

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE
LAS PARTÍCULAS DE SALIVA EN
ESPACIOS INTERIORES CERRADOS***

Alumna: Francés, Pérez, Nerea

Director: Fernández, Gámiz, Unai

Curso: 2022-2023

Fecha: 26 de abril de 2023

RESUMEN

Durante los últimos años hemos vivido una situación de crisis sanitaria mundial debida al COVID-19, la distancia social mínima ha sido un tema polémico a lo largo de este tiempo. En este proyecto se va a llevar a cabo una investigación sobre el comportamiento de las partículas de saliva exhaladas durante diferentes actividades respiratorias, es decir, al respirar, hablar, toser y estornudar. Para ello, se ha realizado un estudio dinámico de fluidos computacional (CFD) sobre una partícula aislada, es decir, no parte de un chorro de partículas, se exhala de forma individual. Se ha tenido en cuenta que dichas exhalaciones se producen en un espacio cerrado en el que no existen corrientes de viento de ningún tipo que afecten al comportamiento de la partícula. Se ha comprobado cuál es el efecto sobre el comportamiento de la partícula si variamos la humedad relativa del espacio. Además, se ha realizado un estudio sobre el efecto causado por la apertura de la boca, simulada con forma redonda. La saliva ha sido simulada en este estudio como una solución salina de 0,9% (p/v).

Los resultados obtenidos han confirmado que, en el caso en que no haya corrientes de aire, la distancia social de 2 m es suficiente en el caso de la respiración, de hablar y de toser. Mientras que, para el caso en que estornuda, se han estudiado dos casos; uno en el cual la velocidad inicial de la partícula es de 20 m/s y otro en el que es 50 m/s. Se ha comprobado que, en el caso más extremo algunas partículas sobrepasarían el límite de los 2 m, por lo que dicha distancia sería insuficiente aun no estando presente el viento. Por otro lado, una humedad relativa baja favorece la evaporación de las partículas, lo cual provoca una mayor cantidad de aerosoles presentes en el aire. Por último, el efecto causado sobre las partículas debido al diámetro de la boca es relativamente bajo. Por todo ello, se puede concluir que los datos determinantes que favorecen el contagio y la presencia de aerosoles en el aire son la humedad relativa del espacio en el que se encuentra y la velocidad inicial de la exhalación.

Palabras clave: partícula; gotita; saliva; Dinámica de Fluidos Computacional (CFD); humedad relativa (HR); diámetro; velocidad de partícula; evaporación; tiempo de caída; desplazamiento; COVID-19.

ABSTRACT

During the past few years, we have lived in a world health crisis due to the COVID-19 pandemic. Social distancing has been a controversial issue throughout this time. This project concerns the investigation of the behavior of saliva particles exhaled while performing different respiratory activities, that is, breathing, speaking, coughing and sneezing. For that purpose, a computational fluid dynamics (CFD) study has been performed on an isolated particle, i.e., not part of a particle stream but an individually exhaled particle. For the aim of the study, it has been considered that such exhalations are performed in a closed space where no airflow exists that may possibly affect the behavior of the particle. The effect of varying the relative humidity on the particle behavior has been tested. Moreover, the effect caused by the opening of the mouth has been studied by simulating it with a round shape. Saliva has been simulated as a 0.9% (w/v) saline solution for this study.

The obtained results have confirmed that, when there is no air flow, a distance of 2 meters is enough in the case of breathing, speaking, and coughing, whereas for the case of sneezing, two cases have been studied. In the first one, the initial velocity of the particle is 20 m/s and, in the second one, the initial speed is 50 m/s. It has been proved that in the most extreme case some particles would exceed the 2 meter limit and, therefore, said distance would be insufficient even in the absence of wind. On the other hand, low relative humidity favors the evaporation of particles, leading to a greater number of aerosols in the air. Lastly, the effect caused by the diameter of the mouth to the particles is relatively low. Thus, it can be concluded that the determining factors that favor contagion and the presence of aerosols in the air are the relative humidity of the space in which it is located and the initial speed of exhalation.

Key words: particle; droplet; saliva; Computational Fluids Dynamics (CFD); relative humidity (HR); diameter; particle's velocity; evaporation; falling time; displacement; COVID-19.

ÍNDICE

1. Introducción.....	-1-
2. Desarrollo.....	-4-
2.1. Dominio.....	-4-
2.2. Condiciones iniciales.....	-7-
3. Resultados.....	-8-
3.1. Efecto de la humedad relativa en el comportamiento de las partículas.....	-10-
3.2. Efecto de la apertura de la boca en el comportamiento de las partículas.....	-13-
3.3. Efecto de la actividad respiratoria en el comportamiento de las partículas.....	-15-
4. Conclusión.....	-19-
5. Presupuesto.....	-21-
5.1. Licencia de Software.....	-21-
5.2. Mano de obra.....	-21-
6. Referencias.....	-23-

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coste asociado a la licencia empleada.....	-21-
Tabla 2. Coste asociado a la mano de obra empleada.....	-21-
Tabla 3. Coste total del estudio.....	-22-

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geometría empleada para realizar las simulaciones.....	-5-
Figura 2. Tiempo de evaporación de una única partícula de la saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una humedad relativa del 50 %, temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s.....	-8-
Figura 3. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una humedad relativa del 50 %, temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s.....	-9-
Figura 4. Tiempo de evaporación de cada partícula de saliva variando la humedad relativa. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y la velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.....	-10-
Figura 5. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.....	-11-
Figura 6. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.....	-12-
Figura 7. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de 20 µm. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.....	-13-
Figura 8. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza	

una comparativa para los casos en que la boca tiene diferentes diámetros: 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m.....-14-

Figura 9. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para los casos en que la boca tiene diferentes diámetros: 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m.....-15-

Figura 10. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.....-16-

Figura 11. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.....-17-

Figura 12. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de 20 µm. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.....-18-

Figura 13. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de 40 µm. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.....-19-

INTRODUCCIÓN

1.INTRODUCCIÓN

Desde hace tres años nuestra sociedad se ha visto obligada a convivir con un virus, el COVID-19 o SARS-CoV-2, del cual a día de hoy se tiene gran cantidad de información ya que se ha podido investigar en profundidad, aunque algunos aspectos, como la forma en que afecta el tipo de actividad respiratoria, no se comprenden en su totalidad. Este virus provocó un gran número de muertes y causó patologías a muchas otras personas. A día de hoy se sabe que las partículas más grandes de saliva se pueden depositar en las superficies, mientras que las más pequeñas son incluso más peligrosas, ya que tras su evaporación las pequeñas gotitas y sus residuos se quedan en el aire prolongando el tiempo de posibilidad de infección y la distancia que recorren dichas gotitas (Xie, Xiaojian, Li, Sun, & Liu, 2009). Las gotitas emitidas mediante la respiración, el habla, un estornudo y al toser son las causantes de la rápida propagación que tuvo lugar, ya que vivimos en una sociedad en la que el contacto humano es algo casi imprescindible, lo cual, a su vez, provocó un aumento notable en el uso de los dispositivos electrónicos al comienzo de dicha pandemia mundial.

En el transcurso de estos últimos años hemos tenido que vivir una serie de cambios que afectaron a nuestra situación económica debido al confinamiento que vivimos, el cual provocó un parón laboral en muchos de los sectores. A su vez, tuvimos que adaptarnos a una nueva forma de relacionarnos con otras personas, se impuso el uso de la mascarilla y la distancia social. Además, se comenzó a usar el gel hidroalcohólico para la desinfección de manos y superficies. Se descubrió que el contagio también se podía dar con el contacto directo de los ojos o la boca con las manos tras haber tocado una superficie que contuviera pequeñas partículas del virus, por ejemplo, tras dar la mano a otra persona o tocando los productos en el supermercado. Se han realizado diversos estudios a cerca del tipo de superficies (madera, tela, papel, vidrios, plásticos...) y el periodo de tiempo que sobreviven las partículas en ellas, siendo peligrosas para la propagación de enfermedades (Otter et al., 2016). Se halló que el virus podía sobrevivir en plástico y acero hasta 3 días y en el caso de encontrarse en cartón sobrevivía como máximo un día (van Doremalen et al., 2020). En 2003 tuvo lugar otra enfermedad respiratoria, el SARS-Cov-1, en los países del sudeste asiático, este virus no llegó a provocar una pandemia mundial, pero también se realizaron múltiples estudios. A causa de este otro virus, se comprobó la supervivencia del mismo, similar al COVID-19, en diferentes superficies, viendo que las superficies impermeables eran las que más favorecían su supervivencia (Lai, Cheng, & Lim, 2005), además, se comprobó que los papeles infectados no eran tan peligrosos como podía

INTRODUCCIÓN

pensarse. Una buena limpieza con desinfectantes consigue eliminar los restos de SARS-CoV-2 de forma eficiente (Zhou, Zeng, & Chen, 2020).

Los principales síntomas de esta enfermedad podrían llegar a confundirse con los de otras enfermedades, por lo que se crearon los test de antígenos. Estos test eran menos eficaces que las pruebas PCR en caso de no presentar aún síntomas suficientes, los casos de resultado negativo no eran del todo fiables, por lo que había que realizar una prueba PCR.

Otra de las medidas de seguridad que se tuvieron que tomar para frenar la propagación de esta enfermedad fue el uso de la mascarilla. Se distinguen dos tipos de mascarillas principalmente; las quirúrgicas y las FFP (Filtering Face Piece) o N95, aunque existen varios tipos más. Hay numerosos estudios sobre los múltiples tipos de mascarilla que se pueden utilizar. Se ha comprobado que las mascarillas quirúrgicas protegen contra gotas infectadas durante un determinado tiempo, pero no contra los aerosoles, es decir, protegen al portador de la mascarilla contra las partículas de mayor tamaño (Ju, Boisvert, & Zuo, 2021). Por ello son un recurso limitado para proteger a los sanitarios que se encuentran expuestos a una alta carga vírica. A pesar de no ser el mejor recurso, su uso fue recomendado a la población durante la peor parte de la pandemia, en caso de tener los síntomas del virus (Aranaz Andrés et al., 2020). Las mascarillas quirúrgicas logran filtrar las partículas de 20 nm exhaladas al aire hasta en un 90% (Caicoya, 2020). En el caso de los sanitarios se recomendó el uso de las FFP2, ya que éstas filtran las partículas que entran con un porcentaje del 8% de posibilidad de filtración de partículas al interior de dicha mascarilla (Aranaz Andrés et al., 2020). Las mascarillas del tipo FFP (FFP1, FFP2 y FFP3) se consideran EPI (Equipo de Protección Individual), mientras que las quirúrgicas no. El uso de pantallas faciales fue menos común, pero también ha sido objeto de estudio, se comprobó que el uso de estos dispositivos para el caso en que el emisor no llevara pantalla y el receptor sí, no protegía lo suficiente (Ugarte-Anero, Fernandez-Gamiz, Aramendia, Zulueta, & Lopez-Guede, 2021).

