



## DESARROLLO DE UN RESPIRADOR MECÁNICO DE BAJO COSTO

Romero Andrés<sup>1</sup>, Mainetti Carlos<sup>2</sup>, Borja Fernando, Gallego Danna<sup>3</sup>, Piovan Marcelo<sup>4</sup> y Pistonesi Carlos<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada. UTN FRBB.  
11 de abril 461, 8000 Bahía Blanca, Argentina, aromero@frbb.utn.edu.com.

<sup>2,5</sup> Grupo de Estudio Sobre Energía, UTN FRBB.

<sup>3</sup> Unidad de Diseño Industrial Tecnológico, UTN FRBB

### RESUMEN

La irrupción del coronavirus denominado COVID-19, tomó por sorpresa a todos los países del mundo. La rapidísima proliferación de la enfermedad, en menos de 60 días ha puesto en jaque los sistemas de salud de casi todos los países donde llegó, incluso del así llamado mundo occidental industrializado. Un ejemplo dramático es el caso de Italia, cuyo sistema hospitalario colapsó. El cuello de botella de las circunstancias sanitarias, se halla en la limitada cantidad de equipos de asistencia respiratoria automatizada para asistir en la recuperación de los pacientes que por causa de la infección tienen severas limitaciones para inhalar y exhalar. Argentina no ha sido inmune, sin embargo, beneficiada por la llegada tardía del contagio (entre la última quincena de febrero y la primera de marzo), ha dado espacio y tiempo para organizar medidas de contención. Aun así, existe la posibilidad latente que sean necesarias grandes cantidades de respiradores automatizados, los cuales escasean en Argentina, especialmente los de clase profesional-hospitalaria. Es pues que el motivo de este trabajo radica en el desarrollo de un tipo básico de respirador que sea homologable. La hipótesis de trabajo se basa en el uso de elementos homologados conocidos por los médicos como la bolsa AMBU<sup>®</sup>, para auxilio manual de respiración en los procedimientos de traslado. Con esto se ha desarrollado un prototipo de sistema mecánico que comprime la bolsa mediante el empuje de dos rodillos paralelo y cuyo movimiento es dirigido automáticamente por una placa microcontroladora de bajo costo. La mayoría de las piezas se han construido aditivamente en plásticos biodegradables.

**Palabras Clave:** Respirador mecánico, COVID-19, impresión 3D.



## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución de la pandemia de CODIV-19 que atraviesa el mundo ha experimentado un rápido incremento de contagios, lo cual genera una demanda extraordinaria de recursos críticos como camas de terapia intensiva y respiradores artificiales. Argentina no ha quedado fuera de tal situación y, la llegada tardía de los contagios, permitió generar distintas políticas sanitarias para mitigar el aumento de contagios y prepararse para la obtención estos recursos valiosos.

La Argentina posee empresas fabricantes de respiradores artificiales, pero dado el aumento vertiginoso de la demanda a nivel mundial, provocaron que las autoridades nacionales decidieran prohibir la exportación de estos insumos críticos. Aun así, la fabricación de estos elementos puede no alcanzar si la tasa de contagios aumenta aceleradamente.

Un respirador artificial es un dispositivo utilizado para asistir de ventilación a un paciente con problemas respiratorios. Es un sistema capaz de regular el flujo y presión de aire para adaptarse a las necesidades del paciente, pudiéndose regular la mezcla de oxígeno/aire y la humedad, así como censar los intentos de respiración. Posee diferentes sensores y modos de ventilación que, junto a una representación de información del proceso ventilatorio ayudan al médico a proporcionar una ventilación efectiva y segura.

