

Prototipo de ventilador mecánico: fabricación de carcasas mediante la tecnología de impresión 3D y el uso de materiales compuestos estructurales

Víctor Alfonso Gómez Culebro, Cecilia Zárate Pérez, Edgar Adrián Franco Urquiza*
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Carretera Estatal 200, km 23, Querétaro 76265, México
edgar.franco@cidesi.edu.mx

Resumen

La población Mexicana se vio afectada por la presencia del virus Síndrome Respiratorio Agudo Severo relacionado con coronavirus 2 (SARS-CoV-2), el cual es causante de la enfermedad respiratoria conocida como coronavirus COVID-19. Esta enfermedad trajo consigo una gran cantidad de pacientes que requirieron el uso de ventiladores mecánicos. Esta situación conllevó a desarrollar prototipos rápidos de ventiladores mecánicos que permitieran atender de manera eficiente su fabricación para cubrir la demanda sanitaria a nivel nacional. El presente trabajo es un artículo de difusión que muestra el desarrollo de las carcasas de ventiladores mecánicos a nivel prototipo, a través de técnicas de impresión 3D de plásticos y manufactura de materiales compuestos de fibra de carbono. El uso de estos materiales permitió reducir el peso de los ventiladores, que previamente se desarrollaron con láminas metálicas, facilitando su desplazamiento por las instalaciones hospitalarias. El objetivo de este artículo es difundir los alcances de la infraestructura nacional para la fabricación de carcasas de ventiladores mecánicos a través del prototipado rápido.

Palabras clave: Ventilador mecánico, impresión 3D, materiales compuestos, COVID-19

Abstract

The Mexican population was affected by the presence of the Severe Acute Respiratory Syndrome virus related to coronavirus 2 (SARS-CoV-2), which causes the respiratory disease known as coronavirus COVID-19. This disease brought with it a large number of patients who required the use of mechanical ventilators. This situation led to the development of rapid prototypes of mechanical ventilators that would make it possible to efficiently attend to their manufacturing to meet the national health demand. This work is a dissemination article that shows the development of mechanical fan casings at the prototype level through 3D printing techniques for plastics and the manufacture of carbon fiber composite materials. Using these materials made it possible to reduce the weight of the fans, which were previously developed with metal sheets, making it easier to move around the hospital facilities. This article aims to disseminate the scope of the national infrastructure for manufacturing mechanical fan housings through rapid prototyping.

Keywords: Mechanical ventilator, 3D printing, composite materials, COVID-19

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de octubre de 2022

Aceptado:

11 de noviembre de 2022

Introducción

El virus SARS-CoV-2 puede invadir las células epiteliales que recubren las vías respiratorias, interfiriendo con la capacidad de los pulmones causando hipoxemia, lo que significa que el organismo humano se ve privado de oxígeno. Para atenuar esta emergencia médica, se emplea un ventilador mecánico, que es un dispositivo que bombea aire a los pulmones de una persona con insuficiencia respiratoria grave. El ventilador proporciona aire con un contenido elevado de oxígeno y genera presión en los pulmones para ayudar con la respiración (Chatburn & Branson, 2022; Minami et al., 2022; Wong, Chiew, Desai, & Chase, 2022). El uso de ventiladores mecánicos también ayuda a eliminar el dióxido de carbono y reequilibrar los niveles de pH de la sangre.

Debido al virus SARS-CoV-2 muchos hospitales se encontraron con escasez de ventiladores mecánicos, lo que generó una emergencia sanitaria a nivel mundial que desencadenó en el desarrollo y optimización de estos sistemas. Un ventilador mecánico consta de cuatro sistemas que permiten su correcto funcionamiento:

1. Fuente de energía
2. Control de Entrega de Gas
3. Monitoreo
4. Características de seguridad.

Las partes externas de un ventilador mecánico contienen a estos sistemas y son: el monitor (panel de control), la unidad de ventilador, y el sistema de ventilación y humidificador, según se puede apreciar en la Figura 1.

Durante el pico de la pandemia, gran parte de la población con COVID-19 requirieron un ventilador mecánico. Sin embargo, en la mayoría de los casos se realizaron evaluaciones subjetivas finalizando en conclusiones catastróficas basadas en colocar los ventiladores a pacientes con mayores probabilidades de sobrevivir debido a la escasez en el sector salud (Fjølner et al., 2022; Gendreau et al., 2022; Maleczek,

Toemboel, Van Erp, Thalhammer, & Rössler, 2022). Esta alarmante situación propició la participación de diversas entidades federales y estatales de México para desarrollar tecnologías enfocadas en el desarrollo de ventiladores mecánicos de bajo costo y tiempos de fabricación cortos. Para ello el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) sumaron esfuerzos para el desarrollo de prototipos de ventiladores mecánicos.