Además del COVID-19, existen otras enfermedades que han sido estudiadas a lo largo de la historia cuya transmisión se produce debido a las gotitas respiratorias, como es la tuberculosis, el sarampión, la gripe común, paperas, etc.

Los sistemas de ventilación tienen un claro lado positivo, ayudan a controlar la transmisión del virus (Rayegan et al., 2023), mientras que por otro lado los sistemas que han ido surgiendo a raíz de esta pandemia, requieren una alta inversión de dinero, la cual muchas personas no han podido asumir. Un sistema de ventilación sin coste alguno, es decir, natural, sería abrir las ventanas o puertas para que circule el aire, aunque este es menos eficaz que si se

INTRODUCCIÓN

complementa con el uso de los sistemas de ventilación mecánica controlada. Durante estos años se ha recomendado la ventilación constante de aulas, oficinas, salas, etc. Existen multitud de sistemas de ventilación, por lo que existen muchos estudios acerca de ellos (Bhagat, Davies Wykes, Dalziel, & Linden, 2020). La ventilación en los hospitales tomó un papel fundamental, ya que se comprobó que muchos hospitales carecían de una ventilación eficiente, provocando un mayor riesgo de infección entre pacientes y sanitarios (Li, Y., Huang, Yu, Wong, & Qian, 2005). Realizaron un estudio sobre un caso de contagio de COVID-19 de tres familias que no mantuvieron contacto directo en un restaurante en China, comprobando como la causa de dicho brote fue una ventilación deficiente; únicamente se realizó a través de la infiltración y la apertura ocasional de la puerta de incendios, lo cual causó una mala distribución del aire provocando que en la zona donde se encontraban dichas familias se creara una zona de contaminación del aire (Li, Yuguo et al., 2021). Gracias a dicho estudio se comprobó la importancia de una buena ventilación exterior, ya que este local no cumplía con la tasa mínima de ventilación promedio necesaria debido a que no tenía la ventilación activa. Se han estudiado los riesgos causados por un chorro de tos en una cabina de avión (Yang, Li, Yan, & Tu, 2018). Por otro lado, los purificadores de aire son una buena idea cuando los sistemas de ventilación implican una inversión de capital elevada (Rayegan et al., 2023). Se han realizado estudios sobre el efecto que causan los purificadores de aire en presencia de aerosoles dispersos en el aire, comprobando cuál es el porcentaje de efectividad en función del tamaño de los aerosoles (Zhao, Liu, & Chen, 2020). Se investigó un aula en el que había un purificador de aire (Burgmann & Janoske, 2021), realizando un estudio numérico y experimental, concluyendo que el uso de estos dispositivos es útil junto a la ventilación generada al abrir la ventana. También se comprobó como la distancia de 1,5 m que separaba a dos individuos en un ascensor era suficiente (Chillón, Ugarte-Anero, Aramendia, Fernandez-Gamiz, & Zulueta, 2021).

La saliva está compuesta en su mayoría por agua, corresponde al 99% de la masa de la saliva, esto explica porque los estudios realizados con partículas de agua pura se aproximan tanto a los obtenidos mediante la simulación de la saliva. En el proceso de evaporación de la saliva, el agua es lo primero que se evapora. El 1% restante corresponde a una variedad de electrolitos y proteínas (Del Vigna de Almeida, Patricia, 2008), los cuales forman los residuos de gota en el proceso de evaporación. Por ello, a la hora de estudiar la evaporación de la saliva se tiene que tener en cuenta la evaporación del agua (Stiti, Castanet, Corber, Alden, & Berrocal, 2022). La composición de la saliva no es un dato siempre idéntico, ya que su composición puede

INTRODUCCIÓN

variar atendiendo a diferentes factores como es la edad de la persona, los alimentos que ha ingerido, etc. (Del Vigna de Almeida, Patricia, 2008).

Cuando las partículas de menor tamaño se evaporan rápidamente crean los denominados núcleos de gota, gotitas o aerosoles y se quedan suspendidas en el aire un periodo de tiempo. En este estudio no se ha podido analizar la evaporación de dichos aerosoles. Algunos estudios determinan que, para considerarse aerosol, la partícula tiene que tener un diámetro igual o menor que $5\ \mu\text{m}$ (Fennelly, 2020). Estos aerosoles resultan tan importantes debido a que, gracias a su tamaño, la gravedad apenas les afecta, lo cual implica que se mantienen flotando en el aire durante determinados periodos de tiempo (Ju, Boisvert, & Zuo, 2021). En cambio, las partículas de mayor tamaño caen al suelo, debido a la acción de la gravedad sobre ellas, antes de convertirse en aerosoles, por lo que no se quedan depositados en el aire, completan el proceso de evaporación sobre la superficie.

2. DESARROLLO

2.1. DOMINIO

Para realizar el estudio (CFD) se ha creado un dominio rectangular cuyas dimensiones son; ancho 6m, largo 6m, alto 3m (X, Y, Z). Se han dado estos valores debido a que se ha podido observar que en algunos casos las partículas exhaladas avanzan en gran cantidad de forma horizontal y a su vez, algunas partículas, suben al ser exhaladas de la boca (Xie, X., 2007).

Se ha creado una entrada (Inlet) de velocidad, a una altura vertical de 2m con respecto al suelo y centrada en el eje X, el valor de su posición en Y es 0. Esta entrada se usará para crear un inyector de superficie para poder simular la boca abierta de una persona. Este inyector será al que se le variará la velocidad cuando se hable de la velocidad inicial de la partícula, ya que esta velocidad es la que expulsa la partícula de la boca. Para poder simplificar la geometría de esta entrada se ha creado un círculo, sobre el cual se realizará un estudio acerca del efecto de la apertura de la boca sobre el movimiento y la evaporación de la partícula exhalada, estudiando los diámetros de 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m. Posteriormente, se mantendrá un diámetro de 0,04m cuando se realice el estudio de cómo afecta la humedad relativa y la velocidad inicial de salida de la partícula.

Los diámetros de las partículas que van a ser objeto de estudio son: 20 μm , 40 μm , 60 μm , 80 μm , 100 μm , 120 μm , 140 μm , 160 μm , 180 μm y 200 μm . Se observó que un 82 % de las

DESARROLLO

gotitas exhaladas al hablar eran de un diámetro menor que $100\ \mu\text{m}$ (Xie, Xiaojian et al., 2009), en cambio al toser se vio que tan solo un 64 % de las gotas tenían menos de $100\ \mu\text{m}$ de diámetro, en este estudio con personas se observó lo variable que pueden llegar a ser estas actividades respiratorias (Xie, Xiaojian et al., 2009). En cambio, se observó que, al toser, el tamaño de las gotas emitidas al entorno es de $10\ \mu\text{m}$ a $120\ \mu\text{m}$ (Dbouk & Drikakis, 2020).

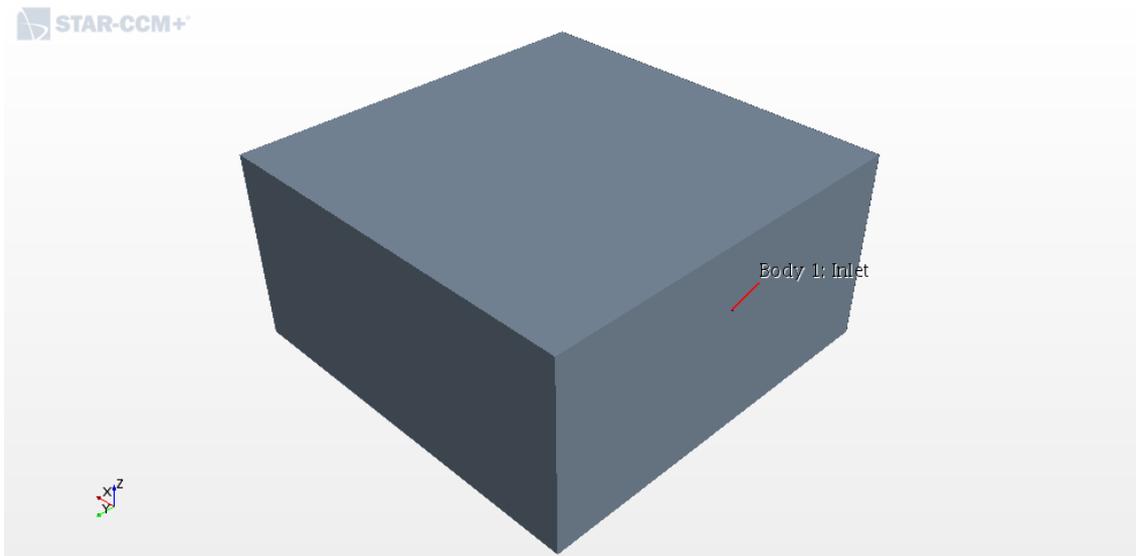


Figura 1. Geometría empleada para realizar las simulaciones.

Las velocidades iniciales a estudiar van a ser 5 casos diferentes; 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s. Cuando se tome la velocidad de 1 m/s, se va simular el caso en que el individuo estuviese respirando con la boca abierta, ya que se ha demostrado que también durante la respiración se desprenden pequeñas partículas de saliva (Asadi et al., 2019). Una velocidad de 5 m/s corresponde a la velocidad a la que podría salir dicha partícula mientras se está hablando. Para el caso en el que se simula como una persona tose se establecerá una velocidad de 10 m/s. De media la tos tiene una velocidad de salida aproximada de $11,2\ \text{m/s}$ (Gupta, Lin, & Chen, 2009), pero en este caso se ha aproximado a 10 m/s. Por último, cuando una persona estornuda se puede establecer una velocidad que oscila desde 20 m/s a 50 m/s, por lo que se estudiarán ambas velocidades. Se ha comprobado como los estornudos son el caso más peligroso ya que las partículas exhaladas alcanzan los 2 m de desplazamiento horizontal (Busco, Yang, Seo, & Hassan, 2020). De media una persona sana estornuda un máximo de cuatro veces al día (Hansen & Mygind, 2002). A su vez, se comprobó que estornudar produce mayor número de gotas de pequeño tamaño en comparación con las otras actividades respiratorias (Duguid, 1946).

