

Prototipo de ventilador mecánico de emergencia tipo presión positiva intermitente en respuesta a la pandemia del *COVID-19*

Emergency, intermittent positive pressure mechanic ventilator prototype in response to the *COVID-19* pandemic

Adrián Jaramillo¹, Andrés Martínez², Christian González², Alejandro Von Chong^{3*}

¹ Licenciatura en Ingeniería de Control y Automatización, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá

² Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá

³ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: alejandro.von@utp.ac.pa

Resumen. En respuesta a la crisis provocada por la actual pandemia de *COVID-19* en Panamá, al aumento diario de los números de casos positivos y al incremento de las ocupaciones en la Unidad de Cuidado Intensivos (UCI) que conlleva al déficit de ventiladores mecánicos disponibles, se desarrolló un prototipo de ventilador mecánico de bajo costo de tipo presión positiva intermitente, basándose en el uso de componentes comerciales y asequibles, con especificaciones de alta precisión y rapidez en el procesamiento de datos. Este prototipo representa una optimización funcional de un ventilador mecánico escogido como referencia. Para esta optimización, se tomaron en cuenta componentes como electroválvulas, pantalla con interfaz hombre-máquina (IHM), controladores, estructura, entre otros. Seguidamente, mediante pruebas de laboratorio, se comparó la estabilidad, resolución y velocidad de cada uno de los posibles componentes del prototipo optimizado con aquellos instalados en el sistema base. Los resultados experimentales muestran comportamientos estables y con un mayor rango de operación, debido no solo a las características de los componentes seleccionados, sino también al microcontrolador utilizado.

Palabras clave: *COVID-19*, electroválvulas, microcontrolador, presión positiva intermitente, ventilador mecánico en Panamá.

Abstract. In response to the crisis caused by the current *COVID-19* pandemic in Panama, the daily increase in the number of positive cases and the increase in Intensive Care Unit (ICU) occupancies which leads to a shortage of available mechanical ventilators, a low-cost, intermittent positive pressure mechanical ventilator prototype was developed, based on the use of commercial and affordable components, with specifications of high precision and speed in data processing. This prototype represents a functional optimization of the mechanical ventilator selected as a reference. For this optimization, components such as solenoid valves, display with human-machine interface (HMI), controllers, structure, among others, were considered. Subsequently, through laboratory tests, the stability, resolution, and speed of each of the possible components of the optimized prototype were compared with those installed in the base system. The experimental results show stable behaviour and a wider range of operation, due to not only the characteristics of the selected components, but also to the microcontroller implemented.

Keywords: *COVID-19*, solenoid valve, microcontroller, intermittent positive pressure, mechanical ventilator.

1. Introducción

La enfermedad pandémica causada por el virus SARS-CoV-2 y sus diferentes variantes, anunciada como *COVID-19* por la Organización Mundial de la Salud, ha provocado una crisis sanitaria y económica a nivel mundial. Específicamente, en Panamá se han registrado más de 460 mil casos positivos y más de 7,000 defunciones hasta septiembre de 2021 [1]. Esta enfermedad, altamente infecciosa, puede

agravarse en pacientes hasta provocar síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA), el cual comúnmente requiere intubación y ventilación mecánica [2]. Por esta razón, la demanda de dispositivos de ventilación mecánica y los insumos para su manufactura ha aumentado exponencialmente durante la pandemia, dando paso a problemáticas como

restricciones de importación, inflación de precios y tiempos adquisición elevados.

Un ventilador mecánico es un dispositivo de operación automática, diseñado para asistir o reemplazar la función de los músculos ventilatorios de los pacientes que no pueden respirar por sí mismos. Su misión es llevar oxígeno a los pulmones y al organismo, deshacerse del dióxido de carbono de los pulmones y dar soporte a la respiración [3]. Generalmente, los ventiladores están constituidos por una fuente de gas con presión positiva, un recorrido de mangueras flexibles y válvulas, un sistema de control, interfaces de comunicación y monitoreo de variables y alarmas, filtros y humidificadores.

