Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,
Volumen 9, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

PROPUESTA DE DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ANALIZADOR DE VENTILADORES MECÁNICOS: APLICACIÓN DE LA METROLOGÍA PARA EL MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN EN LA EMPRESA MRS MEDICAL

PROPOSAL FOR THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MECHANICAL VENTILATOR ANALYZER: APPLICATION OF METROLOGY FOR MAINTENANCE AND CALIBRATION AT MRS MEDICAL

Miguel Ángel Rodarte
Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Miguel Ángel Fraire Hernández
Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Luis Alberto Flores Chaires
Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Diego Tadeo Fraire Frausto
Universidad Autónoma de Zacatecas, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19348

Propuesta de Diseño y Desarrollo de un Analizador de Ventiladores Mecánicos: Aplicación de la Metrología para el Mantenimiento y Calibración en la Empresa MRS Medical

Miguel Ángel Rodarte López[1]
39204158@uaz.edu.mx
https://orcid.org/0009-0004-2599-1047
Universidad Autónoma de Zacatecas
México

Miguel Ángel Fraire Hernández
miguelfraire@hotmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6678-3883
Universidad Autónoma de Zacatecas
México

Luis Alberto Flores Chaires
luischaires@uaz.edu.mx
https://orcid.org/0000-0003-3958-8959
Universidad Autónoma de Zacatecas
México

Diego Tadeo Fraire Frausto
diego.fraire@uaz.edu.mx
https://orcid.org/0009-0005-9409-3432
Universidad Autónoma de Zacatecas
México

RESUMEN

La presente investigación expone el diseño conceptual y desarrollo de un analizador para ventiladores mecánicos, enfocado en optimizar los procesos de mantenimiento y calibración en la empresa MRS Medical Mantenimiento, Reparación y Servicio S.A. de C.V. A partir de la experiencia práctica en dicha empresa, se identificaron limitaciones técnicas y económicas en el uso de equipos comerciales de análisis, lo que motivó la creación de una solución propia basada en principios de metrología aplicada. El dispositivo propuesto permite medir parámetros críticos como presión, flujo, volumen y concentración de oxígeno, conforme a normativas técnicas nacionales (NOM-025) e internacionales. La propuesta incluye un diseño conceptual, una metodología de validación y un esquema de simulación basado en modelos matemáticos de la mecánica ventilatoria, con el objetivo de establecer su viabilidad técnica. Los resultados obtenidos sugieren que la implementación de este analizador contribuiría a reducir tiempos de inactividad, mejorar la precisión de las mediciones y optimizar los costos operativos, fortaleciendo así la seguridad y eficiencia en la atención médica.

Palabras clave: diseño, mantenimiento, metrología, ventilación mecánica, calibración

[1] Autor principal
Correspondencia: 39204158@uaz.edu.mx

Proposal for the Design and Development of a Mechanical Ventilator Analyzer: Application of Metrology for Maintenance and Calibration at MRS Medical

ABSTRACT

This research presents the conceptual design and development of an analyzer for mechanical ventilators, aimed at improving maintenance and calibration processes at MRS Medical Mantenimiento, Reparación y Servicio S.A. de C.V. Based on the practical experience acquired at the company, technical and economic limitations in the use of commercial analytical equipment were identified. This led to the development of a proprietary solution grounded in applied metrology principles. The proposed device is capable of measuring critical parameters such as pressure, flow, volume, and oxygen concentration, in accordance with both national (NOM-025) and international technical standards. The proposal outlines a conceptual design, validation methodology, and simulation scheme based on mathematical models of ventilatory mechanics to assess its technical feasibility. The results suggest that implementing this analyzer could reduce downtime, enhance measurement accuracy, and lower operational costs, thereby contributing to safer and more efficient patient care.

Keywords: design, maintenance, metrology, mechanical ventilation, calibration

Artículo recibido 23 julio 2025
Aceptado para publicación: 26 agosto 2025

INTRODUCCIÓN

La ventilación mecánica es una técnica de soporte vital fundamental para pacientes que no pueden mantener una respiración efectiva por sí mismos. Utilizada principalmente en unidades de cuidados intensivos (UCI), esta tecnología permite mantener niveles adecuados de oxigenación y eliminación de dióxido de carbono, siendo crítica en condiciones respiratorias severas. Sin embargo, el funcionamiento preciso y confiable de los ventiladores mecánicos depende de un mantenimiento riguroso y una calibración adecuada. Cualquier desviación en sus parámetros puede ocasionar complicaciones graves para el paciente, incluyendo barotrauma, hipoventilación o hipoxemia, situaciones que comprometen directamente la vida del paciente. En este contexto, la metrología aplicada se convierte en una herramienta esencial para garantizar la precisión y trazabilidad de las mediciones que estos equipos requieren. La calibración periódica y la verificación de sus variables criticas como presión, flujo, volumen y concentración de oxígeno, deben realizarse con instrumentos confiables y específicos, conforme a estándares nacionales e internacionales como la (NOM-025, ISO 13485 o IEC 60601).

No obstante, en el entorno clínico real, especialmente en empresas de mantenimiento de equipos médicos, como MRS Medical Mantenimiento, Reparación y Servicio S.A. de C.V., existen limitaciones importantes. Entre ellas, la falta de herramientas especializadas para la verificación de parámetros respiratorios y los altos costos asociados al uso de analizadores comerciales. Esta situación no solo dificulta el cumplimiento normativo, sino que también prolonga los tiempos de inactividad de los equipos y eleva los costos operativos. Ante esta problemática, surge la propuesta de diseñar y desarrollar un analizador propio de ventiladores mecánicos, con un enfoque técnico y económico adaptado a las necesidades de empresas del sector biomédico. Este dispositivo busca proporcionar una solución integral y accesible que facilite el mantenimiento preventivo, garantizando al mismo tiempo la seguridad del paciente y la eficiencia operativa de los servicios médicos.

Planteamiento del problema

La ventilación mecánica es una tecnología esencial para el tratamiento de pacientes con insuficiencia respiratoria. No obstante, su efectividad depende en gran medida de una calibración precisa y un mantenimiento regular, lo que requiere instrumentos especializados que permitan verificar parámetros críticos como presión, flujo, volumen y concentración de oxígeno.

En la empresa MRS Medical Mantenimiento, Reparación y Servicio S.A. de C.V., dedicada al mantenimiento de equipos médicos, se ha identificado una insuficiencia importante: la falta de un analizador propio que permita realizar estas tareas con la precisión y frecuencia necesarias. Actualmente, el uso de analizadores comerciales representa una solución parcial, debido a su elevado costo, limitada disponibilidad y falta de servicio técnico oportuno. Esto puede afectar directamente la eficiencia operativa y la calidad del servicio.

El no contar con herramientas especializadas impide realizar un mantenimiento preventivo eficaz, lo que podría traducirse en un aumento del riesgo clínico para los pacientes, tiempos prolongados de inactividad y costos operativos elevados. No obstante, resulta necesario desarrollar una solución tecnológica accesible y adecuada al entorno clínico local, que permita realizar estas mediciones de manera confiable y trazable.

Objetivo General

Proponer un analizador de ventiladores mecánicos que contribuya a mejorar los procesos de mantenimiento y calibración en MRS Medical, aplicando principios de metrología para garantizar la precisión en la medición de parámetros críticos.