El estudio computacional se ha realizado empleando técnicas basadas en el estado multifásico basado en las técnicas Eulerianas-Lagrangianas. La dispersión de la partícula de saliva

DESARROLLO

estudiada corresponde a la forma Lagrangiana, mientras que el aire, formado por la mezcla de aire seco y vapor de agua, sigue las fórmulas Eulerianas. Una de las propiedades estudiadas en este trabajo es la humedad relativa, la cual depende de la cantidad de vapor de agua y de aire presentes, por lo que, para calcular las dos humedades relativas estudiadas posteriormente, 30 % y 50 %, se variará la fracción de masa de aire y agua en las propiedades de la simulación. Se ha introducido un modelo de acoplamiento bidireccional para representar las interacciones entre el aire y la partícula.

Para poder establecer la salinidad de 0,9 % (p/v) de la partícula de saliva se ha seguido la Ley de Raoult para determinar cuál es la presión de saturación de la mezcla de agua y NaCl, tal y como se ha realizado en otros estudios (Ugarte-Anero, Fernandez-Gamiz, Portal-Porras, Zulueta, & Urbina-Garcia, 2022), (Xie, X., 2007), siguiendo la siguiente fórmula: (1)

$$P_{va,s} = X_w * P_{va} * (T_p)$$

Siendo T_p la temperatura de la partícula, en este caso se toma como 36° C, P_{va} la presión de vapor y X_w la fracción molar de la partícula, esta última sigue la siguiente ecuación (Xie, X., 2007): (2)

$$X_w = \left(1 + \left(\frac{6 * i * m_s * M_w}{\pi * \rho_L * M_s * d_p^3} \right) \right)^{-1}$$

Siendo i el factor de iones, para el caso de NaCl (Xie, X., 2007) nos indica que este valor es 2. Además, m_s es la masa de soluto en la partícula, M_w es el peso molecular del agua, M_s es el peso molecular del soluto, d_p es el diámetro de la partícula. Este estudio presenta una gran similitud en las propiedades empleadas para la simulación del aire y las partículas con este otro estudio (Ugarte-Anero et al., 2022).

La partícula se ve afectada por la fuerza de la gravedad, se ha introducido $-9,81 \text{ m/s}^2$, pero también le afecta la fuerza de arrastre, por ello se ha introducido el modelo de Schiller-Naumann. Se ha empleado la teoría de correlación de Ranz-Marshall para la transferencia de calor de la partícula esférica en la caída. Para representar la disminución de la masa de la partícula que tiene lugar durante la evaporación de esta, se ha empleado el número de Sherwood, este implica una evaporación cuasi-estable. Por último, para representar la turbulencia y dispersión a las que se ven sometidas las partículas se han indicado las ecuaciones RANS, Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

DESARROLLO

El estudio CFD se ha realizado gracias al programa STAR-CCM+ 2019.1.1 de Siemens que ha permitido realizar todas las simulaciones necesarias para la obtención de los siguientes datos mostrados en las gráficas.

2.2. CONDICIONES INICIALES

El objeto de estudio será una partícula aislada exhalada a un espacio cerrado, solo actúan la gravedad, el peso sobre dicha partícula, y la fuerza de arrastre. No existen corrientes de aire causadas por ventilación, esto es, se ha supuesto que el aire se encuentra estancado dentro del dominio diseñado, por lo que no hay corrientes que impulsen las partículas. Tampoco se tuvo en cuenta la presencia de contaminantes en el aire que afecten a la evaporación de la partícula. La humedad relativa, la relación entre la cantidad de vapor de agua en el aire y la máxima que podría contener el aire, será objeto de estudio. Se van a estudiar dos situaciones diferentes en cuanto a dicha humedad relativa: 30 % y 50 %. Se realizará una comparativa con estas dos humedades manteniendo el resto de datos iniciales con el mismo valor para ambos casos y se comprobará que ambientes más secos favorecen la evaporación de las partículas por lo que se crean mayor cantidad de gotitas depositadas en el aire, favoreciendo la dispersión del virus. La temperatura ambiente del espacio interior establecida será de 20°C y será un dato constante en todas las simulaciones, en este estudio no se analizará este factor. Cuanto menor es la humedad relativa y menores son las temperaturas, es decir en ambientes más secos y fríos, más rápido es el proceso de evaporación de la partícula (Busco et al., 2020).

Una persona adulta, en buen estado de salud, tiene una temperatura corporal aproximada de 36°C de media, por lo que este dato se tomará como la temperatura inicial de la partícula ya que parte del cuerpo humano, dicha temperatura será la misma en todos los casos simulados. Aunque como ya se ha comprobado en otros estudios, esta temperatura comienza a variar una vez exhalada al medio en el que se encuentre. Para simular la saliva, se ha simulado como una solución salina de 0,9% (p/v), tal y como se ha realizado en otros estudios (Xie, X., 2007), (Ugarte-Anero et al., 2022). Este dato se ha tenido en cuenta en la simulación variando la presión de saturación del agua, debido a la presencia de NaCl. En este estudio no se ha tenido en cuenta la formación de los residuos de gota durante la evaporación.

RESULTADOS

3. RESULTADOS

Como caso principal con el que se va a realizar la comparación con los diferentes casos que se van a proponer se va a tomar una velocidad inicial de la partícula de 10 m/s, un diámetro de la boca de 0,04 m y una humedad relativa del 50 %. La temperatura inicial de la partícula se toma como 36°C. Por otro lado, la temperatura del habitáculo al que se exhala es de 20°C, es un dato constante. En la figura 2 podemos ver como a medida que aumenta el diámetro de la partícula, aumenta el tiempo de evaporación de dicha partícula. Comparando el caso en el que el diámetro es de 20 μm y el de 200 μm , tienen una diferencia en sus tiempos de evaporación de 245 s, pero como se va a explicar a continuación, algunas partículas tocarán el suelo antes de evaporarse, por lo que se evaporarán ya en el suelo y no serán tan peligrosas como las que se quedan suspendidas en el aire.

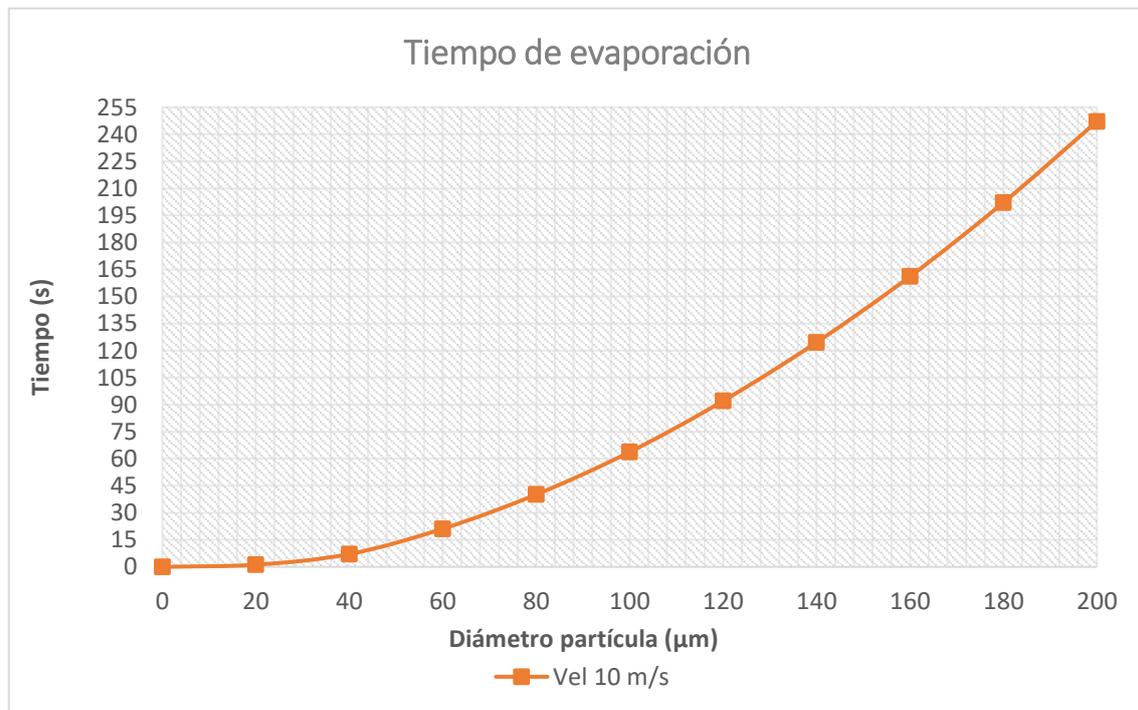


Figura 2. Tiempo de evaporación de una única partícula de la saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una humedad relativa del 50 %, temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s.

En la figura 3 se va a seguir el esquema de la curva de caída de gotas de evaporación de Wells (WELLS, 1934), la cual no tuvo en cuenta, entre otras cosas, la salinidad de la saliva. Realizó el estudio como si fueran partículas de agua pura, lo cual implica que sus datos obtenidos difieren de la realidad, pero planteó una curva interesante para futuras investigaciones. Además, los datos de este estudio realizado por Wells fueron obtenidos mediante extrapolación. Para realizar este tipo de gráficos se tiene en cuenta el tiempo de evaporación de las partículas y el

RESULTADOS

tiempo que tardan estas en llegar al suelo, en este estudio llamado tiempo de caída. El valor del tiempo evaporación es el aportado como dato en la gráfica cuando la partícula no ha llegado a caer al suelo y se ha evaporado por completo en el aire. En cambio, cuando la partícula toca suelo, es decir, el valor de Z es 0, se tiene en cuenta el tiempo que ha tardado en ocurrir esto, el tiempo de caída, y no se indica el tiempo de evaporación de esta partícula en la gráfica. Cuanto mayor es el diámetro de la partícula menor es el tiempo que tarda en caer al suelo, debido al efecto que tiene la gravedad sobre ella, y mayor es el tiempo que tarda en evaporarse, mientras que para las partículas pequeñas ocurre todo lo contrario, caen de una forma más lenta, pero se evaporan a una velocidad mucho mayor (Xie, X., 2007). El valor crítico es el valor del último diámetro que se ha evaporado antes de tocar suelo y a partir del cual las partículas de mayor tamaño tocarán suelo antes de completar la fase de evaporación. Como se puede observar en la figura 3, el valor crítico para este caso es de un diámetro de 60 μm , por lo que las partículas de mayor tamaño caerán al suelo y serán menos peligrosas, ya que las de diámetro igual o menor que 60 μm se quedarán suspendidas en el aire en forma de gotita, lo cual favorece el contagio. Se ha de recalcar que al tocar suelo son menos críticas, pero no dejan de ser peligrosas para el contagio ya que se puede producir la transmisión del virus si se entra en contacto directo con dichas partículas debido a que quedan depositadas sobre las superficies.

