



Universidad Santiago de Cali

Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Biomédica

Una Revisión de Procesos de Calibración de Ventiladores Mecánicos

Autores:
Valentina Zea
Christian Camilo Rivera Chila

Año: 2025

Docente:
Leonardo A. Bermeo

Modalidad:
Artículo de revisión. Diplomado.

Santiago de Cali, Valle del Cauca

Una revisión de procesos de calibración de los ventiladores mecánicos

Christian Camilo Rivera Chila
christian.rivera02@usc.edu.co

Valentina Zea Diaz
valentina.zea00@usc.edu.co

Leonardo Antonio Bermeo Varon
Leonardo.bermeo00@usc.edu.co

A review of calibration processes of ventilator
Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Bioingeniería

Resumen

La ventilación mecánica es un procedimiento de respiración artificial por medio de un aparato mecánico, que permite ayudar o sustituir la función respiratoria, con el fin de mejorar la oxigenación y aportar en la mecánica pulmonar. Durante la época de la pandemia del Covid-19, se evidenció la importancia del uso de los ventiladores mecánicos fundamental para la insuficiencia respiratoria generada por la infección, la creciente demanda de estos equipos puso en evidencia la falta de reglamentación gubernamental sobre el uso, procesos de mantenimiento y calibración de sus parámetros debidamente documentados. En ese sentido en este trabajo se realizó la revisión bibliográfica de los procesos de calibración para los ventiladores mecánicos. La búsqueda se realiza mediante descriptores en las diferentes bases de datos como Springer, Dialnet, Scopus, Scielo, Google Académico, PubMed, teniendo en cuenta publicaciones de revistas científicas, trabajos de grado y páginas web de las organizaciones en un período de 16 años (2009-2024). Los resultados arrojan que para la calibración se tienen en cuenta procesos previos a la actividad como (i) la preparación del ambiente para la confiabilidad de la toma de datos, incluyendo temperatura y humedad relativa, (ii) preparación y acondicionamiento del analizador y el ventilador objeto de estudio, (iii) montaje para la conexión del analizador con el equipo y (iv) calibración del equipo considerando el Volumen corriente o tidal, Frecuencia respiratoria, Relación I:E, Presión pico, PEEP, FiO₂ y Flujo respiratorio pico.

Palabras Clave: Calibración de ventiladores mecánicos, metrología, respiración, ventilación mecánica

Abstract

Mechanical ventilation is a procedure of artificial respiration employing a mechanical device, which allows assisting or substituting the respiratory function, to improve oxygenation and contribute to pulmonary mechanics. During the time of the Covid-19 pandemic, the importance of the use of mechanical ventilators, fundamental for respiratory insufficiency generated by the infection, was evidenced; the growing demand for this equipment evidenced the lack of governmental regulation of the use, maintenance processes, and calibration of its duly documented parameters. In this sense, a bibliographic review of the calibration processes for mechanical ventilators was carried out in this work. The search was carried out using descriptors in different databases such as Springer, Dialnet, Scopus, Scielo, Google Scholar, and PubMed, considering publications in scientific journals, theses, and websites of organizations over 16 years (2009-2024). The results show that the calibration takes into account processes before the activity, such as (i) preparation of the environment for reliable data collection, including temperature and relative humidity, (ii) preparation and conditioning of the analyzer and ventilator under study, (iii) mounting for connection of the analyzer to the equipment, and (iv) calibration of the equipment considering tidal volume, respiratory frequency, I:E ratio, peak pressure, PEEP, FiO₂ and peak respiratory flow.

Keywords: Mechanical ventilators calibration, Metrology, Breathing, Mechanical ventilation

1. INTRODUCCIÓN

Para el Ministerio de Salud y Protección Social (2017), la respiración es un proceso que se realiza de manera involuntaria, y automática controlada por el sistema nervioso central y es vital para los seres vivos. Mediante dicho proceso se lleva oxígeno desde el aire hasta los alvéolos pulmonares y se recoge el dióxido de carbono de la sangre venosa para expulsarlo al exterior, el cual es un desecho del metabolismo, cuando el oxígeno llega a los pulmones es absorbido por los glóbulos rojos de la sangre y de allí es conducido a todas las células del cuerpo. La respiración es una de las funciones vitales de los seres humanos, ya que de esta depende la oxigenación de la sangre y por ende el buen funcionamiento de los órganos que lo componen. Según Romero (2020), para el siglo XVIII surgió una nueva enfermedad que residía en la falta de oxígeno en los pulmones, a la cual llamaron ahogamiento. Con el desarrollo de las Sociedades de Reanimación en Europa quienes

pretendían encontrar la cura al ahogamiento, promovieron el uso de la ventilación, pero este progreso provocó nuevas complicaciones porque el exceso de presión en la vía aérea causaba lesiones pulmonares graves o consecuencias fatales para el paciente.

Desde los inicios de la ventilación mecánica, existieron diferentes prototipos con el objetivo de reducir las complicaciones asociadas a la respiración, encontrando en la actualidad un gran avance tecnológico donde los ventiladores son programados a través de microprocesadores haciendo su funcionamiento más preciso. El funcionamiento básico de un ventilador mecánico comprende un sistema neumático externo, por el cual entra el aire y el oxígeno a un manómetro o regulador de presión que permite disminuir la presión y mantenerla constante. Conectado al manómetro está el microprocesador, que da la orden del nivel del flujo, de allí se acciona un solenoide proporcional que inducirá el aire al paciente. El ventilador mecánico cuenta con una válvula de seguridad, que permite disminuir la presión y en caso de que el equipo se apague asegura la entrada de aire ambiente (Gutiérrez, 2011).

Los ventiladores tienen un sistema de emanación del dióxido de carbono y una válvula unidireccional impide que el aire exhalado pase al mismo circuito inspiratorio, entonces se abre la válvula espiratoria, donde los gases pasan por un filtro, un sensor de flujo que mide el volumen del gas exhalado, a medida que el gas va saliendo la presión disminuye (Vega, 2021). En el funcionamiento del ventilador mecánico se encuentran variables como presión, flujo, tiempo y volumen donde es de vital importancia seguir un proceso de calibración seguro y confiable, pues permite conocer el comportamiento del equipo en términos de los errores encontrados para sus variables.

Los ventiladores mecánicos son equipos médicos muy importantes para el tratamiento de pacientes en áreas de pediatría crítica o para la atención de cuidados respiratorios en adultos. Dado el gran uso a nivel hospitalario de estos equipos, es de vital importancia que se siga un proceso de calibración de todos sus parámetros medibles confiable y seguro, de esta manera aclara que en el país no existe ningún método específico, unificado y avalado legalmente para la seguridad del funcionamiento de los ventiladores mecánicos, lo que refleja un grave problema ya que el uso de diferentes metodologías no oficializadas para la calibración de los ventiladores y el posible fracaso de dichos métodos se vería reflejado en la salud de los pacientes (Pérez, 2011).

Tal fue el caso de la pandemia que inicio en el año 2019 (Covid-19), la cual constituyó un reto para los servicios de salud ya que este virus tenía un alto poder de transmisión. El uso de ventilación mecánica no invasiva se generalizó en las unidades de medicina intensiva para el tratamiento de personas en estado crítico infectadas por el COVID 19, debido al crecimiento exponencial del número de casos en la fase expansiva de la epidemia y al hecho de que la manifestación principal del virus era la insuficiencia respiratoria, generando una mayor demanda de los equipos de respiración asistida como los ventiladores mecánicos (Hernández, 2020).

