

**PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE EQUIPOS MÉDICOS PARA ADAPTARLOS  
COMO VENTILADORES MECÁNICOS TEMPORALES**

**Nicolás Reyes García**

**Trabajo Dirigido**

**Tutor  
Esp. Néstor Flórez Luna  
Especialización en Bioingeniería**

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO  
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD  
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA  
BOGOTÁ D.C  
2020**



## **Agradecimientos**

Quiero dedicarle esta página a las personas que han hecho esto posible

Quiero agradecer en primer lugar a mis señores padres, los cuales se han esforzado durante años para que salga adelante y tenga la mejor educación posible, que a pesar de las dificultades que se han presentado en los últimos años siempre me apoyaron y me impulsaron a seguir adelante con mis estudios

Quiero agradecer a mi tutor el ingeniero Néstor Flórez Luna quien me ayudo a hacer un trabajo innovador y que me ha apoyado desde que inicie la carrera

Agradecer a la escuela colombiana de ingenieros Julio Garavito y al colegio mayor nuestra señora del rosario que me dieron a la oportunidad de estudiar una carrera en convenio con una muy alta calidad y que poco se ha visto en este país

Quiero agradecer al cuerpo docente de alta calidad de ambas instituciones, que se esfuerzan para que los estudiantes aprendan y se mantengan interesados en los estudios de todos los temas relacionados con la ingeniería biomédica

## Tabla de contenido

1.	RESUMEN .....	1
2.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.1.	Introducción a la problemática.....	2
2.2.	<b>Terapia respiratoria</b> .....	4
2.3.	<b>Solución propuesta</b> .....	5
3.	OBJETIVOS .....	5
3.1.	<b>General</b> .....	5
3.2.	<b>Específicos</b> .....	5
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
4.1.	<b>Optimización de los recursos disponibles</b> .....	7
5.	HIPÓTESIS .....	7
5.1.	<b>Uso de compresores de aire como suministro para ventiladores de emergencia</b> .....	8
5.2.	<b>Uso de compresores de aire para terapia respiratoria</b> .....	8
5.3.	<b>Uso de equipos de anestesia como ventiladores mecánicos de manera temporal</b> .....	8
5.4.	<b>Liberación de espacios en la red de gases del centro hospitalario</b> .....	9
6.	MARCO TEÓRICO.....	9
6.1.	<b>Uso de los compresores de aire de los ventiladores mecánicos</b> .....	9
6.2.	<b>Terapia respiratoria</b> .....	12
6.3.	<b>Situación en hospitales</b> .....	12
7.	METODOLOGÍA.....	13
7.1.	<b>Uso de compresores de aire para nebulización</b> .....	15
7.2.	<b>Uso de máquinas de anestesia como ventilador mecánico</b> .....	19
8.	RESULTADOS .....	21
8.1.	<b>Nebulización con compresor de aire</b> .....	21
8.2.	Equipos de anestesia como ventilador mecánico .....	25
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
9.1.	Análisis de las pruebas de nebulización.....	27
9.2.	<b>Análisis para los equipos de anestesia</b> .....	29
9.3.	<b>Procesos soportados por la FDA</b> .....	29
9.4.	<b>Opinión de experto acerca del tema tratado</b> .....	30

10.	CONCLUSIONES .....	31
11.	TRABAJOS FUTUROS.....	32
12.	REFERENCIAS .....	33

## Listado de Figuras

Figura 1: Cantidad de casos de COVID 19 durante el año 2020 [3].....	3
Figura 2: Esquemático general del ventilador mecánico puritana 840, tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03).....	10
Figura 3: unidad de compresión de aire del ventilador mecánico puritan 840, tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03) .....	11
Figura 4: Succionador de aire Thomas 1630, imagen tomada de biomédico.co .....	14
Figura 5: ventilador mecánico marca neumovent para la prueba de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	14
Figura 6: compresor de aire del ventilador mecánico neumovent utilizado para las pruebas de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica. ....	15
Figura 7: montaje para la primera prueba sin mascarilla fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	16
Figura 8: montaje de nebulización usando la red de gases medicinales fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	17
Figura 9: Montaje para nebulización con compresor de aire de ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	18
Figura 10: Montaje para nebulización con compresor de aire de ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	18
Figura 11: equipo de anestesia “Anesthesia system A7” de mindray, imagen tomada de <a href="https://www.mindraynorthamerica.com/anesthesia-systems/anesthesia-machines/anaesthesia-machines-a7/">https://www.mindraynorthamerica.com/anesthesia-systems/anesthesia-machines/anaesthesia-machines-a7/</a> .....	19
Figura 12: heyer modular antesthesia system tomado del manula de servicio.....	20
Figura 13: Compresor de aire usado para las primeras 2 pruebas de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	21
Figura 14: prueba de nebulización sin mascara con el compresor de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	22
Figura 15: Prueba de nebulización sin mascarilla con el sistema de gases fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	23

Figura 16: Prueba de nebulización con mascarilla y el sistema de gases fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	24
Figura 17: Prueba de nebulización con mascarilla y el compresor de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	24

## Listado de Tablas

Tabla 1: características comparadas de diferentes nebulizadores tomado de [5] .....	4
Tabla 2: lista de partes del compresor de aire de la figura 3: tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03).....	11
Tabla 3: “Heyer modular anesthesia system”, Equipo apagado o en espera .....	26

## Listado de Videos

Video 1: Prueba de nebulización usando el compresor de aire como suministro de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	22
Video 2: comparación de pruebas de nebulización por ambos métodos fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	23
Video 3: Prueba de nebulización con el compresor de aire del ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	25
Video 4: Flujómetro de la prueba de nebulización usando el sistema de gases. fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	28
Video 5: Flujómetro de la prueba de nebulización usando el compresor de aire. fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.....	28

## 1. RESUMEN

El presente trabajo propone el uso de ventiladores de emergencia y máquinas de anestesia como instrumentos de reemplazo temporal de ventiladores mecánicos y sus correspondientes funciones destinadas para terapia respiratoria.

El objetivo de este trabajo es aumentar la disponibilidad de las conexiones de acceso a la red de gases medicinales y reducir levemente la demanda de ventiladores mecánicos en clínicas y centros hospitalarios.

En específico se quiere proponer el uso de los compresores de aire que tienen varias marcas de ventiladores mecánicos como un reemplazo o sustituto para las balas de aire que deben tener los ventiladores de urgencia, de este mismo modo, con estos equipos sería posible realizar terapia respiratoria en zonas del centro hospitalario que no estén adecuadas para dicho procedimiento, como lo son salas de espera y usar máquinas de anestesia las cuales especifiquen sus modos ventilatorios como ventiladores mecánicos temporales.

Al usar compresores de aire como suministro de aire para terapias por nebulización se puede liberar espacio de la red de gases en las salas de terapia los cuales se podrían usar para conectar otros equipos de mayor importancia como los ventiladores mecánicos, de igual forma con este método sería posible hacer las nebulizaciones en casa de los pacientes, además de comprobar que ciertas máquinas de anestesia se pueden usar como ventiladores mecánicos.

El uso de compresores de aire como suministro para la terapia respiratoria muestra que funciona de manera similar a la de la red de gases en lo que se refiere a presión y flujo, sin embargo, el montaje propuesto genera un ruido y vibración molestas, además de no contar con un filtro adecuado para el aire que se suministra, adicionalmente para que un equipo de anestesia funcione como ventilador mecánico, debe especificar qué modos ventilatorios tiene.

## **2. INTRODUCCIÓN**

En los últimos 100 años la humanidad ha tenido un gran avance en lo que se refiere a medicina, pasando de usar remedios caseros y poco confiables a tener tratamientos y medicamentos para gran parte de las afectaciones a la salud; esto permitió aumentar en un gran porcentaje los nacimientos exitosos, desarrollar terapias para tratar una gran cantidad de afecciones y crear medicinas que combatan un sin número de enfermedades; gracias a todo esto, la esperanza de vida del ser humano ha aumentado de manera significativa desde principios del siglo XIX [1] [2]; si bien la medicina ha avanzado de manera significativa, también lo han hecho las enfermedades que día a día evolucionan y se vuelven más complejas, en especial los virus, los cuales son capaces de evolucionar y desarrollar resistencia contra las medicinas, lo que ha causado un incremento en las enfermedades existentes, con mayor complejidad en su composición y de mayor resistencia a los medicamentos.

Lo anterior aplica tanto para las enfermedades que se desarrollan de manera natural, como para las que son desarrolladas por el hombre con el fin de ser usadas como armas biológicas; una muestra de lo anterior se evidencia en el brote ocurrido a finales de 2019, de una nueva enfermedad respiratoria causada por la mutación de un virus de la familia corona, que, si bien no tiene una tasa de mortalidad muy alta, en el sentido de que sólo es mortal para personas con sistemas inmunes comprometidos y personas de la tercera edad, su propagación o velocidad de contagio, es una de las más altas de los últimos tiempos, tanto así, que fue capaz de propagarse por el mundo entero en un plazo de 4 a 5 meses, lo que la hace una de las enfermedades que más rápido se ha propagado en la historia que tiene registrada la raza humana.

