dispone de equipos como ordenadores con capacidad suficiente para ejecutar los programas de monitoreo, lo que asegura que no habrá limitaciones técnicas para implementar el sistema de monitoreo basado en la condición. Aunque el hospital cuenta con un sistema de registro de variables como compuestos orgánicos volátiles (COV), humedad, presión y temperatura, no se dispone de un sistema de almacenamiento o consulta de estos datos, lo que limita la capacidad para optimizar la gestión del mantenimiento. Por esto, el desarrollo de un sistema de 15 monitoreo basado en la condición aporta importantes beneficios en términos de eficiencia y mejora del proceso de mantenimiento.

1.8. Administración del riesgo

El proyecto presenta varias limitaciones que deben gestionarse adecuadamente para garantizar su éxito. Estas limitaciones se agrupan en las siguientes categorías:

a. Recurso humano:

El equipo del proyecto está compuesto por el estudiante encargado del desarrollo del sistema de monitoreo, con el apoyo del ingeniero del hospital y del profesor guía. Sin embargo, una limitante potencial es la disponibilidad de tiempo y el acceso a expertos adicionales en la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real. Para mitigar este riesgo, se mantiene una comunicación constante con los asesores para coordinar las sesiones de revisión y obtener retroalimentación oportuna. Además, se busca realizar capacitaciones específicas en áreas donde se identifiquen brechas de conocimiento con el tiempo adecuado.

b. Recurso financiero:

El financiamiento del proyecto proviene principalmente de fuentes personales y familiares. Esta situación puede convertirse en una limitante si surge la necesidad de adquirir equipos adicionales o licencias de software que no están disponibles de manera gratuita. Para mitigar este riesgo, se elabora un plan de gastos detallado y se busca la posibilidad de obtener financiamiento complementario de la institución o del hospital. Asimismo, se prioriza el uso de herramientas y recursos de bajo costo o gratuitos siempre que sea posible.

c. Confidencialidad:

Debido a que el proyecto se realiza dentro de una instalación médica pueden existir restricciones sobre el acceso a información sensible o sobre la publicación de ciertos datos. Para mitigar este riesgo, se utiliza únicamente información que no comprometa la integridad de la empresa y se garantiza que toda la información sensible sea tratada de acuerdo con las políticas del hospital. La recolección de datos se limita a aquellos que se relacionan con el rendimiento del sistema de filtrado de aire, lo que evita cualquier interferencia con la información médica de los pacientes.

En caso de que alguna limitante se materialice, como la falta de financiamiento para adquirir hardware especializado o los retrasos en el acceso a las instalaciones del hospital, se toma acción anticipada. Se buscan alternativas de bajo costo y se prioriza la adquisición de componentes esenciales para asegurar que los objetivos principales del proyecto no se vean comprometidos. Asimismo, si se requiere la compra de equipos o repuestos, estos se planificarán con suficiente antelación para evitar inconvenientes o retrasos significativos en la ejecución del proyecto.

1.9. Cronograma proyectado del desarrollo del proyecto

No.	Actividad	Semana																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Entrega del anteproyecto para su previa aprobación.	■																	
2	El coordinador comunica a los estudiantes el nombre del profesor guía asignado y proporciona el cronograma para la práctica.		■																
3	El coordinador notifica a los profesores sobre el estudiante asignado, entrega un archivo con los datos del estudiante y la empresa, una descripción del proyecto, formularios de evaluación y el cronograma de la práctica.			■															
4	Inicio de práctica.				■														
5	Conocimiento de la organización, análisis del contexto, revisión de la literatura, normas vigentes, estudios previos realizados y funcionamiento actual del sistema de ventilación.					■													
6	Primera visita profesor guía.						■												
7	Rediseño del sistema de ventilación (de ser requerido) con informe de mejoras.							■											
8	Segunda visita profesor guía.								■										
9	Estudio de las posibles fallas en cada etapa de filtración del sistema, así como la evaluación del impacto de las fallas y su frecuencia de ocurrencia									■									
10	Redacción del informe detallado con los modos de falla identificados (AMFE de cada etapa de filtración)										■								
11	Tercera visita profesor guía											■							
12	Desarrollo del código en arduino y pruebas en un arduino digital (en línea)												■						
13	Adquisición de componentes necesarios (Arduino, sensores, módulos de comunicación)													■					
14	Montaje del prototipo en protoboard y pruebas														■				
15	Programación de funcionalidad de IOT para recolectar datos en tiempo real (conexión y almacenamiento de datos)															■			
16	Revisión del correcto funcionamiento del prototipo ya montado en protoboard y conectado a la red																■		
17	Revisión de flujos financieros																	■	
18	Investigación de costos requeridos para la implementación del proyecto																		■
19	Realizar el análisis técnico financiero																		■
20	Estudiante entrega el borrador del informe final digital al profesor guía y a los profesores lectores.																		■
21	Profesor guía devuelve al estudiante borrador del informe final revisado.																		■
22	Profesor guía debe enviar un correo al coordinador si no autoriza la exposición del estudiante, informando el motivo.																		■
23	Profesor guía envía por correo al coordinador resumen ejecutivo aprobado.																		■
24	Profesor guía entrega al coordinador la evaluación del asesor industrial.																		■
25	Estudiante somete a revisión del filólogo el informe final revisado por el profesor guía.																		■
26	El coordinador publica el cronograma de exposiciones.																		■
27	Estudiante entrega al coordinador de trabajo final de graduación carta de entendimiento de la biblioteca, carta de recibido de la empresa y la carta del filólogo.																		■
28	Profesor guía entrega al coordinador de trabajo final de graduación su evaluación del estudiante asignado.																		■
29	Exposiciones de práctica de especialidad ante jurado																		■
30	El coordinador publica la nota final de la práctica profesional.																		■

Figura 3. Cronograma proyectado para el desarrollo del proyecto.

1.10. Metodología por seguir

Objetivo específico planteado	Actividad por realizar	Fuente de información	Análisis de datos con criterios estadísticos	Resultados esperados (Indicador de logro)
Realizar un análisis de criticidad y de Modos de Falla, Efectos y Criticidad (AMFEC) para determinar los componentes críticos a monitorear en el sistema de ventilación.	Inspección del sistema de ventilación, recopilación de datos históricos y entrevistas con personal de mantenimiento.	Manuales de operación, registros de mantenimiento, normativas ISO.	Análisis probabilístico del impacto de fallas según criticidad y frecuencia de ocurrencia.	Informe del AMFEC de los sistemas de ventilación.
Diseñar un sistema de monitoreo seleccionando las variables necesarias para el diagnóstico y pronóstico del estado del sistema de ventilación.	Desarrollo y prueba del programa en Python y LabVIEW para la simulación de diferentes escenarios operativos.	Manual de operación del sistema de ventilación, librerías de simulación en Python y LabVIEW.	Simulación de fallas en distintas condiciones y análisis del comportamiento del sistema.	Sistema de monitoreo.
Elaborar un modelo de pronóstico o diagnóstico para evaluar la vida útil remanente del sistema de ventilación y predecir posibles fallas críticas.	Implementación de modelos predictivos en Python y RapidMiner para estimar la vida útil remanente de los componentes del sistema de ventilación.	Datos históricos de fallas, manuales de mantenimiento, estudios previos sobre vida útil remanente (RUL).	Modelado de RUL basado en aprendizaje automático y comparación con datos reales.	Simulación del RUL.
Elaborar un análisis técnico-financiero de la tecnología necesaria para el desarrollo del proyecto, que determine la factibilidad de su implementación, basándose en costos de implementación mediante el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).	Recopilación de costos de equipos y componentes, estimación de costos de mantenimiento, análisis financiero.	Listas de precios, fichas técnicas, normativas financieras.	Cálculo del CAUE y comparación con estrategias de mantenimiento alternativas.	Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

Figura 4. Metodología por seguir para el proyecto.

2. Capítulo II: marco teórico

2.1. Laboratorios de reproducción asistida

Los laboratorios de fertilización in vitro (FIV) constituyen espacios altamente controlados diseñados para llevar a cabo técnicas de reproducción asistida que implican la fecundación de ovocitos fuera del cuerpo humano. Según Bagnarello González (2015), la técnica de FIV consiste en una estimulación ovárica controlada, la recolección de ovocitos y su fertilización en laboratorio, seguida de la transferencia embrionaria a la cavidad uterina en las fases de clivaje o blastocisto.

Estos procedimientos requieren condiciones ambientales sumamente estrictas. La temperatura, la humedad relativa, la concentración de partículas, la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV), la presión del aire y el grado de contaminación microbiológica deben mantenerse dentro de rangos definidos para garantizar la viabilidad celular y evitar alteraciones en la división embrionaria. Tal como documenta Llerena-Cano (2011), el control del entorno de cultivo, mediante medios químicamente definidos y cámaras de incubación específicas, permitió lograr la maduración embrionaria in vitro en condiciones reproducibles.

La importancia de mantener un ambiente aséptico y estable se deriva no solo de los requerimientos fisiológicos del cigoto y el embrión, sino también de la sensibilidad de los gametos a cambios sutiles en el pH, la presión parcial de oxígeno o incluso la carga iónica del entorno de cultivo. Estas variables se consideraron esenciales desde los primeros estudios sobre soluciones salinas como la de Krebs-Ringer, hasta el desarrollo de sistemas modernos con incubadoras de atmósfera controlada y cultivos en microgotas cubiertas con aceite de parafina, que demostraron mejores resultados en el desarrollo embrionario in vitro (Llerena-Cano, 2011).

Asimismo, el éxito del procedimiento de FIV ha evolucionado a la par de los avances en biotecnología ambiental. Como lo explica Llerena-Cano (2011), el desarrollo de medios de cultivo, las técnicas de microinyección, y la optimización de las condiciones de incubación han sido fundamentales para alcanzar tasas de éxito clínico aceptables, que en algunos contextos superan el 35 % por transferencia embrionaria. Así, los laboratorios de FIV no son únicamente espacios técnicos, sino entornos clínicos críticos donde el control ambiental forma parte integral del proceso terapéutico.

2.2. Sistema de ventilación

2.2.1. Sistemas de ventilación en hospitales

Palau (2021) explica que la ventilación puede entenderse como un proceso de renovación del aire, mediante el cual se extrae aire viciado e ingresa aire “limpio” o con mejores condiciones. Este principio constituye la base

del diseño de sistemas de ventilación, ya que busca mantener la calidad del aire interior a niveles adecuados para la salud y el confort de los ocupantes. Sin embargo, al tratarse de instalaciones del sector salud, el enfoque sobre la ventilación debe ser más riguroso. Tal como advierte Palau (2021): “Al referirnos a instalaciones del sector salud debemos de tener consideraciones especiales como calidad del aire interior, normativas aplicables y filtración” (s.p.). Estas consideraciones son fundamentales para garantizar ambientes controlados que minimicen el riesgo de infecciones, cumplan con estándares técnicos exigentes y aseguren una operación médica segura.

De acuerdo con lo establecido por ASHRAE (2013), el diseño de los sistemas de ventilación en instalaciones de salud debe priorizar múltiples aspectos más allá del confort térmico convencional. En este contexto, se propone el siguiente orden de prioridades para el diseño de estos sistemas en entornos hospitalarios, considerando tanto el impacto clínico como la sostenibilidad operativa:

1. Rendimiento (control de infecciones, confort, resultados clínicos del paciente).
2. Seguridad (protección contra incendios, integridad física).
3. Confiabilidad operativa.
4. Costo de mantenimiento.
5. Costo energético.
6. Adaptabilidad del sistema.

2.2.2. Calidad del aire interior en hospitales

La calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés) se refiere a la condición del aire dentro y alrededor de los edificios, así como a su impacto en la salud y el confort de los ocupantes. En entornos hospitalarios, donde se alberga a una población inmunológicamente vulnerable y se realizan procedimientos críticos, mantener un alto estándar de calidad del aire no es opcional, sino un requisito esencial. De acuerdo con Palau (2021): “La calidad del aire interior es la calidad del aire dentro y alrededor del edificio y estructuras, especialmente a la salud y confort de los ocupantes del edificio” (s.p.), lo cual implica atender múltiples variables de origen físico, químico y biológico.

Desde el punto de vista físico, los factores que influyen en la calidad del aire interior (IAQ) incluyen la temperatura y la humedad, las radiaciones ionizantes que se utilizan en radiología, así como las radiaciones no ionizantes como la ultravioleta o los campos electromagnéticos presentes en equipos médicos. Estas variables, si no se controlan adecuadamente, pueden comprometer no solo la eficiencia del equipo, sino también la estabilidad del ambiente hospitalario y el bienestar del personal y de los pacientes (Palau, 2021).

En cuanto a los factores químicos, Palau (2021) señala contaminantes comunes como el monóxido de carbono (CO), que incluso en bajas concentraciones puede causar fatiga y cefalea; el dióxido de azufre (SO₂), que se asocia con crisis asmáticas; y los compuestos orgánicos volátiles (COV), capaces de generar síntomas como náuseas y mareos. A esto se suman las partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2,5}), que pueden provenir de diversas fuentes como aerosoles, bacterias, combustión o polen, y que tienen un impacto directo sobre el sistema respiratorio. Finalmente, en el grupo de factores biológicos se encuentran microorganismos como hongos, bacterias, virus (incluido el SARS-CoV-2) y parásitos, que son responsables de muchas infecciones nosocomiales y representan uno de los mayores desafíos para la bioseguridad en los hospitales.

Una ventilación inadecuada o un diseño incorrecto del sistema HVAC puede favorecer la acumulación de aerosoles con carga viral en espacios cerrados, lo que incrementa el riesgo de contagios en áreas sensibles como quirófanos, unidades de cuidados intensivos o salas de aislamiento (Fong-Silva et al., 2020).

Eficiencia de los grupos de filtro ISO 16890	
Polvo grueso	<50 % de PM10
ePM10	≥ 50 % de PM10
ePM2,5	≥ 50 % de PM2,5
ePM1	≥ 50 % de PM1

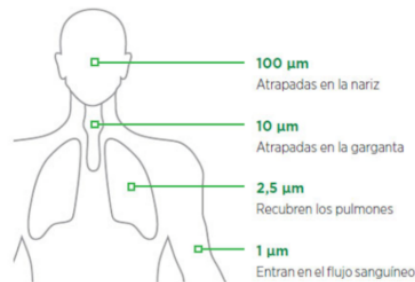


Figura 5. Eficiencia de filtrado según ISO 16890 y penetración de partículas en el sistema respiratorio según su tamaño.

Fuente: Palau (2021).

2.2.3. Filtración de partículas

Dentro del diseño de sistemas de ventilación para hospitales, uno de los elementos más críticos es la filtración del aire exterior, en especial en lo que respecta al ingreso a zonas limpias o de alta sensibilidad. Tal como establece el Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado para hospitales y clínicas de Ashrae, es obligatorio implementar un esquema de filtración en dos etapas como mínimo. La primera etapa debe contar con filtros de eficiencia MERV 7 o MERV 13, según el tipo de zona hospitalaria, mientras que la segunda etapa requiere filtros con eficacia MERV 14 o filtros HEPA, igualmente determinados por la criticidad del área atendida (ASHRAE, 2013). Este enfoque escalonado asegura una reducción progresiva de contaminantes, desde partículas gruesas hasta microorganismos y aerosoles ultrafinos, lo cual resulta esencial para mantener condiciones de aire aceptables en espacios de alto riesgo biológico.

De forma complementaria: “El uso de filtros HEPA y tecnologías como la radiación ultravioleta germicida (UVGI) se ha recomendado como estrategia para mitigar el riesgo de transmisión aérea de virus en espacios cerrados” (Fong-Silva et al., 2020, s.p.). Aunque inicialmente orientada al control del SARS-CoV-2, esta medida demuestra ser eficaz como acción preventiva frente a múltiples patógenos en ambientes hospitalarios.

Finalmente, frente a la emergencia de nuevos agentes biológicos: “Es fundamental adaptar los estándares de ventilación y renovar la infraestructura hospitalaria para responder a nuevos escenarios epidemiológicos” (Fong-Silva et al., 2020, s.p.). Esta adaptación no solo implica la actualización tecnológica, sino también un cambio en los protocolos operativos y en el mantenimiento preventivo.

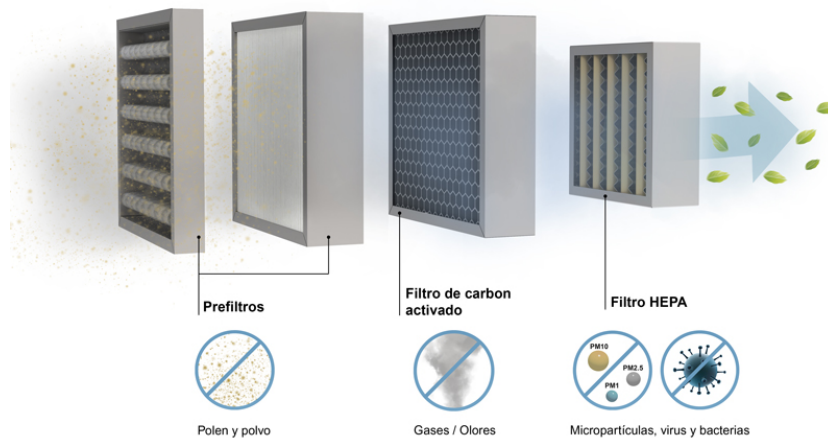


Figura 6. Composición típica de un sistema de filtración de aire.
 Fuente: Figura reproducida de Airtecnicos (2021).

Esta Figura 6 ilustra las distintas etapas que conforman un sistema de filtración de aire en ambientes críticos. Además, muestra visualmente cómo el aire atraviesa, de manera secuencial, distintos componentes como prefiltros, filtros HEPA y otros módulos complementarios hasta llegar al espacio controlado.

2.2.3.1. Clasificación de los filtros de aire

Los filtros de aire se clasifican con base en tres parámetros operativos fundamentales: la eficiencia de captura, la pérdida de carga (o resistencia al flujo de aire), y la capacidad de retención de contaminantes. La eficiencia representa la habilidad del filtro para eliminar partículas suspendidas en el flujo de aire, siendo especialmente relevante su comportamiento promedio durante toda la vida útil. Por otra parte, la resistencia al flujo de aire corresponde a la caída de presión que se produce al atravesar el filtro a un caudal específico. Por último, la capacidad de retención de polvo indica cuánta carga de partículas puede almacenar el medio filtrante antes de alcanzar una caída de presión límite o afectar negativamente el caudal de aire tratado (National Environmental Balancing Bureau, 1998).

2.2.3.2. Mecanismos de captura de partículas

Los filtros de aire utilizan distintos mecanismos físicos para interceptar y retener las partículas presentes en el aire. Entre los más relevantes, National Environmental Balancing Bureau (1998) destaca:

- **Impacto inercial:** las partículas de mayor tamaño tienden a seguir trayectorias rectas debido a su inercia, lo que provoca colisiones directas con las fibras del medio filtrante cuando el flujo de aire se desvía bruscamente. Este mecanismo es más efectivo con partículas superiores a 2 μm y a altas velocidades.

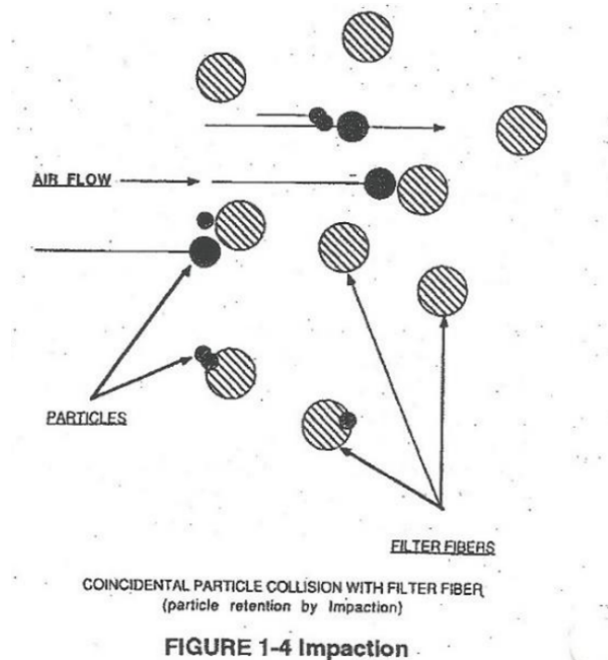


Figura 7. Mecanismo de impacto inercial para la captura de partículas.
Fuente: figura reproducida del National Environmental Balancing Bureau (1998).

- Intercepción:** las partículas que siguen el flujo del aire pueden entrar en contacto con las fibras si sus trayectorias se aproximan lo suficiente, adhiriéndose mediante fuerzas de Van der Waals. Este mecanismo es particularmente efectivo en partículas del orden de $0.3 \mu\text{m}$.

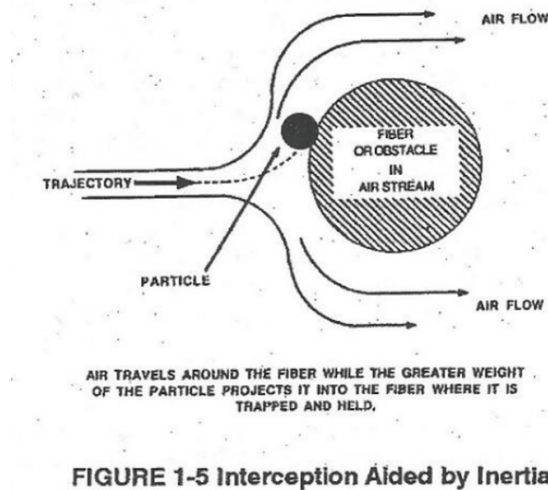


Figura 8. Mecanismo de intercepción para la captura de partículas.
Fuente: figura reproducida del National Environmental Balancing Bureau (1998).

- Obstrucción:** se produce cuando el espacio libre entre las fibras es menor que el tamaño de la partícula, lo que genera una barrera física que impide su paso. Este fenómeno es más común con partículas alargadas que

se depositan sobre la superficie.

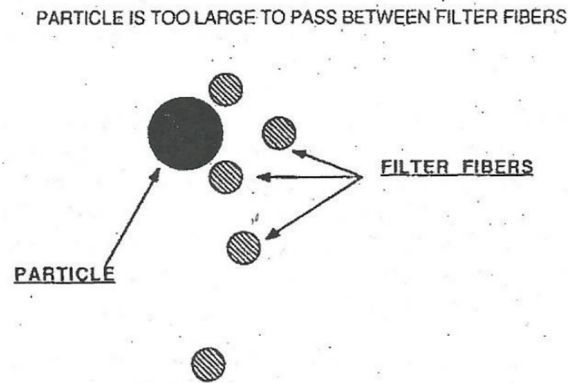


FIGURE 1-6 Straining Effect

Figura 9. Mecanismo de obstrucción para la captura de partículas.
Fuente: figura reproducida del National Environmental Balancing Bureau (1998).

- **Difusión:** las partículas ultrafinas (menores que $0.3 \mu\text{m}$) experimentan movimiento browniano, lo que las desvía de la corriente de aire y aumenta su probabilidad de colisionar con las fibras del filtro.

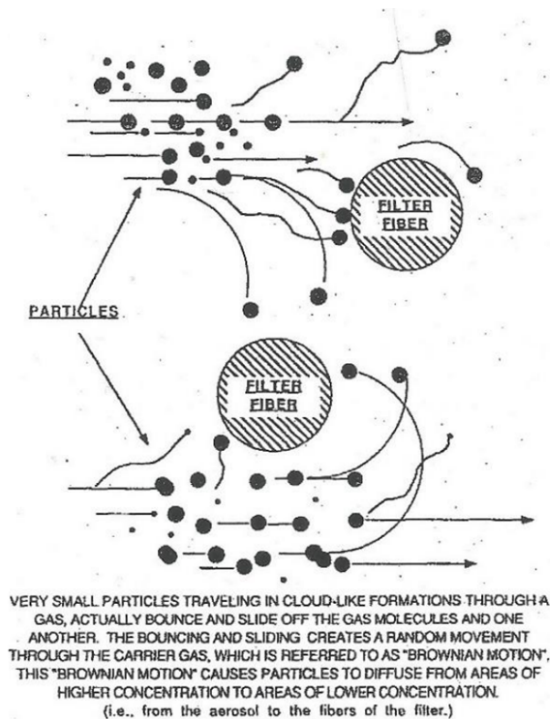


Figure 1-7 Diffusion

Figura 10. Mecanismo de difusión para la captura de partículas.
Fuente: figura reproducida del National Environmental Balancing Bureau (1998).

- **Atracción electrostática:** algunas fibras o medios filtrantes pueden generar cargas electrostáticas que inducen la atracción de partículas con carga opuesta.
- **Zona de mínima eficiencia (principio de Langmuir):** las partículas de $0.3 \mu\text{m}$ representan el tamaño más difícil de filtrar, ya que son demasiado pequeñas para ser capturadas por impacto o intercepción, y demasiado grandes para ser afectadas eficazmente por difusión.