Figura 1. Render del ventilador Ehécatl 4T de CIDESI (Lanitem, 2021).

El uso de prototipos rápidos permite que se fabriquen piezas, con relativa facilidad y un ahorro considerable de tiempo y costo, que puedan utilizarse para realizar pruebas y comprobar el correcto funcionamiento de los componentes del prototipo. Los prototipos también permiten realizar ajustes en el diseño, probar la forma, el ajuste, la configuración y disposición, así como la funcionalidad de la pieza o componente. Por lo general, el prototipo rápido se conoce como producto mínimo viable (MV), ya que contiene solo las funciones esenciales necesarias para probar y obtener comentarios de los usuarios.

Muchos procesos de creación rápida de prototipos están disponibles hoy en día, siendo los procesos de fabricación digital -como la impresión 3D o el mecanizado CNC- los más utilizados en la actualidad. La impresión 3D permite fabricar rápidamente un modelo a escala de una pieza a partir de datos de diseño asistido por computadora (CAD) tridimensionales. La impresora está controlada por un sistema computarizado, que toma el diseño 3D como

entrada y fabrica el producto 3D como salida. La tecnología ha evolucionado con el tiempo y una amplia variedad de materiales están disponibles para la impresión. En este artículo nos enfocaremos en los sistemas de impresión de plásticos. Existen tres tipos principales de tecnologías de impresión 3D:

- El sinterizado selectivo por láser (SLS), el cual utiliza material de impresión suministrado en forma de polvo. Cada capa de la pieza se crea fundiendo el polvo con un láser.
- El modelado por deposición fundida (FDM), el cual utiliza filamento termoplástico y lo funde durante su extrusión, que es controlada con precisión por la computadora y de acuerdo con el diseño 3D.
- La estereolitografía también utiliza un láser, pero en este caso, una resina líquida se solidifica por capas al paso de la acción del láser.

El FDM es la tecnología más utilizada, y probablemente sea el primer proceso en el que se piensa cuando surge la necesidad de imprimir objetos en 3D. La tecnología FDM fabrica los objetos capa por capa, depositando selectivamente el material fundido en un camino predeterminado hasta completar la pieza (Alwasel, Zaky, Alhussaini, Alossimi, & Alharbi, 2021; El Haddi et al., 2022; Manero et al., 2020; White, Mackay, Solitro, Conrad, & Alexander, 2021). Los materiales para FDM incluyen polímeros como ABS, PLA, PETG y PEI. Es necesario considerar algunos parámetros que se pueden ajustar previo a la impresión 3D, los cuales incluyen las temperaturas de la boquilla y la plataforma de construcción, la velocidad de construcción, la altura de la capa y la velocidad del ventilador de enfriamiento.

Los compuestos de fibra de carbono (Carbon Fiber Reinforced Polymers) son materiales ligeros y resistentes que se utilizan en la fabricación de numerosos productos con características estructurales. Se componen de fibras largas de carbono, que pueden ser unidireccionales o tejidos, los cuales se disponen en una secuencia de capas apiladas. La orientación de las capas, y la configuración de los tejidos, influyen en las propiedades finales del compuesto, también conocido

como laminado. Las fibras son impregnadas con resinas líquidas termoestables (epoxi, poliéster o viniléster) asistidas por vacío, las cuales una vez que se endurecen no pueden volver a fundir ni moldearse, por lo que se consideran materiales sin capacidad de reciclaje, a diferencia de los plásticos. Las características intrínsecas de los constituyentes conllevan a que los compuestos de fibra de carbono sean atractivos para industrias relevantes. Hoy en día, las aplicaciones más comunes de estos compuestos se encuentran en la industria aeroespacial, automotriz y eólica. Los CFRP también se encuentran en la tecnología médica, robótica, tecnología de automatización, tecnología de medición y óptica, así como en ingeniería mecánica y en el sector del deporte y el ocio. Para atender el desarrollo de prototipos rápidos ante la emergencia sanitaria, se podrían adoptar a los materiales compuestos para fabricar ventiladores mecánicos. No obstante, no existe información que detalle sobre ello.

Según el volumen de producción, el diseño del elemento, el tamaño, las propiedades requeridas, y la estética, existen varios métodos disponibles para la producción de compuestos de fibra de carbono.