Como se observa, el sistema electro-mecánico de un respirador artificial es complejo, con una electrónica de control basado en microprocesadores y sensores los cuales funcionan junto a un software asociado y, adicionalmente, posee varios insumos importados, hacen que el diseño y construcción de estos equipos demore más que la necesidad requerida, más aún si no se posee un conocimiento previo del proceso a controlar. Por esta razón, se han generado un sinnúmero de proyectos de diseño de respiradores desde organismos públicos y privados como por ejemplo el proyecto “Un respiro” [1], diseñado por la Universidad Nacional de Rosario junto con la empresa INVENTU (Figura 1), el prototipo denominado Ciclador Automático de Resucitador (CARE) perteneciente al proyecto “RespirAR” [2], diseñado por un equipo interdisciplinario integrado por Paschetta, Vassarotto y Torres (Figura 2), y el prototipo asistente respiratorio [3], diseñado por el Centro de Investigación Aplicada UNRAf Tec de la Universidad Nacional de Rafaela junto a la empresa INBIO (Figura 3).

Varios proyectos como estos se valen de una bolsa de resucitación manual conocida como bolsa AMBU® [2-5], la cual se utiliza como ventilador de acción manual en el traslado de personas con problemas respiratorios a los centros asistenciales. Esta estrategia de diseño tiene la ventaja de no requerir componentes complejos, son más económicos y rápidos para su fabricación.



Figura 1. Respirador proyecto “Un respiro” de la UNR e INVENTU

Figura 2. Respirador proyecto “RespirAR”

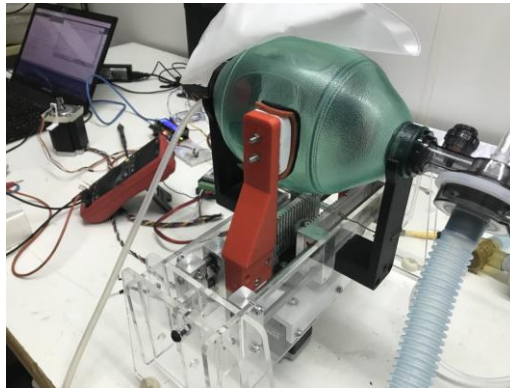


Figura 3. Prototipo asistente respiratorio de UNRaf, CenTec e Inbio

En este contexto, se propuso el diseño de un prototipo de ventilador mecánico automatizado, de baja complejidad y bajo coste, que sirva en la emergencia como alternativa frente a la escasez de los respiradores artificiales tradicionales [8]. El diseño se basa en la automatización de una bolsa de reanimación manual, más conocida como AMBU®. Cabe aclarar que este ventilador no pretende reemplazar al respirador artificial tradicional, pero puede ser muy útil en el caso que el sistema de salud colapse por la falta de los mismos.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL RESPIRADOR

El respirador artificial propuesto se basa en una bolsa de reanimación manual (Figura 4), el cual se utiliza como elemento ventilatorio con presión positiva a un paciente con problemas respiratorios. Dicha bolsa fue diseñada para ser accionada por un profesional médico en una situación de emergencia, mientras monitorea los parámetros clínicos del paciente mediante aparatología adicional.



Figura 4. (a) Bolsa de reanimación manual. (b) Utilización de la bolsa

El diseño propuesto se basa en la automatización del accionar de la bolsa dentro de ciertos parámetros de ventilación mecánica como volumen de aire (VOL), respiraciones por minuto (BPM) y relación tiempo de inspiración / expiración (I/E). En el inicio del proyecto se determinaron ciertas condiciones y objetivos a cumplir por el diseño:

- Baja complejidad, un sistema simple con pocas piezas mecánicas y de fácil armado.
- Fácil replicación, es decir que las mayorías de las piezas puedan ser construidas en materiales plásticos con impresoras 3D.
- Bajo coste y que los elementos para las piezas sean obtenidos en el país, sean de producción nacional o de fácil obtención.
- Bajo tiempo de fabricación.
- Fácil limpieza y esterilización.

Con estas premisas se pergeñaron varias alternativas funcionales que condujeron a la selección y desarrollo del equipo que en los próximos apartados se expone.

