

Una nueva alternativa para la esterilización de salas destinadas a pacientes con COVID-19

Tarifa, Enrique E.^{1,2}; Martínez, Sergio L.¹ y Vera, Carlos R.^{2,3}

(1) *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
eetarifa@fi.unju.edu.ar; smartinez@fi.unju.edu.ar

(2) *CONICET*

(3) *INCAPE, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, CONICET.*
cvera@fiq.unl.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo, se evalúa la efectividad de las recomendaciones dadas por la OMS para el tratamiento del aire de salas destinadas a la internación de pacientes con COVID-19. Dado el alto riesgo que implica la realización de experiencias con el propio virus, el estudio se implementa por medio de simulación. El modelo planteado se resuelve en forma analítica. Los resultados muestran que el tratamiento centralizado del aire, según las recomendaciones vigentes, no es lo suficientemente eficaz como para garantizar la salud del personal sanitario. Esta conclusión es válida independientemente de la tecnología empleada por el equipo esterilizador. Como alternativa superadora, en este trabajo, se propone el tratamiento descentralizado del aire. Para ello, se instalan carpas de aislamiento individuales en las camas de los pacientes y se asigna un equipo esterilizador independiente para el tratamiento del aire de cada una de las carpas. La evaluación de esta alternativa mostró que puede garantizar que no habrá contagio durante un tiempo aceptable de permanencia en la sala. Las carpas a emplear son de bajo costo y de fácil instalación. Además, el tamaño de los esterilizadores asignados a las carpas es mucho menor que el requerido en la alternativa centralizada.

ABSTRACT

In the present work, the effectiveness of the WHO recommendations for the treatment of the air of rooms hospitalization of patients with COVID-19 is evaluated. Given the high risk involved in carrying out experiments with the virus itself, the study is implemented through simulation. The proposed model is solved analytically. The results show that centralized air treatment, according to current recommendations, is not effective enough to guarantee the health of healthcare personnel. This conclusion is valid regardless of the technology used by the sterilizing device. As a better alternative, in this work, decentralized air treatment is proposed. For this, individual isolation tents are installed in the beds of the patients and an independent sterilizing device is assigned to treat the air of each of the tents. The evaluation of this alternative showed that it can guarantee that there will be no contagion during an acceptable time of stay in the room. The tents to be used are inexpensive and easy to install. In addition, the size of the sterilizing devices assigned to the tents is much smaller than that required in the centralized alternative.

Palabras claves: SARS-CoV-2 – COVID-19 – esterilización – simulación

Keywords: SARS-CoV-2 – COVID-19 – sterilization – simulation

1 INTRODUCCIÓN

A fines de 2019, se inició la pandemia de la COVID-19 causada por el coronavirus SARS-CoV-2. En 2020, la OMS (OMS, 2020) aceptó que la transmisión aérea del virus podría ser posible en circunstancias y lugares específicos, donde se efectúen procedimientos o se administren tratamientos que puedan generar aerosoles (por ejemplo, intubación endotraqueal, broncoscopia, aspiración abierta, administración de un fármaco por nebulización, ventilación manual antes de la intubación, giro del paciente a decúbito prono, desconexión del paciente de un ventilador, ventilación no invasiva con presión positiva, traqueostomía y reanimación cardiopulmonar). Por sus siglas en inglés, estos procedimientos se denominan AGP (*aerosol generating procedure*, procedimientos generadores de aerosoles). Para los lugares donde un AGP se lleva a cabo, la OMS recomienda una cantidad mínima de renovaciones de aire por hora (WHO, 2021a).

Ante la insistencia de especialistas de todo el mundo, recién el 30 de abril de 2021, la OMS comunicó claramente que la principal vía de contagio de la COVID-19 son los aerosoles que emiten los afectados por la enfermedad (WHO, 2021b). Los aerosoles son pequeñas gotas, con diámetro menor a $5 \mu\text{m}$, que una persona emite al respirar, hablar, estornudar o toser. Estas gotas pueden permanecer en el aire de 0.5 a 3 h (Kern & Krishnan, 2006).

