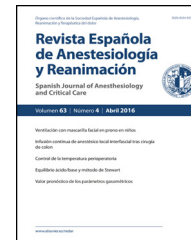




Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID-19. The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect, the company's public news and information website.

Elsevier hereby grants permission to make all its COVID-19-related research that is available on the COVID-19 resource centre - including this research content - immediately available in PubMed Central and other publicly funded repositories, such as the WHO COVID database with rights for unrestricted research re-use and analyses in any form or by any means with acknowledgement of the original source. These permissions are granted for free by Elsevier for as long as the COVID-19 resource centre remains active.



ARTÍCULO ESPECIAL

COVID-19: cómo transformar un ventilador de no invasiva en un ventilador de críticos



G. Tusman^{a,*}, M. Campos^{b,c} y E. Gogniat^d

^a Departamento de Anestesia, Hospital Privado de Comunidad, Mar del Plata, Argentina

^b Departamento de Anestesia, Sanatorio Finochietto, Buenos Aires, Argentina

^c Centro de Simulación, Asociación de Anestesia, Analgesia y Reanimación de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

^d Kinesiólogo Respiratorio, Miembro del Capítulo de kinesiología Intensivista y Comité de Neumonología Crítica, Sociedad Argentina de Terapia Intensiva, Buenos Aires, Argentina

Recibido el 5 de abril de 2020; aceptado el 10 de mayo de 2020

Disponible en Internet el 15 de mayo de 2020

PALABRAS CLAVE

COVID-19;
Intubación traqueal;
Ventilación no invasiva;
Ventilador;
Presión positiva;
CO₂

KEYWORDS

COVID-19;
Tracheal intubation;
Noninvasive ventilation;
Ventilator;
Positive pressure;
CO₂

Resumen La pandemia del COVID-19 ha hecho estragos, no solo en el número de víctimas fatales sino también en la infraestructura de los hospitales y unidades de cuidados intensivos. El número limitado de respiradores es una preocupación de toda la comunidad dada la demanda masiva y a muy corto plazo de estos equipos. Esta presentación tiene como fin dar soluciones sencillas para ventilar pacientes intubados de modo mandatorio utilizando equipos de ventilación no invasiva. Las soluciones propuestas permiten 2 estrategias claras frente al COVID-19: Reemplazar las máquinas de anestesia para disponer de ellas en pacientes. Usar la opción de equipos de ventilación no invasiva para pacientes con COVID-19 a modo de «puente» y a la espera de la liberación de un respirador específico en la unidad de cuidados críticos.

© 2020 Sociedad Española de Anestesiología, Reanimación y Terapéutica del Dolor. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

COVID-19: how to transform a noninvasive ventilation device in a critical care ventilator

Abstract COVID-19 pandemic caused not only many deaths around the world but also made evident technical limitations of hospital and intensive care units (ICU). The growing demand of ICU ventilators in a short lapse of time constitutes one of the main community concerns. The main goal of this communication is to give simple solutions to transform a noninvasive ventilator in an invasive one for intubated patients. The proposal can be applied in two well defined

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: gtusman@hotmail.com (G. Tusman).

strategies for the COVID-19 pandemic: To replace anesthesia workstations, leaving those machines to be used in patients. To apply this option in COVID-19 patients by way of a therapeutic "bridge", waiting for the release of a ventilator in the ICU.

© 2020 Sociedad Española de Anestesiología, Reanimación y Terapéutica del Dolor. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

La pandemia del COVID-19 causada por el coronavirus SARS-CoV-2 y originada en la ciudad de Wuhan, China, ha dejado numerosas víctimas alrededor del mundo en un breve lapso de tiempo¹⁻⁴. El COVID-19 es una afección predominantemente respiratoria, que oscila desde síntomas similares a la gripe hasta un síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA). Aproximadamente un 10-15% de los pacientes presentan una insuficiencia respiratoria moderada, mientras que un 5% de los casos evoluciona a formas graves que necesitan soporte ventilatorio invasivo en las unidades de cuidados intensivos (UCI)²⁻⁴.