### 3. DETALLE CONSTRUCTIVO

El sistema mecánico del dispositivo fue pensado con el propósito de comprimir la bolsa Ambu®, y tiene ciertas características particulares que tratan de simular la compresión que ejercería la mano de un operador, según las técnicas de manipulación tradicional. La insuflación debe realizarse aproximadamente a la mitad de la capacidad del balón resucitador con la mano dominante. Por ello, el sistema mecánico incorpora dos rodillos cilíndricos que simularían los dedos del operador, estos rodillos ruedan desde la parte posterior de la bolsa hacia el frente de la misma y a su vez en forma transversal consiguiendo un movimiento combinado de compresión como de desplazamiento axial.

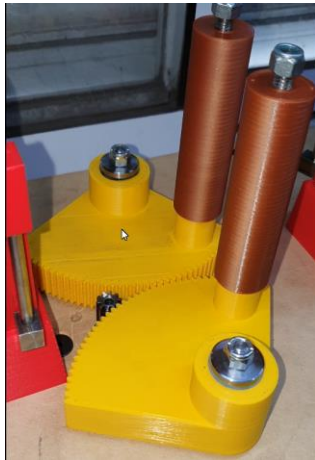


Figura 5. Sistema mecánico de compresión.

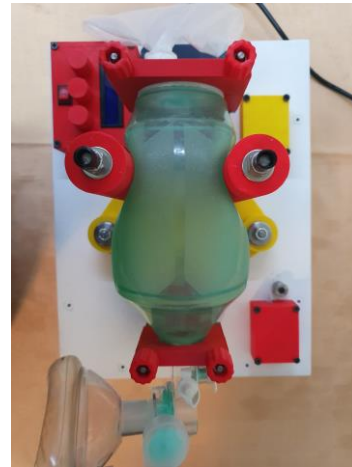


Figura 6. Bolsa bajo compresión

Este desplazamiento axial es consecuencia del diseño, y a la vez, tiene la función de no aplicar presión siempre en el mismo lugar y así evitar la fatiga del material en una zona determinada y consecuentemente, al rodar sobre la superficie no se produce abrasión ni punción localizadas sobre la superficie exterior de la bolsa evitando el desgaste prematuro.

El sistema mecánico consta de dos sectores de un cuarto de engranaje circular engranados entre sí, a los cuales van solidarios los ejes de los rodillos, estos sectores son movidos por un piñón conectado a un motor paso a paso controlado electrónicamente.

Esta configuración mecánica, tiene el objeto de hacer que todas las partes funcionen en forma rotativa y montadas sobre rodamientos lo que deriva en un mantenimiento prácticamente nulo en la vida útil del equipo, si bien un sistema de colisas resulta de aparente mayor sencillez, conlleva al problema de desgaste, alto rozamiento y mayor probabilidad de atascamiento por falta de mantenimiento,

La bolsa se encuentra suspendida mediante dos anclajes, uno frontal fijo (salida del aire) y otro trasero móvil (entrada del aire). Este último se encuentra libre mediante una corredera que le permite movimiento axial a consecuencia de la contracción del largo que sufre la bolsa durante la compresión. La bolsa puede ser fácilmente retirada aflojando las cuatro tuercas ad hoc en los soportes.

Todas las partes del sistema mecánico están hechas en impresión 3d para su fácil replicado, Los bulones, tuercas y arandelas de ajuste; el piñón montado al motor y una planchuela de montaje a la bancada son los únicos elementos metálicos. En la construcción de las piezas impresas se ha empleado el material Poli-Ácido Láctico (o bien PLA en la jerga) en una impresora clase Prusa MK3s. En la Tabla 1 se indican todas las piezas impresas, y los parámetros de fabricación más representativos de cada una. En tal Tabla, por razones de espacio se han indicado algunos parámetros con siglas: Vdl (Velocidad de impresión), PdLI (porcentaje de llenado interior), ECE (Espesor de Cáscara Externa), Tdl (tiempo de impresión).