Esta alta tasa de contagio, también se debe a que en el mundo actual es muy frecuente la movilidad de las personas entre países en cantidades significativas, lo que ciertamente resultó ser un factor determinante para la propagación del virus. [2] [3]

### **2.1. Introducción a la problemática**

Si bien es cierto que, desde que el virus fue identificado como una amenaza se han empezado a realizar investigaciones acerca de este y a la fecha de realización de este documento, ya varios países han avanzado en el desarrollo de posibles vacunas, esto puede tardar bastante en realizarse y aún más, en distribuirse por todo el mundo, por lo que por ahora, se debe hacer todo lo posible para evitar que este virus se propague y dar un tratamiento adecuado para garantizar la recuperación de las personas contagiadas que han presentado síntomas de la enfermedad.

Debido a que el virus ataca principalmente el sistema respiratorio, se ha visto la necesidad de proporcionar cada vez más ventiladores mecánicos a clínicas y hospitales, ya que son necesarios para que el paciente infectado pueda respirar y su vida no corra peligro. Sin embargo, los ventiladores existentes no dan abasto, debido a la alta infectividad del virus y a la cantidad de nuevos pacientes que necesitan un ventilador cada día como se puede apreciar en la Figura 1, los casos han estado en aumento a lo largo de todo el año 2020,

lo que evidencia la necesidad de equipos de apoyo respiratorio en especial de ventiladores [3].

Es por esto que la FDA (*Food and Drug Administration*) ha propuesto soluciones alternativas para la falta de ventiladores en clínicas y hospitales del mundo, y aunque estas soluciones fueron ideadas para el coronavirus, también funcionarán apropiadamente para el caso de que surja otra enfermedad o virus que afecte al sistema respiratorio y cause una alta demanda de equipos de terapia respiratoria, como lo son los ventiladores mecánicos.

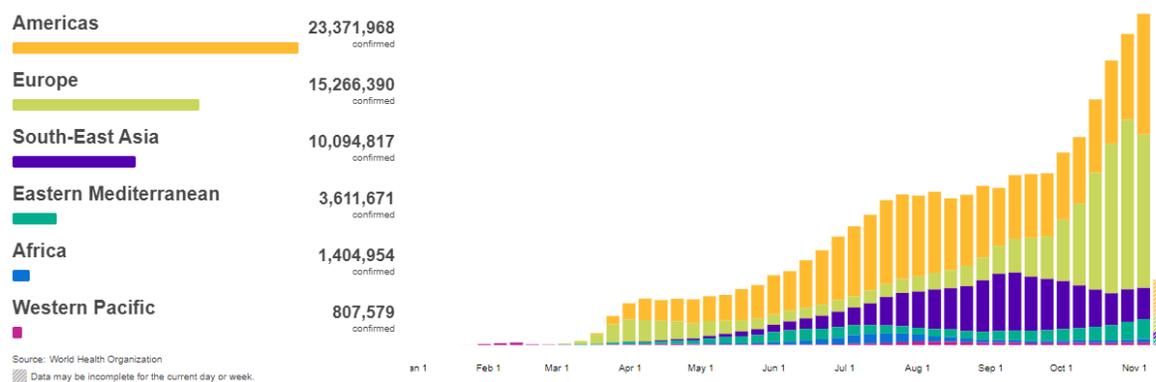


Figura 1: Cantidad de casos de COVID 19 durante el año 2020 [3]

Las soluciones propuestas se basan en que los centros de investigación y universidades de cada país construyan sus propios ventiladores de manera improvisada, para estos casos los requisitos de aceptación para estos equipos dados por la FDA son mucho más sencillos que para los equipos que sacan las grandes multinacionales, claro está, que su vida útil es mucho menor debido a que se presentaron y fueron aceptados para atender la urgencia de la pandemia. Otra solución propuesta ha sido usar equipos encontrados en clínicas y hospitales, relacionados con el sistema respiratorio, (máquinas de anestesia, ventiladores de urgencias, compresores de aire, etc.) y adaptarlos como ventiladores mecánicos de manera temporal, con unos cambios mínimos. De esta manera, si uno de estos equipos tiene baja demanda de uso, se puede adaptar como ventilador mecánico, para un paciente que lo necesite de manera urgente.

Si bien, no todos los equipos pueden adaptarse como ventiladores mecánicos, sí existen varios que son posibles de usar de esta manera. Con el fin de evitar confusiones o errores de uso, la FDA ha publicado un documento en el que lista todos equipos a los cuales se les puede hacer esta adaptación y describe la forma de hacerla, para que cada clínica y centro hospitalario pueda aumentar la cantidad de ventiladores mecánicos disponibles, sin la necesidad de tener que invertir en más equipos, o dejar pacientes sin la atención adecuada. [4]

## 2.2. Terapia respiratoria

La terapia respiratoria es un tratamiento que se basa en suministrar un medicamento en forma de aerosol a los pacientes que presenta complicaciones respiratorias o que acaban de salir de una enfermedad que afectó de manera negativa al sistema respiratorio, es por esto que dichos medicamentos están únicamente dedicados al tratamiento de las vías respiratorias y los pulmones, la manera más común de suministrar estos medicamentos es a través de la nebulización, que se basa en pasar una fuente de aire a través de un recipiente especial llamado cámara de nebulización la cual contiene el medicamento, al pasar por esta cámara el medicamento sale como partículas gracias al suministro de aire y finalmente llega al paciente, existen diferentes tipos de nebulizaciones dependiendo del medicamento, de la temperatura y de la presión que se deba suministrar para convertir el medicamento en aerosol; los diferentes tipos de nebulización pueden verse detalladamente en la Tabla 1. [5]

	<b>NJ</b>	<b>NUS</b>	<b>NM</b>	<b>IDMp</b>	<b>INS#</b>
Fuente de poder	gas comp./eléctrico	eléctrico	batería/eléctrico	propelentes	mecánica
Generación del aerosol	activa con flujo de gas restringida	electrónica no adiciona gas restringida	electrónica no adiciona gas portátil	manual c/propelentes no adiciona gas muy portátil	manual c/resorte no adiciona gas muy portátil
Portabilidad	ruidoso	silencioso	silencioso	silencioso	silencioso
Temperatura del aerosol	baja	alta	ambiente	ambiente	ambiente
Volumen residual (ml)	0.8-1.5	0.8 -1.2	0.1-0.3	NA	NA
Variabilidad en desempeño	alta	baja	baja	baja	baja
Preparación de medicamento	si	si	si	no	no
Mezclas de medicamentos	posible	posible	posible	no es posible	no es posible
Dosis emitida	alta	alta	alta	baja	baja
Tiempo del tratamiento	largo	intermedio	corto (# #)	muy breve	muy breve
Tiempo inicio de nube (ms)	80 (medio)	160 (largo)	4 (muy breve)	20 (breve)	30 (breve)
Duración del aerosol	> 5 min	> 5 min	2-3 min	0.15-0.3 seg	1.1-1.5 seg
Contaminación	posible	posible	menos probable	imposible	imposible
Costo del dispositivo	muy bajo	alto	alto	bajo	bajo
Instalación en circuito	insp.-Y/ventilador	insp/Y o ventilador (con flujo continuo)	insp/Y o ventilador	rama inspiratoria	Y-TET
Flujo de gas (L/min)	2-10	NA	NA	NA	NA
Reservorio medicamento	dependiente abierto al circuito	dependiente abierto al circuito	superior con barrera entre reservorio y circuito	superior con válvula entre canister y circuito	en línea c/ TET válvula entre reservorio y circuito

Tabla 1: características comparadas de diferentes nebulizadores tomado de [5]

El tratamiento con estos aerosoles es de gran ayuda para todo tipo de terapias respiratorias, siendo el tipo más común de medicamentos los que se suministran en frío para terapias y despejar vías respiratorias, este es un concepto similar a la forma de funcionamiento de los inhaladores portátiles que suministran medicamento en forma de aerosol; el mayor inconveniente de los tratamiento con terapias de aerosol es que por lo general se debe hacer con el apoyo de la red de gases medicinales por lo que usualmente el paciente debe estar en una sala especializada en la clínica u hospital, pero debido a la gran cantidad de casos que se presentan de manera diaria se ha visto la necesidad de implementar e innovar nuevas maneras de aplicar terapia respiratoria a los pacientes, ya sea con métodos o equipos nuevos, cualquier terapia será aceptada de manera rápida debido a la situación actual en la que se encuentra el mundo. [5]

### **2.3. Solución propuesta**

El presente trabajo pretende formular un protocolo para el uso de ventiladores mecánicos, máquinas de anestesia y los compresores de aire con que cuentan los ventiladores mecánicos, como fuentes auxiliares de aire; esto con el propósito de ampliar la disponibilidad de ventiladores y otros equipos ventilatorios, para esto se propone la adaptación de nebulizadores y así evitar la ocupación de los sistemas de gases medicinales, liberándolos para instalar ventiladores mecánicos alternos para los pacientes que los necesiten.