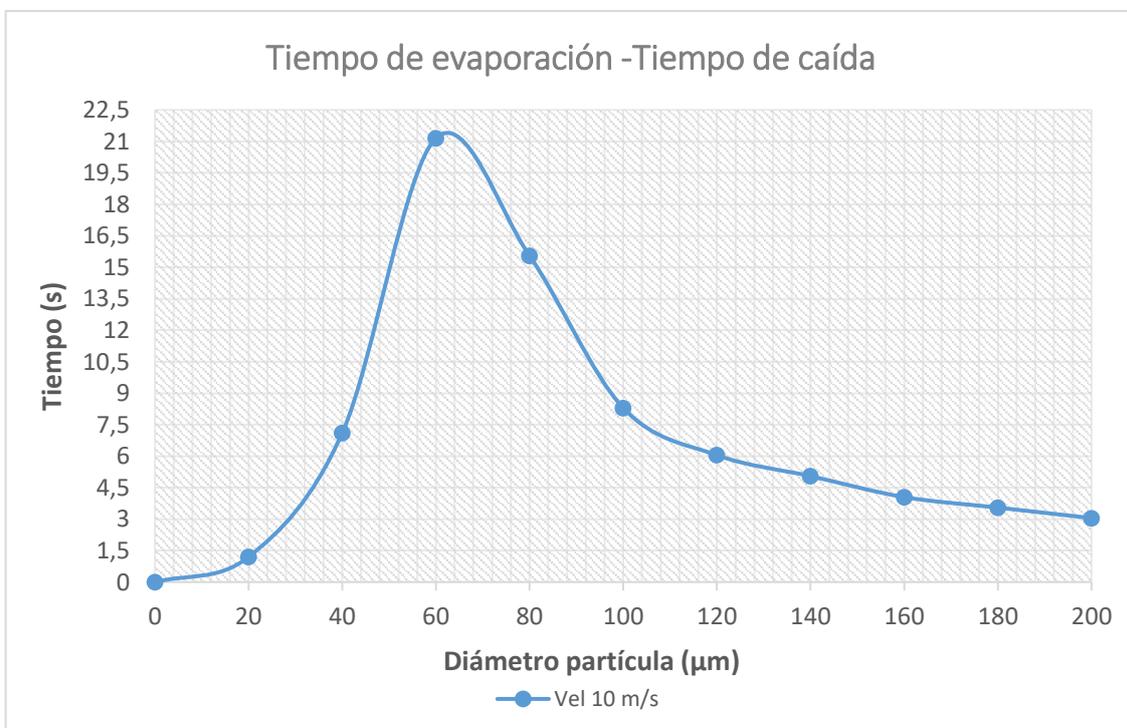


Figura 3. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una humedad relativa del 50 %, temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s.

RESULTADOS

3.1. EFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

Se toma la velocidad inicial como 10 m/s, por lo que este dato, será el usado para realizar la comparativa de resultados variando la humedad relativa de 30 % y 50 %. Además, se toma el caso en el que la boca está más abierta, es decir, con un diámetro de 0,04 m. Como se puede apreciar en el figura 4, una humedad relativa inferior ayuda a favorecer la evaporación de las partículas tal y como se ha comprobado en diferentes estudios (Ugarte-Anero et al., 2021), (Busco et al., 2020), (Xie, X., 2007). Si se comparan los resultados obtenidos en ambos casos para una partícula de 200 μm , con una humedad relativa del 30 % se ha obtenido un tiempo de evaporación de 129 s, mientras que, para el otro caso, 50 %, ha sido de 247s.



Figura 4. Tiempo de evaporación de cada partícula de saliva variando la humedad relativa. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y la velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.

En las situaciones en las que la humedad relativa es del 30 % el valor crítico aumenta a 80 μm , es decir, las partículas de más de 80 μm caerán al suelo, mientras que para el caso de humedad relativa del 50 % será a partir de 60 μm , tal y como se puede apreciar en la figura 5. Por ello estas situaciones en las que la humedad relativa es menor son más peligrosas en cuanto

RESULTADOS

a la transmisibilidad del virus, ya que habrá una mayor cantidad de partículas que se evaporan suspendidas en el aire, provocando una mayor cantidad de aerosoles en el ambiente. Se puede concluir que una humedad relativa mayor implica una velocidad de evaporación menor. Por otro lado, un ambiente seco implica una velocidad de caída mayor, ya que se han obtenido valores más bajos para el caso de humedad relativa 50 % una vez alcanzado el valor crítico. Cuando el diámetro es mayor de 100 μm podemos ver como disminuye la importancia de la humedad relativa, ya que se obtienen valores similares para ambos casos, tal y como otros estudios lo comprueban (Wei & Li, 2015). Esto puede ser debido a que al ser de mayor tamaño se ven más influenciadas por la gravedad bajo la que se encuentran sometidas, el tamaño es común en ambos casos estudiados, ya que la diferencia entre ambos casos es unicamente la humedad relativa.

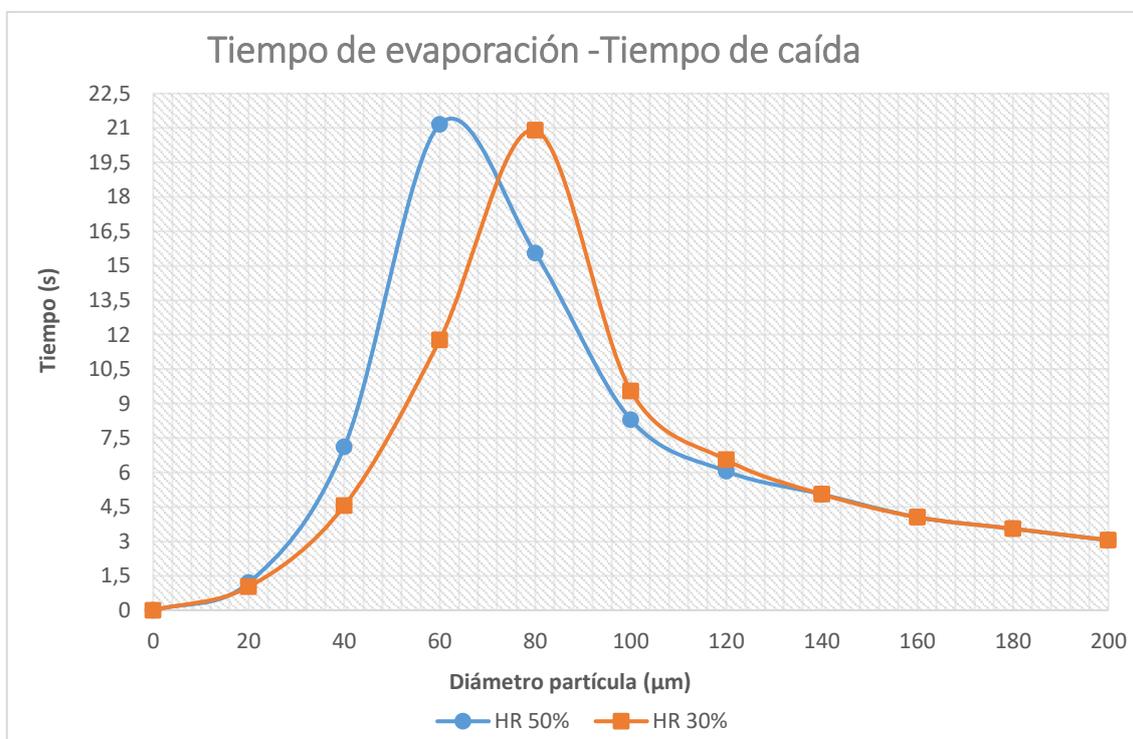


Figura 5. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20^oC, temperatura inicial de la partícula 36^oC, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.

Con los resultados obtenidos se ha comprobado que la humedad relativa no es un dato crítico en cuanto al desplazamiento horizontal máximo que alcanzan las partículas, llegando en ambos casos, como máximo, a alcanzar valores alrededor de los 0,4 m. En la figura 6 se ha podido observar cómo se obtienen valores muy similares, siendo la diferencia en algunos supuestos de escasos milímetros. Cabe recordar que no se ha tenido en cuenta la presencia de aire o vientos que impulsen estas partículas, una vez expulsadas de la boca únicamente se ven afectadas por la gravedad. Su principal impulso de salida es la velocidad inicial, 10 m/s. En este estudio (Dbouk

RESULTADOS

& Drikakis, 2020) comprobó como la distancia social de 2 m establecida como medida de seguridad para el caso en el que no hubiese viento era suficiente, tal y como se ha comprobado con los datos obtenidos en las simulaciones. Como se va a ver en todos los casos en los que se estudie el desplazamiento a lo largo de este proyecto, los valores máximos de desplazamiento alcanzados corresponderán a las partículas cuyo tamaño sea de un diámetro de 40 μm ya que las que son de menor tamaño se evaporan muy rápido y las de mayor tamaño caen a una velocidad mayor, lo cual en ambos casos implica que avanzan en menor medida en la dirección horizontal del eje.