El alto contagio dado por el elevado número de reproducción del virus (Ro: 2,2-3,5)⁵ explica por qué los hospitales están abarrotados de pacientes graves que necesitan soporte ventilatorio. Hoy día la oferta de respiradores es muy inferior a la demanda, por lo que hay escasez de estos aparatos de soporte vital avanzado. Esta situación sanitaria crítica es la base de la cuarentena y medidas de aislamiento social de la población para, de este modo, controlar la tasa de infectados y minimizar, entre otras cosas, la necesidad de respiradores en la población general. Esta problemática podría ser mucho más exagerada y dramática en los países emergentes y subdesarrollados con serias limitaciones de infraestructura y con escasos recursos económicos.

Proponemos una solución para aumentar el número de respiradores para el tratamiento del COVID-19. La idea se basa en transformar un equipo de ventilación no invasiva (VNI) en un ventilador de críticos para pacientes intubados. Describiremos las bases del funcionamiento de las alternativas que proponemos, seguida de una simulación de estas soluciones en un paciente con pulmones sanos y otro con SDRA.

Soluciones propuestas

Los equipos clásicos de VNI no están diseñados para ventilar pacientes intubados, y uno de los motivos es la reinhalación del dióxido de carbono (CO₂) que se acumula durante la espiración en la tubuladura única. Es decir, al no tener ramas inspiratoria y espiratoria ni válvulas unidireccionales, parte del CO₂ del gas que se espira dentro del circuito único será reinhalado en la siguiente inspiración, originando hipercapnia. La solución para usar un equipo de VNI en un paciente ventilado, por lo tanto, está en evitarla sin que se despresurice el sistema ni afecte la ventilación alveolar del paciente.

Los equipos VNI deberán tener las opciones de *back up* de frecuencia y ciclado por tiempo para poder usarlo como una

ventilación mandatoria controlada por presión (PC-CMV). Estas especificaciones permitirían usar el aparato de VNI tanto en un modo de ventilación mandatoria como espontáneo.

Las soluciones propuestas se detallan a continuación (fig. 1). En todas ellas, se coloca tras el tubo endotraqueal un filtro antibacteriano/viral (HMEF)⁶ para evitar la dispersión del SARS-CoV-2 y para conservar la temperatura y humedad.

Opción 1

Esta es la opción más sencilla donde una fuga en el HMEF o en el puerto de fuga que utilizan este tipo de equipos, permite un flujo continuo que lava el CO₂ espirado (fig. 1, panel superior). Es decir, el paciente espira a través del HMEF mientras que el equipo de VNI aporta flujo no solo al paciente sino también el flujo necesario para lavar el CO₂ atrapado en el circuito. Para lograr este objetivo el equipo de VNI debe tener un generador de flujo muy eficiente para mantener el sistema presurizado. La reinhalación de CO₂ dependerá del tamaño de la fuga y de las presiones seleccionadas (a mayor presión, mayor debería ser el flujo por la fuga y más eficiente sería el lavado de CO₂).

Opción 2

La solución consiste en reemplazar el circuito de rama único del equipo de VNI por un sistema de anestesia Bain o sistema Mapleson D modificado con doble tubuladura coaxial^{7,8}. La bolsa del circuito de Bain y el flujo de gases frescos son eliminados. La tubuladura externa del circuito Bain se conecta al equipo de VNI, mientras que la rama interna se deja abierta al exterior para la fuga de gases espirados (fig. 1, panel medio). Las potenciales ventajas de esta opción son: 1) Obligar al gas espirado rico en CO₂ a eliminarse por el tubo interno, ya que el mismo encuentra oposición a ir por la rama externa dado por el flujo/presión aportada por el equipo de VNI, y 2) Conservar en cierta medida una parte del calor y humedad dentro del circuito.

