



Universidad Politécnica
de Madrid

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos



Grado en Matemáticas e Informática

Trabajo de Fin de Grado

Riesgo de Contagio en un Avión

Madrid, Junio - 2024

Autor: Aaron Moyano Alcacer 20M020

Tutor: Alfonso Mateos Caballero, Catedrático de Universidad

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

Grado en Matemáticas e Informática

Título: Riesgo de Contagio en un Avión

Junio - 2024

Autor: Aaron Moyano Alcacer 20M020

*Tutor: Alfonso Mateos Caballero, Catedrático de Universidad
Departamento de Inteligencia Artificial
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos
Universidad Politécnica de Madrid*

Resumen

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es la investigación del papel crítico del transporte aéreo internacional en la propagación de pandemias, centrándose específicamente en la pandemia de la COVID-19, tal y como está evidenciado en numerosos estudios científicos.

El estudio exhaustivo de cómo las pandemias se propagan a lo largo del entorno de las aeronaves, especialmente cuando un pasajero infectado forma parte del viaje, contribuye a la comprensión científica de los diferentes mecanismos de propagación viral, como el distinto número de individuos que podrían haber contraído la enfermedad durante el vuelo.

Diferentes artículos científicos han abordado la dificultad de comprender cómo se produce el contagio entre pasajeros en el contexto aeroportuario. La propagación viral se ve influida por una variedad de factores, tales como la eficacia de los sistemas de ventilación y filtración del aire, la distribución de asientos, la densidad de pasajeros en el avión y la verificación del uso de mascarillas. Estas variables juegan un papel crucial al impactar en la ecuación del riesgo de contagio, destacando la necesidad de una evaluación detallada de cada uno de estos elementos para una comprensión más completa y precisa.

El análisis detallado de factores cruciales en la propagación viral en el transporte aéreo permite formar estrategias preventivas por parte de autoridades y aerolíneas. Destaca la importancia de la cooperación internacional para establecer estándares comunes que garanticen la seguridad de los viajeros y minimicen el riesgo de propagación. Se mencionan modelos epidemiológicos como el SIR y SIQR, que ofrecen herramientas valiosas para comprender y prever la propagación de enfermedades, facilitando la toma de decisiones informadas en crisis sanitarias. Además, se presentan metodologías como Wells-Riley y Dosis-Respuesta para diversas cabinas de aviones.

En este marco, resulta fundamental llevar a cabo investigaciones constantes y ajustar los procedimientos en la industria de la aviación. Por ello, se busca mejorar la comprensión de los riesgos relacionados con la propagación de enfermedades y desarrollar estrategias eficaces que salvaguarden la salud de los pasajeros y de la comunidad en su conjunto.

Abstract

The primary goal of this Bachelor's Thesis is to delve into the pivotal role of international air transportation in the dissemination of pandemics, specifically centering on the COVID-19 pandemic, as elucidated in numerous scientific studies.

The thorough examination of how pandemics unfold within the aircraft environment, particularly when an infected passenger is part of the journey, contributes significantly to the scientific comprehension of various mechanisms of viral transmission, such as the varying number of individuals who might have contracted the disease during the flight.

Several scientific articles have grappled with the challenge of comprehending how contagion takes place among passengers in the airport setting. Viral spread is influenced by diverse factors, including the effectiveness of air ventilation and filtration systems, seat distribution, passenger density on the plane, and the enforcement of mask usage. These variables play a pivotal role in impacting the contagion risk equation, underscoring the necessity for a meticulous evaluation of each of these elements to attain a more holistic and precise understanding.

The meticulous analysis of crucial factors in viral spread within air transportation enables the formulation of preventive strategies by authorities and airlines. It accentuates the significance of international cooperation in establishing shared standards to ensure traveler safety and minimize the risk of transmission. Epidemiological models like SIR and SIQR are cited, providing valuable tools for comprehending and foreseeing disease spread, thereby facilitating informed decision-making during health crises. Furthermore, methodologies such as Wells-Riley and Dose-Response are presented for various aircraft cabin configurations.

Within this framework, it is imperative to conduct ongoing research and adapt procedures within the aviation industry. Consequently, the objective is to refine the understanding of risks associated with disease transmission and devise effective strategies that safeguard the health of passengers and the broader community.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a todos los profesores que han sido parte de mi formación en la Universidad Politécnica de Madrid. Su dedicación y enseñanzas han sido cruciales para mi desarrollo como futuro ingeniero.

Quiero hacer una mención especial a mi tutor de Trabajo de Fin de Grado, Alfonso Mateos Caballero, cuyo apoyo constante fue fundamental en los momentos más difíciles de este proyecto.

No puedo pasar por alto el enorme apoyo que he recibido de mi familia. Merece un reconocimiento especial por su apoyo inquebrantable. Su dedicación, sacrificio y amor incondicional han sido el motor que me impulsó a seguir adelante. No puedo sino estar agradecido por la libertad que me han dado para tomar mis propias decisiones y enfrentar la vida a mi manera. Gracias a Silvia, Antonio y Katya por estar siempre ahí, por creer en mí y por alentarme a alcanzar mis sueños.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Alejandro, David, Iván, Marcos, Miguel, y Sergio. Es difícil expresar cuánto valoro su amistad. Juntos hemos reído, llorado, superado obstáculos y compartido momentos que quedarán grabados en mi memoria para siempre, enriqueciendo profundamente mi vida. Sin el apoyo constante que hemos brindado mutuamente como grupo, seguir adelante en esta vocación como ingeniero habría sido un desafío mucho mayor. Estoy sinceramente agradecido por contar con su presencia y su respaldo. Por esta razón, merecen tener su espacio en estos agradecimientos.

También quiero dar las gracias al proyecto del Ministerio de Ciencia e Innovación "Sistema de Ayuda a la Decisión basado en Aprendizaje Estadístico y Optimización en Redes. Aplicaciones a la Propagación de Pandemias a través del Transporte", PID2021-122209OB-C31.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivaciones y Objetivos	3
1.2.1. Motivaciones	3
1.2.2. Definición de Objetivos	3
2. Estado del Arte	5
2.1. Introducción a la COVID-19 y virus existentes	6
2.1.1. COVID-19	6
2.1.2. Otros virus	7
2.2. Modelos Matemáticos que estudian la transmisión	9
2.2.1. Introducción al modelo SIR	9
2.2.2. El modelo SIR para calcular el riesgo de contagio	12
2.2.3. Variación del modelo SIR	15
2.2.3.1. El modelo ASIRS	15
2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión .	17
2.3.1. Ecuaciones de Wells - Riley	17
2.3.1.1. Contexto Histórico y estudios hasta la fecha	17
2.3.1.2. Propagación en cabinas de avión y métodos empleados .	18
2.3.1.3. Boeing 737-600	19
2.3.1.4. Maqueta de Cabina	22
2.3.1.5. Cabinas con distribución 2-2 , 2-3-2 y 3-3-3	27
2.3.2. Métodos alternativos a las Ecuaciones de Wells - Riley	30
2.3.2.1. CFD y Dosis-Respuesta en Dornier 728	30
3. Selección y Comparación de Metodologías	34
3.1. Metodologías Elegidas	34
3.2. Comparación de Metodologías	35
3.2.1. Resultados obtenidos en las Distribuciones de Cabina con Metodo- logía CFD y Dosis-Respuesta	35
3.2.1.1. Distribución de Cabina 2-2	36
3.2.1.2. Distribución de Cabina 2-3-2	37
3.2.1.3. Distribución de Cabina 3-3-3	39
3.2.2. Resultados obtenidos con metodología Wells-Riley y Distancia en la cabina del Dornier 728	40
4. Conclusiones y Trabajo Futuro	43
4.1. Conclusiones	43

ÍNDICE GENERAL

4.2. Trabajo Futuro	44
Bibliografía	46
A. CFD y Dosis-Respuesta en Distribuciones de Cabina	47
B. Wells-Riley y Distancia en avión Dornier 728	49

Índice de figuras

2.1. Avión con Contagios en Irlanda [4]	7
2.2. Diagrama del modelo SIR	9
2.3. Riesgo de Contagio de los Pasajeros [16]	14
2.4. Cabina con Infectado en la Duodécima Fila [6]	19
2.5. Distribución de Asientos [6]	19
2.6. Contornos de Riesgo de Contagios [6]	21
2.7. Distribución Habitual de un Boeing 737 [6]	22
2.8. Distribución de Asientos [6]	22
2.9. Diseño de la Maqueta de una Cabina [26]	23
2.10. Organización de la Maqueta de una Cabina [26]	23
2.11. No llevar Mascarilla, Primero MV, Segundo DV [27]	25
2.12. Llevar Mascarilla solo Persona Infectada, Primero MV, Segundo DV [27]	25
2.13. Todos los pasajeros llevan Mascarilla, Primero MV, Segundo DV [27]	26
2.14. Riesgo de Contagio en Distribución 2-2 [28]	27
2.15. Riesgo de Contagio en Distribución 2-3-2 [28]	28
2.16. Riesgo de Contagio en Distribución 3-3-3 [28]	29
2.17. Diseño de Cabina de un Do728 [29]	30
2.18. Ventilación en la cabina de un Do728 [29]	30
2.19. Riesgo de Contagio en un Do728 [29]	32
2.20. Número Estimado de Contagios para Dosis específicas [29]	32
3.1. Dosis infecciosa D_{in} utilizada para Distribución de Cabina 2-2 [29]	36
3.2. Resultados de Metodología <i>CFD</i> en Distribución de Cabina 2-2	36
3.3. Resultados con Metodología Wells-Riley [28]	37
3.4. Resultados de Metodología <i>CFD</i> en Distribución de Cabina 2-3-2	38
3.5. Resultados con Metodología Wells-Riley [28]	38
3.6. Resultados de Metodología <i>CFD</i> en Distribución de Cabina 3-3-3	39
3.7. Resultados con Metodología Wells-Riley [28]	39
3.8. Resultados de Wells-Riley y Distancia en Dornier 728	41
3.9. Resultados obtenidos con la Metodología <i>CFD</i> y Dosis-Respuesta [29]	41
B.1. Medidas para el avión Dornier 728 [30]	50

Índice de cuadros

2.1. Tabla de Riesgo de Contagio [27]	26
2.2. Rangos de los Parámetros utilizados en la Investigación [29]	31

Listings

A.1. Parámetros dados	47
A.2. Calcular el Riesgo de Contagio	48
B.1. Inicialización de Variables	49
B.2. Inicialización de Variables 2	50
B.3. Función <code>calcular_probabilidad_contagio</code>	50
B.4. Calcular probabilidad de contagio	51

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Las enfermedades infecciosas han sido una constante a lo largo de la historia de la humanidad, atribuidas a la abundante presencia de bacterias y virus, pues han planteado un desafío perenne para la salud pública debido a su capacidad intrínseca para evolucionar, adaptarse y desarrollar resistencia frente a los avances médicos. Patologías como la Gripe, el Zika y el foco principal de estudio en esta investigación, la COVID-19, muestran una notable versatilidad en sus modos de transmisión, presentando un potencial epidemiológico significativo que puede desencadenar pandemias y ocasionar un impacto devastador a nivel global en términos de mortalidad.

Específicamente, la COVID-19 se presenta como una enfermedad infecciosa ocasionada por el virus SARS-CoV-2, miembro de la familia Coronaviridae, manifestando una amplia gama de síntomas. Desde su rápida expansión a nivel mundial, llevó a la Organización Mundial de la Salud (OMS)[1] a declarar una emergencia de salud pública el 30 de enero de 2020. Pasaron solo unos meses antes de que se la reconociera como una pandemia global, el 11 de marzo del mismo año. En lo que respecta a los efectos de la COVID-19, aunque una proporción de pacientes experimenta síntomas más graves que requieren intervención médica, esto es especialmente relevante en el caso de personas mayores o aquellos con condiciones médicas preexistentes.

Por esta razón, varios gobiernos a nivel mundial adoptaron medidas que consideraron apropiadas para hacer frente a la pandemia. A nivel internacional, se establecieron controles fronterizos para regular la entrada y salida de personas del país, lo que conllevó diversas restricciones en los viajes aéreos. A nivel local, la mayoría de las instituciones públicas, incluyendo universidades, escuelas y sistemas de transporte público, fueron cerradas, y se implementaron medidas de cuarentena con restricciones horarias para la mayor parte de la población.

Como se ha señalado previamente, la expansión de la COVID-19 en distintas naciones comienza a nivel internacional, con la llegada de individuos infectados procedentes de otros países. Estos casos de contagio internacional tienen lugar principalmente en los aeropuertos, los cuales representan los principales nodos de transporte para traspasar fronteras a nivel global. En consecuencia, una gestión efectiva del control de los viajes aéreos resulta crucial para mitigar la propagación del virus y disminuir los posibles impactos en el país.

Además de los aeropuertos, los aviones, como parte del transporte aéreo, también desempeñan un papel de suma importancia. En estos medios de transporte, ocurre algo aún más significativo debido a su naturaleza de rapidez y accesibilidad económica, y en el contexto de un mundo altamente interconectado en el que vive la población actualmente, el control del flujo de pasajeros resulta desafiante. Con un solo vuelo, una persona infectada puede recorrer largas distancias y potencialmente propagar el virus a una parte de la población en el destino. Por lo tanto, es posible alcanzar varios países en un período de tiempo muy corto mediante vuelos, lo que incrementa la rapidez con la que puede extenderse la enfermedad.

Por ende, como medida drástica que todos los países se vieron obligados a implementar, surgieron soluciones como la cuarentena, el uso de mascarillas y, especialmente, el distanciamiento social.

Si bien la cuarentena funciona como una intervención restrictiva para mitigar la propagación del virus en términos de transporte y movimiento de personas, puede agravar la situación social. No obstante, para el propósito de esta investigación, el distanciamiento social demuestra una importancia crucial.

Debido a esta razón, la comprensión de la probabilidad asociada a cada factor resulta fundamental para evaluar el riesgo de transmisión. Aspectos como el patrón de flujo de aire en el interior de la cabina del avión, la distancia entre los pasajeros, la duración de la exposición a individuos potencialmente infectados y la eficacia de los sistemas de ventilación desempeñan un papel crucial en la determinación de la probabilidad de transmisión.

Adicionalmente, factores como la densidad de pasajeros, la observancia de las medidas preventivas y la presencia de portadores asintomáticos contribuyen significativamente a la probabilidad de contagio. Al cuantificar estas probabilidades y evaluar su efecto acumulativo, los investigadores pueden elaborar metodologías para anticipar la dinámica de transmisión y analizar la eficacia de diversas estrategias de mitigación.

1.2. Motivaciones y Objetivos

1.2.1. Motivaciones

La motivación de este Trabajo Fin de Grado (TFG) nace de la necesidad de comprender y gestionar los riesgos asociados a la propagación de enfermedades infecciosas en cabinas de avión. Esto es especialmente relevante en situaciones donde existe una alta densidad de personas en espacios cerrados y en constante movimiento, como ocurre en los vuelos comerciales.

Con la pandemia de la COVID-19 la importancia de analizar y mejorar las medidas de prevención en el transporte aéreo se ha vuelto más que evidente. Entender cómo se propaga el contagio en los aviones es crucial no solo para proteger la salud pública, sino también para garantizar la seguridad de los pasajeros y la tripulación.

1.2.2. Definición de Objetivos

En este Trabajo Fin de Grado se llevará a cabo una investigación exhaustiva sobre diversos factores de riesgo y medidas predominantes asociadas al contagio en entornos aeronáuticos, con especial énfasis en los aviones. Asimismo, se analizará la probabilidad de que un pasajero contraiga una enfermedad infecciosa en función de los factores identificados.

El propósito de este estudio es ofrecer un análisis detallado sobre la efectividad de diversas medidas preventivas, tales como los sistemas de ventilación, la disposición de los asientos y el comportamiento de los pasajeros, con el objetivo de reducir el riesgo de contagio durante los viajes aéreos.

Para alcanzar el objetivo principal, se han definido los siguientes sub-objetivos que guiarán la investigación:

- Realización de un estudio inicial para familiarizarse con el tema y establecer un contexto sólido.
- Evaluación exhaustiva de las metodologías más recientes relacionadas con la probabilidad de contagio en un avión.
- Evaluación mediante la comparación de las existentes entre sí, seguida de su implementación para evaluar el riesgo de contagio en vuelos comerciales.
- Aplicación probabilística de las soluciones identificadas, abordando problemas específicos del transporte aéreo en base a los datos obtenidos.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este apartado, se llevará a cabo un análisis del estudio realizado en cabinas de aviones en las cuales ha podido existir un riesgo de contagio. Aunque se mencionan distintas pandemias en el Capítulo 1, el análisis se centrará el estudio en el COVID-19. Además, se busca una mayor precisión al limitar el enfoque a un avión en lugar de considerar toda el área del aeropuerto.