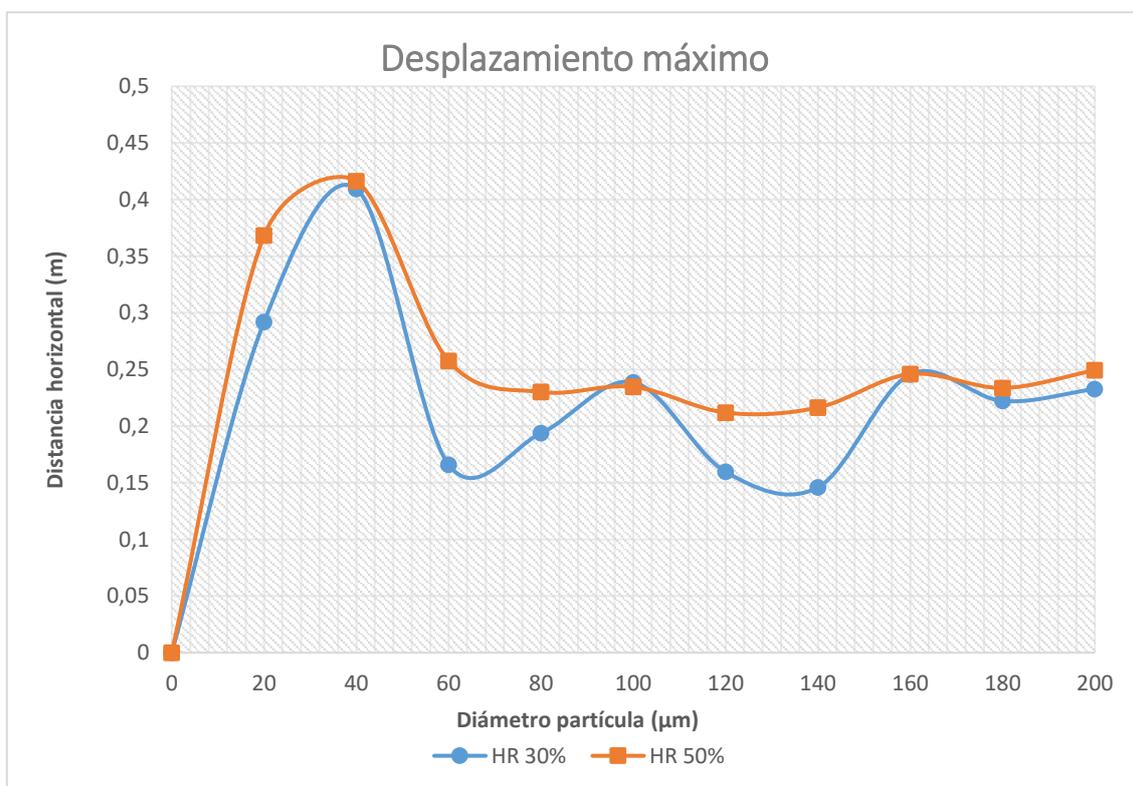


Figura 6. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, diámetro de la boca 0,04 m y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.

Tras estudiar el movimiento que sigue una partícula de 20 μm , representado en la figura 7, se puede ver como en ambos casos sigue una trayectoria similar, es por ello que se han tomado intervalos tan pequeños para graficar los resultados del valor de la Z. La partícula tiende a subir una vez exhalada y cuando la humedad relativa es del 30 % no llega a alcanzar los 0,3 m de desplazamiento horizontal, mientras que cuando se tiene una humedad relativa del 50 % no llega a alcanzar los 0,4 m. La diferencia entre ambos casos es prácticamente irrelevante. Se

RESULTADOS

puede decir que lo realmente importante sobre unas humedades relativas bajas es que favorece la evaporación de las partículas, no afectando en gran medida al desplazamiento que estas alcanzan. Tiene sentido que el desplazamiento sea algo menor en el caso de un ambiente más seco ya que se evapora antes, por lo que dispone de menos tiempo para avanzar. Se ha elegido este diámetro debido a que es uno de los más peligrosos, ya que se forman las, mencionadas ya, pequeñas gotitas en el aire.

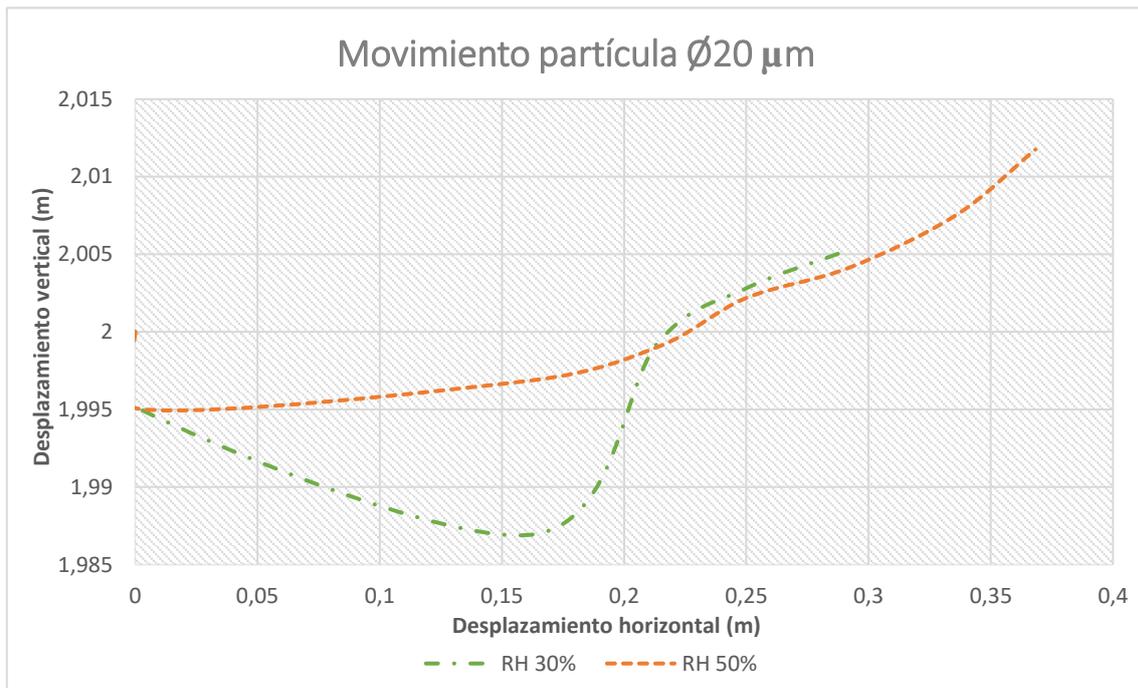


Figura 7. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de $20\ \mu\text{m}$. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C , temperatura inicial de la partícula 36°C , diámetro de la boca $0,04\ \text{m}$ y velocidad inicial de la partícula $10\ \text{m/s}$. Se realiza una comparativa para el caso en que la humedad relativa es de 30% y de 50%.

3.2. EFECTO DE LA APERTURA DE LA BOCA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

La boca se ha simulado como una entrada con forma de círculo por lo que se va a realizar un estudio sobre el efecto que causa el tamaño de la apertura de la boca sobre las partículas de saliva exhaladas. Cada persona tiene un tamaño de boca diferente, es por ello que se van a usar tres tamaños diferentes. Los diámetros de boca seleccionados para las simulaciones son: $0,02\ \text{m}$, $0,03\ \text{m}$ y $0,04\ \text{m}$. La velocidad inicial de la partícula es de $10\ \text{m/s}$, como en el caso anterior, y la humedad relativa escogida es del 50%. Cuanto mayor es la apertura de la boca, mayor es el tiempo de evaporación de la partícula y el tiempo de caída, aunque en el momento en que se alcanza el valor crítico, el tamaño de la apertura deja de ser tan relevante en los datos obtenidos.

RESULTADOS

tal y como se puede ver en la figura 8. Esto puede ser debido a la acción de la fuerza de la gravedad presente. En los tres casos el diámetro crítico es el de 60 μm , aunque con diferentes tiempos de evaporación, siendo para el caso de 0,02 m 19,4 s, para 0,03 m 20 s y para 0,04 m 21,15 s. Se puede concluir que, a pesar de tener valores ligeramente más altos cuando la boca se encuentra más abierta, la diferencia entre los tres casos no es excesiva.

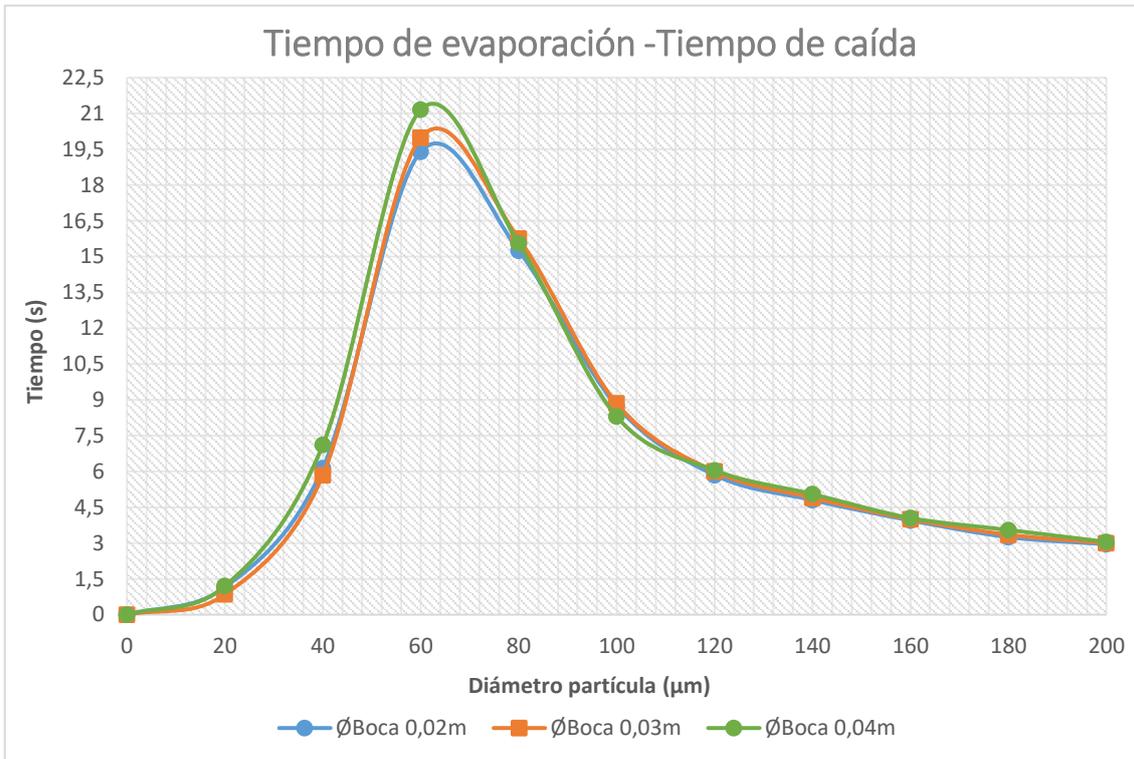


Figura 8. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20 $^{\circ}\text{C}$, temperatura inicial de la partícula 36 $^{\circ}\text{C}$, humedad relativa del 50% y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para los casos en que la boca tiene diferentes diámetros: 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m.