Objetivos Específicos

- Investigar los principios de funcionamiento de los ventiladores mecánicos y los parámetros críticos que deben medirse para asegurar su correcto desempeño.
- Analizar los fundamentos metrológicos necesarios para establecer criterios de verificación y calibración adecuados en equipos de soporte respiratorio.
- Desarrollar una propuesta técnica y conceptual para el diseño de un analizador de ventiladores mecánicos, considerando funcionalidad, accesibilidad y precisión.
- Evaluar la viabilidad técnica del diseño mediante comparación con dispositivos comerciales y revisión bibliográfica.
- Proponer estrategias para la integración del diseño del analizador en los procesos de mantenimiento de MRS Medical, enfocándose en su viabilidad operativa y su potencial impacto en la mejora de procesos.

Justificación

Los ventiladores mecánicos son dispositivos críticos en la atención de pacientes en estado grave. Su correcto funcionamiento debe ser verificado mediante procedimientos de calibración que aseguren la precisión de sus parámetros. No obstante, los equipos actualmente disponibles en el mercado son costosos y, en muchos casos, inaccesibles para instituciones con presupuestos limitados.

Desarrollar un analizador propio representa una solución viable para la mejora continua de los servicios técnicos prestados por empresas especializadas como MRS Medical. Este dispositivo permitirá realizar verificaciones periódicas y trazables, facilitando la detección de fallas, reduciendo el tiempo de inactividad de los equipos y optimizando la atención al paciente.

Además, la propuesta se alinea con las exigencias normativas en materia de calidad y seguridad médica, permitiendo cumplir con estándares como la NOM-025, ISO 13485 y otras regulaciones aplicables. El diseño también podrá escalarse a otros entornos clínicos con características similares, contribuyendo al fortalecimiento del sector de mantenimiento biomédico en el país.

Hipótesis

Si se desarrolla un analizador de ventiladores mecánicos basado en principios de metrología y adaptado a las condiciones operativas de MRS Medical, entonces será posible optimizar los procesos de mantenimiento y calibración, mejorando la precisión de las mediciones y reduciendo los costos y tiempos de inactividad.

METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque aplicado y tecnológico, orientado al diseño conceptual de un dispositivo analizador para ventiladores mecánicos. Debido a limitaciones de recursos materiales y financieros, no se procedió al ensamblaje físico ni a pruebas experimentales del prototipo; en cambio, se desarrolló una propuesta integral sustentada en principios de ingeniería biomédica, metrología, simulación computacional y análisis normativo.

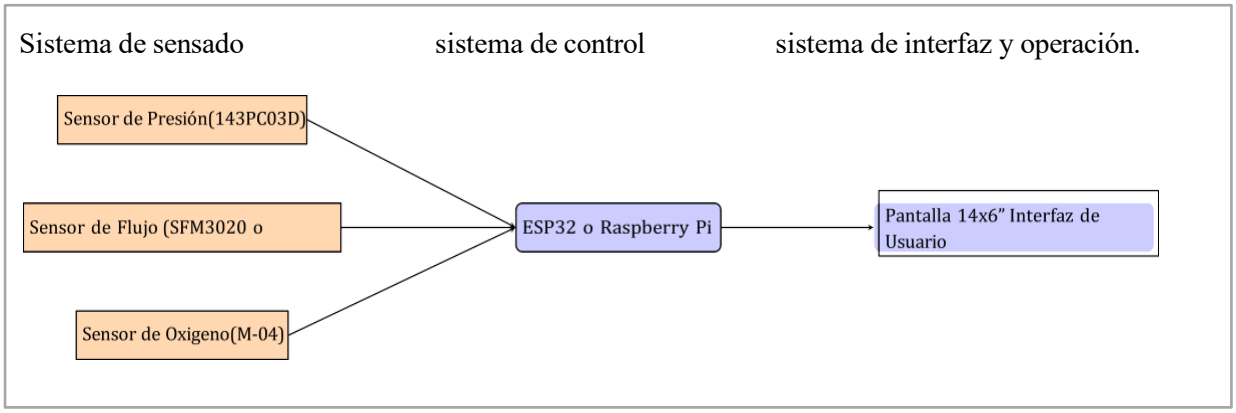
El proceso metodológico se estructuró bajo un diseño exploratorio-descriptivo, dada la ausencia de un modelo preexistente. Se planteó una solución original basada en criterios clínicos, técnicos y regulatorios, adaptada al contexto operativo de MRS Medical como se muestra en la figura 6.1.

Este enfoque permitió´ definir y justificar la viabilidad del sistema propuesto y sentar las bases para una futura implementación experimental.

RESULTADOS

El diseño del analizador se enfocó en cumplir con los requerimientos definidos durante el análisis técnico. El sistema se divide en tres partes: sensado, control, e interfaz y operación, cada una tiene funciones específicas que trabajan en conjunto para captar, procesar y mostrar datos respiratorios en tiempo real. Tal y como se muestra en la figura 1 representa la arquitectura funcional de estos sistemas.

Figura 1. Arquitectura funcional del sistema del analizador



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (febrero, 2025).

Sistema de Sensado

Este es el encargado de adquirir las señales físicas generadas por el ventilador mecánico y transformarlas en señales eléctricas medibles. Se enfoca principalmente en las siguientes variables:

- Presión de gases (presión inspiratoria, presión de vía aérea)
- Flujo inspiratorio y espiratorio
- Volumen respiratorio
- Concentración de oxígeno

Componentes del Sistema de Sensado

A continuación, se describen los sensores seleccionados para la adquisición de variables críticas en la ventilación mecánica.

Tabla 1. Sensores utilizados en el sistema de sensado

Variable	Sensor seleccionado	Características clave
Presión	143PC03D (Honey-well)	Sensor diferencial, alta resolución
Flujo	SFM3020 o SFM3300-250-D (Sensirion)	Sensores digitales de flujo con alta precisión
Oxígeno	M-04 Medical Oxygen Sensor	Sensor electroquímico, salida de 9–14 mV en 21 % O2

Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (febrero, 2025)

Sistema de Control

Para procesar las señales de los sensores y controlar el sistema se usará el microcontrolador ESP32 (ver Figura 1). Más adelante se podría integrar una Raspberry Pi.

El ESP32 es una opción potente y económica, ideal para este tipo de aplicaciones. Tiene dos núcleos, varias entradas y salidas, contiene además la conectividad Wi-Fi y Bluetooth, lo que permite re- copilar, procesar y enviar datos de presión, flujo y oxígeno a otros dispositivos externos para visualizar o almacenar información.

El sistema de control se basa en un microcontrolador ESP32 o una Raspberry Pi 3, según la versión del prototipo. Sus funciones principales son:

- Recibir las señales del sistema de sensado.
- Procesar los datos mediante algoritmos.
- Calcular parámetros como volumen tidal, frecuencia respiratoria, PIP y PEEP.
- Activar alarmas si se detectan valores fuera de rango.
- Comunicarse con la interfaz de usuario y, si es necesario, con una base de datos externa.