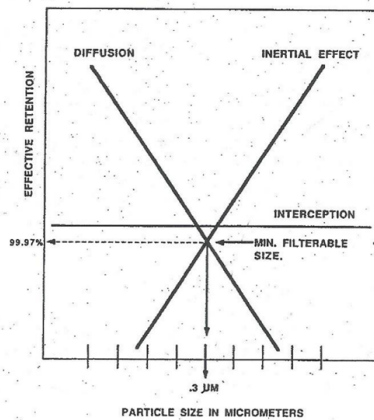


FIGURE 1-8 Langmuir's Principle

Figura 9. Principio de Langmuir's.

Fuente: Study Course For Certified Testing of Cleanrooms, 1998

Figura 11. Principio de Langmuir.

Fuente: figura reproducida del National Environmental Balancing Bureau (1998).

2.2.3.3. Filtración de aire de alta eficiencia

El uso de filtros de alta eficiencia es imprescindible para alcanzar los niveles de limpieza exigidos en salas limpias y espacios controlados. Los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) están diseñados para remover al menos el 99.97 % de partículas de $0.3 \mu\text{m}$, utilizando medios secos y densamente compactados en configuraciones rígidas. Estos filtros presentan una alta caída de presión inicial habitualmente de 1 in. w.g. (250 Pa) y operan a velocidades bajas (alrededor de 0.025 m/s) (National Environmental Balancing Bureau, 1998).

El elemento filtrante está compuesto por microfibras de vidrio entrelazadas, plegadas para maximizar el área de contacto sin incrementar excesivamente la resistencia. A medida que se acumula carga, la caída de presión se incrementa de manera lineal, alcanzando cerca del 90 % de la capacidad de carga total al duplicarse la resistencia inicial (Institute of Environmental Sciences and Technology, 2005). Los filtros HEPA modernos ofrecen eficiencias que oscilan entre el 99.97 % y el 99.997 % para partículas del tamaño crítico.

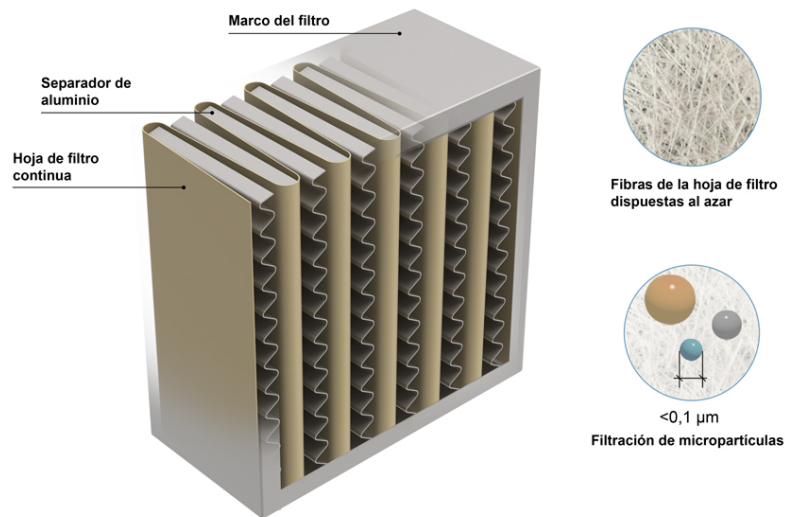


Figura 12. Composición del filtro HEPA.
Fuente: figura reproducida de Airtecnicos (2021).

2.2.3.4. Resistencia al flujo de aire

La caída de presión en filtros HEPA no debe superar los 25.4 mm de columna de agua (1 in. w.g.) en condiciones estándar. No obstante, durante las pruebas de fabricación se someten a presiones de hasta 33 mm (1.3 in. w.g.) para validar su desempeño. Estas mediciones deben realizarse aguas arriba y aguas abajo del filtro utilizando técnicas adecuadas, y preferiblemente en orientación perpendicular al flujo de aire (Institute of Environmental Sciences and Technology, 2005).

2.2.3.5. Sistemas de filtración tipo cielo

Los sistemas de tipo cielo, también conocidos como filtros terminales, se instalan en el techo de salas limpias y ambientes críticos. Su función es proporcionar la última etapa de purificación del aire justo antes de que este ingrese al espacio. Existen los siguientes formatos según Institute of Environmental Sciences and Technology (2005):

1. **Módulo con marco permanente y filtro reemplazable:** con una estructura fija y cara metálica perforada, permite cambiar el medio filtrante sin desmontar todo el conjunto. Puede incluir válvulas reguladoras de caudal, puertos de medición y dispositivos de prueba de integridad.
2. **Módulo desechable:** diseñado para ser reemplazado completamente al final de su vida útil. Se instala en sistemas de cielorraso tipo T-grid y puede conectarse a ductos individuales.
3. **Módulo con ventilador incorporado (FFU):** contiene un ventilador interno que fuerza el paso del aire a través del filtro, asegurando un flujo constante y homogéneo en el punto de descarga.

2.2.3.6. Unidades manejadoras de aire acondicionado

La unidad manejadora de aire (UMA) constituye el componente principal de un sistema de distribución de aire en instalaciones con sistemas de ventilación. Su tarea es condicionar y movilizar el aire hacia las distintas zonas del edificio, combinando adecuadamente el aire proveniente del exterior con el aire recirculado del ambiente interior.

Este tipo de equipo se presenta comúnmente en formato modular y está conformado por diversas secciones funcionales. Entre ellas se encuentran las entradas de aire exterior y de retorno, un módulo de filtración, un serpentín de enfriamiento alimentado con agua, una cámara que aloja el ventilador y el motor, y un sistema de control automatizado que regula su operación.

La capacidad de manejo de aire de estas unidades varía ampliamente según el modelo y aplicación, oscilando entre 2 000 y 63 000 ft³ cúbicos por minuto (equivalente a 943 a 29 730 l por segundo) (Wang, 2001).

En las unidades manejadoras de aire, la selección adecuada de filtros es esencial para mantener la eficiencia energética y garantizar la protección de los componentes aguas abajo. Tronville (2009) señala que, al escoger un filtro, se deben considerar aspectos como el diseño del pliegue, la resistencia estructural del soporte, la pérdida de carga inicial y la evolución de la caída de presión durante el ciclo de vida. Además, es necesario estimar los impactos que estos factores tienen sobre el consumo energético y el mantenimiento del sistema.

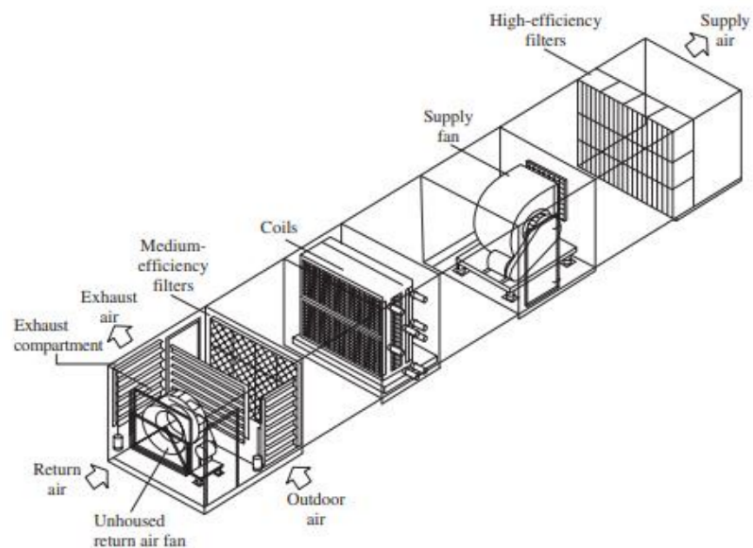


Figura 13. Composición de la unidad manejadora de aire acondicionado.

Fuente: figura reproducida de Wang (2001).

La Figura 13 ilustra la composición de una unidad manejadora de aire (UMA), y muestra sus principales componentes internos como ventiladores, serpentines, cámaras de mezcla y módulos de filtrado. Esta figura permite visualizar cómo se integra el sistema de ventilación con el sistema de filtración y climatización en instalaciones hospitalarias.

2.2.3.7. Filtros tipo bolsa MERV 14

Los filtros MERV 14 conocidos como tipo bolsa o bolsillo pertenecen a la categoría de filtros de superficie extendida sin soporte interno. Estos dispositivos están diseñados para maximizar el área de filtración mediante el uso de múltiples compartimientos en forma de bolsillos. El medio filtrante puede ser de fibra de vidrio o de materiales sintéticos, según el diseño del fabricante. En el caso de los filtros de fibra de vidrio, los bolsillos están compuestos por una media fijada a un respaldo y cosida en una manera específica que varía de acuerdo con el proveedor. Esta forma se estabiliza mediante costuras especiales y refuerzos longitudinales que evitan que el filtro se deforme o colapse durante el paso del aire (National Air Filtration Association, 2017).

Por otro lado, los filtros fabricados con medio sintético emplean técnicas de sellado térmico, cosido o incluso métodos ultrasónicos para fijar los bordes del filtro. En ambos tipos, los bolsillos se mantienen abiertos mediante estructuras de retención internas y se sellan al cabezal del filtro por medio de adhesivos, calor o elementos mecánicos. Esta configuración completa conforma la superficie frontal del filtro. Durante el funcionamiento, el flujo de aire infla los bolsillos, lo que permite una distribución eficiente del medio filtrante. Para optimizar el transporte, los bolsillos se pliegan hacia el cabezal y se aseguran con bandas que los mantienen en posición. Estos filtros están disponibles en diferentes dimensiones, profundidades y configuraciones, lo que da la posibilidad de adaptarlos a distintas aplicaciones HVAC exigentes, como aquellas presentes en áreas críticas (National Air Filtration Association, 2017).



Figura 14. Filtro tipo bolsa MERV.
Fuente: figura reproducida de Camfil (2019).

2.2.3.8. Filtros plisados MERV 8

Los filtros plisados MERV 8 son una opción ampliamente utilizada en sistemas comerciales debido a su bajo costo y eficiencia intermedia. Pueden fabricarse, tanto en versiones desechables como reutilizables. Los modelos desechables están contruidos con cartón aglomerado y medios filtrantes de fibra de vidrio o materiales sintéticos.

Los filtros de fibra de vidrio, por lo general, incluyen soportes de retención que evitan que el medio se desprenda del marco durante la operación. Estos filtros están disponibles en profundidades estándar de 1 o 2 in. Por otra parte, los filtros de pliegues sintéticos utilizan refuerzos internos en forma de anillos o costillas que mantienen el medio estable y distribuyen el flujo de aire (National Air Filtration Association, 2017).

En cuanto a la construcción, los filtros plisados pueden tener una estructura de cartón troquelado y medios sintéticos o mixtos como el poliéster-algodón. Estos están disponibles en profundidades de 1, 2 y 4 in, y su eficiencia puede variar entre MERV 5 y MERV 11. Las dimensiones nominales suelen expresarse en pulgadas, aunque las medidas reales pueden ser ligeramente menores. Por razones de funcionalidad, estos filtros están diseñados para permitir el paso de aire en un solo sentido, indicado por una flecha en el marco exterior, la cual debe coincidir con la dirección del flujo de aire del sistema durante la instalación (National Air Filtration Association, 2017).



Figura 15. Filtro tipo MERV.
Fuente: figura reproducida de Camfil (2019).

2.3. Análisis de modo y efecto de fallas (Amfe)

El análisis de modo y efecto de fallas (Amfe) es una metodología sistemática que permite identificar de forma anticipada las fallas potenciales que pueden presentarse en un producto o en un proceso. Este análisis considera variables como la frecuencia de ocurrencia, la facilidad de detección y el efecto que tales fallas provocarían sobre la operación o la calidad del producto (Pulido and de la Vara Salazar, 2009).

Una vez que se identificaron las fallas potenciales, estas se jerarquizan de acuerdo con su impacto en la confiabilidad del producto o proceso. A partir de esta clasificación, se determinan acciones específicas orientadas a atender prioritariamente aquellas fallas que representan un riesgo mayor para el desempeño y la calidad (Pulido and de la Vara Salazar, 2009).

Una vez que se recopiló toda la información sobre los posibles modos de falla, el siguiente paso consiste en evaluar el grado de gravedad asociado a cada caso. Este análisis permite dimensionar las consecuencias que puede generar cada falla, considerando aspectos como la insatisfacción del cliente, el impacto en los costos y otros efectos relevantes. El valor asignado incrementa a medida que aumenta la repercusión sobre el producto, el proceso o el servicio afectado (Lema, 2019).

Gravedad	Criterio	Valor
Muy baja Repercusiones imperceptibles	No se espera que este fallo de baja importancia produzca algún efecto real sobre el objeto de estudio.	1
Baja Repercusiones irrelevantes que son apenas imperceptibles	Si existe fallo ocasionaría un ligero inconveniente para el cliente. Es posible que se note un pequeño deterioro de su rendimiento sin ser de mayor importancia. Se puede remediar.	2 - 3
Moderada Defectos de relativa importancia	Existe un deterioro observable en el rendimiento del sistema, por lo que puede causar insatisfacción en el cliente.	4 - 6
Alta	El fallo puede llegar a ser crítico e inutilizar el sistema. Con ello el cliente tendrá un mayor grado de insatisfacción.	7 - 8
Muy alta	Fallo potencial muy crítico que produzca afectación en la seguridad del producto o proceso. Si el caso es muy grave se le puntuará con un valor de 10	9 - 10

Figura 16. Clasificación de la gravedad del modo de fallo según la repercusión en el cliente.
Fuente: figura reproducida de Bestratén Belloví and Orriols Ramos (2006).

La Figura 16 presenta la escala de clasificación de la gravedad del modo de fallo, asignando niveles según la repercusión para la persona usuaria final. Esta figura es fundamental para interpretar el análisis Amfe posterior y permite, priorizar las fallas más críticas.

Además de la gravedad, se debe determinar la frecuencia o probabilidad de ocurrencia de cada causa de falla potencial. La frecuencia representa la posibilidad de que un mecanismo de falla se active y produzca el efecto correspondiente. Aunque su estimación puede ser subjetiva en muchos casos, es fundamental apoyarse en información histórica y en la experiencia previa para realizar una evaluación objetiva (Lema, 2019).

Frecuencia	Criterio	Valor
Muy Baja Improbable	Ningún fallo se asocia a procesos casi idéntico. Tampoco se ha dado antes en el pasado, pero se considera que puede ocurrir	1
Baja	Fallos aislados en procesos similares o casi idénticos. Se puede esperar en la vida del sistema, aunque es poco probable que ocurra.	2 - 3
Moderada	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previstos al actual. Existe la posibilidad de que aparezcan durante la vida del sistema.	4 - 5
Alta	El fallo se ha presentado con alguna frecuencia en el pasado en procesos similares o previos procesos que han fallado	6 - 8
Muy alta	El fallo es casi inevitable. Existe gran posibilidad de que fallo se produzca de manera más frecuente	9 - 10

Figura 17. Frecuencia de ocurrencia del modo de fallo.
Fuente: figura reproducida de Bestratén Belloví and Orriols Ramos (2006).

La Figura 17 muestra la escala de frecuencia de ocurrencia de los modos de fallo, que indica cuán común es que un evento ocurra. Esta figura sirve como guía para evaluar el índice de prioridad de riesgo (NPR) dentro del análisis Amfe.

Otro aspecto clave en el Amfe es la detectabilidad, que indica cuán probable es que un fallo no se detecte oportunamente a lo largo del proceso. Cuanto más difícil resulte identificar una falla existente, mayores son las consecuencias asociadas a su aparición tardía. Por este motivo, el valor de detectabilidad es más bajo cuando los mecanismos de detección sean confiables y efectivos, y más alto cuando la detección sea incierta o poco segura (Lema, 2019).

Detectabilidad	Criterio	Valor
Muy alta	El defecto es evidente.	1
Alta	El defecto es evidente y aunque se puede detectar fácilmente, podría no ser distinguido en primera instancia.	2 – 3
Mediana	Defecto detectable, aunque posiblemente no llegue al cliente.	4 - 6
Pequeña	Es difícil detectar el defecto con procedimientos normales.	7 - 8
Improbable	Defecto no puede detectarse, pero el cliente posiblemente lo percibirá.	9 - 10

Figura 18. Clasificación de la detección del modo de fallo.
Fuente: figura reproducida de Bestratén Belloví and Orriols Ramos (2006).

La Figura 18 explica la clasificación de la capacidad de detección de una falla antes de que ocurra o llegue al cliente. Esta figura es clave para completar el trinomio de análisis Amfe (frecuencia, gravedad, detección).

Una vez que se han establecido los valores correspondientes a la gravedad, la frecuencia y la detectabilidad de cada modo de falla, se procede con el cálculo del índice de prioridad de riesgos (IPR). Este indicador permite priorizar las causas que deben abordarse para prevenir la materialización de fallos en el sistema. El IPR se obtiene mediante el producto de los valores asignados a la frecuencia, la gravedad y la detectabilidad, según la ecuación:

$$\text{IPR} = \text{Frecuencia (F)} \times \text{Gravedad (G)} \times \text{Detectabilidad (D)} \quad (1)$$

El valor resultante es adimensional, lo cual resulta conveniente, ya que el objetivo principal es contar con una medida numérica que facilite la clasificación y la ordenación de las causas según su nivel de prioridad (Lema, 2019).



Figura 19. Matriz de evaluación de la frecuencia, gravedad y detectabilidad de fallos.
Fuente: figura reproducida de Progressa Lean (2024).

La Figura 19 presenta una matriz en la que se cruzan los valores de gravedad, frecuencia y detectabilidad para calcular el NPR. Esta matriz le permite al lector comprender cómo se priorizan los riesgos en los sistemas analizados.

2.3.1. Modos de falla

En el análisis de confiabilidad, un modo de falla se entiende como cualquier evento o condición que provoca que un sistema, proceso o componente no pueda desempeñar de manera correcta su función prevista. Esta definición resalta que una falla no implica necesariamente la detención completa del funcionamiento, sino cualquier desviación respecto al desempeño esperado que compromete la operación normal del bien analizado (Moubray, 2001).

Al describir los modos de falla, es fundamental seleccionar cuidadosamente los verbos que se utilizan, debido a que estos impactan de forma significativa en la formulación de estrategias adecuadas para el manejo de las fallas. Verbos genéricos como “fallar”, “quebrar” o “funcionar mal” deberían emplearse en menor medida, ya que ofrecen poca claridad sobre la naturaleza específica de la falla y dificultan la elección del método más adecuado para su gestión (Moubray, 2001).

El análisis de modos de falla resulta esencial debido a la complejidad inherente de los sistemas industriales. Una sola máquina puede presentar docenas de formas distintas de fallar, mientras que, en un conjunto de equipos, como una línea de producción, las razones potenciales se cuentan por cientos. En plantas completas, esta cifra puede escalar hasta miles o incluso cientos de miles de modos de falla posibles (Moubray, 2001). Si se entiende el mantenimiento como el aseguramiento continuo de las funciones que los usuarios esperan de un bien físico, entonces es indispensable contemplar todas las causas potenciales de pérdida de funcionalidad. De esta forma, los modos de falla se clasifican en tres grandes categorías: cuando la capacidad de un activo cae por debajo del desempeño esperado, cuando el desempeño supera la capacidad de diseño del activo, y cuando el bien es incapaz de cumplir su función desde el inicio de su operación (Moubray, 2001).

2.3.2. Efectos de falla

En el análisis de confiabilidad, los efectos de falla se refieren a la descripción de las consecuencias que se manifiestan cuando ocurre un modo de falla. Esta evaluación permite entender de qué manera impacta la falla en el sistema, en el proceso o en el usuario final y sirve, como base para priorizar las acciones de mantenimiento y mitigación necesarias (Moubray, 2001).

Es importante diferenciar claramente entre los efectos de las fallas y las consecuencias de las fallas. Por otro lado, el efecto responde a la pregunta sobre qué sucede cuando ocurre una falla, la consecuencia se enfoca en cómo dicha falla impacta la seguridad, el ambiente, la operación o la integridad física del sistema. Al describir los efectos de una falla, se debe incluir información detallada que permita posteriormente evaluar las consecuencias. Esta descripción debe abarcar evidencias visibles de la falla, su potencial amenaza para la seguridad o el ambiente, el impacto que puede tener en la producción o en las operaciones, el daño físico ocasionado, y las acciones necesarias para corregir el problema (Moubray, 2001).

Cuando se describen los efectos de las fallas, es fundamental proporcionar información que permita determinar si la falla es evidente para los operadores en condiciones normales de operación. La descripción debe especificar si la falla genera señales claras como la activación de alarmas, luces de advertencia, o la aparición de efectos físicos visibles, tales como ruidos inusuales, humo, vapores, olores extraños o la presencia de líquidos en el suelo. Este nivel de detalle es esencial para que el equipo de análisis evalúe correctamente la visibilidad de la falla y tome decisiones adecuadas sobre su gestión (Moubray, 2001).

2.3.3. Proceso para realizar un Amfe

Tras la identificación general de funciones, modos de falla Y efectos de falla, Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar (2009) mencionan los elementos fundamentales del análisis Amfe:

- **Función del proceso:** consiste en describir de forma breve el objetivo del proceso analizado, al identificar sus principales etapas y la función correspondiente de cada una.
- **Severidad (S):** representa la gravedad de los efectos de la falla una vez que esta ha ocurrido. La severidad se evalúa en una escala del 1 al 10 y debe considerar principalmente el impacto en el cliente final. Si el efecto se manifiesta tanto en el cliente como en el proceso de manufactura, se toma siempre el valor de severidad más alto. Es recomendable que el equipo establezca criterios de evaluación uniformes para mantener la consistencia del análisis.
- **Ocurrencia (O):** se estima la frecuencia con la que puede activarse cada mecanismo de falla potencial. Al igual que la severidad, se utiliza una escala del 1 al 10 para valorar la probabilidad de que ocurra cada causa identificada.
- **Detección (D):** evalúa la capacidad de los controles actuales para detectar una falla o su efecto, suponiendo que la falla ya ha ocurrido. Además, se utiliza una escala del 1 al 10, donde un valor más bajo indica una mayor eficacia de detección. Es importante diferenciar que este parámetro no mide la probabilidad de ocurrencia, sino únicamente la habilidad de identificar la falla antes de que el producto avance en el proceso.
- **Número de prioridad de riesgo (NPR):** se calcula multiplicando los valores asignados a severidad (S), ocurrencia (O) y detección (D). El NPR permite priorizar los modos de falla en función de su criticidad, estableciendo el nivel de atención que deben recibir.

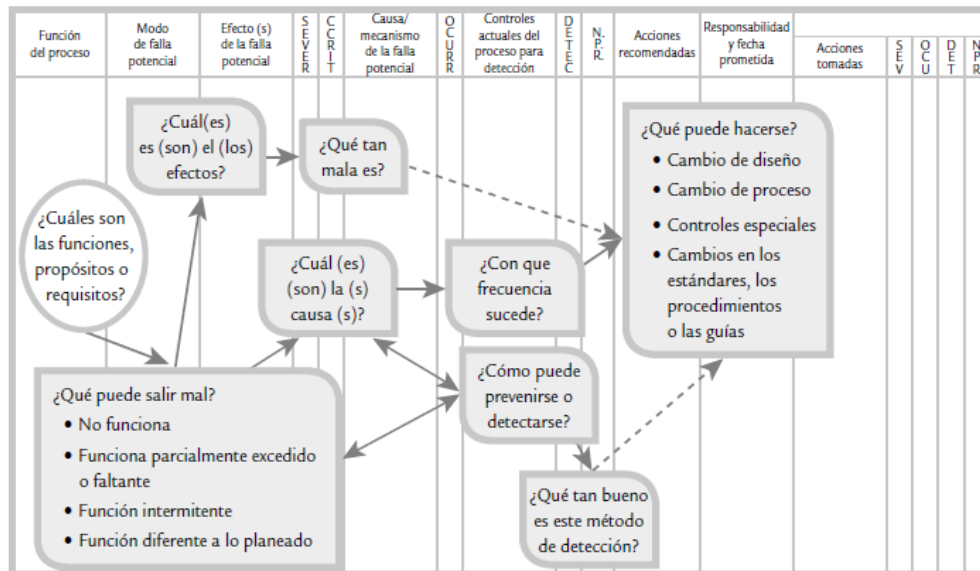


Figura 20. Secuencia del proceso para realizar un Amfe.

Fuente: figura reproducida de Pulido and de la Vara Salazar (2009).

La Figura 20 muestra la secuencia del proceso para realizar un Amfe, desde la identificación del componente hasta el análisis de causas, efectos y criticidad. Esta visualización constituye una excelente guía para entender la lógica estructurada del análisis de fallos.

2.4. Diagrama de Pareto

2.4.1. Fundamentos del diagrama de Pareto

Entre los procesos organizacionales, se ha reconocido que más del 80 % de los problemas proviene de causas comunes, es decir, de factores que actúan de forma continua sobre los sistemas. Sin embargo, también es importante considerar que existe un pequeño número de inconvenientes o situaciones críticas que tienen un impacto desproporcionadamente alto en el problema total. Esta premisa da origen al uso del diagrama de Pareto, una herramienta gráfica basada en barras que se emplea para analizar datos categóricos. Su principal objetivo es facilitar la identificación de los problemas vitales y sus principales causas, lo que permite enfocar los esfuerzos de mejora en aquellas áreas que generan el mayor efecto sobre el desempeño global (Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar, 2009).