La solución propuesta consiste en la formulación de un protocolo que oriente el uso de ventiladores, los cuales no requerirán de balas de gas adicionales y por lo tanto tampoco consumirán más recursos; en este sentido, los sistemas para el tratamiento respiratorio propuestos tienen como propósito el poder contar con salas para terapia respiratoria improvisadas en cualquier lugar de un centro hospitalario, el cual tenga al menos conexión eléctrica. Adicionalmente, el sistema tendría la posibilidad de soportar terapia respiratoria a domicilio, de forma que el paciente pueda recibirla sin la necesidad de exponerse a contagios o contagiar a otros pacientes al ir a un centro hospitalario; los equipos para estas terapias son bastante compactos y ya existen en la gran mayoría de las clínicas y hospitales por lo que no sería necesario la adquisición de equipos nuevos.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1. General**

Desarrollar un protocolo de evaluación que determine ampliar la disponibilidad de ventiladores y otros dispositivos respiratorios con sus accesorios para su uso durante una emergencia sanitaria, que involucre enfermedades que afecten el sistema respiratorio.

### **3.2. Específicos**

- a) Determinar los requisitos necesarios para que los ventiladores y otros dispositivos respiratorios se adapten de manera temporal en una pandemia, que involucre enfermedades que afecten el sistema respiratorio.
- b) Evaluar el funcionamiento de las máquinas de anestesia y los ventiladores de emergencia modificados para su uso como ventiladores y respiradores de presión positiva para una pandemia que afecta el sistema respiratorio.
- c) Asegurar que los procesos y pruebas realizadas estén bajo el código de clasificación internacional de los equipos médicos.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos meses se ha visto que en el caso de que se propague una enfermedad del sistema respiratorio por el mundo, la cantidad de equipos disponibles de terapia respiratoria serían insuficientes para atender la demanda de los países. Además, las personas que más se podrían ver afectadas, serían aquellas que necesiten algún tipo de soporte de ventilación o que requieran de una terapia con uno de estos equipos de manera periódica. La sobre demanda de estos equipos ha causado que muchos médicos y especialistas tengan que decidir a qué pacientes deberían darle tratamiento sobre otros, si bien cada país busca una forma diferente de hacer este sesgo menor, es una decisión que puede costar vidas.

Es por esto que los centros hospitalarios y clínicas del mundo han estado solicitando de manera urgente a grandes multinacionales, enfocadas en la manufactura de equipo médico, la provisión de ventiladores mecánicos en cantidades abundantes, ya que es el equipo médico que más se necesita, para tratar los síntomas graves de las enfermedades respiratorias. Estas empresas no pueden cumplir con esta demanda, debido al delicado proceso de manufactura que necesitan estos equipos y la cantidad de pruebas y requisitos que deben cumplir para que puedan ponerse a circular, garantizando su correcto funcionamiento, sin exponer a los pacientes al riesgo derivado de una falla en su funcionamiento. [6] [7]

Incluso, si una clínica o centro hospitalario tiene una gran cantidad de estos equipos, debe tratarlos con el mayor cuidado e higiene, ya que deben ser minuciosamente desinfectados después de que termine su uso en un paciente y antes de usarlo en otro, con el fin de evitar un brote del virus en el lugar menos indicado. Esto también quiere decir que el tiempo de espera para el uso de uno de estos equipos en un paciente con síntomas graves, puede alargarse incluso más, lo que es perjudicial para su salud. [8]

Es por esto que las salas de urgencias se ven saturadas de pacientes que necesitan un ventilador o algún elemento de terapia respiratoria para combatir los síntomas de manera eficiente, además de esto hay un alto número de personas que debido a una condición de discapacidad o de fuerza mayor que les impide moverse hacia los centros médicos, deban realizar un tratamiento en casa. Esto es una complicación aún mayor, ya que los médicos que hacen tratamiento a domicilio no cuentan con los equipos necesarios para realizar un tratamiento respiratorio de manera prolongada, por lo que estas personas tienden a empeorar sus síntomas. Las familias de estas personas tampoco pueden permitirse adquirir un ventilador mecánico, debido al alto costo de estos y al mantenimiento complejo al que deben ser sometidos, por lo que en muchas ocasiones se ven obligados a pagar tratamientos prioritarios con la finalidad de que sus familiares enfermos reciban la atención que necesitan.

Existe una cantidad considerable de centros de investigación y universidades que se han enfocado en el desarrollo de dispositivos de terapia respiratoria, sin embargo, no es posible asegurar su calidad al 100% debido a que, a pesar de haber sido realizados con ciertos protocolos y requisitos, fueron creados por personas con insuficiente experiencia en el área y en varios casos con materiales comunes, lo que puede afectar su durabilidad y usabilidad en el largo plazo. Si bien lo anterior no es un inconveniente, ya que para eso fueron diseñados, es preocupante que un equipo hecho por una empresa no especializada

falle o deje de funcionar en la mitad de un tratamiento, llegando a generar un riesgo para la vida del paciente. [9]

#### **4.1. Optimización de los recursos disponibles**

Para la problemática previamente planteada se desea sugerir una posible solución basada en los recursos con los que cuentan los centros hospitalarios, es decir no es necesario la adquisición de equipo nuevos de alto costo que puedan perjudicar la programación presupuestal de la clínica u hospital, en lugar de esto, se le dará uso a equipos con los que la gran mayoría de estos centros ya cuentan, en específico se está hablando de los compresores de aire de diferentes equipos, en este caso en concreto se hablará de los compresores de aire que vienen incluidos en parte de los ventiladores mecánicos y del compresor de aire con el que cuentan los succionadores de aire.

Por lo general los ventiladores mecánicos se dan de baja cuando su tiempo de vida útil se agota, pero esto no quiere decir que el compresor, que muchas veces viene con este equipo, esté desgastado, ya que al compresor se le da mucho menor uso que al ventilador; lo anterior es debido a que este se usa en caso de una emergencia o que la red de gases medicinales este ocupado, teniendo esto en cuenta es posible usar los compresores para realizar otros tratamientos o encontrar otro uso para estos.

La solución que se desea proponer es usar estos compresores para que funcionen como suministro de aire en terapia respiratoria, más específicamente en nebulizaciones, de esta manera sería posible hacer dicha terapia en casi cualquier espacio del centro hospitalario e incluso en lugares fuera de este, y a su vez liberaría espacio en la red de gases medicinales lo cual es uno de los principales objetivos, ya que en la situación actual de la pandemia de la COVID-19 ha causado que las redes de gases de los centros hospitalarios estén ocupadas de manera constante por los ventiladores mecánicos, los cuales son necesarios para los pacientes de estado de salud más delicado afectados por el virus; al liberar las tomas de la red de gases de la salas de terapia respiratoria sería posible utilizar este espacio para darle tratamiento a pacientes que padezcan de esta enfermedad.

En este mismo sentido, sería posible usar los compresores para realizar la terapia respiratoria en la residencia de los pacientes; esto no sólo permite un tratamiento más cómodo para los pacientes que tengan dificultades de movilidad, sino que también evita que ellos se expongan a un ambiente en el que es posible que se contagien con la COVID 19, o en caso de ya estar contagiados, previene que propaguen el virus, lo cual sería bastante grave para personas que necesitan de terapias respiratorias de algún tipo.

#### **5. HIPÓTESIS**

Debido a la alta demanda de ventiladores mecánicos y la gran cantidad de pacientes que necesitan terapia respiratoria a causa de alguna enfermedad o tratamiento, se propone la implementación de un protocolo el cual permite aumentar la disponibilidad de ventiladores mecánicos en las clínicas y centros hospitalarios ya sea por despejar conexiones en la red de gases medicinales o el uso de otros equipos como ventiladores mecánicos temporales

### **5.1. Uso de compresores de aire como suministro para ventiladores de emergencia**

Tomando como base que existen modelos de ventiladores mecánicos que cuentan con un compresor de aire como elemento adicional y que este compresor tiende a tener un tiempo de vida útil mayor que los ventiladores, debido a al poco uso que usualmente se le da, se propone usar este compresor de manera que suministre aire medicinal a un ventilador de urgencia, el cual sería más pequeño, pero más práctico y con el elemento adicional que requeriría de una bala de aire medicinal.

El compresor puede conectarse fácilmente a estos equipos supliendo la bala de aire medicinal por una conexión de flujo constante del mismo y de esta manera el uso de estos ventiladores se pueda prolongar y así dar un tratamiento adecuado a los pacientes que estén en la sala de espera o para la atención de un paciente de manera continua; si bien no puede ser usados en los pacientes con síntomas más graves, sí es posible darles tratamiento a pacientes con síntomas leves o moderados.

### **5.2. Uso de compresores de aire para terapia respiratoria**

Los compresores de aire también pueden ser usados para terapia respiratoria en casa, más concretamente en nebulizaciones, este equipo solo necesita de una conexión eléctrica para funcionar y es lo suficientemente compacto como para llevarlo en un vehículo de servicios médicos sin que ocupe un espacio considerable, una vez en la residencia del paciente, sólo se necesitaría de un flujómetro conectado a la salida del compresor para regular la presión, una cánula y una mascarilla a la que se conecte, de esta manera, es posible hacer terapia respiratoria a las personas que tienen el mayor riesgo de ser víctimas graves o mortales, de un virus que afecte el sistema respiratorio, esto también ayuda a personas de edad avanzada o que padezcan de alguna discapacidad y así evitar las eventuales complicaciones o riesgos al tener que movilizarse a un centro hospitalario.