Otros parámetros de importancia son comunes a todas las piezas como, por ejemplo, la temperatura de pico (215°C) y de plataforma (60°C), el espesor de capa de impresión (0.3 mm).

Tabla 1. Piezas impresas y sus parámetros más importantes de construcción

<b>Pieza (cantidad)</b>	<b>Vdl [mm/seg]</b>	<b>PdLI [%]</b>	<b>ECE [mm]</b>	<b>DP [hs]</b>
Engranajes (2)	30	20	1.6	8.4
Cilindros (2)	40	20	2.0	7.2
Soporte fijo	40	20	1.2	3.7
Cubre soporte fijo	40	20	1.2	1.2
Soporte móvil	40	20	1.2	6.2
Cubre soporte móvil	40	20	1.2	1.2
Corredera soporte	40	20	1.2	6.1
Caja p/control	50	100	1.6	6.5
Perillas de control (3)	35	20	1.2	1.1
Cajas sensores (2)	50	100	1.6	3.8
Porta Tuercas (4)	30	20	1.2	2.2

El tiempo de impresión total ha sido de 48 hs. en máquina, a lo que debe sumarse un total de 4 hs. asociadas a los preparativos de impresión y limpieza de cada pieza. El piñón de accionamiento ha sido construido por fresado convencional en acero SAE 1045, con un módulo 1.25 mm., diámetro de Addendum de 15 mm.

#### 4. SISTEMA DE CONTROL

El control del respirador se realiza a través de un microcontrolador Arduino Nano, que junto al driver de potencia modelo TB6600, conforman el bloque principal de accionamiento del motor paso a paso NEMA 23. El sistema de control es de tipo abierto, sin realimentación. Los parámetros de entrada BPM, I/E y VOL se ajustan mediante tres potenciómetros ubicados debajo del display que muestran dichos valores. En la Figura 7 puede observarse un diagrama del sistema de control implementado.

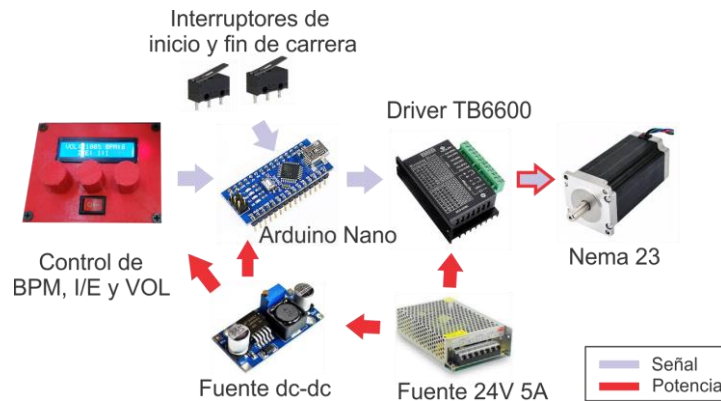


Figura 7. Sistema de control simplificado.

Al sistema se le ha incorporado dos interruptores (inicio y final de carrera) a fin de asegurar primero, una inicialización mecánica conocida y, segundo, que el desplazamiento de los rodillos esté dentro de la zona de trabajo deseada.

La alimentación se obtiene de una fuente de tipo industrial de 24Vcc 5A, la cual energiza el driver de potencia TB6600 y adicionalmente, de ésta se obtiene la alimentación del microcontrolador y el display a partir de una fuente dc dc como puede verse en la Figura 7. En la Figura 8 se muestra el circuito completo implementado para el control del respirador.