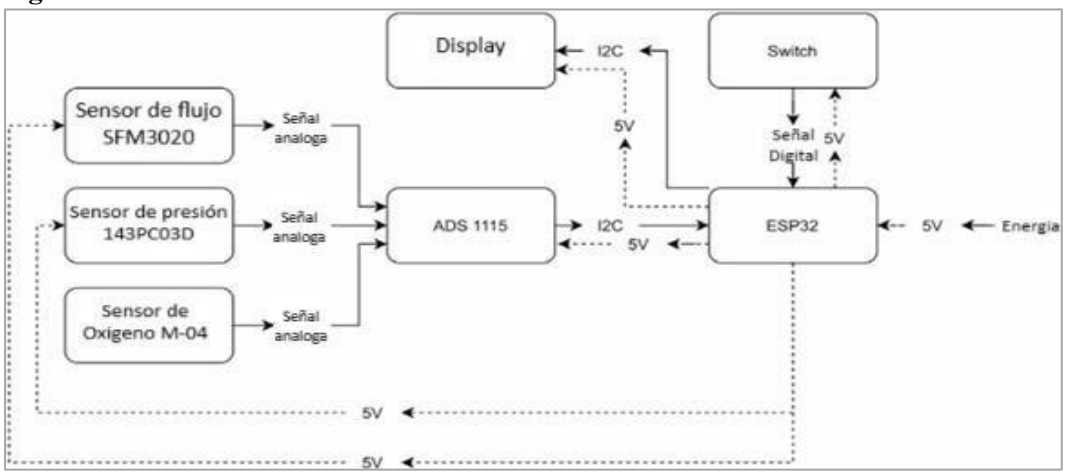
Sistema de Interfaz y Operación

Este sistema le da al usuario una vista clara e interactiva del estado ventilatorio del paciente simulado. Sus principales funciones incluyen:

- Pantalla tipo tablet de 14×6 pulgadas.
- Gráficas como presión vs. tiempo y flujo vs. volumen.
- Indicadores numéricos y visuales.
- Menús para ajustar parámetros y configurar alarmas.
- Almacenamiento de datos para seguimiento.

Con esto, el técnico puede ver cómo se comporta el ventilador, hacer ajustes y comprobar si los parámetros se mantienen dentro de lo esperado.

Figura 2. Ubicación de sensores en el sistema de sensado



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025).

Simulación de señales respiratorias y estimación de parámetro

Para validar el procesamiento de señales sin necesidad de sensores físicos, se desarrolló un script en Python que simula la dinámica básica de un ciclo respiratorio. El objetivo es generar señales sintéticas de flujo y presión, aplicar técnicas de filtrado digital y estimar parámetros clínicos relevantes como el volumen tidal (VT), la frecuencia respiratoria (RR) y la presión pico (PIP).

Generación de señales

Se creó una señal de flujo con forma de sinusoide truncada, positiva solo durante la inspiración, imitando un patrón típico en ventilación. Se añadió ruido aleatorio para representar la variabilidad fisiológica: *flow = np.sin(2 * np.pi * f * t) flow[flow < 0] = 0 flow+= np.random.normal(0,noise_level, size=flow.shape)*

La señal de presión se modeló como proporcional al flujo, considerando una resistencia respiratoria y una presión positiva al final de la espiración (PEEP). También se añadió ruido:

*ressure = R * flow + PEEP + np.random.normal(0, 0.2, size=flow.shape)*

Acondicionamiento de señales

Para simular el filtrado analógico/digital que ocurre en sistemas reales, se aplicó un filtro pasa bajos Butterworth de segundo orden. Esto permite eliminar el ruido de alta frecuencia y obtener señales más limpias:

b, a = butter(2, 5 / (fs / 2)) flow_filt = filtfilt(b, a, flow) press_filt = filtfilt(b, a, pressure)

Cálculo del volumen tidal

El volumen tidal (VT) se obtuvo integrando la señal de flujo filtrada a lo largo del tiempo. Esto equivale a sumar el área bajo la curva del flujo:

volume = np.cumsum(flow_filt) / fs VT = np.max(volume) - np.min(volume)

Estimación de parámetros ventilatorios

- Frecuencia respiratoria (RR): detectando los picos de flujo inspiratorio.
- Presi´on pico (PIP): valor máximo de la señal de presión filtrada.
- Presi´on media (Pmed): valor promedio de la señal de presión.

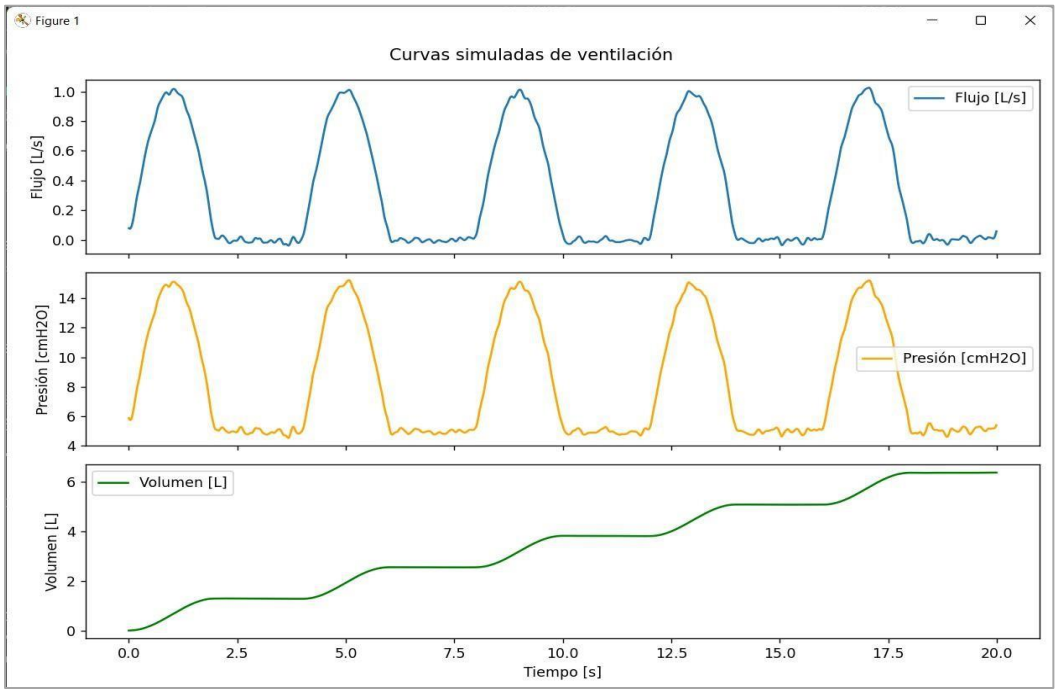
peaks, _ = find_peaks(flow_filt, height=0.1, distance=fs / (RR/60)) RR_estimada =

*len(peaks) * (60 / (t[-1] - t[0])) PIP = np.max(press_filt) Pmed = np.mean(press_filt)*

Visualización de resultados

Se generaron tres gráficas que representan: Flujo vs. Tiempo Presión vs. Tiempo Volumen vs. Tiempo Estas curvas permiten observar de manera visual el comportamiento dinámico del sistema respiratorio simulado.