Debido al incremento del uso de los ventiladores mecánicos durante la pandemia existía la posibilidad de que, al llegar al pico de infecciones, no se contara con la oferta suficiente de ventiladores para cubrir con las necesidades clínicas. La ocupación de camas UCI en Colombia superó el 80% de la capacidad hospitalaria durante abril del 2021, esto es, de las 12.623 camas UCI del territorio nacional para esa fecha, 6.817 camas están ocupadas por pacientes con covid-19 confirmado o sospechoso y 3.343 están ocupadas por pacientes con patologías distintas al virus, lo que deja solo 2.463 camas disponibles en el país para atender pacientes críticos. Las anteriores cifras reflejan la mayor tasa de ocupación en los picos de contagios registrados, la situación más crítica se presentó en Antioquia con una ocupación de UCI del 97,32%, en Bogotá se registró un 88,8% y Cali tuvo una ocupación del 93,8% (Gutiérrez, 2021).

Entre las muchas respuestas que se tuvieron en pro de cumplir con el soporte ventilatorio a los pacientes, en muchos países se agilizó la fabricación de ventiladores mecánicos de emergencia, donde Colombia no fue ajeno a esta situación (Farré et al., 2020). El Ministerio de Salud y Protección Social (2020) suministró lineamientos para el estudio y aprobación de los ventiladores mecánicos, en el marco de una investigación clínica priorizando la eficacia de la tecnología y la seguridad de los pacientes. Los lineamientos de seguridad para estos equipos empezaron con la evaluación por la Sala Especializada de Dispositivos Médicos y Reactivos de Diagnóstico In Vitro del INVIMA, donde se deben cumplir diferentes etapas.

Entre estas etapas se realizó la implementación de métodos y pruebas funcionales y de seguridad en un ambiente real, utilizando los simuladores y analizadores de laboratorio, comparando los parámetros electrónicos, neumáticos y mecánicos para su calibración y realizar un análisis de riesgos en cumplimiento de la norma ISO 14971. Los equipos deben de cumplir con los siguientes parámetros: (i) Volumen Corriente (VT) de 200 a 1000 ml, con una razón de 6 a 8 ml/kg, (ii) PEEP que va de 5 a 20 cmH₂O de presión positiva al final de la espiración, (iii) FIO₂ que va de 21-100%, la tarea consistía en iniciar al máximo y se va disminuyendo gradualmente conforme a SaO₂, para asegurar un porcentaje entre el 88-92%, (iv) la relación I:E que debe ser de 1:1 a 1:3,2, (v) PIP que va de 5 - 80 cmH₂O y que corresponde a presión inspiratoria pico, es valido si se tiene un máximo de 40, (vi) los modos de ventilación controlados por volumen o por presión, (vii) alarmas del Sistema como la desconexión eléctrica, batería baja, desconexión de gas (opcional), falla general o ventilación inoperativa, volumen bajo (opcional), PEEP, apnea (opcional), oclusión, frecuencia respiratoria alta (opcional), (viii) frecuencia Respiratoria que va hasta 35 respiraciones por minuto, (ix) flujo que va de 40-50 L/min para ventilación mecánica controlada por volumen, (x) Soporte de presión que va hasta 45 cmH₂O, y (xi) válvula de alivio de la presión y sensores de presión, volumen y flujo (Perea, 2022).

Es así como, la necesidad de planificación y coordinación es importante, ya que en el proceso aparecen y se desarrollaban diferentes prototipos, desaprovechando posibles sinergias. Además, teniendo presente la importancia de los ventiladores mecánicos y su demanda creciente debido a la pandemia por Covid-19, nace la importancia de las iniciativas interdisciplinarias, la fabricación o monitoreo de los parámetros del equipo son procesos realizados por la ingeniería biomédica (Farré et al., 2020). Culma (2011) explica que la ingeniería biomédica conduce a la gestión clínica y de los equipos biomédicos para el buen desempeño de los sistemas de salud prestado a los pacientes. De los aspectos fundamentales para los ingenieros biomédicos es la metrología de los equipos, con ello se ofrece la confiabilidad que los equipos estén funcionando dentro de los parámetros de calidad establecidos por los fabricantes, generando confiabilidad a los profesionales de la salud en el diagnóstico, intervención y tratamiento de los pacientes. Con la experiencia vivida durante la pandemia del Covid-19, que dejó alrededor del mundo un alto índice de muertes, nace la necesidad de tener unificación y claridad de los métodos de calibración de los ventiladores mecánicos, ya que están directamente relacionados con la recuperación y calidad de vida de los pacientes.

Debido a la importancia de la metrología para los ventiladores mecánicos, se realizó una revisión bibliográfica en diferentes bases de datos como Scopus, Scielo, Science Direct, Google Académico y repositorios institucionales, con el fin de buscar información de los procesos y metodologías de calibración recientes avalados legalmente a nivel internacional, el objetivo de este artículo es la evaluación de dichos estudios para escoger la técnica más completa, eficiente y eficaz que pueda ser de ayuda para la oficialización legal para las instituciones de salud y laboratorios de metrología de dicho equipo.

2. VENTILADORES MECÁNICOS

La ventilación mecánica es un procedimiento de respiración artificial por medio de un aparato mecánico, que permite ayudar o sustituir la función respiratoria, con el fin de mejorar la oxigenación y aportar en la mecánica pulmonar (García, 2014). Adicionalmente la ventilación mecánica es una alternativa terapéutica que brinda la posibilidad de suministrar un adecuado nivel de vida a los pacientes que se encuentran en estado crítico debido a una insuficiencia respiratoria, con el fin de mejorar el intercambio gaseoso, evitar la injuria pulmonar y disminuir el trabajo respiratorio (Granados, 2018). Para realizar este proceso es necesario contar con equipos de ventilación mecánica, que deben tener la capacidad de monitorear la ventilación del paciente y su proceso respiratorio, por medio de indicadores digitales y/o gráficos, que involucran avisos al operador a través de alarmas audiovisuales.

Un ventilador mecánico es un equipo médico por medio del cual se genera un flujo de gas en las vías respiratorias del paciente, este equipo controla la dirección y magnitud del flujo, como también su presión, humedad, temperatura y la mezcla de gases. El ventilador mecánico puede controlar la duración de la inspiración y espiración en sus diferentes fases, y monitorizar los diferentes parámetros de estas (Ramírez, 2012).

2.1 Bloques funcionales

Un ventilador mecánico es constituido por los siguientes bloques funcionales como se puede observar en la Figura 1 (Gutiérrez, 2011):

(i) Sistema de control: es la parte principal del ventilador que se encarga de interpretar las órdenes del operador para establecer el modo de ventilación y oxigenación que se requieren, y de interpretar las alarmas que informan el cambio de los parámetros suministrados. La programación de los parámetros y alarmas son almacenados por la memoria del microprocesador donde los sensores suministran la información de los parámetros importantes como la presión en la vía aérea, flujo y volumen inspirado.

(ii) Sistema de provisión de gases: Es el encargado del suministro de aire, oxígeno y en algunos modelos actuales óxido nítrico y otros gases medicinales. La función principal es la administración del flujo, volumen, presión y tiempo de cada ciclo respiratorio. Emplea fuelle, pistones, solenoides proporcionales o válvulas de tijeras, combinados con motores paso a paso para el control electrónico del movimiento.

(iii) Sistema de monitoreo interno: El sistema de monitoreo se hace por medio de sensores de flujo y presión del equipo, además realiza el control del volumen corriente, frecuencia y presión en las vías aéreas programadas por el operador. Este sistema permite la verificación continua del funcionamiento interno del equipo, si hay alguna anomalía se activan los sistemas de seguridad.

(iv) Interfaz operador – respirador: esta función posibilita al operador el ajuste de los parámetros del equipo y la monitorización de la ventilación del paciente en tiempo real.