El reconocimiento tardío de la OMS, obliga a la reformulación de los protocolos de prevención. Al ser los aerosoles la principal vía de contagio, el tratamiento del aire recomendado para los lugares donde se realiza un AGP se debe extender a todos los lugares donde esté presente una persona afectada por la enfermedad. Por el mismo motivo, el tratamiento debe ser continuo, no sólo cuando se realiza un AGP. Para el tratamiento del aire se dispone de una variedad de tecnologías. Los filtros son los equipos más empleados. Estos equipos son efectivos para una gran variedad de microorganismos con tamaños mayores de $0.3 \mu\text{m}$, como esporas de hongos y bacterias. Sin embargo, los virus son más pequeños, y no pueden ser completamente retenidos por los filtros (3M, 2020).

Para el caso de los virus, un adecuado complemento para los filtros es el posterior tratamiento térmico del aire. Este concepto surgió en los años cincuenta para la esterilización del aire destinado a biorreactores. La esterilización se logra calentando el aire a una temperatura suficientemente alta, y manteniéndolo a esa temperatura durante el tiempo necesario para alcanzar el grado de esterilización requerido (Elsworth et al., 1955). Tarifa et al. (2020) presentaron el diseño óptimo de un equipo que funciona con dicho principio. Otras tecnologías

disponibles complementan la filtración con un tratamiento destructivo: calentamiento eléctrico, descarga eléctrica, ionización, ozonización, descarga de plasma, radiación UV (WHO, 2021a).

En el presente trabajo, se evalúa la eficacia del tratamiento del aire en una sala con pacientes con COVID-19 realizado de acuerdo a las recomendaciones de la OMS (WHO, 2021a). Debido al riesgo que implica la experimentación con el propio virus, el estudio se realiza mediante simulación. Los resultados de la evaluación muestran que, independientemente de la tecnología empleada, el tratamiento es ineficaz. Ante esa situación, en este trabajo, se propone un nuevo método de tratamiento, el cual aumenta la eficacia en varios órdenes de magnitud con respecto al tratamiento recomendado por la OMS. De esta manera, se puede garantizar que el personal sanitario podrá permanecer en la sala un tiempo mayor, sin riesgo para su salud.

2 TRATAMIENTO CENTRALIZADO

2.1 Sistema

La Fig. 1 presenta el sistema a analizar en primer lugar. En este sistema, de acuerdo a las recomendaciones de la OMS (WHO, 2021a), se realiza el tratamiento del aire de una sala que alberga a pacientes con COVID-19. El aire de la habitación es enviado a un equipo esterilizador. El aire esterilizado es reciclado a la habitación. Con el fin de suministrar el oxígeno necesario para respirar y para mantener el nivel del anhídrido carbónico en un valor aceptable, se emplea un sistema de ventilación que suministra aire fresco a la sala y retira el aire usado. En el estudio, se considera una habitación con un volumen $V_{\text{room}} = 50 \text{ m}^3$, la cual aloja a $N_p = 3$ pacientes.

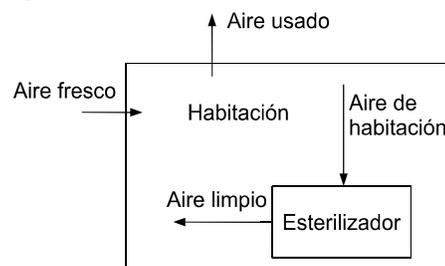


Figura 1. Tratamiento centralizado del aire de una sala.

2.2 Ventilación

La norma ASHRAE 62-1989 recomienda un flujo de aire de $25 \text{ pie}^3 \text{ min}^{-1}$ por cada paciente de una sala de hospital. Dicha norma toma en cuenta tanto la demanda de oxígeno como el mantenimiento de la concentración del anhídrido carbónico en un nivel seguro. Por lo tanto, para la sala en consideración, el flujo de aire fresco debe ser igual a $F_{\text{air}} = 127 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

2.3 Máximo tiempo de exposición

La cantidad N_{exp} de copias de virus aspiradas por una persona depende del tiempo de exposición, del flujo de respiración F_{breath} y de la concentración C del virus en el ambiente:

$$N_{\text{exp}} = \int_0^t C(\xi) F_{\text{breath}} d\xi \quad (1)$$

En promedio, una persona adulta en reposo realiza 12 ciclos de respiración por minuto, aspirando 0.5 L de aire en cada uno de ellos. Por lo tanto, el flujo de respiración de un paciente es $F_{\text{breath}} = 0.36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