### **5.3. Uso de equipos de anestesia como ventiladores mecánicos de manera temporal**

Los compresores de aire también pueden usarse para realizar terapia respiratoria con nebulización en casi cualquier lugar del centro hospitalario, siempre que se tenga una conexión eléctrica; esto puede ayudar a muchas personas que necesiten de dicha terapia, sin embargo y debido a la pandemia por causa de la COVID -19, las salas dedicadas a terapias respiratorias tienen una ocupación alta constantemente; al usar los compresores es posible realizar estas terapias en básicamente cualquier lugar del centro hospitalario, si bien no se tendría la misma privacidad que en una sala de terapia, se priorizaría la atención para los pacientes que necesitan el tratamiento y así su salud no se vería afectada de manera negativa.

#### **5.4. Liberación de espacios en la red de gases del centro hospitalario**

Al hacer uso de compresores de aire y otros equipos para terapia respiratoria los cuales no necesitan de balas de gas, ni de la red de gases del centro médico, sería posible dejar estos espacios libres, de tal manera que puedan ser ocupados por un equipo de mayor necesidad en caso de una emergencia, en este caso sería un ventilador mecánico y de esta forma las salas de terapia respiratoria podrían ser adaptadas como UCI de manera temporal, y los pacientes que requieran de terapia respiratoria podrían ser fácilmente acomodados en otro espacio ya que solo se necesitaría de un lugar para que el paciente este cómodo y una conexión a la red eléctrica.

### **6. MARCO TEÓRICO**

Para cada una de las soluciones planteadas en el presente documento se diseñará un protocolo para la adaptación, el cual sugerirá una serie de equipos de ciertas marcas, con los cuales es posible aplicar dichas soluciones; adicionalmente, la solución se formulará de la forma más general posible, de manera que, si un equipo cumple con ciertos requerimientos mínimos, pueda ser agregado a la lista y ser utilizado como una de las soluciones propuestas; cabe aclarar que cualquiera de los equipos que sea adaptado para terapia respiratoria será única y exclusivamente de manera temporal, ya que si bien pueden ayudar a la recuperación de los pacientes, los equipos no fueron fabricados para ser utilizados de esta forma por largos periodos, lo que podría acortar su vida útil.

Previo a la realización del protocolo se deberá establecer si los nuevos usos asignados a los equipos médicos son viables de implementar en la atención hospitalaria para los pacientes que requieren ventilación asistida o terapia respiratoria. Se desea evitar que, al acondicionar estos equipos, se generen factores negativos que puedan incomodar a los pacientes.

#### **6.1. Uso de los compresores de aire de los ventiladores mecánicos**

Los compresores de aire de los ventiladores mecánicos se usan para darle un suministro de aire al ventilador en caso de que se necesite, pero esto es bastante poco común, al punto de que es normal de que la vida útil del equipo se agote antes que la del compresor, muchas clínicas y hospitales ya ni si quiera ordenan los ventiladores con este accesorio por verlo innecesario, en este sentido es normal que los ventiladores que se dan de baja, tengan un compresor de aire que podría funcionar por un mayor periodo y podrían ser usados en otros tratamientos, como por ejemplo, suministrar aire a un equipo diferente de menor complejidad, esto podría evitar el uso del sistema de gases de forma innecesaria.

A continuación, se presentará el ejemplo de un ventilador mecánico el cual viene con un compresor de aire, que se conecta de manera sencilla, es decir que, desconectar el suministro de aire del compresor del ventilador y ponerlo en otro equipo es bastante sencillo, no se requiere realizar ningún ajuste o modificación compleja:

- Ventilador mecánico Puritan 840

En la Figura 2 se puede ver el esquemático general del ventilador, en la cual, a grandes rasgos se pueden ver sus componentes; en la parte inferior de la imagen y demarcado de un color rojo se presenta el esquemático del compresor, si bien este tiene varias partes y componentes que cumplen con diferentes funciones, lo más resaltante es que la salida del aire de este componente comprime y se da a través de un tubo sencillo, el cual puede desconectarse con facilidad del ventilador sin afectar su funcionamiento y conectar este tubo a otro equipo, es este caso se requiera conectar a un ventilador de emergencia. En la Figura 3 se muestra más en detalle la composición física de este compresor de aire y finalmente en la Tabla 2 se puede ver con claridad las diferentes partes del equipo.

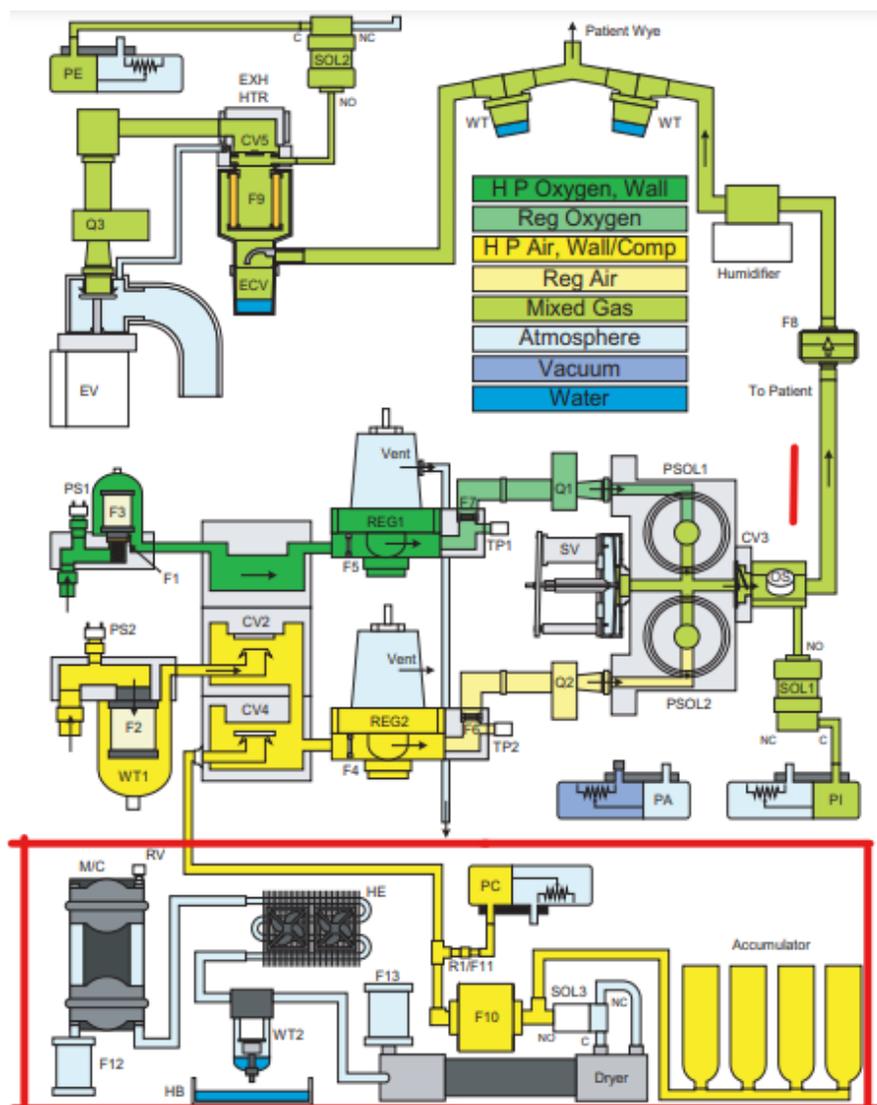


Figura 2: Esquemático general del ventilador mecánico puritana 840, tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03)

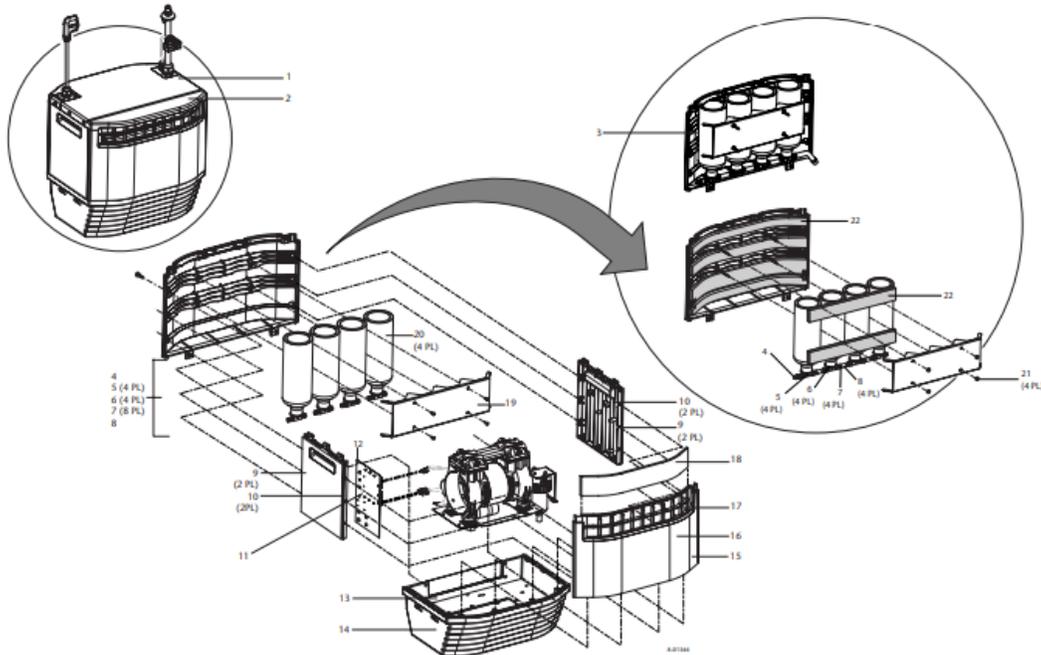


Figura 3: unidad de compresión de aire del ventilador mecánico puritan 840, tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03)