Una técnica de ventilación utilizada a menudo es la ventilación de presión positiva intermitente (VPPI), definida como un modo de ventilación obligatorio con volumen tidal y frecuencia fijos [4]. La función de la máquina ventiladora es entonces controlar el volumen del aire/oxígeno que se le suministra al paciente. En este caso, el ventilador se puede conectar directamente al suministro de gas médico, normalmente disponible en todos los hospitales con presión regulada a 15 psi (con flujo de aire máximo deseado de 60 LPM), y con el uso de válvulas de seguridad (a 80 cm H₂O) en las mangueras de las vías respiratorias.

Por otro lado, en Panamá, principalmente por ser un país de servicios, tiene la necesidad a importar este tipo de ventiladores en situaciones críticas. En un escenario en donde el surgimiento de nuevas cepas de COVID-19 provoca incertidumbre, se hace evidente la importancia de contar en el país con personal cualificado para fabricar equipos biomédicos de emergencia.

En abril de 2021, se culminó el proyecto de un ventilador mecánico de emergencia para paliar las consecuencias de la pandemia de COVID-19 en Panamá [5]. En este proyecto, no fue posible utilizar los componentes más adecuados para el prototipado de un ventilador convencional debido a la falta de insumos y a la fuerte demanda de equipos biomédicos, además de las restricciones de importación por parte de los países fabricantes, tanto de ventiladores como de sus piezas constituyentes [6]. Otro factor de impacto negativo fue el tiempo muy limitado para el diseño y manufactura del ventilador.

Esta investigación propone un prototipo de ventilador de VPPI la cual realiza una optimización funcional del ventilador propuesto en [5]. Se tomaron como base sus objetivos de compatibilidad de materiales, seguridad y funcionalidad, sin embargo, se aportan mejoras en términos de hardware y software, lo que significa que el nuevo sistema está construido con mejores componentes, más accesibles y de menor costo. El prototipo posee un sistema neumático y un sistema electrónico rediseñado completamente, y las mejoras realizadas corresponden a la selección de electroválvulas de mayor velocidad y resolución, la implementación de un

microcontrolador de código abierto, más asequible y rápido que el controlador del ventilador base, y la reestructuración del diseño para hacerlo compacto, conveniente y de fácil mantenimiento.

El artículo inicialmente detalla el proceso de diseño de los sistemas del ventilador y los métodos empleados para el prototipado, seguidamente se presentan los resultados obtenidos y las evidencias de las mejoras realizadas. Finalmente, se muestran las conclusiones obtenidas en este proyecto.

2. Diseño y metodología

A continuación, se presentan los componentes utilizados en el prototipo propuesto, como también los criterios y los procedimientos para su construcción. En la figura 1, se muestra un diagrama de bloques con el funcionamiento del ventilador mecánico propuesto, incluyendo los componentes utilizados para su manufactura.

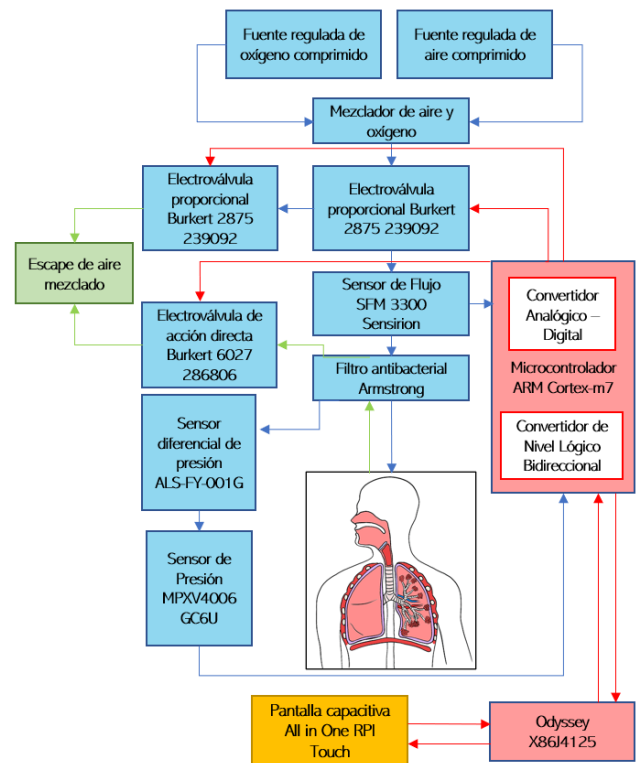


Figura 1. Diagrama de funcionamiento del ventilador mecánico replicado.