El diagrama de Pareto propone un enfoque estratégico para la mejora de procesos. En lugar de intentar abordar todos los problemas y sus causas de manera simultánea, lo que llevaría a esfuerzos dispersos e ineficientes, se plantea la necesidad de utilizar datos estadísticos para establecer prioridades claras. De esta forma, los esfuerzos de mejora se concentran en aquellos inconvenientes cuya resolución genera el mayor impacto en el desempeño del proceso o de la organización (Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar, 2009).

La efectividad del diagrama de Pareto se fundamenta en el principio conocido como la “Ley 80-20” o la idea de “pocos vitales, muchos triviales”. Este principio establece que un pequeño número de causas o factores, aproximadamente el 20 %, es responsables de la mayoría de los efectos o problemas, alrededor del 80 %, en un proceso o sistema. Esta relación evidencia que, al concentrarse en unos pocos elementos críticos, es posible obtener mejoras significativas en el desempeño global (Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar, 2009).

2.4.2. Construcción y análisis del diagrama de Pareto

Para llevar a cabo un análisis efectivo utilizando el diagrama de Pareto, se deben seguir ciertas recomendaciones prácticas que aseguren la interpretación correcta de los datos:

- **Clasificación adecuada:** el diagrama debe organizar los problemas en función de categorías relevantes, tales como el tipo de defecto, el modelo de producto, el tamaño de la pieza, el tipo de máquina, la edad del operario, el turno de producción, el tipo de cliente, el tipo de accidente, el proveedor o los métodos de operación. Cada clasificación genera un diagrama de Pareto distinto.
- **Selección correcta de la unidad de medida:** el eje vertical izquierdo debe representar unidades que reflejen con claridad la contribución de cada categoría al problema general. Cuando existe una diferencia significativa entre la gravedad o el costo asociado a cada defecto, el análisis debe basarse en el producto de la frecuencia por el costo o gravedad de cada defecto, y no únicamente en su frecuencia.
- **Análisis en niveles:** inicialmente se debe realizar un Pareto de problemas (primer nivel). Una vez que se identificó el problema dominante, se puede profundizar aplicando Paretos de segundo nivel sobre las causas

específicas. No se recomienda avanzar a un tercer nivel sin haber agotado previamente el segundo.

- **Identificación de la categoría dominante:** para considerar que una categoría es significativamente más importante que las demás, no es necesario que represente el 80 % del total, sino que debe predominar de manera evidente sobre el resto de las barras.
- **Revisión ante resultados planos:** si el diagrama presenta una distribución plana o un descenso gradual similar a una escalera, es necesario replantear la clasificación de datos o los criterios del problema, buscando agrupar categorías similares o redefinir la perspectiva de análisis para localizar un componente de mayor impacto.
- **Uso de escalas y porcentajes:** el eje vertical derecho debe mostrar una escala porcentual de 0 a 100 %, lo que permite evaluar la importancia relativa de cada categoría a través de la línea acumulativa de porcentaje.
- **Agrupación de categorías menores:** para evitar una dispersión excesiva, las categorías de baja incidencia pueden agruparse bajo una sección denominada “otras”, procurando que esta categoría no represente un porcentaje excesivamente alto.

Además de estas recomendaciones, el diagrama de Pareto ofrece beneficios adicionales significativos. Al expresar gráficamente la magnitud de los problemas, facilita la comunicación visual, motiva la cooperación entre los involucrados y orienta los esfuerzos hacia las causas principales. Esta herramienta elimina la ambigüedad en la evaluación de los inconvenientes al proporcionar una medición objetiva, útil tanto para la priorización inicial como para la comparación de resultados antes y después de un proyecto de mejora Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar (2009).

La elaboración de un diagrama de Pareto requiere seguir un procedimiento sistemático que garantice la identificación correcta y la priorización de problemas. Las etapas principales mencionadas en Gutiérrez Pulido and de la Vara Salazar (2009) son las siguientes:

1. **Definición del problema y objetivos:** es necesario delimitar con claridad el área de mejora que se atiende, así como el objetivo específico del análisis. Con base en esto, se observa el tipo de diagrama de Pareto más adecuado para localizar las prioridades o comprender mejor el problema.
2. **Determinación de datos y factores relevantes:** se debe discutir y decidir qué tipo de datos son necesarios recolectar y cuáles factores son importantes para su estratificación. A partir de esto, se diseña una hoja de verificación adecuada para la recolección de datos que permitan registrar las variables de interés.
3. **Planeación de la recolección de datos:** si los datos provienen de reportes anteriores o deben recolectarse, es importante definir el período de análisis y asignar responsabilidades claras a las personas que se encargan de la recopilación.
4. **Tabulación de datos:** una vez finalizada la recolección, se elabora una tabla que cuantifica la frecuencia de ocurrencia de cada categoría o defecto, lo que incluye su porcentaje de contribución respecto al total.
5. **Jerarquización y decisión del criterio de análisis:** se determina si las categorías se ordenarán directamente por frecuencia o si es necesario ponderarlas multiplicando por el costo o la gravedad asociada. Según la resolución tomada, se procede a construir la representación gráfica.

6. **Documentación del diagrama de Pareto:** se deben registrar adecuadamente las referencias del diagrama, tales como el título, el periodo de análisis, el área de trabajo evaluada y, otros aspectos relevantes.
7. **Interpretación y análisis de segundo nivel:** una vez construido el diagrama de Pareto, se interpreta visualmente el resultado. Si se identifica una categoría que predomina, se recomienda realizar un análisis de segundo nivel sobre esa categoría específica para profundizar en las causas principales que contribuyen a su impacto.

2.5. Análisis económico y el costo anual uniforme equivalente (CAUE)

En el ámbito de la ingeniería de mantenimiento, el análisis económico constituye una herramienta clave para evaluar la viabilidad financiera de proyectos de implementación tecnológica. Dentro de las metodologías más empleadas para esta evaluación se encuentra el costo anual uniforme equivalente (CAUE), que permite expresar todos los costos asociados a un proyecto en un valor uniforme anual, considerando la tasa de interés y el período de vida útil del proyecto o componente.

El CAUE es especialmente útil en comparaciones entre alternativas con diferentes vidas útiles, ya que transforma los flujos de caja (costos de inversión inicial, mantenimiento, operación, entre otros) en una serie de pagos anuales equivalentes. Esta metodología se aborda ampliamente en la literatura de economía de ingeniería (Blank and Tarquin, 2018), y permite una toma de decisiones objetiva desde el punto de vista financiero.

La fórmula general que se utiliza para el cálculo del CAUE es la siguiente:

$$CAUE = I \cdot \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) + C_m \quad (2)$$

Donde:

- I = inversión inicial (CRC),
- i = tasa de interés anual estimada (decimal),
- n = vida útil del proyecto (años),
- C_m = costos anuales de mantenimiento u operación (CRC).

Este enfoque se justifica al considerar el valor temporal del dinero, principio según el cual una suma de dinero en el presente vale más que esa misma suma en el futuro debido a su potencial de inversión (Blank and Tarquin, 2018). La fórmula incluye el factor de recuperación de capital:

$$\frac{A}{P} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

Donde:

- A = valor equivalente anual de la inversión (CRC),
- P = valor presente o inversión inicial (CRC),
- i = tasa de interés anual (decimal),

- n = vida útil del proyecto (años).

Este factor convierte el valor presente de una inversión en una anualidad equivalente, lo que facilita la evaluación comparativa entre diferentes alternativas tecnológicas o métodos de intervención.

El uso del CAUE es particularmente relevante cuando se requiere tomar decisiones que involucran inversiones de capital con diferentes duraciones de vida útil. Al convertir todos los costos a una base anual común, se pueden identificar las alternativas con menor impacto financiero a largo plazo. Esta herramienta es muy utilizada tanto en el sector público como en el privado para evaluar el reemplazo de equipos, la implementación de nuevas tecnologías y la optimización de recursos económicos en el mantenimiento de activos físicos.

3. Capítulo III: desarrollo de objetivos

3.1. Determinación de la variable de mayor impacto del proceso

3.1.1. Análisis AMFE

En las primeras visitas al Hospital Nacional de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, en específico al edificio de la “Unidad de Alta Complejidad en Fertilización In Vitro”, se realizó un recorrido por el sistema de ventilación, enfocándose particularmente en el sistema de tratamiento de aire, con el objetivo de comprender de forma precisa su funcionamiento, debido a su importancia crítica para los procedimientos llevados a cabo en el lugar. Durante estas visitas se conversó y entrevistó al ingeniero Brayan Delgado Cairol, quien ocupa el puesto de *jefatura gestión 3 ingeniería y mantenimiento* y el *coordinador de electromecánica UMRAC*, Daniel Abarca, responsable del mantenimiento y operación del sistema de ventilación del edificio de fertilización in vitro. Ambos enfatizaron la relevancia del funcionamiento correcto del sistema de ventilación y filtrado de aire, ya que cualquier deficiencia en este puede afectar de manera directa los procesos médicos desarrollados en estas áreas.

Brayan explicó que, debido a la extrema sensibilidad de los procesos realizados en el edificio, especialmente en el laboratorio de embriología, el sistema se diseñó con filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) ubicados al final del sistema de tratamiento, los cuales actúan como última barrera antes de la inyección del aire en las zonas críticas del edificio. En estas áreas tan delicadas el aire suministrado debe mantener una concentración de compuestos orgánicos volátiles (VOC) cercana a los $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y en ningún caso debe superar los $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No obstante, esta decisión de diseño implica desafíos importantes. Al estar los filtros HEPA ubicados al final del sistema, su inspección visual, mantenimiento y monitoreo resultan complejos, lo que incrementa el riesgo de no detectar a tiempo una posible falla. Lo anterior compromete la calidad del aire en espacios donde se requiere un control estricto y altos estándares de seguridad.

Debido a esta situación surge la necesidad de implementar un sistema de monitoreo y alarma específico, que le permita al personal supervisar de manera continua el estado de los filtros HEPA, para brindar un espacio más controlado y seguro para los procedimientos médicos.

Según Serra et al. (2008), para realizar un correcto sistema de monitoreo de un proceso, se debe conocer el funcionamiento de los equipos involucrados, sus fallas más comunes y las estrategias de control que se utilizan actualmente. Por este motivo, se realiza un análisis de modos de falla, efectos y criticidad al sistema de ventilación del edificio de fertilización in vitro, considerando las fallas funcionales asociadas al sistema de filtrado y tratamiento de aire, los diferentes modos de falla posibles, así como sus efectos y consecuencias sobre la calidad del aire suministrado.

Inicialmente, se analiza el sistema encargado de condicionar el aire para las zonas críticas del edificio,

como laboratorios de embriología y quirófanos, el cual se inicia desde la inyección del aire desde el ambiente o la recirculación del aire acondicionado, hasta la inyección del aire acondicionado en las zonas críticas del edificio. Junto con Daniel Abarca, encargado del mantenimiento y funcionamiento de este sistema, se definen las principales deficiencias o preocupaciones del sistema:

1. Cercano al hospital se encuentra una estación de trenes, la cual contamina más el aire, lo que provoca que el sistema de ventilación y filtrado se vea más exigido para condicionar el aire a los parámetros requeridos. Por lo tanto, su vida útil remanente es una incógnita.
2. El diseño del sistema que ubica los filtros HEPA al final del sistema provoca que la única forma de inspeccionar su estado sea mediante la detención del funcionamiento de los laboratorios y áreas de quirófano para revisar su condición desde el lugar.

Después de revisar y considerar las deficiencias del sistema, que se relacionan con factores externos al sistema y al diseño de este, se realizó el estudio de análisis AMFE. En la Figura 21 se muestra el resultado del análisis AMFE realizado junto con el encargado Daniel Abarca, para el sistema de ventilación y tratamiento de aire.

Función o Componente del Servicio		Equipo		Modo de Fallo		Efecto	Causas	Método de detección	Gravidad	Frecuencia	Detección	NPR Número de prioridad de riesgo	Responsable	Acción Tomada
1	Garantizar el suministro continuo de aire con los parámetros y condiciones requeridas para los procedimientos médicos llevados a cabo en el edificio.	1	Unidad manejadora modular	1	Lampara UV apagada / parpadeante	Pérdida de irradiación, paso de aire sin tratamiento, posible alarma en edificio	Falta eléctrica, falta mantenimiento suciedad, balastro dañado, vibración excesiva	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	3	5	120	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
				2	Filtro MERV-13 con fisuras o agrietamiento del marco / aumento de presión de aire	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente, falta mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	1	6	48	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
				3	Sobrecalentamiento de ventiladores 1, presión de salida es menor a la necesaria	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento en filtro MERV-13, exceso de partículas adheridas al filtro (colectación) en filtro MERV-13	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	5	70	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
				4	Filtro pergamangano de potasio con fisuras o agrietamiento del marco / aumento de presión de aire	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente o falta mantenimiento de filtro de pergamangano de potasio	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	1	6	48	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
				5	Sobrecalentamiento de ventiladores 2, presión de salida es menor a la necesaria	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento o exceso de partículas adheridas al filtro (colectación) de pergamangano de potasio	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	5	70	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		2	Dampers	6	Bloqueo de mecanismo de accionamiento de dampers / dampers trabados	No se logra impedir o regular el paso de aire, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	2	3	48	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		3	Ventiladores	7	Desbalance mecánico de ventilador	No se logra inyectar el aire con la presión requerida, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento, contaminantes adheridos al ventilador	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	3	42	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		8	Vibración excesiva	6	Puede dañar otros componentes del sistema, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	6	2	3	36	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses	
		4	Filtro HEPA	9	Filtro HEPA con fisuras o agrietamiento del marco / Presión de salida mayor a la necesaria	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente o falta mantenimiento de filtro HEPA	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	7	63	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		10	Sobrecalentamiento de ventiladores 3, presión de salida es menor a la necesaria	9	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento o exceso de partículas adheridas al filtro HEPA	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	2	8	144	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses	
		5	Ductos	11	Pérdida de presión en la salida	Inestabilidad en las condiciones requeridas del aire, posible alarma en edificio	Rotura debido a vibraciones, desajuste o falla en sujeciones	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	7	63	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		6	Bomba de agua helada	12	Bomba no enciende o se apaga	No circula el agua helada, pérdida de capacidad de enfriamiento, posible alarma en edificio	Falla eléctrica, falta de mantenimiento, desgaste de componentes	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	2	18	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
		13	Fuga de agua en la bomba o conexiones como serpientes	9	Pérdida de fluido, baja presión y riesgo de daño a componentes y contaminación de aire, posible alarma en edificio	Deterioro de sellos, vibración, corrosión	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	2	2	36	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo cada 12 meses	

Figura 21. AMFE del proceso de sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.

Siguiendo la teoría y como se observa en la tabla que se muestra del AMFE, el componente más crítico del sistema son los filtros HEPA y las lámparas UV, debido a que su número de prioridad de riesgo (NPR) es bastante elevado. A pesar de que se analiza un sistema del cual depende la efectividad de procesos médicos tan importantes como la fertilización in vitro, muchos valores de NPR son muy bajos. Esto, se debe a que, aunque una falla en cualquier componente compromete la efectividad de los procedimientos llevados a cabo en el edificio, todas las manejadoras modulares y bombas de agua helada cuentan con un sistema automático de by pass, donde respalda, un eventual fallo de cualquiera de los componentes, a excepción de los filtros HEPA, los cuales, por su ubicación y diseño del sistema de ventilación, no tienen este tipo de respaldo. Esta característica, sumada al hecho de que son el componente más influyente en la efectividad de los procesos médicos que se llevan a cabo en el lugar, los convierte en el componente más importante y prioritario del sistema.

Cabe destacar que en este estudio no se analizaron los historiales de mantenimiento y fallas, debido a que no existen registros de mantenimiento definidos. Además, el edificio es relativamente nuevo (inaugurado en 2019) y no hay constancia de alguna eventual falla. Asimismo, Daniel Abarca menciona, que su puesto comenzó en diciembre de 2024, y en ese mes se realizó el primer mantenimiento y cambio de filtros bajo su responsabilidad. Por lo tanto, solicitó que se llevara a cabo un registro claro y documentado de cada mantenimiento realizado.

3.1.2. Diagrama de Pareto

Para el desarrollo del análisis de criticidad de las fallas que puede presentar el sistema asociado al acondicionamiento del aire, se realizaron entrevistas y consultas a Daniel Abarca y Brayan Delgado, encargados del mantenimiento y funcionamiento del sistema. Debido a que no existen registros de fallas o mantenimiento hasta la fecha, y, por lo tanto, no se cuenta con costos asociados, tiempos de reparación o repercusiones en los procesos médicos, se tomó como base el número de prioridad de riesgo (NPR) de cada modo de falla identificado.

En este caso, el análisis de Pareto busca determinar el posible mayor problema no solo desde una perspectiva técnica y financiera, sino principalmente desde un enfoque preventivo e institucional, debido a que el sistema opera en un entorno sensible como un laboratorio donde se llevan a cabo procesos de reproducción asistida. Cualquier fallo en los componentes del sistema, ya sea por mal funcionamiento de las lámparas UV, saturación de filtros, sobrecalentamiento de ventiladores, fugas, entre otros, no solo genera un costo técnico de reparación, sino que, como mencionan Mortimer et al. (2018), al comprometer la calidad del aire en el laboratorio, puede afectar negativamente el desarrollo de embriones y gametos, los cuales dependen de condiciones fisicoquímicas altamente estrictas para su crecimiento y viabilidad.

Además, se menciona en el artículo documentado que los gametos y embriones son altamente susceptibles a contaminantes presentes en el ambiente, como los compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas en suspensión y microorganismos y que la presencia de estos agentes puede alterar el entorno de cultivo celular, representando una amenaza significativa para el éxito de la fertilización in vitro.

Durante una de las visitas técnicas, Daniel Abarca indicó que el laboratorio de embriología y fertilización in vitro cuenta con un sistema que monitorea constantemente los niveles de COV a la salida del laboratorio. Este sistema activa una alarma cuando los parámetros de calidad del aire se ven comprometidos ya dentro del laboratorio, para que el personal tome las acciones correctivas necesarias. No obstante, incluso cuando las condiciones ambientales se alteran por un período breve, la efectividad de los procesos puede verse comprometida y, por ende, también la seguridad de los pacientes. Como advierten Mortimer et al. (2018): “Incluso exposiciones breves al ambiente externo pueden ser suficientes para introducir riesgos como bacterias, mohos y toxinas que podrían afectar la biología de

los gametos, el desarrollo embrionario, o ambos” (s.p.).

Cualquiera de estas exposiciones puede producir consecuencias severas en la salud de los pacientes tratados, lo que compromete no solo la eficacia de los tratamientos, sino también la responsabilidad ética y legal de la entidad. La alteración del ambiente requerido para estos procedimientos, ya sea por lapsos cortos o prolongados, puede impactar negativamente el desarrollo embrionario en etapas críticas, lo que genera alteraciones que no siempre se manifiestan de forma inmediata. A mediano y largo plazo, estas condiciones pueden traducirse en enfermedades crónicas, trastornos del desarrollo o incluso problemas hereditarios en los descendientes, lo que aumentaría el riesgo de demandas por negligencia médica o incumplimiento de normativas de bioseguridad. Tal como se advierte: “Cualquier adaptación representa una fuente de estrés fisiológico. El estrés celular también puede provocar alteraciones en la expresión y regulación génica embrionaria, incluidas modificaciones epigenéticas, que podrían heredarse” (Mortimer et al., 2018, s.p.).

Por esta razón, el objetivo principal de este análisis Amfec es identificar los modos de falla que, aunque actualmente no generen costos económicos directos, pueden derivar en consecuencias legales, reputacionales o clínicas graves si no se controlan a tiempo. Estas consecuencias pueden incluir sanciones por parte de entidades reguladoras, interrupciones en el funcionamiento del laboratorio y acciones legales por exposición a ambientes no seguros. Por esto, el gráfico de Pareto mostrado en la Figura 22, generado a partir del análisis AMFE, permite reconocer y priorizar aquellos modos de falla con mayor potencial de afectar las condiciones ambientales críticas del laboratorio. Al centrarse en estos puntos vulnerables mencionados, se busca prevenir escenarios que pueden derivar en efectos adversos sobre el desarrollo embrionario, salud de los pacientes, así como en consecuencias sanitarias, legales e institucionales de alto impacto.

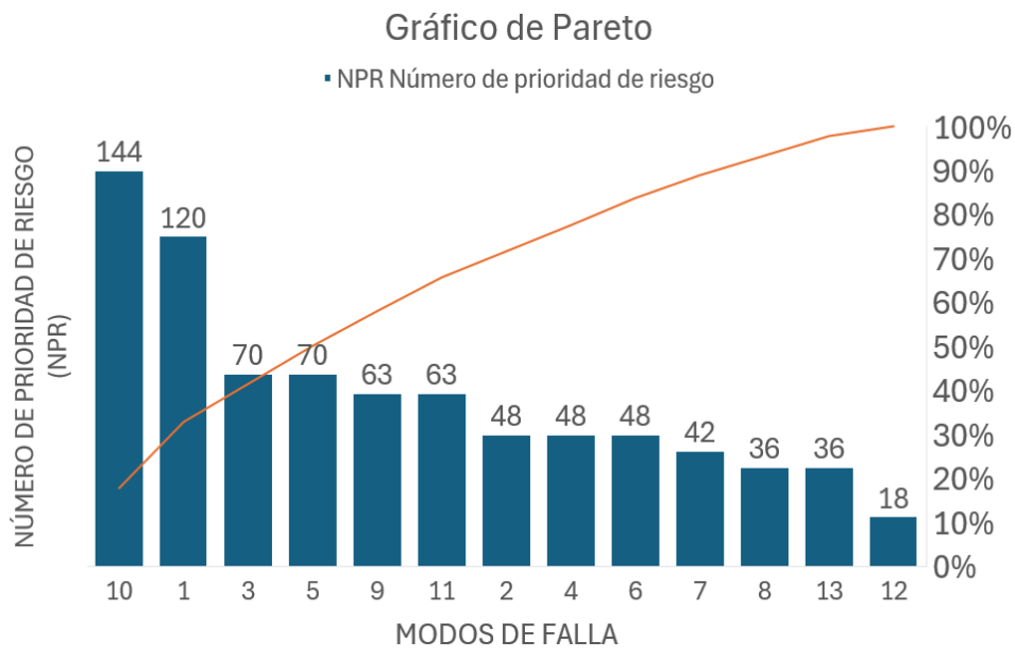


Figura 22. Gráfico del diagrama de Pareto del sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.

La Figura 22 muestra la distribución obtenida con base en el número de prioridad de riesgo (NPR) para

cada modo de falla identificado en el sistema de tratamiento de aire. Este gráfico de Pareto permite visualizar de forma clara y estructurada cuáles son los fallos que representan el mayor riesgo potencial para la operación segura del sistema de ventilación del edificio de fertilización in vitro, lo que facilita la toma de decisiones preventivas con base en criterios de criticidad.

Como se puede observar, las fallas con mayor NPR corresponden al sobrecalentamiento de ventiladores por colmatación del filtro HEPA (NPR=144) y a las lámparas UV apagadas o parpadeantes (NPR=120). Estas se identifican como los *pocos vitales* del sistema, ya que concentran una parte significativa del riesgo total. En conjunto, representan más del 40 % del riesgo acumulado, según lo indica la línea de porcentaje del gráfico, lo cual justifica su priorización inmediata dentro de las estrategias de mantenimiento preventivo y de monitoreo continuo.

Tal como se explicó, este análisis es relevante en un entorno altamente controlado como un laboratorio de fertilización in vitro, donde cualquier alteración en la calidad del aire, ya sea por la presencia de contaminantes, la pérdida de presión o el paso de aire sin tratamiento, puede comprometer de forma directa la viabilidad de los procesos médicos. Si bien muchos de los componentes analizados cuentan con un sistema de respaldo o *bypass* que mitiga el impacto de una posible falla, los filtros HEPA no disponen de este mecanismo, lo que los convierte en el punto más crítico del sistema. Esto explica por qué, a pesar de compartir los modos de falla de otros filtros, su NPR es considerablemente más alto.

Además, una de las mayores preocupaciones que identificaron los encargados del sistema es la dificultad operativa que implica la inspección y mantenimiento de los filtros HEPA. Debido a su ubicación al final del sistema, cualquier revisión requiere detener completamente los procesos médicos que se desarrollan en las áreas críticas del edificio. Esta condición no solo involucra una interrupción en los procedimientos clínicos, sino que también representa un riesgo para la seguridad del entorno, ya que durante ese lapso se pierde la capacidad de mantener el aire dentro de los parámetros exigidos. Por lo tanto, la criticidad del filtro HEPA no radica solo en su función en el sistema, sino también en las limitaciones técnicas y operativas que su mantenimiento simboliza.