- Laminación manual, la cual se utiliza para la manufactura de piezas de diseño simple que no requieran un acabado estético ni propiedades estructurales específicas. La impregnación de las fibras se lleva a cabo de forma manual, con el apoyo de rodillos y brochas. Algunas desventajas relacionadas con este método incluyen la baja repetibilidad, burbujas de aire dentro del laminado de carbono y daños en el tejido.
- Embolsado al vacío, el cual se desarrolla a partir de la laminación manual. Los pasos iniciales son idénticos al laminado manual, donde se aplica una resina manualmente con un rodillo o brocha sobre las de telas de fibra de carbono. La diferencia se relaciona con el uso de la bolsa de vacío en la fase final y una bomba de vacío, el vacío nos proporciona una buena compactación en el laminado permitiendo una buena adherencia entre las capas de los tejidos de fibra de carbono y nos

permite extraer parte de las burbujas de aire que se generaron por la impregnación manual.

- Infusión de resina asistida por vacío, este método de manufactura nos permite obtener un buen acabado estético sobre una de las caras de la pieza. El proceso consiste en colocar fibras secas sobre el molde e ir fijando las fibras con un adhesivo especial para garantizar un ajuste perfecto al molde y al tejido. Luego se colocan una tela peel ply y sobre ella una red especial que nos garantiza la distribución adecuada de la resina. El conjunto se sella con una película plástica y cinta de butilo. Por un lado, se conecta la bomba de vacío que inicialmente succiona aire usando el vacío mientras que la bolsa de vacío asegura que las telas y fibras se compacten contra el molde. Gracias al vacío, la resina se suministra automáticamente a través de las redes y conductos colocados previamente para asegurar la impregnación de los tejidos secos de fibra de carbono.
- Moldeo por transferencia de resina, el cual utiliza moldes cerrados que contiene la pre-forma de la fibra. Los moldes se cierran y se inyecta resina líquida a alta presión. Este método de manufactura nos permite conseguir piezas con buen acabado estético en ambas caras y con muy buenas propiedades estructurales.
- Autoclave, el cual utiliza por lo general fibras pre-impregnadas. Las fibras tienen resinas parcialmente curadas y el catalizador permanece latente, para prolongar su vida útil los pre-impregnados se almacenan a bajas temperaturas. El uso del autoclave nos permite tener un mejor control de la temperatura y la presión que se le aplica al laminado. Esta tecnología garantiza la máxima calidad y apariencia estética en una de las caras de la pieza manufacturada, por lo que es ampliamente requerida para la producción de autos de carreras de F1, monobloques, difusores, componentes de palas eólicas y en la aeronáutica

En este trabajo se presenta la fabricación de las carcasas de un prototipo de ventilador mecánico para atender de forma rápida las urgencias derivadas de la pandemia COVID-19. El ventilador representó el trabajo conjunto de distintas áreas de investigación. Las carcasas del ventilador se fabricaron a través de impresión 3D y el proceso de infusión asistido por vacío en materiales compuestos, a partir del aprovechamiento de la infraestructura instalada en CIDESI.

Materiales y métodos

El chasis y las carcasas del ventilador se diseñaron utilizando el software SolidWorks 2020. Las carcasas se imprimieron a través de la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM) en una impresora Rise Pro2 Plus, utilizando un filamento PLA Premium de 1.75 mm de diámetro color plus adquirido en 3D Market. El proceso de impresión 3D se realizó a temperatura ambiente ($\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$), depositando el PLA capa a capa con un espesor de 0.2 mm en dirección vertical (eje "Z"), a través de una boquilla de 0.4 mm de diámetro. Las dos caras de mayor longitud de cada pieza impresa se consideraron como referencia para la dirección vertical, de esta forma se aseguró que las piezas de grandes dimensiones pudieran caber en la impresora Rise Pro2 Plus.

La impresión se llevó a cabo sobre un soporte raft para facilitar la adhesión de la impresión a una temperatura del extrusor de 215 °C. Se imprimieron 5 capas sólidas de contorno inferior y superior, con 2 capas sólidas de contorno lateral y una densidad de relleno al 30%. La velocidad de depósito para las capas sólidas fue de 25 mm/s, mientras que la velocidad de depósito para el relleno fue de 45 mm/s. La estrategia de relleno utilizada para todas las piezas fue un patrón cuadrangular para cada capa.