La propagación de virus en aviones, concretamente dentro de las cabinas de los mismos, y considerando que es uno de los transportes más utilizados, ha generado una masiva cantidad de publicaciones por parte de investigadores pertenecientes al campo. Esta investigación ha intentado englobar toda la información mediante un estudio exhaustivo que recopila artículos que abordan el objetivo del estudio desde diversas perspectivas.

La mayoría de las publicaciones tratan de aplicar los conocidos modelos SIR (*Susceptible infectious recovered*), así como distintas variantes tales como ASIRS (*Airport based susceptible infected recovered susceptible*). Sin embargo, estos modelos presentan un inconveniente, debido a que su enfoque se centra únicamente en poblaciones cerradas.

Esta sección también abarcará otros artículos que se centran en modelos estadísticos y matemáticos basados en la probabilidad de contraer COVID-19 dentro de las cabinas de los aviones. En lugar de enfocarse en poblaciones cerradas, como lo hacen los modelos SIR y sus variantes, estos análisis profundizan en la comprensión de factores específicos dentro de las cabinas de aviones. Estos factores, que se discutirán más adelante, pueden incluir la distancia entre pasajeros, el número de asientos en las filas de aviones, y el flujo del aire.

2.1. Introducción a la COVID-19 y virus existentes

2.1.1. COVID-19

La pandemia COVID-19, más conocida por su virus como SARS-CoV-2, es un virus que se manifiesta como una enfermedad infecciosa, con una amplia gama de síntomas. Aunque la mayoría de las personas infectadas experimentan síntomas leves a moderados y se recuperan sin necesidad de tratamiento especial, una proporción enfrenta consecuencias más graves que requieren atención médica, especialmente aquellos que son mayores o tienen condiciones médicas preexistentes.

La transmisión del virus, principalmente a través de diminutas partículas líquidas liberadas por una persona infectada al toser, estornudar, hablar o respirar, resalta la importancia de adoptar buenas prácticas respiratorias y de considerar el autoaislamiento en caso de síntomas. La disponibilidad de la vacunación se presenta como una herramienta en la lucha contra la COVID-19, complementando las medidas preventivas previamente establecidas.

Uno de los principales medios de propagación a gran escala es a través de los aeropuertos y el transporte internacional que estos facilitan. Dado que los aeropuertos están distribuidos por todo el mundo, desde grandes metrópolis hasta pequeñas ciudades, permiten no solo el movimiento masivo de personas, sino también el desplazamiento rápido de un punto del planeta a otro en cuestión de horas. Esta característica ha permitido que el virus se disemine de un país a otro en un periodo muy corto, lo que ha ampliado su alcance de manera significativa.

Se realizó un estudio [2] utilizando el modelo SEIR (*Susceptible exposed infectious recovered*), para prever el alcance internacional de la pandemia de la COVID-19, partiendo de su origen en Wuhan, China. El SEIR considera a individuos potencialmente infectados que han estado en contacto con una persona infectada, y lograron estimar la cantidad aproximada de personas que podrían estar infectadas en Wuhan y otras provincias de China.

Otro estudio [3] se centró en la estimación de la escala potencial de la pandemia en Estados Unidos, centrándose en casos importados directamente desde Wuhan. Emplearon el mismo modelo SEIR con una ligera modificación en la formulación, utilizando la distribución de Poisson para aproximar los posibles contagios causados por los infectados en un momento dado. Sus resultados sugirieron que Estados Unidos podría experimentar un gran número de casos si no se aplicaban medidas sanitarias más estrictas.

Se llevó a cabo otro estudio [4] sobre la propagación por importación en Irlanda. Analizaron casos específicos de pasajeros de vuelos internacionales que dieron positivo por SARS-CoV-2 y causaron contagios en varias regiones de Irlanda en los días siguientes al vuelo, tal y como se puede ver en uno de sus aviones en la *Figura 2.1*.

Dada la rápida expansión de la enfermedad y la facilidad de contagio en los vuelos y aeropuertos, el estudio recomendó controles aeroportuarios más estrictos y seguimientos de las personas infectadas.

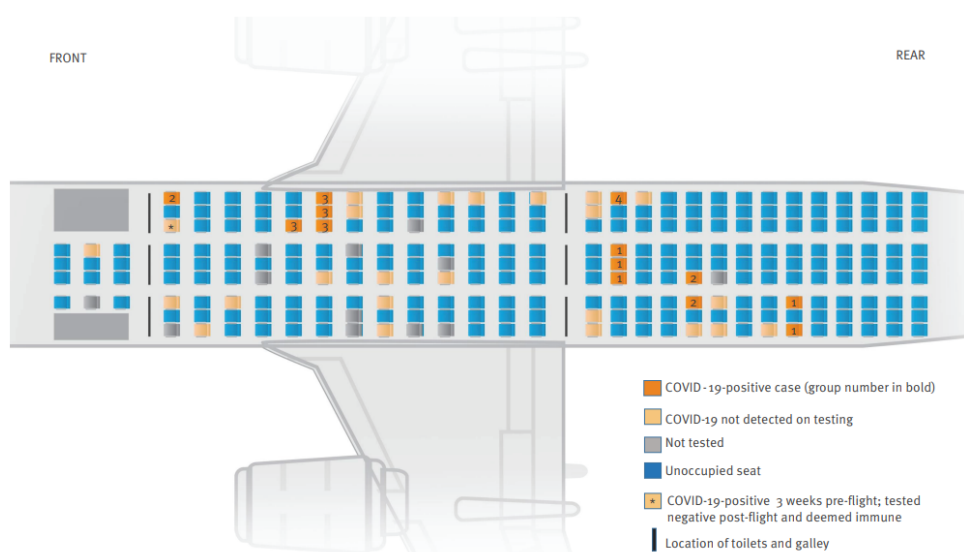


Figura 2.1: Avión con Contagios en Irlanda [4]

Otro análisis [5] se centró en los patrones en el transporte aéreo para determinar su capacidad predictiva respecto al impacto mundial de la enfermedad de la COVID-19. Partieron de la hipótesis de que todos los pasajeros salientes de la provincia de Hubei tenían la misma probabilidad de estar infectados, independientemente de su destino final.

Utilizaron datos aéreos para calcular el flujo de pasajeros a los posibles destinos y desarrollaron un modelo para hacer predicciones. En general, el estudio destacó la importancia de los patrones en el transporte aéreo como una alerta temprana del riesgo de propagación.

2.1.2. Otros virus

La red de transporte aéreo ha desempeñado un papel crucial en la propagación de diversas enfermedades a lo largo del tiempo, incluyendo la gripe y otras patologías anteriores a la COVID-19.

La propagación de virus y bacterias plantea preocupaciones significativas para la seguridad global. El aire puede ser expulsado a velocidades superiores a 100 MPH, liberando hasta 100,000 bacterias en el aire. Estas partículas se mezclan con gotas de agua de diferentes tamaños, y se estima que hasta 40,000 gotas pueden ser expulsadas, viajando distancias de hasta 3 metros. Los estornudos pueden ser causados por la entrada de contaminantes en la mucosa nasal o por infecciones virales.

Los virus, bacterias y aerosoles que los transportan vienen en una variedad de tamaños. Las bacterias suelen tener un tamaño de entre 0.1 y 0.5 micrones, mientras que los virus varían entre 0.002 y 0.4 micrones [6]. Algunos ejemplos incluyen el virus de la influenza con aproximadamente 0.1 micrones y las bacterias causantes de neumonía con un tamaño promedio de 0.25 micrones. Los virus del sarampión, la gripe y la varicela tienen diámetros de aproximadamente 0.12, 0.22 y 0.3 micrones, respectivamente. Dada esta diversidad de tamaños, es crucial estudiar la distribución de contaminantes de varios tamaños.

2.1. Introducción a la COVID-19 y virus existentes

Se dirige la atención hacia el virus de la Gripe, que constituye una afección común a nivel mundial [7]. Esta enfermedad se propaga fácilmente a través de la tos o el estornudo, manifestándose con síntomas como fiebre repentina, tos, dolor de garganta y fatiga. La vacunación es la medida más efectiva para prevenir la enfermedad, y el tratamiento se enfoca en aliviar los síntomas mediante reposo y una adecuada ingesta de líquidos. La mayoría de las personas se recuperan en una semana.

Un estudio [8] examinó la propagación de la gripe en Estados Unidos durante un período de nueve años, centrándose en un pico tardío que ocurrió después de los eventos del 11 de septiembre de 2001. Se planteó la hipótesis de que las restricciones en el transporte aéreo habían contribuido a este efecto, sugiriendo que el aumento de la movilidad había influido en el patrón de propagación de la enfermedad.

Sin embargo, investigaciones posteriores [9] cuestionaron la robustez de esta hipótesis, señalando que el análisis realizado durante un período de tiempo más largo reveló otros picos tardíos en décadas anteriores, lo que sugiere que otros factores además de las restricciones en el transporte aéreo podrían haber influido en la propagación de la enfermedad. Aunque el estudio inicial fue innovador [8], la evidencia disponible no fue suficiente para evaluar plenamente el impacto de las restricciones en el transporte aéreo en la propagación de la gripe.

Se llevó a cabo un estudio [10] que presentó un modelo llamado GLEaM (*GLobal Epidemic and Mobility*) diseñado para simular la propagación de epidemias y predecir contagios y mortalidad. Este modelo se compone de tres capas que permiten analizar la movilidad humana y las dinámicas de las enfermedades:

1. Capa de población: Esta capa representa el número de personas en cada área geográfica, dividiendo la superficie mundial en celdas con una estimación de la población asignada a cada una. Además, se designan subpoblaciones alrededor de los aeropuertos para representar sus áreas de influencia.
2. Capa de movilidad: Aquí se modelan los flujos de movimiento de la población, separándose entre la red aérea internacional y la red de transporte a nivel nacional.
3. Capa epidémica: Esta capa representa las dinámicas de las enfermedades, incluyendo el proceso de contagio, generación de nuevas infecciones, recuperaciones, muertes, entre otros aspectos.

La eficacia del modelo se validó mediante una simulación del brote de gripe ocurrido entre 2001 y 2002. Utilizando el modelo SLIR (*Susceptible latent infected recovered*), similar al modelo SEIR previamente discutido, se representó la población latente como aquellos expuestos al virus. Durante la simulación, se movilizaron los pasajeros desde sus lugares de origen hasta sus destinos, definiendo los índices de transición entre los distintos estados. Los resultados obtenidos coincidieron estrechamente con los datos reales, demostrando la capacidad predictiva del modelo para la gripe y su aplicabilidad potencial en otras epidemias.

El crecimiento acelerado del transporte aéreo internacional desde el año 2000 ha sido identificado como un factor crucial en la propagación global de diversas enfermedades infecciosas. Este aumento en la movilidad ha facilitado la expansión de enfermedades regionales a nivel mundial, impulsando la necesidad de una mayor coordinación y comunicación global para enfrentar pandemias.

2.2. Modelos Matemáticos que estudian la transmisión

2.2.1. Introducción al modelo SIR

El modelo *SIR*, el cual fue ideado por Kermack y McKendrick [11] en el siglo veinte, emerge como una herramienta esencial en la comprensión de la propagación de enfermedades infecciosas de transmisión directa. Su fundamento radica en un sistema de tres ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, las cuales posibilitan la realización de cálculos para extraer datos de gran valor.

Estos modelos fragmentan la población en tres distintos compartimentos o grupos: Susceptibles, Infectados y Recuperados. Los tamaños relativos de estos compartimentos se representan como funciones del tiempo t , identificadas como $S(t)$, $I(t)$ y $R(t)$, respectivamente.

Uno de los pilares fundamentales del modelo es la hipótesis de mezcla de acción de masas, la cual postula que la tasa de interacción entre individuos infectados y susceptibles es directamente proporcional al producto de sus respectivos tamaños de población. En otras palabras, si el tamaño de cualquiera de los grupos se duplica, se esperaría una duplicación en el número de nuevas infecciones. Esta suposición encuentra justificación en el hecho de que la mayoría de los individuos en una comunidad mantienen un número limitado de contactos cercanos, como familiares, compañeros de trabajo o de clase.

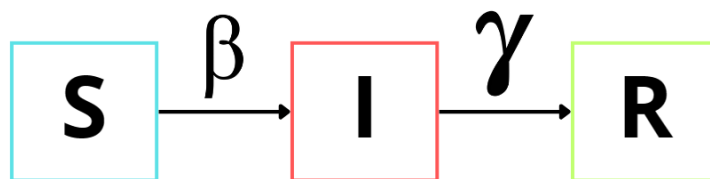


Figura 2.2: Diagrama del modelo SIR

El modelo *SIR* puede definirse mediante el siguiente sistema:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t). \quad (2.1)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t). \quad (2.2)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t). \quad (2.3)$$

Donde β y γ son parámetros que denotan las tasas de transmisión y recuperación. Adicionalmente, la suma de estas cantidades debe ser igual al número total de individuos dentro del grupo en estudio.

$$N = S + I + R. \quad (2.4)$$

2.2. Modelos Matemáticos que estudian la transmisión

El sistema presentado incorpora dos parámetros:

1. El parámetro β , que siempre es mayor que cero, denota la velocidad de transmisión. β puede expresarse como el producto de κ , que representa los contactos para la transmisión por unidad de tiempo, y de τ , que indica el índice de transmisión de la enfermedad infecciosa. La Ecuación viene dividida por N . Esto se representa como:

$$\beta = \frac{\kappa\tau}{N}. \quad (2.5)$$

2. Por otro lado, γ , que también debe ser mayor que cero, representa la tasa de recuperación de una enfermedad infecciosa específica. Con esta información, la duración media de la contagio D se puede simplificar como:

$$D = \frac{1}{\gamma}. \quad (2.6)$$

Además, existe el principio del umbral epidémico, el cual establece la existencia de un valor crítico, conocido como el número reproductivo efectivo R_e , que determina si una enfermedad se extinguirá rápidamente o se propagará y dará lugar a una pandemia:

$$R_e = \frac{S(0)}{N} \frac{\kappa\tau}{\gamma}. \quad (2.7)$$

Por otro lado, el número reproductivo básico R_0 , representa la cantidad promedio de individuos secundariamente infectados generados por un individuo primariamente infectado. Estos coeficientes pueden calcularse de la siguiente manera:

$$R_0 = \frac{\kappa\tau}{\gamma}. \quad (2.8)$$

Combinando ambas ecuaciones, se obtiene:

$$R_e = \frac{S(0)}{N} R_0. \quad (2.9)$$

El número de reproducción efectivo, R_e , puede concebirse como la medida de nuevas infecciones que un individuo infectado puede generar al inicio de un brote. Es decir, si un individuo infectado inicialmente contagia a X individuos susceptibles, y cada uno de estos a su vez infecta a otros Y susceptibles, es probable que la propagación de las infecciones sea exponencial.

Debido a la COVID-19, el objetivo será reducir R_e a menos de uno, disminuyendo la duración del contagio de la enfermedad, D , bajando la tasa de contacto, κ , mediante medidas como la restricción del número máximo de personas en espacios cerrados, reduciendo la transmisibilidad, τ , lo cual puede lograrse mediante acciones más simples como el uso de mascarillas, la higiene de manos con desinfectante o la ventilación constante de espacios cerrados, y menguando $S(0)$, lo cual solo será posible mediante la vacunación.

Estado del Arte

Además, se puede obtener el número máximo de individuos infectados utilizando la fórmula I_{\max} . Al dividir la Ecuación 2.2 entre la Ecuación 2.1, y siendo $p = \frac{\beta}{\gamma}$, la tasa de transmisión entre la tasa de recuperación, se obtiene la siguiente Ecuación:

$$\frac{dI(t)}{dS(t)} = \frac{-\gamma S(t)I(t) - \beta I(t)}{\gamma S(t)I(t)} = -1 + \frac{p}{S}. \quad (2.10)$$

Al reorganizar lo anterior se puede hallar I_{\max} :

$$I_{\max} = I_0 + S_0 + p \ln p - p - p \ln S_0 = N - p - p \ln \left(\frac{p}{S_0} \right). \quad (2.11)$$

También se puede hallar el número máximo de personas susceptibles siguiendo el mismo proceso que anteriormente, pero la división se debe hacer de la siguiente manera [12]:

$$\frac{dS(t)}{dR(t)} = -\frac{\gamma}{\beta} = -\frac{1}{p}, \quad (2.12)$$

$$\ln S = -\frac{R}{p}. \quad (2.13)$$

Para obtener el número deseado, se debe calcular S cuando el tiempo tiende a infinito, ya que $I(t)$ tenderá a 0.

$$S(\infty) = S_0 \exp \left(-\frac{R(\infty)}{p} \right) = S_0 \exp \left(\frac{-(N - S(\infty))}{p} \right), \quad (2.14)$$

$$I_{\text{total}} = I_0 + S_0 - S(\infty). \quad (2.15)$$

Este modelo matemático puede proporcionar una gran cantidad de información que no se puede deducir directamente de los datos, lo que lo convierte en una base sólida para el estudio de la propagación de enfermedades, la planificación de contingencias, y las medidas de seguridad, entre otros aspectos.