2.1 Equipo de calibración

El IMT Analytics FlowAnalyzer PF-300 es un calibrador de ventiladores profesional, el cual mide variables como flujo, presión y volumen. Este es el instrumento de referencia utilizado para las pruebas de caracterización.

2.2 Componentes empleados para el sistema de control, seguimiento y monitoreo

Se procedió a comparar teóricamente los componentes del ventilador mecánico propuesto con los del ventilador mecánico base. En esta sección, de manera sistemática, se exponen las características técnicas, curvas de comportamiento, ventajas, desventajas, dificultades, metodología y comentarios sobre la eficacia, selección y fiabilidad de estos componentes.

2.2.1 Microcontrolador Teensy 4.1

Es una tarjeta de desarrollo que posee uno de los procesadores más potentes registrados hasta la fecha, el ARM Cortex-m7 32 bit [7]. Para referencia, la Teensy 4.1 es 60 veces más rápida que el Arduino Mega.

El microcontrolador Teensy 4.1 fue seleccionado como la opción económicamente viable para este sistema, en comparación con el controlador lógico programable (PLC) X20BC 0083 que se utiliza en el ventilador mecánico base.

2.2.2 Electroválvulas

A diferencia de la situación del ventilador mecánico base, las circunstancias permitieron obtener electroválvulas de mayor resolución para este prototipo, pues no existían restricciones rigurosas limitando la obtención de estos productos en el mercado. Se evaluaron los siguientes modelos de electroválvulas proporcionales marca Burkert®: 2873 00239081, 2873 00250330, 2873 00252639 y 2875 00239092. Los modelos de electroválvulas de acción directa Burkert® estudiados fueron 6027 00184683 y 6027 00286806.

Mediante el analizador de flujo de gases PF-300 y el software FlowLab, se caracterizaron las electroválvulas midiendo su tiempo promedio de conmutación (de apertura), aplicándoles una entrada de voltaje en forma de escalón con el fin de comparar y seleccionar las electroválvulas con un menor tiempo de apertura, tanto del grupo de electroválvulas proporcionales como del de las de acción directa. A las electroválvulas proporcionales también se les aplicó una entrada de voltaje en forma de rampa para visualizar los rangos de modulación de ancho de pulso (PWM, siglas en inglés de *pulse-width modulation*) y así determinar los rangos de operación (*i.e.*, eliminar la zona muerta y la zona de saturación), el tiempo mínimo de ciclo de cada controlador y el tiempo promedio que les toma llegar al valor de flujo establecido.

2.2.3 Componentes eléctricos/electrónicos

Se emplearon convertidores analógicos-digitales ADS1115 y convertidores de nivel lógico bidireccionales, debido a los diferentes voltajes (lógicos) de operación. Para controlar las electroválvulas, se utilizaron los módulos MOSFET XY-MOS, junto con sensores de presión modelo MPXV4006 y un sensor de flujo modelo SFM3300. Además, el sistema cuenta con

suministro eléctrico de la fuente de poder NDR-120-24 Mean Well, tuberías de conexión para gas, extensores, cables adaptadores, acrílicos para la estructura física del ventilador y soportes elaborados en impresiones 3D. Cada uno de estos componentes se compararon con los componentes empleados en el ventilador base, mediante la ficha técnica y el rango de operación.

2.3 Softwares empleados

2.3.1 Procesamiento de datos – Arduino IDE

En cuanto al entorno utilizado para el desarrollo de las aplicaciones, se utilizó el software de Arduino IDE.

El software utilizado para desarrollar las aplicaciones en el PLC está sujetos a licencias, por lo tanto, periódicamente se debe invertir en suscripciones que permiten utilizar el software, obtener actualizaciones y soporte de parte de la compañía que los suministra. A pesar de estas “desventajas”, se reconoce que unas de sus ventajas es que ya cuentan con librerías y funciones diseñadas especialmente para entornos industriales, las cuales han sido optimizadas y garantizan un funcionamiento correcto.