3.2. Diseño del sistema de monitoreo

3.2.1. Determinación de las variables por monitorear

Con el desarrollo de un sistema de monitoreo en los filtros HEPA, se pretende permitir un diagnóstico o pronóstico continuo del estado de dichos filtros. La variable que se seleccionó para este fin es la presión diferencial (ΔP), reconocida por su utilidad técnica como indicador del nivel de colmatación de filtros y de su vida útil remanente.

Diversos estudios respaldan la selección de esta variable, Pei et al. (2023) afirman: “Todos los sensores comerciales disponibles actualmente para monitorear filtros de aire están basados en mediciones de presión diferencial” (s.p.), lo que evidencia que es un estándar ampliamente adoptado por su efectividad y confiabilidad. En este mismo sentido, el estudio recalca que: “La presión diferencial del filtro HEPA se pudo calcular a partir de los datos de presión, que fue de 44 Pa” (Pei et al., 2023, s.p.), lo que demuestra la viabilidad práctica de medir esta variable con sensores de bajo costo y alta precisión.

Por otro lado, la variación de la presión diferencial en función de condiciones operativas como la velocidad del ventilador también ha sido documentada. Pei et al. (2023) mencionan: “A mayor velocidad del ventilador, mayor es la presión diferencial, lo cual se confirmó mediante el análisis de 75 puntos de muestra por cada velocidad” (s.p.). Esta evidencia apoya el uso de ΔP como variable dinámica que responde no solo al estado del filtro, sino también a las condiciones de operación del sistema de ventilación, en este caso de componentes como los ventiladores, los cuales pueden verse afectados por anomalías en los filtros HEPA, resaltando la importancia de conocer la velocidad a la que opera los ventiladores antes de llegar al filtro HEPA.

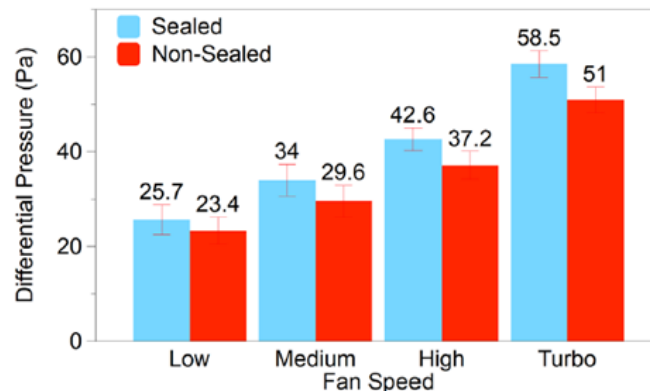


Figura 23. Presiones diferenciales del filtro HEPA a distintas velocidades del ventilador.
Fuente: figura reproducida de Pei et al. (2023).

La Figura 23 muestra las mediciones de presión diferencial en un filtro HEPA ante distintas velocidades del ventilador. Se evidencia que el aumento en la velocidad del flujo de aire genera un incremento proporcional en la resistencia del filtro, reflejado en el diferencial de presión. Esta relación confirma la importancia de monitorear ambas variables, ya que su comportamiento conjunto permite validar la precisión de los datos recolectados y asegurar una interpretación adecuada del estado operativo del sistema.

Ahora bien, aunque la presión diferencial por sí sola no garantiza una evaluación integral de la eficiencia del filtro, es una herramienta indispensable para detectar desviaciones en su funcionamiento. Tal como indican los

autores: “La medición de la presión diferencial no puede ofrecer suficiente información para verificar que los filtros están funcionando como se diseñaron, y pueden existir riesgos potenciales para los ocupantes o el equipo detrás del filtro” (Pei et al., 2023, s.p.). Sin embargo, cuando esta variable se combina con modelos de referencia, su valor diagnóstico se potencia notablemente. Por lo tanto, se propone la incorporación de un segundo sensor que mida la velocidad del aire justo antes de la entrada al filtro HEPA. Esta medición permite utilizarla como referencia, asegurando que el diferencial de presión registrado esté efectivamente relacionado con el estado de obstrucción del filtro, y no distorsionado por un posible aumento en la velocidad del aire. De esta manera, se evita una interpretación errónea del estado del filtro y se mejora la precisión del diagnóstico y la medición del diferencial de presión.

Este enfoque combinado es precisamente el que proponen Moore et al. (2014), quienes presentan un método para estimar la vida útil restante de un filtro de aire basado en la comparación entre presiones diferenciales en distintos momentos operativos. Según se describe:

El método incluye medir una primera tasa de flujo de aire y una primera presión de aire, y luego una segunda tasa de flujo y su respectiva presión, obteniendo diferenciales de presión que se utilizan para calcular la vida útil restante del filtro (Moore et al., 2014).

Este método ayuda a documentar, comprender y almacenar el comportamiento del filtro durante su vida útil remanente, Moore et al. (2014) definen una condición crítica: “Cuando el diferencial de presión a través de un filtro de aire es mayor o igual a 2.5 kPa a una tasa de flujo de 200 g/s, ese filtro se considera en fin de vida” (s.p.). Esta referencia proporciona un parámetro de umbral técnico que puede ser adaptado al contexto hospitalario y que sirva, como criterio para la activación de alarmas o el mantenimiento preventivo.

Además, se destaca que: “Los datos pareados, junto con los datos de presión diferencial observados en filtros nuevos y al final de su vida útil, se utilizan para calcular la vida útil restante del filtro de aire” (Moore et al., 2014, s.p.). Esta metodología permite, en el marco del sistema propuesto, no solo el diagnóstico en tiempo real, sino también la proyección o pronóstico de fallas, lo que representa un avance importante respecto al modelo actual de mantenimiento correctivo y visual.

Cabe mencionar que estos métodos no solo se orientan al monitoreo puntual, sino que también permiten estructurar un sistema integral con capacidad de aprendizaje. Como señalan Pei et al. (2023): “El sistema de monitoreo puede almacenar datos de operación del filtro que pueden utilizarse para modelar el desempeño o incluso entrenar un modelo de aprendizaje automático” (s.p.). Esto abre la posibilidad de desarrollar soluciones inteligentes capaces de ajustarse al comportamiento real del sistema en función del entorno.

3.2.2. Arquitectura de sistema

Con las dos variables que se seleccionaron para monitorear en el sistema, se propone una arquitectura de monitoreo basada en el enfoque metodológico de ingeniería de sistemas, siguiendo el modelo que plantearon Montero and Vingerhoeds (2019). Esta metodología permite estructurar el desarrollo desde la identificación de necesidades hasta el diseño funcional y lógico del sistema, garantizando coherencia, trazabilidad y una alineación directa con los requerimientos de los actores involucrados.

La primera etapa se inició al identificar las necesidades y deseos de los stakeholders clave del sistema de ventilación del edificio de reproducción asistida, lo que incluye al personal técnico, a los operadores y a los responsables de mantenimiento. Entre los requerimientos relevantes detectados y comentados con Daniel Abarca resaltan:

- Detectar obstrucciones progresivas en filtros HEPA antes de que afecten la calidad del aire.
- Visualizar en tiempo real el estado del sistema de filtrado.
- Reducir intervenciones innecesarias y optimizar la programación del mantenimiento.
- Cumplir con las exigencias normativas de los ambientes controlados.

Posteriormente, con base en el modelo FBSE (Functional, Behavioral, Structural, Experiential), se han clasificado y priorizado como se indica a continuación:

Tipo de requisito	Requisito	Prioridad
Funcional	El sistema debe medir la presión diferencial entre entrada y salida del filtro HEPA.	Crítico
Funcional	El sistema debe medir la velocidad del aire antes del filtro HEPA.	Crítico
Conductual	El sistema debe emitir alerta cuando el diferencial supere los umbrales definidos.	Crítico
Conductual	El sistema debe estimar la vida útil remanente (RUL) del filtro.	Crítico
Experiential	El sistema debe ofrecer una interfaz intuitiva para el personal de laboratorio.	Importante

Tabla 1: clasificación de requisitos del sistema de monitoreo de filtros HEPA

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 presenta la clasificación de los requisitos funcionales y no funcionales definidos para el sistema de monitoreo propuesto. Se organiza en categorías clave como adquisición de datos, procesamiento, visualización, almacenamiento y generación de alertas, lo que permite visualizar de manera estructurada qué funcionalidades debe cumplir el sistema y facilita su diseño y evaluación en etapas posteriores.

Además, esta clasificación permite reducir la ambigüedad y establecer los límites del sistema por desarrollar, lo que favorece una transición más clara hacia su arquitectura. Posteriormente, con la descomposición funcional, se definió la función principal del sistema de monitoreo:

“Estimar con precisión el momento óptimo para realizar el mantenimiento en los filtros del sistema de ventilación antes de una eventual falla”.

Dicha función se descompone en las siguientes subfunciones:

- F1: medir presión diferencial del filtro.
- F2: medir velocidad del aire antes del filtro.
- F3: preprocesar y almacenar los datos.
- F4: detectar colmatación del filtro a partir de las señales.
- F5: estimar la vida útil remanente.
- F6: emitir alertas y reportes al usuario.

- F7: generar reporte.

Esta descomposición funcional, basada en la arquitectura propuesta por Montero and Vingerhoeds (2019), permite asignar cada función a un componente lógico específico, lo que facilita los procesos de verificación y validación del sistema. La Figura 24 ilustra esta estructura de manera clara, y sirve, además, como una herramienta visual que contribuye a una comprensión más efectiva y accesible del funcionamiento del sistema propuesto.

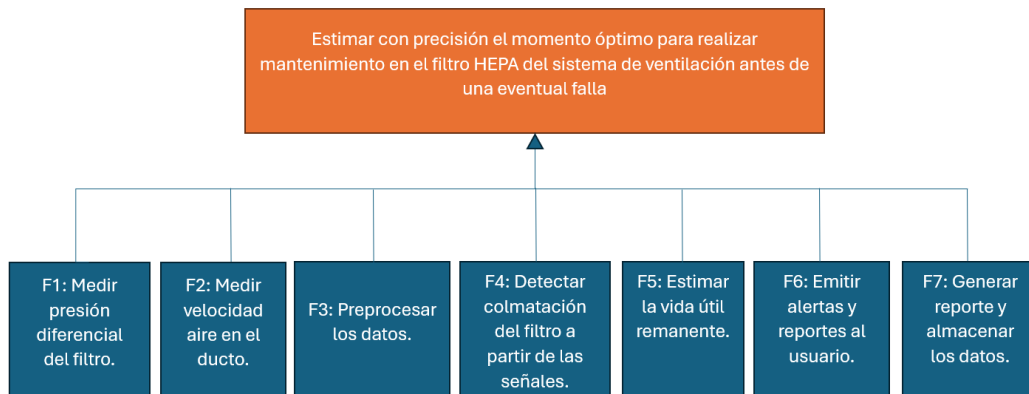


Figura 24. Descomposición funcional del sistema de mantenimiento predictivo para el sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.
Fuente: Elaboración propia

Con base en las funciones descritas, se plantea una arquitectura funcional en la que:

- Los sensores de presión diferencial y velocidad (F1 y F2) envían señales a una unidad de procesamiento y almacenamiento de datos (F3).
- A partir de los datos, se realiza un diagnóstico del estado del filtro (F4) y posteriormente, una estimación de la vida útil restante (RUL) (F5).
- Posteriormente, el sistema entrega resultados a través una interfaz visual (F6), ya sea un visor local o un servidor web.
- Finalmente, se genera un reporte que se almacena.

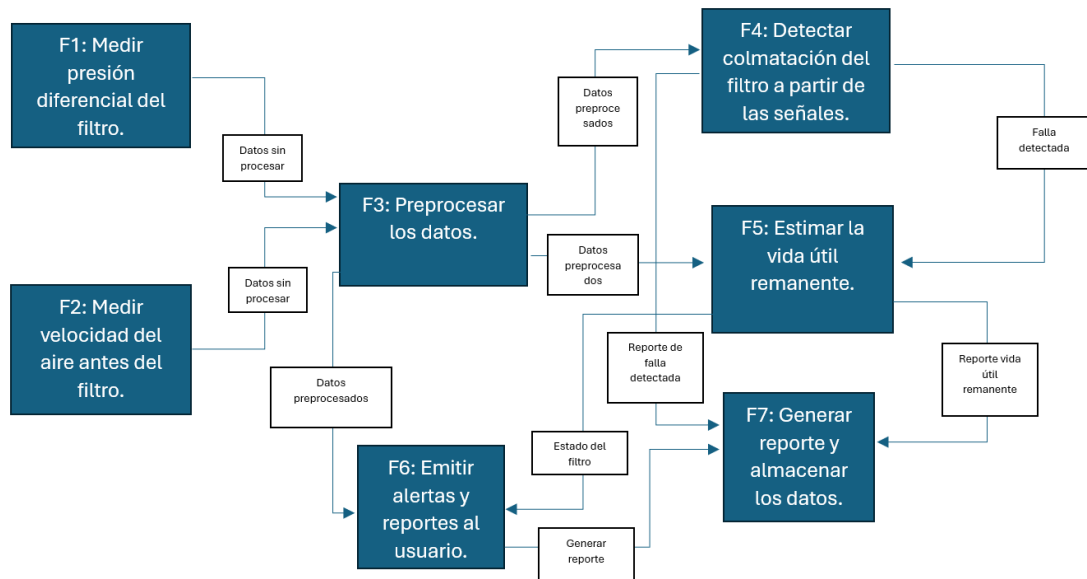


Figura 25. Arquitectura funcional del concepto del sistema de mantenimiento predictivo para el sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 25 muestra la arquitectura funcional propuesta para el sistema de mantenimiento predictivo del sistema de ventilación. Además, representa las relaciones entre los distintos subsistemas, desde la adquisición de datos hasta la toma de decisiones, lo que permite visualizar cómo cada componente contribuye al monitoreo en tiempo real y al análisis de la condición del filtro HEPA.

Las interfaces externas incluyen:

- **Entrada:** sensores físicos conectados a la unidad de procesamiento de datos.
- **Salida:** pantalla LCD o interfaz web, y conexión a bases de datos locales o en la nube.
- **Usuario:** técnico de mantenimiento o personal del laboratorio.

Cada una de estas funciones es, en realidad, un componente lógico que cumple la función requerida. En esta arquitectura lógica se puede asignar a cada función un componente específico:

Componente lógico	Función asignada
Módulo de adquisición	F1, F2
Módulo de procesamiento	F3
Módulo de diagnóstico	F4
Módulo de pronóstico	F5
Módulo de visualización	F6
Módulo de almacenamiento de datos	F7

Tabla 2: asignación funcional por módulo lógico del sistema.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra la distribución de las funciones específicas que debe cumplir cada módulo lógico del

sistema, tales como la adquisición, el procesamiento, la comunicación y la visualización. Esta asignación funcional permite establecer una arquitectura clara, facilitando la implementación ordenada de cada subsistema y asegurando que todas las necesidades operativas del sistema de monitoreo sean cubiertas por los componentes seleccionados.

3.2.3. Prototipo del sistema de monitoreo

Cada uno de los módulos funcionales definidos en la arquitectura conceptual del sistema puede representarse mediante componentes electrónicos específicos, que permiten realizar la medición y la supervisión de las variables críticas que se seleccionaron. La propuesta contempla el uso de dispositivos robustos y de alta sensibilidad, adecuados para un ambiente de monitoreo continuo en sistemas de ventilación.

Para el monitoreo del diferencial de presión a través de los filtros HEPA, se plantea el uso de sensores digitales de presión diferencial de alta precisión, como el Sensirion SDP3x. Este sensor permite medir variaciones de presión de hasta ± 500 Pascales, un rango adecuado para aplicaciones de ventilación y filtración de aire. El sensor ofrece una salida digital por medio del protocolo de comunicación I2C, lo que facilita integrarlo con plataformas de adquisición de datos como Arduino. Además, de garantizar alta resolución y compensación automática de temperatura. Se propone instalar estos sensores en puntos estratégicos del sistema, conectándolos mediante tubos flexibles a tomas de presión ubicadas antes y después de los módulos de filtrado. Esta configuración permite detectar de manera temprana procesos de saturación progresiva en los filtros HEPA o cambios anómalos en las condiciones del flujo de aire.

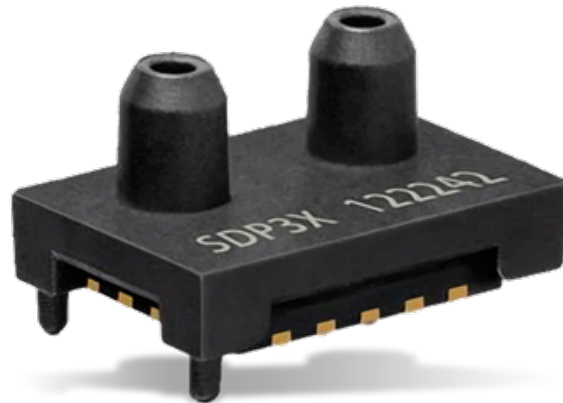


Figura 26. Sensor digital de presión diferencial.

Fuente: Mouser Electronics.

De forma complementaria, se considera la medición de la velocidad del aire en el conducto de ingreso antes del filtro HEPA, con el objetivo de validar que las variaciones en el diferencial de presión no sean causadas por fluctuaciones en el caudal de aire. Para esta medición, se plantea el uso de sensores compactos de flujo de aire, como el FS3000-1005 de Renesas, el cual proporciona una salida analógica proporcional a la velocidad del flujo y es compatible con microcontroladores de bajo costo como Arduino. Se sugiere instalar este tipo de sensor en un tramo recto del conducto donde las perturbaciones del flujo sean mínimas, asegurando una medición representativa.



Figura 27. Sensor compacto de flujo de aire.
Fuente: Mouser Electronics.

Toda la información generada por los sensores puede gestionarse por un microcontrolador programable, como el Arduino Mega 2560, que integraría las señales de entrada, ejecutaría evaluaciones preliminares sobre las condiciones del sistema, y activaría alertas locales o remotas en caso de detectar desviaciones fuera de los umbrales establecidos.

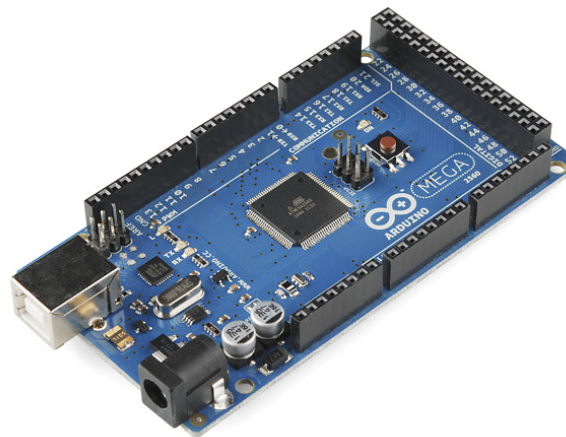


Figura 28. Arduino Mega 2560.
Fuente: Micro JPM.

Para la transmisión de datos hacia una plataforma de almacenamiento o monitoreo remoto, se sugiere incorporar un módulo de comunicación inalámbrica como el ESP32, que permitiría el envío de información mediante una red wifi hacia un servidor o base de datos local. Esta arquitectura posibilita no solo el monitoreo en tiempo real, sino también generar registros históricos para el análisis de tendencias y la implementación futura de estrategias de mantenimiento basado en condición.



Figura 29. Módulo de comunicación inalámbrica.
Fuente: Mouser Electronics.

De esta manera, cada bloque funcional del sistema conceptual podría ser representado y monitoreado mediante componentes electrónicos específicos, seleccionados en función de su idoneidad técnica para las condiciones de operación del sistema de ventilación, lo que asegura la viabilidad técnica del sistema de monitoreo propuesto.

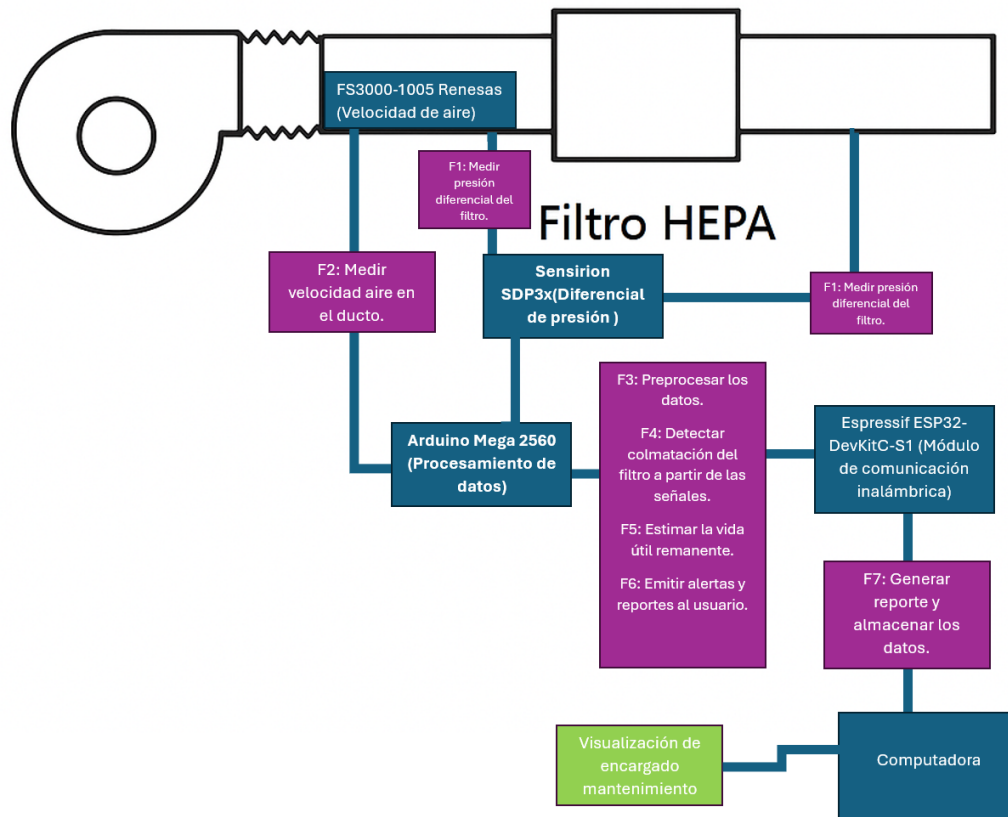


Figura 30. Prototipo de la arquitectura funcional del sistema de monitoreo en tiempo real para filtro HEPA.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 30 presenta el prototipo de la arquitectura funcional del sistema de monitoreo en tiempo real. En esta figura se integran los sensores, el microcontrolador, el módulo de comunicación y la visualización, lo que permite comprender cómo interactúan los distintos elementos para generar un sistema operativo autónomo.

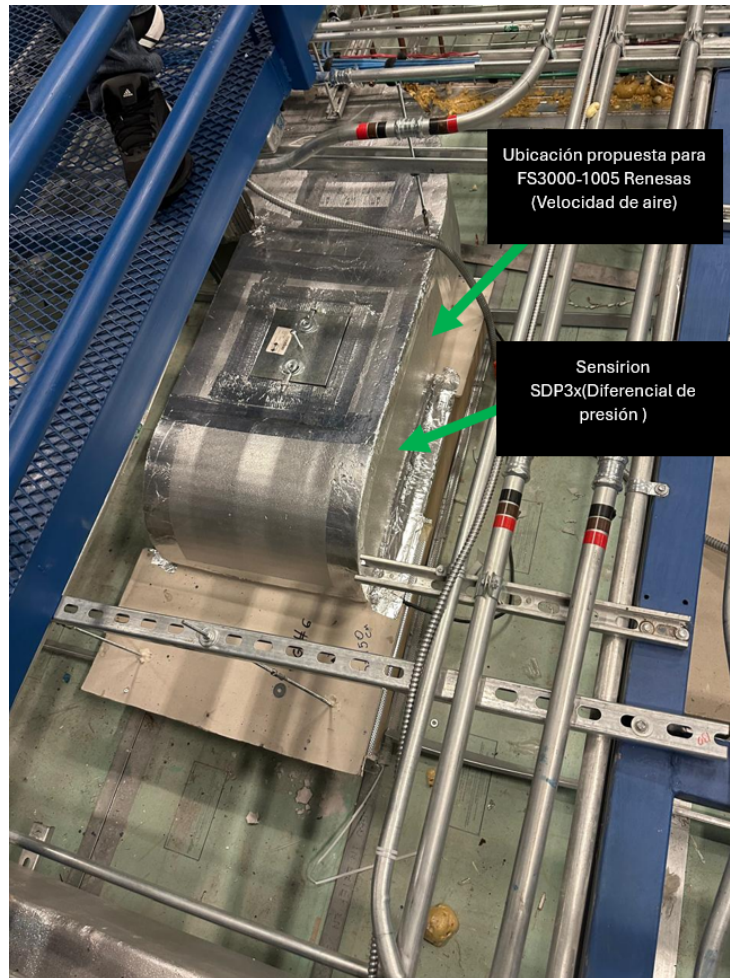


Figura 31. Propuesta de ubicación de sensores de presión diferencial y velocidad del aire en el sistema de ventilación.

Fuente: laboratorio de medicina de alta complejidad en el Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva.