Opción 3

Otra solución es evitar totalmente la reinhalación del CO₂ con una válvula unidireccional tipo Duck-Bill colocada en el extremo distal del circuito único del equipo de VNI, por detrás del filtro HMEF y del tubo endotraqueal (fig. 1, panel inferior). La válvula tipo Duck-Bill se usa en los sistemas de

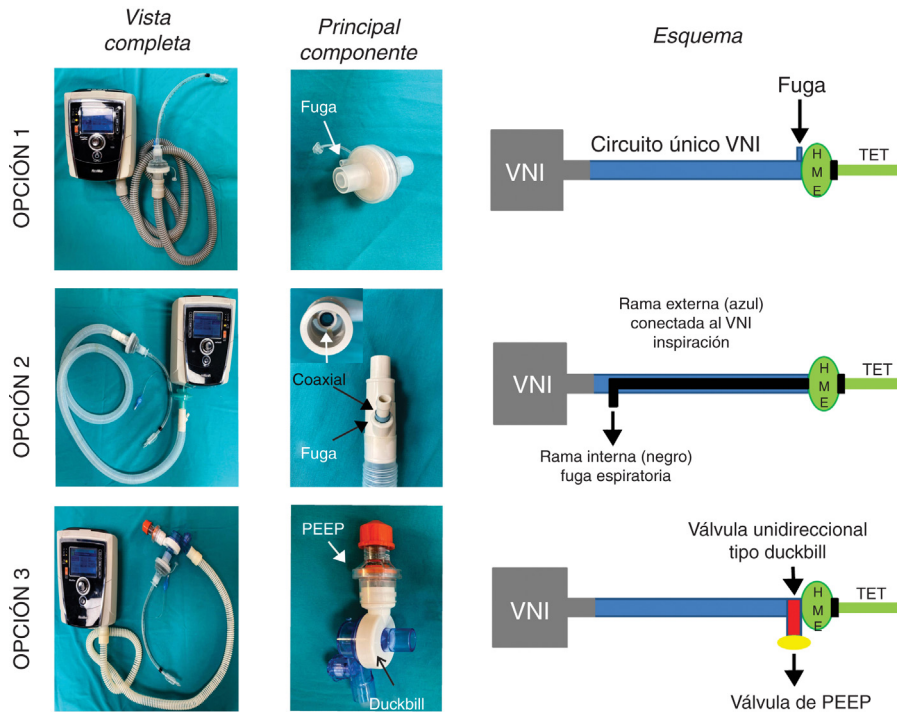


Figura 1 Opciones analizadas para usar los equipos de VNI como ventilador de intensivos. En la opción 1 se usa el circuito único del ventilador no invasivo (VNI) con una fuga proximal al filtro HMEF y tubo endotraqueal (TET). La opción 2 consiste en agregar un circuito anestésico Bain con doble tubuladura coaxial. La rama externa se adapta al equipo de VNI y la tubuladura interna sirve como fuga de gases espirados. La opción 3 constituye un circuito VNI estándar con una válvula de no-reinhalmación tipo Duc-Bill ubicada en el extremo distal conectado al paciente por detrás del filtro HMEF. Los gases espirados se escapan por dicha válvula donde se adiciona una válvula de PEEP externa.

ventilación Mapleson C de no reinhalación (p. ej., bolsa de resucitación tipo Ambu®), donde por un extremo se ventila al paciente y por el otro el CO₂ se espira al ambiente a través de una válvula de PEEP externa⁹. La PEEP externa se debe programar al mismo valor que la presión positiva espiratoria (EPAP) del equipo de VNI. Esta disposición es necesaria para disminuir la resistencia espiratoria dada por la válvula de Duck-Bill; ya que esta válvula no está diseñada para la ventilación espontánea y genera mucha resistencia al flujo espirado (fig. 2).

Simulación

Las opciones propuestas (fig. 1) se evaluaron en el Centro de Simulación de la Asociación de Anestesia, Analgesia y Reanimación de la ciudad de Buenos Aires. Se utilizó un simulador respiratorio ASL 5000® (IngMar Medical, Pittsburgh, EE. UU.) conectado al equipo de VNI a través de un tubo endotraqueal n.º 8. El equipo de VNI analizado fue el Stellar® 150 (ResMed Inc., Sydney, Australia) con las opciones de *back up* de frecuencia y ciclado por tiempo. Se monitorizaron presión, flujo y capnografía con el monitor FluxMed® (MBMED, Buenos Aires, Argentina) con sensores colocados detrás del filtro HMEF. La fracción inspirada de oxígeno (FiO₂) se midió con un analizador de gases colocado entre la HMEF y el tubo endotraqueal.