Para la fabricación de las carcasas estructurales fue necesario construir moldes de fibra de vidrio. Para ello, se fabricaron moldes maestros a partir de fibra de madera de densidad media, también conocida como madera MDF, cuyo acrónimo corresponde a las palabras en inglés Medium Density Fibreboard. Los moldes MDF permiten fabricar piezas curvas y complejas con relativa facilidad. Los moldes se

fabricaron a partir de tabloncillos de MDF de 1 pulgada de espesor, los cuales fueron cortados en segmentos a dimensiones específicas de acuerdo a un arreglo de apilamiento modelado en software 3d, que después se unieron entre sí con pegamento y pijas metálicas como refuerzo, para ser ensamblados a una base principal de Nylamid. De esta manera se forma pieza de volumen adecuado, y acorde a las dimensiones de la pieza a moldear. El siguiente paso fue la programación en software CAM, junto con la selección y preparación de herramienta de corte y sujeción, para ejecutar el maquinado de todas las superficies conforme al modelo 3d del molde. Finalmente, se realizó un acabado manual con lija para desvanecer las marcas notorias por el paso de la herramienta en el maquinado. La maquinaria específica usada para llevar a cabo este trabajo fue una sierra banco circular para madera marca OTMT, un centro de maquinado vertical marca HAAS modelo VF9 y un centro de maquinado horizontal de 4 ejes marca HAAS modelo EC1600.

A pesar de sus múltiples ventajas de manufactura, los moldes maestros de MDF son muy porosos por naturaleza, y poseen una baja resistencia mecánica, lo que dificulta ser utilizados en el proceso de fabricación de moldes y/o piezas mediante el proceso de inyección de resina por medio de infusión. Para reducir la porosidad, los moldes maestros fueron sellados utilizando un sellador River al 48% de nitrocelulosa de la marca Comex y adquirido a Pinturas Acueducto S.A de C.V., seguido de 2 capas de primario 2K-HS-Grundfiller F54 marca Mipa comprado a DINAR QUERETARO y con ello lograr una superficie óptima para la manufactura de los moldes.

Los moldes fueron fabricados a partir del método de infusión asistido por vacío e impregnación manual. En ambos casos se empleó la colchoneta de fibra de vidrio tipo MAT, suministrado por Poliformas plásticas S.A de C.V., la cual fue impregnada con resina epoxi Epolam 2015 comprado con Sika Mexicana S.A de C.V.

A partir de estos moldes se fabricaron las carcasas estructurales del ventilador empleando 2 capas de fibra de carbono 3K -198 g/m² - tejido plano 1x1- adquirido a Quintum. Los tejidos se impregnaron con

resina epoxi Epolam 2015 mediante el método de infusión asistida por vacío.

Resultados

El desarrollo de productos es el término general que se utiliza para describir todas las etapas que hacen posible que la idea de un producto se haga realidad y se lance al mercado. Durante cada etapa, equipos multidisciplinarios se involucran para trazar una hoja de ruta que permita cubrir cada una de las etapas en el desarrollo adecuado del producto.

Tal como se ha mencionado previamente, los ventiladores mecánicos contienen múltiples sistemas y componentes (Dhanani et al., 2020; Martell et al., 2021). No obstante, en este artículo se presenta la manufactura rápida de las carcasas que se utilizaron en el prototipo de ventilador mecánico de CIDESI. Para el diseño del prototipo se consideró un estimado de dimensiones con respecto a la altura, el ancho y la longitud de ventiladores mecánicos comerciales disponibles en el mercado. Con base en estas dimensiones, se realizó un boceto a partir del cual se diseñaron las partes estructurales (chasis) y las carcasas del ventilador mecánico.

El sistema del monitor puede contener el sistema de ventilación y los ensambles eléctricos-electrónicos para su control. Por tanto, las carcasas para este sistema se fabricaron con materiales compuestos de fibra de carbono. Para ello, los moldes del monitor se fabricaron con madera MDF, una vez liberados los diseños por el equipo técnico. La Figura 2 muestra los modelos MDF maestros a partir de los cuales se fabricaron los moldes de fibra de vidrio y resina Epoxi.

Para realizar un diseño adecuado del ventilador (Anwari et al., 2021; Chiang, Castro, & Sánchez, 2022; Shah, Bhattarai, et al., 2015; Shah, Joshipura, et al., 2015), se procedió a dividir el chasis en tres partes principales:

- Monitor: esta parte incorpora todos los sistemas principales del ventilador, como válvulas inspiratorias, circuitos eléctricos, circuitos de gas, y el soporte de la pantalla LCD, principalmente.

- Pedestal: sirve para almacenar paquetes de baterías y otras partes de un ventilador. Cuenta con una puerta para facilitar el acceso a estos sistemas.
- Base: se utiliza para mover el ventilador, incorpora ruedas giratorias para facilitar el movimiento.