Es importante señalar que, si bien el presente apartado propone la disposición general de los sensores en el sistema de ventilación, la única representación gráfica incorporada corresponde a la ubicación sugerida del primer sensor de presión diferencial y del sensor de velocidad del aire. Esta decisión responde a limitaciones de acceso físico al sistema real, ya que, conforme a la inspección preliminar y a lo que indica el personal técnico del hospital, el filtro HEPA se encuentra instalado en la etapa final del sistema de conducción de aire, en una sección de difícil acceso ubicada en el nivel inferior del edificio. Debido a las condiciones estructurales del área y a las políticas de operación del laboratorio, no fue posible realizar inspecciones visuales ni documentar gráficamente dicha sección sin comprometer la integridad del sistema o interrumpir su funcionamiento. Por lo tanto, la representación esquemática se limita a los puntos del sistema donde se cuenta con acceso autorizado y condiciones seguras para la observación técnica, manteniendo la coherencia con los criterios de factibilidad operativa del entorno hospitalario.

3.3. Modelo de pronóstico para la vida útil remanente de filtros HEPA

3.3.1. Uso de lenguaje de programación Python

En la sección anterior se propuso usar una placa Arduino Mega 2560 como dispositivo para la adquisición, conversión y envío de datos hacia una interfaz de monitoreo, así como componentes electrónicos para adquirir y procesar datos. Esta propuesta se fundamenta en su capacidad de procesamiento, su amplia compatibilidad con sensores industriales y su facilidad de programación. Sin embargo, debido a la criticidad del entorno hospitalario en el que se pretende aplicar el sistema, en específico en el área de fertilización in vitro del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva, no es viable intervenir físicamente en el sistema real en esta etapa del proyecto.

La infraestructura del laboratorio opera bajo protocolos estrictos de limpieza, estabilidad del flujo de aire y presión positiva, por lo que cualquier modificación no autorizada podría poner en riesgo los procedimientos clínicos. Por este motivo, en esta fase no se utiliza un prototipo físico basado en Arduino, sino que se opta por una estrategia de simulación digital avanzada, que permite validar el modelo de monitoreo sin necesidad de hardware conectado con el sistema real.

Para este propósito, se desarrolló un sistema de simulación utilizando Python, un lenguaje de programación de alto nivel ampliamente utilizado en ingeniería, automatización, análisis de datos y modelado de sistemas físicos. Entre sus principales ventajas destacan:

Gracias a esta estructura, se logra simular adecuadamente el comportamiento esperado de un filtro HEPA que opera en condiciones reales, lo que incluye la evolución del diferencial de presión semana a semana y la influencia de variables dinámicas como la velocidad del aire.

Es importante señalar que todas las funciones que se implementan que actualmente generan datos aleatorios, como las que simulan la lectura de presión o de velocidad, tienen una equivalencia directa con sensores físicos reales. Si en el futuro se decide implementar el sistema con sensores conectados a hardware, bastará con sustituir esas funciones por lecturas directas provenientes de transductores electrónicos, como sensores de presión diferencial o anemómetros digitales, conectados a un microcontrolador como Arduino. De esta manera, la lógica desarrollada durante la simulación se mantiene completamente funcional en un entorno real.

Por último, lo más valioso del uso de Python no es la generación de datos simulados, sino la forma en la que estos datos se procesan mediante un modelo de predicción de vida útil remanente (VUR). Esta parte del código, basada en un modelo de regresión lineal simple, permite calcular cuántas semanas restan al filtro antes de alcanzar el umbral de cambio, utilizando como base el comportamiento histórico del diferencial de presión registrado en simulaciones anteriores. Este modelo predictivo, aunque construido con datos simulados, está diseñado para operar directamente con datos reales en el futuro, y constituye el núcleo del sistema de monitoreo propuesto, manteniendo su funcionalidad sin importar si las lecturas provienen de sensores físicos o de una simulación digital.

3.3.2. Código de simulación en Python

3.3.2.1. Configuración inicial e importación de bibliotecas

La primera parte del código adjunta en los anexos, está destinada a configurar el entorno de trabajo. En ella se realiza la importación de todas las bibliotecas necesarias para ejecutar el sistema. Se incluyen librerías estándar de Python como random, time y datetime. Además, de bibliotecas especializadas, como matplotlib, para la creación de gráficas en tiempo real, pandas para el manejo de estructuras de datos tipo tabla, y Openpyxl para la manipulación

de archivos Microsoft Excel. Además, se incorporan herramientas específicas para construir la interfaz de usuario y gestionar tareas simultáneas como la reproducción de alarmas sonoras. Por último, se verifica el sistema operativo mediante Platform para cargar condicionalmente la librería Winsound en sistemas Windows.

3.3.2.2. Funciones auxiliares del sistema

Una vez importadas las bibliotecas, se definen varias funciones que permiten gestionar el comportamiento general del sistema. Por ejemplo, la función `reproducir_alarma()` utiliza Winsound para emitir una alerta sonora ante condiciones anómalas y se ejecuta, en un hilo separado para no interferir con la visualización. Otra función importante es `generar_nombre_datos_filtro()`, que se encarga de que cada vez que se termine el uso de un filtro se genere automáticamente el archivo Microsoft Excel, el cual sirve de base de datos para el siguiente pronóstico del nuevo filtro. Además, crea automáticamente un nombre único para cada archivo Microsoft Excel, lo que evita sobrescrituras. Estas funciones representan herramientas de soporte esenciales para la trazabilidad del sistema.

3.3.2.3. Simulación de variables físicas

En esta sección del código se definen las funciones que simulan las variables físicas monitoreadas por sensores reales: el diferencial de presión, que se monitorea constantemente en la gráfica y de igual manera se puede observar segundo a segundo del lado derecho, junto con la velocidad del aire. La función `leer_presion()` modela el comportamiento de un filtro HEPA a lo largo del tiempo, lo que genera aumentos diarios aleatorios de entre 0.0 y 0.6 pascales, este comportamiento se puede observar en la Figura 32. Esta lógica se fundamenta en una entrevista realizada al encargado de este mantenimiento en el hospital, Daniel Abarca, quien ocupa el puesto de *coordinador de electromecánica UMRAC* y, quien explicó que, gracias a la presencia de múltiples etapas de prefiltración, los filtros HEPA tienden a presentar incrementos muy bajos y estables en su diferencial de presión, con variaciones que resultan prácticamente imperceptibles en escalas de tiempo reducidas. Por este motivo, se planteó una estrategia de monitoreo en tiempo real, con actualizaciones segundo a segundo, que permite detectar cualquier anomalía repentina en el sistema. Sin embargo, para fines de almacenamiento, los datos se registran una vez por semana, lo que evita el consumo innecesario de memoria y la acumulación de información redundante.

En la simulación, se estableció que cada segundo del programa representa un día, y que cada siete segundos equivalen a una semana. Esta relación permite simular el comportamiento de un año completo en aproximadamente seis minutos, lo que facilita las pruebas funcionales del sistema. Esta decisión se tomó con el objetivo de lograr un equilibrio entre una toma de datos suficientemente frecuente para detectar anomalías, y una frecuencia lo suficientemente espaciada para mantener una gestión eficiente del almacenamiento.

3.3.2.4. Estimación de vida útil remanente del filtro

Esta sección describe una de las funcionalidades clave del sistema de monitoreo: la estimación de la vida útil remanente (VUR) del filtro HEPA, basada en la evolución del diferencial de presión a lo largo del tiempo. La función implementada en Python, denominada `calcular_vida_util_remanente()`, utiliza registros históricos de filtros anteriores para estimar en cuántas semanas se alcanzará el umbral técnico establecido para el cambio del filtro, fijado en 400 pascales (Pa).

El valor de 400 Pa se define como un punto de referencia conservador, no como un límite de falla. De acuerdo con United States Environmental Protection Agency (1991), la presión diferencial típica para filtros HEPA

nuevos es de 25 mm de columna de agua (aproximadamente 245 Pa), y la vida útil operativa del filtro se considera concluida cuando se alcanza un diferencial de entre 51 y 102 mm (2 a 4 in) de columna de agua (equivalente a 500–1000 Pa).

No obstante, debido a que en este proyecto se desea implementar un sistema de alerta predictiva, no reactiva, se adopta el valor de 400 Pa como punto de aviso anticipado, lo cual ofrece un margen operativo considerable antes de alcanzar una condición crítica.

Además, como se indica: “Una vez que la caída de presión se vuelve inaceptable, el filtro debe ser reemplazado” (United States Environmental Protection Agency, 1991, s.p.). En este caso, al tratarse de un entorno hospitalario, el nivel de exigencia en cuanto al control de contaminantes, la esterilidad y la estabilidad del flujo de aire exige adoptar medidas conservadoras que aseguren la continuidad operativa del sistema y protejan la integridad de los procedimientos clínicos. Esta parte del código se representa en la Figura 32, en el lado derecho donde se observa constantemente el cálculo *vida útil remanente estimada*.

Esta decisión también se fundamenta en las declaraciones del encargado de mantenimiento, Daniel Abarca, quien señaló que, debido a la presencia de múltiples etapas de prefiltración antes del filtro HEPA, este último nunca ha alcanzado condiciones en las que su estado o diferencial de presión sean cercanos a un nivel crítico en el momento de ser reemplazado. Por esto, aunque un filtro HEPA puede seguir funcionando por encima de los 400 Pa, dicho valor se considera un umbral suficientemente conservador para utilizar como límite de advertencia en el sistema propuesto, en especial considerando que durante las labores de mantenimiento jamás se ha evidenciado un desgaste significativo en estos filtros.

La función calcula el valor de VUR mediante una fórmula de regresión lineal simple, expresada como:

$$VUR = \frac{400 - P_{\text{actual}}}{\Delta P_{\text{promedio}}} \quad (4)$$

El $\Delta P_{\text{promedio}}$ representa el incremento semanal promedio en la presión diferencial del filtro, extraído de archivos Microsoft Excel generados por simulaciones anteriores. Estos archivos contienen registros semanales que simulan cómo aumenta la presión a medida que se acumula el material particulado en la superficie del filtro. Este modelo asume un comportamiento relativamente constante de acumulación, el cual se validó a través de una entrevista con el encargado de mantenimiento del Hospital de las Mujeres, Daniel Abarca. Según su criterio técnico, el filtro HEPA presenta una variación mínima semana a semana debido a que está precedido por múltiples etapas de prefiltración, lo que reduce de forma drástica el ingreso de partículas al último filtro de la cadena.

Por ende, tanto la justificación técnica como la empírica avalan el uso de un modelo lineal para estimar la vida útil, lo que evita la complejidad de los modelos no lineales. Este enfoque simple y eficiente permite calcular cuántas semanas restan antes de que se alcance el umbral de alerta de 400 Pa, lo que facilita la programación del mantenimiento sin interrumpir el servicio.

3.3.2.5. Visualización gráfica en tiempo real, alarmas visuales y sonoras

Una de las fortalezas del sistema desarrollado es su capacidad para mostrar visualmente el comportamiento del diferencial de presión en tiempo real. Para esto, se utiliza matplotlib, que permite trazar la curva del historial de presión día a día, y añadir líneas horizontales de advertencia en 350 y 400 Pa. Además, se incluye un panel de estado con mensajes dinámicos que indican si el filtro se encuentra en condición operativa, necesita atención o requiere reemplazo. Esto simula una interfaz de monitoreo similar a la que puede utilizar el personal técnico en un hospital.

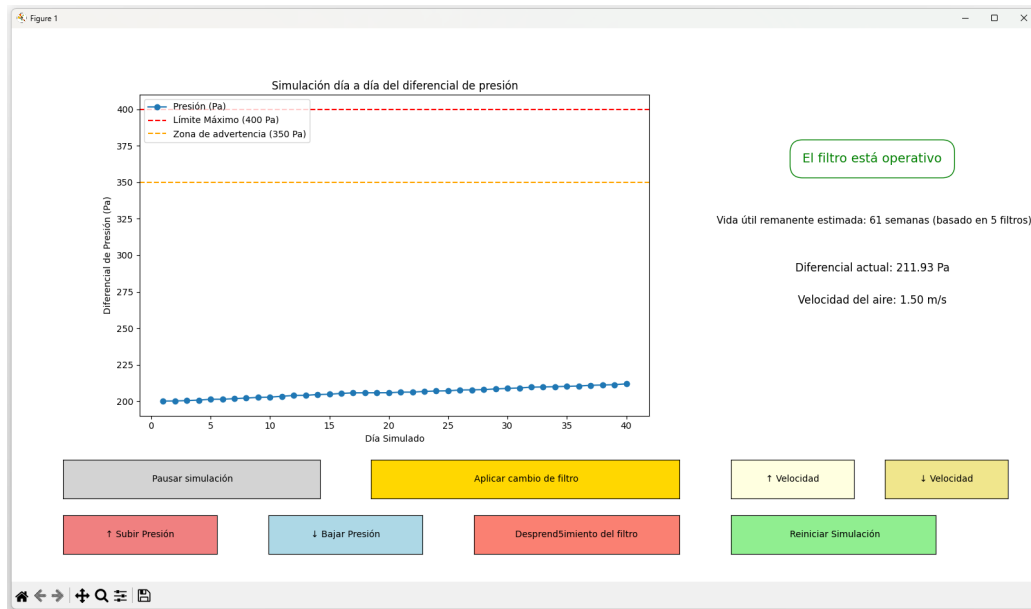


Figura 32. Simulación en tiempo real del comportamiento del filtro HEPA.
Fuente: elaboración propia en Python.

La Figura 32 muestra la interfaz de simulación en tiempo real del comportamiento del filtro HEPA. En ella se observan dinámicamente los valores de presión diferencial y velocidad del aire, lo que permite una interpretación inmediata del estado operativo del sistema. Además, se incluyen los valores estimados de vida útil remanente del filtro, así como los controles interactivos de la simulación, ubicados en la parte inferior de la interfaz, que permiten simular condiciones específicas y evaluar la respuesta del sistema en diferentes escenarios.

El sistema incorpora mecanismos de alarma tanto visuales como sonoros, los cuales se ilustran en las Figuras 33 a 36. En la Figura 33 se muestra la respuesta del sistema ante una caída repentina de presión, mientras que en la Figura 34 se simula una condición de desprendimiento del filtro. En ambos casos, el sistema activa una señal acústica acompañada de mensajes de advertencia en pantalla. Asimismo, se emiten alertas cuando el diferencial de presión alcanza umbrales críticos: 350 Pa (véase la Figura 35), como señal de advertencia temprana, y 400 Pa (véase la Figura 36), como umbral máximo antes del reemplazo. Estas funcionalidades validan que el sistema no solo registra información en tiempo real, sino que también responde de forma proactiva ante condiciones críticas muchas veces impredecibles.

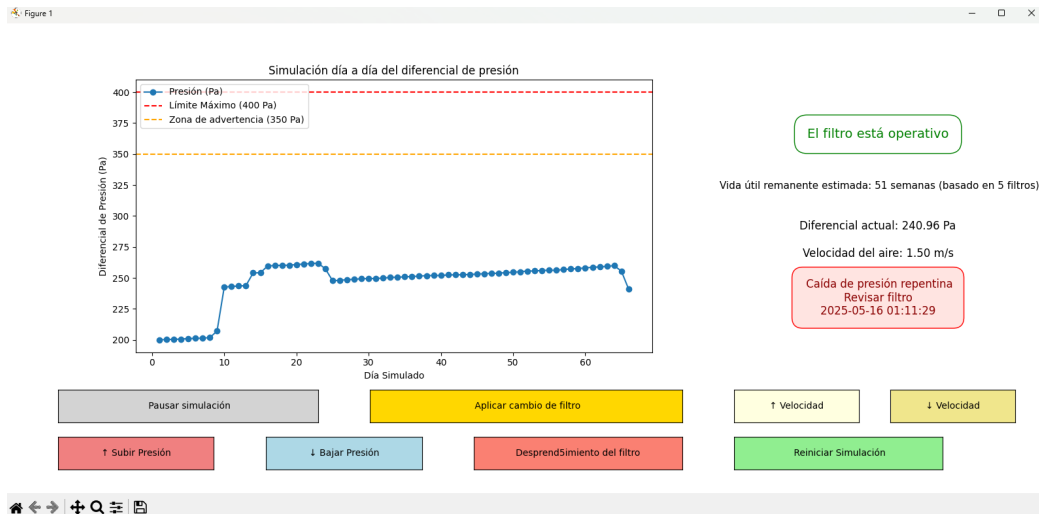


Figura 33. Simulación en tiempo real de la caída repentina de presión del filtro HEPA.
Fuente: elaboración propia en Python.

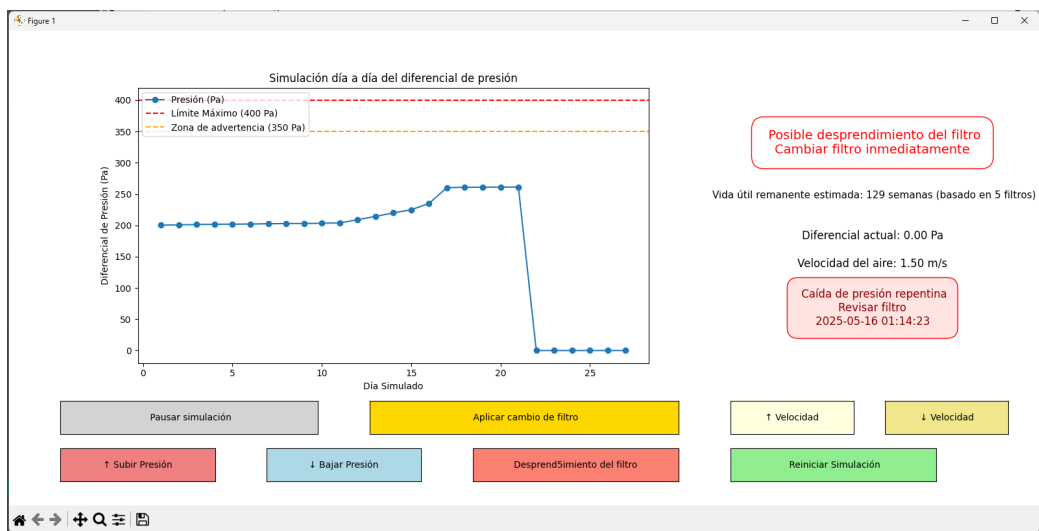


Figura 34. Simulación en tiempo real del desprendimiento del filtro HEPA.
Fuente: elaboración propia en Python.

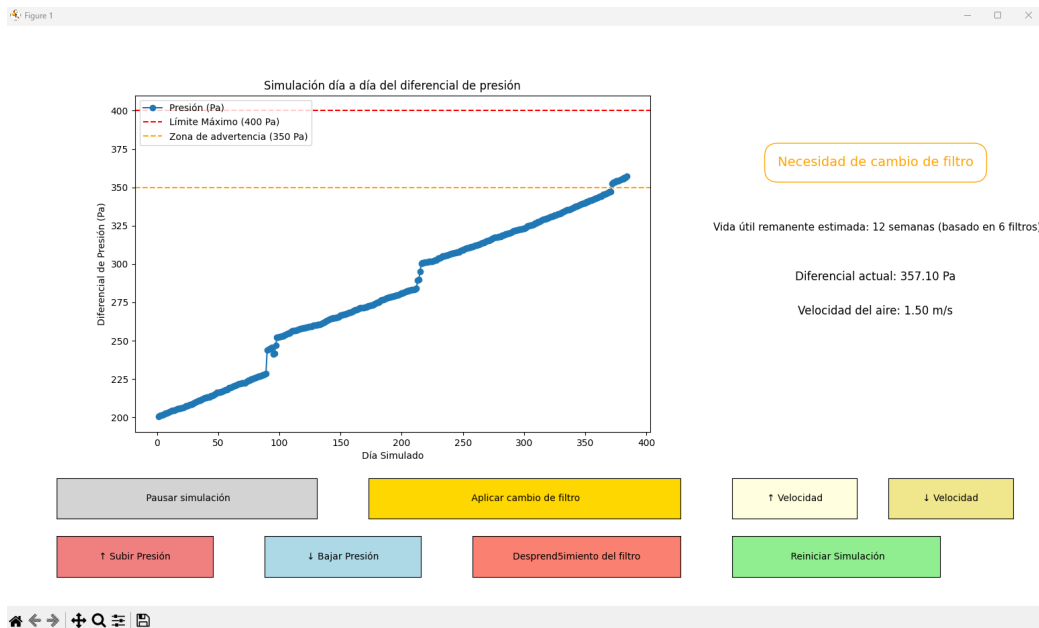


Figura 35. Simulación en tiempo real de llegada a 350 PA de diferencial de presión en el filtro HEPA.
 Fuente: elaboración propia en Python.

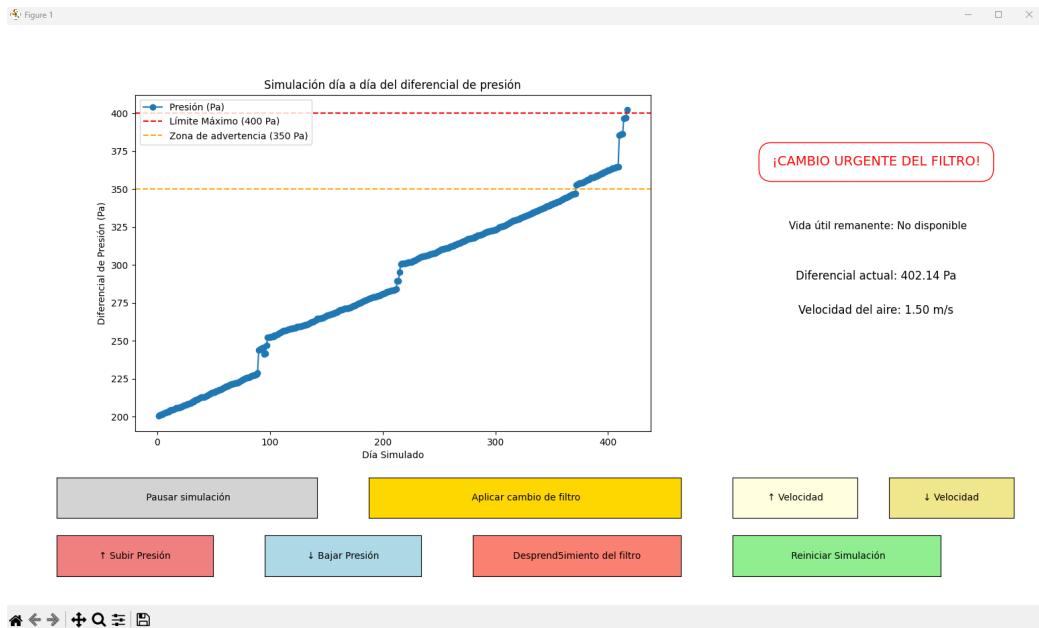


Figura 36. Simulación en tiempo real de llegada a 400 PA de presión en el filtro HEPA.
 Fuente: elaboración propia en Python.

3.4. Análisis técnico-financiero

3.4.1. Enfoque metodológico

El análisis técnico-financiero de la implementación del sistema de monitoreo del filtro HEPA se plantea como una evaluación integral de su viabilidad y retorno económico. Este enfoque se fundamenta en el hecho de que el sistema de ventilación del laboratorio de medicina de alta complejidad del Hospital de las Mujeres Dr. Adolfo Carit Eva es relativamente reciente (inaugurado en 2019), por lo que no se dispone de registros históricos de mantenimiento correctivo ni de datos que se relacionan con el desempeño en condiciones operativas reales. Tampoco se cuenta con facturas que documenten el costo individual de los filtros reemplazados ni con comprobantes que indiquen con exactitud cuándo se realizaron los mantenimientos, ni su frecuencia. Esta situación se mantuvo así hasta la llegada del encargado actual, Daniel Abarca, ocupante del puesto *coordinador de electromecánica UMRAC*, quien a partir de diciembre de 2024 ha comenzado a sistematizar los registros de reemplazo de filtros, costos asociados y observaciones técnicas, marcando un cambio en la trazabilidad y el control del sistema de ventilación.

De acuerdo con las entrevistas realizadas al personal del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del hospital, en especial a Daniel Abarca, en la actualidad no se realiza ningún tipo de registro estructurado de la vida útil efectiva de los filtros, de las mediciones de presión diferencial, ni de eventos que indiquen saturación o deterioro del sistema de filtración. No se miden variables clave como el diferencial de presión, la velocidad del aire o la caída de flujo en los filtros HEPA. Por lo tanto, no existe ninguna evidencia técnica que respalde si los filtros HEPA continúan operando correctamente o si están próximos a alcanzar su vida útil. Aunque las condiciones del laboratorio se mantienen estables en cuanto a temperatura, COV, humedad y esterilidad, no se conoce con certeza si el desempeño de los filtros HEPA se conserva en rangos óptimos más allá de una estimación conservadora basada en el calendario.

Es decir, el enfoque de mantenimiento aplicado hasta ahora ha sido completamente basado en tiempo, en el cual todos los filtros (lo que incluye los de tipo HEPA, MERV-13 y de permanganato de potasio) se sustituyen anualmente. Esta práctica, aunque cumple con los requerimientos mínimos normativos ANSI/Ashrae 170-2021 y ANSI/Ashrae 62.1-2013, presenta ineficiencias desde el punto de vista técnico y económico, ya que no considera la condición real del filtro ni la variabilidad de la carga de partículas, lo que puede extender su vida útil de manera significativa con ciertas condiciones ambientales.