2.3.2 Interfaz gráfica – LabVIEW

Las señales generadas y procesadas por el microcontrolador Teensy 4.1 son proyectadas mediante una interfaz gráfica para la visualización del comportamiento del sistema, al igual que para la modificación de los parámetros de funcionamiento por parte del usuario. Para esto, se utilizó una pantalla táctil de 10.1” controlada por un Odyssey X86J4125 [8], que es computador de bajo costo, flexible y manejado por diversos lenguajes de programación. En este caso, se utilizó LabVIEW por su versatilidad en interfaces gráficas.

2.3.3 Diseño 3D – Autodesk Fusion

Se estudió el modelo actual del ventilador mecánico base y se idearon mejoras a la orientación de la pantalla de la interfaz hombre-máquina (IHM). Cabe mencionar que el diseño de esta IHM resultó del trabajo en conjunto con los médicos intensivistas de la Caja de Seguro Social; resultando un diseño familiar con el usuario final, reduciendo así el tiempo de entrenamiento en situaciones de emergencia [5].

En cuanto a las mejoras en el tamaño de la estructura y el espaciamiento entre cables para el manejo de los componentes, se utilizó el software Autodesk Fusion 360. Aquí se diseñó el modelado en 3D del prototipo del ventilador, contemplando el tamaño de sus componentes, la mejor distribución posible y la comodidad brindada para el uso y mantenimiento por parte del operador o personal médico en cuestión.

2.4 Compatibilidad de los materiales con el oxígeno

Existen riesgos de incendio consustanciales en todos los sistemas que utilizan oxígeno o que están enriquecidos con él. Esto se debe a que el oxígeno es un potente oxidante y, cuando está presente en concentraciones y presiones elevadas, provoca que algunos materiales se hagan más inflamables, es decir, que requieran de menor energía para que ocurra en ellos una ignición. Es importante recalcar que, al inicio de la ventilación mecánica (en un paciente en estado crítico), la fracción de oxígeno inspirado por el intubado es 1 (100% oxígeno) y luego se reduce hasta el valor necesario para poder efectuar el destete (es decir, la desconexión del ventilador mecánico). Por esta razón, verificar la compatibilidad con el oxígeno de los dispositivos en contacto directo con este gas es un procedimiento de evidente importancia en la prevención contra incendios. En el proyecto desarrollado en [5], se realizó una evaluación de compatibilidad con oxígeno; no obstante, no muchos otros proyectos han compartido esta información.

En este proyecto, se optó por un enfoque consistente con el estándar ISO 15001 sobre compatibilidad con oxígeno de equipos respiratorios [9] y el NFPA 53 sobre recomendaciones prácticas para atmósferas enriquecidas con oxígeno [10].

2.5 Consideraciones de seguridad

En cuanto a la normativa de seguridad del PLC X20B, cumple con la norma IEC 61131, que es un estándar internacional para equipos de autómatas programables. Este establece en sus partes 2 [11] y 6 [12] requerimientos y pruebas de seguridad que deben cumplir todos los PLC para ser aprobados. Estos incluyen condiciones climáticas, compatibilidad electromagnética, vibraciones, servicio eléctrico, entre otros.

Con el propósito de emular las protecciones eléctricas brindadas por el PLC X20BC, se implementaron medidas de protección como diodos antirretornos y protecciones en la ejecución del programa. Los resultados de estas implementaciones se discuten en la sección 3.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados que justifican la selección de componentes óptimas para el prototipo de ventilador mecánico.

3.1 Comparación entre la Teensy 4.1 y el PLC X20

Con el propósito de comparar la precisión y rapidez de la Teensy 4.1 con el PLC X20 BC 0083 que se utiliza en el ventilador mecánico base, se muestran en la tabla 1 las especificaciones técnicas y los resultados de las pruebas de velocidad de procesamiento de ambos controladores.

Tabla 1. Comparaciones entre la Teensy 4.1 con el PLC X20

Características	PLC X20BC0083	Teensy 4.1
Tiempo mín. por ciclo registrado	50 ms	1 ms
Velocidad de transferencia	100 Mbit/s	100 Mbit/s
Reloj de frecuencia para PWM	15 Hz – 50 KHz	Hasta 150 MHz
Resolución de pines PWM	16 bits	16 bits
Resolución de pines Analógicos	13 bits	12 bits

Fuente: Correspondiente a PLC X20 [13]; correspondiente a Teensy 4.1 [7].