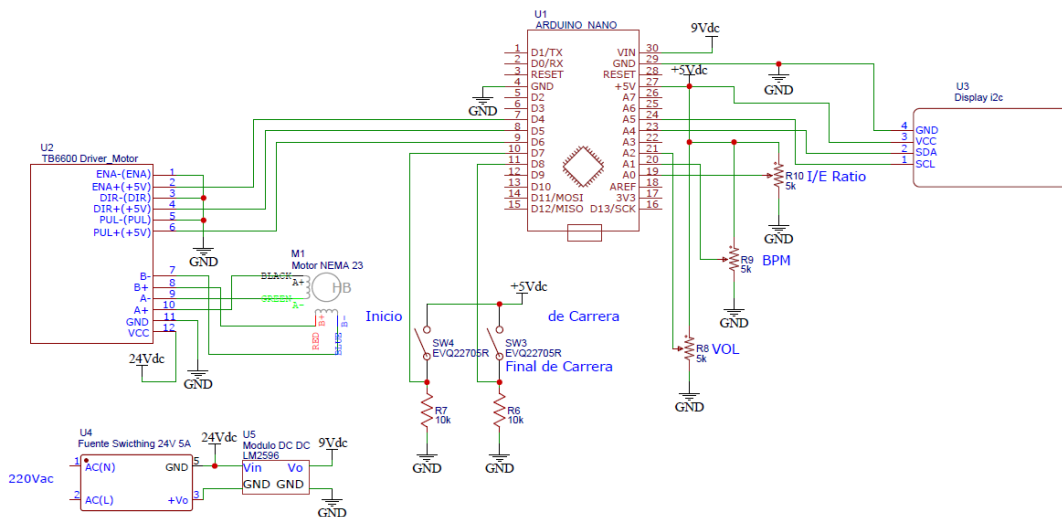


Figura 8. Circuito eléctrico implementado.

## 5. EVALUACIÓN Y PRUEBAS

Para realizar el ensayo de comportamiento del equipo se utilizó un espirómetro con sensor a turbina con interrupción infrarroja y rejilla protectora, portátil, marca MIR mod. Spirobank G calibrado (Figura 9). El mismo se conectó mediante interfaz USB a un PC de escritorio y los resultados fueron tomados y analizados por un software WinspiroPRO, versión 7.5 (Figura 10).



Figura 9. Espirómetro MIR.

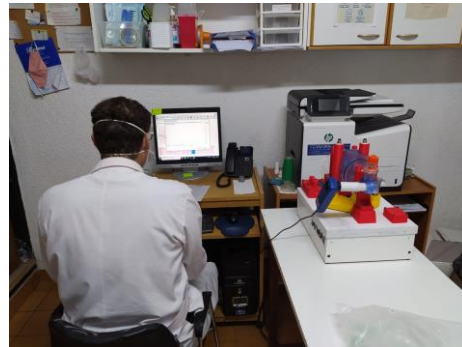


Figura 10. Ensayo del respirador.

El ensayo se realizó en condiciones ambientales óptimas de temperatura, presión y humedad. Se analizaron dos condiciones generales:

- Paciente adulto masculino, caucásico, de 175 cm de altura y 80 kg de peso, no fumador.
- Paciente infantil masculino, caucásico, de 110 cm de altura y 40 kg de peso, no fumador. Con 24 respiraciones por minuto (BMP).

Para el primer caso, la prueba se llevó a cabo teniendo en cuenta el volumen corriente, con cuatro diferentes configuraciones del respirador: al 70%, 80%, 90% y 100%. En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos.