2.2.2. El modelo SIR para calcular el riesgo de contagio

El objetivo radica en analizar el tráfico aéreo para anticipar dónde y en qué medida puede propagarse una epidemia [13]. Con este fin, se introduce un nuevo parámetro denominado el *Riesgo Importado*, que permite examinar este riesgo epidémico. Es decir, se evalúa el riesgo asociado a las personas infectadas que llegan a otro aeropuerto desde cualquiera de las conexiones de la red aérea.

Para realizar estas predicciones, se requiere considerar una serie de factores interrelacionados, entre los cuales se incluyen:

- El número de pasajeros diarios que transitan por un aeropuerto.
- La duración de los vuelos que parten y llegan a dicho aeropuerto.
- El modelo del avión utilizado y su capacidad.
- El estado epidemiológico del área de influencia de los aeropuertos involucrados.

Estos factores son de vital importancia para recopilar la mayor cantidad de información relevante posible. Sin embargo, es importante destacar que esta aproximación suele ser efectiva principalmente en las etapas iniciales de una pandemia.

El riesgo diario importado, referido como $Risk_j$ en un aeropuerto j , se obtiene sumando el riesgo aportado por cada vuelo k desde cualquier aeropuerto i a j , siendo su riesgo $Risk_{ijk}$. El riesgo de un vuelo depende de la situación epidémica del área de influencia de su aeropuerto de origen, la duración del vuelo y el riesgo de contagio dentro del avión basado en la disposición de los pasajeros. Esto se representa mediante la siguiente fórmula:

$$Risk_j = \sum_{i \in A_j} \sum_{k \in V_{ij}} Risk_{ijk}. \quad (2.16)$$

considerando A_j como el conjunto de aeropuertos que tienen vuelos directos al aeropuerto j y V_{ij} como todos los vuelos que van desde el aeropuerto i al aeropuerto j .

El riesgo inicial de un vuelo en su momento de partida se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_{ijk}(0) = n_{ijk} \frac{S_i(0)}{h_i}, \quad (2.17)$$

$$I_{ijk}(0) = n_{ijk} \frac{I_i(0)}{h_i}, \quad (2.18)$$

$$R_{ijk}(0) = n_{ijk} \frac{R_i(0)}{h_i}, \quad (2.19)$$

donde n es el número de personas sobre las cuales se realiza el cálculo y h es el número de personas que habitan la zona de influencia.

Se calcula el número de infectados en la zona durante los últimos 7 días [14]. Este valor se multiplica por diez debido a la falta de precisión en los datos al inicio de una pandemia [15]. Luego, se considera solo el 75% de este número, teniendo en cuenta la proporción de asintomáticos y su menor capacidad de transmisión.

Finalmente, se divide este valor por la mitad para reflejar la probabilidad reducida de transmisión entre viajeros en comparación con la población general [16].

Teniendo todos estos elementos en cuenta, la función de riesgo permanece como :

$$I_{ijk}(0) = n_{ijk} \frac{10 \times \frac{3}{4} \times \frac{1}{2} I_i(0)}{h_i} = 3.75 n_{ijk} \frac{I_i(0)}{h_i}. \quad (2.20)$$

La Ecuación 2.20 permite calcular el riesgo final de un vuelo específico con destino a un aeropuerto determinado. Se introduce un parámetro temporal que representa la duración del vuelo en minutos. Para estimar la cantidad de nuevos susceptibles, infectados y recuperados durante cada minuto del vuelo, se utilizan los coeficientes de transmisión β y de recuperación γ . Estos coeficientes son fundamentales para modelar la dinámica de transmisión, lo que conduce a la obtención de nuevas ecuaciones.

$$S_{ijk}(t+1) = S_{ijk}(t) - \beta S_{ijk}(t) \frac{I_{ijk}(t)}{n_{ijk}}, \quad (2.21)$$

$$I_{ijk}(t+1) = I_{ijk}(t) + \beta S_{ijk}(t) \frac{I_{ijk}(t)}{n_{ijk}} - \gamma I_{ijk}(t), \quad (2.22)$$

$$R_{ijk}(t+1) = R_{ijk}(t) + \gamma I_{ijk}(t) \quad (2.23)$$

Siendo $S_{ijk}(t)$ los individuos susceptibles, $I_{ijk}(t)$ los individuos infectados y $R_{ijk}(t)$ los individuos recuperados en el minuto t . La duración total del vuelo se representa en minutos como m_{ijk} , por lo tanto, el riesgo que llega a un aeropuerto j desde un aeropuerto i mediante un vuelo k se calcula como:

$$Risk_{ijk} = I_{ijk}(m_{ijk}). \quad (2.24)$$

Asimismo, el riesgo total en un día en concreto se mide mediante:

$$Risk_j = \sum_{i \in A_j} \sum_{k \in V_{ij}} I_{ijk}(m_{ijk}). \quad (2.25)$$

Dado que este estudio se centra principalmente en el COVID-19, se utiliza un valor de

$$\gamma = \frac{1}{D} = \frac{1}{9}, \quad (2.26)$$

donde D representa el número de días que tarda una persona promedio en recuperarse de la COVID, en este caso 9.

Se estima que el índice de transmisión se reduce en un 82% [13], cuando todos los pasajeros usan mascarillas durante el vuelo, lo que se traduce en un valor de $P_M = 0.18$.

2.2. Modelos Matemáticos que estudian la transmisión

Dentro del avión, un aspecto es el fallo de protección de las mascarillas, que se clasifica en dos situaciones.

1. Avión Completo (FP): Cuando el avión está completo. En este caso, el riesgo de transmisión se calcula como la suma del riesgo aportado por los cinco pasajeros ubicados en la misma fila que el pasajero susceptible, más los seis pasajeros en las filas delanteras y traseras. Es decir, este cálculo es específico para aviones con un determinado número de sillas por fila, en este caso 6. Este riesgo es el $1/4$ del riesgo de los pasajeros en la misma fila [16].
2. Asiento del medio vacío (EMS): Cuando el avión está lleno pero el asiento del medio se mantiene vacío por razones de seguridad. En este caso, el riesgo de transmisión para los pasajeros en las filas delanteras y traseras es el $2/3$ del riesgo de transmisión de los mismos pasajeros en el caso de un avión completo [16].

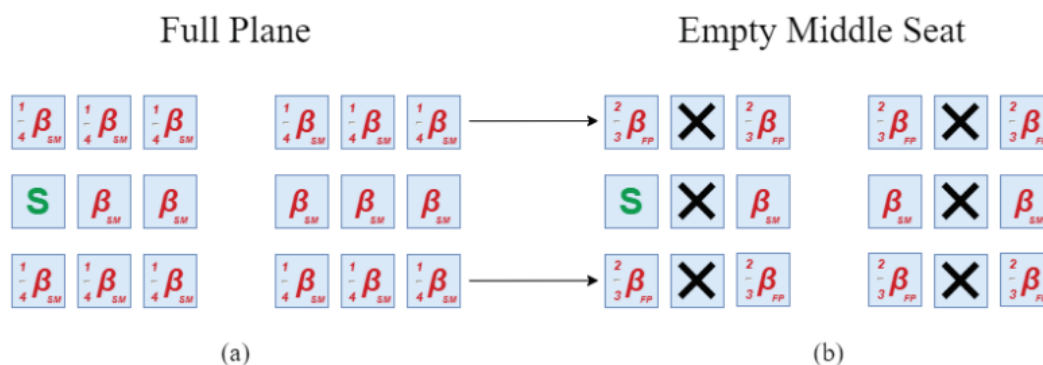


Figura 2.3: Riesgo de Contagio de los Pasajeros [16]

De esta manera, la probabilidad de que una persona infectada contagie a una persona susceptible con el avión completo es:

$$P_L(FP) = \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) P_L(FP, \text{en la misma fila}) = 0.402, \quad (2.27)$$

$$P_L(EMS) = P_L(EMS, \text{en la misma fila}) + \frac{2}{3} P_L(FP, \text{en la misma fila}) = 0.224. \quad (2.28)$$

Donde $\beta = PS$, P representa la probabilidad de que un contacto sea contagioso y S es el número medio de relaciones que tiene un individuo, se puede obtener la función final de β utilizando los posibles valores de P mencionados anteriormente. Esta función se expresa como:

$$\beta = PS = PLPMS = \begin{cases} 0.253 = 0.402 \times 0.18 \times 3.5, FP \\ 0.081 = 0.224 \times 0.18 \times 2, EMS \end{cases} \quad (2.29)$$

Donde $3.5 = 2 + \frac{1}{4} \times 6$ se refiere a los 2 pasajeros que se encuentran en la misma fila y los 3 que se encuentran en las filas delantera y trasera del individuo susceptible, y $2 = 1 + \frac{1}{4} \times 4$ se refiere a 1 pasajero de la misma fila y 2 en las filas delantera y trasera.

2.2.3. Variación del modelo SIR

2.2.3.1. El modelo ASIRS

En una red de aeropuertos, los retrasos originales pueden originarse por diversos factores, como la reducción de capacidad, fallos en el equipo del aeropuerto y condiciones climáticas extremas. Estos retrasos se propagan a través de vuelos compartidos, transitando de vuelos salientes en los aeropuertos de origen a vuelos entrantes en los aeropuertos de destino. En este contexto, los aeropuertos pueden clasificarse en tres estados: susceptibles, representando aquellos propensos a sufrir retrasos; infectados, donde los retrasos se están propagando activamente; y recuperados, donde los retrasos han sido resueltos.

Históricamente, la propagación de los retrasos en los aeropuertos se ha representado a través de gráficos, donde los nodos representan los aeropuertos y las aristas indican su conectividad. Cuando ocurre un retraso en un aeropuerto, puede resultar en mayores retrasos en los aeropuertos conectados debido a la propagación del retraso.

Además, los retrasos en los aeropuertos afectados pueden disiparse durante operaciones posteriores y dejar de estar influenciados por el retraso inicial. No obstante, estos aeropuertos siguen siendo susceptibles a retrasos de otras fuentes en el futuro. Dada la complejidad de las redes de aeropuertos, la evolución de los retrasos dentro de estas presenta características similares a la propagación en redes complejas [17].

Del análisis previo, se puede observar que el mecanismo de propagación del modelo SIRS guarda similitudes con las características de la propagación de retrasos en los aeropuertos [18]. Consideremos un escenario en el que existen tres tipos de aeropuertos en la red en un momento dado t :

- Aeropuertos sin retrasos (S), que son susceptibles de sufrir retrasos.
- Aeropuertos con retrasos (I), que actualmente experimentan retrasos.
- Aeropuertos recuperados (R), que previamente estaban afectados por retrasos pero han vuelto a operar con normalidad. Los aeropuertos recuperados solo están inmunizados contra la actual propagación de retrasos y pueden volver a ser susceptibles en el futuro.

Al aplicar el proceso a todos los vuelos, los aeropuertos se ven influenciados por la probabilidad. La dinámica del modelo ASIRS se puede representar de la siguiente manera:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) + \alpha R(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) - \alpha R(t), \\ S(t) + I(t) + R(t) = 1, \end{array} \right. \quad (2.30)$$

2.2. Modelos Matemáticos que estudian la transmisión

donde:

- $S(t)$ representa la proporción de aeropuertos susceptibles,
- $I(t)$ representa la proporción de aeropuertos retrasados,
- $R(t)$ representa la proporción de aeropuertos recuperados,
- β es la tasa de contagio,
- γ es la tasa de recuperación,
- α es la tasa a la que los aeropuertos recuperados pierden inmunidad.

Se supone que en el momento inicial t_0 , las proporciones de aeropuertos infectados, susceptibles y recuperados se denotan como I_0 (donde $I_0 > 0$), S_0 (donde $S_0 > 0$), y R_0 (donde $R_0 \geq 0$), respectivamente. Luego, las ecuaciones que describen la dinámica se dan de la siguiente manera:

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \beta I(t), \quad \text{con } I(0) = I_0, \quad (2.31)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t), \quad \text{con } S(0) = S_0. \quad (2.32)$$

Después de un análisis en profundidad, se concluyen los siguientes factores:

1. Si $\beta S(t) = \gamma$, $I(t)$ alcanza su valor máximo, lo que significa la situación de retraso más grave en la red de aeropuertos. Este equilibrio entre la tasa de contagio y la tasa de recuperación da como resultado la propagación máxima del retraso.
2. Cuando $\beta S(t) < \gamma$, la proporción de infectados $I(t)$ aumenta con el tiempo, lo que indica que el retraso en el aeropuerto se extiende a más aeropuertos.
3. Por el contrario, cuando $\beta S(t) > \gamma$, $I(t)$ disminuye, lo que lleva a un alivio de la situación de retrasos en la red de aeropuertos. En este caso, el retraso del aeropuerto no se propaga a otros aeropuertos.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

2.3.1. Ecuaciones de Wells - Riley

2.3.1.1. Contexto Histórico y estudios hasta la fecha

La teoría propuesta por Wells en 1955 [19] sugiere que los patógenos se transmiten en cantidades discretas, definiendo un *quantum* como la cantidad mínima necesaria para causar enfermedad al 63% aproximadamente de los individuos expuestos. La información relativa a la carga viral, expresada en términos de *quanta*, resulta crucial, pues el *quantum* representa la cantidad de virus considerada. En resumen, una persona infectada produce de manera continua una serie de *quanta* infecciosos a lo largo del tiempo [20]. Riley y sus colaboradores determinaron una tasa de emisión de 1.5 *quanta*/s a partir de los datos recopilados durante un brote de sarampión en una escuela en 1974 [21]. Supusieron que el aire estaba bien mezclado en las habitaciones, es decir, las partículas, incluidos los patógenos, se dispersaban homogéneamente por todo el espacio, lo que resultó en una distribución uniforme de patógenos después de la emisión, modelo conocido como *Wells – Riley*.

Varios estudios utilizan este modelo para estimar el riesgo de contagio por SARS-CoV-2. Por ejemplo, Sun y Zhai aplicaron el modelo para inferir una tasa de emisión de 0.238 *quanta*/s basándose en un caso de transmisión detectado en un autobús en Hunan, China [22]. Además, Buonanno et al. utilizaron un método derivado para estimar la tasa de emisión cuántica de las infecciones por SARS-CoV-2, sustituyendo valores desconocidos por valores conocidos correspondientes al SARS-CoV-1. Esto resultó en tasas de emisión que oscilaban entre menos de 1 *quanta*/h y más de 100 *quanta*/h [20].

Paralelamente, se ha prestado una mayor atención al confort de los pasajeros y a la calidad del aire en todos los modos de transporte. En consecuencia, en los últimos años se han llevado a cabo numerosas simulaciones utilizando dinámica de fluidos computacional, mejor conocido como *CFD*, para analizar los sistemas de ventilación en diversos medios de transporte público, como autobuses [23], trenes [24] y aviones, con el objetivo de evaluar y mejorar el confort térmico y la calidad del aire.

En un estudio reciente [25], You y otros investigadores utilizaron técnicas de *CFD* para prever la dispersión de contaminantes y calcular retrospectivamente la tasa de emisión cuántica durante un incidente de superpropagación del SARS-CoV-1 en la cabina de un avión Boeing 737, que resultó en varias infecciones secundarias. Este estudio identificó con precisión la ubicación de los asientos tanto de la persona índice como de los individuos infectados. Sin embargo, la determinación de la tasa de emisión generalmente se basa en el supuesto de Riley y colaboradores, ya que a menudo no se disponen de datos precisos sobre las condiciones límite en el momento de la contagio.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

2.3.1.2. Propagación en cabinas de avión y métodos empleados

El aire en la cabina de un avión está regulado por un sistema de control ambiental, mejor conocido como *ECS*, para garantizar la seguridad y comodidad de los pasajeros. La mayoría de los aviones de pasajeros con sistemas *ECS* utilizan una mezcla de 50% de aire exterior y 50% de aire recirculado filtrado. Los contaminantes pueden originarse en el aire exterior, dentro del *ECS* o en la propia aeronave.

Para estimar el riesgo de enfermedades respiratorias infecciosas, se utilizan comúnmente los métodos conocidos como Wells-Riley y Dosis-Respuesta. El enfoque *WR* se centra únicamente en la transmisión aérea desde una única fuente, mientras que el método *DR* considera rutas de transmisión adicionales y factores como la intensidad de la fuente y la cantidad de patógenos. Varios factores influyen en la transmisión aérea de patógenos, incluida la dispersión en ambientes interiores, el tamaño del aerosol, la deposición respiratoria, la turbulencia del aire, las medidas de control, la estrategia de ventilación, las interacciones patógeno-huésped y la supervivencia de los patógenos.