Item no. (Figure 9-26)	Part no.	Quantity	Description
1	4-079060-SP	1	• Assembly, top cover
2	4-076246-00	1	• Foam kit, sound, top panel
3	4-079062-SP	1	• Assembly, back panel
4	4-076465-00	1	• Fitting, plug, accumulator
5	4-076207-00	4	• Fitting, accumulator
6	N-3710120	4	• O-ring, accumulator
7	4-075256-00	8	• Hose clamp
8	4-075514-00		• Tubing, braided, silicone
9	4-079063-SP	2	• Assembly, side panel (includes Tinnerman clips)
10	4-076244-00	2	• Foam kit, sound, side panel (not shown)
11	4-075802-SP	1	• Printed circuit board, 806 compressor
12	4-070034-00	3	• Screw, 6-32 x 0.38 (mount PCB to side panel)
13	4-076241-00	1	• Foam kit, sound, base (Included in base assembly)
14	4-079064-SP	1	• Assembly, base (includes air dryer clamp assembly)
15	4-079061-SP	1	• Assembly, front panel
16	4-076243-00	1	• Foam kit, sound, front panel (not shown)
17	4-076206-00	1	• Support, foam filter
18	4-074374-00	1	• Filter, foam
19	4-076218-00	1	• Bracket, accumulator
20	4-076477-00	4	• Accumulator
21	4-005483-00	4	• Nut
22	4-076242-00	1	• Foam kit, sound, back panel

Tabla 2: lista de partes del compresor de aire de la figura 3: tomado del manual de servicio (4-070496-00 Rev. A (08/03) 840 Ventilator System Service Manual Rev. A (08/03)

## **6.2. Terapia respiratoria**

La terapia respiratoria es necesaria para personas de cualquier edad que hayan sufrido de una condición respiratoria grave, en especial para la recuperación del sistema respiratorio con un daño; uno de los métodos más usados es el de usar medicamentos en forma de nube con la intención de que el paciente los inhale, para esto es necesario hacer pasar una cierta presión de aire por el contenedor del medicamento y que este entre a una mascarilla, de esta manera el paciente puede hacer un tratamiento de recuperación de una manera no invasiva e indolora, pero esto tiene una ligera complicación, el suministro de aire hace que el medicamento líquido se vuelva gas es dado por el sistema de gases de la red hospitalaria, si bien esto normalmente no es un inconveniente, ya que existen salas de rehabilitación dedicadas solo a estas terapias, puede darse el caso de una situación que se requiera que se ocupen gran cantidad de las tomas del sistemas de gases, los pacientes se quedarían sin su terapia, lo cual puede agravar su condición de salud. [10]

## **6.3. Situación en hospitales**

Debido a la situación actual en la que está ocurriendo en el país y en el mundo, muchas clínicas y hospitales se han visto obligados a adquirir más equipos para cubrir la demanda, esto entre otras complicaciones traídas por la pandemia de la COVID-19; con la finalidad de tener más claro cómo está la situación en el país y cómo lo están tratando en los hospitales del país, se realizó entre agosto y septiembre del 2020 una consulta a la profesional Juliana González Carrillo, directora de ingeniería de clínica La Colina, a quien se le realizaron una serie de preguntas de un tema adyacente al que se está tratando, y entre sus respuestas, dio información relevante al uso de la red de gases y el equipo más usado durante la emergencia, las preguntas y respuestas que dio con respecto al tema se encuentran a continuación:

### **¿Qué equipos se utilizaron?**

Los principales equipos que se han requerido durante la emergencia sanitaria son:

- Ventilador que cuente con modos ventilatorios controlado o asistido, sincrónico o asincrónico, CPAP, BPAP, etc.
- Monitor Multiparámetros que cuente con Alarmas visuales y audibles, capaz de monitorear NIBP, IBP, SPO2, ECG, Temperatura, Respiración; para casos críticos gasto cardiaco y módulo Bis (Proporciona profundidad de conciencia. y monitorización de la sedación)
- Central de Monitoreo
- Cánula de alto flujo
- Reguladores de vacío
- Succionadores
- Tomas de gases medicinales (Oxígeno, Aire Medicinal y Vacío)
- Desfibrilador

**¿Hay falta de equipos? ¿Tuvieron que alquilarse? ¿Cómo se consiguieron? ¿De cuánto eran los costos adicionales que traían?**

La emergencia sanitaria obligo a la clínica a expandirse en atención priorizada para pacientes Covid, por lo que fue necesario alquilar los siguientes equipos:

- Cánulas de alto flujo (Cantidad = 12), con un precio mensual C/U \$950.000
- Monitor Multiparámetros (Cantidad = 10), con un precio mensual C/U \$600.000

Con respecto al tema de ventiladores, se obtuvo un préstamo por parte de Clínica El Country para mermar la necesidad que actualmente se está viviendo.

### **¿A qué tipo de personas enfocaron su atención?**

La atención priorizada va destinada a pacientes Covid sin importar su seguro de salud, se realizó cancelación de cirugías programadas para tener quirófanos listos para cirugías de urgencias de pacientes Covid, o en su defecto tener máquinas de anestesia disponibles para ventilar pacientes, una vez nuestra demanda en ventilación llegara a su 100%.

## **7. METODOLOGÍA**

Para contar con una solución efectiva a la problemática planteada, y previo a la elaboración del protocolo, se realizaron dos pruebas para verificar que el sistema de gases medicinales de la clínica pueda ser reemplazado por un compresor de aire, para las terapias respiratorias por nebulización. Lo anterior teniendo en cuenta que el compresor de aire puede producir un suministro constante de aire, sin la necesidad de conexión a redes gases, sólo debe contar con una conexión eléctrica.

Para la primera prueba fueron necesarios los siguientes materiales:

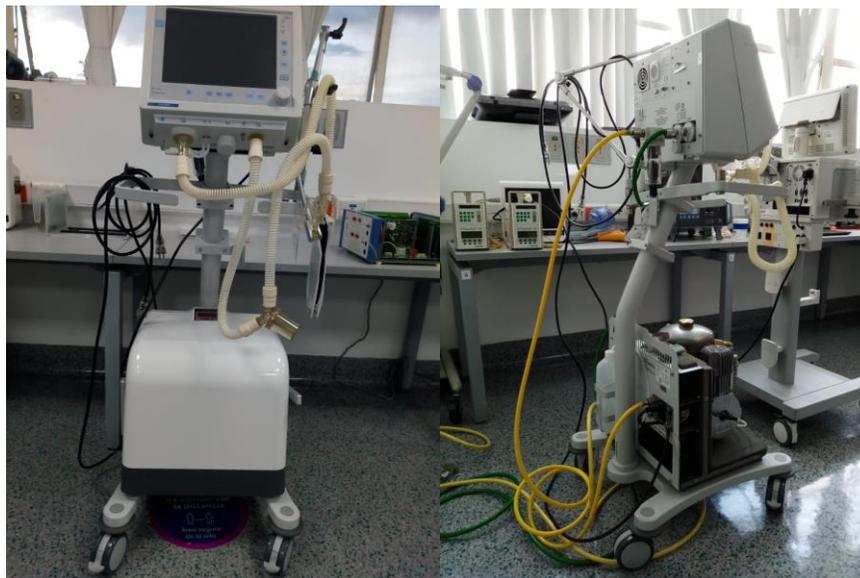
- Un compresor de aire, con una salida simple a la cual se le pueda conectar una cánula.
- Un flujómetro de aire con adaptador para cánulas en la entrada y salida
- Una cámara de nebulizador
- Agua
- Cánulas
- Mascarilla

Para la realización de esta prueba se utilizó un succionador de aire, el cual fue el suministro de aire para una de las pruebas de nebulización, más específicamente se usó el succionador eléctrico Thomas 1630, el cual se ilustra en la Figura 4, para la primera parte de las pruebas de nebulización, el compresor usado es parte de un equipo de succión de residuos líquidos para cirugía.