Figura 3. Presentación de la simulación y lo que presentaría en su interfaz-Usuario



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025)

Tabla 2. Parámetros respiratorios estimados en la simulación.

Parámetro	Símbolo	Valor estimado
Volumen Tidal	VT	0.52 L
Frecuencia Respiratoria	RR	15.0 rpm
Presión Inspiratoria Pico	PIP	19.8 cmH_2O
Presión Media	P_{media}	10.6 cmH_2O
Fracción Inspirada de Oxígeno	FiO_2	40.2 %

Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025).

Los valores obtenidos en la simulación representan un patrón respiratorio fisiológico típico en condiciones controladas. El volumen tidal estimado de 0.52 litros se encuentra dentro del rango esperado para un adulto en ventilación mecánica. La frecuencia respiratoria de 15 rpm corresponde a una frecuencia normal en reposo. La presión pico (PIP) y la presión media reflejan un sistema con una resistencia moderada y una presión positiva al final de la espiración

(PEEP) bien establecida. Finalmente, la fracción inspirada de oxígeno simulada (FiO_2) cercana al 40 % representa una mezcla enriquecida, común en entornos clínicos para pacientes que requieren soporte respiratorio.

Simulación de la señal de concentración de oxigeno (FiO).

Para simular la salida de un sensor de oxígeno, se generó´ una señal con un valor base correspondiente a una mezcla rica en oxigeno (40), añadiendo pequeñas variaciones aleatorias para representar el ruido típico de sensores electroquímicos.

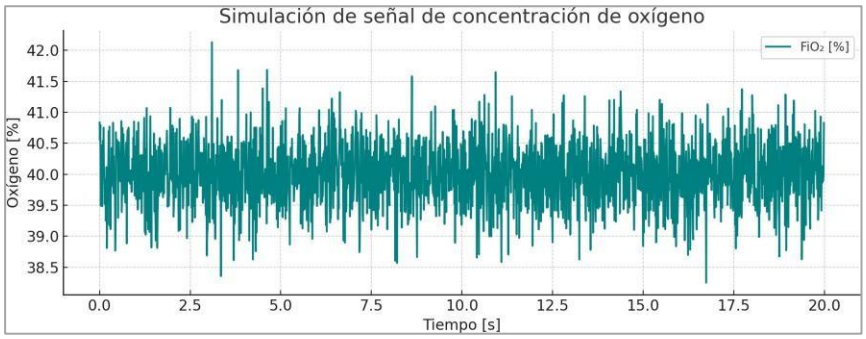
$FiO_{2base} = 0{,}40 variacion = 0{,}005 FiO2 =$

$FiO_{2base} + np.random.normal(0, variacion, size = t.shape)$

La señal obtenida representa la concentración de oxígeno como una curva relativamente estable, con fluctuaciones menores del orden de ±0,5 %, coherente con las tolerancias habituales en sensores médicos.

Esta simulación es útil para probar algoritmos de monitoreo de FiO sin requerir hardware real, y se integra fácilmente con las señales de presión y flujo para emular un entorno completo de ventilación mecánica.

Figura 4. Señal simulada de concentración de oxígeno (FiO)

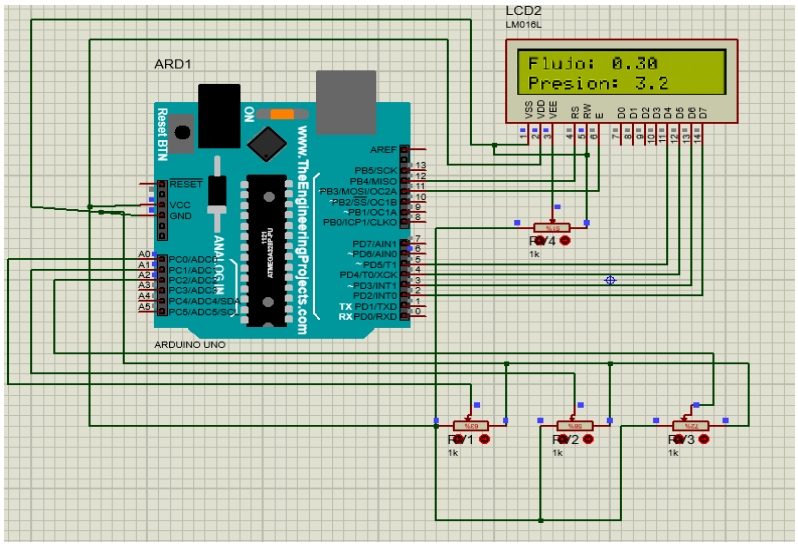


Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025).

Este código constituye una base inicial para poder adaptarse y simular diferentes modos ventilatorios (flujo cuadrado vs. decaído, distintas RR y VT), y poder incorporar canales de sensores adicionales.

Simulación del sistema en Proteus

Figura 5. Simulación en Proteus.



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025)

Esta simulación sirvió como punto de partida para el diseño y prueba del algoritmo de control, así como para visualizar el comportamiento de los componentes en un entorno virtual antes de una implementación física.

Justificación de componentes en la simulación.

Uso de Arduino Uno en lugar de ESP32

Durante el desarrollo del prototipo opté por utilizar un Arduino Uno en lugar del ESP32, principalmente el Arduino Uno es muy compatible con este software y me permitió´ avanzar sin

complicaciones técnicas relacionadas con controladores o configuraciones avanzadas. En esta etapa, prioricé la funcionalidad básica del sistema más que la conectividad, por lo que el Uno fue una herramienta adecuada para validar el comportamiento del algoritmo y los componentes.

Uso de pantalla LCD 16x2

Para mostrar las variables simuladas (como presión, flujo y concentración de oxígeno), decidí usar una pantalla LCD 16x2. Esta pantalla es simple pero efectiva, y me permitió visualizar los datos de forma clara y directa.

Sustitución de sensores por potenciómetros

En lugar de sensores reales, se utilizaron potenciómetros para simular las señales analógicas; me ayudó a controlar manualmente los valores que representarían las mediciones reales, siendo una forma sencilla y práctica de simular sensores dentro de Proteus.

Importancia de su implementación

La representación del comportamiento lógico del sistema fue representada mediante Python, lo cual permitió analizar el procesamiento de las señales y simular el flujo de datos de forma matemática. En esta sección, el enfoque se traslada a la simulación en Proteus para visualizar la estructura física y la interacción entre componentes. Este conjunto entre lo virtual (en Python) y lo esquemático (en Proteus) facilita una comprensión más integral del funcionamiento del sistema funcionando como punto de partida para el diseño y prueba del algoritmo de control, así como para visualizar el comportamiento de los componentes en un entorno virtual antes de su implementación física.