La mínima dosis de virus que provoca una infección en una persona, MID (*minimum infective dose*), aún es objeto de estudio. Sin embargo, es posible proponer un valor aproximado a partir de trabajos ya publicados. Schröder (2020) sugiere que el MID para el SARS-CoV-2 debería ser menor que el correspondiente al virus SARS-CoV-1. Watanabe et al. (2010) estimaron que el valor del MID para el SARS-CoV-1 es 280 copias virales. Chaudhuri et al. (2020) desarrollaron un modelo para predecir la propagación de la COVID-19 y realizaron experiencias con diferentes valores de MID para el SARS-CoV-2 (10, 100 y 1000 copias de virus). Luego, compararon los resultados de las simulaciones con datos previamente publicados y concluyeron que el MID para el SARS-CoV-2 es del orden de 10 copias de virus. Con un método similar, Lelieveld et al. (2020) desarrollaron un modelo para la transmisión de la COVID-19, en el cual emplearon valores de MID en el rango de 100 a 1000 copias de virus. Del análisis realizado, en el presente trabajo, se adopta el valor conservador de $MID = 50$ copias de virus.

Haciendo $N_{\text{exp}} = MID$ en la ec. (1), se puede estimar el máximo tiempo de exposición MET (*maximum exposition time*) durante el cual una persona puede permanecer en el ambiente contaminado sin ser infectada:

$$MET = \frac{MID}{F_{\text{breath}} C} \quad (2)$$

La Fig. 2 expone la dependencia del máximo tiempo de exposición en función de la concentración del virus SARS-CoV-2 en el aire de la habitación. Considerando que las personas que cuidan a los pacientes tienen un tiempo de permanencia en la sala menor a 8 h, se adopta ese valor como el mínimo valor aceptable para el MET . El valor adoptado es bastante conservador debido a que las personas a cargo del cuidado de los pacientes no permanecen durante todo el turno de trabajo en la sala contaminada. Para garantizar un MET superior al valor planteado, la

máxima concentración de virus permitida en la sala es 20 copias m^{-3} .

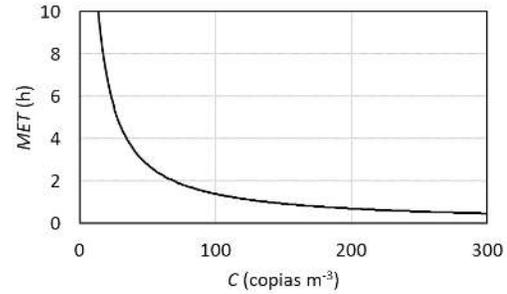


Figura 2. Máximo tiempo de exposición en función de la concentración del virus SARS-CoV-2 en el aire de la habitación.

2.4 Fuentes y sumideros de virus

En la respiración de una persona infectada típica, la concentración viral es $1.7 \text{ copias m}^{-3}$. Esta concentración se eleva hasta $2.26 \times 10^5 \text{ copias m}^{-3}$ en casos extremos (Riediker & Tsai, 2020). Como $F_{\text{breath}} = 0.36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para el caso extremo, la velocidad de emisión viral por la respiración de un paciente es $\gamma = 81360 \text{ copias h}^{-1}$. Cuando el paciente tose, la concentración típica es $1.56 \times 10^5 \text{ copias m}^{-3}$, y puede llegar hasta $2.0221 \times 10^{10} \text{ copias m}^{-3}$ en casos extremos (Riediker & Tsai, 2020). Para este caso extremo, $\gamma = 7.28 \times 10^9 \text{ copias h}^{-1}$. En el presente trabajo, se adopta el valor promedio $\gamma = 1.00 \times 10^5 \text{ copias h}^{-1}$.

La concentración viral en el aire decae continuamente debido a que, por un lado, el virus se desactiva con el tiempo y, por otro, las partículas se depositan en las superficies presentes (Hussein et al., 2009). Para el SARS-CoV-2, la velocidad de decaimiento es $k_d = 0.63 \text{ h}^{-1}$. Este valor fue calculado considerando un tiempo de vida media igual a 1.1 h (Riediker & Tsai, 2020).

2.5 Evaluación del sistema

A continuación, se analiza la eficacia de la esterilización realizada por un equipo que procesa el aire de toda la habitación (Fig. 1). Este análisis es independiente de la tecnología empleada por el equipo esterilizador.