En la figura 9 podemos ver como teniendo la misma velocidad inicial, es decir 10 m/s, cuanto mayor es el diámetro de la boca, mayor es la distancia horizontal máxima que alcanza la partícula exhalada. La figura 9 muestra los datos obtenidos en cuanto al desplazamiento en el eje X para los tres casos propuestos. Los valores máximos alcanzados son los que corresponden a las partículas de diámetro 40 μm , siendo para el caso cuyo diámetro de boca es de 0,02 m de 0,32 m, para el diámetro de apertura 0,03 m corresponden 0,35 m y por último para el diámetro de 0,04 m, el valor extremo, 0,42 m. Se puede afirmar que un diámetro menor de la boca contribuye a que las partículas recorran un espacio menor, por lo que lo ideal sería reducir la

RESULTADOS

apertura de la boca al hablar, toser, etc., pero como seres humanos que somos, este factor es difícil de controlar y no causa una gran diferencia en los resultados.

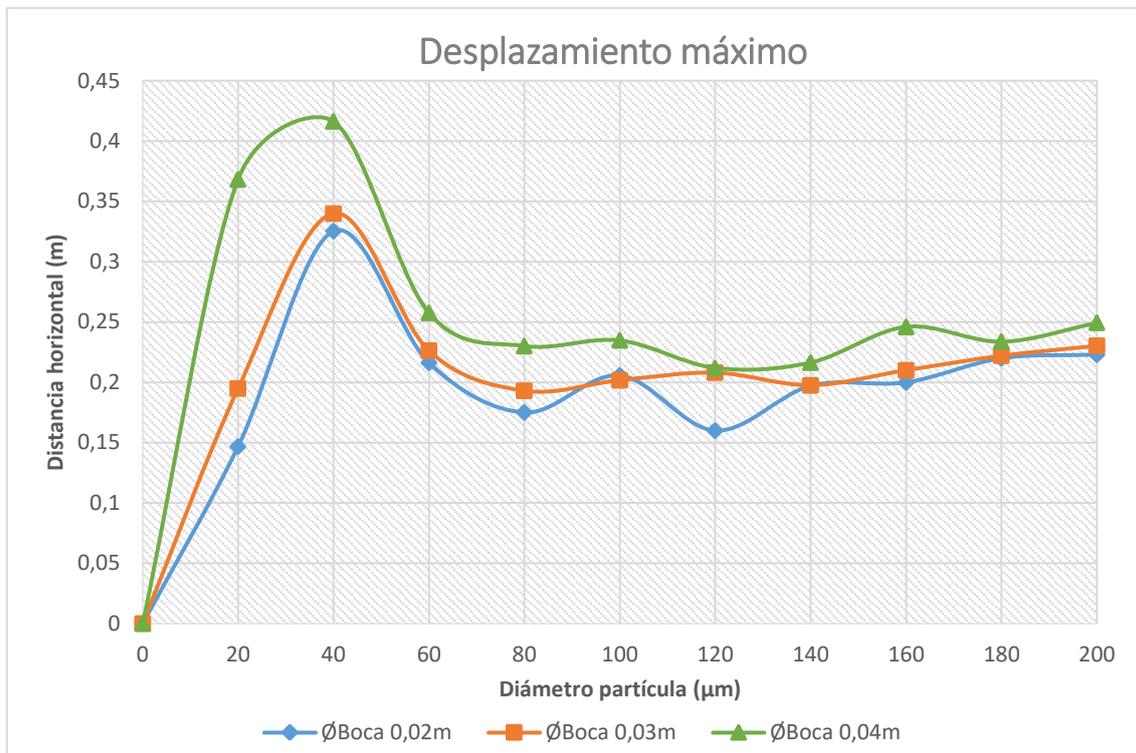


Figura 9. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y velocidad inicial de la partícula 10 m/s. Se realiza una comparativa para los casos en que la boca tiene diferentes diámetros: 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m.

3.3. EFECTO DE LA ACTIVIDAD RESPIRATORIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS

Las partículas se pueden exhalar al ambiente de diferentes formas en función de la actividad respiratoria que causa la exhalación. Cuando respiramos también emitimos pequeñas partículas que son imperceptibles a simple vista, por lo que solemos olvidar que respirar es otra vía de transmisión de partículas de saliva que, en caso de estar contagiadas por un virus, resultarían infecciosas. Para simular este caso en el que se respira, se va a usar una velocidad inicial de partícula de 1 m/s, para el caso en que se simula el momento en que una persona habla se va a usar el dato inicial de velocidad de 5 m/s. Para toser 10 m/s, este es el estudio base con el que se están comparando los diferentes casos propuestos, y para estornudar se van a ver dos casos: 20 m/s y 50 m/s. Como ya se podía suponer, el caso más peligroso es el de 50 m/s, ya que se entiende que, a mayor velocidad inicial, el impulso que tiene la partícula a la salida de la boca, recorrerá más espacio. Para realizar el estudio comparativo de estos cinco casos se ha

RESULTADOS

establecido una humedad relativa del 50 % y un diámetro de la boca de 0,04 m. En la figura 10 podemos observar cómo al exhalar la partícula a mayores velocidades, toca el suelo antes y se evapora más rápido, aunque los datos obtenidos no tienen una notable diferencia. Siendo en los cinco casos el diámetro crítico de 60 μm , los tiempos de evaporación que les corresponden son; para 1 m/s un tiempo de 22,6 s, para 5 m/s tiene un tiempo de 21,3 s, para 10 m/s un valor de 21,15 s, para 20 m/s tiene un valor de 21 s y para 50 m/s le corresponden 20,6 s.

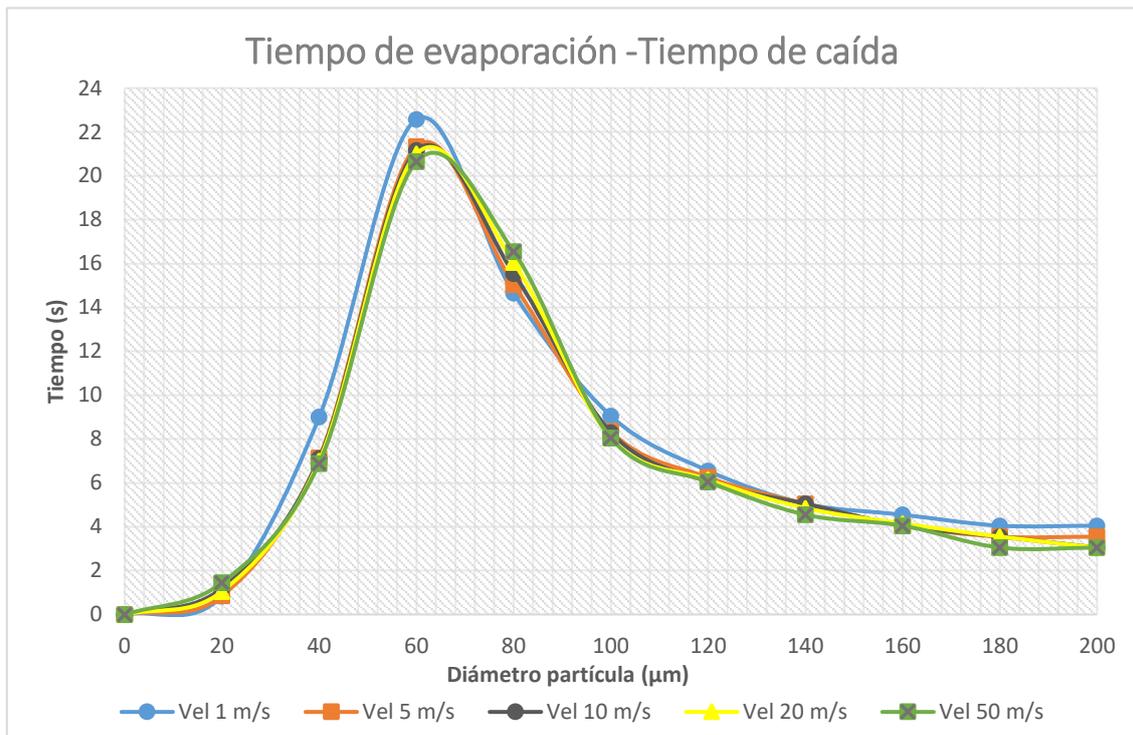


Figura 10. Tiempo de evaporación y tiempo de caída de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C, temperatura inicial de la partícula 36°C, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.

El factor que se ve más afectado por la variación de velocidades iniciales de la partícula es la distancia horizontal máxima que recorre la partícula. Cuando la partícula exhalada es de un diámetro de 40 μm es cuando se alcanza el valor máximo de desplazamiento en el eje horizontal, llegando en el caso en el que la velocidad es de 50 m/s a superar los 2 m establecidos como distancia mínima entre personas, mientras que a una velocidad de 1 m/s apenas avanzará unos centímetros. Este dato nos muestra la gran importancia de la velocidad inicial que impulsa la partícula de saliva, es decir, la actividad respiratoria que la causa es de gran importancia. Además, por lo general, en un estornudo se suele expulsar mayor cantidad de saliva, es decir más partículas, que al hablar o respirar, lo cual aumenta aún más su peligrosidad debido a la carga vírica que esto implica. Para el caso en el que se tenga en cuenta la presencia de corrientes de aire o vientos, estos valores podrían aumentar en una gran proporción. La velocidad inicial

RESULTADOS

que se usa como dato sólo impulsa a la partícula en el momento exacto en el que se exhala, posteriormente esta velocidad irá variando a medida que va cayendo. Por todo lo mencionado, en la figura 11 se pueden observar los valores obtenidos y como sigue la lógica ya expuesta. Para el valor de diámetro de 40 μm una partícula exhalada a una velocidad de 1 m/s recorrerá 0,1 m, si es exhalada a 5 m/s avanzará 0,18 m, para una velocidad inicial de 10 m/s llegará a los 0,42 m, para una velocidad de 20 m/s avanzará 1,14 m y por último para el caso más extremo llegará a alcanzar 2,65 m, sobrepasando el límite de 2m.