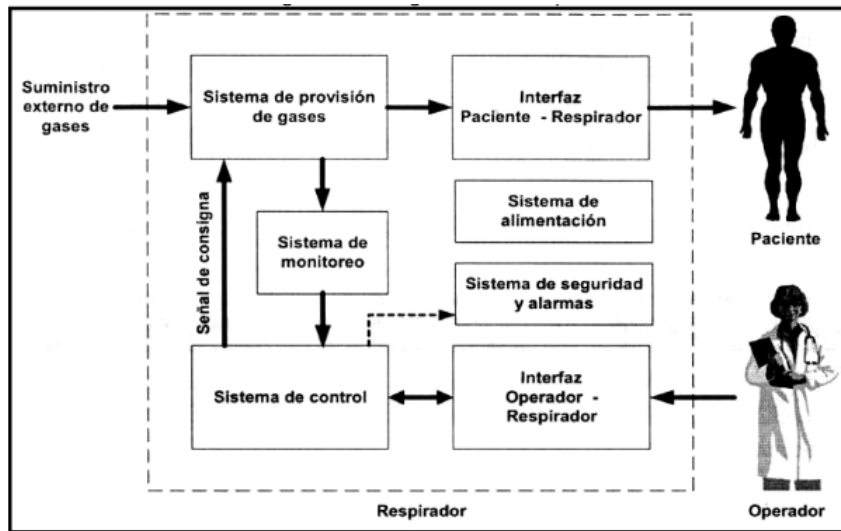
(v) Interfaz paciente – respirador: Es el medio por el cual se traslada el gas que va del ventilador al paciente durante la fase inspiratoria conduce el gas exhalado hacia el ventilador y luego liberarlo al medio ambiente. El gas inspirado se acondiciona aumentando su temperatura, agregándole humedad y filtrándolo para luego realizar las mediciones de flujo y volumen del gas inspirado por el paciente. También mide la presión de la vía aérea y la temperatura del gas inspirado.

(vi) Sistema de seguridad y alarmas: este bloque funcional comunica de forma gráfica y sonora al operador la presencia de fallas o porque los parámetros establecidos por el operador no concuerdan con los suministrados al paciente. Se puede generar alertas también cuando los parámetros ajustados son considerados por el equipo peligrosos para el paciente. El sistema de seguridad se activa en caso de fallas del equipo o pérdida de energía, compensación de fugas en el circuito del paciente, ventilación en caso de desconexión parcial, apertura de la válvula de seguridad en caso de fallas graves y ventilación de apnea.

(vii) Sistema de alimentación: el suministro electrónico se puede generar de manera interna por medio de baterías recargables o conexión a fuente externa, verificando siempre la compatibilidad de voltaje a 110 o 220 voltios, donde se considera si es de corriente alterna o continua, para evitar sobrecargas se debe conectar a un estabilizador de voltaje.

En la Figura 1 se observa la conexión de todos los bloques funcionales desde el operador hasta el paciente. Como se puede observar la vinculación entre los bloques funcionales del ventilador mecánico es realizada por el operador el cual selecciona el modo de ventilación y ajusta los parámetros de funcionamiento mediante la interfaz operador – respirador. Estos requerimientos son enviados al sistema de control donde se calcula la posición de los solenoides proporcionales (Sistema de Control) y se fija el comportamiento de los componentes del sistema de provisión de gases, por medio de las señales durante el ciclo respiratorio. El gas es entregado al paciente por medio del sistema de provisión de gases a través de la interfaz paciente – respirador definido por las condiciones del sistema de control. El sistema de monitoreo interno registra los valores de presión y flujo en tiempo real, realizando una comparación entre los valores recibidos y los calculados previamente, y si encuentra fallas efectúa correcciones con el fin de aproximarse a los valores ajustados por el operador. Con este proceso se conforma un lazo cerrado de control que intenta mantener de forma constante los parámetros ajustados por el operador en el sistema respiratorio. El sistema también posee un sistema de seguridad con alarmas y un bloque propio de alimentación (Ramírez, 2012).

Figura 1. Bloques funcionales del ventilador mecánico



Fuente: (Ramírez, 2012, p.35).

2.2 Tipos de Ventilación

Existen los siguientes tipos de ventilación utilizada por los ventiladores mecánicos (Cárdenas, 2016):

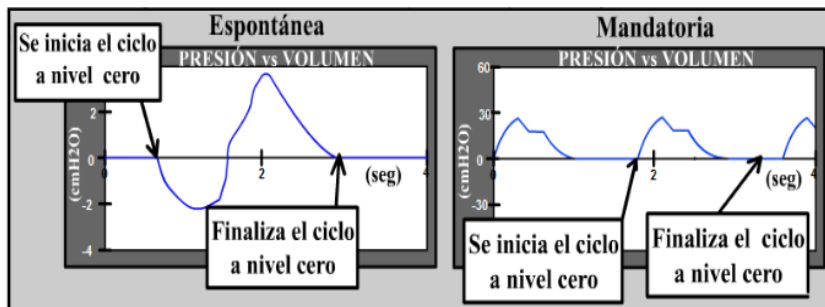
(i) Ventilación para respiración Mandatoria u Obligada: el volumen, la presión y el tiempo de inspiración son definidos debido al comportamiento entre los parámetros adaptados por el operador y la mecánica respiratoria del paciente. El equipo es el que define el flujo de gas o el valor de presión. Este tipo de ventilación está conformada por dos grupos dependiendo del inicio de la inspiración:

- Ventilación Mandatoria Controlada: este tipo de ventilación es determinada por el ventilador en el inicio de la ventilación.
- Ventilación Mandatoria Asistida: este tipo de ventilación es iniciada por la detección de un esfuerzo inspiratorio del paciente registrado por los sensores de presión o sensores de flujo

(ii) Ventilación para respiración Espontánea: el control del volumen, la presión, el flujo y el tiempo la tiene el paciente, la intervención del ventilador durante una ventilación espontánea permite proveer gas al paciente con un porcentaje de oxígeno mayor del que obtendría si respirase aire ambiental, aumentar la presión de la línea base, incrementar el nivel de humedad o proveer medicación agregándola al gas inhalado.

En la Figura 2 se observa la diferencia entre estas dos modalidades.

Figura 2. Diferencia entre ventilación Mandatoria y Espontánea



Fuente: (Ramírez, 2012, p.46)

2.3 Parámetros de los ventiladores mecánicos

La monitorización durante la ventilación mecánica permite la determinación de los diferentes parámetros de la mecánica respiratoria, la adecuada interpretación de estos datos puede ser útil para conocer el estado de los componentes del sistema respiratorio del paciente y también orientar los ajustes del ventilador. Los parámetros comunes a todos los modos de operación del equipo son (Miño, 2020):

(i) Frecuencia respiratoria (FR): la frecuencia respiratoria es la cantidad de respiraciones por minuto, esto es la cantidad de movimientos de inspiraciones y espiraciones por unidad de tiempo. Los rangos están entre 40–60 rpm para neonatos, 30–40 rpm para lactantes, 20–30 rpm para niños y 12–15 rpm para adolescentes (López, 2008). El objetivo de la medición de este parámetro es comprobar si las respiraciones son normales. Frecuencia respiratoria rápidas se denominan taquíneas, lentas se definen como bradipneas e inexistentes conocidas como apnea. Existe una relación directa entre la frecuencia respiratoria y el tiempo espiratorio como se observa en la ecuación (1), donde T_i es el tiempo de inspiración y T_e es el tiempo de espiración.

$$FR = \frac{60}{T_i + T_e} \quad (1)$$

(ii) Presión positiva al final de la espiración (PEEP): la PEEP es la presión residual en el sistema respiratorio al terminar la espiración, esta impide un vacío en el mismo y prepararlo para la siguiente inspiración. Si no hay enfermedad pulmonar generalmente se programa un PEEP entre 3 y 5 cmH₂O (Pérez, 2021). Para mantener la presión positiva se utiliza una válvula que define una resistencia con umbral en la rama espiratoria del circuito, esta resistencia admite la salida de gas solo cuando se supera la presión predefinida impidiendo que la presión en las vías aéreas llegue a cero, esta función sirve para mejorar la oxigenación.