La Ecuación *WR* 2.33, la cual es utilizada para evaluar la probabilidad de contagio al cuantificar la dosis de patógenos inhalados en términos de *quanta*, se fundamenta en el supuesto de una concentración estacionaria de partículas infecciosas, que varía con la tasa de ventilación en una habitación uniformemente mezclada.

Se expresa de la manera:

$$\frac{I}{N} = (1 - e^{-\frac{I_0 q_n Q_B t}{Q_T}}). \quad (2.33)$$

En esta Ecuación, I representa el número de casos infecciosos, N denota el tamaño de la población, I_0 es el número inicial de infectados, q_n indica la tasa de generación de *quanta*, t representa el tiempo de exposición, y Q_B y Q_T son las tasas de ventilación de la persona y de la habitación, respectivamente.

Al reorganizar la Ecuación para resolver q_n , se obtiene:

$$q_n = -\frac{Q_T \ln(1 - \frac{I}{N})}{I_0 Q_B t}. \quad (2.34)$$

2.3.1.3. Boeing 737-600

En esta sección se analiza el caso específico del Boeing 737-600.

La *Figura 2.4* proporciona una representación visual del diseño de la cabina.

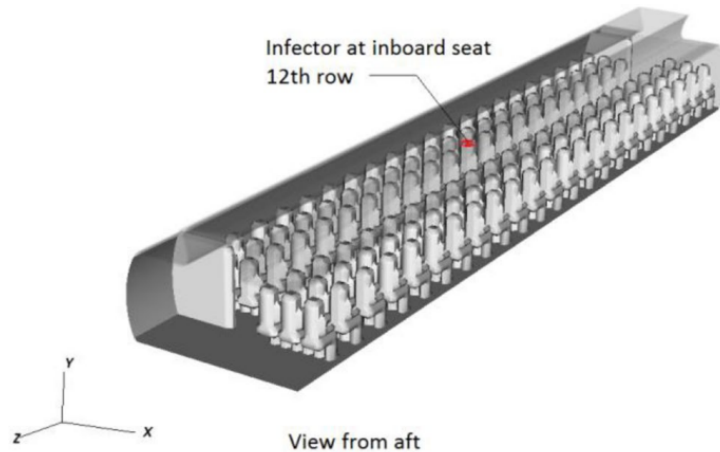


Figura 2.4: Cabina con Infectado en la Duodécima Fila [6]

La *Figura 2.5* proporciona una visión de los asientos y de la distancia entre estos.



Figura 2.5: Distribución de Asientos [6]

El suministro de aire se realizaba a través de dos ranuras en el difusor superior, mientras que la evacuación se llevaba a cabo mediante rejillas en el suelo. Se supuso que el flujo de aire a través de los difusores era uniforme a lo largo de su longitud, y que la salida de aire se distribuía de manera uniforme a lo largo de un espacio entre marcos de 21 pulgadas. El modelo no consideró bloqueos en la puerta de carga ni restricciones en el compartimento del ala.

Se define q_n como la tasa de generación de *quanta* por minuto, expresada por:

$$q_n = \frac{q_g}{\text{copias/quanta}} \quad (2.35)$$

donde q_g representa la tasa de generación de virus (copias por minuto).

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

Para calcular q_g , se emplean las siguientes ecuaciones:

1. Para determinar la cantidad de *quanta*, se utiliza la fórmula:

$$quanta = \frac{q_g}{q_n} \quad (2.36)$$

2. Dado que la concentración de virus es 4223 veces mayor que la concentración escalar, se expresa:

$$\frac{\text{copias}}{quanta} = 4223 \times \frac{\text{copias}}{quanta \text{ escalar}}. \quad (2.37)$$

Dado que se conoce el valor de q_n , se sustituye en la siguiente Ecuación para obtener q_g .

La expresión para la relación entre copias y *quanta* se define como:

$$\frac{\text{copias}}{quanta} = \frac{\text{copias}/\text{HID}_{50}}{QD_{50}}. \quad (2.38)$$

$$\text{HID}_{50} = \text{TCID}_{50} \times \left(\frac{\text{HID}_{50}}{\text{TCID}_{50}} \right). \quad (2.39)$$

donde:

- HID_{50} representa las copias del virus para la dosis infecciosa humana del 50 %.
- Q_0 es la dosis de *quanta*, calculada de la siguiente manera:

$$e^{-Q_0} = 1 - 0.5$$

$$\Rightarrow Q_0 = 0.693.$$

- TCID_{50} denota la dosis infecciosa mediana del cultivo de tejidos.
- $\frac{\text{HID}_{50}}{\text{TCID}_{50}}$ se refiere a la relación entre la dosis infecciosa humana del 50 % y la dosis infecciosa mediana del cultivo de tejidos.

Para el cálculo del riesgo de contagio, se emplea la Ecuación 2.33, la cual también se expresa como:

$$\frac{I}{N} = \left(1 - e^{-\frac{CQ_B t}{\text{copias}/quanta}} \right). \quad (2.40)$$

donde:

- Q_B es igual a 0.3 CFM.
- C representa la concentración inhalada, medida en virus por pie cúbico (virus/ft³).
- t corresponde a 180 minutos.
- $\text{copias}/quanta$ se calcula como $\frac{\text{HID}_{50}}{QD_{50}} = \frac{1770}{0.693} = 2554$.

Estado del Arte

La tasa de copias/*quanta* se determina como la relación entre la dosis infecciosa humana del 50% (HID50) y la dosis de *quanta* al 50% (QD50), y se utiliza como un parámetro esencial en la estimación del riesgo de contagio.

La *Figura 2.6* muestra la variación del riesgo para los 131 pasajeros susceptibles en su totalidad. La suma de los riesgos resulta en un total de 2-3 infecciones.

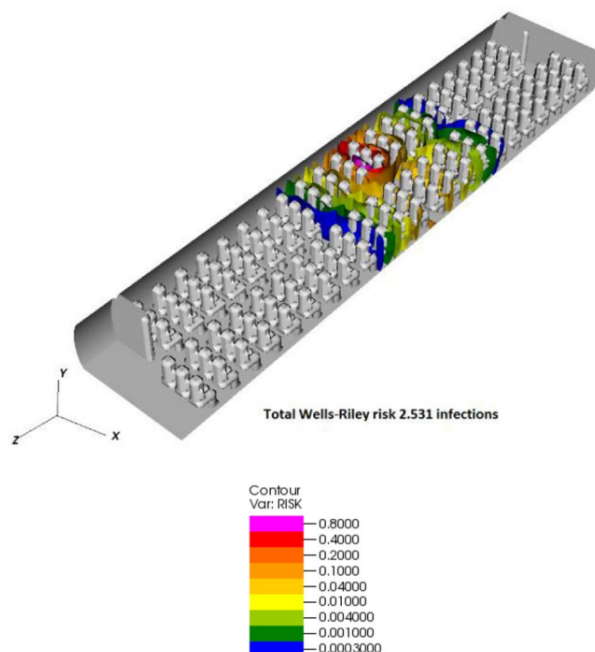


Figura 2.6: Contornos de Riesgo de Contagios [6]

El uso de mascarillas desempeña un papel crucial en la mitigación del riesgo de infecciones transmitidas por el aire. Cuando una persona infectada las utiliza, estas ayudan a disminuir la concentración de virus para otras personas al capturar las gotas antes de que se dispersen. Aunque existe variabilidad en la efectividad entre los distintos tipos de mascarillas, los estudios sugieren un potencial significativo para la reducción del riesgo.

La Ecuación 2.41 es una modificación de la Ecuación de Wells-Riley 2.33, que integra la eficiencia de la mascarilla para evaluar su efectividad en la reducción del número de casos infecciosos.

$$\frac{I}{N} = 1 - e^{-\frac{(1-I_f)q_G}{\left(\frac{\text{copies}}{\text{quanta}}\right)}(1-I_f)Q_{BT}/Q_T} = 1 - e^{-\left(\frac{(1-I_f)C}{\left(\frac{\text{copies}}{\text{quanta}}\right)}\right)Q_{BT}}, \quad (2.41)$$

donde:

- $\frac{(1-I_f)q_G}{\left(\frac{\text{copies}}{\text{quanta}}\right)}$ es el efecto de la mascarilla en la persona índice.
- Q_T es el efecto del flujo de aire filtrado/fresco.
- $(1 - I_F)Q_{BT}$ es el efecto de la mascarilla en los pasajeros.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

Se han propuesto medidas de distanciamiento social, como dejar vacíos los asientos del medio, para mitigar el riesgo de contagio en los aviones. En una disposición típica de asientos para un avión Boeing 737, como se puede observar en la *Figura 2.7*, esta práctica reduce la ocupación al 69% de la capacidad, lo que resulta en un aumento del 45% en la ventilación de los pasajeros.



Figura 2.7: Distribución Habitual de un Boeing 737 [6]

Para los aviones regionales con 52 pasajeros, implementar el distanciamiento social modificando la disposición de los asientos reduce el número de pasajeros en un 50%, como se puede observar de ejemplo en la *Figura 2.8*, lo que genera un aumento en la ventilación y una reducción de casi el 60% en el riesgo.

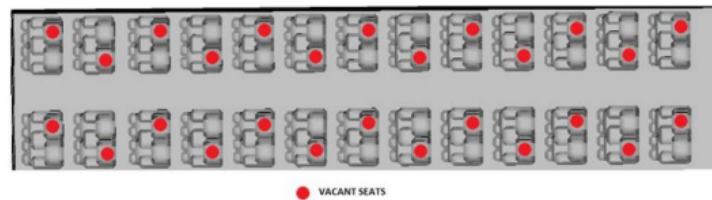


Figura 2.8: Distribución de Asientos [6]

Utilizando las ecuaciones anteriores junto con los hallazgos de CFD correspondientes, se observó que con aproximadamente el 67% de capacidad y el asiento del medio vacío, el riesgo relativo se reduce a alrededor del 40%, lo que concuerda con el nivel de riesgo asociado cuando todos los pasajeros usan una mascarilla. Estos resultados sugieren que la combinación de distanciamiento social y el uso universal de mascarillas puede reducir significativamente el riesgo de contagio.

2.3.1.4. Maqueta de Cabina

En este caso específico [26], se desarrolló una maqueta de cabina a escala real con un solo pasillo en un entorno de laboratorio. La *Figura 2.9* ilustra el diseño interior de esta maqueta, que consistía en 7 filas con capacidad para un total de 42 asientos, cada asiento ocupado por un maniquí. El suelo de la cabina estaba revestido de alfombra y equipado con tiras de iluminación.

Se instaló un sistema de aire acondicionado para suministrar aire a una temperatura específica a la maqueta de la cabina. El caudal de aire dentro de la cabina se mantuvo constante en 9.5 L/s por pasajero tanto para el sistema de ventilación de cabina directo, *DV*, como para el sistema de ventilación de cabina mixto, *MV*. Los maniquíes fueron configurados para tener una temperatura superficial de $30\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$.

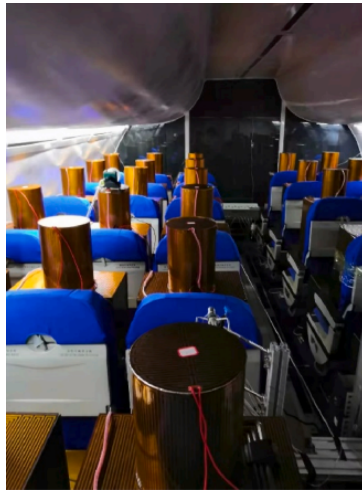


Figura 2.9: Diseño de la Maqueta de una Cabina [26]

La *Figura 2.10* presenta una representación esquemática detallada de la maqueta de la cabina.

En el sistema de ventilación mixta *MV*, el aire se suministraba a través de siete difusores en el techo, o como 1 en la *Figura 2.10*, que representaban el 40% del suministro total de aire, y a través de siete difusores en los hombros a ambos lados, marcados como 2, que representaban el 60% restante del suministro total de aire. Los difusores de escape se ubicaron en las partes inferiores de ambas paredes laterales cerca del suelo, marcados como 3. Por otro lado, el sistema de ventilación por desplazamiento *DV* suministraba aire a través de difusores ubicados en las partes inferiores de ambas paredes laterales cerca del suelo, también marcados con 3, y expulsaba aire a través de difusores en el techo, marcados con 1.

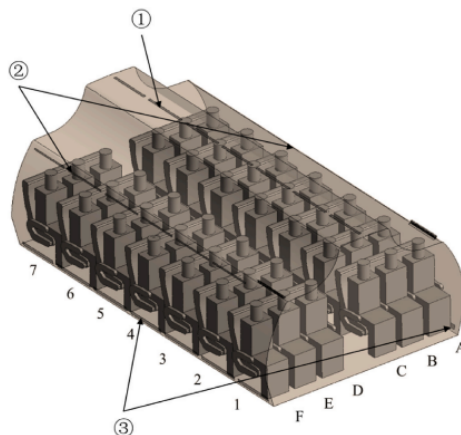


Figura 2.10: Organización de la Maqueta de una Cabina [26]

Durante la simulación, se ubicó la fuente de partículas frente a la cabeza del maniquí (4A, 4B, 4C) y se seleccionaron partículas de tamaño de $1 \mu m$ y $5 \mu m$. Las paredes se definieron como superficies reflectantes, lo que permitió que las partículas rebotaran en los límites y cambiaran su impulso a medida que interactuaban con ellos.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

Se evaluó el riesgo de contagio por COVID-19 en las cabinas de aviones mediante la Ecuación de Wells-Riley 2.33.

El riesgo de contagio para un pasajero en la cabina se estimó utilizando la Ecuación:

$$P = 1 - e^{-C_i Q_B t}. \quad (2.42)$$

Donde P representa el riesgo de contagio, C_i es la concentración de contaminantes (*quanta*-hora/m³), Q_B es la tasa de flujo respiratorio del pasajero (m³/s), y t es la duración del vuelo (s).

El valor de *quanta* para la COVID-19 se calculó utilizando la Ecuación 2.43:

$$q_n = -\frac{Q_T \ln(1 - P)}{N Q_B t}, \quad (2.43)$$

donde q_n representa la *quanta* de la COVID-19, Q_T es la tasa de ventilación de la cabina (m³/s), N es el número de personas en la cabina y t es la duración del vuelo.

La distribución del riesgo de contagio por COVID-19 dentro de la cabina de un avión está directamente relacionada con el patrón de distribución del aire.

En este caso de la maqueta de cabina, el riesgo de contagio se dividió en tres escenarios diferentes: primero, donde ningún pasajero utilizó mascarillas; segundo, donde solo el pasajero índice lleva una mascarilla; y tercero, donde todos los pasajeros usan mascarillas.

- Sin mascarillas

La *Figura 2.11* representa la distribución de los riesgos de contagio bajo dos sistemas de ventilación cuando ningún pasajero usa mascarillas.

Los ejes X y Z representan el número de columna y el número de fila, respectivamente, mientras que el eje Y representa la probabilidad de contagio, variando de 0 a 1. La barra roja indica la posición del paciente índice. En el caso del sistema MV , el paciente índice se encuentra en la posición $C4$, mientras que en el caso del sistema DV se encuentra en la posición $A4$. Por tanto, cada barra de color morado representa la probabilidad de contagio de la persona ubicada en el respectivo asiento, organizado por columna y fila.

Al comparar los escenarios, bajo el sistema de ventilación directa MV , se observa que el riesgo promedio más alto de contagio para los pasajeros ocurre cuando la persona índice está sentada en el asiento $C4$.

Por otro lado, bajo el sistema de ventilación mixta DV , el impacto de los contaminantes en los pasajeros que se sientan al otro lado de la persona índice (columnas D-E) es casi insignificante. El riesgo medio de contagio más alto para los pasajeros se da cuando la persona infectada ocupa el asiento $A4$.

Dado que los sistemas MV son prevaletentes en los aviones de pasajeros, se recomienda que durante la pandemia de la COVID-19, cualquier pasajero que pueda ser la persona infectada evite sentarse en las columnas C o D, cerca del pasillo.