Diseño físico del prototipo

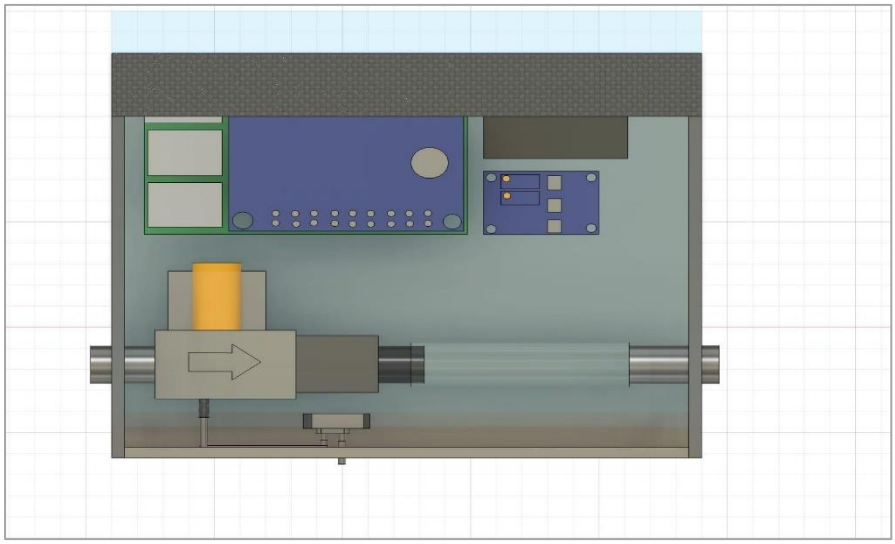
Una vez desarrollada la lógica de funcionamiento y validado el sistema en entornos virtuales como Python y Proteus, se procedió a diseñar el aspecto físico del dispositivo mediante el software de modelado 3D Fusion 360. Este diseño tiene como propósito representar la estructura que albergaría los componentes electrónicos, sensores y display en una implementación real del sistema.

Modelado 3D del prototipo

El diseño en Fusion 360 incluye un gabinete compacto que permite la correcta distribución de los sensores (flujo, presión y oxígeno), la tarjeta controladora (Arduino o ESP32), la pantalla LCD 16x2 y la interfaz de alimentación. Se tomaron en cuenta factores como:

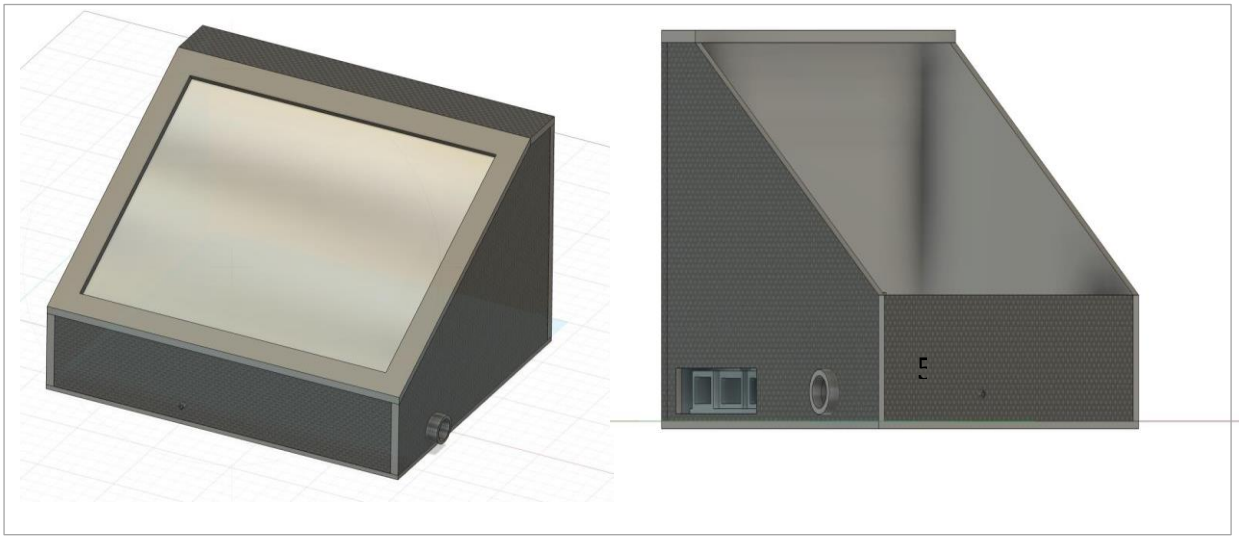
- Accesibilidad a los puertos de conexión.
- Ventilación adecuada para evitar sobrecalentamiento.
- Visualización frontal clara de la pantalla.
- Posibilidad de impresión 3D del modelo para prototipado rápido.

Figura 6. En la vista superior se aprecia la ubicación general de los sensores y la pantalla



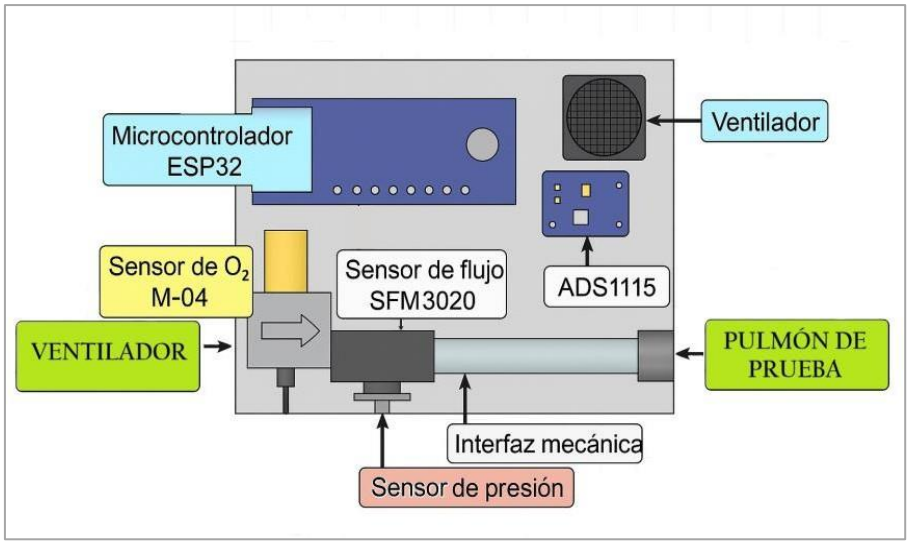
Fuente: Elaboración propia, Mendoza, S. (abril, 2025).

Figura 7: La vista frontal permite observar la interfaz del usuario con la pantalla LCD



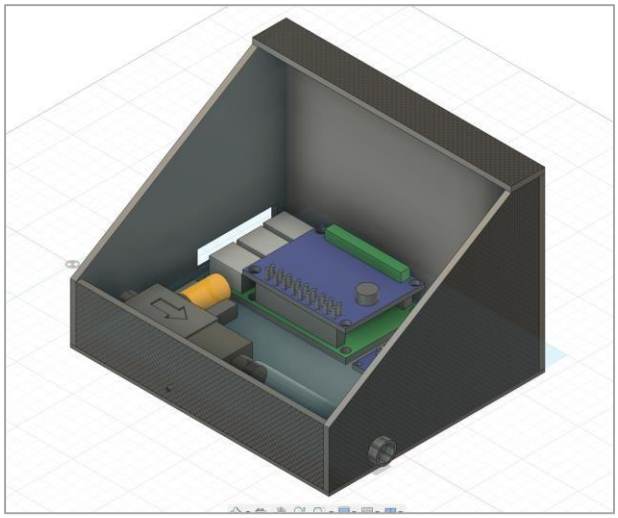
Fuente: Elaboración propia, Mendoza, S. (abril, 2025).