(iii) Presión inspiratoria máxima (PIP): la PIP es el nivel mayor aplicado a los pulmones durante la inhalación. En ventilación mecánica el valor refleja una presión positiva en cmH₂O. El nivel para un pulmón normal es de 12-15 cmH₂O (Elorza, 2009). En la respiración normal, a veces puede denominarse presión máxima inspiratoria (IPO), que es un valor negativo. La PIP nunca debe ser superior a 40 cmH₂O. Un ciclo respiratorio controlado por volumen se denota la P pico y la P meseta, esta presión meseta (P_{plat}) se observa cuando la pausa inspiratoria es suficientemente larga para asemejarse a la presión alveolar y está directamente relacionada por el volumen circulante corregido, la *compliance* estática del sistema (C_{st}) y la PEEP total como se indica en la ecuación (2).

$$P_{plat} = \frac{V_{t\text{corregido}}}{C_{st}} + PEEP \quad (2)$$

(iv) Tiempo inspiratorio (T_i): el T_i es el tiempo durante el cual hay un flujo inspiratorio hacia los pulmones, donde se genera presión efectiva, se relaciona por lo general con el tiempo espiratorio dentro y esta en un rango de 0,3 y 1,2 s (Asociación Española de Pediatría, 2012).

(v) Relación inspiración/espiración (I:E): la I:E es la fracción de tiempo durante el ciclo respiratorio de la inspiración y la espiración, normalmente se utiliza una relación I:E de 1 a 1/3 (Arnaudo, 2021). Un ciclo respiratorio esta determinado por la relación del tiempo inspiratorio (T_i) y el tiempo espiratorio (T_e), como se observa en la ecuación (3):

$$I:E = \frac{T_i}{T_e} \quad (3)$$

(vi) Pausa inspiratoria (T_p): la T_p es el tiempo posterior al tiempo inspiratorio. Es donde se realiza un cierre de las válvulas tanto inspiratorias como espiratorias del equipo, provocando que el volumen inspiratorio se mantenga por un lapso de tiempo de 2 a 3 segundos en los pulmones (Pavez, 2022).

(vii) Sensibilidad de disparo (Trigger): esta sensibilidad corresponde al esfuerzo umbral que realiza el paciente, para que el equipo entregue un período ventilatorio. La sensibilidad es activada de dos formas, por flujo donde se requiere menos esfuerzo del paciente que esta entre 1 y 3 l/min, y por presión que va esta entre -1 y -2 cmH₂O (Núñez, 2023).

(viii) Volumen Tidal (V_t): el V_t es la cantidad de gas que el ventilador envía al paciente en cada respiración en un rango de 7 a 10ml/kg (Solana, 2012). Bajo los conceptos de ventilación mecánica se hace el uso del concepto de volumen tidal corregido, dado por el volumen comprimido en el ventilador definido por la ecuación (4):

$$V_{t\text{corregido}} = V_t - [(PIP + PEEP)C_t] \tag{4}$$

donde el valor C_t son los tabuladores que se usen y se clasifica como fórmula de uso clínico, si se utiliza un pulmón de respiración artificial, se anulará este parámetro y se iguala el valor del volumen tidal al del volumen tidal corregido.

3. METODOLOGIA

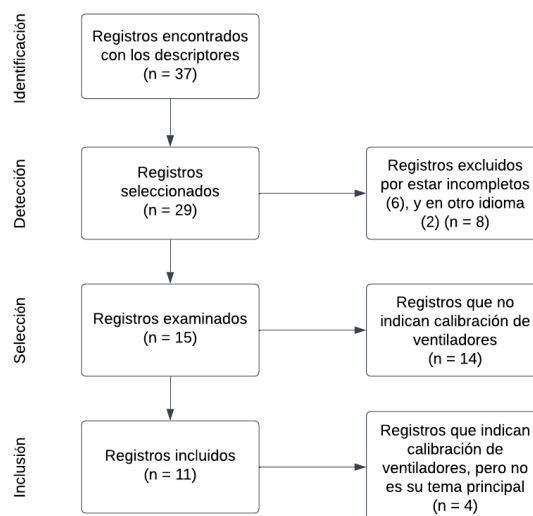
Para la realización de este trabajo se utiliza una metodología descriptiva, mediante la revisión sistemática de documentos relacionados con la calibración de los parámetros operados por el ventilador mecánico. La búsqueda se realiza mediante descriptores en las diferentes bases de datos como Springer, Dialnet, Scopus, Scielo, Google Académico, PubMed, teniendo en cuenta publicaciones de revistas científicas, trabajos de grado, páginas web de las organizaciones y demás documentos de interés almacenados en las bases de datos. Se aplicaron palabras clave como respiración, ventilación mecánica, metrología y calibración de ventiladores mecánicos; empleando una ecuación de búsqueda (“respiración” OR “breathing”) AND (“ventilación mecánica” OR “mechanical ventilation”) AND (“metrología” OR “metrology”) AND (“calibración de ventiladores mecánicos” OR “mechanical ventilator calibration”), con una ventana de tiempo de 16 años (2009-2024). El análisis de los diferentes documentos encontrados se realiza con el fin de enfatizar los estudios importantes para los métodos de calibración de los ventiladores mecánicos, con la necesidad de saber que métodos de calibración existen ya sean nacionales o internacionales.

En la revisión se tiene en cuenta para la inclusión artículos, manuales, libros, tesis y legislaciones que contengan información de base para la realización de un método de calibración para los ventiladores mecánicos. Los criterios de exclusión, como textos escritos que sean en idiomas diferentes al inglés o español, como también las publicaciones que no tengan los datos completos de los autores, las citas y referencias bibliográficas porque dan lugar a una fuente poco confiable, ni archivos duplicados o que conserven temáticas diferentes a los ventiladores mecánicos.

4. RESULTADOS

En la Figura 3, se relaciona los criterios de inclusión y exclusión de los documentos encontrados.

Figura 3. Metodología de inclusión y exclusión



Fuente: Elaboración propia.

Con la información recolectada en la fase anterior, se evidencian 10 artículos con la temática sobre la calibración de los ventiladores mecánicos elaborados en diferentes países. En la Tabla 1, se realiza la recopilación de los estudios que cumplieron con los descriptores de búsqueda, teniendo presente los parámetros de calibración de los equipos, referenciando los documentos por autor, año de publicación, título del estudio realizado y observaciones concernientes a los parámetros utilizados por los diferentes métodos.