En este estudio, el aire de la habitación es contaminado por la respiración y eventual tos de N_p pacientes. En estas condiciones, el balance de virus en la habitación es el siguiente:

$$V_{\text{room}} \frac{dC_{\text{room}}}{dt} = -F_{\text{air}} C_{\text{room}} - V_{\text{room}} ACH \left(1 - \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{room}}} f_e \right) C_{\text{room}} + N_p \gamma - V_{\text{room}} k_d C_{\text{room}} \quad (3)$$

$$C_{\text{out}} = f_e C_{\text{tent}} \quad (4)$$

donde V_{room} es el volumen de la habitación, C_{room} es la concentración del virus en la habitación, ACH es el cambio de aire de la habitación por hora, C_{out} es la concentración del virus en el aire ya procesado por el esterilizador y f_e es el factor de esterilización. La relación $T_{\text{out}}/T_{\text{room}}$ corrige la densidad del aire para equipos que emplean calentamiento. Se supone que el aire fresco no contiene virus.

El balance planteado tiene la siguiente solución analítica:

$$C_{\text{room}} = \frac{a}{b} + \left(C_0 - \frac{a}{b} \right) e^{-bt} \quad (5)$$

$$a = \frac{N_p \gamma}{V_{\text{room}}} \quad (6)$$

$$b = \frac{F_{\text{air}}}{V_{\text{room}}} + ACH \left(1 - \frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{room}}} f_e \right) + k_d \quad (7)$$

La Fig. 3 exhibe la evolución de la concentración viral en la habitación a partir del momento en que ingresan los pacientes a la habitación. El esterilizador está encendido desde el inicio. La habitación inicialmente tiene aire no contaminado, $C_{\text{room}}^0 = 0$ copias m^{-3} . Los valores adoptados para los parámetros para este caso son $V_{\text{room}} = 50 \text{ m}^3$, $N_p = 3$, $\gamma = 1.00 \times 10^5$ copias h^{-1} , $k_d = 0.63 \text{ h}^{-1}$, $T_{\text{room}} = 298.15 \text{ K}$, $T_{\text{out}} = 313.15 \text{ K}$, $f_e = 0.001$ y $F_{\text{air}} = 127 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

La Fig. 4 explicita la evolución de la concentración viral en la habitación con pacientes a partir del momento en que se enciende el esterilizador. La concentración inicial corresponde al estado estacionario de la habitación ya con pacientes; pero con el esterilizador apagado ($ACH = 0 \text{ h}^{-1}$), $C_{\text{room}}^0 = 1893$ copias m^{-3} . Como era de esperarse, tanto en el caso considerado en la Fig. 3 como en la Fig. 4, a pesar de tener diferentes condiciones iniciales, el estado estacionario final es el mismo, y se alcanza en menos de 0.5 h para $ACH > 3 \text{ h}^{-1}$. En las pruebas realizadas, se observó que las evoluciones presentadas en ambas figuras son poco sensibles a variaciones en los valores de T_{room} , T_{out} y f_e . Por lo tanto, los resultados obtenidos son independientes de la tecnología empleada por el equipo esterilizador.

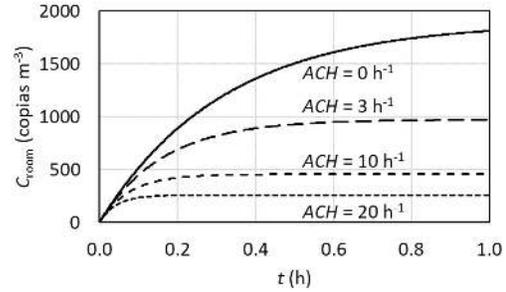


Figura 3. Evolución de la concentración viral en la habitación a partir del momento en que ingresan los pacientes. El esterilizador se enciende al inicio.

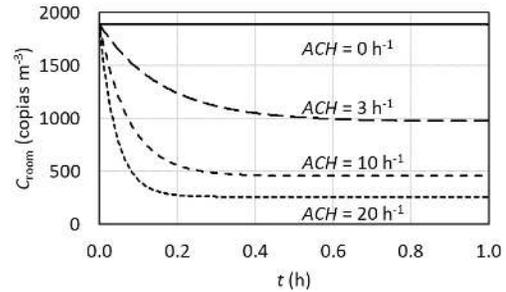


Figura 4. Evolución de la concentración viral en la habitación con pacientes a partir del momento en que se enciende el esterilizador.