Evidentemente se encuentran mejores características de un controlador en comparación al otro, y viceversa. A pesar de que pareciera que el microcontrolador Teensy 4.1 fuera superior que el PLC X20, este último, por ser un dispositivo de gama industrial, contiene medidas de seguridad a nivel de hardware y software, certificados e interfaces industriales que garantizan que el sistema sea robusto. En cambio, con el controlador Teensy, se requieren diseñar circuitos electrónicos, o adicionarles módulos específicos que garantice el cuidado del equipo lo cual aumenta significativamente la mano de obra.

En último lugar, los controladores industriales son costosos, aparte de las cantidades de módulos que éstos necesitan para operar, y los términos de licencias que se renuevan por periodos determinado. El controlador Teensy es económicamente accesible a todo el público, y de código abierto, por lo tanto, el software para desarrollar aplicaciones es gratuito.

3.2 Electroválvulas Burkert® con entradas escalón y rampa

La electroválvula de acción directa 6027 00184683 y la electroválvula proporcional 2873 00239081, actualmente instaladas en el sistema del ventilador base, están señaladas mediante la numeración “VB” referente a la versión del sistema.

Como se observa en la figura 2, a las electroválvulas de acción directa, se le aplicó una entrada de voltaje escalón. Notablemente, podemos contemplar que la electroválvula 6027 00184683 genera cambios bruscos de flujo, por lo que presenta picos significativamente grandes que pueden ser perjudiciales por la disminución brusca de la presión, en comparación con la electroválvula 6027 00286806. Otro aspecto importante tomado en consideración es la cantidad de flujo que permite ésta última, lo cual es ventajoso en términos de funcionalidad.

De igual manera, se les aplicó una entrada de voltaje escalón a las electroválvulas proporcionales. Claramente podemos observar, tal y como se presenta en la figura 3, que la electroválvula proporcional 2875 239092, soporta caudales mayores a diferencia de las otras electroválvulas proporcionales, incluyendo la actualmente instalada en el sistema de ventilador base.

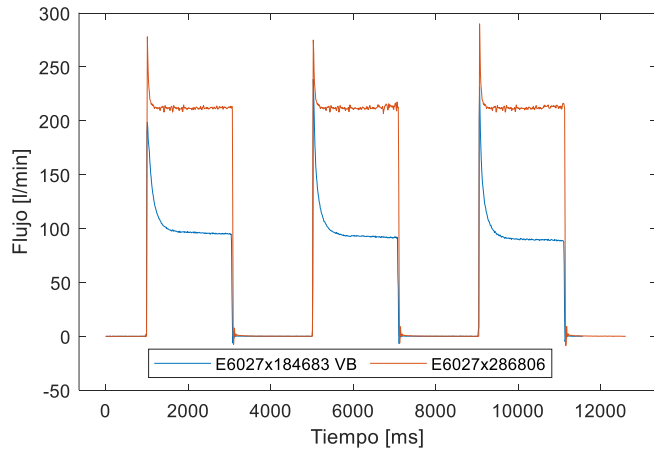


Figura 2. Comportamiento de las electroválvulas de acción directa al aplicarles entradas escalón.

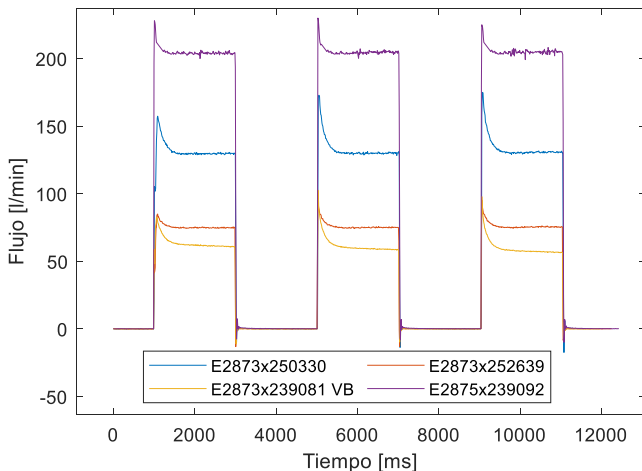


Figura 3. Comportamiento de las electroválvulas proporcionales al aplicarles entradas escalón.