Soporte de monitor

En un ventilador mecánico, el aspecto más importante es su control y los datos que se muestran en una pantalla que suele ser del tamaño de una pantalla de computadora portátil de 15". Para sostener esta pantalla es necesario inclinarla, por lo que se diseñó un soporte de aluminio. Esta parte del prototipo rápido del ventilador mecánico es de gran relevancia, ya que contiene los sistemas electrónicos y de ventilación mecánica que deben resguardarse. En consecuencia, esta parte se fabricó con tejidos de fibra de carbono para tener alta resistencia sin incrementar su peso Figura 2a. El ventilador está diseñado con ranuras para conectar las válvulas inspiratorias y espiratorias en la parte trasera, orificios para conectar aire médico y oxígeno en la parte posterior, orificios para manijas de tornillo y soportes para monitor.

Pedestal

El pedestal permite realizar las conexiones eléctricas necesarias para el dispositivo, resguardar las baterías o bien, contener los mecanismos para el acople a sistemas anexos de respiración. Las especificaciones del diseño del pedestal contienen varios filetes y ranuras para que el diseño sea estético, que sea un prototipo no impide la estética del ventilador, tal como se muestra en la Figura 2b. El pedestal posee un mecanismo de compuerta que facilita el acceso a los componentes guardados en el interior. Además, se ha diseñado una base para acoplarla con la parte del monitor.

Base

La base se conforma de un chasis metálico para soportar el peso del ventilador prototipo. La base está diseñada de tal forma que sus patas se acoplan a una carcasa que cubre el chasis son interferir en el acople de las ruedas giratorias. La base cuenta con un diseño

para que el pedestal encaje simétricamente mediante seis orificios que permiten el atornillado de su contraparte, lo que facilita el montaje.

Fabricación del monitor

En el caso del monitor, el proceso para la obtención de las carcasas prototipo se dividió en 3 pasos generales: 1) preparación de los moldes maestros, 2) obtención de moldes para la carcasa y 3) fabricación de carcasas estructurales por medio del moldeo por infusión asistido por vacío. Para cada una de las tres etapas se empleó Resina Epolam 2015, Primer 2k, nitrocelulosa, gel coat tooling naranja, Fibra de vidrio tipo MAT para los moldes y Fibra de carbono plain weave de 198 gsm para las carcasas del monitor prototipo.

Preparación de los moldes maestros

La Figura 2 muestra los dos moldes MDF maestros que fueron manufacturados dentro de las instalaciones de CIDESI Estado de México y recibidos en CIDESI sede aeropuerto.

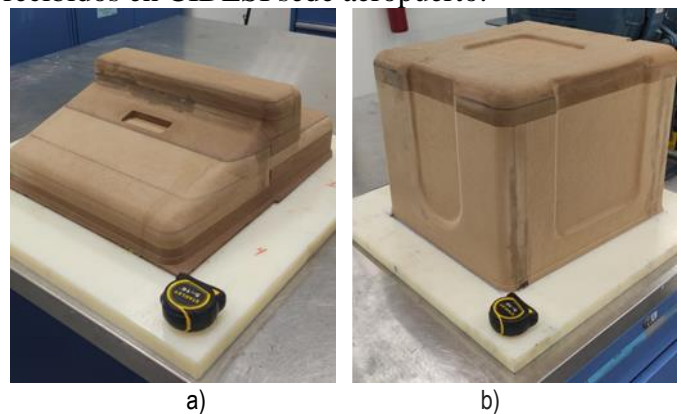


Figura 2. Fotografías de los moldes MDF maestros del monitor prototipo para fabricar los moldes para piezas de fibra de carbono. Fuente: elaboración propia

El proceso de sellado del MDF requiere de una limpieza de la superficie de los moldes maestros, tal como se aprecia en la Figura 3. Para ello, se utilizó aire comprimido, con la finalidad de evitar la presencia de partículas de polvo que incidan en la calidad del sellado durante el recubrimiento de los moldes maestros.



Figura 3. Fotografía representativa del proceso de limpieza de los moldes MDF maestros. Fuente: elaboración propia

Se utilizó una pistola por gravedad para un adecuado tratamiento de sellado (Figura 4). Este procedimiento permitió recubrir por capas a los moldes MDF maestros. Para el sellado de los moldes se utilizaron dos tipos de materiales: el sellador de nitrocelulosa y el primer 2k.