Las simulaciones se basaron solo en determinar si las opciones propuestas permitían una correcta función del equipo de VNI, si mantenían presurizado el sistema durante

su funcionamiento, si evitaban la reinhalación de CO₂ y que FiO₂ podían lograr. Dada la urgencia en hacer pública esta información por la pandemia COVID-19, no se estudiaron combinaciones en los parámetros ventilatorios ni tampoco se analizaron otras potenciales modificaciones en el circuito de equipo de VNI.

El primer paso fue simular una ventilación controlada en un paciente con pulmones sanos con una producción de CO₂ de 170 ml/min, *compliance* de 50 ml/cmH₂O, resistencia de la vía aérea de 8 cmH₂O/l/s. La presión positiva inspiratoria en la vía aérea (IPAP) se fijó en 20 cmH₂O y la presión positiva espiratoria (EPAP) en 8 cmH₂O con una frecuencia respiratoria de 18 bpm (tiempo inspiratorio; 1 s; tiempo espiratorio: 2,3 s). La figura 3 muestra que las opciones propuestas conservan el sistema presurizado y eliminan CO₂ de modo correcto, sin reinhalación, como lo evidencia el retorno a cero en la señal del CO₂ durante la inspiración.

El segundo paso fue simular una ventilación controlada en un paciente con SDRA con una producción de CO₂ de 170 ml/min, *compliance* de 30 ml/cmH₂O, resistencia de la vía aérea de 18 cmH₂O/l/s. La IPAP se fijó en 25 cmH₂O y la EPAP en 12 cmH₂O con una frecuencia respiratoria de 18 bpm (tiempo inspiratorio: 1 s; tiempo espiratorio: 2,3 s). La figura 4 muestra que en la simulación de pulmones enfermos las opciones analizadas también conservan las presiones seleccionadas y evitan la reinhalación del carbónico.

El último paso fue probar los sistemas simulando un paciente sano ventilando espontáneamente. La figura 5 muestra las curvas de flujo, presión y capnografía usando