Se aplicaron entradas de voltaje rampa, lo cual permite visualizar la resolución de cada una de las electroválvulas proporcionales en función de los rangos de PWM. En la figura 4, observamos las diferentes campanas de flujo que presentan las electroválvulas en un rango de operación establecido de PWM.

La electroválvula proporcional 2875 239092, manifiesta un rango superior de maniobrabilidad en comparación de las otras electroválvulas, lo que representa una mayor exactitud y versatilidad.

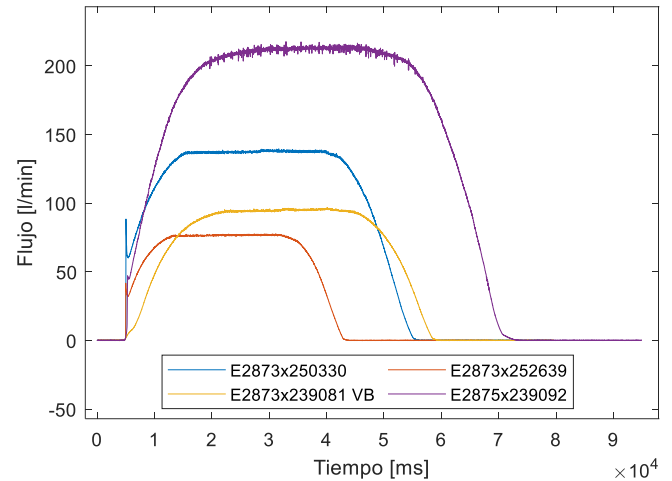


Figura 4. Comportamiento de las electroválvulas proporcionales al aplicarles entradas rampa.

Para finalizar, los tiempos de apertura fijan la duración que les toma llegar a un valor establecido de flujo, presión o volumen en un tiempo determinado. Esto es importante para asegurar no haya una sobrepresión en los pulmones del paciente, causante de barotraumas o volutraumas en caso de accionamientos muy lentos.

Como se puede observar en la figura 5, las electroválvulas 2873 252639 y 2875 239092 tienen los tiempos de apertura mínimos, sin embargo, al resto de las electroválvulas, les toma entre 20ms y 80ms para llegar a su valor nominal de flujo.

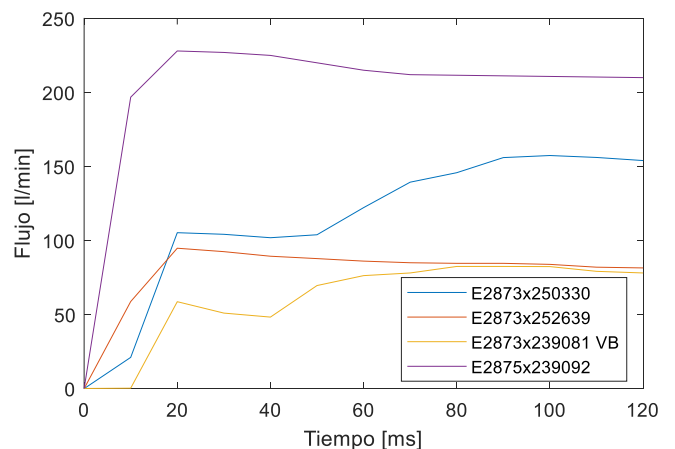


Figura 5. Tiempo de apertura para las electroválvulas proporcionales.

En base a estos resultados, se escogieron las siguientes electroválvulas, tomando en cuenta las oscilaciones, los tiempos de respuesta y los picos significativos que puedan producir:

- Electroválvula de tipo émbolo, acción directa Burkert® 6027 00286806
- Electroválvula proporcional estándar Burkert® 2875 00239092

3.3 Reingeniería del código y de la interfaz humano-máquina

Como se utilizó un PLC en el ventilador base, se tuvo que migrar por completo la lógica y las funciones propias empleadas en este dispositivo (tales como funciones de detección de máximos, mínimos, filtrado de señales, estadística, etc.) y adaptarlas en el entorno de programación de Arduino. Además, el resultado de utilizar el computador Odyssey fue la obtención de una IHM versátil, cómoda y económicamente viable, la cual realiza todas las funciones ofrecidas por el PLC.