Tabla 1. Documentos sobre la calibración de ventiladores mecánicos

Autores y fecha	Nombre	Hallazgos	Limitaciones
Galvis, Meza & Botero (2009)	Diseño de procedimientos para la calibración de ventiladores pulmonares.	Se realizan pruebas de valores de los Parámetros constantes, medidas de fuga, flujo, volumen y presión.	Para el procedimiento de calibración para ventiladores mecánicos no existía una norma técnica específica.
Pérez (2011)	Diseño y evaluación de un método de calibración de ventiladores mecánicos para adultos.	Los valores analizados por este método de calibración son las variables de volumen corriente, frecuencia respiratoria, relación I:E, presión pico, PEEP, FiO ₂ , y Flujo respiratorio pico.	Falta de cumplimiento de la normatividad dirigida al mantenimiento, calibración y ajuste de los equipos dentro de la institución afectando el desempeño de los ventiladores mecánicos calibrados con este proyecto.
Ramírez (2012)	Implementación de un procedimiento e instructivo para la calibración de ventiladores pulmonares para especialistas en Metrología S.A.S	Implementan un procedimiento basado en la norma NTC/ISO-IEC 17025 e incluyen un cálculo de incertidumbres	No hay descripción exacta del método de calibración
Bliman et al. (2011)	Desarrollo de un simulador pulmonar de paciente para ensayar ventiladores mecánicos.	Por medio de este método se realiza el cálculo de volumen, flujo, control de resistencia, distensibilidad y ventilación espontánea.	No hay una comparación con un estándar de calibración.
Fernández (2017)	Diseño de un procedimiento para la calibración de ventiladores pulmonares en el marco de la Norma Técnica NTC-ISO-IEC 17025:2017.	La caracterización de los parámetros ventilatorios del procedimiento son la frecuencia respiratoria, tiempo inspiratorio, volumen minuto, volumen tidal, PEEP, presión inspiratoria pico y FiO ₂ .	La normatividad colombiana no cuenta con un procedimiento normalizado sobre el control y vigilancia de la calibración de los ventiladores mecánicos, realizada por los laboratorios dejando una brecha amplia a la ocurrencia de eventos adversos asociados al uso de estos equipos.
Chen et al. (2020)	A Research of self-help ventilator Sharing based on Internet of Things in Hospital.	Las magnitudes de medición relacionadas al ventilador son para las vías respiratorias (flujo, presión, volumen, concentración de oxígeno, temperatura y humedad), respiraciones (flujo y presión), y para la presión (alta, baja, ultra baja), por medio del analizador de gases Fluke VT900A	No hay descripción exacta del método de calibración, solo indican que usan el VT900A para el proceso de calidad y validación.
Heredia et al. (2021)	Diseño y evaluación de un ventilador mecánico.	Se realizaron pruebas de laboratorio con modelo simulado de volumen, presión estática y flujo.	Durante las pruebas se detectó desgaste mecánico en la transmisión, dificultad al acceso a los componentes para el mantenimiento y el calentamiento de los componentes internos lo cual sugiere una mejora en el diseño. No hay una descripción exacta del proceso de calibración.
Ramírez (2021)	Criterios de diseño de un Ventilador Mecánico para pacientes con problemas de neumonía, para ser utilizado en las fases prehospitalaria y post-hospitalaria.	Para la calibración de los ventiladores mecánicos se tienen en cuenta los parámetros de fracción inspiratoria de oxígeno, frecuencia respiratoria, volumen corriente o volumen tidal, disparo, relación I:E o tiempo inspiratorio, Flujo inspiratorio	La pandemia del Covid-19, reflejo una escasez de equipos para ventilación mecánica, colocando en evidencia a muchos países de Latinoamérica su incapacidad para el desarrollo de equipos médicos de alta tecnología.
Farré et al. (2022)	Simple low-cost construction and calibration of accurate pneumotachographs for monitoring mechanical ventilation in low-resource settings	El objetivo de este trabajo fue diseñar y probar un procedimiento para construir y calibrar muy fácilmente neumotacógrafos de bajo costo que sean robustos, precisos y asequibles para usuarios en regiones de bajos recursos. El procedimiento ideado, que no requiere costosos dispositivos de	No hay una comparación del proceso de calibración realizado con un patrón

		medición estándar se probó para monitorear el flujo y el volumen durante la ventilación mecánica.	
Torres (2022)	Normativa asociada a la certificación de ventiladores mecánicos invasivos: estudio post Covid-19.	Indica los valores designados por las entidades encargadas, de Volumen corriente, PEEP, FiO2, Relación I:E, Presión inspiratoria pico, modos de ventilación, Alarmas del sistema, Frecuencia respiratoria, y Flujo.	Falta de normatividad asociadas a la certificación de los ventiladores mecánicos, un equipo médico sin certificación puede derivar graves consecuencias tanto para el paciente como para el centro médico tratante, ya que el equipo puede presentar fallas.
Quispe (2024)	Estudio comparativo entre el ventilador mecánico peruano de emergencia Masi y el ventilador estadounidense Spiro wave.	Especificaciones técnicas medibles para este estudio fueron el Volumen tidal, Presión positiva al final de la espiración, Presión inspiratoria pico, Frecuencia respiratoria, Proporción I:E, Oxígeno y Presión barométrica.	En documento indica que en Perú existe una desconfianza en la tecnología producida a nivel nacional relacionada a la industria de equipos biomédicos. DIGEMID, órgano encargado de la evaluación de dispositivos médicos no brinda un lineamiento regulatorio para la obtención de registros sanitarios de sistemas biomédicos.

Fuente: Elaboración propia.

Galvis, Meza y Botero (2009), Pérez (2011) y Heredia et al. (2021) utilizan el VT PLUS HF de Fluke como equipo estándar para realizar la calibración de ventiladores mecánicos ya que ofrece funciones especiales para la medición de los parámetros de los ventiladores mecánicos. Los autores indican que la humedad debe estar entre el 30% a 75% y la temperatura de 10°C a 40°C (Galvis, Meza y Botero, 2009), y 10°C a 35°C (Pérez, 2011).

Pérez (2011) incluye un análisis estadístico por medio de ANOVA de la incertidumbre asociada al proceso de calibración y Heredia et al. (2021) utilizan un ACCU LUNG de Fluke para simular un pulmón artificial en el proceso de calibración.

Bliman (2011) construye un simulador para evaluar ventiladores mecánicos, principalmente para medir resistencia, distensibilidad y ventilación espontánea, así como comparar curvas de presión, flujo y volumen. El equipo permite comparar entre diferentes ventiladores y Ferré (2021) un calibrador de bajo costo para las variables de presión y flujo. Si bien estos trabajos son interesantes los autores no mencionan un proceso de validación de los equipos construidos.

Chen et al., (2019) realizaron la medición de los datos de un ventilador con el analizador de gases FLUKE modelo VT900A, midiendo variables de volumen, presión, flujo y oxígeno, sin embargo, no hay una descripción detallada del proceso de medición.

Fernández (2019), propone un método normalizado como guía de calibración de los ventiladores mecánicos, utilizando el equipo patrón VT 600, y se realiza un modelo matemático como se describe en la ecuación (5), donde se analiza la relación que existe entre las diferentes variables que intervienen en el proceso de calibración.

$$C_i = P_{Ri} + P_{xi} + \sum_j \delta_j (pat) + \sum_k \delta_k (ins) \tag{5}$$

donde C_i es la corrección final de calibración, P_{Ri} es el valor de la lectura del analizador en el punto i , P_{xi} es el valor de la lectura del equipo en el punto i y $\sum_j \delta_j (pat)$, $\sum_k \delta_k (ins)$ hace referencia a las incertidumbres. Los autores remarcan que en Colombia no hay una norma específica para variables biomédicas y que estas se remiten a procesos industriales.

Ramírez (2021) relaciona el procedimiento para ajustes y calibración de ventiladores en los que se incluye (i) prueba de operatividad, (ii) pruebas de fuga, (iii) pruebas del sensor de flujo, (iv) pruebas del sensor de oxígeno, (v) menú de servicio, (vi) pruebas con pulmón de prueba (ACCU LUNG) y (vii) pruebas con analizador de flujo donde indican 4 equipos el Fluke VT650 Gas Flow Analyzer, Certifier Flow Analyzer Plus, IMT Analytics AG FlowAnalyser PF-301 VAC y CITREX H4. El autor expresa que la confiabilidad de los datos registrados se debe manejar bajo un ambiente controlado, ya que el analizador realiza compensaciones automáticas de acuerdo al ambiente donde se realiza el proceso. Quispe (2024) describe de forma similar el proceso de calibración indicando el diseño de protocolo de calibración, análisis estadístico y evaluación, utilizando un analizador de gases Fluke VT650. El autor indica que la humedad debe estar entre el 10% a 90% y la temperatura de 10°C a 40°C.