La Fig. 5 muestra la concentración viral en la habitación en el estado estacionario, con pacientes y el equipo esterilizador encendido, en función de la velocidad de recambio de aire. Los valores sugeridos actualmente para ACH_{room} varían entre 10 y 40 h^{-1} para el caso en estudio (WHO, 2021a). En esas condiciones, la concentración viral en la sala es $C_{\text{room}} > 139$ copias m^{-3} . Esto es inaceptable porque es un valor muy por encima del valor máximo tolerable de 20 copias m^{-3} .

La Fig. 6 permite determinar el máximo tiempo de permanencia en la habitación sin riesgo de contagio en función de la concentración viral. Para las concentraciones estimadas, se tiene $MET < 1 \text{ h}$. Nuevamente, como era de esperar, la situación es inaceptable si se evalúa con este criterio ya que el valor de MET está muy por debajo del valor requerido de 8 h.

Los resultados obtenidos muestran que el esquema de esterilización evaluado y las recomendaciones existentes no son suficiente para procesar adecuadamente las emisiones de los pacientes, lo que provoca que las condiciones en la habitación no sean seguras para las personas a cargo de la atención de los pacientes. Esta conclusión es válida independientemente de la tecnología empleada por el equipo esterilizador (filtración, calentamiento, ionización, radiación UV, entre otras).

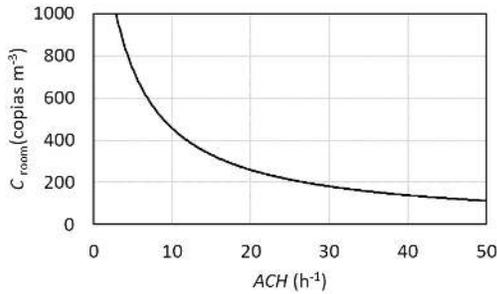


Figura 5. Concentración viral en la habitación con pacientes en el estado estacionario. El esterilizador está encendido.

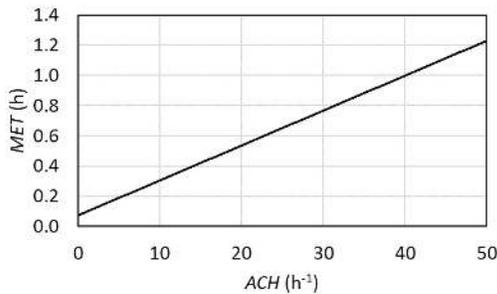


Figura 6. Máximo tiempo de exposición en la habitación con pacientes en el estado estacionario. El esterilizador está encendido.

3 TRATAMIENTO DESCENTRALIZADO

3.1 Sistema

Debido a que el tratamiento centralizado del aire de la sala es una opción ineficaz, en esta sección se propone y analiza el tratamiento descentralizado de las emisiones de cada paciente. Para ello, en cada cama, se instala una carpa para aislar al paciente (Fig. 7).

Las emisiones capturadas por las carpas son tratadas en forma descentralizada; es decir, se destina un equipo esterilizador exclusivo para cada carpa. El aire tratado es enviado al resto de la habitación, denominado *bulk* o simplemente habitación en adelante. De esta manera, en este sistema, existen dos zonas con aire contaminado: el interior de las carpas, con alta concentración viral, y el *bulk*, con concentración viral reducida por el sistema de tratamiento de aire y el sistema de ventilación (Fig. 8).



Figura 7. Carpa de aislamiento en una cama.

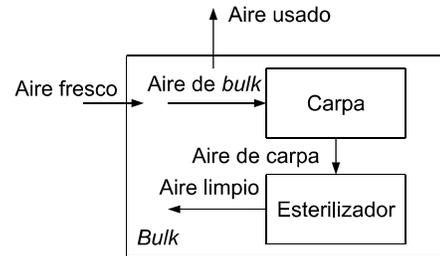


Figura 8. Sistema de tratamiento de aire descentralizado.