3.4 Mejoras en la estructuración física

Se realizaron mejoras en la distribución interior de los componentes del sistema original, que resultaron en un sistema más compacto y accesible para los mantenimientos (figura 6). Se construyeron dos niveles en el interior del ventilador, en el primero de ellos reposan todos los componentes electrónicos y en el segundo, las electroválvulas.

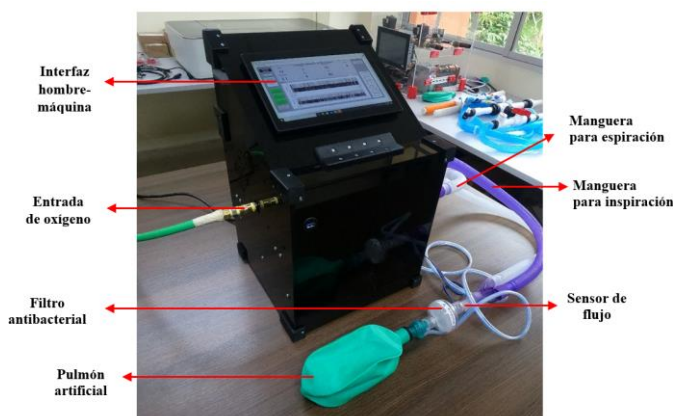


Figura 6. Estructuración física del prototipo de ventilador mecánico.

3.5 Resultados de la compatibilidad con oxígeno

Es importante tomar en cuenta que lo que se busca en materiales metálicos es un calor de combustión lo más bajo posible ya que, a menor calor de combustión, la compatibilidad de ese metal con el oxígeno es mayor. En cuanto a la conductividad térmica, mientras mayor sea esta, habrá una disipación de calor más rápida en el metal, reduciendo así la

temperatura y los riesgos de ignición. Además, para metales y no metales, los diseñadores tienden a elegir los materiales con la temperatura de autoignición más elevada posible para maximizar la resistencia a la ignición. Es significativo mencionar que los materiales con un alto índice de oxígeno son los preferidos. En la tabla 3, se enlistan los dispositivos en contacto directo con oxígeno, sus especificaciones y su compatibilidad. Estos resultados se obtuvieron con base en las propiedades termoconductoras consultadas en [9] y [10].

Tabla 2. Compatibilidad de los dispositivos en contacto con oxígeno

Dispositivo	Material /sello	Compatibilidad con oxígeno	Marca, modelo
Válvula proporcional	Latón/PTFE [†] Teflon [®]	APACO*	Burkert, modelo 2875 00239092
Válvula de acción directa	Latón/PTFE [†] Teflon [®]	APACO*	Burkert, modelo 6027 00286806
Sensor de flujo	Múltiples**	Compatible	Sensirion SFM3300
Mangueras	Poliamida	Compatible	Tameson
Conexiones de las mangueras	Poliamida	Compatible	Genéricas
Tubos	Cobre	Compatible	N/A

[†] PTFE: politetrafluoroetileno, conocido coloquialmente como teflón.

*APACO indica "adecuado para aplicaciones con oxígeno".

** Mezcla de PPE+PS (grado médico: biocompatible; ISO 10993 o USP Clase VI), Si, Si₃N₄, SiOx, oro, epoxi, poliuretano, acero inoxidable (recocido) [13].

3.6 Resultados de las consideraciones de seguridad

Se aplicó una entrada de voltaje escalón a las electroválvulas y se detectó un retorno de corriente a través de un osciloscopio. Este retorno de corriente es perjudicial para el resto de los dispositivos, principalmente los electrónicos, implementados en el prototipo. Para mitigar este problema, se instalaron diodos de protección en cada uno de los accionamientos de las electroválvulas. Se obtuvo como resultado la supresión del retorno de corriente, garantizando la seguridad del resto de componentes del prototipo. La figura 7 muestra la gráfica de comportamiento antes (izq.) y después (der.) de la instalación de estos últimos.

3.7 Modo asistido

El modo asistido es un método común de destete o, dicho de otra manera, la liberación del paciente de la ventilación mecánica forzada una vez este presenta signos de mejoría. El modo asistido consiste en la detección de una presión negativa

generada durante un intento de respiración iniciada por el paciente [5]. Para detectar las respiraciones activadas por el paciente se monitorea la derivada de la señal de presión, enviando una inspiración en caso de sobrepasar un umbral (o sensibilidad) establecido por el médico.