Figura 4. Fotografía representativa de la aplicación de sellante a través de una pistola de gravedad. Fuente: elaboración propia

El primer material que se le aplicó a los moldes MDF maestros fue el sellador de nitrocelulosa. Se le aplicaron 4 capas en total, con espacios de secado de 30 minutos entre cada capa. Posteriormente, se aplicaron 4 capas en total de primer 2k, con espacios de secado de 6 horas entre cada capa, quedando una apariencia de color gris, tal como se puede observar en la Figura 5.



Figura 5. Fotografía representativa del aspecto de los moldes MDF maestros posterior al tratamiento de sellado. Fuente: elaboración propia

Obtención de moldes para la carcasa

A partir del sellado, los moldes MDF maestros permitieron la manufactura de los moldes para la fabricación de la carcasa prototipo. Para ello, se empleó el método de infusión asistido por vacío, según se puede apreciar en la Figura 6.

Para este proceso, el MAT seco de fibra de vidrio se coloca de forma manual sobre la superficie de los moldes MDF maestros. Posteriormente se cubre toda la periferia del molde maestro utilizando una película (bolsa) de plástico, y se sella con cinta de butilo sobre una base plana. Lo anterior permitirá generar un vacío hermético por medio de una bomba hasta compactar el refuerzo MAT de fibra de vidrio. Finalmente, por acción del vacío se introduce la resina. El proceso de infusión por vacío ofrece una reducción de las emisiones volátiles que suelen ocurrir en las técnicas de proceso por moldeo abierto.



Figura 6. Fotografía representativa donde se aprecia el arreglo del proceso de infusión en uno de los moldes MDF maestros. Fuente: elaboración propia

Posterior a la infusión, los moldes MAT de fibra de vidrio se retiran de los moldes MDF maestros, y se procede a realizar tareas de acabado en la superficie de los moldes MAT. Para ello, se realizó un proceso de recubrimiento, aplicando tres capas de geal coat con espacios de curado de 30 minutos entre cada capa. Posteriormente, los moldes MAT se lijaron utilizando lijas con diferentes tipos de granos hasta obtener un buen acabado y proceder con el pulido de los moldes MAT, tal como se aprecia en la Figura 7.

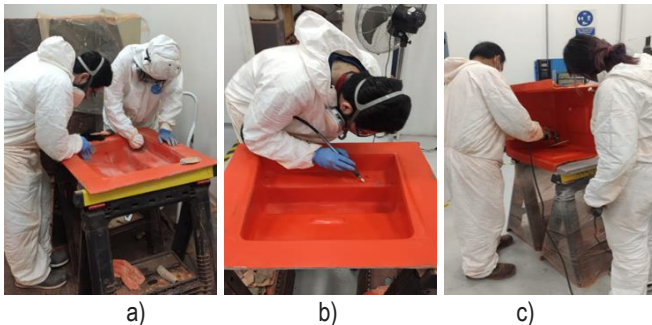


Figura 7. Fotografías representativas del acabado final de los moldes MAT de fibra de vidrio: a) aplicación de geal coat, b) acabado superficial, c) pulido. Fuente: elaboración propia

Fabricación de carcasas estructurales

A través de los moldes MAT de fibra de vidrio se fabricaron las carcasas estructurales de fibra de carbono correspondientes al monitor del ventilador mecánico prototipo. Estas carcasas estructurales se manufacturaron utilizando 4 capas de fibra de carbono de tejido plano de 198 gsm, mediante el proceso de infusión de resina asistida por vacío, tal como se muestra en la Figura 8. Las carcasas del monitor se presentan en la Figura 9.



Figura 8. Fotografía representativa del arreglo del proceso de infusión asistida por vacío para la fabricación de las carcasas estructurales correspondientes al ventilador prototipo. Fuente: elaboración propia



Figura 9. Fotografía de los moldes MAT de fibra de vidrio (en rojo) y el monitor estructural de fibra de carbono (en negro) para el ventilador mecánico prototipo. Fuente: elaboración propia

Fabricación del pedestal y base

El diseño y la fabricación de un ventilador mecánico toman en cuenta características como la funcionalidad, la fiabilidad y la estabilidad del proceso. El material empleado debe ser de los más altos estándares médicos para tratar al paciente con seguridad. Los polímeros termoplásticos son un material adecuado para el diseño semiestructural de todos los ventiladores mecánicos modernos. Los materiales más comunes utilizados para fabricar la estructura exterior de los ventiladores mecánicos son POM-C, PEEK, PEI y PVDF.