3.2 Evaluación del sistema

Para mantener niveles adecuados de oxígeno y anhídrido carbónico, se permite ingresar aire a las carpas desde la habitación. El aire de la habitación ingresa a cada carpa debido a la aspiración del equipo esterilizador. Por el mismo motivo, no hay riesgo de que el aire contaminado de la carpa salga hacia la habitación. Como en el caso anterior, las normas ASHRAE estipulan $25 \text{ pie}^3 \text{ min}^{-1}$ de aire fresco por cada paciente. Si además se supone que el volumen de aire dentro de cada carpa es $V_{\text{tent}} = 2 \text{ m}^3$, se tiene que la renovación de aire en cada carpa debe ser $ACH_{\text{tent}} \geq 20 \text{ h}^{-1}$. Por la misma norma, el flujo de aire que debe hacer circular el sistema de ventilación de la habitación sigue siendo $F_{\text{air}} = 127 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

En estas condiciones, los balances del virus en cada carpa y en la habitación están dados por las siguientes ecuaciones:

$$V_{\text{tent}} \frac{dC_{\text{tent}}}{dt} = -V_{\text{tent}} ACH_{\text{tent}} C_{\text{tent}} + \gamma - V_{\text{tent}} k_d C_{\text{tent}} \quad (8)$$

$$V_{\text{bulk}} \frac{dC_{\text{bulk}}}{dt} = -F_{\text{air}} C_{\text{bulk}} + N_p V_{\text{tent}} ACH_{\text{tent}} \left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{room}}} f_e C_{\text{tent}} - C_{\text{bulk}} \right) \quad (9)$$

$$-V_{\text{bulk}} k_d C_{\text{bulk}} \quad (10)$$

$$V_{\text{bulk}} = V_{\text{room}} - N_p V_{\text{tent}} \quad (10)$$

$$C_{\text{out}} = f_e C_{\text{tent}} \quad (11)$$

donde C_{tent} es la concentración viral en cada carpas, C_{bulk} es la concentración en la habitación y V_{bulk} es el volumen libre de la habitación. En el planteo de los balances, se considera que el aire fresco no contiene virus y que, debido a la acción del equipo esterilizador y del sistema de ventilación, $C_{bulk} \ll C_{tent}$. Las ecuaciones planteadas tienen la siguiente solución analítica:

$$C_{tent} = \frac{a}{b} + \left(C_{tent}^0 - \frac{a}{b} \right) e^{-bt} \quad (12)$$

$$C_{bulk} = \frac{ac}{bd} + \frac{cC_{tent}^0 - \frac{ac}{b}}{d-b} e^{-bt} \quad (13)$$

$$a = \frac{\gamma}{V_{tent}} \left(C_{bulk}^0 - \frac{cC_{tent}^0 - \frac{ac}{b}}{d-b} \right) e^{-dt} \quad (14)$$

$$b = ACH_{tent} + k_d \quad (15)$$

$$c = N_p \frac{V_{tent}}{V_{bulk}} ACH_{tent} \frac{T_{out}}{T_{room}} f_e \quad (16)$$

$$d = \frac{F_{air}}{V_{bulk}} + N_p \frac{V_{tent}}{V_{bulk}} ACH_{tent} + k_d \quad (17)$$

La Fig. 9 describe la evolución de la concentración viral en una carpas a partir del momento en que ingresa el paciente. El equipo esterilizador está encendido desde el inicio. Los valores adoptados para los parámetros de esta alternativa son los siguientes: $V_{room} = 50 \text{ m}^3$, $V_{tent} = 2 \text{ m}^3$, $N_p = 3$, $\gamma = 1.00 \times 10^5 \text{ copias h}^{-1}$, $k_d = 0.63 \text{ h}^{-1}$, $T_{room} = 298.15 \text{ K}$, $T_{out} = 313.15 \text{ K}$, $f_e = 0.001$ y $F_{air} = 127 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

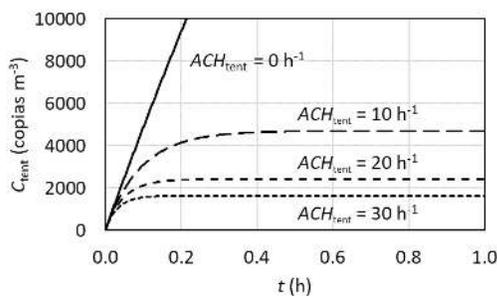


Figura 9. Evolución de la concentración viral en una carpas a partir del momento en que ingresa el paciente. El esterilizador se enciende al inicio.