*Figura 4: Succionador de aire Thomas 1630, imagen tomada de biomédico.co*

Para la segunda prueba de nebulización, se utilizó el compresor de aire de un ventilador mecánico, más específicamente se usó la salida de aire de este, de esta manera sólo se necesitaría una conexión eléctrica para usarlo y el ventilador mismo no sería utilizado por lo que quedaría disponible en caso de ser necesario. El ventilador utilizado para las pruebas fue un ventilador mecánico de marca neumovent, no obstante, es posible realizar estas pruebas con cualquier compresor de aire siempre y cuando tenga una salida de aire a la que se pueda acceder de manera sencilla; en la Figura 5 se puede apreciar el ventilador mecánico usado para las pruebas y en la Figura 6 se ilustra cómo normalmente se conecta el compresor de aire al ventilador. Esta conexión es la se usaría como suministro para la nebulización:



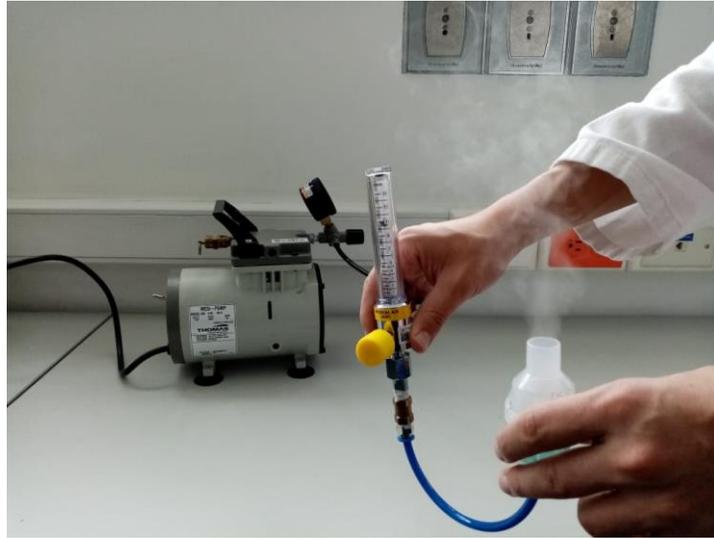
*Figura 5: ventilador mecánico marca neumovent para la prueba de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*



*Figura 6: compresor de aire del ventilador mecánico neumovent utilizado para las pruebas de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

### **7.1. Uso de compresores de aire para nebulización**

El montaje que se muestra en la Figura 7, realizado para la prueba consistió en conectar el compresor de aire a la red eléctrica, conectar la salida de compresor a la entrada de un flujómetro con una cánula, conectar la salida del flujómetro a la entrada de la cámara de nebulización y colocar agua en la cámara de nebulización, para la prueba de comparación no se usó una mascarilla.



*Figura 7: montaje para la primera prueba sin mascarilla fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Con la finalidad de hacer una comparación entre este método y lo que se hace normalmente en terapia respiratoria también se conectó un flujómetro al sistema de gases, y se le conectó una cámara de nebulización con ayuda de una cánula, como se muestra en la Figura 8, esto se realizó para hacer comparaciones entre los dos métodos y ver si existen diferencias significativas.

Más específicamente el objetivo es poner ambos métodos a funcionar con la finalidad de observar si existen diferencias en la presión, flujo o continuidad con la que el medicamento fluye, para estos se aseguró que las cámaras de nebulización tuvieran el mismo nivel de agua, que los flujómetros estuvieran igualmente abiertos y que estuvieran funcionando por un periodo similar.



*Figura 8: montaje de nebulización usando la red de gases medicinales fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Finalmente se realizó una prueba más, pero esta vez usando el compresor de aire que estaba integrado en un ventilador mecánico como se puede ver en las Figura 9 y la Figura 10, usando el mismo modelo conectado la salida da aire del compresor al flujómetro con una cánula y el flujómetro a la cámara de nebulización.



*Figura 9: Montaje para nebulización con compresor de aire de ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*



*Figura 10: Montaje para nebulización con compresor de aire de ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

## 7.2. Uso de máquinas de anestesia como ventilador mecánico

Debido a la situación actual en la que se encuentra el mundo, es necesario adquirir tantos ventiladores mecánicos como sea posible, para esto la FDA ha propuesto y aceptado el uso de otros dispositivos que puedan actuar como ventiladores mecánicos y para terapia respiratoria una de las soluciones propuestas es el uso de las máquinas de anestesia ya que estas cuentan con un sistema de ventilación para el paciente, el cual puede ser usado si la necesidad de suministrar gas anestésico, esto es de gran ayuda ya que pueden usarse las máquinas de anestesia para dar tratamiento a más personas en Clínicas y hospitales.

Para estas pruebas lo que se hizo fue buscar equipos de anestesia de diferentes marcas, con el criterio de que el manual de servicio del equipo, debe especificar qué modos ventilatorios tiene y finalmente comparar los modos ventilatorios de los equipos entre sí, con la idea de ver cuáles son más factibles de ser usados como ventilador mecánico, si bien hay algunos que tiene muchos más modos ventilatorios y funciones adicionales que otros, esto no significa que el equipo que tenga menos modos será descartado, el equipo de anestesia podrá ser usado como ventilador mecánico siempre y cuando cumpla con unos requisitos mínimos.

Las máquinas de anestesia que fueron seleccionadas por ser más detalladas en sus modos ventilatorios fueron las siguientes:

“Anesthesia System A7” de Mindray, el cual se puede ver en la Figura 11



*Figura 11: equipo de anestesia “Anesthesia system A7” de mindray, imagen tomada de <https://www.mindraynorthamerica.com/anesthesia-systems/anesthesia-machines/anaesthesia-machines-a7/>*

- “Heyer modular anesthesia system” de Heyer el cual se puede ver en la Figura 12



*Figura 12: heyer modular antesthesia system tomado del manual de servicio*

Al comparar estos equipos no se tuvo en cuenta sus funciones como máquinas de anestesia o que tan efectivos fueran en esa área, solo se tuvo en cuenta que tan bien pueden funcionar como ventiladores mecánicos y la cantidad de modos de ventilación que estos mismos pueden tener.

## 8. RESULTADOS

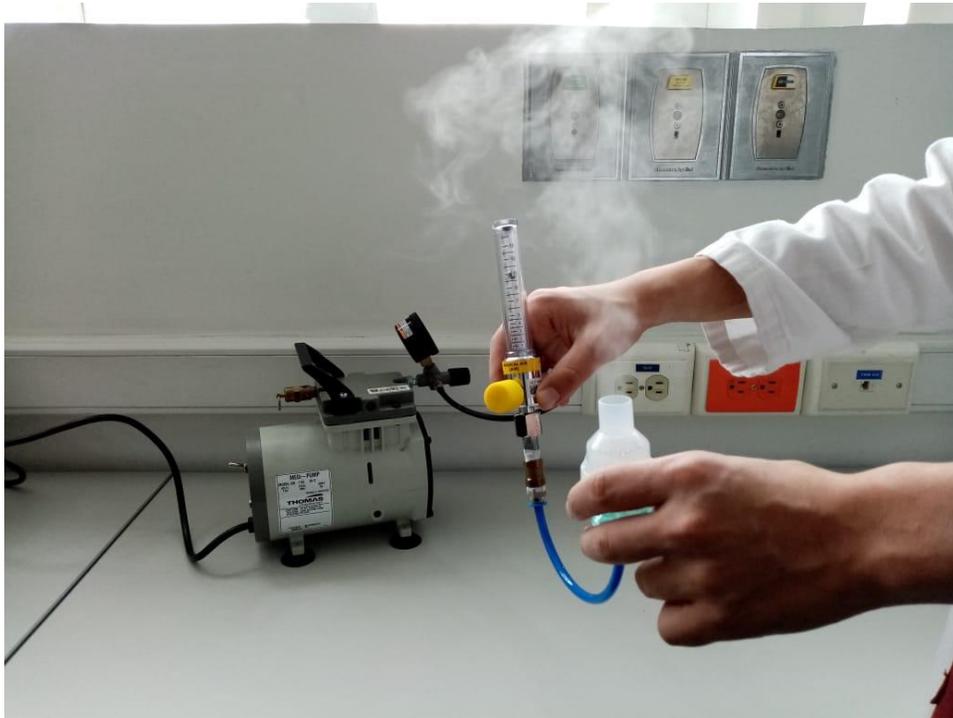
### 8.1. Nebulización con compresor de aire

Las pruebas de nebulización se realizaron con la ayuda del compresor de aire que se puede observar en la Figura 13:



*Figura 13: Compresor de aire usado para las primeras 2 pruebas de nebulización fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Para las comparaciones primero realizó una prueba individual con los 2 primeros métodos el que incluye el compresor de aire y el sistema de gases, con la finalidad de observar si la nebulización funcionaba de manera correcta; la Figura 14 es el método usando el compresor de aire como suministro y la Figura 15 es usando el sistema de gases.

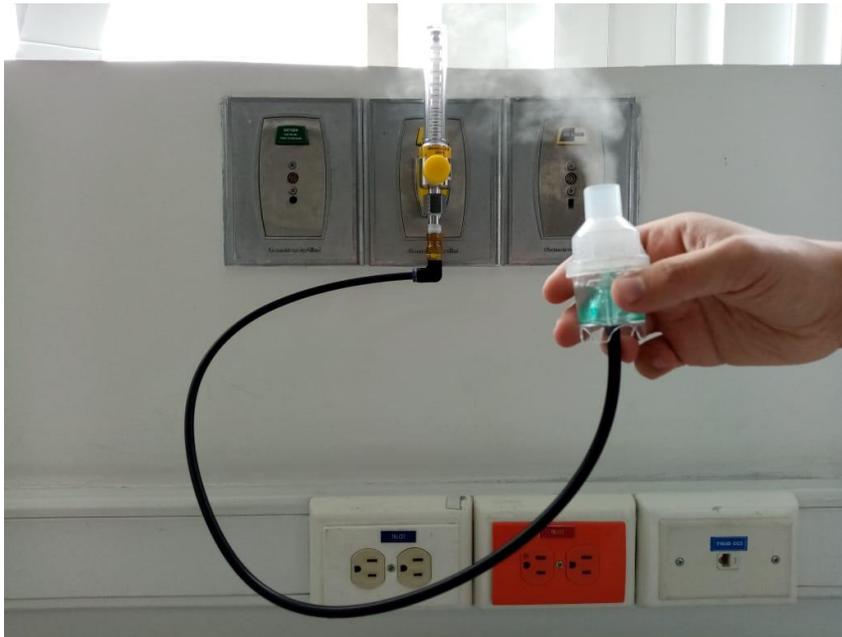


*Figura 14: prueba de nebulización sin mascara con el compresor de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Para que el proceso sea algo más claro se adjunta el Video 1 de como el compresor de aire Thomas funciona como suministro de aire para la cámara de nebulización.