Ramírez (2012) implementa un procedimiento basado en la norma NTC/ISO-IEC 17025 e incluyen un cálculo de incertidumbres. El autor no incluye una descripción exacta del método de calibración.

Torres (2022) realizan una descripción de las variables y sus rangos para el proceso de calibración de ventiladores basado en la normalización internacional: Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), referente a ventiladores la normativa internacional; ISO 13485, ISO 10993-1, ISO 80601-2-12, ISO 18562-1, ISO 18562-2, ISO 18562-3, ISO 18562-4, IEC 60601-1, IEC 60601-1-2, IEC 60601-1-8, IEC 60601-1-12 y IEC 6230. El autor describe un montaje previo para la adecuación del lugar o espacio determinado para realizar el proceso de calibración. Los limitantes de este trabajo recaen en que no hay un proceso específico de calibración y tampoco indican un analizador de gases específico.

5. DISCUSIÓN

De acuerdo a la investigación realizada, se expone que la calibración de los parámetros utilizados por los ventiladores mecánicos es de suma importancia, con el implemento de las normas internacionales que abarcan la metrología biomédica incluyendo la toma de mediciones y errores, para disminuir posibles fallas en los equipos que repercutan en la vida del paciente. Por medio de la comparación de la información suministrada por los autores, se determinan coincidencias para la exposición de los ejes temáticos relacionados para la calibración de los ventiladores mecánicos, obtenidos por medio del estudio detallado del funcionamiento del aparato respiratorio, para la definición del funcionamiento del equipo a calibrar. Para desarrollar el método de manera efectiva se tienen en cuenta variables como volumen, presión, flujo y oxígeno, variables manejadas por los distintos ventiladores mecánicos.

A continuación, se describe cada una de las pruebas a tener en cuenta en un método de calibración de los ventiladores mecánicos:

Chen et al. (2019) indica que dentro de los materiales para la calibración de ventiladores se debe contar con el analizador de gases FLUKE modelo VT900A. El analizador mide variables de diferentes tipos como volumen, presión, flujo y oxígeno, utilizadas por los ventiladores mecánicos, en la Tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas operadas por el analizador de gases FLUKE VT900A.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del analizador de gases FLUKE VT900A

Parámetro	Rango	Exactitud
Volumen tidal inspiratorio	0 a 60 l	± 2,0% o 5 ml
Volumen tidal espiratorio	0 a 60 l	± 2,0% o 5 ml
Volumen minuto	0 – 100 l	± 2,0% o 5 ml
Frecuencia respiratoria	1 a 1500 lpm	±1 %
Relación de tiempo inspiratorio a espiratorio (I:E)	1:300 hasta 300:1	±2 % o 0,1
Presión máxima inspiratoria (PIP)	± 160 mbar	± 0,75 % o 0,1 mbar
Pausa de presión inspiratoria (IPP)	± 160 mbar	± 0,75 % o 0,01 mbar
Presión media vía aérea (MAP)	± 160 mbar	± 0,75 % o 0,1 mbar
Compliancia pulmonar	0 a 1000 ml/mbar	±3 % o 0,1 ml/mbar
Tiempo inspiratorio	0 a 60 s	0,02 segundos
Tiempo espiratorio	0 a 90 s	0,02 segundos
Presión positiva al final de la espiración (PEEP)	± 160 mbar	± 0,75 % o 0,1 mbar
Flujo máximo espiratorio (PEF)	±300 lpm	±2,0 % o 0,04 lpm
Flujo máximo inspiratorio (PIF)	±300 lpm	±2,0 % o 0,04 lpm

Fuente: (Fluke Biomedical, 2024)

5.1 Preparación para las pruebas del ambiente y el analizador

- (i) Condiciones del entorno de calibración, temperatura y humedad relativa.

La confiabilidad de los datos que se vayan a registrar, se recomienda el manejo de un ambiente controlado por los rangos de temperatura de 10°C a 35°C y humedad relativa de 30% a 75%. Estas condiciones son dadas por las condiciones de funcionamiento de los ventiladores mecánicos, ya que el analizador realiza compensaciones automáticas de acuerdo al ambiente (Galvis, Meza y Botero, 2021).

(ii) Preparación y condiciones del analizador.

Para poder hacer uso del analizador en el método propuesto, se debe contar con la vigencia de calibración del patrón, los sensores de presión y de presiones diferenciales deben estar ajustados a cero y debe encontrarse en condiciones óptimas de seguridad eléctrica (Bliman, 2011).

(iii) Preparación del ventilador mecánico.

La ejecución de la calibración debe realizarse en un ambiente de perfectas condiciones de higiene y de seguridad, el equipo a calibrar debe encontrarse conectado a la red eléctrica con polo a tierra para prever posibles incidentes (Galvis, Meza y Botero, 2009).

(iv) Preparación del montaje según Farré et al. (2022) y Torres (2022) y analizador utilizado por Chen, et al. (2019).

- Sin encender el instrumento a calibrar ni el instrumento patrón, se desconecta del ventilador mecánico la manguera del tubo endotraqueal. Esta manguera debe ser nueva, donde el personal técnico de limpieza se encarga de reemplazar la manguera por una nueva. Si no es el caso se solicita a un técnico de higiene para que realice la labor de limpieza y reemplazo de la manguera.
- Conectar los extremos referentes de la manguera designada por Fluke a la salida de oxígeno y entrada de dióxido de carbono al ventilador mecánico.
- Posteriormente se conecta el otro lado de la manguera a la entrada del VT900A *gas flow analyzer*.
- Tomar simulador de pulmón y conectarlo a la salida designada del VT900A *gas flow analyzer*.
- Se prende el VT900A *gas flow analyzer* y se deja calentar por 30 minutos
- Una vez calentado el VT900A *gas flow analyzer*, se coloca en ceros.
- Se asegura de que el área esta despejada y no existen objetos obstruyendo el movimiento de las mangueras.
- Prender el ventilador mecánico.
- Se configura los puntos de medición por cada variable y se inicia el proceso de calibración.

5.2 Toma de Mediciones y Cálculo de las Incertidumbres

Para el proceso de toma de mediciones, se recomienda tomar mínimo 4 mediciones de un mismo valor. El procedimiento de mediciones se debe realizar de manera descendente y luego ascendente, de tal forma que nunca se tome una medida detrás de la otra de un mismo valor, si no, una primera medida de varios valores, luego una segunda medida de estos valores, luego tres sucesivas. Así se le permite al VT900A realizar de nuevo todo el procedimiento de medición desde cero en cada observación, obteniendo datos más reales (Heredia, 2021).

Fernández (2017) indica que el modelo matemático con el que se analiza la relación de las variables que intervienen en el proceso de calibración está definido en la ecuación (5).