Figura 8. Explicación de partes en el diseño



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025)

Figura 9. Las vistas laterales de accesos a puertos y espacios para funciones



Fuente: Elaboración propia, Mendoza, S. (abril, 2025)

Estas vistas en conjunto permiten anticipar la viabilidad de montaje físico del sistema.

Este modelo no solo apoya la planificación de la etapa de fabricación, sino que también per- mite prever limitaciones físicas, mejorar la ergonomía y asegurar que todos los componentes encajen correctamente dentro del espacio disponible.

Relevancia del diseño en el desarrollo del proyecto

Contar con un modelo físico del proyecto facilita la visualización general del sistema, mejora la comunicación del diseño con otras áreas (como impresión, integración o pruebas clínicas) y permite realizar ajustes anticipados antes de un ensamblaje real.

Validación del Sistema y simulación

Simulación matemática de curvas pulmonares

La simulación matemática de las curvas pulmonares tiene como objetivo representar el comportamiento dinámico del sistema respiratorio bajo ventilación mecánica.

Modelo unicompartimental

El modelo más comúnmente utilizado es el de un sistema lineal simplificado:

Donde:

$$P(t) = R \cdot Q(t) + \frac{V(t)}{C}$$

$P(t)$ es la presión de la vía aérea en función del tiempo.

$Q(t)$ es el flujo inspiratorio.

$V(t)$ es el volumen pulmonar.

R es la resistencia de las vías aéreas ($cmH_2O \cdot s/L$).

C es la compliancia pulmonar (L/cmH_2O).

Las curvas generadas incluyen

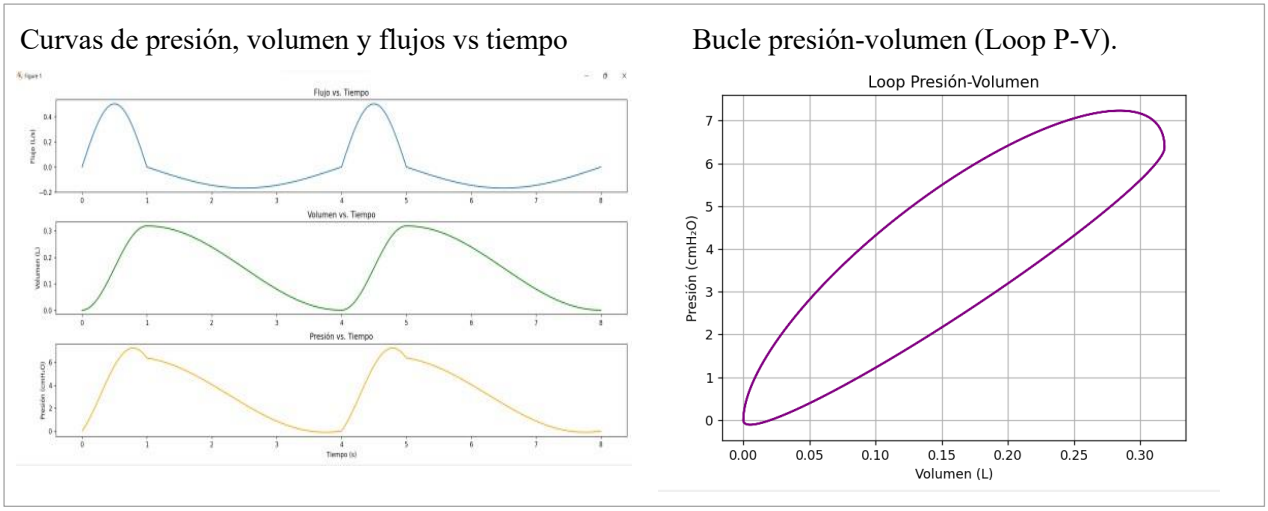
- Curva presión-tiempo: muestra el aumento y disminución de la presión durante el ciclo respiratorio.
- Curva volumen-tiempo: representa el volumen acumulado de aire ingresado a los pulmones.
- Curva flujo-tiempo: describe la dirección y magnitud del aire moviéndose por las vías aéreas.
- Bucle presión-volumen (loop P-V): útil para analizar el comportamiento elástico del pulmón.

Simulación comparativa de patrones pulmonares

Para validar el comportamiento del sistema de sensado frente a condiciones fisiológicas diversas, se realizaron simulaciones de curvas respiratorias usando modelos matemáticos en Python. Se representaron tres casos: un patrón normal (pulmón sano), un caso obstructivo (EPOC) y un caso restrictivo (fibrosis pulmonar).

Caso 1: Pulmón Sano

Figura 10. Simulación de respiración mecánica para pulmón sano.



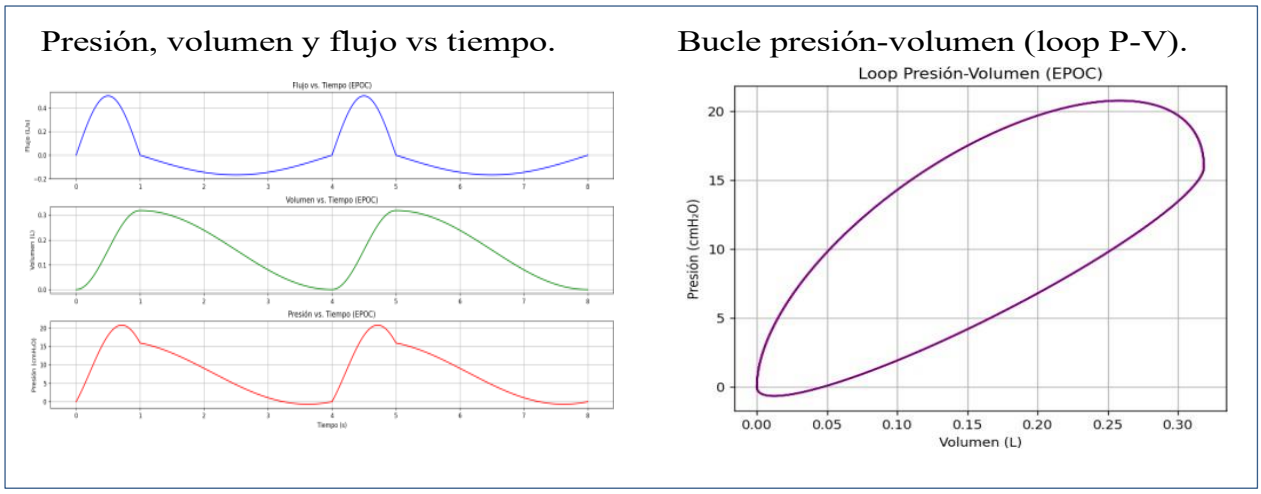
Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025).

En un pulmón sano se observa un ciclo regular, con:

- Flujo inspiratorio simétrico y espiración sin retención.
- Volumen que retorna a cero al final del ciclo.
- Presión moderada y bucle presión-volumen estrecho, indicativo de buena compliancia.

Caso 2: EPOC (Obstructivo).

Figura 11. Curvas simuladas para paciente con EPOC.