La Fig. 10 presenta la evolución de la concentración viral en la habitación para las mismas condiciones. El sistema completo alcanza el estado estacionario en menos de 1 h para $ACH_{tent} > 20 \text{ h}^{-1}$. En este

estado, ya es posible observar que la concentración en la habitación es tres órdenes de magnitud menor a la concentración presente en cada carpas, y es dos órdenes de magnitud menor al valor obtenido para el caso de tratamiento centralizado.

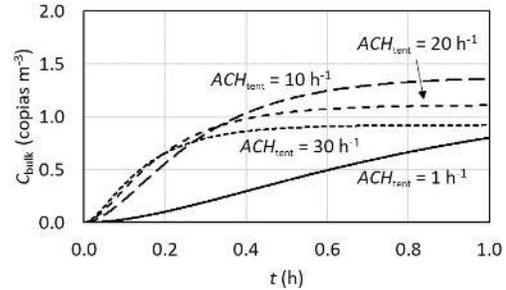


Figura 10. Evolución de la concentración viral en la habitación a partir del momento en que ingresan los pacientes. El esterilizador se enciende al inicio.

La Fig. 11 y la Fig. 12 exhiben la concentración viral en las carpas y en la habitación, respectivamente, en el estado estacionario alcanzado para diferentes velocidades de recambio de aire en las carpas. Se puede observar que la concentración en las carpas es independiente de f_e , mientras que la concentración en la habitación es altamente sensible a ese parámetro del equipo esterilizador.

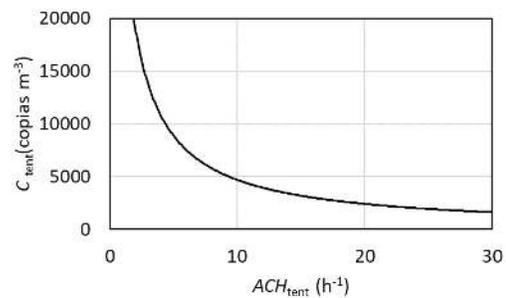


Figura 11. Concentración viral en una carpas en el estado estacionario.

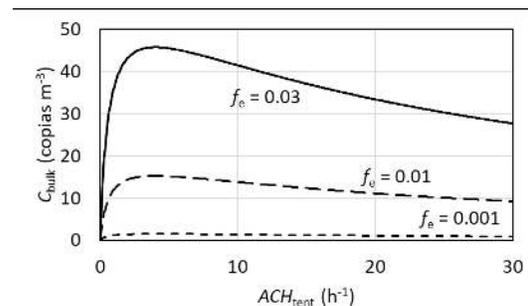


Figura 12. Concentración viral en la habitación en el estado estacionario.

La Fig. 13 explicita los correspondientes tiempos máximos de exposición. Se puede apreciar que, para

$f_e = 0.01$ y $ACH_{tent} = 20 \text{ h}^{-1}$, se obtiene $MET = 12.6 \text{ h}$, un valor por encima de las 8 h requeridas. El citado valor del factor de esterilización es fácilmente obtenible con cualquier tecnología. Por otra parte, la velocidad de recambio de aire de las carpas coincide con la velocidad mínima demandada por la necesidad de ventilación, así que tampoco representa un problema técnico para implementar la alternativa que se propone en este trabajo. Por último, el tratamiento centralizado, ni aun con $ACH_{room} = 40 \text{ h}^{-1}$, equivalente a un flujo de aire de $2000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, logra un tratamiento eficaz. En cambio, el tratamiento descentralizado, sí lo logra para $ACH_{tent} = 20 \text{ h}^{-1}$, equivalente a un flujo total de aire de $40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ por cada carpa, lo que produce un flujo total a tratar de sólo $120 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Por lo tanto, si bien la alternativa analizada emplea más equipos esterilizadores, el tamaño de los equipos es mucho menor que el requerido para la primera alternativa evaluada. Además, el costo y dificultad de instalación de las carpas de aislamiento son bajos. Por todo esto, se considera que la alternativa propuesta en este trabajo es factible y adecuada para ser implementada en instalaciones sanitarias.