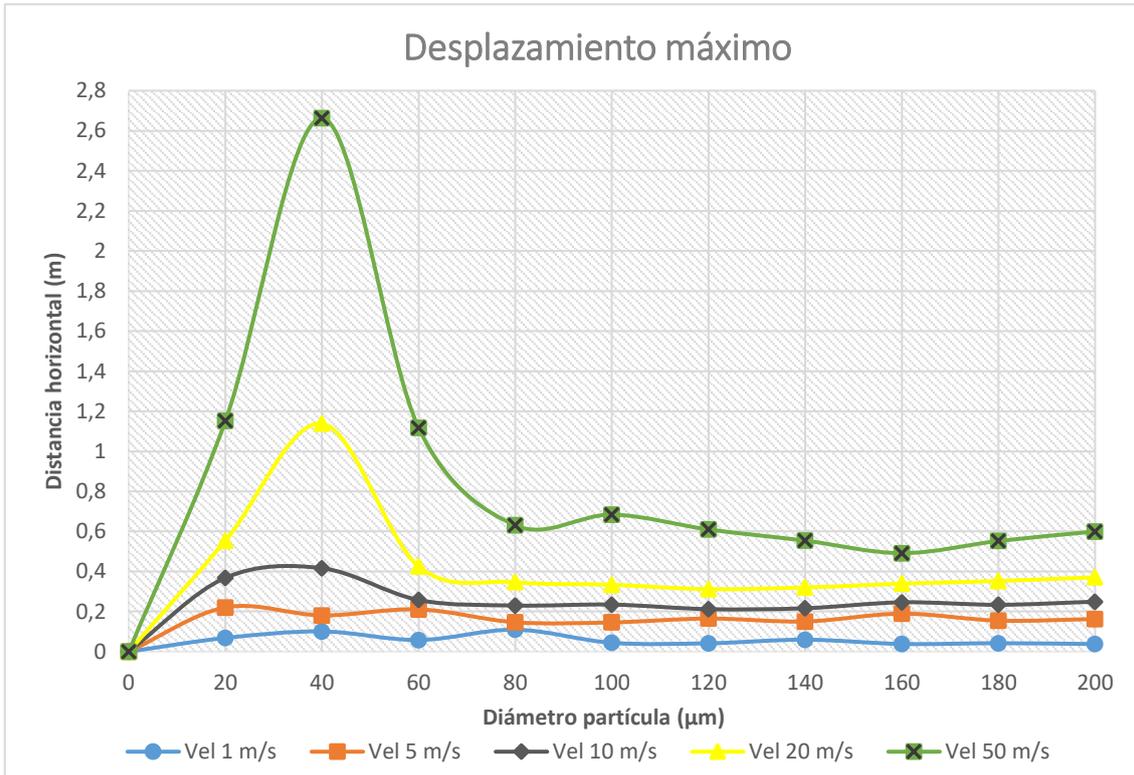


Figura 11. Desplazamiento horizontal máximo de cada partícula de saliva. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20 $^{\circ}\text{C}$, temperatura inicial de la partícula 36 $^{\circ}\text{C}$, humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de 0,04 m. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s y 50 m/s.

A continuación se va a realizar un estudio en la figura 12 sobre el movimiento seguido por una partícula de saliva de diámetro 20 μm para los cinco casos definidos en este apartado. Se han usado unos intervalos de tan solo 0,02m para representar la posición en Z, debido a que apenas cae la partícula, tarda periodos de tiempo muy bajos en evaporarse. En la figura 13 se ha realizado el mismo estudio pero para el caso de una partícula de diámetro 40 μm . En este caso se puede observar como en todos los casos menos en el más extremo, la partícula avanza

RESULTADOS

una distancia de forma horizontal y llegada a un punto cae prácticamente en vertical. En cambio para el caso de 50m/s, continua con un movimiento más horizontal a lo largo de la caída.

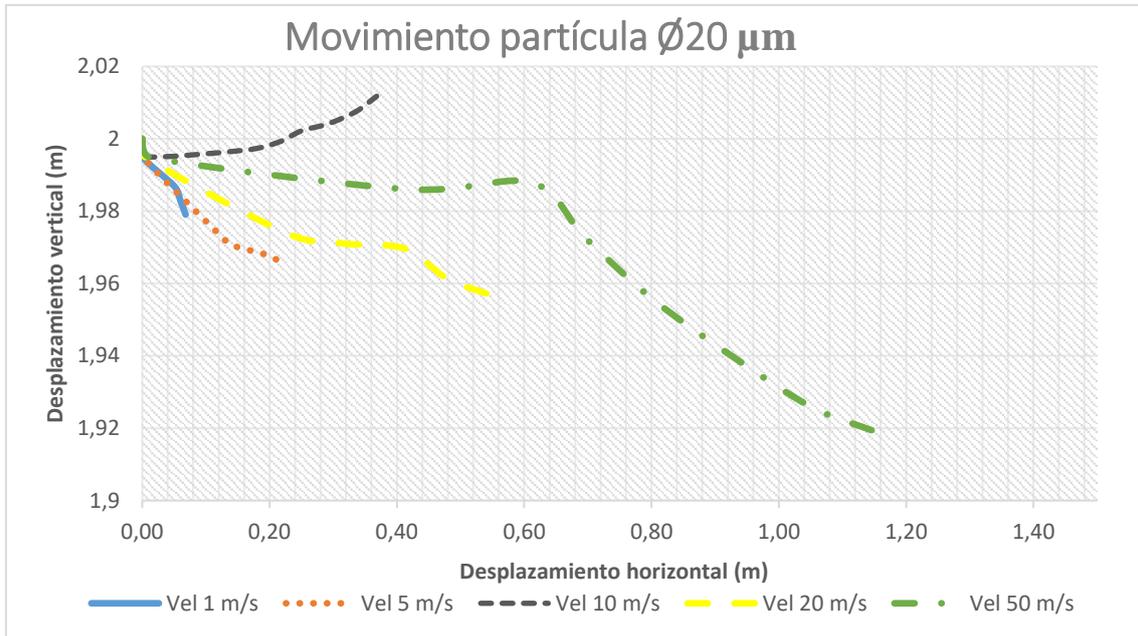


Figura 12. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de $20 \mu\text{m}$. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C , temperatura inicial de la partícula 36°C , humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de $0,04 \text{ m}$. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s , 5 m/s , 10 m/s , 20 m/s y 50 m/s .

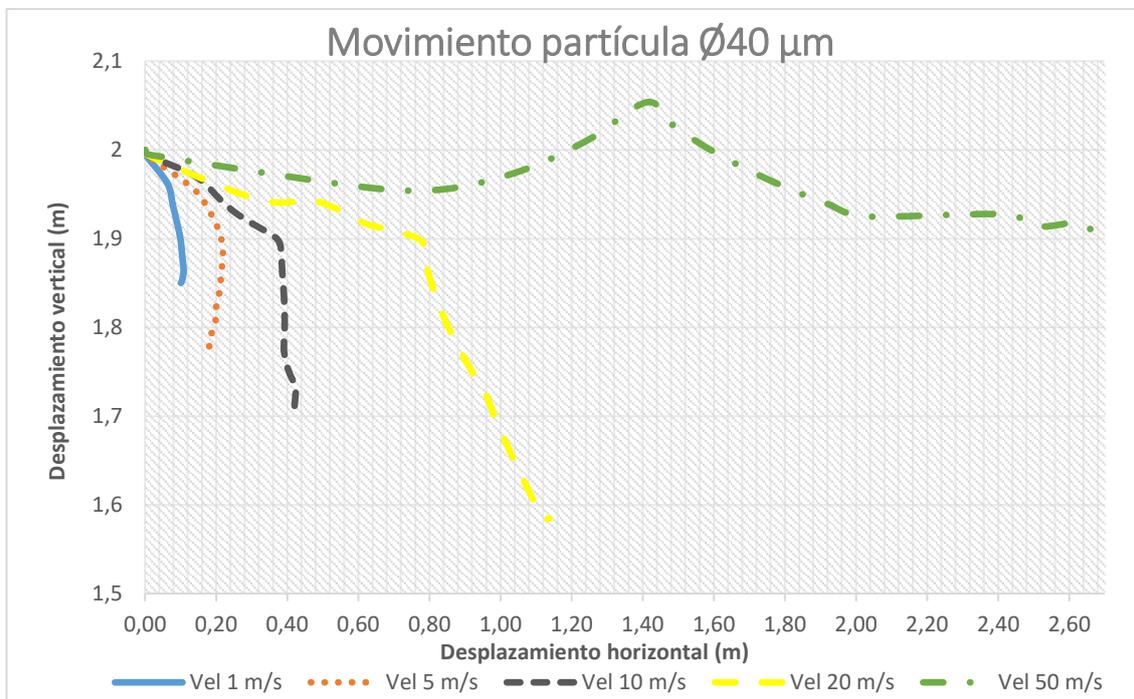


Figura 13. Movimiento seguido por una partícula de saliva con un diámetro de $40 \mu\text{m}$. Las condiciones ambientales interiores son de una temperatura ambiente de 20°C , temperatura inicial de la partícula 36°C , humedad relativa del 50% y diámetro de la boca de $0,04 \text{ m}$. Se realiza una comparativa para los diferentes casos de velocidad inicial de la partícula: 1 m/s , 5 m/s , 10 m/s , 20 m/s y 50 m/s .

CONCLUSIÓN

4.CONCLUSIÓN

Esta investigación ha sido llevada a cabo para estudiar el comportamiento de las partículas en diferentes situaciones y a su vez para cotejar la efectividad de la distancia social establecida de 2 m. Se ha examinado cuál es la consecuencia de variar la humedad relativa, estudiando el caso de HR igual a 30 % y 50 %, viendo que cuando el ambiente es más seco, es decir, menor humedad relativa, menor es el tiempo de evaporación y de caída al suelo de las partículas de saliva, por lo que se presenta una mayor cantidad de aerosoles suspendidos en el aire. Esto implica que existe una mayor carga vírica en los espacios cuya humedad relativa sea baja. En cuanto al desplazamiento que llevan a cabo dichas partículas, teniendo en cuenta que se ha simulado el caso de toser, velocidad inicial de la partícula de 10 m/s, la distancia de 2 m sería más que suficiente para ambos casos, ya que la humedad relativa apenas afecta en el espacio que recorre la partícula antes de caer o evaporarse.

Por otro lado, se ha investigado sobre el efecto de la apertura de la boca, simulada mediante un círculo, variando su diámetro, estudiando los siguientes casos; 0,02 m, 0,03 m y 0,04 m. Se ha visto como a mayor apertura, mayor es el tiempo que tarda en evaporarse y caer, pero se han obtenido valores muy similares para los tres casos, por lo que podría decirse que la característica que se ha visto más afectada es el desplazamiento máximo que alcanzan las partículas, aun siendo la diferencia entre los casos relativamente baja. A mayor diámetro de boca, mayor es el desplazamiento máximo que alcanza la partícula antes de evaporarse o de caer por completo. La velocidad adoptada es también la de toser, los datos obtenidos confirman que la distancia de 2 m es válida.