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025)

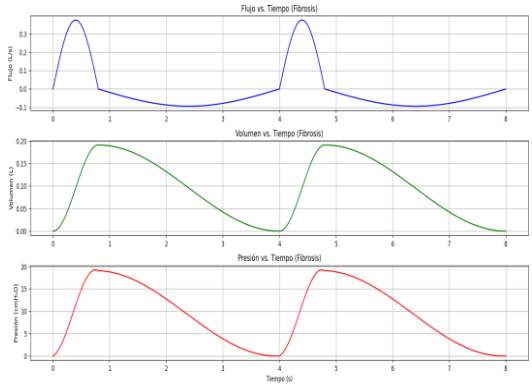
En EPOC se simulan alta resistencia y baja compliancia:

- Flujo espiratorio prolongado y reducido, representando dificultad para vaciar los pulmones.
- Volumen con posible atrapamiento aéreo (no retorna a cero).
- Presión elevada sostenida y bucle amplio, típico de obstrucción.

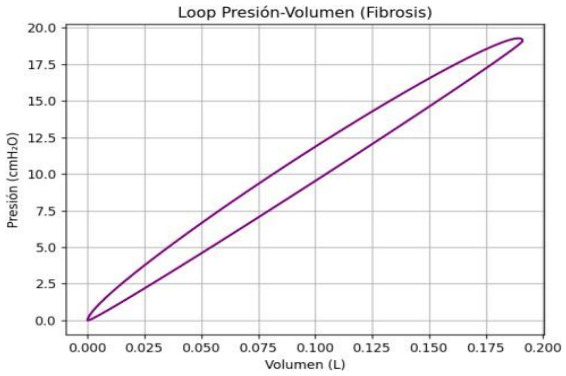
Caso 3: Fibrosis pulmonar (Restrictivo).

Figura 12: Presión, volumen y flujo vs. tiempo.

Bucle presión- volumen (loop P-V).



Curvas simuladas para paciente con fibrosis Pulmonar



Fuente: Elaboración propia, Rodarte, M. (abril, 2025)

En fibrosis se observa baja compliancia, con:

- Volumen reducido (menor VT).
- Presión elevada por mayor rigidez pulmonar.
- Bucle más vertical y estrecho, indicativo de restricción.

CONCLUSIONES

Se comprueba la hipótesis debido a que el desarrollo del prototipo de analizador de ventiladores mecánicos permitió alcanzar los objetivos planteados al inicio del proyecto, al implementar un sistema funcional capaz de adquirir, procesar y visualizar parámetros clave como flujo, presión y concentración de oxígeno. Este sistema se diseñó utilizando componentes de bajo costo y fácil disponibilidad, lo cual refuerza su aplicabilidad en entornos educativos, de mantenimiento preventivo o diagnóstico básico.

A pesar de las limitaciones presupuestarias que impidieron la validación directa con ventiladores clínicos o sensores certificados, se empleó una metodología de validación alternativa que incluyó simulaciones, comparación con datos técnicos de referencia y análisis teórico de incertidumbre. Esta estrategia permitió estimar que el margen de error del sistema es inferior al 3 %, lo cual es aceptable para los fines no clínicos propuestos.

Se demostró que el prototipo responde adecuadamente a variaciones simuladas en las señales de entrada, y que su visualización en pantalla es clara y estable. Además, el diseño modular y el uso de plataformas abiertas como Arduino facilitan su mejora futura y, posible ampliación con funciones como registro de datos o activación de alarmas.

En resumen, se afirma que el prototipo desarrollado representa una solución viable, económica y técnicamente fundamentada para el análisis básico de ventiladores mecánicos. Su implementación puede servir como base para futuros desarrollos más complejos o clínicamente validados, especialmente en contextos donde el acceso a equipos certificados es limitado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

International Electrotechnical Commission (IEC). *IEC 60601-1:2005 - Medical electri- cal equipment – Part 1: General requirements for basic safety and essential performan- ce*. Geneva: IEC, 2005.

AAA Testers. *AAA Testers Website*. https://www.aaatesters.com. Consultado en mayo de 2025.

Alibaba. *Alibaba Medical Devices Section*. https://www.alibaba.com. Consultado en mayo de 2025.

IMT Analytics. *FlowAnalyser PRO*. https://imtanalytics.com/products/flowanalyser- pro. Accedido: 12 de noviembre de 2024.

Soto del Arco. Francisco. *VENTILACION MECANICA manual para enfermeria*. Edi- torial Medica Panamericana, 2017.

Alexander Ariza. *Introduccion A La Ingenieria Biomedica*. Universidad Pontificia Bolivariana. seccional Bucaramanga, 2009.

Francisco Ariza. ‹Modos avanzados de ventilaci´on y su implementacio´n cl´ınica ›. En: *Revista de Medicina Respiratoria* 16.4 (jul. de 2009), pa´gs. 255-267. doi: 10.1016/j. resmed.2009.03.003.

Kim E. Barrett. *Ganong: Fisiolog´ıa M´edica*. 26.ª ed. McGraw-Hill Education, 2020.

Luis Cesar Cheuquelaf Barriga. ‹Protocolo Para El Balanceo Dina´Mico De Un Ventilador Con El Analizador De Vibraciones Detector Iii ›. Tesis Doct. Valdivia –Chile, 2009.

S. Bhaskar et al. ‹Practical Design of Flow Meter for Mechanical Ventilation Equip- ment ›. En: *Journal of Physics: Conference Series* 1666.1 (2020). Accedido: 13 de mar- zo de 2025, p´ag. 012015. doi: 10.1088/1742-6596/1666/1/012015. url: https://www.researchgate.net/publication/347935300_Practical_Design_of_Flow_Meter_for_Mechanical_Ventilation_Equipment.

M. Herrera Carranza. *Breviario de Ventilaci´on Mec´anica*. Editorial M´edica Panameri- cana, 2018.

Guillermo R. Chiapero, Fernando Rios y Mariano Setten. *VENTILACION MECANI- CA*. Editorial Medica Panamericana, 2017.

Autor Desconocido. *Background, Classifications of Positive-Pressure Ventilators, In- dications for Mechanical Ventilation*. Medscape Reference. Accedido: 09 de marzo de 2025. Ago. de 2024. url: https://emedicine.medscape.com/article/304068- overview.

Johann Heinrich Dra¨ger. *Pulmotor Manual*. Primera referencia histo´rica sobre ventila- cio´n con presio´n positiva. Dra¨gerwerk AG, 1907.

Luis A. Ramos Go´mez y Salvador Benito Vales. *Fundamentos de la ventilacion meca- nica*. MARGE Medical Books, 2012.

Juan Gonz´alez. *Ventilaci´on Mec´anica: Principios y Aplicaciones*. 1st. Madrid: Editorial M´edica, 2018. isbn: 978-84-123456-7.

M. Gonz´alez. *Ventilaci´on Mec´anica en Cuidados Cr´ıticos*. Editorial M´edica Panameri- cana, 2019.

BSI Group. *ISO 13485 - Quality Management System*. BSI Group. Accedido: 12 de marzo de 2025. url: https://www.bsigroup.com/en-US/products-and-services/standards/iso-13485-quality-management-system/.

Sean M. Hickey, Abdulghani Sankari y Al O. Giwa. *Mechanical Ventilation*. StatPearls - NCBI Bookshelf. Accedido: 09 de marzo de 2025. Mar. de 2024. url: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539742/.