El sistema de monitoreo propuesto en el Capítulo 3.3. busca modificar dicho paradigma mediante la presentación de un modelo de mantenimiento basado en condición, en el cual el reemplazo de los filtros HEPA solo se realiza cuando la variable monitoreada, en este caso, el diferencial de presión alcanza un umbral en el que el filtro sigue funcionando en óptimas condiciones, de manera que, no comprometan las condiciones y procesos médicos realizados en el laboratorio. Sin embargo, se puede considerar un umbral para extender la vida útil que actualmente tienen estos filtros, por ejemplo, los 400 pascales (Pa) (en el apartado 3.3. se explica la selección de este umbral). Con esta estrategia, se prevé extender la vida útil efectiva del filtro HEPA más allá del ciclo anual, lo que puede traducirse en una reducción significativa de los costos anuales sin comprometer la calidad del aire ni la seguridad del entorno hospitalario.

3.4.2. Costos de implementación del sistema de monitoreo con componentes industriales

3.4.2.1. Costos directos de implementación

Con el fin de garantizar la robustez, precisión y confiabilidad del sistema de monitoreo en un entorno clínico crítico como un laboratorio de fertilización in vitro, se propone sustituir los componentes del prototipo mencionados en la sección 2.2.3. por equipos de nivel industrial. Esta decisión responde a que los sensores y microcontroladores propuestos inicialmente (Arduino, sensores económicos) presentan limitaciones importantes en cuanto a durabilidad, inmunidad al ruido eléctrico y exactitud metrológica, y su uso se restringiría a la etapa de pruebas del prototipo. En su lugar, para una posible implementación real en el sistema de ventilación, se seleccionaron equipos ampliamente utilizados en instalaciones hospitalarias y laboratorios de alta sensibilidad, los cuales cumplen la misma función que el prototipo. Además, cabe destacar que, el equipo *Siemens LOGO! 8.4*, cuenta con puerto Ethernet integrado y permite la conexión a redes locales (LAN). Por lo tanto, el *Módulo de comunicación inalámbrica* ya no es un componente individual necesario.

Componente	Modelo / Marca	Costo (USD)	Costo (CRC)
Sensor de presión diferencial	Setra Model 267	644.79	341,738.70
Sensor de velocidad de aire	TSI 8455	850.95	451,003.50
PLC industrial	Siemens LOGO! 8.4	291.70	154,601.00
Pantalla HMI	Siemens KTP1200	1,844.07	977,357.10
Licencia Software	LOGO COMFORT V8 LICENCIA	77.86	39,464.39
Instalación y puesta en marcha	Cotización vía llamada comercial	1,500.00	770,000.00
Total		5,209.37	2,734,164.69

Tabla 3: desglose de inversión con componentes industriales, lo que incluye la instalación.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 detalla el costo estimado de implementación del sistema de monitoreo utilizando componentes de nivel industrial. Incluye el precio unitario, la cantidad requerida y el costo total por ítem, lo que permite calcular la inversión inicial. Esta información constituye la base para el análisis técnico-financiero posterior, que evalúa la viabilidad del proyecto mediante el cálculo del costo anual uniforme equivalente (CAUE).

A esta inversión se le adiciona un costo estimado de mantenimiento anual de ₡50,000.00, que contempla calibraciones técnicas periódicas, limpieza de sensores, revisión de conexiones industriales y soporte especializado. El precio se consultó a empresas comerciales del país.

Cabe destacar que las fichas técnicas revisadas para estos componentes no especifican una vida útil exacta en años, pero incluyen referencias a la estabilidad operativa a largo plazo, a materiales resistentes (acero inoxidable, policarbonato y cerámica) y al uso en entornos industriales exigentes. Esto se debe a que este tipo de dispositivos suele emplearse bajo normativas de mantenimiento preventivo, y considerando el uso proyectado en un ambiente hospitalario estable, se estima una vida útil conservadora de 5 años. Esta estimación permite evaluar financieramente el sistema desde un enfoque prudente, lo que evita la sobreestimación de beneficios.

3.4.2.2. Costos indirectos de implementación

Más allá de los costos directos asociados a sensores, módulos lógicos, cableado y programación, debe considerarse una categoría crítica que muchas veces se ignora al analizar los sistemas de soporte en los que están

involucrados terceros: los costos indirectos derivados de una falla técnica no detectada que afecta a pacientes o embriones en desarrollo.

En este entorno clínico de alta complejidad, una falla en la calidad del aire provocada por un filtro HEPA saturado que supere su límite técnico sin advertencia puede tener consecuencias irreversibles. Tal como se señala en el planteamiento del problema, la confiabilidad de los parámetros ambientales debe mantenerse en un 100 %, y la falta de conocimiento o monitoreo abre la puerta a la proliferación de microorganismos o contaminantes que pueden comprometer directamente la salud del paciente y del personal médico (Mortimer et al., 2018).

Debido a que el laboratorio de reproducción asistida alberga embriones en fases críticas de desarrollo, cualquier alteración en variables como la presión, la temperatura o la concentración de compuestos orgánicos volátiles puede interrumpir la maduración celular, provocar daño genético o causar directamente la pérdida de viabilidad embrionaria (Llerena-Cano, 2011). Estas consecuencias, más allá de lo clínico, representan un riesgo ético, médico y económico de magnitud incalculable.

La pérdida de un embrión en el proceso de fertilización in vitro no solo tiene un impacto emocional profundo para la pareja receptora, sino que también puede traducirse en demandas judiciales, costos reputacionales para la institución y gastos legales, especialmente si se demuestra que el hecho pudo haberse evitado mediante una vigilancia técnica adecuada.

El alto costo económico de un ciclo de FIV agrava esta situación. Una falla ambiental que obligue a cancelar un ciclo representa la pérdida de años de planificación médica, lo que supera los costos materiales. Por lo tanto, se puede afirmar que la vida humana o potencial humana (el embrión) no tiene un valor económico cuantificable.

Desde una perspectiva financiera, los efectos de no contar con registros y alertas oportunas pueden traducirse en:

- Costos legales derivados de litigios por negligencia médica.
- Indemnizaciones por daños a la salud reproductiva de los pacientes.
- Repetición obligatoria de ciclos de FIV a cargo del centro clínico.
- Pérdida de confianza institucional con impacto en la reputación.
- Costos administrativos derivados de auditorías, peritajes y procesos disciplinarios.

Tal como se discute en el apartado de administración del riesgo, la inexistencia de sistemas de registro continuo impide demostrar el cumplimiento de los parámetros ambientales ante un evento adverso, debido a que la calidad del entorno no puede ser validada retroactivamente sin un historial documentado. Esta limitación expone legalmente al hospital a posibles demandas por negligencia técnica.

Además, como advierten Fong-Silva et al. (2020), una ventilación inadecuada puede favorecer la acumulación de aerosoles con carga viral, lo que incrementa el riesgo de infecciones o complicaciones en zonas críticas como quirófanos o laboratorios de FIV. Este tipo de eventos, que pueden parecer aislados, generan consecuencias acumulativas difíciles de cuantificar.

A nivel macroeconómico, Collazo Herrera and Chaviano Pedroso (2021) destacan que los costos indirectos desempeñan un papel primordial en la evaluación económica en salud, al reflejar pérdidas derivadas de una salud deficiente, incluso cuando no se traducen en costos inmediatos. En este contexto, la omisión de un monitoreo adecuado puede generar consecuencias estructurales y sociales que trascienden el plano clínico.

Asimismo, según estimaciones de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), el costo por intento y técnicas de fertilización in vitro puede alcanzar los 15,500.00 CRC, equivalentes a aproximadamente a 26,819.00 USD, al tipo de cambio vigente (Semanao Universidad, 2019). Estos valores no contemplan los gastos adicionales derivados de cancelaciones, repeticiones de ciclos o pérdidas legales ocasionadas por fallos evitables, lo que incrementa de manera significativa el impacto económico global de la omisión.

3.4.3. Cálculo del costo anual uniforme equivalente (CAUE) con equipos industriales

Para el cálculo de CAUE, la tasa de interés que se seleccionó corresponde a la tasa de política monetaria vigente en Costa Rica en mayo de 2025, la cual se mantiene en un 4 % desde octubre de 2024, según datos reportados por FocusEconomics (FocusEconomics, 2024). Esta tasa es una referencia comúnmente empleada para análisis técnico-financieros de inversiones públicas y privadas en el país.

Por otro lado, la vida útil considerada para los equipos industriales es de 5 años. Si bien las fichas técnicas de los sensores, pantallas y controladores industriales consultados no especifican una duración operativa definida, se adopta esta estimación como un valor conservador que garantiza una proyección responsable, sin sobrestimar los beneficios económicos. Esta suposición también considera factores como el entorno hospitalario exigente, las posibles obsolescencias tecnológicas y el desgaste asociado al uso continuo.

Cabe destacar que el precio de instalación y puesta en marcha fue cotizado mediante llamada telefónica con una empresa comercial del país, con un monto total de \$1,500.00 USD. Este valor se incluye como parte de la inversión inicial del proyecto.

La fórmula de CAUE utilizada es la siguiente:

$$CAUE = I \cdot \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) + C_m \quad (5)$$

Donde:

- $I = 2,734,164,69$ CRC (inversión inicial incluyendo instalación),
- $i = 0,04$ (tasa de interés anual estimada),
- $n = 5,00$ (vida útil estimada),
- $C_m = 50,000,00$ CRC (mantenimiento anual).

Cálculo del factor de capitalización:

$$\left(\frac{0,04(1+0,04)^5}{(1+0,04)^5 - 1} \right) = 0,2246271135 \approx 0,23$$

Entonces:

$$CAUE(\text{CRC}) = 2,734,164.69 \cdot 0,23 + 50,000.00 = 628,857.88 + 50,000.00 = \boxed{678,857.88 \text{ CRC anuales}}$$

3.4.4. Análisis comparativo y beneficio económico actualizado

El escenario de gasto actual, con base en el reemplazo preventivo anual del filtro HEPA, representa un desembolso fijo de ₡4,457,360.00 por año. Sin embargo, como se ha documentó en las entrevistas técnicas con el

encargado de mantenimiento, Daniel Abarca, no se han observado fallos funcionales ni signos de saturación en los filtros en el momento de su sustitución. Esta evidencia empírica permite inferir que los filtros operan por debajo de su límite técnico tras 12 meses de uso, lo cual justifica la proyección de una extensión conservadora de la vida útil efectiva hasta 18 meses. Es decir, un 50 % adicional de duración, sin comprometer las condiciones críticas de operación del sistema de ventilación.

La implementación del sistema permite espaciar el reemplazo a un ciclo de 1.5 años, lo que equivale a un gasto promedio anual ajustado de:

$$\frac{2}{3} \cdot 4,457,360,00 = 2,971,573,33 \text{ CRC}$$

El ahorro bruto sería:

$$4,457,360,00 - 2,971,573,33 = 1,485,786,67 \text{ CRC}$$

El ahorro neto, considerando el nuevo CAUE actualizado con los costos de instalación, sería:

$$1,485,786,67 - 678,857,88 = \boxed{806,928,79 \text{ CRC anuales}}$$

Este ahorro representa una disminución del 54.82 % respecto al gasto original y permite recuperar la inversión en un plazo aproximado de 3.4 años, con beneficios económicos acumulativos durante toda la vida útil del sistema. Cabe destacar que el análisis se basa en supuestos conservadores, por lo que los resultados pueden ser aún más favorables si se optimizan los ciclos de mantenimiento o si los equipos logran superar los 5 años de funcionamiento estimados. Además del retorno financiero directo, deben considerarse los costos indirectos asociados a una falla técnica en entornos clínicos críticos, los cuales no pueden monetizarse fácilmente, pero representan riesgos significativos en términos de responsabilidad médica, reputación institucional y consecuencias éticas irreversibles.

3.4.5. Propuesta de fases de implementación, capacitación y seguimiento del cambio

Debido al carácter crítico del entorno clínico en el que se propone implementar el sistema de monitoreo, se recomienda estructurar el proceso de adopción en tres fases estratégicas: implementación técnica, capacitación del personal y seguimiento posimplementación. Esta propuesta busca asegurar una transición ordenada desde un esquema de mantenimiento preventivo fijo hacia un enfoque basado en condición, lo que reduce las resistencias internas, errores operativos o fallos de integración.

3.4.5.1. Fase 1: implementación técnica y validación en sitio

Esta primera fase contempla la adquirir componentes industriales según lo descrito en el apartado 3.4.2.1, así como su instalación física y conexión al sistema de ventilación del edificio. El proceso debe incluir:

- Instalación de sensores de presión diferencial y de velocidad de aire en los puntos críticos del sistema de filtración.
- Configuración inicial del PLC y HMI industrial, asegurando su integración con la infraestructura eléctrica existente.

- Validación del sistema en condiciones controladas, mediante simulaciones de escenarios de falla y verificación de los umbrales de alarma.
- Se realizan pruebas funcionales con monitoreo en tiempo real, validando la exactitud de los datos y la confiabilidad del sistema.

Esta fase debe llevarse a cabo en coordinación con el personal de mantenimiento del hospital y proveedores técnicos externos. Además, debe realizarse con una bitácora técnica de instalación que registre la configuración de parámetros, las pruebas de comunicación y el comportamiento esperado.

3.4.5.2. Fase 2: capacitación operativa y documentación técnica

Una vez validado el sistema, se debe proceder a una etapa de formación dirigida al personal que está a cargo de la operación y mantenimiento del sistema. Esta capacitación debe incluir:

- Funcionamiento general del sistema de monitoreo basado en condición.
- Lectura e interpretación de los valores mostrados en la pantalla HMI.
- Manejo de alarmas visuales y sonoras, así como las acciones que se recomiendan ante eventos.
- Procedimientos para exportar reportes y consultar el historial del sistema.
- Buenas prácticas para el mantenimiento preventivo del sistema de monitoreo.

Adicionalmente, se debe solicitar un manual técnico a la empresa encargada de la instalación y programación del equipo, el cual debe contener diagramas de conexión, la estructura del código, los parámetros configurados, los procedimientos de reinicio y las soluciones para errores comunes.

3.4.5.3. Fase 3: seguimiento, evaluación del cambio y mejora continua

Después de la puesta en marcha y de la capacitación, se recomienda establecer un plan de seguimiento durante los primeros 6 meses de operación. Esta fase debe considerar:

- Revisión mensual del comportamiento del sistema, validando la coherencia entre los registros y las condiciones físicas del filtro.
- Se realizan entrevistas semiestructuradas con el personal usuario para identificar dificultades, observaciones y propuestas de mejora.
- Ajustes en los umbrales de alarma o parámetros del modelo, de acuerdo con el comportamiento real del sistema.
- Evaluación del impacto en los costos de mantenimiento, ciclos de vida del filtro HEPA y tiempo de inactividad.

En esta etapa también se debe identificar oportunidades de escalabilidad, como el monitoreo remoto a través de una red local con dispositivos portátiles. Este enfoque permite una evolución progresiva hacia un esquema más robusto de mantenimiento predictivo en el entorno clínico.

4. Conclusiones

- El análisis de criticidad y el Amfec aplicado al sistema de ventilación del laboratorio de medicina de alta complejidad permitió identificar los componentes más sensibles al fallo, como los filtros HEPA y las lámparas UV. Esto permitió priorizar las variables clave para el monitoreo y sustentar técnicamente la necesidad de un sistema de supervisión continua en las áreas críticas del hospital.
- Se diseñó un sistema de monitoreo en tiempo real funcional, utilizando sensores de presión diferencial y velocidad del aire integrados en una propuesta de prototipo de plataforma Arduino. El sistema incluyó visualización gráfica, alarmas de riesgo y registro de datos, cumpliendo con los requisitos de monitoreo y mostrando viabilidad como herramienta de mantenimiento predictivo.
- Se desarrolló un modelo de simulación en Python capaz de predecir la vida útil remanente de los filtros HEPA mediante el análisis del comportamiento del diferencial de presión. A pesar de tratarse de un entorno simulado, el modelo demostró ser útil para la toma de decisiones de mantenimiento basadas en condición, reduciendo la dependencia de reemplazos calendarizados.
- El análisis técnico-financiero, basado en el indicador CAUE, evidenció que implementar el sistema propuesto permite generar ahorros de hasta un 54.82 % respecto al modelo de mantenimiento actual. Además del retorno económico estimado a mediano plazo, el sistema representa una inversión estratégica que resguarda la integridad de procesos clínicos delicados, cuyo valor humano y ético trasciende cualquier estimación monetaria.

5. Recomendaciones

- Para futuras implementaciones, se recomienda sustituir los sensores del prototipo por equipos industriales certificados de presión diferencial y velocidad de aire, que ofrezcan mayor precisión, estabilidad, durabilidad y cumplimiento normativo en entornos hospitalarios.
- Se sugiere ampliar el alcance del sistema de monitoreo para incluir variables adicionales como temperatura, concentración de COV, humedad relativa y estado de lámparas UV, de acuerdo con las prioridades que se identificaron en el análisis Amfec y los requerimientos ambientales del laboratorio.
- Se recomienda que la interfaz del sistema evolucione hacia una plataforma web o aplicación móvil, lo que permite el acceso remoto a los datos, la visualización de tendencias, la consulta de alarmas y la generación de reportes por parte del personal de mantenimiento o de gestión de calidad.
- Para proteger la integridad física de los sensores y conexiones, se recomienda que las tareas de mantenimiento que impliquen la manipulación de ductos o de la unidad manejadora de aire se realicen con extrema precaución y siguiendo protocolos específicos si el sistema de monitoreo ya está instalado.
- Es indispensable establecer un sistema digital de gestión de mantenimiento que registre todas las intervenciones, tanto correctivas como preventivas, mediante órdenes de trabajo electrónicas. Esto facilita la trazabilidad de fallas, la planificación predictiva y la toma de decisiones basada en datos históricos.
- El modelo de simulación para estimar la vida útil remanente puede perfeccionarse mediante técnicas de aprendizaje automático (machine learning), regresión polinómica o modelos estadísticos multivariantes. Lo anterior tiene el fin de reducir el error y ajustar las predicciones al comportamiento real observado en condiciones de operación.
- Toda evaluación técnica-financiera de sistemas que afectan directamente a la salud humana debe contemplar el costo indirecto incalculable asociado a su omisión, en especial cuando se trata de tecnologías aplicadas a la preservación de la vida o la integridad reproductiva. Aunque este valor no pueda ser estimado monetariamente, debe estar presente como criterio ético y estratégico en la toma de decisiones institucionales.
- Se recomienda que la transición hacia un modelo de mantenimiento basado en condición sea acompañada de un proceso estructurado de gestión del cambio, que contemple mecanismos de retroalimentación y apoyo continuo al personal técnico. Esto permite minimizar errores operativos, facilitar la adaptación progresiva al nuevo sistema y fortalecer la confianza institucional en su funcionamiento. Además, debe reconocerse que ciertos beneficios indirectos, como la prevención de daños clínicos o la pérdida de embriones en procesos de

fertilización in vitro no puede ser monetizada directamente, pero resulta fundamental para evaluar el impacto real y ético del sistema implementado.

6. Bibliografía

- Airtecnicos (2021). Filtros hepa: qué son y cómo funcionan. Consultado el 9 de mayo de 2025.
- Alvarado, A. A. A. (2020). Diseño de un sistema experto para el monitoreo y alerta de modos de falla para el sistema de bombeo de agua potable en el tecnológico de costa rica.
- ASHRAE (2013). *Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado para hospitales y clínicas*. ASHRAE, Atlanta, GA, segunda edición edition. Traducido por ATEAAR con autorización de ASHRAE.
- Bagnarello González, F. (2015). Fertilización in vitro: conceptualización. *Revista de Ginecología y Obstetricia*, pages 205–214.
- Bestratén Belloví, M. and Orriols Ramos, R. M. (2006). Ntp 679: Análisis modal de fallos y efectos (amfe). Technical report, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), Barcelona, España. Actualizada, Sustituye a la NTP 368.
- Blank, L. T. and Tarquin, A. J. (2018). *Engineering Economy*. McGraw-Hill Education, 8th edition.
- Buendía, L. H. P. (2023). Sistema de monitoreo y registro en tiempo real de la humedad relativa y temperatura en el cuarto húmedo del centro de investigaciones en vivienda y construcción.
- Camfil (2019). Slimline dcm-fd. Riverdale, New Jersey: Camfil.
- Carrasco, F. J. C., Carrión, J. G., and Guillamón, M. P. (2016). Elementos del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial. final.
- CCSS (2020). *Manual de procedimientos de la Unidad de Medicina Reproductiva de Alta Complejidad en la red de servicios de salud de la CCSS (UMRAC)*. Fecha de emisión: Febrero 2020.
- Collazo Herrera, M. and Chaviano Pedroso, I. (2021). Los costos indirectos en la evaluación económica de salud. *Información para Directivos de la Salud*, 36(Sep-Dic):e1087.
- Cumbe, C. F. G. (2021). Diseño de un modelo de gestión de mantenimiento basado en condición para la empresa proveedora de servicios de internet (isp) mundo wireless del cantón cuenca.
- FocusEconomics (2024). Costa rica interest rate. Recuperado el 19 de mayo de 2025.
- Fong-Silva, W., Severiche-Sierra, C., and Fong-Amarís, W. (2020). Sistemas de acondicionamiento de aire y ventilación como foco infeccioso de sars cov-2 en hospitales, clínicas e instituciones de salud. *IPSA Scientia, revista científica multidisciplinaria*, 5(1):28–35.

- Garrido, S. G. (2014). *Ingeniería de mantenimiento: Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento industrial*. Renovetec.
- Gutiérrez Pulido, H. and de la Vara Salazar, R. (2009). *Control estadístico de calidad y Seis Sigma*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., México, D.F., segunda edición edition.
- Huamani, L. and Rodolfo., J. (2018). Diagnóstico de fallos y costos evitados mediante técnicas de mantenimiento predictivo bajo la norma iso 17359 aplicado en molinos sag 36 ft x 26.6 ft de minera hudbay peru sac.
- Iglesias, R., Peña, R. E. R., and Rene, P. (2020). Gestión de la información para la elaboración de un plan de mantenimiento basado en condición con monitoreo en línea de la maquinaria del área de vulcanización tt (truck tires) en continental tire andina sa (2019).
- Institute of Environmental Sciences and Technology (2005). Iest-rp-cc001.4 hepa and ulpa filters. Technical report, Contamination Control Division Recommended Practice 001.4.
- Lema, S. R. (2019). Implementación de análisis modal de fallos y efectos (amfe). *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 8(1):64–75.
- Llerena-Cano, G. (2011). Retrospectiva de la tecnología de laboratorio en reproducción asistida. *Revista Peruana de Ginecología y Obstetricia*, 57:8–12.
- Montero, J. J. and Vingerhoeds, R. (2019). A system engineering approach to predictive maintenance systems: From needs and desires to logical architecture. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pages 1–9. IEEE.
- Moore, J. K., Ostan, T. W., Li, L., Bahm, J. L., Fikany, P. J., Mockeridge, T. J., Stenson, D. P., and McCormick, S. J. (2014). Methods for determining a remaining useful life of an air filter.
- Mortimer, D., Cohen, J., Mortimer, S. T., Fawzy, M., McCulloh, D. H., Morbeck, D. E., Pollet-Villard, X., Mansour, R. T., Brison, D. R., Doshi, A., Harper, J. C., Swain, J. E., and Gilligan, A. V. (2018). Cairo consensus on the ivf laboratory environment and air quality: report of an expert meeting. *Reproductive Biomedicine Online*, 36(6):658–674.
- Moubray, J. (2001). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad*. Industrial Press Inc., New York, Estados Unidos, segunda edición edition.
- Méndez, J. Q. and Castillo, S. O. (2011). Implementación de un mantenimiento basado en la condición usando modelado y simulación: caso de estudio de un motor sincrónico de imanes permanentes.
- National Air Filtration Association (2017). *Understanding MERV: ASHRAE Standard 52.2*. NAFA.
- National Environmental Balancing Bureau (1998). *Study Course for Certified Testing of Cleanrooms*. NEBB.
- Palau, S. . (2021). Ventilación en instalaciones del sector salud. Consultado el 8 de mayo de 2025.
- Pei, C., Chen, W., Ou, Q., and Pui, D. Y. H. (2023). Smart filter performance monitoring system. *Aerosol and Air Quality Research*, 23(4):220416. Open Access under CC BY 4.0.