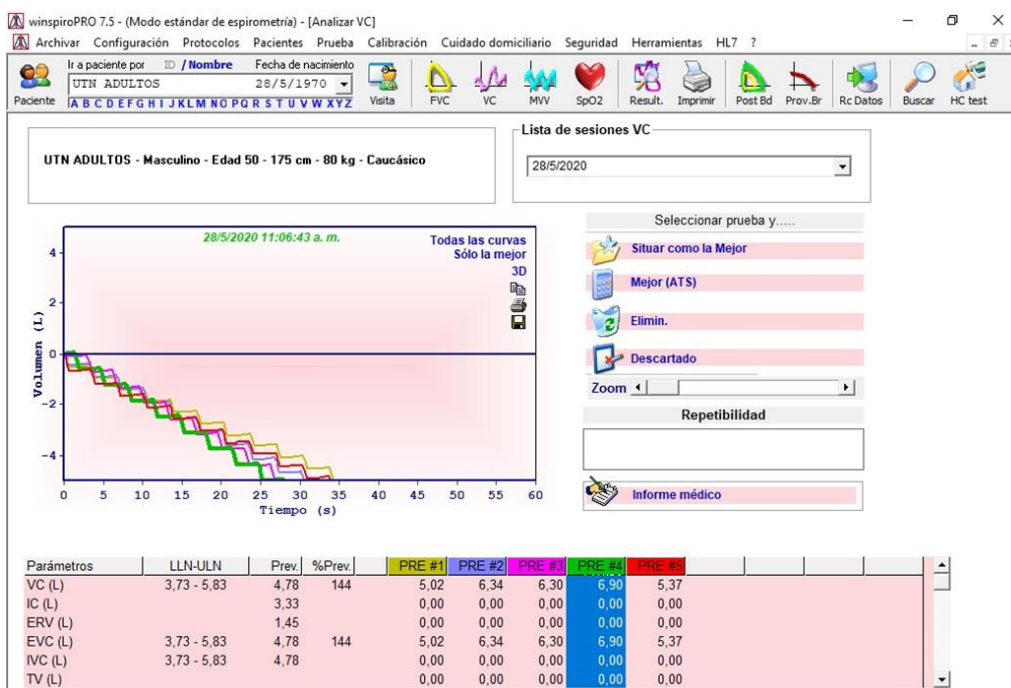


Figura 11. Resultados obtenidos para un paciente adulto.





Para el segundo caso, la prueba se realizó con volumen corriente, pero con seis diferentes configuraciones del respirador: al 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%. En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos de este caso.

Como observación podemos decir que a partir del 80% se asegura un volumen minuto a 18 respiraciones por minuto de más de 6 litros de aire ventilado.