Leidy Yanet Serna Higuita. ‹Modelado din´amico del sistema respiratorio ante incre- mentos de demanda ventilatoria, enfermedades pulmonares y ventilaci´on mec´anica asis- tida ›. Tesis doct. Universitat Polit`ecnica de Catalunya, 2017.

IEC 80601-2-12:2020 - Medical electrical equipment — Part 2-12: Particular requi- rements for basic safety and essential performance of critical care ventilators. In- ternational Electrotechnical Commission, 2020. url: https://webstore.iec.ch/ publication/66629.

GNW Instrumentation. *What Is Traceability In Calibration And Why Is It Important?* GNW Calibration Services. Accedido: 09 de marzo de 2025. Ene. de 2025. url: https://www.gnw.co.uk/blog/what-is-traceability-in-calibration/.

ISO. *ISO 13485:2016 - Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes*. Geneva: International Organization for Standardization, 2016. isbn: 978-92-67-10778-0.

ISO 14971:2019 - Medical devices — Application of risk management to medical de- vices. International Organization for Standardization, 2019. url: https://www.iso. org/standard/72704.html.

ISO 80601-2-12: Medical electrical equipment – Part 2-12: Particular requirements for basic safety and essential performance of critical care ventilators. International Organization for Standardization, 2020.

ISO/IEC 17025:2017 - General requirements for the competence of testing and calibra- tion laboratories. International Organization for Standardization, 2017. url: https://www.iso.org/standard/66912.html.

JCGM 200:2012. *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Joint Committee for Guides in Metrology. 2012. url: https://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.

James Li. *Metrology Explained: Definitions, Applications & SI Units*. First Mold. Ac- cedido: 09 de marzo de 2025. Sep. de 2024. url: https://firstmold.com/guides/ metrology/.

Open Library. *2.1 Ventilators: The Basics – Breathe Easy*. eCampusOntario Press- books. Accedido: 09 de marzo de 2025. Ene. de 2023. url: https://ecampusontario.

pressbooks.pub/mcvresource/chapter/2-1-ventilators- the-basics/.

Tom Lish. *What is Measurement Traceability?* Setra Systems. Accedido: 10 de marzo de 2025. Oct. de 2024. url: https://www.setra.com/blog/what-is- measurement- traceability.

Europlaz Technologies Ltd. *Metrology in Medical Device Development*. https : / / europlaz.co.uk /metrology- in- medical- device- development/. Accedido: 14 de marzo de 2025.

Hamilton Medical. *Flow sensors for mechanical ventilators*. https://www.hamilton-medical.com/Products/Consumables/Flow- Sensors.html. Accedido: 18 de febrero de 2025.

Medical electrical equipment - Part 1-8: General requirements for basic safety and es- sential performance - Collateral Standard: General requirements, tests and guidance for alarm systems in medical electrical equipment and medical electrical systems. Standard. International Electrotechnical Commission, 2006.

SEP M´etrologie. *What are the types of metrology?* SEP M´etrologie. Accedido: 09 de marzo de 2025. Ago. de 2024. url: https://sepmetrologie.com/en/what-are- the-types-of-metrology/.

Fernando Guti´errez Mun˜oz. *Ventilaci´on Mec´anica*. Acta M´edica, 2011.

Organizacio´n Mundial de la Salud. *Gesti´on de tecnolog´ıa biom´edica: gu´ıa para sistemas de mantenimiento hospitalario*. 2021. url: https://www.who.int/publications/i/ item/9789240031032.

World Health Organization. *Especificaciones t´ecnicas para ventiladores invasivos y no invasivos para COVID-19: gu´ıa provisional*. Accedido el 10 enero de 2025. 2020.

Oliverio Garc´ıa Palencia. *El Mantenimiento General Administraci´on de Empresas*. https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/322db66d-4d43-47f8-a958-061f4296dec0/content . Accedido el 15 septiembre de 2024. 2014.

Bhakti K. Patel. *Overview of Mechanical Ventilation*. Merck Manuals. Accedido: 09 de marzo de 2025. Abr. De 2024. url: https://www.merckmanuals.com/professional/critical-care-medicine/respiratory-failure-and-mechanical-ventilation/overview-of- mechanical-ventilation.

Comisio´n Federal para la Protecci´on contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). *Sitio oficial de COFEPRIS*. Accessed: 2025-04-13. url: https://www.gob.mx/cofepris.

J. Ram´ırez. *Terapia Respiratoria Avanzada*. McGraw-Hill, 2020.Rigel Medical. *Rigel Medical Website*. https://www.rigelmedical.com. Consultado en mayo de 2025.

Daniel Arellano S. ‹VENTILACION MECANICA: Generalidades y Modalidades Tra- dicionales ›. En: *Revista de Kinesiolog´ıa"* 9.4 (2006), pa´gs. 17-25.

Secretar´ıa de Salud, M´exico. *NOM-025-SSA3-2013 - Organizaci´on y funcionamiento de laboratorios cl´ınicos*. Norma Oficial Mexicana. 2013. url: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5318355&fecha=13/11/2013.

Oswald Sonntag y Tze Ping Loh. *Calibration*. Fluke Corporation. Accedido: 10 de marzo de 2025. Nov. de 2023. url: https://www.fluke.com/de-at/mehr-erfahren/ blog/kalibrierung/about-calibration.

Pierre Squara, Michael Imhoff y Maurizio Cecconi. ‹Metrology in Medicine: From Measurements to Decision, with Specific Reference to Anesthesia and Intensive Care ›. En: *Anesthesia Analgesia* 120.1 (2015). Accedido: 9 de marzo de 2025, p´ags. 66-75. doi: 10.1213/ANE.0000000000000477. url:https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/ articles/PMC4272233/.

Victor Edison Cabrera Valencia. ‹Estudio de plan para mantenimiento preventivo›. Tesis doct. Guayaquil, 2019.

VIEW. *What is Metrology Importance, Types, Tools, and Applications*. SlideShare. Accedido: 09 de marzo de 2025. Nov. de 2024. url: https://www.slideshare.net/ slideshow/what-is-metrology-importance-types-tools-and-applications/ 273701034.

Fernando Villada, Germa´n Moreno y Jaime Valencia. ‹El mantenimiento predictivo y su efecto en la optimizacio´n de costos de mantenimiento ›. En:

Revista Facultad de Ingenier´ıa Universidad de Antioquia 25 (2016), p´ags. 95-105. doi: 10.17533/udea. redin.326346. url: https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/326346.

Vitrek. *What is Calibration, and Why Is It Important?* Vitrek. Accedido: 09 de marzo de 2025. Ene. de 2025. url: https://vitrek.com/mti- instruments/knowledge- center/what-is-calibration-why-calibration-of- measuring-equipment-is- important/.

J. B. West. *Fisiopatolog´ıa Pulmonar: Bases Fisiol´ogicas para el Diagn´ostico yTrata- miento*. Editorial M´edica Panamericana, 2021.

Tianwen Zhu et al. ‹A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches ›. En: *arXiv preprint arXiv:1912.07383* (2019). url: https://arxiv. org/abs/1912.07383.