(i) La incertidumbre asociada al analizador o sistema de calibración $\sum_j \delta_j (pat)$ incluye:

- Incertidumbre de calibración del analizador

$$u(\delta(pat)_{cal}) = \frac{U}{K} \quad (6)$$

- Incertidumbre por derivada del analizador

$$u(\delta(pat)_{der}) = \frac{\partial_p}{2\sqrt{3}} \quad (7)$$

- Incertidumbre por resolución del ítem de calibración

$$u(\delta(ins)_{res}) = \frac{Resolución}{2\sqrt{3}} \quad (8)$$

- Incertidumbre por repetitividad del ítem de calibración

$$u(\delta(ins)_{rep}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

$$S_{BC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [t_{p,i} - \bar{t}_p]^2}{n-1}} \quad (10)$$

(ii) La incertidumbre combinada se calcula a partir de la siguiente formula:

$$u_c C^2 = (c_1 u(\delta(pat)_{cal}))^2 + (c_2 u(\delta(pat)_{der}))^2 + (c_3 u(\delta(pat)_{int}))^2 + (c_4 u(\delta(pat)_{res}))^2 + (c_5 u(\delta(pat)_{rep}))^2 \quad (11)$$

Posterior al cálculo de las incertidumbres típicas de acuerdo con el modelo matemático, se procede a calcular los grados efectivos de libertad que se requieren para determinar el factor de cubrimiento por medio de la siguiente ecuación de Welch-Satterthwaile:

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(C)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(C)}{v_i}} \quad (12)$$

(iii) En la siguiente ecuación se calculan los grados de libertad efectivos:

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(C)}{\frac{u^4 \delta(pat)_{cal}}{200} + \frac{u^4 \delta(pat)_{der}}{100} + \frac{u^4 \delta(pat)_{int}}{100} + \frac{u^4 \delta(ins)_{res}}{100} + \frac{u^4 \delta(ins)_{rep}}{n-1} + \frac{u^4 \Delta_{NR}}{100}} \quad (13)$$

(iv) Con los resultados de los grados de libertad, se obtiene el factor de cobertura K evaluada para una distribución de probabilidad del 95,45%, para un intervalo de confianza de ese porcentaje se obtiene la incertidumbre expandida multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura k, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$U = u_c(C)k \quad (14)$$

5.3 Emisión del Certificado de calibración del respectivo ventilador mecánico

Quispe (2024), indica que el certificado de calibración debe contener los respectivos datos del cliente y del equipo calibrado, en la Figura 4 se presenta un ejemplo de modelo de certificado de calibración de un ventilador mecánico.

Figura 4. Modelo de certificado de calibración de un ventilador mecánico

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CALIBRATION CERTIFICATE No. 000000000000
CLIENTE: Nombre IPS
DIRECCIÓN: Ubicación de la IPS
CIUDAD: Ciudad de ubicación de la IPS
EQUIPO CALIBRADO: Ventilador mecánico
MARCA: Fabricante del VM
MODELO: Modelo del VM
NÚMERO DE SERIE: Serie del VM
ACTIVO FIJO: Número dado por la institución
FECHA DE RECEPCIÓN: Fecha de recepción del equipo
FECHA DE CALIBRACIÓN: Fecha en la cual se llevó a cabo la calibración
LUGAR DE CALIBRACIÓN: Laboratorio o sala especial IPS
CLAUSULA DE RESPONSABILIDAD: “Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que pueden derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados. El usuario es responsable de la recalibración de sus equipos a intervalos apropiados”
FIRMAS: Firma Auxiliar de Calibración (elaboró), Firma Jefe de Calibración (revisó) y Firma Director de Laboratorio
MÉTODO DE CALIBRACIÓN: Método utilizado para la calibración del VM, medición directa con patrón simulador
TRAZABILIDAD: NIST (National Institute of Standard and Technology). Fluke Corporation. Patrón Marca Fluke Biomedical modelo VT PLUS HF Serie No 1210021-1001 del 01-28-2010 (ejemplo de patrón escogido para el método). Empresa que realiza la calibración
INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN: La incertidumbre expandida de la medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura K, calculado conforme a los grados de libertad para una probabilidad de 95%
DATOS DE CALIBRACIÓN: Se muestran los resultados mediante tablas de las mediciones realizadas a cada variable de medición.

Fuente: (Quispe, 2024, p.84)

6. CONCLUSIONES

La búsqueda de información relacionada con los procesos de calibración de los ventiladores mecánicos indica que no existen procesos estandarizados por entes gubernamentales y estas se remiten a variables industriales. Los laboratorios de metrología se remiten a la norma NTC/ISO-IEC 17025 que refiere a normas generales de ensayo y calibración.

En un proceso de calibración se tienen en cuenta procesos previos a la actividad como la preparación del ambiente para la confiabilidad de la toma de datos, incluyendo temperatura y humedad relativa, preparación y acondicionamiento del analizador y el ventilador objeto de calibración, y respectivo montaje para la conexión del analizador con el equipo. A pesar de que el analizador VT PLUS HF es el que más se encuentra en la literatura, este ya está obsoleto, por lo que se recomienda el VT650 o el Fluke VT900A, que mide los parámetros utilizados por los ventiladores mecánicos como el volumen corriente o tidal, frecuencia respiratoria, relación I:E, presión pico, PEEP, FiO₂, y flujo respiratorio pico.

Para el desarrollo del proceso de calibración se tienen en cuenta las incertidumbres asociadas al analizador o sistema de calibración, incluyendo la incertidumbre de calibración del analizador, la incertidumbre por derivada del analizador, la incertidumbre por resolución del ítem de calibración, la incertidumbre por repetitividad del ítem de calibración, la incertidumbre combinada con la cual se realiza el cálculo de libertad efectivos, y el cálculo de la incertidumbre expandida. Con la correcta toma de datos se expide un certificado de calibración donde se evidencia si el equipo ejecuta de forma correcta los parámetros de trabajo analizados.

REFERENCIAS

Arnaudo, PD., Vidales Balaguer, ML. (2021). Introducción a la ventilación mecánica neonatal invasiva. Parte I. *Revista Enfermería Neonatal*, 35(1). <https://www.revista.fundasamin.org.ar/introduccion-a-la-ventilacion-mecanica-neonatal-invasiva-parte-i/>

- Asociación Española de Pediatría. (2012). Recomendaciones para la asistencia respiratoria en el recién nacido. *Anales de Pediatría*, 77(4), 280. <https://www.analesdepediatria.org/es-recomendaciones-asistencia-respiratoria-el-recien-articulo-S1695403312001725>
- Bliman F., Braga JP., Cáceres JM., Ramírez V. (2011). *Desarrollo de un simulador pulmonar de paciente para ensayar ventiladores mecánicos*. [Trabajo de grado, Universidad de la Republica Uruguay]. Repositorio institucional Universidad de la Republica Uruguay. Recuperado de http://www.nib.fmed.edu.uy/sitio_nib/BibliotecaNIB/PublNIB144.pdf
- Cárdenas Rezabala, BG. Isla Valdanzo, R. (2016). *Diseño de un simulador pasivo de pulmón para un respirador mecánico*. [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Catalunya]. Repositorio institucional Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/101061/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chen, X. B., An, Z., Li, T. Q., Duan, J., Song, D. J., Lin, Y. & Yan, D. (2020). A Research of self-help ventilator Sharing based on Internet of Things in Hospital. *Research Square*.
- Culma, JE., Muñoz, J., Gonzales, LD. (2011). *Estado de la metrología biomédica en Colombia*. Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Recuperado de <https://inm.gov.co/web/wp-content/uploads/2021/10/9.11.-ESTADO-DE-LA-METROLOGIA-BIOMEDICA-EN-COLOMBIA-FINAL.pdf>
- Elorza, D., Sánchez, AM., Pérez, J. (2009). Ventilación mecánica neonatal. *Anales de Pediatría Continuada*, 7(1), 8-15. <https://www.elsevier.es/es-revista-anales-pediatria-continuada-51-articulo-ventilacion-mecanica-neonatal-S1696281809704457>
- Farré, R., Puig-Domingo, M., Ricart, P., Nicolás, JM. (2020). Emergency Mechanical Ventilators for COVID-19. *Archivos de Bronconeumología*, 56 (2), 7-8. <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2020.05.012>
- Farré, R., Rodríguez Lázaro, MA., Gozal D., et al (2022). Simple low-cost construction and calibration of accurate pneumotachographs for monitoring mechanical ventilation in low-resource settings. *Frontiers of Medicine*, 9(938949). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9376320/>
- Fernández, K. (2017). *Diseño de un procedimiento para la calibración de Ventiladores Pulmonares en el marco de la Norma Técnica NTC-ISO-IEC 17025:2017*. [Trabajo de grado, Universidad del Bosque]. Repositorio institucional Universidad del Bosque. Recuperado de <https://repositorio.unbosque.edu.co/server/api/core/bitstreams/127e93ae-723f-49f4-88a2-f2cadfa5b74c/content>
- Fluke Biomedical. (2024). Analizador de flujo de gas VT900A + Comprobador de anestesia VAPOR. Recuperado el 26 de julio del 2024, de <https://www.flukebiomedical.com/products/biomedical-test-equipment/gas-flow-analyzers-ventilator-testers/vt900a-gas-flow-analyzer-vapor-anesthesia-tester>.
- Galvis AF., Meza Contreras LG. & Botero Arbelaez M. (2009). Diseño de procedimientos para la calibración de ventiladores pulmonares. *Scientia et Technica Año XV*, 3(43), 175-180. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4727285>
- García Castillo, E., Chicot Llano. M., Rodríguez Serrano, D.A., Zamora García, E. (2014). Invasive and noninvasive mechanical ventilation. *Medicine*, 11 (63), 3759-3767. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304541214708406>
- Granados (2018). *Diseño de un departamento de ingeniería biomédica para la Clínica Ceboca, especializado en mantenimientos de equipos médicos generales, imagenología, calibración de equipos, ventilación mecánica, y laboratorio clínico*. [Tesis de pregrado, Universidad de Magdalena]. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/270124934.pdf>
- Gutiérrez Muñoz, F. (2011). Ventilación mecánica. *Acta Médica Peruana*, 28 (2). <http://54.39.98.165/index.php/AMP/article/view/1094>