- Progressa Lean (2024). Amfe: Análisis modal de fallos y efectos. Consultado el 25 de abril de 2025.
- Pulido, H. G. and de la Vara Salazar, R. (2009). *Control estadístico de calidad y Seis Sigma*. McGraw-Hill/Interamericana de México, México, D.F., segunda edición edition.
- Quiroz, B. R. S. and Suárez, M. H. (2023). Análisis de la situación actual del mantenimiento en el sector automotriz.
- Salazar Duarte, C. (2022). Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real para el diagnóstico en la gestión del funcionamiento y mantenimiento de las estaciones de carga de automóviles eléctricos de la empresa jasec.
- Semanario Universidad (2019). Ccss inaugura centro para aplicación de fertilización in vitro. Consultado el 30 de mayo de 2025.
- Serra, F., Catuogno, G., Angelo, C. D., and Bossio, G. (2008). Sistemas de monitoreo de condición en turbinas eólicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12:06.57–06.63. ISSN 0329-5184.
- Tronville, P. (2009). Air filtration and efficiency: Air filters – energy rating and labelling. *Filtration+Separation*, pages 31–33.
- United States Environmental Protection Agency (1991). Epa-cica fact sheet: Fabric filter - hepa and ulpa type. EPA-452/F-03-023.
- Valverde-Vega, J. and Gómez-Gutiérrez, L. (2015). Situación del mantenimiento industrial en las empresas de costa rica. Informe o documento, sin detalles de publicación específicos.
- Wang, S. K. (2001). *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. McGraw-Hill, New York, 2 edition.





7. Apéndices

A. Equipos y sensores necesarios para prototipo del sistema de monitoreo

Parámetro	Equipo	Aplicación	Cantidad	Fotografía	Costo unitario (USD)	Precio total
Presión diferencial	SDP3x	Medir presión en filtro HEPA	1		\$34,00	\$34,00
Velocidad del aire	FS3000-1005	Medir velocidad del aire en ducto	1		\$20,00	\$20,00
Microcontrolador	Arduino Mega 2560 R3	Conexión entre sensores y sistema de adquisición	1		\$50,00	\$50,00
Módulo WiFi	ESP32-DevKitC-S1	Enviar datos al sistema de análisis	1		\$12,00	\$12,00
Materiales menores	Protoboard, cables, conectores	Ensamblaje de circuito básico	1		\$24,00	\$24,00
Software	Python (código abierto)	Desarrollo del sistema de monitoreo	1	–	\$0,00	\$0,00
Totales			6		\$140,00	\$140,00

Fuente: Elaboración propia

B. Equipos y sensores necesarios para posible implementación del sistema de monitoreo

Parámetro	Equipo	Aplicación	Cantidad	Fotografía	Costo unitario (USD)	Precio total
Presión diferencial	Setra Model 267	Medir presión en filtro HEPA	1		\$644.79	\$644.79
Velocidad del aire	TSI 8455	Medir velocidad del aire en ducto	1		\$850.95	\$850.95
PLC	Siemens LOGO!	Conexión entre sensores y sistema de adquisición	1		\$291.70	\$291.70
Pantalla HMI	Siemens KTP1200	Visualización	1		\$1,844.07.00	\$1,844.07.00
Software	LOGO! Soft Comfort	Desarrollo del sistema de monitoreo	1		\$77.86	\$77.86
Totales			5		\$3,709.37	\$3,709.37

Fuente: Elaboración propia

C. AMFE del proceso de sistema de ventilación edificio de reproducción asistida del Hospital Adolf Carit Eva.

Función o Componente del Servicio	Equipo	Modo de Fallo	Efecto	Causas	Método de detección	0 reparado	0 reparado	0 reparado	NPR Número de prioridad de riesgo	Responsable	Acción Tomada	
1	1	Unidad manejadora modular	1	Lampara UV apagada / parpadeante	Pérdida de irradiación, paso de aire sin tratamiento, posible alarma en edificio	Falta eléctrica, falta mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	3	5	120	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
			2	Filtro MERV-13 con fisuras o agrietamiento del marco / aumento de presión de aire	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente, falta mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	1	6	48	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
			3	Sobrecalentamiento de ventiladores 1, presión de salida es menor a la necesaria	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento en filtro MERV-13, exceso de partículas adheridas al filtro (colmatación) en filtro MERV-13	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	5	70	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
			4	Filtro pergamangano de potasio con fisuras o agrietamiento del marco / aumento de presión de aire	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente o falta mantenimiento de filtro de pergamangano de potasio	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	1	6	48	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
			5	Sobrecalentamiento de ventiladores 2, presión de salida es menor a la necesaria	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento o exceso de partículas adheridas al filtro (colmatación) de pergamangano de potasio	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	5	70	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
	2	Dampers	6	Bloqueo de mecanismo de accionamiento de dampers trabados	No se logra impedir o regular el paso de aire, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	8	2	3	48	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
	3	Ventiladores	7	Desbalance mecánico de ventilador	No se logra proyectar el aire con la presión requerida, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento de contaminantes adheridos al ventilador	Alarma en zona afectada o inspección visual	7	2	3	42	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
	8		Vibración excesiva	Puede dañar otros componentes del sistema, posible alarma en edificio	Falta de mantenimiento	Alarma en zona afectada o inspección visual	6	2	3	36	Mantenimiento preventivo cada 12 meses	
	4	Filtro HEPA	9	Filtro HEPA con fisuras o agrietamiento del marco / Presión de salida mayor a la necesaria	Paso de aire sin tratamiento, aumento de presión innecesario, saturación de otros filtros, posible alarma en edificio	Instalación deficiente o falta mantenimiento de filtro HEPA	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	7	63	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
	10		Sobrecalentamiento de ventiladores 3, presión de salida es menor a la necesaria	Sobrecarga de ventilador, pérdida presión, posible alarma en edificio	Falta mantenimiento o exceso de partículas adheridas al filtro HEPA	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	2	8	144	Mantenimiento preventivo cada 12 meses	
	5	Ductos	11	Pérdida de presión en la salida	Inestabilidad en las condiciones requeridas del aire, posible alarma en edificio	Rotura debido a vibraciones, desajuste o falla en sujeciones	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	7	63	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
	6	Bomba de agua helada	12	Bomba no enciende o se apaga	No circula el agua helada, pérdida de capacidad de enfriamiento, posible alarma en edificio	Falta eléctrica, falta de mantenimiento desgaste de componentes	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	1	2	18	Mantenimiento preventivo cada 12 meses
			13	Fuga de agua en la bomba o conexiones como serpentina	Pérdida de fluido, baja presión y riesgo de daño a componentes y contaminación de aire, posible alarma en edificio	Deterioro de sellos, vibración, corrosión	Alarma en zona afectada o inspección visual	9	2	2	36	Mantenimiento preventivo cada 12 meses

Fuente: Elaboración propia

D. Código de programación completo.

```
import random
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.animation import FuncAnimation
from matplotlib.widgets import Button
import time
from datetime import datetime
import platform
import threading
import os
import glob

if platform.system() == 'Windows':
    import winsound

def reproducir_alarma(frecuencia=1000, duracion=5000):
    if platform.system() == 'Windows':
        def sonar():
            winsound.Beep(frecuencia, duracion)
            threading.Thread(target=sonar, daemon=True).start()

def generar_nombre_datos_filtro(base="datos_filtro_estructurado", extension=".xlsx"):
    contador = 1
    while True:
        nombre_archivo = f"{base}{contador}{extension}"
        if not os.path.exists(nombre_archivo):
            return nombre_archivo
        contador += 1

tiempo_inicio_real = time.time()

def leer_presion():
    global presion, presion_manual, filtro_desprendido

    if filtro_desprendido:
        return 0.0

    variacion = random.uniform(0.0, 0.6)

    presion += variacion + presion_manual
    presion_manual = 0.0
    presion = max(0, min(presion, presion_maxima))
    return round(presion, 2)

def leer_velocidad():
    global velocidad_aire, velocidad_manual
    velocidad_aire += velocidad_manual
    velocidad_manual = 0.0
    velocidad_aire = max(0.0, round(velocidad_aire, 2))
    return velocidad_aire

def calcular_vida_util_remanente(presion_actual):
    try:
        archivos = glob.glob("datos_filtro_estructurado*.xlsx")
        semanas_estimadas = []

        for archivo in archivos:
            try:
                # Leer aumento promedio desde D2
                aumento_promedio = pd.read_excel(archivo, header=None, engine='openpyxl').iloc[1, 3]

                if pd.isna(aumento_promedio) or aumento_promedio <= 0.1:
                    continue # ignorar valores irrelevantes

                semanas = (400 - presion_actual) / aumento_promedio
                if semanas >= 0:
                    semanas_estimadas.append(semanas)

            except:
                continue

        if not semanas_estimadas:
            return " Vida útil remanente: No disponible"

        promedio = sum(semanas_estimadas) / len(semanas_estimadas)
        return f" Vida útil remanente estimada: {int(round(promedio))} semanas (basado en {len(semanas_estimadas)} filtros)"
    except:
        return " Vida útil remanente: Error"
```

Fuente: Elaboración propia

```

def guardar_datos_filtro_excel():
    if len(datos) == 0:
        return
    df = pd.DataFrame(datos)
    nombre_final = generar_nombre_datos_filtro()

    # Calcular aumento promedio (Pa por semana), ignorando semanas con presión 0
    try:
        df_filtrado = df[df["Diferencial de Presión"] > 0]
        if len(df_filtrado) < 2:
            aumento_promedio = 0
        else:
            presion_inicial = df_filtrado["Diferencial de Presión"].iloc[0]
            presion_final = df_filtrado["Diferencial de Presión"].iloc[-1]

            semana_inicial = df_filtrado["Semana"].iloc[0]
            semana_final = df_filtrado["Semana"].iloc[-1]
            semanas_totales = semana_final - semana_inicial
            if semanas_totales <= 0:
                aumento_promedio = 0
            else:
                aumento_promedio = (presion_final - presion_inicial) / semanas_totales
    except:
        aumento_promedio = 0

    with pd.ExcelWriter(nombre_final, engine='openpyxl') as writer:
        df.to_excel(writer, index=False, sheet_name='Simulación')
        worksheet = writer.sheets['Simulación']
        # Guardar en celda D2 el aumento promedio
        worksheet.cell(row=2, column=4, value=aumento_promedio)

# Parámetros
presion_inicial = 200.0
presion_maxima = 500.0
presion = presion_inicial
datos = []
historial_presion = []
velocidad_aire = 1.5
velocidad_manual = 0.0
velocidad_referencia = 1.5

# Variables
dia_actual = 0
simulacion_activa = True
presion_manual = 0.0
presion_anterior = presion_inicial
alarma_activa = False
tiempo_alarma_inicio = None
mensaje_alarma = ""
tiempo_alarma_duracion = 10
sonido_reproducido = False
sonido_urgente_reproducido = False
sonido_desprendimiento_reproducido = False
filtro_desprendido = False
pausada = False

# Control de semanas
tiempo_inicio_simulacion = time.time()
ultima_semana_guardada = 0

# Gráfica
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(11, 5), gridspec_kw={'width_ratios': [4, 1]})
plt.subplots_adjust(wspace=0.5, bottom=0.3)

def actualizar(frame):
    ignorar_por_velocidad = False
    global dia_actual, presion_anterior
    global alarma_activa, tiempo_alarma_inicio, mensaje_alarma
    global sonido_reproducido, sonido_urgente_reproducido, sonido_desprendimiento_reproducido
    global presion, simulacion_activa, ultima_semana_guardada

    if not simulacion_activa:
        return

```

Fuente: Elaboración propia

```

dia_actual += 1
presion_actual = leer_presion()
historial_presion.append(presion_actual)
delta_presion = presion_actual - presion_anterior

if delta_presion <= -5:
    alarma_activa = True
    tiempo_alarma_inicio = time.time()
    mensaje_alarma = f"Caída de presión repentina\nRevisar filtro\n(datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S'))"
    sonido_reproducido = False

presion_anterior = presion_actual

if presion_actual < 200:
    estado = " Filtro desprendido"
    color_estado = 'red'
    mensaje_estado = " Posible desprendimiento del filtro\nCambiar filtro inmediatamente"
    if not sonido_desprendimiento_reproducido:
        reproducir_alarma(frecuencia=1500, duracion=5000)
        sonido_desprendimiento_reproducido = True
elif presion_actual >= 400:
    estado = " Reemplazo urgente"
    color_estado = 'red'
    mensaje_estado = ";CAMBIO URGENTE DEL FILTRO!"
    simulacion_activa = False
    if not sonido_urgente_reproducido:
        reproducir_alarma(frecuencia=1200, duracion=5000)
        sonido_urgente_reproducido = True
    guardar_datos_filtro_excel()
elif presion_actual >= 350:
    estado = " Cambio próximo"
    color_estado = 'orange'
    mensaje_estado = "Necesidad de cambio de filtro"
else:
    estado = " Operativo"
    color_estado = 'green'
    mensaje_estado = "El filtro está operativo"

if alarma_activa and not sonido_reproducido:
    reproducir_alarma(frecuencia=1000, duracion=5000)
    sonido_reproducido = True

velocidad_actual = leer_velocidad()

if abs(velocidad_actual - velocidad_referencia) > 1.5:
    texto_estimado = " Ignorar cálculo: variación de velocidad detectada"
else:
    velocidad_actual = leer_velocidad()
    ignorar_por_velocidad = abs(velocidad_actual - velocidad_referencia) > 1

    if ignorar_por_velocidad:
        texto_estimado = " Ignorar cálculo: variación de velocidad detectada"
    else:
        texto_estimado = calcular_vida_util_remanente(presion_actual)

tiempo_actual = time.time()
segundos_transcurridos = tiempo_actual - tiempo_inicio_simulacion
semana_actual = int(segundos_transcurridos // 7) + 1

if semana_actual > ultima_semana_guardada:
    datos.append({
        "Semana": semana_actual,
        "Diferencial de Presión": 0.0 if ignorar_por_velocidad else presion_actual,
        "Estado": "Ignorado por velocidad" if ignorar_por_velocidad else estado
    })
    ultima_semana_guardada = semana_actual

axl.cla()
axl.plot(range(1, len(historial_presion) + 1), historial_presion, marker='o', label="Presión (Pa)")
axl.axhline(y=400, color='r', linestyle='--', label="Límite Máximo (400 Pa)")
axl.axhline(y=350, color='orange', linestyle='--', label="Zona de advertencia (350 Pa)")
axl.set_xlabel("Día Simulado")
axl.set_ylabel("Diferencial de Presión (Pa)")
axl.set_title("Simulación día a día del diferencial de presión")
axl.legend(loc='upper left')

```

Fuente: Elaboración propia

```

ax2.cla()
ax2.axis("off")
ax2.text(0.5, 0.8, mensaje_estado, fontsize=14, color=color_estado, ha='center', va='center',
        bbox=dict(facecolor='white', edgecolor=color_estado, boxstyle='round,pad=1.0'))
if alarma_activa and time.time() - tiempo_alarma_inicio < tiempo_alarma_duracion:
    ax2.text(0.5, 0.2, mensaje_alarma, fontsize=12, color='darkred', ha='center', va='center',
            bbox=dict(facecolor='mistyrose', edgecolor='red', boxstyle='round,pad=1.0'))
elif alarma_activa:
    alarma_activa = False
ax2.text(0.5, 0.6, texto_estimado, fontsize=11, ha='center')
ax2.text(0.5, 0.45, f"Diferencial actual: {presion_actual:.2f} Pa", fontsize=12, ha='center')
ax2.text(0.5, 0.35, f"Velocidad del aire: {velocidad_actual:.2f} m/s", fontsize=12, ha='center')

def subir_presion(event):
    global presion_manual
    presion_manual += 5.0

def bajar_presion(event):
    global presion_manual
    presion_manual -= 5.0

def simular_desprendimiento(event):
    global filtro_desprendido
    filtro_desprendido = True

def aumentar_velocidad():
    global velocidad_manual
    velocidad_manual += 0.2

def disminuir_velocidad():
    global velocidad_manual
    velocidad_manual -= 0.2

def aplicar_cambio_filtro(event):
    global simulacion_activa
    if simulacion_activa:
        simulacion_activa = False
        guardar_datos_filtro_excel()
        print("Cambio de filtro aplicado. Datos guardados.")

def pausar_reanudar_simulacion(event):
    global simulacion_activa, pausada
    if simulacion_activa:
        simulacion_activa = False
        pausada = True
        boton_pausa.label.set_text("Reanudar simulación")
    else:
        simulacion_activa = True
        pausada = False
        boton_pausa.label.set_text("Pausar simulación")

def reiniciar_simulacion(event):
    global presion, dia_actual, datos, simulacion_activa, presion_manual, presion_anterior
    global alarma_activa, tiempo_alarma_inicio, mensaje_alarma
    global sonido_reproducido, sonido_urgente_reproducido, sonido_desprendimiento_reproducido
    global filtro_desprendido, tiempo_inicio_simulacion, ultima_semana_guardada, historial_presion

    presion = presion_inicial
    presion_anterior = presion_inicial
    dia_actual = 0
    datos.clear()
    historial_presion.clear()
    simulacion_activa = True
    presion_manual = 0.0
    alarma_activa = False
    tiempo_alarma_inicio = None
    mensaje_alarma = ""
    sonido_reproducido = False
    sonido_urgente_reproducido = False
    sonido_desprendimiento_reproducido = False
    filtro_desprendido = False
    tiempo_inicio_simulacion = time.time()
    ultima_semana_guardada = 0

# Botones
ax_boton_subir = plt.axes([0.05, 0.05, 0.15, 0.07])
boton_subir = Button(ax_boton_subir, '↑ Subir Presión', color='lightcoral')
boton_subir.on_clicked(subir_presion)

```

Fuente: Elaboración propia

```

# Botones
ax_boton_subir = plt.axes([0.05, 0.05, 0.15, 0.07])
boton_subir = Button(ax_boton_subir, '↑ Subir Presión', color='lightcoral')
boton_subir.on_clicked(subir_presion)

ax_boton_bajar = plt.axes([0.25, 0.05, 0.15, 0.07])
boton_bajar = Button(ax_boton_bajar, '↓ Bajar Presión', color='lightblue')
boton_bajar.on_clicked(bajar_presion)

ax_boton_desprendimiento = plt.axes([0.45, 0.05, 0.2, 0.07])
boton_desprendimiento = Button(ax_boton_desprendimiento, 'Desprendimiento del filtro', color='salmon')
boton_desprendimiento.on_clicked(simular_desprendimiento)

ax_boton_reset = plt.axes([0.7, 0.05, 0.2, 0.07])
boton_reset = Button(ax_boton_reset, 'Reiniciar Simulación', color='lightgreen')
boton_reset.on_clicked(reiniciar_simulacion)

ax_boton_pausa = plt.axes([0.05, 0.15, 0.25, 0.07])
boton_pausa = Button(ax_boton_pausa, "Pausar simulación", color='lightgray')
boton_pausa.on_clicked(pausar_reanudar_simulacion)

ax_boton_cambio = plt.axes([0.35, 0.15, 0.3, 0.07])
boton_cambio = Button(ax_boton_cambio, 'Aplicar cambio de filtro', color='gold')
boton_cambio.on_clicked(aplicar_cambio_filtro)

ax_boton_vel_subir = plt.axes([0.7, 0.15, 0.12, 0.07])
boton_vel_subir = Button(ax_boton_vel_subir, '↑ Velocidad', color='lightyellow')
boton_vel_subir.on_clicked(lambda event: aumentar_velocidad())

ax_boton_vel_bajar = plt.axes([0.85, 0.15, 0.12, 0.07])
boton_vel_bajar = Button(ax_boton_vel_bajar, '↓ Velocidad', color='khaki')
boton_vel_bajar.on_clicked(lambda event: disminuir_velocidad())

ani = FuncAnimation(fig, actualizar, interval=1000, cache_frame_data=False)
plt.show()

```

Fuente: Elaboración propia


8. Anexos

1. Cotización filtro HEPA.

RALEX			
DESCRIPCIÓN	COTIZACION	EQUIPO	MONTO
Filtro HEPA 56cmx117cm, 99.99% eficiencia, 0.3 micron/ Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00568	1327829	\$ 8 412,00
Filtro HEPA 56cmx117cm, 99.99% eficiencia, 0.3 micron/ Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00569	1327828	\$ 8 412,00
Filtro HEPA 56cmx117cm, 99.99% eficiencia, 0.3 micron/ Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00570	1327830	\$ 8 412,00
Filtro HEPA 56cmx117cm, 99.99% eficiencia, 0.3 micron/ Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00571	1327831	\$ 8 412,00
Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00572	1327833	\$ 512,00
Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00573	1327834	\$ 512,00
Breaker de dos polos de 25A/230VAC/ Breaker de 3A/230VAC para circuito de control	S00574	1327835	\$ 512,00
TOTAL			\$ 35 184,00

Fuente: RALEX

2. Precio Sensor digital de presión diferencial.

1		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	403-SDP37125PATR250 SDP37-125Pa-TR-250pcs Sensirion <input type="text" value="Ref. Cliente"/>	Sensores de presión montados en placa Analog Differential Pressure Sensor En conformidad con la RoHS QuickView	<input type="text" value="1"/>	1 Se envía ahora	€16 211	€16 211	
---	---	---	--	--	--------------------------------	------------------	---------	---------	---

Fuente: Mouser Electronics

2. Precio Sensor compacto de flujo de aire.

2		Mouser N.º: Fabricante N.º: Fabricante:: Ref. Cliente:	972-FS3000-1005 FS3000-1005**** Renesas Electronics <input type="text" value="Ref. Cliente"/>	Sensores de flujo FS3000 AIR VELOCITY FLOW MODULE, SURFACE MOUNT, En conformidad con la RoHS QuickView	<input type="text" value="1"/>	1 Se envía ahora	€9 692	€9 692	
---	---	---	--	--	--------------------------------	------------------	--------	--------	---

Fuente: Mouser Electronics

3. Precio Arduino Mega 2560.

Arduino Mega 2560 R3 [VERSION GENERICA]



Producto n°:	AD20475
Tu precio:	US\$34,95
No. de articulos en existencia:	0
Disponibilidad:	Solicitado

[Comprar](#)

Fuente: Micro JPM

4. Precio Módulo de comunicación inalámbrica.

	Mouser N.º:	356-ESP32-DEVKITC-S1	Herramientas de desarrollo WiFi - 802.11 ESP32 General Development Kit, ESP32-SOLO-1 on the board QuickView	<input type="text" value="1"/>	1 Se envía ahora	€5 800	€5 800	
	Fabricante N.º:	ESP32-DevKitC-S1						
	Fabricante::	Espressif						
	Ref. Cliente:	<input type="text" value="Ref. Cliente"/>						

Fuente: Mouser Electronics

5. Precio Setra Model 267.



Price:	644,79 US\$
Weight:	1 lbs
Lead Time:	1 Days
VIEW DETAILS >	
ADD TO CART	



Fuente: SETRA Catalog

6. Precio TSI 8455.

Home / TSI 8455-06 Air Velocity Transducer 6" General Purpose Probe



TSI 8455-06 Air Velocity Transducer 6" General Purpose Probe

Regular Price:

~~\$915.00~~

Special Price:

\$850.95

Mitchell Part Number: TSI-8455-06

Manufacturer: TSI

Availability: Typically in stock, Call if Urgent

Be the first to review this product

- 1 +

[ADD TO CART](#)

[Add to compare](#)

[Add to wishlist](#)

Quick overview:

8455-06 Air Velocity Transducer with 6" probe is ideal for both temporary and permanent installations for air velocity measurements in small ducts or pipes is required. The full-scale range, signal output, and time constant are user selectable and can be easily changed to meet the needs of your application.

Fuente: Mitchell Instrument

7. Precio Siemens LOGO! 8.4.

	Mouser N.º:	982-6ED10521FB080BA2	Controladores PLC LOGO 230RCE, 8DI/4DO 400 BLOCKS	1	1 Se envía ahora	€148 144	€148 144
	Fabricante N.º:	6ED10521FB080BA2					
	Fabricante:	Siemens					
	Ref. Cliente:	<input type="text" value="Ref. Cliente"/>					


En conformidad con la RoHS [QuickView](#)

Fuente: Mouser Electronics

8. Precio Siemens KTP1200.

6AV2123-2MB03-0AX0 Siemens

SIEMENS Compare



NFS 290 Available

New Factory Sealed - Original More available on backorder

USD1,847.18 VAT Excluded

- 1 + Add to cart

To Costa Rica starting from USD46.18
[View all shipping services](#)

Fuente: PLC City

9. Precio LOGO! Soft Comfort V8.



MARCA: SIEMENS
REF. FABRICANTE: 6ED1058-0BA08-0YA1

SOFTWARE LOGO COMFORT V8 LICENCIA INDIVIDUAL

LOGO! Soft Comfort V8, Single License para 1 instalacin E-SW, SW y documentacin en DVD, en 6 idiomas, ejecutable en Windows XP, 7, 8, 10 (32 y 64 bits), Mac OSx 10.7 Lion a hasta Mac OSx El Capitan, Linux SUSE 11.3, SP3, K 3.0.76 LOGO! Soft Comfort V8 es el software que permite programar intuitivamente los mdulos LOGO!. La gama incluye ms de 40 mdulos de funcin diferentes que se pueden interconectar rpida y simplemente por simples clics con el ratn segn aplicacin. Adems del modo de representacin individual es posible el modo en red cuando debe configurarse la comunicacin entre varios mdulos LOGO!: en este caso es posible visualizar simultneamente hasta tres programas, la comunicacin entre ellos se configura automticamente. Los programas LOGO! creado con versiones anteriores pueden usarse sin problemas en la versin 8.