Por último, se ha estudiado sobre los casos en que una persona respira con una velocidad inicial de la partícula de 1 m/s, habla con una velocidad de 5 m/s, tose con una velocidad de 10 m/s y estornuda, para este caso se ha estudiado a 20 m/s y a 50 m/s. Cuanto menor es la velocidad con la que parte la partícula, mayor es el tiempo que tardan las partículas en evaporarse, pero el dato más relevante de esta parte del estudio es el desplazamiento máximo de las partículas. Se ha comprobado como a mayor velocidad, mayor es el espacio recorrido por las partículas, llegando algunas de estas cuya velocidad es de 50 m/s a superar los 2 m establecidos como distanciamiento mínimo. Para los otros cuatro casos estudiados la distancia de 2 m es suficiente, pero en el caso de mayor velocidad estudiado, esta distancia no sería efectiva para evitar el contagio.

CONCLUSIÓN

Se ha observado como las partículas de menor tamaño, 20 μm y 40 μm , tienden a elevarse una vez exhaladas antes de comenzar a caer, esto es debido a que al tener un tamaño tan pequeño se ven afectadas en menor medida por la gravedad en comparación con las de mayor tamaño como pueden ser las de 180 μm y 200 μm . En este estudio existen algunas limitaciones, ya que la partícula parte de la boca de forma individual y no de un chorro de partículas. Otro caso interesante que podría llevarse a cabo en otra investigación, sería simular estas mismas situaciones, pero en presencia de corrientes de aire, causadas por ventilación, en este caso se estudia el aire estancado en el espacio delimitado. Para finalizar, cabe recordar que la saliva se ha tomado como una solución salina que se evapora, sin tener en cuenta la formación de los residuos de partícula.

5.PRESUPUESTO

En este apartado se va a desarrollar el presupuesto necesario para poder llevar a cabo una investigación de este tipo. Los costes asociados a este estudio se podrían agrupar en dos clases: la mano de obra y el coste de la licencia del programa empleado. El programa usado ha sido **Siemens STAR CCM+ 2019.1.1 (Siemens, Londres, Reino Unido)** (STAR-CCM+ | siemens software.) ya que se ha tratado de un estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Licencia del Software

Se han realizado 80 simulaciones diferentes, variando el diámetro de la partícula de 20 μm a 200 μm , en intervalos de 20, y a su vez variando las diferentes propiedades mencionadas a lo largo de este estudio. La simulación de menor duración ha sido de 10 minutos, mientras que la más larga ha sido de 28 horas. Contando con que hubo que realizar 2 simulaciones de nuevo, el total de horas de uso del programa sería de 780h, es decir, 32 días y medio en funcionamiento. En la Tabla 1 se resume este gasto.

Tabla 1. Coste asociado a la licencia empleada.

Licencia	Cantidad (h)	Precio unitario (€/h)	Total (€)
Siemens STAR CCM+	780	-	3500

Mano de obra

El otro gasto importante del estudio es la cantidad de horas empleadas en mano de obra del ingeniero. En la Tabla 2 se muestra la cantidad de horas invertidas en investigación, en el desarrollo de la idea, en la modelización de las simulaciones y en la comprobación de resultados y conclusiones.

Tabla 2. Coste asociado a la mano de obra empleada.

Actividad	Cantidad (h)	Precio unitario (€/h)	Total (€)
Investigación y desarrollo	100	10	1000
Modelo	120	12	1440
Resultados y conclusiones	100	10	1000

PRESUPUESTO

Subtotal	320	-	3440
-----------------	-----	---	------

En la Tabla 3 se muestra el total de la inversión de dinero que se necesitaría para llevar a cabo la investigación.

Tabla 3. Coste total del estudio.

CONCEPTO	TOTAL (€)
Licencia	3500
Mano de obra	3440
SUBTOTAL	6940

REFERENCIAS

6.REFERENCIAS

- Aranaz Andrés, J. M., Gea Velázquez de Castro, M. Teresa, Vicente-Guijarro, J., Beltrán Peribáñez, J., García Haro, M., Valencia-Martín, J. L., . . . Gómez Montero, G. (2020). Mascarillas como equipo de protección individual durante la pandemia de COVID-19: Cómo, cuándo y cuáles deben utilizarse. *Journal of Healthcare Quality Research*, 35(4), 245-252. doi:10.1016/j.jhqr.2020.06.001
- Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*, 9(1), 2348. doi:10.1038/s41598-019-38808-z
- Bhagat, R. K., Davies Wykes, M. S., Dalziel, S. B., & Linden, P. F. (2020). Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*, 903, F1. doi:10.1017/jfm.2020.720
- Burgmann, S., & Janoske, U. (2021). Transmission and reduction of aerosols in classrooms using air purifier systems. *Physics of Fluids*, 33(3), 033321. doi:10.1063/5.0044046
- Busco, G., Yang, S. R. (., Seo, J. (., & Hassan, Y. A. (2020). Sneezing and asymptomatic virus transmission. *Physics of Fluids*, 32(7), 073309. doi:10.1063/5.0019090
- Caicoya, M. (2020). El papel de las mascarillas en el control de la epidemia COVID-19. *Journal of Healthcare Quality Research*, 35(4), 203-205. doi:10.1016/j.jhqr.2020.05.001
- Chillón, S. A., Ugarte-Anero, A., Aramendia, I., Fernandez-Gamiz, U., & Zulueta, E. (2021). Numerical modeling of the spread of cough saliva droplets in a calm confined space. *Mathematics*, 9(5) doi:10.3390/math9050574
- Dbouk, T., & Drikakis, D. (2020). On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Physics of Fluids*, 32(5), 053310. doi:10.1063/5.0011960
- Del Vigna de Almeida, Patricia. (2008). Saliva composition and functions: A comprehensive review. Retrieved from <http://oralpathol.dlearn.kmu.edu.tw/case/Journal%20reading-intern-08-04/Saliva-function-composition-J%20Comtemp%20Dent%20Pract-2008.pdf>

REFERENCIAS

- Duguid, J. P. (1946). The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Journal of Hygiene*, 44(6), 471-479. doi:10.1017/S0022172400019288
- Fennelly, K. P. (2020). Particle sizes of infectious aerosols: Implications for infection control. *The Lancet Respiratory Medicine*, 8(9), 914-924. doi:10.1016/S2213-2600(20)30323-4
- Gupta, J. K., Lin, C. -, & Chen, Q. (2009). Flow dynamics and characterization of a cough. *Indoor Air*, 19(6), 517-525. doi:10.1111/j.1600-0668.2009.00619.x
- Hansen, B., & Mygind, N. (2002). How often do normal persons sneeze and blow the nose? *Rhinology*, 40(1), 10-12. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/12012947>
- Ju, J. T. J., Boisvert, L. N., & Zuo, Y. Y. (2021). Face masks against COVID-19: Standards, efficacy, testing and decontamination methods. *Advances in Colloid and Interface Science*, 292, 102435. doi:10.1016/j.cis.2021.102435
- Lai, M. Y. Y., Cheng, P. K. C., & Lim, W. W. L. (2005). Survival of severe acute respiratory syndrome coronavirus. *Clinical Infectious Diseases*, 41(7), e67-e71. doi:10.1086/433186
- Li, Y., Huang, X., Yu, I. T. S., Wong, T. W., & Qian, H. (2005). Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in hong kong. *Indoor Air*, 15(2), 83-95. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00317.x
- Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., . . . Kang, M. (2021). Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, 196, 107788. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107788
- Otter, J. A., Donskey, C., Yezli, S., Douthwaite, S., Goldenberg, S. D., & Weber, D. J. (2016). Transmission of SARS and MERS coronaviruses and influenza virus in healthcare settings: The possible role of dry surface contamination. *Journal of Hospital Infection*, 92(3), 235-250. doi:10.1016/j.jhin.2015.08.027
- Rayegan, S., Shu, C., Berquist, J., Jeon, J., Zhou, L. (., Wang, L. (., . . . Ge, H. (2023). A review on indoor airborne transmission of COVID-19– modelling and mitigation approaches. *Journal of Building Engineering*, 64, 105599. doi:10.1016/j.job.2022.105599

REFERENCIAS

STAR-CCM+ | siemens software. Retrieved from

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/simcenter/Star-CCM.html>

Stiti, M., Castanet, G., Corber, A., Alden, M., & Berrocal, E. (2022). Transition from saliva droplets to solid aerosols in the context of COVID-19 spreading. *Environmental Research*, 204, 112072. doi:10.1016/j.envres.2021.112072

Ugarte-Anero, A., Fernandez-Gamiz, U., Aramendia, I., Zulueta, E., & Lopez-Guede, J. (2021). Numerical modeling of face shield protection against a sneeze. *Mathematics*, 9(13) doi:10.3390/math9131582

Ugarte-Anero, A., Fernandez-Gamiz, U., Portal-Porras, K., Zulueta, E., & Urbina-Garcia, O. (2022). Computational characterization of the behavior of a saliva droplet in a social environment. *Scientific Reports*, 12(1), 6405. doi:10.1038/s41598-022-10180-5

van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., . . . Munster, V. J. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, 382(16), 1564-1567. doi:10.1056/NEJMc2004973

Wei, J., & Li, Y. (2015). Enhanced spread of expiratory droplets by turbulence in a cough jet. *Building and Environment*, 93, 86-96. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.018

WELLS, W. F. (1934). On air-borne infection*: Study ii. droplets and droplet nuclei. *American Journal of Epidemiology*, 20(3), 611-618. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a118097

Xie, X. (2007). How far droplets can move in indoor environments – revisiting the wells evaporation–falling curve. *Indoor Air*, 17(3), 211-225. doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x

Xie, X., Li, Y., Sun, H., & Liu, L. (2009). Exhaled droplets due to talking and coughing. *Journal of the Royal Society, Interface*, 6 Suppl 6(Suppl 6), 703. doi:10.1098/rsif.2009.0388.focus

REFERENCIAS

- Yang, L., Li, X., Yan, Y., & Tu, J. (2018). Effects of cough-jet on airflow and contaminant transport in an airliner cabin section. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 10(2), 72-82. doi:10.1177/1757482X17746920
- Zhao, B., Liu, Y., & Chen, C. (2020). Air purifiers: A supplementary measure to remove airborne SARS-CoV-2. *Building and Environment*, 177, 106918. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106918
- Zhou, Y., Zeng, Y., & Chen, C. (2020). Presence of SARS-CoV-2 RNA in isolation ward environment 28 days after exposure. *International Journal of Infectious Diseases*, 97, 258-259. doi:10.1016/j.ijid.2020.06.015