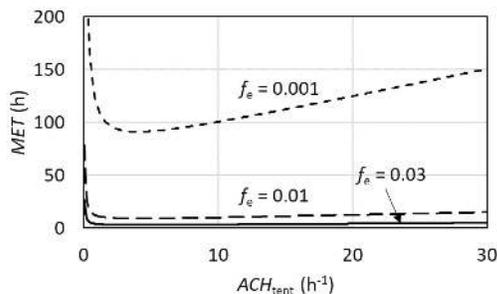


Figura 13. Máximo tiempo de exposición en la habitación.

4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se evaluó la efectividad de las recomendaciones dadas por la OMS para el tratamiento del aire de salas destinadas a la internación de pacientes con COVID-19. Dado el alto riesgo que implica la realización de experiencias con el propio virus, el estudio se llevó a cabo empleando simulación. El modelo planteado fue resuelto en forma analítica. Como criterio de eficacia del tratamiento del aire, se adoptó al máximo tiempo de exposición durante el cual una persona puede permanecer en la sala sin riesgo para su salud.

Del análisis de los resultados, se concluye que el tratamiento centralizado del aire en las condiciones sugeridas por las recomendaciones vigentes no es lo suficientemente eficaz como para garantizar la salud del personal sanitario durante el tiempo que se supone estarán expuestos al virus, 8 h. Esta conclusión es válida independientemente de la tecnología empleada

por el equipo esterilizador. Ante este escenario, en el presente trabajo, se propuso como una mejor alternativa el tratamiento descentralizado del aire. En este caso, se deben instalar carpas de aislamiento en las camas de los pacientes y se debe asignar un equipo esterilizador independiente para el tratamiento del aire de cada una de las carpas. La evaluación de esta alternativa mostró que el tratamiento del aire es lo suficientemente eficaz como para producir un máximo tiempo de exposición en la sala superior a las 8 h requeridas. Las carpas a emplear son de bajo costo y de fácil instalación. El tamaño de los equipos esterilizadores asignados a las carpas es mucho menor que el requerido en la alternativa centralizada. Por todo lo planteado, se concluye que la alternativa propuesta en este trabajo es eficaz y factible.

5 REFERENCIAS

- 3M, *Respiratory protection for airborne exposures to biohazards* (Technical Data Bulletin N.º 174; pp. 1-10), 3M, 2020.
- Chaudhuri, S., S. Basu, A. Saha, Analyzing the dominant SARS-CoV-2 transmission routes toward an ab initio disease spread model, *Physics of Fluids*, 32(12), 2020.
- Elsworth, R., R. C. Telling, J. W. S. Ford, Sterilization of air by heat, *The Journal of Hygiene*, 53(4), 445-457, 1955.
- Hussein, T., A. Hruška, P. Dohányosová, L. Džumbová, J. Hemerka, M. Kulmala, J. Smolík, Deposition rates on smooth surfaces and coagulation of aerosol particles inside a test chamber, *Atmospheric Environment*, 43(4), 905-914, 2009.
- Kern, G., M. Krishnan, Virus removal by filtration: Points to consider, *BioPharm International*, 19(10), 2006.
- Lelieveld, J., F. Helleis, S. Borrmann, Y. Cheng, F. Drewnick, G. Haug, T. Klimach, J. Sciare, H. Su, U. Pöschl, Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(21), 18, 2020.
- OMS. *Vías de transmisión del virus de la COVID-19: Repercusiones para las recomendaciones relativas a las precauciones en materia de prevención y control de las infecciones*, Organización Mundial de la Salud, 2020.
- Riediker, M., T.-H. Tsai, Estimation of viral aerosol emissions from simulated individuals with asymptomatic to moderate coronavirus disease 2019, *JAMA Network Open*, 3(7), 10, 2020.
- Schröder, I., COVID-19: A Risk Assessment Perspective. *ACS Chemical Health & Safety*, 27(3), 160-169, 2020.
- Tarifa, E. E., S. L. Martínez, C. R. Vera, Diseño

de un equipo esterilizador eficiente de aire,
Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA, 6, 647-654, 2020.

Watanabe, T., T. A. Bartrand, M. H. Weir, T. Omura, C. N. Haas, Development of a dose-response model for SARS coronavirus. *Risk Analysis: An Official Publication of the Society for Risk Analysis*, 30(7), 1129-1138, 2010.

WHO, *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*, WHO, 2021a.

WHO, *Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted?*, WHO, 2021b.