PVP
68,32 €

1u. - 1 +

Fuente: B2b Diselectric

10. Ficha técnica Siemens KTP1200.

SIEMENS

Data sheet

6AV2123-2MB03-0AX0

SIMATIC HMI, KTP1200 Basic, Basic Panel, Key/touch operation, 12" TFT display, 65536 colors, PROFINET interface, configurable from WinCC Basic V13/ STEP 7 Basic V13, contains open-source software, which is provided free of charge see enclosed CD



General information	
Product type designation	KTP1200 Basic color PN
Display	
Design of display	TFT widescreen display, LED backlighting
Screen diagonal	12 in
Display width	261.1 mm
Display height	163.2 mm
Number of colors	65 536
Resolution (pixels)	
• Horizontal image resolution	1 280 pixel
• Vertical image resolution	800 pixel
Backlighting	
• MTBF backlighting (at 25 °C)	20 000 h
• Backlight dimmable	Yes
Control elements	
Keyboard fonts	
• Function keys	
— Number of function keys	10
— Number of function keys with LEDs	0
• Keys with LED	No
• System keys	No
• Numeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
• alphanumeric keyboard	Yes; Onscreen keyboard
Touch operation	
• Design as touch screen	Yes; Analog-resistive
Installation type/mounting	
Mounting position	vertical
Mounting in portrait format possible	Yes
Mounting in landscape format possible	Yes
maximum permissible angle of inclination without external ventilation	35°
Supply voltage	
Type of supply voltage	DC
Rated value (DC)	24 V
permissible range, lower limit (DC)	19.2 V
permissible range, upper limit (DC)	28.8 V
Input current	
Current consumption (rated value)	510 mA
Starting current inrush I ^t	0.2 A ² ·s
Power	

6AV21232MB030AX0
Page 1/6

8/15/2023

Subject to change without notice
© Copyright Siemens

Fuente: PLC City

Active power input, typ.	12.2 W
Processor	
Processor type	ARM
Memory	
Flash	Yes
RAM	Yes
Memory available for user data	10 Mbyte
Type of output	
Acoustics	
• Buzzer	Yes
• Speaker	No
Time of day	
Clock	
• Hardware clock (real-time)	Yes
• Software clock	Yes
• retentive	Yes; Back-up duration typically 6 weeks
• synchronizable	Yes
Interfaces	
Number of industrial Ethernet interfaces	1
Number of RS 485 interfaces	0
Number of RS 422 interfaces	0
Number of RS 232 interfaces	0
Number of USB interfaces	1; Up to 16 GB
Number of 20 mA interfaces (TTY)	0
Number of parallel interfaces	0
Number of other interfaces	0
Number of SD card slots	0
With software interfaces	No
Industrial Ethernet	
• Industrial Ethernet status LED	2
Protocols	
PROFINET	Yes
Supports protocol for PROFINET IO	No
IRT	No
PROFIBUS	No
EtherNet/IP	Yes
MPI	No
Protocols (Ethernet)	
• TCP/IP	Yes
• DHCP	Yes
• SNMP	Yes
• DCP	Yes
• LLDP	Yes
WEB characteristics	
• HTTP	No
• HTML	No
Redundancy mode	
Media redundancy	
— MRP	No
Further protocols	
• CAN	No
• MODBUS	Yes; Modicon (MODBUS TCP/IP)
Interrupts/diagnostics/status information	
Diagnoses	
• Diagnostic information readable	No
EMC	
Emission of radio interference acc. to EN 55 011	
• Limit class A, for use in industrial areas	Yes
• Limit class B, for use in residential areas	No
Degree and class of protection	

IP (at the front)	IP65
IP (rear)	IP20
NEMA (front)	
• Enclosure Type 4 at the front	Yes
• Enclosure Type 4x at the front	Yes
Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
cULus	Yes
RCM (formerly C-TICK)	Yes
KC approval	Yes
Use in hazardous areas	
• ATEX Zone 2	No
• ATEX Zone 22	No
• IECEx Zone 2	No
• IECEx Zone 22	No
• cULus Class I Zone 1	No
• cULus Class I Zone 2, Division 2	No
• FM Class I Division 2	No
Marine approval	
• Germanischer Lloyd (GL)	Yes
• American Bureau of Shipping (ABS)	Yes
• Bureau Veritas (BV)	Yes
• Det Norske Veritas (DNV)	Yes
• Lloyds Register of Shipping (LRS)	Yes
• Nippon Kaiji Kyokai (Class NK)	Yes
• Polski Rejestr Statkow (PRS)	No
• Chinese Classification Society (CCS)	No
Ambient conditions	
Ambient temperature during operation	
Operation (vertical installation)	
— For vertical installation, min.	0 °C
— For vertical installation, max.	50 °C
Operation (max. tilt angle)	
— At maximum tilt angle, min.	0 °C
— At maximum tilt angle, max.	40 °C
Operation (vertical installation, portrait format)	
— For vertical installation, min.	0 °C
— For vertical installation, max.	40 °C
Operation (max. tilt angle, portrait format)	
— At maximum tilt angle, min.	0 °C
— At maximum tilt angle, max.	35 °C
Ambient temperature during storage/transportation	
• min.	-20 °C
• max.	60 °C
Relative humidity	
• Operation, max.	90 %; no condensation
Operating systems	
proprietary	Yes
pre-installed operating system	
• Windows CE	No
configuration / header	
Message indicator	Yes
Alarm system (incl. buffer and acknowledgment)	Yes
Process value display (output)	Yes
Process value default (input) possible	Yes
Recipe management	Yes
Configuration software	
• STEP 7 Basic (TIA Portal)	Yes; via integrated WinCC Basic (TIA Portal)
• STEP 7 Professional (TIA Portal)	Yes; via integrated WinCC Basic (TIA Portal)
• WinCC flexible Compact	No

• WinCC flexible Standard	No
• WinCC flexible Advanced	No
• WinCC Basic (TIA Portal)	Yes
• WinCC Comfort (TIA Portal)	Yes
• WinCC Advanced (TIA Portal)	Yes
• WinCC Professional (TIA Portal)	Yes
Languages	
Online languages	
• Number of online/runtime languages	10
Project languages	
• Languages per project	32
Functionality under WinCC (TIA Portal)	
Libraries	Yes
Applications/options	
• Web browser	Yes
• SIMATIC WinCC Sm@rtServer	Yes; Available with WinCC (TIA Portal) V14 or higher
Number of Visual Basic Scripts	No
Task planner	
• time-controlled	No
• task-controlled	Yes
Help system	
• Number of characters per info text	500
Message system	
• Number of alarm classes	32
• Bit messages	
— Number of bit messages	1 000
• Analog messages	
— Number of analog messages	25
• S7 alarm number procedure	No
• System messages HMI	Yes
• System event, more (SIMATIC S7, SINUMERIK, SIMOTION, ...)	Yes; System message buffer of the SIMATIC S7-1200 and S7-1500
• Number of characters per message	80
• Number of process values per message	8
• Acknowledgment groups	Yes
• Message indicator	Yes
• Message buffer	
— Number of entries	256
— Circulating buffer	Yes
— retentive	Yes
— maintenance-free	Yes
Recipe management	
• Number of recipes	50
• Data records per recipe	100
• Entries per data record	100
• Size of internal recipe memory	256 kbyte
• Recipe memory expandable	No
Variables	
• Number of variables per device	800
• Number of variables per screen	100
• Limit values	Yes
• Multiplexing	Yes
• Structures	No
• Arrays	Yes
Images	
• Number of configurable images	250
• Permanent window/default	Yes
• Global image	Yes
• Pop-up images	No
• Slide-in images	No
• Image selection by PLC	Yes

• Image number in the PLC	Yes
Image objects	
• Number of objects per image	100
• Text fields	Yes
• I/O fields	Yes
• Graphic I/O fields (graphics list)	Yes
• Symbolic I/O fields (text list)	Yes
• Date/time fields	Yes
• Switches	Yes
• Buttons	Yes
• Graphic display	Yes
• Icons	Yes
• Geometric objects	Yes
Complex image objects	
• Number of complex objects per screen	10
• Alarm view	Yes
• Trend view	Yes
• User view	Yes
• Status/control	No
• Sm@rtClient view	No
• Recipe view	Yes
• f(x) trend view	No
• System diagnostics view	Yes; System message buffer of the SIMATIC S7-1200 and S7-1500
• Media Player	No
• HTML browser	Yes
• PDF display	No
• IP camera display	No
• Bar graphs	Yes
• Sliders	No
• Pointer instruments	No
• Analog/digital clock	No
Lists	
• Number of text lists per project	300
• Number of entries per text list	100
• Number of graphics lists per project	100
• Number of entries per graphics list	100
Archiving	
• Number of archives per device	2; One message and one process value archive
• Number of entries per archive	10 000
• Message archive	Yes
• Process value archive	Yes
• Archiving methods	
— Sequential archive	Yes
— Short-term archive	Yes
• Memory location	
— Memory card	No
— USB memory	Yes
— Ethernet	No
• Data storage format	
— CSV	No
— TXT	Yes
— RDB	No
Security	
• Number of user groups	50
• Number of user rights	32
• Number of users	50
• Password export/import	Yes
• SIMATIC Logon	No
Character sets	
• Keyboard fonts	
— US English	Yes

Transfer (upload/download)	
• MPI/PROFIBUS DP	No
• USB	No
• Ethernet	Yes
• using external storage medium	Yes
Process coupling	
• S7-1200	Yes
• S7-1500	Yes
• S7-200	Yes
• S7-300/400	Yes
• LOGO!	Yes
• WinAC	Yes
• SINUMERIK	Yes; No access to NCK data
• SIMOTION	Yes
• Allen Bradley (EtherNet/IP)	Yes
• Allen Bradley (DF1)	No
• Mitsubishi (MC TCP/IP)	Yes
• Mitsubishi (FX)	No
• OMRON (FINS TCP)	No
• OMRON (LINK/Multiink)	No
• Modicon (Modbus TCP/IP)	Yes
• Modicon (Modbus)	No
Service tools/configuration aids	
• Backup/Restore manually	Yes
• Backup/Restore automatically	No
• Simulation	Yes
• Device switchover	Yes
Peripherals/Options	
Printer	No
SIMATIC HMI MM memory card: Multi Media Card	No
SIMATIC HMI SD memory card: Secure Digital memory card	No
SIMATIC HMI CF memory card Compact Flash Card	No
USB memory	Yes
SIMATIC IPC USB Flashdrive (USB stick)	Yes
SIMATIC HMI USB stick	Yes
Mechanics/material	
Enclosure material (front)	
• Plastic	Yes
• Aluminum	No
• Stainless steel	No
Dimensions	
Width of the housing front	330 mm
Height of housing front	245 mm
Mounting cutout, width	310 mm
Mounting cutout, height	221 mm
Overall depth	60 mm
Weights	
Weight (without packaging)	1 710 g
Weight (with packaging)	2.2 kg

last modified:

10/8/2021 

Fuente: PLC City

11. Ficha técnica Setra Model 267.



Model 267

Very Low Differential Pressure Transducer

Features

- Optional 3.5 Digit LCD Display w/ 0.5% FS Accuracy
- NEMA 4 Rated Housing
- Optional Static Pressure Probe
- PG-9, PG-13 or Conduit Electrical Termination
- 24 VAC or 24 VDC Excitation
- CE & RoHS Compliant
- Suitable for Harsh Environments
- Optional LCD Display
- $\pm 0.25\%$, 0.4%, 0.5%, 1% FS Accuracy

Applications

- HVAC Systems
- Energy Management Systems
- Static Duct Pressure
- Cleanroom Pressure
- Oven Pressurization & Furnace Draft Controls

© Setra Systems, Inc. All rights reserved.
The Setra Systems name and logo are registered trademarks of Setra Systems, Inc.



Setra's Model 267 is the most rugged high accuracy, low differential pressure transducer on the market. It delivers accuracies of $\pm 1\%$ FS (without display), $\pm 0.5\%$ FS (with display), and optional $\pm 0.25\%$ FS and $\pm 0.4\%$ FS accuracies, and pressure ranges from 0.1" W.C. up to 100" W.C. The 267 is housed in a robust, NEMA 4 rated enclosure and has an optional static pressure probe reducing installation and material costs. The 267 is offered with an optional LCD display and a standard accuracy of $\pm 0.5\%$ making it ideal for high accuracy Pharmaceutical applications.

Customization is standard

The 267, unlike most competitors, offers many mechanical and electrical options that can be integrated into existing designs. The optional 0.25" diameter pressure probe is made of sturdy extruded aluminum and is designed with baffles to prevent velocity pressure errors which saves money and reduces time on the job site.

Robust enclosure for difficult applications

The 267 is housed in a NEMA 4 rated housing and is built to withstand harsh environments. The 267 is available in both wall and duct mount providing the installer with flexible mounting options. The wall mount allows the sensor to be installed anywhere, whereas the duct probe configuration is designed to maximize space efficiency in difficult applications.

The Setra sensor

The core technology of the 267 is the all stainless steel capacitive sensing element. Setra designs and manufactures all of their sensing elements resulting in full control over the process and quality of every single sensor. The welded dead-ended capacitive sensors requires minimal amplification and delivers excellent accuracy and longterm stability. Setra's technology has been used in over 8 million installations and has the highest field acceptance rate in the industry.

800.257.3872 | www.setra.com

Fuente: SETRA Catalog

Specifications

Performance data

	Standard	Optional	
Accuracy RSS ¹ (at constant temp)	±1.0% FS	±0.4% FS	±0.25% FS
Non-linearity, BFSL	±0.98% FS	±0.38% FS	±0.22% FS
Hysteresis	±0.10% FS	±0.10% FS	±0.10% FS
Non-repeatability	±0.05% FS	±0.05% FS	±0.05% FS

Position effect: consult factory

Physical description

Case	IP65/NEMA 4 Plastic Glass-Filled Polycarbonate UL94V-0 Case
Electrical connection	Screw Terminal Strip Inside of Case
Electrical Terminations	PG-9/PG13.5 Strain Relief, 1/2" Conduit Opening, or 9 Pin D-Sub Connector*
Zero and Span Adjustments	Accessible Inside of Case
Weight (approx.)	9.0 Ounces (255 grams) 9.5 Ounces (Duct Probe Assembly)

Electrical data (Voltage)

Circuit	3-Wire (Exc, Gnd, Sig), Protected from Miswiring
Excitation (for 0-5 VDC Output)	9 to 30 VAC /12 to 40 VDC
Excitation (for 0-10 VDC Output)	11 to 30 VAC /13 to 40 VDC
Output ²	0 to 5 VDC ³ / 0 to 10 VDC ³

Electrical data (current)

Circuit	2-Wire, Protected from Miswiring
Output ⁷	4 to 20 mA ⁴
Bidirectional Output at Zero	12 mA
Min. Loop Supply Voltage (VDC)	9 + 0.02 x (Resistance of Receiver plus line)
Max. Loop Supply Voltage (VDC)	30 + 0.004 x (Resistance of Receiver plus line)

Pressure media

Thermal Effects ^{5,3}	
Compensated Range °F (°C)	+40 to +150 (+5 to +65)
Zero/Span Shift %FS/°F (°C)	±0.033 (±0.06)
Maximum Line Pressure	10 PSI
Overpressure	Up to 10 PSI (Range Dependent)
Long-Term Stability	0.1% FS Total

Environmental data

Operating ⁶ Temperature °F (°C)	0 to +150 (-18 to +65)
Storage Temperature °F (°C)	-65 to +180 (-54 to +82)

¹ RSS of Non-Linearity, Hysteresis, and Non-Repeatability.

² Units calibrated at nominal 70°F. Maximum thermal error computed from this datum.

³ Calibrated into a 50k ohm load, operable into a 5000 ohm load or greater.

⁴ Zero output factory set to within ±0.16 mA (±0.08 mA for optional accuracies). Span (Full Scale) output factory set to within ±0.16 mA (±0.08 mA for optional accuracies).

⁵ Zero output factory set to within ±50mV (±25 mV for optional accuracies).

Span (Full Scale) output factory set to within ±50mV (±25 mV for optional accuracies)

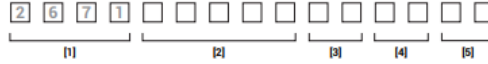
⁶ Operating temperature limits of the electronics only. Pressure media temperatures may be considerably higher.

⁷ Calibrated at factory with a 24 VDC loop supply voltage and a 250 ohm load.

Ordering information

Example part number: 2671R25WD11G2CN

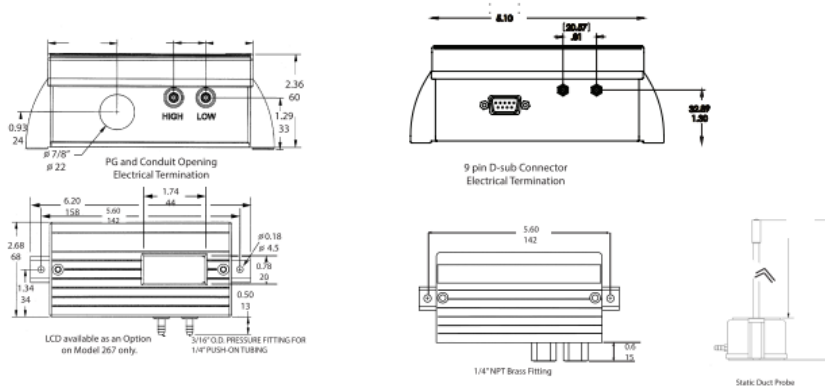
0 to .25 in. WC Unidirectional Range, 4-20 mA Output, 3/16" Barbed Brass Fitting, PG-9 Electrical Termination, 1% Accuracy with LCD Display



[1]		[2]	or	[2]	[3]		[4]		[5]	
Model	267	Range ¹ (unidirectional)		Pressure range ¹ (bidirectional)	Output		Pressure Fitting/Elec. Termination		Accuracy (Full Scale)	
2671	267	OR1WD	0 to 0.1"W.C.	OR1WB	11	4-20 mA	3/16" Barbed Brass Fitting	CN	±1% FS with no LCD Display	
		R25WD	0 to 0.25"W.C.	R25WB	2D	0-5 VDC	PG-13.5 Strain Relief	CD	±1% FS with LCD Display	
		OR5WD	0 to 0.5"W.C.	OR5WB	2E	0-5 VDC	PG9 Strain Relief	EN	±0.4% FS* with no LCD Display	
		001WD	0 to 1"W.C.	001WB			9 pin D-Sub Conn.	FN	±0.25% FS* with no LCD Display	
		1RSWD	0 to 1.5"W.C.	1RSWB			1/2" Conduit Opening	GN	±1% FS* with no LCD Display	
		2RSWD	0 to 2.5"W.C.	2RSWB			1/4"NPTF Brass Fitting	HD	±0.5% FS* with LDC Display	
		005WD	0 to 5.0"W.C.	005WB			PG-9 Strain Relief	ED	±0.4% FS* with LDC Display	
		010WD	0 to 10"W.C.	010WB			PG-13.5 Strain Relief	FD	±0.25% FS* with LDC Display	
		025WD	0 to 25"W.C.	025WB			9 Pin D-Sub Conn.			
		050WD	0 to 50"W.C.	050WB			1/2" Conduit Opening			
		100WD	0 to 100"W.C.	100WB			Static Duct Probe			
		025LD	0 to 25 Pa	025LB			1/2" Conduit Opening			
		050LD	0 to 50 Pa	050LB			PG-13.5 Strain Relief			
		100LD	0 to 100 Pa	100LB			9 Pin D-Sub Conn.			
		250LD	0 to 250 Pa	250LB			1/2" Conduit Opening			
		500LD	0 to 500 Pa	500LB						
		100CLD	0 to 1000 Pa	100CLB						
		25CLD	0 to 2500 Pa	25CLB						
		40CLD	0 to 4000 Pa	40CLB						
		70CLD	0 to 7000 Pa	70CLB						

*Includes Cal. Cert

Dimensions



12. Ficha técnica TSI 8455.



Air Velocity transducer TSI

Model 8455

General purpose: protected probe tip, rugged ceramic sensor, wide range of measurement applications, fast response time.

SPECIFICATIONS

Accuracy: $\pm 2.0\%$ of reading¹, ¹From 64.4 to 82.4°F (18 to 28°C), outside this range and within temperature compensation range add 0.11% per °F (0.2% per °C)
 $\pm 0.5\%$ of full scale of selected range

Field selectable range:
 25 ft/min to 200, 250, 300, 400, 500, 750, 1,000, 1,250, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000, 4,000, 5,000, 7,500,
 10,000 ft/min (0.125 m/s to 1.0, 1.25, 1.50, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 40.0, 50.0 m/s)

Repeatability: $< \pm 1.0\%$ of reading³, ³Standard deviation based on one minute average from 100 to 1,000 fpm (0.5 to 5.0 m/s)

Response to flow: 0.2 sec⁴, ⁴For 63% of final value, tested at 1,500 fpm (7.5 m/s)

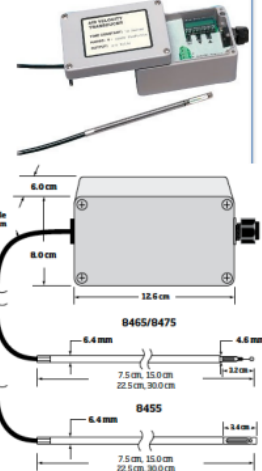
Temperature range:
 Compensation 32 to 140°F (0 to 60°C)
 Operating (electronics) 32 to 200°F (0 to 93°C)
 Operating (sensor) 32 to 200°F (0 to 93°C)
 Storage 32 to 200°F (0 to 93°C)

Resolution (minimum): 0.07% of selected full scale

Input power: 11 to 30 VDC or 18 to 38 VAC, 350 mA max⁶
⁶Input voltage must be maintained within specifications at the transducer

Output:
 Impedance Voltage mode: less than 1 ohm, 20mA max source current
 Resistance Current mode: 500 ohms maximum load
 Signal Field selectable 0 to 5V, 0 to 10V, 0 to 20, 2 to 10V, mA, 4 to 20 mA
 Time constant Field selectable 0.05 to 10 seconds

Probe length: 3 in., 6 in., 9 in., 12 in. (7.5 cm, 15 cm, 22.5 cm, or 30 cm)



All models contain on-board electronics and calibration curves that provide a linear signal output. This linear signal is sent out as either a current (mA) or a voltage (V) signal, allowing output to a variety of data loggers or data acquisition systems. In addition, the current and voltage output ranges are user-selectable for your convenience.

8455	
Range	25 to 10,000 fpm (0.127 to 50.8 m/s), selectable
Accuracy	$\pm(2\%$ of reading at 64.4 to 82.4°F (18-28°C) +0.5% of full scale of selected range)
Response time	0.2 seconds
Input power	11 to 30 VDC or 18 to 28 VAC, 350 mA maximum

8455-04/2022

Fuente: Mitchell Instrument

13. Ficha técnica Siemens LOGO! 8.4.

SIEMENS

Data sheet


6ED1052-1FB08-0BA2



Figures similar

LOGO! 230RCE logic module, display power supply / I/O: 115 V/230 V/relay, 8 DI/4 DO, memory 400 blocks, modularly expandable, Ethernet, integrated web server, data log, user-defined web pages, standard microSD card for LOGO! Soft Comfort V8.4 or higher, older projects executable cloud connection, MQTT in all LOGO! 8.4 basic units

Display	
with display	Yes
Installation type/mounting	
Mounting	on 35 mm DIN rail, 4 spacing units wide
Supply voltage	
Rated value (DC)	
• 115 V DC	Yes
• 230 V DC	Yes; 240 V DC
permissible range, lower limit (DC)	100 V
permissible range, upper limit (DC)	253 V
Rated value (AC)	
• 115 V AC	Yes
• 230 V AC	Yes; 240 V AC
Line frequency	
• permissible range, lower limit	47 Hz
• permissible range, upper limit	63 Hz
Time of day	
Time switching clocks	
• Number	400; Max. 400, function-specific
• Power reserve	480 h
Digital inputs	
Number of digital inputs	8
Digital outputs	
Number of digital outputs	4; Relays
Short-circuit protection	No; external fusing necessary
Relay outputs	
Switching capacity of contacts	
— with inductive load, max.	3 A
— with resistive load, max.	10 A
EMC	
Emission of radio interference acc. to EN 55 011	
• Limit class B, for use in residential areas	Yes; Radio interference suppression according to EN55011, Limit Value Class B
Standards, approvals, certificates	
CE mark	Yes
CSA approval	No; covered by UL cert
UL approval	Yes
FM approval	Yes
developed in accordance with IEC 61131	Yes

according to VDE 0631	Yes
Marine approval	Yes; Available soon
Ambient conditions	
Ambient temperature during operation	
• min.	-20 °C; No condensation
• max.	55 °C
Ambient temperature during storage/transportation	
• min.	-40 °C
• max.	70 °C
Altitude during operation relating to sea level	
• Ambient air temperature-barometric pressure-altitude	Tmin ... Tmax at 1 080 hPa ... 795 hPa (-1 000 m ... +2 000 m)
Dimensions	
Width	71.5 mm
Height	90 mm
Depth	60 mm
last modified:	4/10/2024 

Fuente: Mouser Electronics