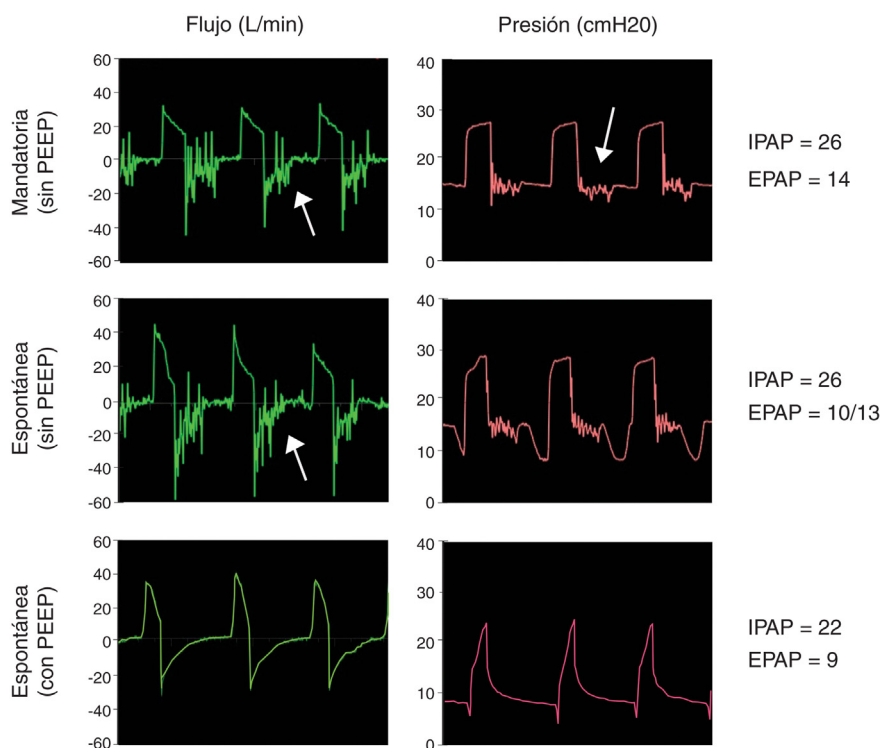


Figura 2 Funcionamiento de la válvula de Duc-Bill. Simulaciones con la opción 3 seleccionando una IPAP de 22 cmH₂O y una EPAP de 8 cmH₂O. La ventilación mandatoria (panel superior) y espontánea (panel medio) sin válvula de PEEP externa muestra un ruido en curva de flujo y presión durante la espiración (flechas). Este ruido o *flutter* de la válvula al espirar se asoció a un aumento en la resistencia al flujo espiratorio. Este fenómeno se revirtió al usar una válvula de PEEP externa seleccionada con el mismo valor de la EPAP aplicada (panel inferior).

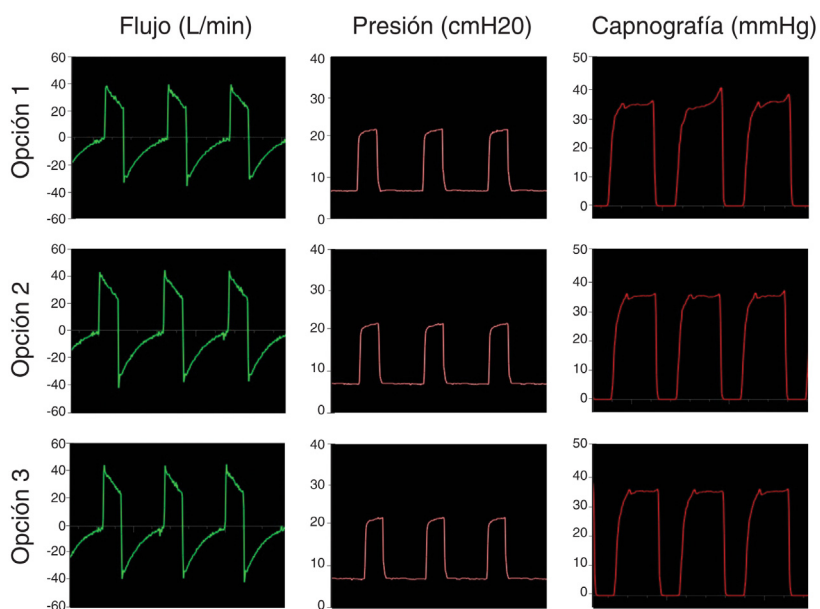


Figura 3 Simulación de ventilación mandatoria en un paciente sano. Las 3 opciones estudiadas mantuvieron la presión seleccionada en el equipo de VNI y evitaron la reinhalación de CO₂.

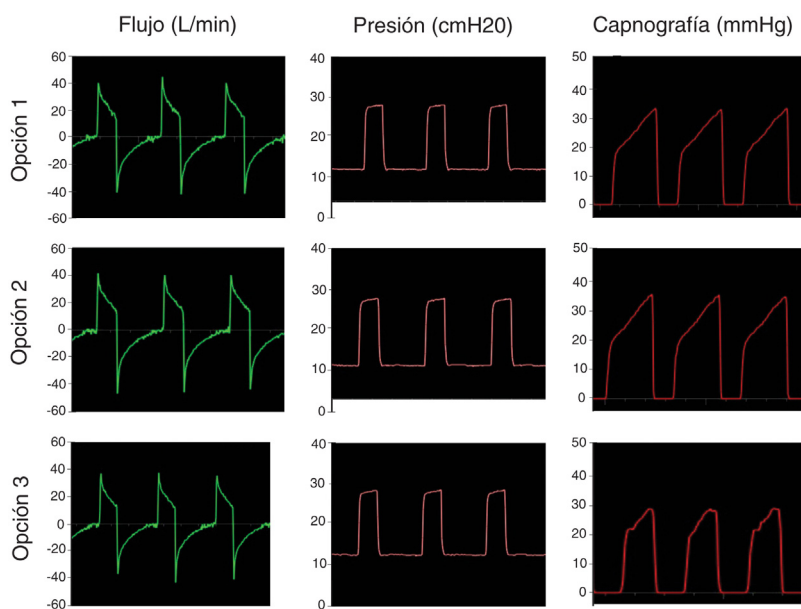


Figura 4 Simulación ventilación mandatoria en paciente con ARDS. Las 3 opciones estudiadas mantuvieron la presión seleccionada en el equipo de VNI y evitaron la reinhalación de CO₂.

la opción 3 a modo de ejemplo; donde claramente se confirma la ausencia de reinhalación de CO₂ y la conservación de las presiones seleccionadas. Las opciones 1 y 2 lograron resultados similares.