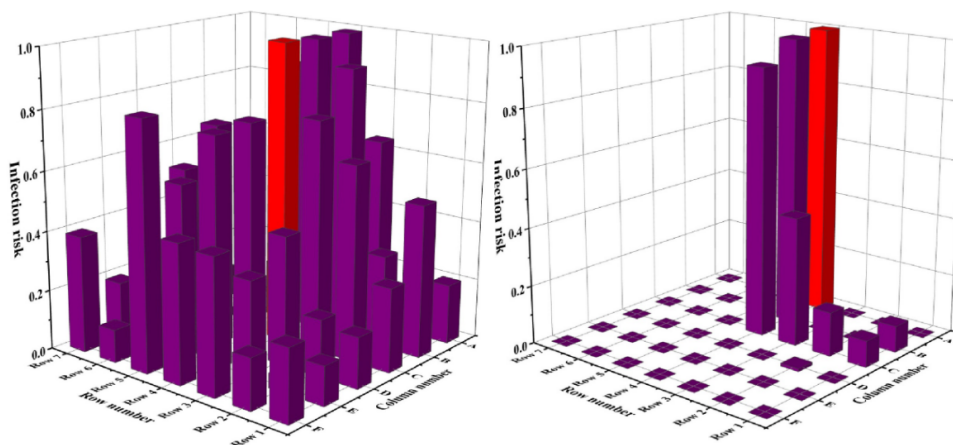


Figura 2.11: No llevar Mascarilla, Primero MV, Segundo DV [27]

- Mascarilla solo utilizada por la persona infectada

Se ha comprobado que las mascarillas de grado quirúrgico reducen la cantidad de virus en el aire exhalado hasta tres veces. En la *Figura 2.12* se representa el riesgo de contagio cuando la persona infectada utiliza una mascarilla.

En este contexto, el riesgo de contagio entre los pasajeros adyacentes disminuye notablemente, hasta en un 74%.

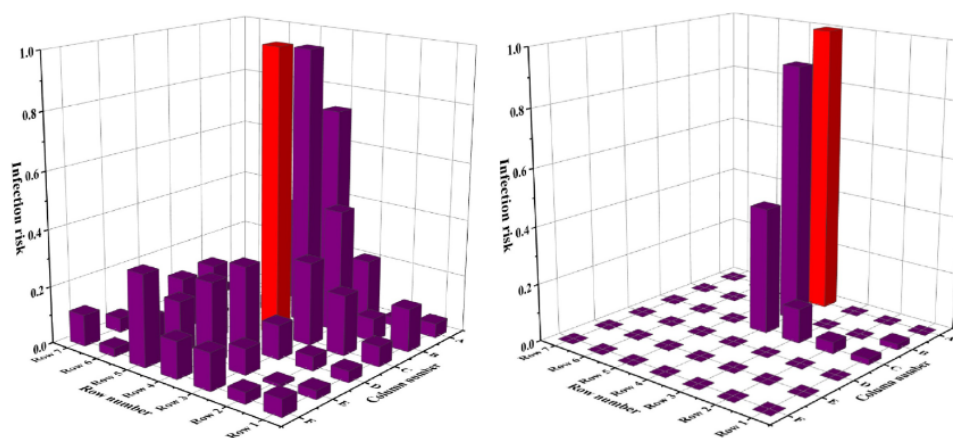


Figura 2.12: Llevar Mascarilla solo Persona Infectada, Primero MV, Segundo DV [27]

- Mascarilla utilizada por todos los pasajeros

La *Figura 2.13* presenta los riesgos de contagio cuando todos los pasajeros utilizan mascarillas. En este escenario, se observa que el riesgo de contagio se reduce hasta en un 80%.

Cuando la persona infectada utilizaba una mascarilla, el riesgo de contagio disminuyó en un promedio del 65% con *MV* y en un promedio del 60% con *DV*. Al llevar todos los pasajeros mascarillas, el riesgo de contagio disminuyó aún más.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

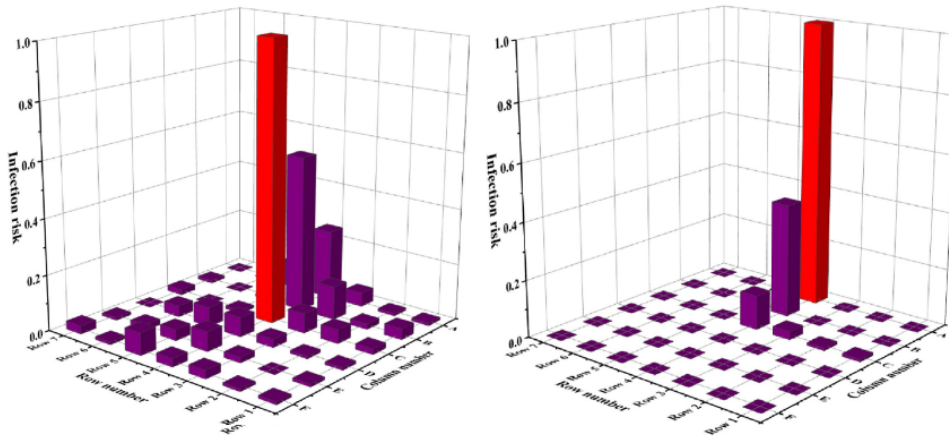


Figura 2.13: Todos los pasajeros llevan Mascarilla, Primero MV, Segundo DV [27]

Los riesgos promedio de contagio para los pasajeros en todos los escenarios se resumen en la *Tabla 2.1*. En el sistema *MV*, el riesgo promedio más alto de contagio ocurrió cuando la persona infectada estaba ubicada en el asiento C4 cerca del pasillo. Por el contrario, el mayor riesgo promedio de contagio bajo el sistema *DV* se produjo cuando la persona infectada estaba en el asiento A4 cerca de la pared.

Infection risks under different air distribution systems.

Infection risk	MV			DV		
	No masks	Mask worn by index person only	Masks worn by all passengers	No masks	Mask worn by index person only	Masks worn by all passengers
A4	0.09	0.03	0.01	0.07	0.04	0.01
B4	0.11	0.03	0.01	0.04	0.01	0.00
C4	0.39	0.15	0.05	0.03	0.01	0.00
Average	0.20	0.07	0.02	0.05	0.02	0.00

Cuadro 2.1: Tabla de Riesgo de Contagio [27]

2.3.1.5. Cabinas con distribución 2-2 , 2-3-2 y 3-3-3

En esta sección, se empleó la Ecuación de Wells-Riley 2.33, esta vez expresada como:

$$P = 1 - e^{-\frac{Iq_n Q_B t}{Q_T}}, \quad (2.44)$$

donde P representa la probabilidad de contagio para una persona susceptible, I denota el número de pacientes contagiados, q_n es la *quanta* producida por cada paciente (h^{-1}), Q_B representa la ventilación pulmonar de cada persona susceptible (m^3/h), t es la duración de la exposición, y Q_T representa la tasa de ventilación de aire limpio suministrado a la cabina de cinco filas (m^3/h).

La Ecuación puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$P = 1 - \exp(-1 \times C \times 0.3 m^3/h \times 4 h) = 1 - \exp(-1.2C), \quad (2.45)$$

donde C es la concentración local de *quanta* ($quanta/m^3/h$). Dado que la distribución de *quanta* en una cabina es altamente no uniforme, se utilizó la concentración promedio sobre un volumen de $0.3 m \times 0.3 m \times 0.3 m$ frente a la nariz de un pasajero.

Cabe destacar, que el Paciente Índice se situó en el asiento 3A. Si la cabina tiene una distribución pequeña como la configuración 2-2, existe la posibilidad de que el virus se transmitiera al otro lado de la cabina en la sección transversal. Por otro lado, en las cabinas grandes, como las configuraciones 2-3-2 y 3-3-3, el virus permanecería en el lado de la cabina en la que estuviese situado el Paciente Índice.

Se calculó la probabilidad de riesgo de contagio de los pasajeros en un vuelo de 4 horas utilizando la Ecuación 2.45. Además, el Paciente Índice se supuso que estaba localizado en diferentes asientos de la Fila 3 para los 3 escenarios mostrados próximamente.

La Figura 2.14 [28] muestra la probabilidad de contagio en una maqueta de cabina de cinco filas dispuesta en un diseño 2-2. La tasa de contagio se calculó en función de la concentración de *quanta* utilizando la Ecuación 2.46.

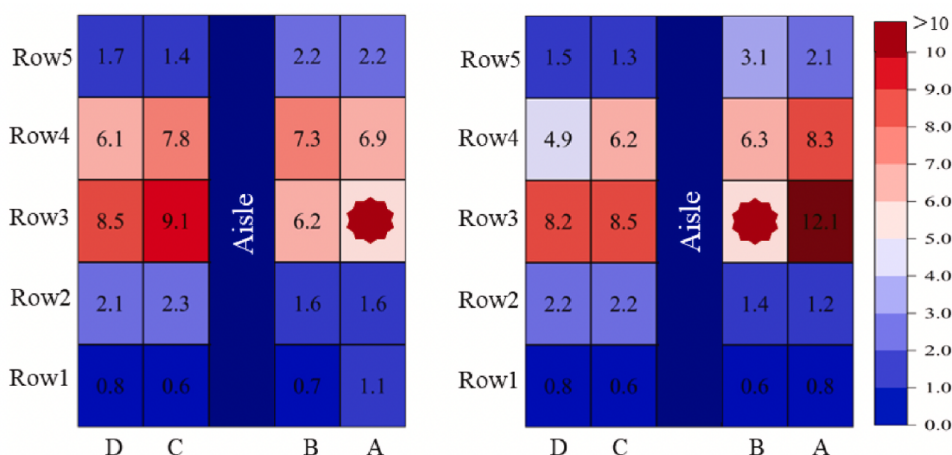


Figura 2.14: Riesgo de Contagio en Distribución 2-2 [28]

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

Específicamente, se promedió la concentración de *quanta* para cada pasajero dentro de un volumen de $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ frente a la región de la nariz del pasajero. Se observó que la probabilidad promedio de infección fue del 3.2% cuando el Paciente Índice estaba sentado en 3A y del 3.4% cuando estaba sentado en 3B, lo que indica una leve variación según la posición del asiento índice. Considerando la simetría de la cabina a lo largo del pasillo, se pueden aplicar resultados especulares en escenarios donde el Paciente Índice se sienta en los asientos C y D.

En toda la cabina de cinco filas, la tasa promedio general de infección para un vuelo de 4 horas varió dependiendo de la posición del Paciente Índice, con una media del 3.4%. Aunque este porcentaje puede parecer inicialmente bajo, la probabilidad de infección para los pasajeros ubicados en la misma fila o muy cerca del Paciente Índice podría llegar al 10%.

La *Figura 2.15* [28] muestra la probabilidad de contagio en una maqueta de cabina de cinco filas dispuesta en un diseño 2-3-2.

Las probabilidades de contagio en la cabina oscilaron entre 2.1%, 2.0%, 1.7% y 1.7% cuando el Paciente Índice estaba sentado en 3A, 3B, 3C y 3D, respectivamente. No se observó ninguna tendencia discernible con respecto a qué posición del asiento presentaba una mayor o menor probabilidad de infección. Además, incluso si existiera tal tendencia, podría no ser práctico asignar deliberadamente a un Paciente Índice a un asiento específico.

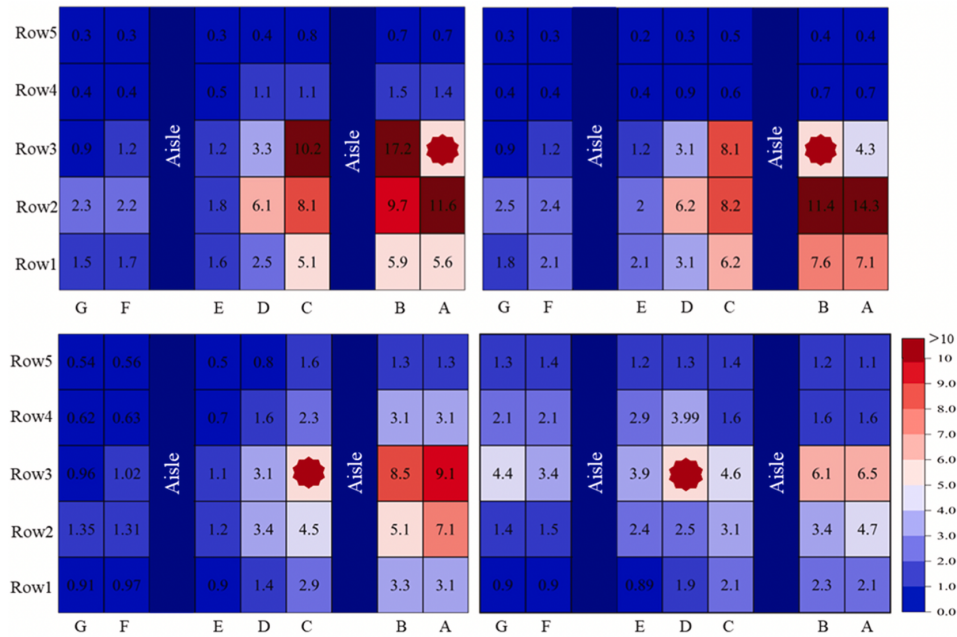


Figura 2.15: Riesgo de Contagio en Distribución 2-3-2 [28]

Estado del Arte

La Figura 2.16 [28] muestra la probabilidad de contagio en una maqueta de cabina de cinco filas dispuesta en un diseño 3-3-3.

Las probabilidades de contagio en la cabina fueron del 1.4%, 1.5%, 1.5%, 1.6% y 1.3% para las posiciones de asiento correspondientes 3A, 3B, 3C, 3D y 3E.

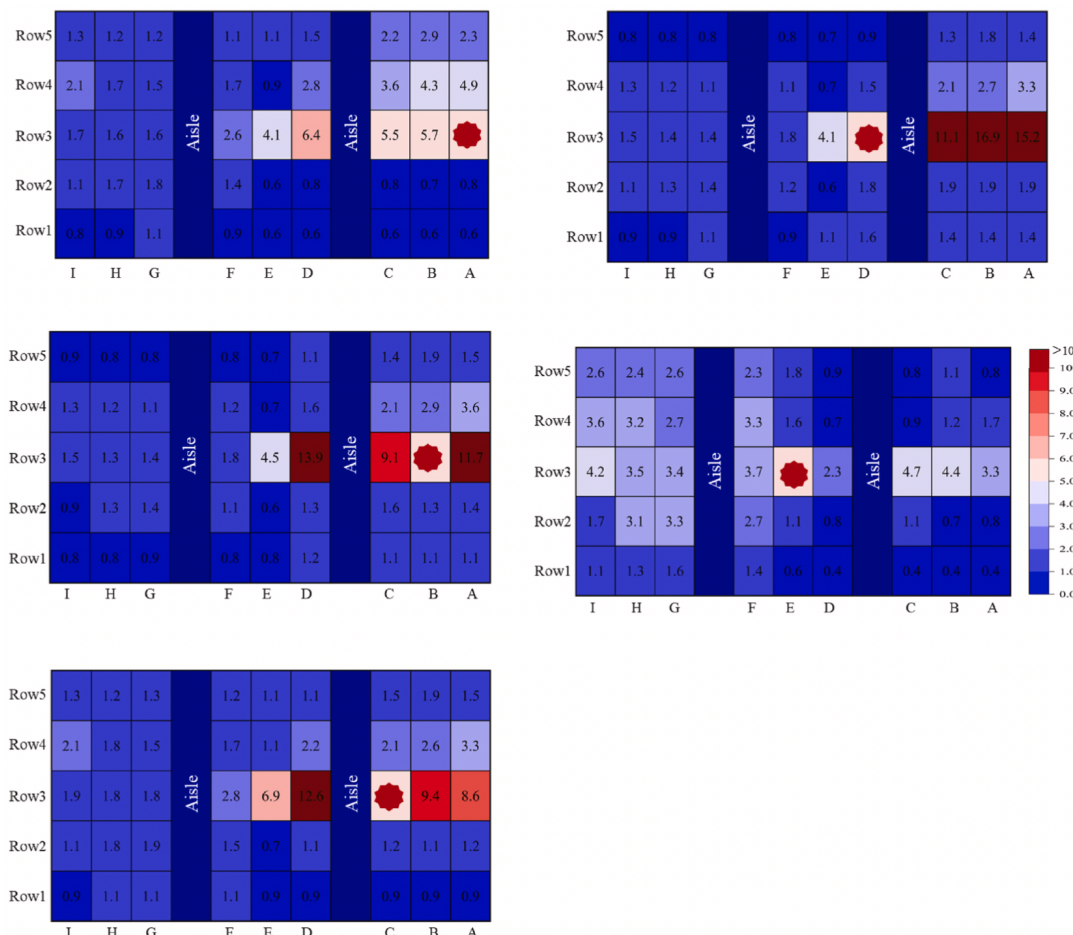


Figura 2.16: Riesgo de Contagio en Distribución 3-3-3 [28]

Cabe destacar que las cabinas más grandes tienden a tener probabilidades promedio de infección más bajas. En concreto, las probabilidades medias fueron del 3.3%, 1.9% y 1.5% para las configuraciones 2-2, 2-3-2 y 3-3-3, respectivamente.