*Video 1: Prueba de nebulización usando el compresor de aire como suministro de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*



*Figura 15: Prueba de nebulización sin mascarilla con el sistema de gases fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Después de esto se pusieron a funcionar ambos métodos uno al lado del otro con la finalidad de compararlos y observar si la nebulización con el compresor es similar a la nebulización con el sistema de gases, e identificar qué diferencias presenta.

Esta prueba se puede ver en el Video 2, en el cual se ven los nebulizadores funcionando por ambos métodos:



*Video 2: comparación de pruebas de nebulización por ambos métodos fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Después de comprobar que con ambos métodos la nebulización era bastante similar se agregó una mascarilla para simular el montaje para la terapia de un paciente y el cómo se conectaría y si este aditamento afectaba en algo el flujo de aire de alguno de los dos métodos en la Figura 16 es usando el compresor de aire mientras que en la Figura 17 se está usando la red de gases medicinales.



*Figura 16: Prueba de nebulización con mascarilla y el sistema de gases fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*



*Figura 17: Prueba de nebulización con mascarilla y el compresor de aire fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Para la parte final se hizo una prueba de nebulización usando el compresor de aire que está integrado en el ventilador mecánico el cual se puede ver en el Video 3, y la mascarilla, para comparar este sistema con los anteriores.



*Video 3: Prueba de nebulización con el compresor de aire del ventilador mecánico fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

La única diferencia de estas pruebas con un proceso de nebulización corriente es que no se usó un medicamento líquido en la cámara de nebulización, se usó agua para las pruebas, pero los resultados deberían ser los mismos.

## **8.2. Equipos de anestesia como ventilador mecánico**

El protocolo obliga a que las máquinas de anestesia con ciertos modos ventilatorios sean implementadas en UCI debido a la gran demanda de ventiladores mecánicos en estas; lo anterior se tuvo que hacer en varias clínicas de la ciudad de Bogotá, referencia por el departamento de ingeniería de dos clínicas de la ciudad de Bogotá. [11]

Para hacer una comparación se escogieron equipos de anestesia los cuales tuvieron descrito con cierto grado de detalle los modos ventilatorios que los mismos equipos abarcaran para esto se revisó el manual de servicio de dichos equipos, además se sesgó por la reputación de la marca del equipo, es decir se investigaron los equipos de marcas más comunes.

En cuanto a los modos ventilatorios que se describen en los equipos de anestesia en muchas ocasiones solo indican que el ventilador tiene el modo manual y automático lo cual es muy poco específico y práctico ya que se desea saber que tanto uno de estos equipos de anestesia puede suplir a los ventiladores.

De los equipos elegidos estos son los modos ventilatorios que indican

“Anesthesia system A7” de mindray

Para el equipo de midray el manual de servicio hace un listado con todos los posibles modos ventilatorios que el equipo posee

- Volume Control Ventilation (VCV), which includes the Pressure Limit Ventilation (PLV) function
- Pressure Control Ventilation (PCV) with/without the Volume Guarantee (VG) ventilation mode
- Synchronized Intermittent Mandatory Ventilation (SIMV) with the VC mode
- SIMV with the PC mode
- Pressure Support (PS) ventilation mode
- Spontaneous ventilation in Manual mode with the Airway Pressure Limit (APL) fully open
- Manual Ventilation through the use of a breathing bag
- Electronic Positive End Expiratory Pressure (PEEP) is available in all ventilation modes. Control over inspiratory flow (Tslope) is possible in PCV, SIMV, and PS modes. Automatic fresh gas compensation helps patients suffer less from manual changes in fresh gas flow rate. The traditional bellows system is driven by gas and makes patient ventilation clearly visible.

“Heyer modular anesthesia system” de Heyer

Los modos ventilatorios del equipo de anestesia de Heyer pueden verse en las tablas de la 3 a la 7

Valve	MV 1	MV2	MV3	MV4
Activity	OFF	ON	OFF	ON
Pressure on port	5, No	1, Yes	6, No	supply of MV2

*Tabla 3: “Heyer modular anesthesia system”, Equipo apagado o en espera*

Valve	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4
Activity	OFF	OFF	OFF	OFF
Pressure on port	5, No	1, No	6, No	no sup. of MV2

Tabla4: “Heyer modular anesthesia system”, Modo manual/respiración espontanea para inspiración y espiración

Valve	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4
Activity	OFF	OFF	OFF	OFF
Pressure on port	5, No	1, No	6, No	no sup. of MV 2

Tabla 5: “Heyer modular anesthesia system”, Ventilación CMV adulto/pediátrica inspiración

Valve	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4
Activity	ON	ON	ON	ON
Pressure on port	5, Yes	1, Yes	6, Yes	supply of MV 2

Tabla 6 “Heyer modular anesthesia system”, Ventilación CMV adulto/pediátrica espiración

Valve	MV 1	MV 2	MV 3	MV 4
Activity	OFF	OFF	OFF	OFF
Pressure on port	5, No	1, No	6, No	no sup. of MV 2

Tabla 7 “Heyer modular anesthesia system”, Respiración CMV en adulto y PEEP

*Las tablas 3 a la 7 fueron tomadas del manual de servicio del equipo de anestesia “Heyer modular anesthesia system”,*

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1. Análisis de las pruebas de nebulización

Al realizar las pruebas de nebulización con el sistema de gases medicinales y el compresor de gases puede observarse que el flujo de aire es bastante similar con los flujómetros marcando una presión de 9 psi en ambos casos lo cual se puede evidenciar en el Video 4 y el Video 5, por lo que se puede decir que el uso de un compresor de aire puede reemplazar el sistema de gases en un caso de emergencia.

Además de esto, ya que solo es necesario el compresor de aire y los instrumentos para la nebulización, es posible que se pueda realizar terapia respiratoria en la casa de los pacientes en caso de que los centros hospitalarios tengan una alta ocupación o que el paciente se le dificulte su movilidad; debido a la situación actual del mundo las salas de espera de las clínicas y hospitales están llenas de personas que necesitan terapia respiratoria, y por esto mismo el sistema de gases está constantemente ocupado, así que un método para aumentar la cantidad de pacientes que tengan acceso a terapia respiratoria sin la necesidad de usar el sistema de gases es algo muy bien recibido.

Sin embargo, durante la comparación de pruebas surgió un inconveniente que podría afectar ciertos tratamientos; dicho inconveniente corresponde a que el compresor de aire, al cumplir su función, vibra y produce bastante ruido, la vibración se notaba en la superficie en la que se tiene el equipo y en el flujómetro, como se muestra a continuación en el video 4 y en el video 5 se muestra el flujómetro de la prueba con el sistema de gases y el flujómetro de la prueba con el compresor, en el cual se ve claramente como el flujómetro usado en el compresor está vibrando ligeramente.



*Video 4: Flujómetro de la prueba de nebulización usando el sistema de gases. fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*



*Video 5: Flujómetro de la prueba de nebulización usando el compresor de aire. fuente el autor (pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería clínica- escuela de medicina y ciencias de la salud – universidad del Rosario- programa de ingeniería biomédica.*

Si bien no es un problema grave o crítico, puede llegar a ser molesto, la vibración del equipo no afecta a la salida del medicamento ni a la mascarilla que está conectada al paciente.

Adicionalmente a esto se notó que la cantidad de líquido que se encontraba en las cámaras de nebulización disminuía un poco más rápido que en la prueba con el compresor de aire, al compararla con la prueba usando el sistema de gases.

La prueba realizada que usó el compresor de aire del ventilador mecánico también mostró un flujo constante de aire sin interrupción y con una presión de 9 psi en el flujómetro, sin embargo, la manguera de suministro de aire que salía del equipo presentaba un daño, por lo que los resultados podrían variar de manera significativa por no tener un cierre hermético en el suministro de aire al flujómetro y por consiguiente al sistema de nebulización.

## **9.2. Análisis para los equipos de anestesia**

Si bien la gran mayoría de los equipos de anestesia cuentan con ventilación mecánica para las cirugías y de esta manera no dependen de otros equipos de los que son necesarios durante los procedimientos, generalmente estos equipos de anestesia son muy genéricos o simples cuando se trata de los módulos de ventilación, al punto que sólo cuentan con ventilación manual o automática, si bien puede que cuenten con más modos, estos ya vienen programados en el equipo para que funcione de manera automática.

Es por esto que para la selección de equipos se sesgó esa parte y se buscaba no solo que mencionaran el módulo de respiración, sino también se buscó que presentaran varios modos ventilatorios que pudieran controlarse y modificarse de manera que estos equipos pudieran ser mucho más manejables en cuanto a parámetros y variables se refiere.