Para la fabricación del pedestal y la base del ventilador mecánico prototipo se utilizó el proceso de impresión 3D utilizando filamento termoplástico de PLA. A través de distintas iteraciones de diseño, cada una considerando suposiciones y consideraciones diversas, se liberaron los diseños del pedestal y la base del ventilador mecánico prototipo, utilizando el software SOLIDWORKS. A partir de estos diseños,

las piezas se fabricaron mediante impresión 3D, según se aprecia en la Figura 10.



Figura 10. Proceso de impresión 3D de distintas piezas del ventilador mecánico prototipo: a) pedestal, b) base. Fuente: elaboración propia

Debido a la capacidad de espacio de las impresoras 3D, fue necesario imprimir por partes las carcasas del ventilador. El montaje de las carcasas fue óptimo. No obstante, fue necesario adherir cada parte con adhesivo a base de cianoacrilato y reforzarlos en su parte posterior con fibra de vidrio tipo MAT y resina poliéster para una sujeción más firme, tal como se presenta en la Figura 11.



Figura 11. Fotografías representativas del acoplamiento de las piezas impresas en 3D: a) refuerzo en la parte posterior de las carcasas de PLA mediante fibra de vidrio tipo MAT con resina poliéster, b) carcasas acopladas. Fuente: elaboración propia

Posteriormente, las carcasas fueron colocadas sobre el chasis del ventilador. La Figura 12 muestra el ensamble final del ventilador mecánico prototipo.

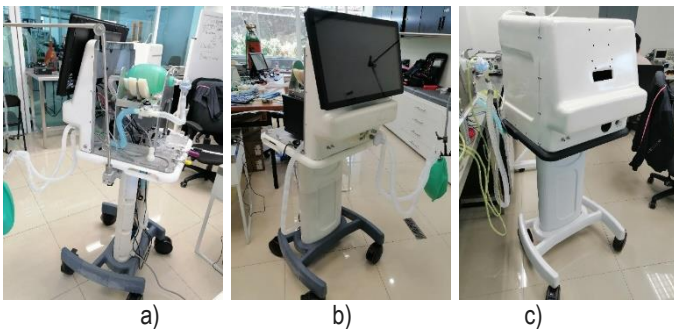


Figura 12. Fotografías representativas del ensamble final del ventilador mecánico prototipo: a) vista posterior del sistema de ventilación, b) vista frontal donde se aprecia el monitor, c) acabado final del prototipo sin el monitor. Fuente: elaboración propia

Trabajos a futuro

El presente trabajo de difusión representa una forma de desarrollo a nivel prototipo utilizando técnicas de manufactura de prototipado rápido. Actualmente se están efectuando pruebas de los sistemas de respiración en porcinos. El siguiente paso es realizar el análisis de funcionamiento para desarrollar los sistemas y carcasas a un nivel industrial, para ello se seguirán distintas normas, entre la que destaca la “NOM-241-SSA1-2021: Buenas prácticas de fabricación de dispositivos médicos”, que permitirán lograr la certificación ante COFEPRIS y conseguir el permiso para el ensamble de sistemas y subsistemas.

Financiamiento

Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto 319037 Escuela Mexicana de Ventilación.

Conclusiones

El diseño de prototipo rápido de ventiladores mecánicos debe ser estético, robusto, ergonómico y eficaz para el usuario médico y paciente.

El proceso de prototipo rápido es constante, y se desarrolla continuamente para adaptar las variaciones diversas que involucran la eficiencia global del ventilador mecánico. Lo más importante a considerar es que el prototipo desarrollado es funcional y puede utilizarse en casos de emergencia.

Evidentemente, existen áreas de mejora que pueden optimizar el rendimiento del prototipo desarrollado en esta investigación, de las cuales destacan las dimensiones, cableado, electrónica y estética. Las ruedas giratorias son de gran relevancia y debe considerarse en el diseño inicial del prototipo.