Las conclusiones derivadas del análisis de estas Figuras sugieren que las diferentes ubicaciones de los asientos para el Paciente Índice resultan en diferentes probabilidades de infección. Sin embargo, es importante destacar que la probabilidad promedio de infección no es suficiente para comparar el tamaño de las cabinas.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

2.3.2. Métodos alternativos a las Ecuaciones de Wells - Riley

2.3.2.1. CFD y Dosis-Respuesta en Dornier 728

El siguiente caso trata en la cabina de un avión Dornier 728, o mejor conocido como *Do728*. Las predicciones basadas en modelos sobre la probabilidad de contagio pueden mejorarse al integrar la metodología Dosis-Respuesta. El transporte de partículas dentro de la cabina del avión es analizado utilizando dinámica de fluidos computacional *CFD*. Este método ofrece una estimación directa del riesgo de contagio, en contraste con la necesidad de realizar una cuantificación regresiva como en el modelo de Wells-Riley.

La comprensión precisa de las trayectorias y tamaños de las partículas resulta crucial para realizar predicciones realistas sobre aspectos como la deposición de partículas en las superficies, el tiempo de vuelo basado en el tamaño y la inactivación biológica de virus.

La disposición del avión, la cual se puede observar en la *Figura 2.17* [29], consta de un solo pasillo, con 14 filas y cinco asientos en cada fila, en total 70 asientos para pasajeros.

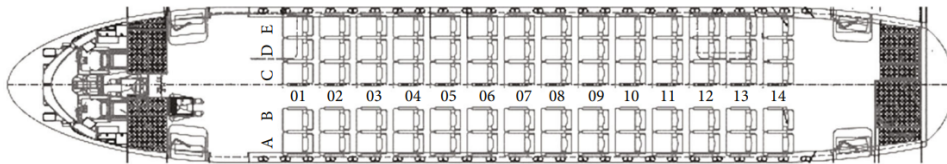


Figura 2.17: Diseño de Cabina de un Do728 [29]

En cuanto al sistema de ventilación de la cabina, ilustrado en la *Figura 2.18* utiliza un enfoque de ventilación mixta, donde el aire fresco se suministra desde el techo, mientras que el aire caliente se extrae cerca del suelo para mantener la comodidad de los pasajeros. La humedad relativa del aire dentro de la cabina durante el vuelo se mantiene en aproximadamente un 15%.

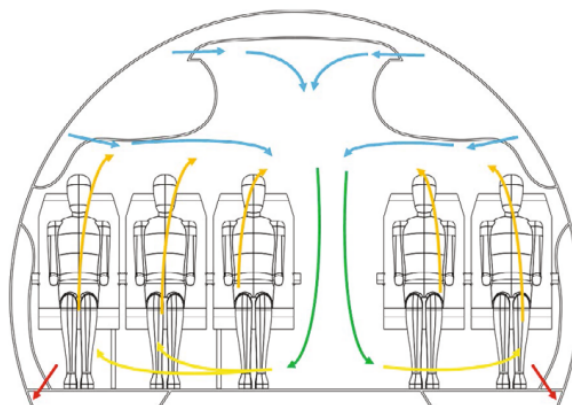


Figura 2.18: Ventilación en la cabina de un Do728 [29]

Estado del Arte

En primer lugar, se contextualizan los diversos parámetros y ecuaciones que se explican en el análisis. La *Tabla 2.2* proporciona un resumen de los rangos potenciales para estos diferentes parámetros.

Parameter	Symbol	Possible range	Reference case
Virus emission	\dot{R}	0 – 5.5×10^4 RNA/s	500 RNA/s
TCID ₅₀ /RNA	f	10^{-6} – 10^{-3}	10^{-4}
Inactivation rate	\dot{d}	0.0-6.4%/min	0.6%/min
Flight duration	t_x	0.5-18.5 h	2 h
Inhalation rate	p_{in}	6-54 l/min	6 l/min
Vulnerability	V	0-1	1

Cuadro 2.2: Rangos de los Parámetros utilizados en la Investigación [29]

La tasa de inhalación de la dosis infecciosa D_{in} se representa como en la siguiente Ecuación y podría mostrar una variación significativa en varios órdenes de magnitud, dependiendo de los valores seleccionados para cada parámetro.

$$D_{in} = R_f s B p_{in}, \quad (2.46)$$

donde D_{in} representa la tasa de inhalación de la dosis infecciosa, R_f es la tasa de retención, s es la eficiencia de filtración, B es el caudal de aire respirado, y p_{in} es la concentración de partículas virales en el aire inhalado.

El riesgo de contagio, basado en datos de dosis-respuesta de estudios de exposición en humanos, puede ser cuantificado mediante el modelo de Wells-Riley.

El riesgo de contagio $I(D_{in})$ se describe como:

$$I(D_{in}) = V(1 - \exp(-K_h D_{in})), \quad (2.47)$$

donde D_{in} representa la dosis infecciosa inhalada en unidades $TCID_{50}$, V denota la vulnerabilidad del individuo susceptible, variando de 0 a 1, y K_h (con unidades de $1/TCID_{50}$) es un parámetro que refleja la infectividad del virus. La vulnerabilidad V incorpora factores como la inmunidad de infecciones anteriores o vacunaciones, con un valor de 1 indicando la máxima vulnerabilidad y 0 representando inmunidad completa.

El parámetro K_h puede calcularse a partir de los resultados de un estudio de exposición en humanos que involucra a n_h participantes, entre los cuales m_h individuos contraen la enfermedad después de la inoculación con una dosis D_h :

$$K_h = \frac{\ln(1 - \frac{m_h}{n_h})}{D_h}. \quad (2.48)$$

La *Figura 2.19* muestra el riesgo de contagio calculado utilizando la Ecuación anterior para todos los asientos. Se observa que el asiento 8E presenta el mayor riesgo de contagio, con un 5.72%, seguido del asiento 8D con un 4.53%. Por el contrario, el riesgo para los pasajeros de la fila anterior al Paciente Índice, es inferior al 1%, mientras que en la fila siguiente al Paciente Índice alcanza hasta el 4.18% en el asiento 9D.

2.3. Modelos probabilísticos que estudian el riesgo de contagio en un avión

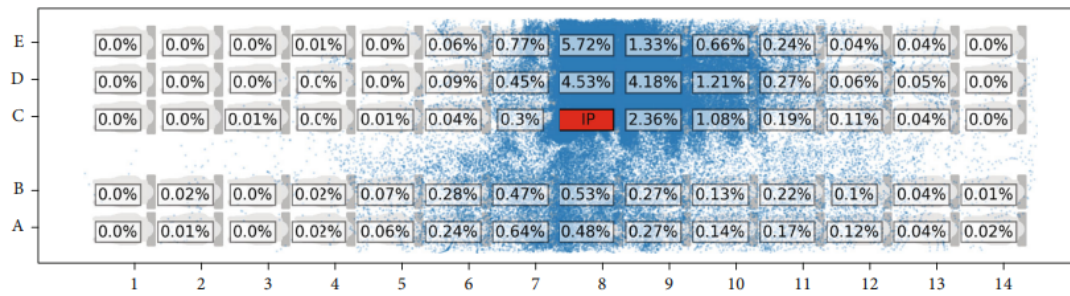


Figura 2.19: Riesgo de Contagio en un Do728 [29]

Es interesante notar que el pasillo parece ofrecer cierta protección, ya que el mayor riesgo se encuentra en el asiento 7A, con un 0.64%. Sin embargo, el patrón de riesgo varía para los asientos A y B en las filas adyacentes al *IP*, donde el riesgo es menor, pero se invierte para las filas más alejadas del Paciente Índice. Por ejemplo, las filas 5, 6 y 12 presentan el mayor riesgo de contagio para los asientos A y B.

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el escenario en la cabina del avión y este muestra la probabilidad de 0, 1 y más de 2 infecciones secundarias para el caso base [29].

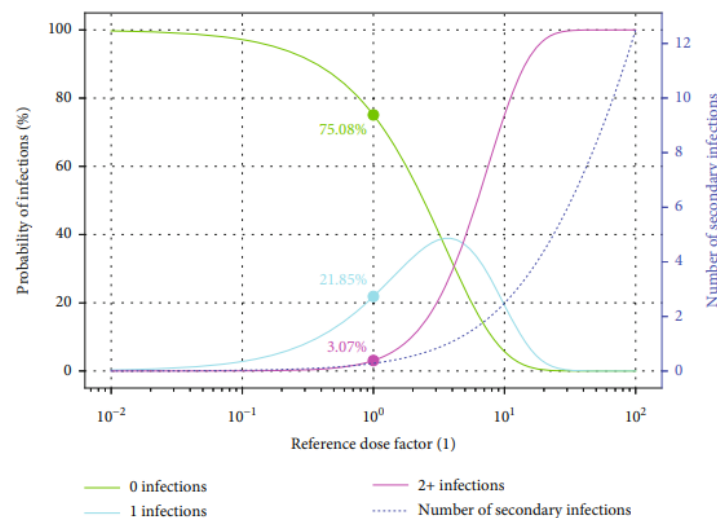


Figura 2.20: Número Estimado de Contagios para Dosis específicas [29]

La probabilidad de que ocurran dos o más transmisiones se sitúa en el 3.07%, mientras que la probabilidad de una sola transmisión es del 21.85%. Por otro lado, la probabilidad de que no ocurra ninguna transmisión es del 75.08%. Es importante destacar que en el caso de referencia, solo se consideran dosis inhaladas de cero o un $TCID_{50}$, lo que indica que las personas infectadas en este escenario han inhalado solo un $TCID_{50}$. Además, para este análisis se seleccionó una tasa de emisión de virus de 5×10^2 ARN/s.

Para concluir, este acercamiento representa una integración de datos de dosis-respuesta derivados de un estudio de exposición humana al SARS-CoV-2 para evaluar el riesgo de contagio.

Se derivan las siguientes conclusiones clave:

1. El riesgo de contagio local se representa con precisión, pues este es un mayor riesgo en las proximidades de la persona índice y disminuye con la distancia.
2. El tamaño de las partículas tiene un impacto mínimo en el transporte de aerosoles cargados de SARS-CoV-2 en la cabina, lo que simplifica el modelo.
3. La alta variabilidad de persona a persona, especialmente en la tasa de emisión de virus, resulta en una amplia gama de resultados potenciales, lo que destaca el desafío en la selección de parámetros.
4. El análisis de sensibilidad permite una evaluación rápida del riesgo de contagio bajo diferentes valores de parámetros.

Capítulo 3

Selección y Comparación de Metodologías

El objetivo de este Capítulo es llevar a cabo una comparación exhaustiva y rigurosa de las diversas metodologías identificadas en el Capítulo 2, con el fin de determinar cuál se adecúa de manera óptima a los objetivos de la presente investigación.

Se emprenderá un análisis que permitirá discernir las diferencias de cada una de estas metodologías elegidas, así como su aplicabilidad en el contexto específico del estudio. Este proceso de selección no solo asegurará la elección de un enfoque metodológico sólido, sino que permitirá percibir las diferencias entre los métodos empleados y los resultados pertinentes en las distintas cabinas de avión mencionadas a lo largo del TFG en el Capítulo 2.

En resumen, este Capítulo se centra principalmente en la comparación de diversas metodologías existentes para evaluar el riesgo de contagio en vuelos comerciales. Algunas de estas metodologías consideran tanto el uso de las ecuaciones de Wells-Riley y las distancias, mientras que otras se concentran únicamente en la metodología *CFD* y la Dosis-Respuesta. Por tanto, se examinarán los distintos escenarios mencionados y disponibles, y se relacionarán con los métodos estudiados. Tras esto, se contrastarán los resultados obtenidos para identificar las discrepancias significativas que surjan en función del método empleado.

3.1. Metodologías Elegidas

Durante el desarrollo de este TFG se han explorado varias metodologías utilizadas para evaluar el riesgo de contagio en entornos de cabina de avión. Se ha notado que la mayoría de estas metodologías, aunque pueden hacer uso del Método de Wells-Riley u otros enfoques similares, presentan diferencias significativas al incorporar variables adicionales que no han sido consideradas en otros estudios. Entre estas variables se encuentran la distancia entre los asientos y la consideración de la distribución del aire en la cabina, entre otros aspectos.

Selección y Comparación de Metodologías

Se ha optado por seleccionar un conjunto específico de metodologías mencionadas en el Capítulo 2, con el propósito de examinar las discrepancias entre los resultados, y de determinar si las variaciones en las variables consideradas tienen un impacto significativo.

Por tanto, se comparan las siguientes metodologías. Primero, la metodología Dosis-Respuesta y Dinámica de Fluidos Computacional, (*CFD* por sus siglas en inglés), la cual fue aplicada para el Dornier 728 en el Capítulo 2.3.2 [29], se ha utilizado para las distribuciones de cabina 2-2, 2-3-2 y 3-3-3, introducidas en el Capítulo 2.3.1.5.

En segundo lugar, se ha seleccionado la metodología empleada para las distribuciones de cabina 2-2, 2-3-2 y 3-3-3 en el Capítulo 2.3.1.5, conocida como Wells-Riley y Distancia, y se ha aplicado dicha metodología a la cabina del avión Dornier 728, el cual se introduce en el Capítulo 2.3.2.

Es decir, se han cruzado metodologías empleadas en distintas cabinas de avión, con el fin de comparar resultados obtenidos previamente con otros nuevos, utilizando una metodología diferente.

3.2. Comparación de Metodologías

Esta sección, como se ha resaltado anteriormente, se enfocará en presentar las diferencias observadas en los resultados obtenidos. Con el fin de analizar las diferencias entre estos resultados, se ha creado un script en el lenguaje de programación Python. Este script ha sido desarrollado para ayudar en la investigación y facilitar el cálculo de la probabilidad de contagio. La explicación detallada de este código se proporcionará antes de entrar en detalle de mencionar los resultados relevantes y se llegue a una conclusión sólida. Cabe destacar que todo el código utilizado para la implementación está en los Apéndices A y B de este documento.

3.2.1. Resultados obtenidos en las Distribuciones de Cabina con Metodología CFD y Dosis-Respuesta

En cuanto a la comparación del nuevo cálculo del riesgo de contagio en las distribuciones de cabina, es necesario explicar cómo se llevará a cabo. Primero, como se ha explicado anteriormente en el Capítulo 2.3.2, se utilizarán los valores y ecuaciones de la metodología CFD y Dosis-Respuesta para el avión Dornier 728. Para ello, se hará referencia a la *Tabla 2.2* del Capítulo 2.3.2, la cual proporciona los valores necesarios para el cálculo.

Se utilizarán las ecuaciones 2.46, 2.47 y 2.48 también pertenecientes al Capítulo 2.3.2 para calcular las distintas probabilidades. Además, se hará uso de un script de Python para cada caso específico de cabina. Cabe destacar que se generará un gráfico para cada distribución de cabina, es decir, 2-2, 2-3-2 y 3-3-3.

3.2.1.1. Distribución de Cabina 2-2

En primer lugar, se aborda la distribución de cabina 2-2. Se utilizan los diversos valores proporcionados en la *Figura 3.1* [29]. Se selecciona una porción específica de los resultados que se acomodan a la distribución de cabina 2-2.