El O₂ suplementario para manipular la FiO₂ —a un volumen minuto respiratorio fijo de 7 l/min—, se administró en 2 posiciones:

1. Flujo suplementario de O₂ aplicado a la toma específica ubicada en el panel posterior del Stellar® 150. Un flujo de 5 l/min resulta en una FiO₂ de casi el 90%.
2. Flujo suplementario de O₂ aplicado en la salida del equipo de VNI donde se conecta el circuito único. Analizamos uno de los sistemas propuestos con fuga sin válvula de no reinhalación (opción 2) y la opción 3 con la válvula unidireccional a distintos flujos de O₂. La [tabla 1](#) muestra los resultados del análisis en ventilación mandatoria.

Ventajas del equipo de ventilación no invasiva como ventilador invasivo

1. Las opciones propuestas permitirían ventilar pacientes de cualquier edad, peso y talla de manera mandatoria o espontánea.
2. Las presiones en la vía aérea que alcanzan estos aparatos de VNI están dentro del rango contemplado en la ventilación de protección.
3. Fácil esterilización del circuito, adaptadores y válvulas.
4. Mayor disponibilidad de equipos comparado con el número de ventiladores de intensivos.

Desventajas del equipo de ventilación no invasiva como ventilador invasivo

1. El control exacto de la FiO₂ no es posible porque depende del flujo adicional de O₂ agregado al sistema, dónde se administra el O₂, la fuga y volumen minuto respiratorio seleccionado. Sin embargo, la información generada en las simulaciones nos indican que este punto no sería un problema de relevancia.
2. Monitorización escasa comparada con respiradores de críticos.
3. Muchos de los equipos de VNI no tienen batería para funcionar de manera autónoma.
4. Las alarmas pueden no ser tan completas y/o sensibles como un ventilador de intensivos. Este problema dependerá de las características técnicas del equipo de VNI utilizado con este propósito y nos obligará a una vigilancia más estrecha de los pacientes.

Nota: La gran oferta de aparatos de VNI del mercado nos obliga a revisar las características de funcionamiento del equipo de VNI que tengamos a disposición: conocer modos ventilatorios, límites/rango de presiones alcanzadas, alarmas, administración de O₂ suplementario, etc. Se recomienda preparar algunas de las opciones propuestas y hacer un testeo previo con un pulmón artificial para asegurarnos de su correcto funcionamiento antes de su uso clínico.

Estrategia detrás de la solución propuesta

El uso de este equipamiento permite dos estrategias bien definidas. Una de ellas es reemplazar las máquinas de anestesia para que las mismas sean usadas en pacientes con COVID-19. Este reemplazo nos obligaría a hacer anestesia

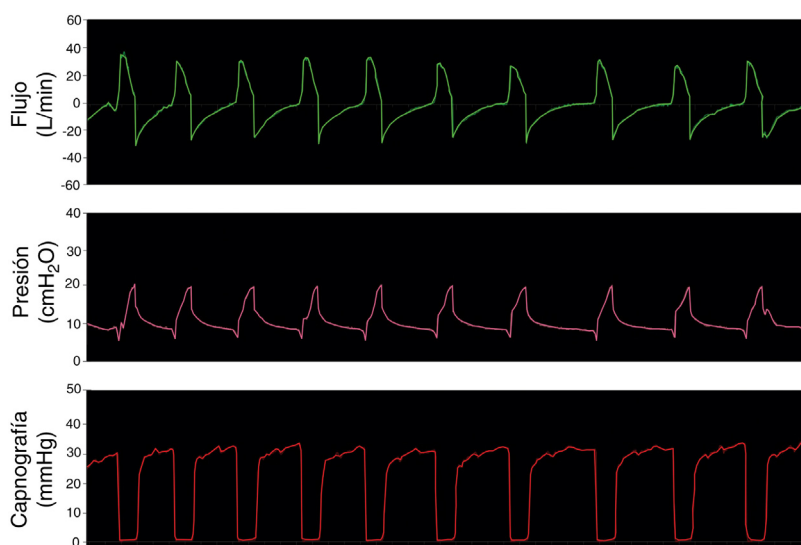


Figura 5 Simulación ventilación espontánea en paciente sano con la opción 3.