Gracias a estos modos ventilatorios es posible usar los equipos de anestesia que no se estén usando o que estén en reserva como ventiladores mecánicos de manera temporal, esto aumentaría la cantidad de ventiladores disponibles en las clínicas y centros hospitalarios, ayudaría a reducir la demanda de ventiladores en caso de que se presente una emergencia que afecte el sistema respiratorio de los pacientes como la que se está viviendo en el presente año 2020 por la pandemia causada por la COVID-19.

## **9.3. Procesos soportados por la FDA**

Estos procesos serían aprobados de acuerdo a lo dispuesto por la FDA debido a la pandemia a causa de la COVID-19 en el año 2020, dada esta situación, la FDA aprobó el uso de equipos y dispositivos alternativos para usarlos en apoyo ventilatorio y terapia respiratoria; el documento que aprueba estos procesos fue expedido por la FDA en marzo del 2020 y está bajo el nombre de "*Emergency Use Authorization (EUA)*" por lo que cualquier prueba para el uso de otros equipos como terapia respiratoria que muestre resultados positivos está autorizado por la FDA, por lo que las pruebas realizadas en nebulización pueden llegar a ser utilizadas sin la necesidad de realizar pruebas exhaustivas, al menos esto durante la contingencia que provocó la COVID-19. En Colombia Hasta la fecha actual (2 de diciembre del 2019), el INVIMA únicamente ha publicado un protocolo de evaluación para los ventiladores mecánicos hechos nacionalmente

#### **9.4. Opinión de experto acerca del tema tratado**

Los resultados y procedimientos tratados en este proyecto le fueron mostrados al profesional José Leonardo Moreno Meneses director de ingeniería hospitalaria de la Clínica Colombia el 20 de noviembre del 2020, preguntándole su opinión como alguien que ha trabajado en el área por varios años y sus observaciones y aclaraciones al respecto, las observaciones del ingeniero José Leonardo fueron las siguientes:[12]

- Las nebulizaciones no se están haciendo, generalmente en tiempo anterior a la pandemia, se adaptaba para hacer las nebulizaciones retirando el oxígeno del paciente y aprovechando ese punto de oxígeno que igual una vez terminada la nebulización se vuelve a colocar el oxígeno al paciente.
- Se debe mirar cómo controlar el ruido que genera esos compresores porque en un consultorio o habitación sería muy molesto.
- Esos compresores son de aire y muchas veces se prefiere nebulizar a nivel hospitalario con fuente de oxígeno porque tiene un efecto sumatorio de broncodilatación.
- Es viable si mitigan el tema de ruido para el paciente y se debería de revisar el filtrado del aire que se va a entregar al paciente.

## 10. CONCLUSIONES

Es claro que se fue consciente de la limitante de sugerir esta solución tecnológica utilizando un compresor de aire, lo importante es que llamo la atención a los conocedores del tema de terapia respiratoria como una posible solución muy viable.

Por esta viabilidad expuesta se puede implementar esta técnica consistente en aislar el ruido y colocar unos filtros especiales de carbón activado para que llegue el aire puro a las vías respiratorias del paciente.

En este proyecto se logró proponer una forma de usar compresores de aire para terapia respiratoria lo que ayudaría en gran medida, ya que si bien los pacientes de terapia respiratoria no han sido una cantidad significativa desde que inicio la pandemia, da la posibilidad de que en caso de que se presente la necesidad de terapia respiratoria no se use la red de gases medicinales y esta queda disponible para los equipos de mayor prioridad como los ventiladores mecánicos y los equipos de anestesia.

De esta misma forma ayuda a los pacientes que necesitan terapia respiratoria pero que prefieren o no pueden movilizarse debido a que lo más seguro es que pertenezcan a una población en riesgo, al hacer terapia respiratoria en casa es posible continuar con sus tratamientos.

Si bien esta solución es innovadora presenta un par de inconvenientes; el primero es que independientemente del tamaño del compresor, este genera un ruido y una vibración que pueden llegar a ser muy molestos en cuartos pequeños y cerrados, de momento solo se probó con nebulización por lo que no es seguro que pueda usarse en otros tratamientos de terapia respiratoria; el otro inconveniente corresponde a que los filtros de estos compresores pueden no llegar a ser los adecuados para esto se propone el uso de filtros de carbón activado.

además de lo anteriormente mencionado es indispensable el usar cánulas de un tamaño adecuado para que no haya fugas de aire en el sistema para esto se puede usar un encendedor para que la cánula se expanda y se ajuste a la boquilla de salida del compresor de aire en caso de que esta tenga un diámetro reducido.

Es una alternativa bastante económica debido a que no sería necesario que los hospitales adquirieran equipos nuevos para aplicarla, ya que todos los elementos pueden ser fácilmente ubicados, y el uso de compresores de ventiladores dados de baja es innovador, teniendo en cuenta que, por lo general, éste se da de baja junto con el ventilador.

El implementar este método es bastante simple en lo que a términos legales y de documentación se refiere, ya que la FDA, expidió en marzo del 2020 una carta que permite el uso de equipos de otras áreas para facilitar el tratamiento de pacientes con COVID-19 y la construcción de equipos ventilatorios de manera local, por lo que mientras sea para ayudar a estas personas, será fácilmente permitido.

Finalmente se puede decir que, si bien esta técnica es innovadora y puede reducir la demanda en los hospitales, de momento no podría ser implementada por dos grandes factores el primero, es el ruido y vibración que genera el compresor que podrían ser perjudiciales o incómodos para los pacientes a los cuales se sometan a estas técnicas.

## **11. TRABAJOS FUTUROS**

Este proyecto fue pensado para ser implementado teniendo en cuenta la situación de pandemia a causa de la COVID-19 del año 2020, por lo que puede que no sea necesario en un futuro cercano, sin embargo, dado el caso que se vuelva a presentar una emergencia sanitaria que afecte en gran medida el sistema respiratorio y que aumente drásticamente la demanda de ventiladores y terapia respiratoria en clínicas y hospitales, pueden usarse estas técnicas para liberar espacio de la red de gases, el uso de estos equipos para nebulización en otras áreas de los hospitales y en residencias puede llegar a verse cada vez más necesario conforme avancen los años.

Si bien es cierto que de momento el proyecto no es implementable como esta propuesto, las correcciones necesarias son bastante sencillas, ya que los dos mayores inconvenientes son, primero el ruido y la falta de un filtro confiable, con esto en mente, sólo se debe idear un contenedor de un material acústico y un filtro para el suministro de aire; con estas pequeñas correcciones puede ser implementado en varias clínicas lo que ayudaría a reducir la demanda de ventilación, ya que los espacios que estos equipos ocupan en la red de gases serían liberados y así podrían ser usados para equipos de mayor prioridad como ventiladores.

Si bien no ayudan directamente con dar ventilación mecánica a los pacientes que lo necesiten, puede ayudar en gran manera a los pacientes que se están recuperando de las fases avanzadas de la COVID-19, ya que podrían hacer terapia respiratoria en la comodidad de sus hogares y de esta manera no sería necesario que se expongan a ambientes que pueden ser perjudiciales para ellos y que empeore su estado de salud.

## 12. REFERENCIAS

- [1] «britanica,» the medicine in the 20th century, june 2010. [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/science/history-of-medicine/Medicine-in-the-20th-century>. [Último acceso: october 2020].
- [2] L. Villareal, «Evolution of viruses,» *Encyclopedia of virology*, pp. 174-184, 2008.
- [3] Z. Z. B. Gross, «Spatio-temporal propagation of COVID-19 pandemic,» *medrxiv*, pp. 1-7, 2020.
- [4] FDA, «Ventilators and Ventilator Accessories for COVID-19,» March 2020. [En línea]. Available: <https://www.fda.gov/medical-devices/coronavirus-covid-19-and-medical-devices/ventilators-and-ventilator-accessories-covid-19> . [Último acceso: October 2020].
- [5] F. Igañes, «terapia inhalatoria en pacientes que reciben ventilacion mecanica,» *neumol pediatri*, vol. 13, p. 149 163, 2018.
- [6] X. S. D. Moreno, «¿que se puede hacer ante el aumento de lademanda de ventilacion mecanica por covid-19?,» *univeridad pedagogica y tecnologica de Colombia* , pp. 1-14, 2020.
- [7] N. Sharma, «medgadget,» August 2020. [En línea]. Available: <https://www.medgadget.com/2020/09/global-mechanical-ventilators-market-size-share-demand-trend-covid-19-impact-analysis-and-forecast-2020-2027.html>. [Último acceso: October 2020].
- [8] G. R. S. Suarez, «Limpieza y desinfección en servicios de salud ante la introduccion del nuevo coronavirus a Colombia,» *minsalud*, nº 1, pp. 1-9, 2020.
- [9] G. Torres, «La carrera para construir ventiladores mecanicos en Colombia,» *Semana*, 2020.
- [10] C. S. L. Carro, «Beneficios de la terapia nebulizada: conceptos basicos,» *Archivos de bronconeumologia*, vol. 47, pp. 2-7, 2011.
- [11] J. Gonzales departamento de ingenieria biomedica Clínica del Country / Clínica La Colina
- [12] J. meneses por la subgerencia de ingenieria biomedica y visepresidencia de infra estructura clinica colombia grupo sanitas international