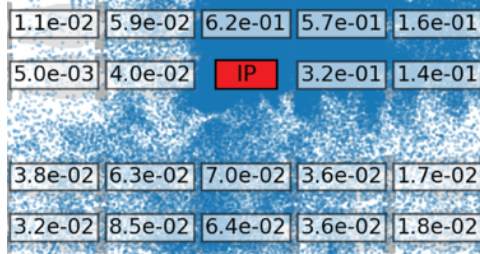


Figura 3.1: Dosis infecciosa D_{in} utilizada para Distribución de Cabina 2-2 [29]

Los resultados obtenidos con la metodología Dosis-Respuesta y *CFD* en la distribución de cabina 2-2, se presentan en la *Figura 3.2*:

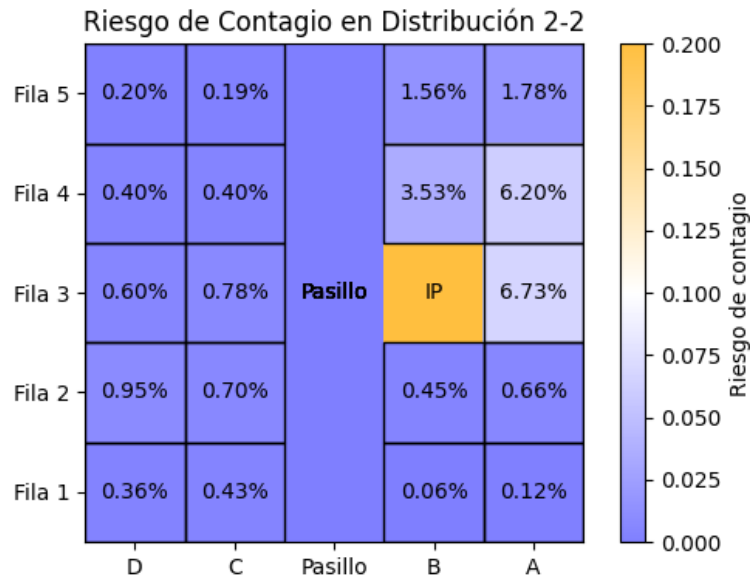


Figura 3.2: Resultados de Metodología *CFD* en Distribución de Cabina 2-2

Si se ponen los resultados obtenidos con la metodología Dosis-Respuesta y *CFD* en la distribución de cabina 2-2 de la *Figura 3.2* frente a los resultados obtenidos en el Capítulo 2.3.1.5 con la metodología de Wells-Riley en la *Figura 3.3*:

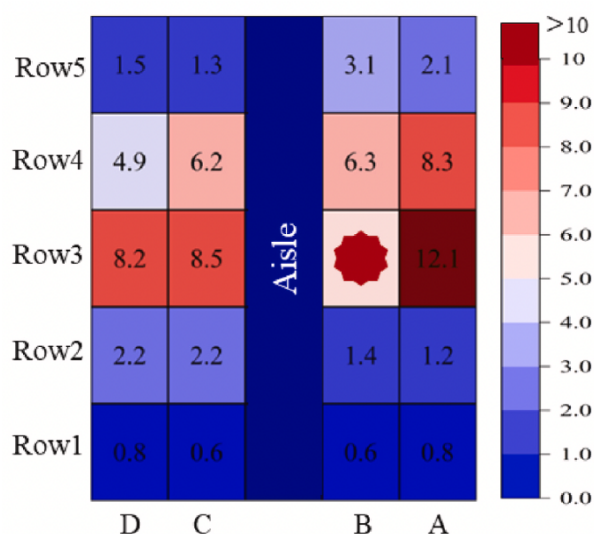


Figura 3.3: Resultados con Metodología Wells-Riley [28]

A modo de aclaración, la fila 1 se refiere a la parte delantera del avión y cada fila posterior corresponde a la fila situada detrás de la anterior. Tratando los resultados obtenidos en el Capítulo 2.3.1.5 en la *Figura 3.3*, se puede observar que la mayor probabilidad de contagio se produce en la misma fila a la que pertenece el Paciente Índice. En consecuencia, las dos filas situadas detrás del Paciente Índice son las más propensas a contagios, aunque la probabilidad sea baja. A medida que se aleja del Paciente Índice, esta probabilidad disminuye.

En contraste, en la metodología Dosis-Respuesta y *CFD* mencionada en el Capítulo 2.3.2, representada en la *Figura 3.2*, se observa un incremento en la probabilidad de contagio en una pequeña zona alrededor del Paciente Índice, representada de forma circular, afectando principalmente a los pasajeros situados detrás. Esto puede deberse a diferentes razones, tales como el flujo de aire utilizado, ya que el aire suele dirigirse hacia la parte trasera del avión. Adicionalmente, se observa que en la fila del Paciente Índice, el pasajero con mayor probabilidad de contagio es el que está próximo a él, y no toda la fila como se muestra en la *Figura 3.3*. Además, se puede observar que la parte izquierda del avión, en la columna A, presenta la mayor probabilidad de contagio.

3.2.1.2. Distribución de Cabina 2-3-2

Siguiendo el mismo procedimiento que anteriormente, se procede a comparar los resultados de la distribución de cabina 2-3-2. Por tanto, el script de Python utilizado es el mismo, sin embargo, lo que cambia es la matriz D_{in} .

Para contrastar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos en el Capítulo 2.3.1.5, se han realizado los cálculos de las probabilidades de contagio que aparecen en la *Figura 3.4*:

3.2. Comparación de Metodologías

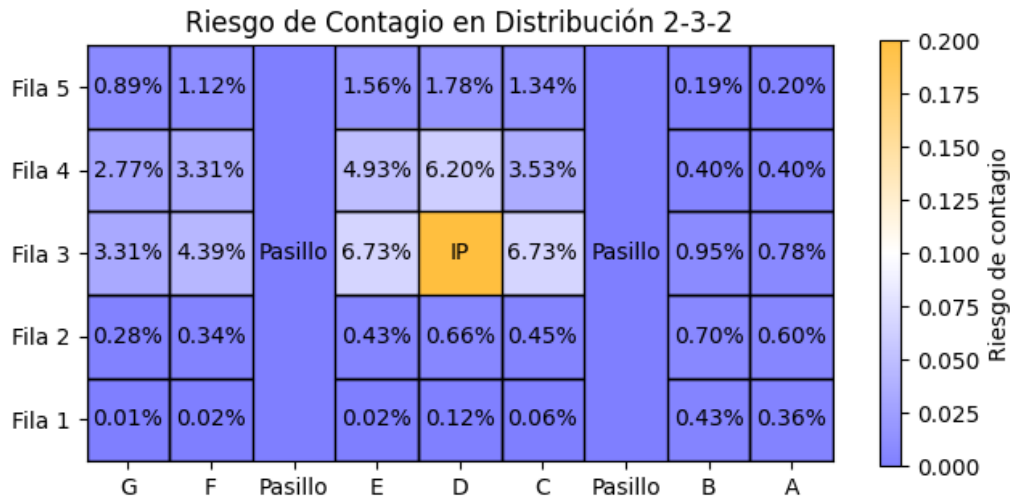


Figura 3.4: Resultados de Metodología *CFD* en Distribución de Cabina 2-3-2

Si se ponen los resultados obtenidos frente los resultados del Capítulo 2.3.1.5 en la *Figura 3.5*:

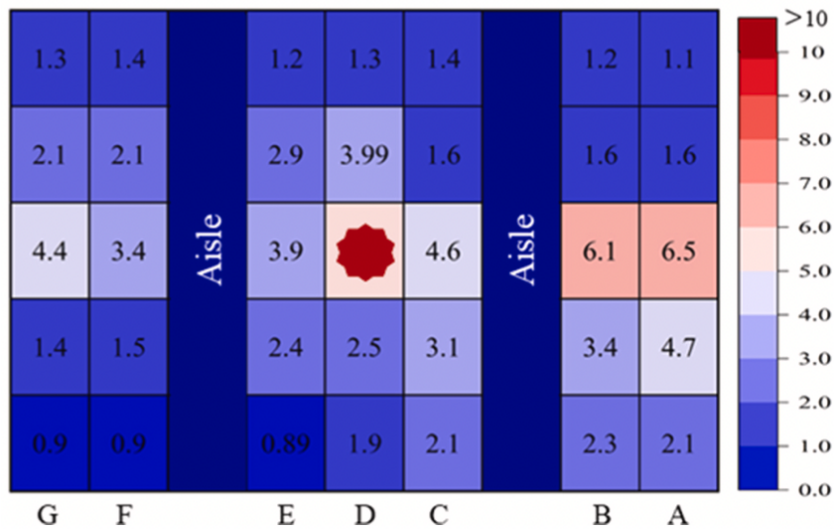


Figura 3.5: Resultados con Metodología Wells-Riley [28]

Se procede a comparar los resultados obtenidos mediante la metodología Dosis-Respuesta y *CFD* utilizando el script de Python en la *Figura 3.4* y los resultados obtenidos con la metodología Wells-Riley en la *Figura 3.5*.

Como se puede observar en la *Figura 3.5*, la mayor probabilidad de contagio ocurre en la parte izquierda del avión, es decir, en las columnas A y B pertenecientes a la misma fila en la que está sentado el Paciente Índice. Además, se puede apreciar un aumento en la probabilidad de contagio a medida que los pasajeros están sentados cerca y alrededor del Paciente Índice, como en las columnas E, D y C.

Selección y Comparación de Metodologías

En cuanto a la *Figura 3.4*, se observa que los resultados son bastante simétricos en comparación con los obtenidos en la *Figura 3.5*. Esto se debe al flujo de aire, el cual se dirige hacia la parte trasera del avión. Cabe destacar que los pasajeros con mayor probabilidad de contagio son aquellos pertenecientes a la fila del Paciente Índice, así como aquellos sentados detrás de él. También se observan resultados destacados en la parte derecha del avión, es decir, en las columnas F y G, donde la probabilidad aumenta a medida que se aproxima a la fila del Paciente Índice. Una vez que se alejan, esta probabilidad disminuye nuevamente.

3.2.1.3. Distribución de Cabina 3-3-3

Siguiendo el mismo procedimiento que anteriormente, se procede a comparar los resultados de la distribución de cabina 3-3-3. Por tanto, el script de Python utilizado es el mismo, sin embargo, lo que cambia es la matriz D_{in} .

Para contrastar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos en el Capítulo 2.3.1.5, se presenta la *Figura 3.6*:

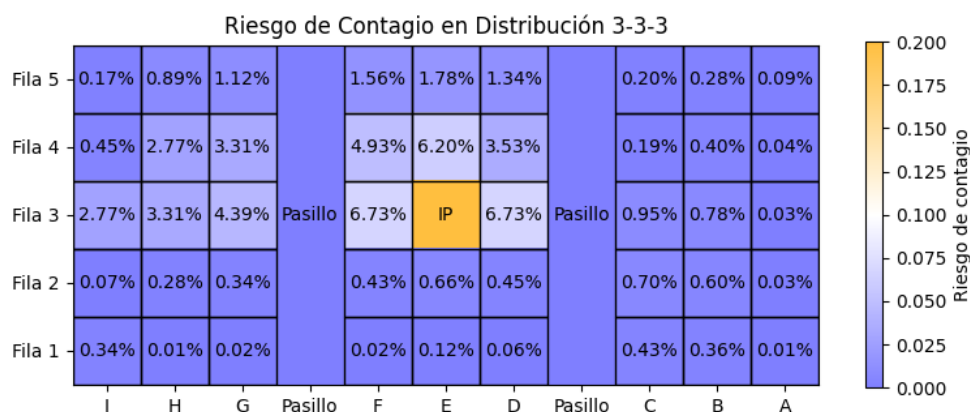


Figura 3.6: Resultados de Metodología CFD en Distribución de Cabina 3-3-3

Si se ponen los resultados obtenidos frente los resultados del Capítulo 2.3.1.5 en la *Figura 3.7*:

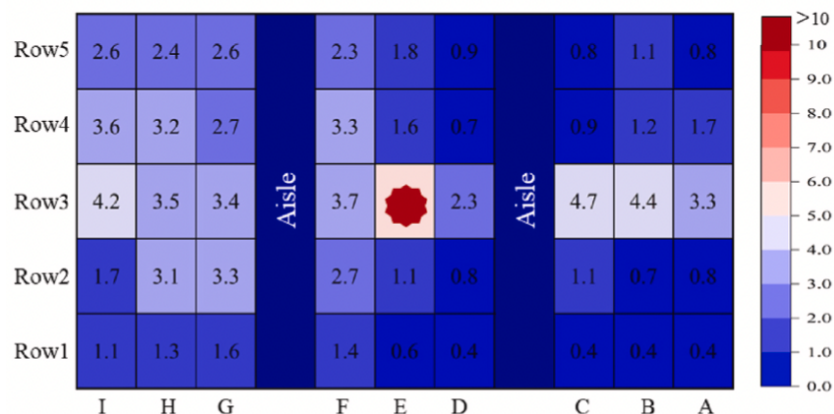


Figura 3.7: Resultados con Metodología Wells-Riley [28]

En relación con la *Figura 3.7*, se observa que la mayor probabilidad de contagio se encuentra en la fila donde está ubicado el Paciente Índice. Además, en este caso, la probabilidad aumenta en la parte derecha del avión, es decir, en las columnas F, G, H e I. Finalmente, se aprecia que la probabilidad incrementa ligeramente si el pasajero está situado detrás del Paciente Índice. Es notable resaltar un resultado específico: el pasajero ubicado en la fila 5, columna G, presenta una mayor probabilidad de contagio en comparación con aquel que está sentado directamente detrás del Paciente Índice.

En cuanto a la *Figura 3.6*, se aprecia la simetría presente en los resultados. La fila con mayor probabilidad de contagio sigue siendo aquella en la que se encuentra el Paciente Índice. Además, se observa que el flujo de aire afecta directamente las probabilidades, razón por la cual aquellos sentados detrás del Paciente Índice pueden tener una mayor probabilidad de contagio.

3.2.2. Resultados obtenidos con metodología Wells-Riley y Distancia en la cabina del Dornier 728

Para realizar el estudio del nuevo riesgo de contagio en el Dornier 728 hay que tener una serie de condiciones en cuenta. Por ejemplo, ahora no se tendrá en cuenta el *CFD* como se hizo anteriormente, y se utilizará en su totalidad el modelo del Wells-Riley. Se recuerda que el Dornier 728 consta de un solo pasillo, con 14 filas y cinco asientos en cada fila, en total 70 asientos para pasajeros.

Para realizar el cálculo del riesgo de contagio en el modelo Dornier 728, se ha elaborado un código simplificado en el lenguaje de programación Python que considera diversas variables relevantes. Estas variables incluyen el número de pacientes contagiados I , la cantidad de *quanta* producida q , la ventilación pulmonar de cada pasajero p , la duración del vuelo t y Q , que representa la tasa de ventilación de aire limpio suministrado a la cabina de cinco filas.

Dado que el código no toma en cuenta ventilaciones mixtas ni distribuciones altamente complejas, se considera la distancia entre los pasajeros y utiliza la ecuación de Wells-Riley.

Para una mayor aclaración, el código de Python calcula la probabilidad de contagio utilizando la ecuación de Wells Riley y considerando la distancia entre los pasajeros.

Tras esto, se obtiene una gráfica de la cabina, intentando simular en apariencia a la *Figura 2.19*. Posteriormente, se adjuntan los resultados en la *Figura 3.8* y se comentarán a continuación.

Selección y Comparación de Metodologías

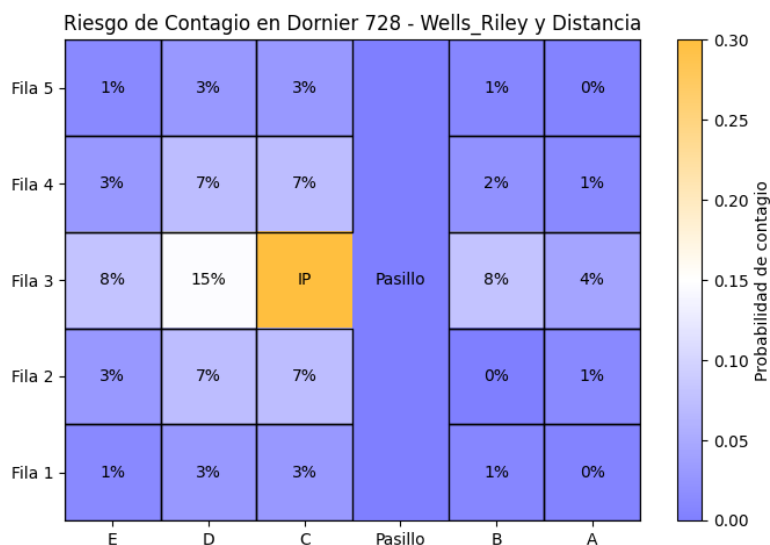


Figura 3.8: Resultados de Wells-Riley y Distancia en Dornier 728

Como se puede observar, el factor de la distancia tiene una gran relevancia, ya que aumenta considerablemente el resultado del riesgo de contagio en comparación con la *Figura 3.9*. Sin embargo, cabe destacar que estos resultados son similares a los obtenidos con el método Wells-Riley a la distribución de las cabinas, como en la *Figura 3.3*.

Por ejemplo, la distancia entre los asientos alejados por el pasillo tiene sentido que tengan menos probabilidad de riesgo que los laterales o más cercanos a la Persona Índice. El script de Python está diseñado para tener en cuenta estas distancias entre asientos, pasillos y contingentes, cuyas medidas se muestran en la *Figura B.1*.