Tabla 1 Relación FiO_2 según el flujo accesorio de oxígeno para cada opción propuesta

Flujo de O_2 (L/min)	Opción 2 (tipo Bain) (%)	Opción 3 (tipo Duck-Bill) (%)
1	23	28
2	25	33
3	27	38
4	29	39
5	33	40
10	45	50

Fracción inspirada de oxígeno (FiO_2) alcanzada en el extremo distal del circuito VNI cuando se administró un flujo adicional de O_2 en el extremo proximal del circuito VNI.

endovenosa total en quirófano porque todas las opciones propuestas son circuitos de ventilación «abiertos». La segunda opción es ventilar con este dispositivo a los pacientes con COVID-19 cuando los ventiladores de UCI estén ocupados. De este modo, el sistema se puede usar como «puente ventilatorio» donde el paciente estará a la espera de la liberación de un equipo en la UCI.

Más allá del COVID-19, la simplicidad de los sistemas permite sus usos para traslado (equipos con batería) en pacientes ventilados, no solo dentro del hospital sino también desde lugares remotos.

Conclusiones

La presente comunicación propone soluciones para transformar un equipo de VNI en un respirador de intensivos para pacientes intubados. Estas propuestas tienen particular importancia para zonas descentralizadas, países emergentes y subdesarrollados donde los recursos suelen ser escasos y la infraestructura limitada.

Financiación

Ningún autor ha recibido ingresos o becas relacionado con esta presentación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen al bioingeniero Ariel Alberto Bonardi y a la kinesióloga Hiromi Kakisu por la asistencia técnica, a Medtronic por facilitar el simulador ASL 5000® y a JAEJ S.A. por el aporte del VNI para hacer la simulación.

Bibliografía

- Zhou F, Yu T, Du R, Fan G, Liu Y, Liu Z, et al. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan China: A retrospective cohort study. *The Lancet*. 2020;395:1065–162, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30566-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30566-3).
- Xie J, Tong Z, Guan X, Qiu H, Slutsky AS. Critical care crisis and some recommendations during the COVID-19 epidemic in China. *Intensive Care Med*. 2020;2:1–4, <http://dx.doi.org/10.1007/200134-020-05979-7>.
- Murthy S, Gomersall CD, Fowler RA. Care for critically ill patients with COVID-19. *JAMA*. 2020, <http://dx.doi.org/10.1001/jama.2020.3633>.
- Wang D, Hu B, Hu C, Zhu F, Liu X, Zhang J, et al. Clinical characteristics of 138 hospitalized patients with 2019 novel coronavirus-infected pneumonia in Wuhan China. *JAMA*. 2020;323:1461–9, <http://dx.doi.org/10.1001/jama.2020.1585>.
- Lai CC, Shih TP, Ko WC, Tang HJ, Hsueh PR. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): The epidemic and the challenges. *Int J Antimicrob Agents*. 2020, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105924>.

6. Breathing circuit filters by recommended application – for use with anesthesia machine breathing circuits [consultado el 10 Mar 2020] Disponible en: <https://www.apsf.org/faq-on-anesthesia-machine-use-protection-and-decontamination-during-the-covid-19-pandemic/2020>.
7. Bain JA, Spoerel WE. A streamlined anaesthetic system. *Can Anaesth Soc J.* 1972;19:426–35.
8. Henville JD, Adams AP. The Bain anaesthetic system. An assessment during controlled ventilation. *Anesthesia.* 1976;31: 247–56.
9. Sivco CS, Cherian VT. What every anesthesiologist should know about the manual resuscitation bag. *A A Pract.* 2018;11: 288–91.