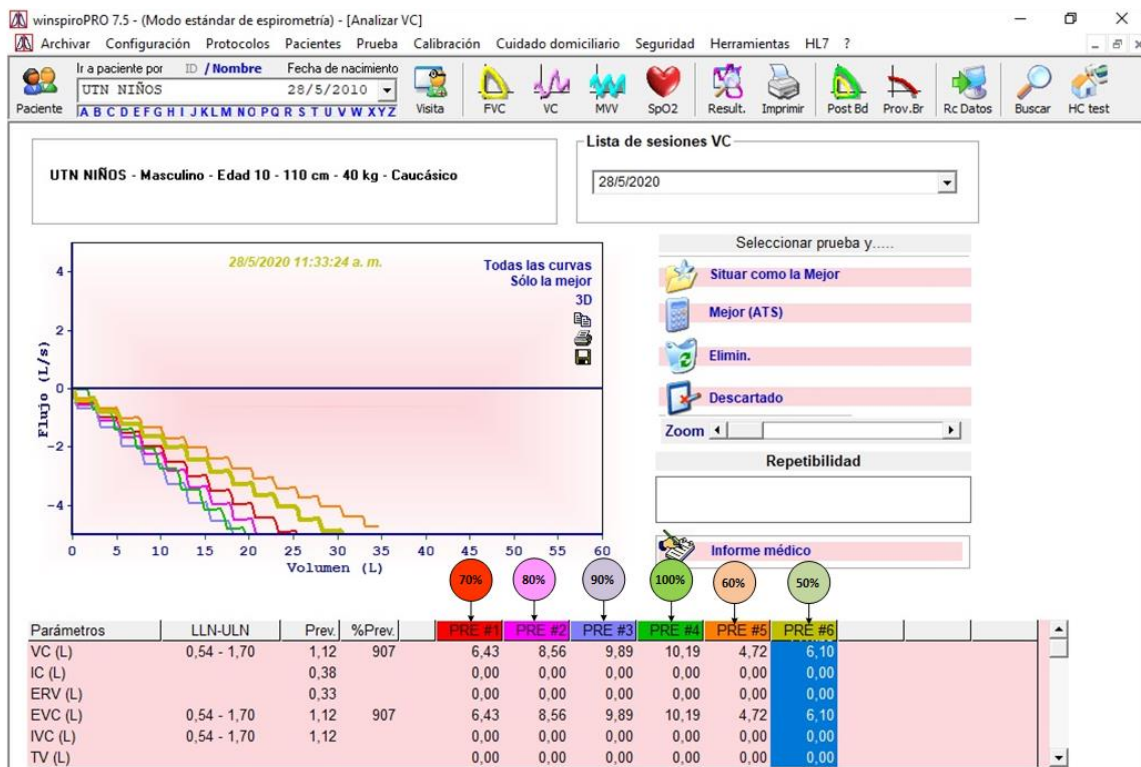


Figura 12. Resultados obtenidos para un paciente infantil.

En este caso el equipo también logra asegurar un volumen minuto a 18 respiraciones por minuto de más de 6 litros de aire ventilado.

## 6. CONCLUSIONES

A modo de conclusiones podemos decir que el respirador mecánico desarrollado, cumple con los requerimientos inicialmente propuestos para dar asistencia dentro de un marco de emergencia, y a su vez facilitar que respiradores de mayores prestaciones puedan ser utilizados en pacientes mas comprometidos. Por otro lado, abre la posibilidad de otros usos asistenciales como es el traslado de pacientes intrahospitalarios o interurbano sin necesidad de que una persona este ventilando permanentemente al paciente en forma manual.

El equipo propuesto es fácil de reproducir, los materiales, insumos electrónicos y mecánicos son pasibles de conseguir en cualquier comercio del ramo (ferreterías, casa de electrónica,



etc.) y no requiere de especialistas para su ensamblado; además el uso de impresión 3d facilita su bajo costo. Todo ello permitiría, eventualmente, su fabricación y montaje en forma seriada.

Fue diseñado de modo tal que tenga fiabilidad acorde a su uso y resistencia para ser usado ininterrumpidamente por largos periodos.

Por último, se están realizando pruebas en organismos sanitarios a fin de encontrar potenciales limitaciones operativas, con el fin de optimizar diseño y/o funcionamiento para atender diversas afecciones respiratorias.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Universidad Nacional de Rosario e INVENTU. (2020). “Un respiro”, recuperado de <https://www.inventu.com.ar/un-respiro>
- [2] F. Paschetta, L. Vassarotto y M. Torres. (2020). “RespirAr”, recuperado de <https://proyectorrespirar.org/>
- [3] Universidad Nacional de Rafaela. (2020). “El prototipo de asistente respiratorio presentado por la unraf fue seleccionado a nivel nacional”, recuperado de <https://www.unraf.edu.ar/index.php/noticias/1331-noticia-518>
- [4] Hussein, Abdul & Lee, Heon Ju & Negrete, Justin & Powelson, Stephen & Servi, Amelia & Slocum, Alexander & Saukkonen, Jussi. (2010). Design and Prototyping of a Low-Cost Portable Mechanical Ventilator. Journal of Medical Devices-transactions of The Asme. 4. 10.1115/1.3442790.
- [5] Shahid, Mukaram. (2019). Prototyping of Artificial Respiration Machine Using AMBU Bag Compression. 1-6. 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706360.
- [6] Soufiane, Belhouideg. (2020). Impact of 3D printed medical equipment on the management of the Covid19 pandemic. The International Journal of Health Planning and Management. 10.1002/hpm.3009.
- [7] Pearce, Joshua. (2020). A review of open source ventilators for COVID-19 and future pandemics. F1000Research. 9. 218. 10.12688/f1000research.22942.2.
- [8] Universidad Tecnológica Nacional FRBB. (2020). “Ventilador Automatizado De Uso Médico” <https://www.frbb.utn.edu.ar/frbb/info/investigacion/proyectos/ventilador/>