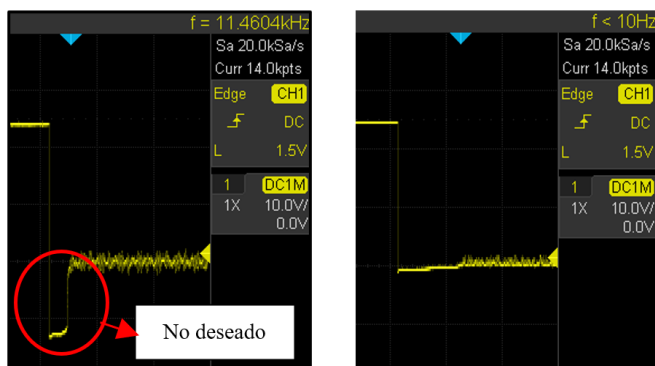


Figura 7. Eliminación del retorno de corriente con diodos de protección.

4. Conclusiones

Se construyó un prototipo de un ventilador mecánico con componentes electrónicos de bajo costo, con mayor resolución, comparado con el ventilador base. Se instalaron electroválvulas más adecuadas, más rápidas y con mayor margen de seguridad. Además, se cuenta con una interfaz gráfica con configuraciones de usuario, un diseño que considera las necesidades primordiales y con un modo asistido. Aunque el tiempo de ejecución fue elevado; la velocidad, estabilidad y valor económico obtenidos fueron significativamente notorios. Como trabajo futuro, se propone solicitar la aprobación del personal médico intensivista de este nuevo diseño con respecto a los parámetros de funcionalidad y facilidad de uso y su posterior replicación, para tener un inventario estratégico de dispositivos de emergencia. Siendo un proyecto, cuyo objetivo es ayudar a salvar vidas, se ha hecho un desarrollo de código abierto, con todos los documentos (código, circuitos, moldes de carátula y todo lo necesario para la reproducción del prototipo) en el repositorio digital: <https://github.com/AlejoBSmith/VentiladorMecanico>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Tecnológica de Panamá por brindar un espacio para la ejecución de este proyecto y a la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT) por el financiamiento para el mismo a través del proyecto de “Diseño e implementación de ventiladores de bajo costo en respuesta a pandemia provocada por COVID-19” con contrato No. 93-2020.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Center for Systems Science and Engineering at Johns Hopkins University, “Covid-19 Dashboard,” *Johns Hopkins University*. 2021.
- [2] G. L. Anesi, “Covid-19: Management of the intubated adult,” *UpToDate*. 2021.
- [3] J. López-Herce and Á. Carrillo, “Ventilación mecánica: indicaciones, modalidades y programación y controles,” *Elsevier*, vol. 6, 2008, doi: 10.1016/S1696-2818(08)75597-5.
- [4] WEINMANN Emergency Medical Technology, “Modos de respiración artificial controlados por volumen.”
- [5] A. Von Chong et al., “Low-cost, rapidly deployable emergency mechanical ventilators during the COVID-19 pandemic in a developing country: Comparing development feasibility between bag-valve and positive airway pressure designs,” 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2021.
- [6] S. J. Evenett, “Chinese whispers: COVID-19, global supply chains in essential goods, and public policy,” *J. Int. Bus. Policy*, vol. 3, no. 4, pp. 408–429, 2020, doi: 10.1057/s42214-020-00075-5.
- [7] PJRC, “Teensy@4.1 Development Board.”
- [8] Seeed Studio, “ODYSSEY - X86J4125800 Most expandable Win10 Mini PC (Linux and Arduino Core) with 8GB RAM.”
- [9] “BSI Standards Publication Anaesthetic and respiratory equipment — Compatibility with oxygen (ISO 15001 : 2010),” 2010.
- [10] “Recommended Practice on Materials, Equipment, and Systems Used in Oxygen-Enriched Atmospheres,” *NFPA 53*, 2021.
- [11] IEC, “Industrial - process measurement and control - Programmable controllers - Part 2: Equipment requirements and tests,” 2017.
- [12] IEC, “Programmable controllers - Part 6: Functional safety,” 2012.
- [13] Sensirion, “Digital Flow Meter For Medical Applications,” no. July. Hoja de datos para SFM3300, pp. 1–7, 2017.