Bibliografía

- Alwasel, A., Zaky, J., Alhussaini, K., Alossimi, B., & Alharbi, T. (2021). Increasing the efficiency of mechanical ventilators during pandemics through additive manufacturing. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 21(2), 242–245. doi:10.17305/bjbms.2020.5165
- Anwari, V., Ng, W. C. K., Mbadjeu Hondjeu, A. R., Xiao, Z., Afenu, E., Trac, J., ... Mashari, A. (2021). Development, manufacturing, and preliminary validation of a reusable half-face respirator during the COVID-19 pandemic. *PloS One*, 16(3), e0247575. doi:10.1371/journal.pone.0247575
- Chatburn, R. L., & Branson, R. D. (2022). Shortages and Vulnerabilities of Hospital Oxygen Systems. *Respiratory Care*, 67(8), 1002–1010. doi:10.4187/respcare.09853
- Chiang, L. E., Castro, F. A., & Sánchez, T. F. (2022). VEMERS 2.0: Upgrading of an Emergency Use Ventilator from a Single Mandatory Volume Control Mode of Ventilation (VEMERS 1.0) to 8 Modes of Ventilation. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 6965083. doi:10.1155/2022/6965083
- Dhanani, J., Pang, G., Pincus, J., Ahern, B., Goodwin, W., Cowling, N., ... Laupland, K. B. (2020). Increasing ventilator surge capacity in COVID 19 pandemic: design, manufacture and in vitro-in vivo testing in anaesthetized healthy pigs of a rapid prototyped mechanical ventilator. *BMC Research Notes*, 13(1), 421. doi:10.1186/s13104-020-05259-z
- El Haddi, S. J., Brito, A., Han, X.-Y., Fontaine, E., Menzel, W., Child, D., ... Chi, A. (2022). CRISIS ventilator: A 3D printed option for ventilator surge in mass respiratory pandemics. *American Journal of Surgery*, 224(1 Pt B), 569–575. doi:10.1016/j.amjsurg.2022.02.064
- Fjølner, J., Haaland, Ø. A., Jung, C., de Lange, D. W., Szczeklik, W., Leaver, S., ... Flaatten, H. (2022). Who gets the ventilator? A multicentre survey of intensivists' opinions of triage during the first wave of the COVID-19 pandemic. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 66(7), 859–868. doi:https://doi.org/10.1111/aas.14094
- Gendreau, S., Benelli, B., Delière, M., Tuffet, S., de Prost, N., Razazi, K., ... Mekontso Dessap, A. (2022, July). Partitioning Mechanical Ventilator Duration in COVID-19-related Acute Respiratory Distress Syndrome. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. United States. doi:10.1164/rccm.202108-1963LE
- Lanitem. (2021, 09 28). Retrieved from Lanitem: <https://lanitem.org/ventilador/>
- Maleczek, M., Toemboel, F., Van Erp, M., Thalhammer, F., & Rössler, B. (2022). Reusable respirators as personal protective equipment in clinical practice: User experience in times of a pandemic. *Wiener Klinische Wochenschrift*, 134(13–14), 522–528. doi:10.1007/s00508-022-02022-1
- Manero, A., Smith, P., Koontz, A., Dombrowski, M., Sparkman, J., Courbin, D., & Chi, A. (2020). Leveraging 3D Printing Capacity in Times of Crisis: Recommendations for COVID-19 Distributed Manufacturing for Medical Equipment Rapid Response. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13). doi:10.3390/ijerph17134634
- Martell, F., Uribe, J. M., Sarabia, J. C. S., Ruiz, A., Martínez, Á. E., & Licurgo, E. (2021). *Mechatronic Design Methodology for Fast-Prototyping of a Pressure Controlled Mechanical Ventilator*. *Lecture Notes in Networks and Systems*.
- Minami, T., Kai, S., Tanaka, T., Ito, I., Kato, G., Nagao, M., ... Chin, K. (2022). Non-invasive ventilation using a novel ventilator and non-vented full-face mask for patients with respiratory failure during the COVID-19 pandemic: Report of three cases. *Respiratory Investigation*, 60(4), 607–611. doi:https://doi.org/10.1016/j.resinv.2022.03.005
- Shah, M. T., Bhattarai, S., Lamichhane, N., Joshi, A., LaBarre, P., Joshipura, M., & Mock, C. (2015). Assessment of the availability of technology for trauma care in Nepal. *Injury*, 46(9), 1712–1719. doi:10.1016/j.injury.2015.06.012
- Shah, M. T., Joshipura, M., Singleton, J., LaBarre, P., Desai, H., Sharma, E., & Mock, C. (2015). Assessment of the availability of technology for trauma care in India. *World Journal of Surgery*, 39(2), 363–372. doi:10.1007/s00268-014-2805-7
- White, L. A., Mackay, R. P., Solitro, G. F., Conrad, S. A., & Alexander, J. S. (2021). Construction and Performance Testing of a Fast-Assembly COVID-19 (FALCON) Emergency Ventilator in a Model of Normal and Low-Pulmonary Compliance Conditions. *Frontiers in Physiology*, 12, 642353. doi:10.3389/fphys.2021.642353
- Wong, J. W., Chiew, Y. S., Desai, T., & Chase, J. G. (2022). Model-based patient matching for in-parallel pressure-controlled ventilation. *BioMedical Engineering Online*, 21(1), 1–14. doi:10.1186/s12938-022-00983-y