- Gutiérrez Núñez, A. (2021). El país registra la mayor cifra de ocupación de camas UCI tras superar 80% de la capacidad. *La República*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/economia/el-pais-registra-la-mayor-cifra-de-ocupacion-de-camas-uci-tras-superar-80-de-la-capacidad-3159182>
- Heredia O., Chunga X., De la Cruz L. & Zimic M. (2021). Diseño y evaluación de un ventilador mecánico. *Europe PMC*. <https://europepmc.org/article/ppr/ppr459367>
- Hernández Garcés, H., Belenguer Muncharaz, A., Zaragoza Crespo, R. (2020). Ventilación mecánica no invasiva y COVID-19. Minimizar la dispersión. *Medicina Intensiva*, 44 (8), 520. <https://doi.org/10.1016/j.medin.2020.03.015>
- López-Herce, J., Carrillo, Á. (2008). Ventilación mecánica: indicaciones, modalidades, programación y controles. *Anales de Pediatría Continuada*, 6 (6), 321-329. <https://www.elsevier.es/es-revista-anales-pediatria-continuada-51-articulo-ventilacion-mecanica-indicaciones-modalidades-programacion-S1696281808755975>
- Ministerio de Salud y Protección Social (2017). *Promoción de la salud respiratoria*. Recuperado el 15 abril de 2024, de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ENT/abece-salud-respiratoria.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social (2020). *Requisitos para la evaluación de eficacia, seguridad y desempeño de ventiladores mecánicos prototipo de fabricación nacional durante la emergencia por COVID-19*. Recuperado el 16 de abril de 2024, <https://portalweb.invima.gov.co/en/requisitos-para-la-evaluacion-de-ventiladores-mecanicos-prototipo-de-fabricacion-nacional-durante-la-emergencia-por-covid-19>
- Miño, C., Cuaycal, A., Quiroga, J., Gómez, K., Portilla, K. (2020). *Algoritmos para el control de parámetros ventiladores en equipos mecánicos emergentes*. [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica Israel]. <https://www.semanticscholar.org/paper/ALGORITMOS-PARA-EL-CONTROL-DE-PAR%C3%81METROS-EN-EQUIPOS-Mi%C3%B1o-Cuaycal/5b0205bf467b6ffee0766278844b6c9a35f231ae>
- Nuñez Silveira, JM., Gallardo, A., García Valdes, P., et al. (2023). Trigger reverso durante ventilación mecánica: diagnóstico e implicaciones clínicas. *Medicina Intensiva*, 47 (11), 648-657. <https://www.medintensiva.org/es-trigger-reverso-durante-ventilacion-mecanica-articulo-S0210569123002541>
- Pavez, N., Damiani, LF. (2022). Pausa inspiratoria y espiratoria durante la ventilación con presión de soporte: Maniobras que debemos incorporar en la práctica clínica. *Medicina Intensiva*, 46 (4), 213-216. <https://www.medintensiva.org/es-pausa-inspiratoria-espiratoria-durante-ventilacion-articulo-S0210569121002722>
- Perea, M. A. (2022). Ventilador Mecánico Transitorio. [Tesis de Pregrado, Ingeniería Industrial]. Repositorio institucional de la Fundación Universitaria Los Libertadores, Facultad de Ingeniería, Bogotá. Recuperado de <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/4c6a2191-5c15-4b22-a585-b15b75057e7b/content>
- Pérez Nieto, O. R., Zamarrón López, E. I, Guerrero Gutiérrez, M. A. (2021). PEEP: dos lados de la misma moneda. *Medigraphic*, 35 (1), 34-36. <https://www.medigraphic.com/pdfs/medcri/ti-2021/ti211g.pdf>
- Pérez Pinzón, E. (2011). *Diseño y evaluación de un método de calibración de ventiladores mecánicos para adultos*. [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Universidad de los Andes. Recuperado de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14712/u442466.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Quispe Pintao, HJ. (2024). *Estudio comparativo entre el ventilador mecánico peruano de emergencia Masi y el ventilador estadounidense Spiro wave*. [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional Pontificia Universidad Católica del Perú. Reuperado de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/26960/QUISPE_PINTADO_HUGO_ESTUDIO_COMPARATIVO_ENTRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramírez, V. (2012). *Implementación de un procedimiento e instructivo para la calibración de ventiladores pulmonares para especialistas en Metrología S.A.S*. [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira]. Repositorio institucional Universidad

Tecnológica de Pereira. Recuperado de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/abe3ad6f-da17-4037-b5bb-8cb50c4c9fc2/content>

- Ramírez, R. (2021). *Criterios de diseño de un Ventilador Mecánico para pacientes con problemas de neumonía, para ser utilizado en las fases prehospitalaria y post-hospitalaria*. [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/53631>
- Ríos Orozco, A., Sandoval Riascos, M. (2019). *Programa de aseguramiento metroológico para equipos biomédicos del Hospital Universitario del Valle Evaristo García*. [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Occidente]. Repositorio institucional Universidad Autónoma de Occidente. Recuperado de <https://red.uao.edu.co/server/api/core/bitstreams/896811d7-ea65-4f45-ace8-9a02eff08e0e/content>
- Romero Ávila, P., Márquez, C., Cabrera, JR. (2020). Historia de la ventilación mecánica. De la Antigüedad a Copenhague 1952. *Revista Médica de Chile*, 148 (6). <http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872020000600822>
- Solana, MJ., López Herce, J., Urbano, J., et al. (2012). Medición del volumen corriente en ventilación de alta frecuencia. *Anales de Pediatría*, 76(1), 11-15. <https://www.analesdepediatria.org/es-medicion-del-volumen-corriente-ventilacion-articulo-S1695403311003687>
- Torres, E. (2022). *Normativa asociada a la certificación de ventiladores mecánicos invasivos: estudio post covid-19*. [Trabajo de grado, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional Universidad de Concepción. Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/10996/1/Torres%20Torres%2C%20Elizabeth%20%20Tesis.pdf>
- Vega, L. (2021). Funcionamiento de equipos de ventilación mecánica domiciliaria y de flujo continuo. *Revista Americana de medicina respiratoria*, 21 (1), 11-25. https://www.ramr.org/articulos/volumen_21_numero_1/suplemento_guias/capitulo_2.pdf