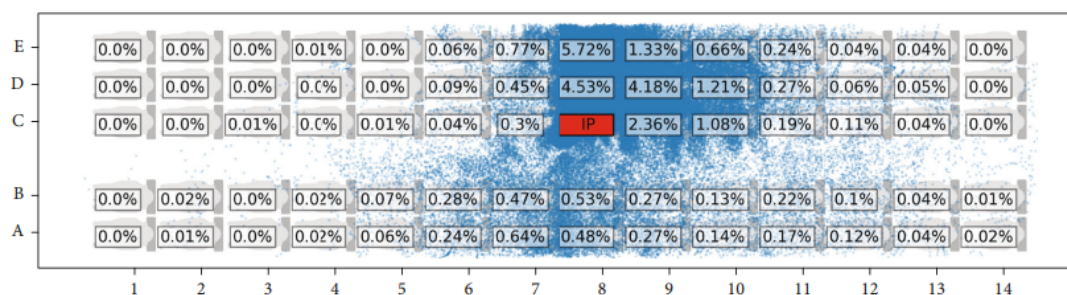


Figura 3.9: Resultados obtenidos con la Metodología CFD y Dosis-Respuesta [29]

Como conclusión, se puede observar que los resultados obtenidos en la *Figura 3.8* parecen mostrar valores significativamente más altos que aquellos representados en la *Figura 3.9*. Por ejemplo, es evidente que en las zonas alrededor del Paciente Índice, ambos resultados muestran una alta probabilidad de contagio. Sin embargo, en la *Figura 3.8*, basada en el modelo de Wells-Riley y la distancia, se puede constatar que a medida que se aleja del Paciente Índice, los valores disminuyen considerablemente. Por otro lado, en la *Figura 3.9*, se puede observar que la probabilidad de contagio tiende a ser más uniforme a lo largo de toda la cabina, ya que se basa en el flujo de

3.2. Comparación de Metodologías

aire, manteniendo así las probabilidades en proporción.

Además, es relevante señalar que en la *Figura 3.8*, los pasajeros con mayor probabilidad de contagio son aquellos que están en la misma fila que el Paciente Índice, es decir, los que se encuentran en su lateral.

Por otra parte, en términos de probabilidad y distancia, es lógico observar la simetría de los resultados, ya que tanto los pasajeros que están detrás como los que están delante del Paciente Índice tienen la misma distancia respecto a él. Para el cálculo de la probabilidad se emplea la ecuación de Wells-Riley y se considera la distancia de todos los asientos con el asiento del Paciente Índice.

Capítulo 4

Conclusiones y Trabajo Futuro

4.1. Conclusiones

Antes de concluir el proyecto, se realizará una breve recapitulación de los puntos abordados en este Trabajo de Fin de Grado y de la implementación de la metodología. Esto permitirá una comprensión profunda de la resolución del proyecto y la visualización de posibles líneas de trabajo abiertas para el futuro.

El estudio exhaustivo llevado a cabo en este proyecto sobre el riesgo de contagio en cabinas de avión ha arrojado resultados significativos y valiosos para comprender mejor la dinámica de la transmisión de enfermedades infecciosas en entornos cerrados y confinados. A través de la exploración de diversas técnicas y modelos matemáticos, se ha logrado obtener una visión integral de los factores que influyen en la propagación de virus como el Covid-19 en este contexto específico.

La introducción del proyecto estableció claramente las motivaciones y los objetivos detrás de esta investigación. En un momento en que la salud pública y la seguridad de los viajes son temas de preocupación global, es crucial comprender y mitigar los riesgos asociados con la propagación de enfermedades infecciosas en entornos tan transitados como las cabinas de avión.

El análisis del estado del arte proporcionó una sólida base teórica al explorar los modelos matemáticos tradicionales como el modelo SIR y sus variaciones, así como los modelos probabilísticos, tales como las ecuaciones de Wells-Riley. Estos modelos permitieron no solo comprender la dinámica de la transmisión del virus, sino también evaluar la eficacia de diferentes estrategias de mitigación y control.

La selección y comparación de técnicas representó un paso crucial en este proyecto, ya que permitió identificar las metodologías más adecuadas para evaluar el riesgo de contagio en diferentes escenarios. La atención especial prestada a las distintas configuraciones de cabinas y al modelo específico de avión, como el Dornier 728, proporcionó una comprensión más profunda de cómo factores como la distribución del aire y la disposición de los asientos afectan el riesgo de contagio.

El análisis del riesgo importado y exportado permitió explorar los posibles escenarios de contagio en la cabina del avión, lo que resultó en recomendaciones prácticas para implementar medidas de prevención y control más efectivas. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes tanto para la industria de la aviación como para la

salud pública en general, ya que pueden contribuir a la formulación de políticas y protocolos más sólidos para garantizar la seguridad de los pasajeros y la tripulación.

En conclusión, este proyecto ha proporcionado una contribución significativa al campo de la epidemiología aeronáutica al proporcionar una comprensión más profunda del riesgo de contagio en cabinas de avión. Sin embargo, queda mucho trabajo por hacer, y se sugiere que futuras investigaciones se centren en áreas como la mejora de los modelos de transmisión y la validación de los resultados mediante estudios empíricos en condiciones reales de vuelo. Estos esfuerzos continuos son esenciales para garantizar la seguridad y el bienestar de todos los que viajan en avión en el futuro.

A nivel personal, cada fase de este proyecto ha sido una experiencia enriquecedora y gratificante. Desde la fase inicial de investigación y comprensión de las metodologías existentes hasta la aplicación práctica de dichas metodologías, he experimentado un crecimiento significativo tanto en conocimientos como en habilidades. Además, la sensación de contribuir, aunque sea en pequeña medida, al estudio de cómo funcionan los contagios y la protección de la salud pública, ha sido una fuente de motivación y satisfacción. Este proyecto ha fortalecido mi pasión por la investigación epidemiológica y me ha dejado con un profundo sentido de gratitud por la oportunidad de participar en un trabajo con un impacto potencialmente significativo en la sociedad.

4.2. Trabajo Futuro

Para el trabajo futuro, se pueden considerar una serie de áreas clave para continuar avanzando en la investigación sobre el riesgo de contagio en cabinas de avión:

1. Mejora de modelos de transmisión: Se puede explorar el desarrollo de modelos más sofisticados y precisos para capturar la dinámica de la transmisión de enfermedades infecciosas en entornos aeronáuticos. Esto podría incluir la incorporación de factores adicionales, como el comportamiento humano, las características específicas del virus y la efectividad de las medidas de control.
2. Validación empírica: Es crucial validar los resultados obtenidos mediante estudios empíricos en condiciones reales de vuelo. Esto implicaría colaboraciones con aerolíneas y autoridades de salud para recopilar datos epidemiológicos y realizar estudios observacionales en vuelos comerciales.
3. Optimización de medidas de prevención y control: Se puede investigar la efectividad de diferentes medidas de prevención y control, como la ventilación mejorada, el distanciamiento físico y el uso de equipos de protección personal. Esto ayudaría a identificar las estrategias más efectivas para reducir el riesgo de contagio en cabinas de avión.
4. Análisis de escenarios futuros: Con el continuo desarrollo de la pandemia y la posible aparición de nuevas variantes del virus, es importante analizar escenarios futuros y evaluar el impacto potencial en la propagación de enfermedades infecciosas en cabinas de avión. Esto permitiría estar preparados para responder de manera efectiva a futuras amenazas para la salud pública.

Conclusiones y Trabajo Futuro

Estas áreas de trabajo futuro representan oportunidades importantes para avanzar en la comprensión y la gestión del riesgo de contagio en cabinas de avión, y pueden contribuir significativamente a mejorar la seguridad y la salud pública en la industria de la aviación.

Apéndice A

CFD y Dosis-Respuesta en Distribuciones de Cabina

En este apéndice, se explicará el código utilizado en la metodología del capítulo 2.3.2 y en las distribuciones de cabina descritas en el capítulo 2.3.1.5.

En el código se inicializan las variables necesarias para el cálculo. Se han definido una serie de parámetros iniciales para el modelo. Por ejemplo, `num_filas` y `num_asientos_por_fila`, en las filas 2 y 3 del *Listing A.1*, indican el número de filas y el número de asientos por fila en el entorno donde se realizará el estudio.

- `indice_fila` y `indice_asiento`, en las filas 4 y 5 del *Listing A.1*, representan los índices de la fila y el asiento del paciente índice, respectivamente, que serán utilizados posteriormente en el código.
- n_h , en la fila 8 del *Listing A.1*, denota el número total de participantes en el estudio, mientras que m_h , en la fila 9, representa el número de individuos que contraen la enfermedad.
- V , en la fila 10 del *Listing A.1*, indica el nivel de vulnerabilidad supuesto para todos los individuos.
- Finalmente, D_{in} , de las filas 13 a la 19 del *Listing A.1*, es una matriz que contiene los valores obtenidos en la Figura 3.1.

```
1 # Given parameters
2 num_filas = 5
3 num_asientos_por_fila = 5
4 indice_fila = 2 # PI's row
5 indice_asiento = 3 # PI's column
6
7 # Data for k_h calculation
8 n_h = 20 # Total number of participants
9 m_h = 1 # People with covid
10 V = 1 # Max vulnerability
11
12 # D_in from the article
13 D_in = [
14     [3.2e-02, 3.8e-02, 1, 5.0e-03, 1.1e-02],
```

```

15         [8.5e-02, 6.3e-02, 1, 4.0e-02, 5.9e-02],
16         [5.4e-02, 7.0e-02, 1, 1.0, 6.2e-01],
17         [3.6e-02, 3.6e-02, 1, 3.2e-01, 5.7e-01],
18         [1.8e-02, 1.7e-02, 1, 1.4e-01, 1.6e-01]
19     ]

```

Listing A.1: Parámetros dados

Después, se procede a explicar el cálculo de las probabilidades de contagio.

- En primer lugar, se calcula k_h , de las líneas 2 a la 5 del *Listing A.2*, es una matriz de coeficientes obtenidos mediante la fórmula 2.48, utilizando los valores de D_{in} .
- Luego, se define una función llamada `calcular_probabilidades`, definida de la línea 8 a la 17 del *Listing A.2*, que toma D_{in} y k_h como entrada, y calcula las probabilidades de contagio para cada asiento utilizando las ecuaciones mencionadas, como la 2.47.
- A continuación, se itera sobre cada asiento en el entorno de estudio, calculando la probabilidad de contagio en función de la distancia y la vulnerabilidad del individuo.
- Si el asiento coincide con el de la persona índice, la probabilidad se establece en 1, ya que esta persona es la referencia.
- Finalmente, en la línea 20 del *Listing A.2*, se calculan las probabilidades de contagio para cada asiento en el lugar de estudio y se almacenan en la matriz `probabilidades`. Además, se procede a mostrar el gráfico.

```

1     # Calculation of k_h with each value of D_in
2     k_h = np.zeros((num_filas, num_asientos_por_fila))
3     for i in range(num_filas):
4         for j in range(num_asientos_por_fila):
5             k_h[i, j] = (np.log(1 - m_h / n_h)) / D_in[i][j]
6
7     # Function to calculate the contagion risk using the given
8     # equations
9     def calcular_probabilidades(D_in, k_h):
10        probabilidades = np.zeros_like(D_in)
11        for i in range(num_filas):
12            for j in range(num_asientos_por_fila):
13                if j != 2: # Ignore the aisle column
14                    if i == indice_fila and j == indice_asiento:
15                        probabilidades[i, j] = 1 # Assign 100
16                        # to the seat for the index person
17                    else:
18                        probabilidades[i, j] = V * (1 - np.exp
19                            (-11.23e-02 * D_in[i][j]))
20        return probabilidades

```

Listing A.2: Calcular el Riesgo de Contagio

Apéndice B

Wells-Riley y Distancia en avión Dornier 728

A continuación se detallan las partes principales del código, el cual calcula probabilidad de contagio de la metodología empleada en el capítulo 2.3.1.5 con la cabina del avión Dornier 728 mencionado en el capítulo 2.3.2:

- Se definen los parámetros del avión, como el número de filas y el número de asientos por fila, así como el índice de la fila y el asiento del paciente índice.
- Se establecen los parámetros para el cálculo de la probabilidad según la ecuación de Wells Riley, que incluyen el número de pacientes contagiados, la cantidad de quanta producida, la ventilación pulmonar de cada persona susceptible, la duración de la exposición y la tasa de ventilación de aire limpio suministrado a la cabina. Todos los parámetros han sido mencionados a lo largo del TFG en el capítulo 2.

```
1 # Dornier728 Data
2 num_filas = 6
3 num_asientos_por_fila = 14
4 indice_fila = 2 # Row
5 indice_asiento = 7 # Column
6
7 # Wells-Riley parameters
8 I = 1 # Number of infected patients
9 q = 20 # Quanta produced per infected patient (m^3*h^-1)
10 p = 0.35 # Pulmonary ventilation rate per susceptible
    person (m^3/h)
11 t = 3 # Duration of exposure (hours)
12 Q = 36 # 10 L/s approx 36 (m^3/h)
13
14 result = -((I*q*p*t)/Q)
```

Listing B.1: Inicialización de Variables

- Se definen las distancias entre los asientos, el pasillo y las filas. Esta información se ha obtenido a partir de distintas búsquedas del avión Dornier 728. En la *Figura B.1* se muestran las medidas necesarias.

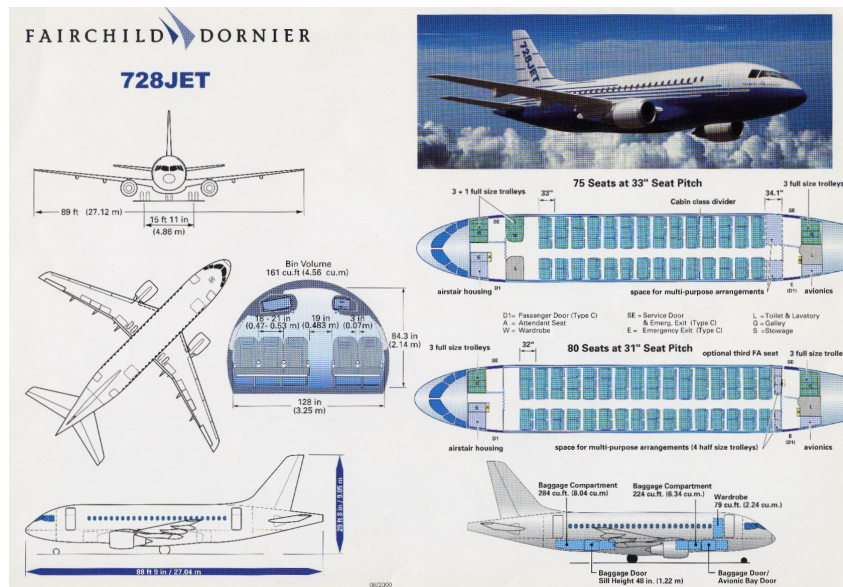


Figura B.1: Medidas para el avión Dornier 728 [30]

Como se puede observar, esta figura representa las medidas exactas para el Dornier 728. Por ejemplo, se pueden apreciar las diferentes zonas del avión y sus medidas correspondientes, como las alas, la cabina, la longitud total y diversos compartimentos esenciales. Al realizar una comparación de métodos y ahora utilizar un factor tan importante como la distancia, se requiere la precisión de estas variables. Por ejemplo, hay medidas que no son perceptibles a simple vista, como la distribución de aire o las gotas de saliva en el mismo, pero algo tan crucial como la distancia entre asientos es algo que se puede observar en cualquier cabina de avión. Por lo tanto, la necesidad de elegir y conocer estas variables es la razón por la cual se inicializan en el código de Python.

```

1 # Specified distances
2 distancia_asiento = 0.6 # Distance between seats in the
   same row
3 distancia_pasillo = 0.5 # Distance between seats and the
   aisle
4 distancia_fila = 0.9 # Distance between rows

```

Listing B.2: Inicialización de Variables 2

- Se crea una función llamada `calcular_probabilidad_contagio` que toma la distancia como entrada y calcula la probabilidad de contagio utilizando la ecuación de Wells-Riley.

```

1 # Function to calculate the probability of infection
2 def calcular_probabilidad_contagio(distancia):
3 # Calculate the probability using the Wells Riley equation
   and considering the distance
4     P = (1 - np.exp(result)) * np.exp(-distancia)
5     return P

```

Listing B.3: Función `calcular_probabilidad_contagio`

- Se itera sobre cada asiento en la cabina del avión para calcular la probabilidad de contagio, considerando la distancia al paciente índice y utilizando la función `calcular_probabilidad_contagio`.

```
1     # Calculate the infection probability for each seat
2     probabilidades = np.zeros((num_filas, num_asientos_por_fila)
3                               )
4
5     for i in range(num_filas):
6         for j in range(num_asientos_por_fila):
7             if j == 3: # If it's the aisle row
8                 probabilidades[i, j] = 0 # Set probability to 0
9                 (blank)
10            else:
11                if i == indice_fila and j == indice_asiento:
12                    probabilidades[i, j] = 1 # Assign 100 to
13                    seat C8
14                else:
15                    if i == indice_fila: # If it's the same row
16                        as the index patient
17                            if j in [0, 1]: # If the seat is next to
18                                the IP
19                                    dist_total = distancia_pasillo + abs
20                                        (j - indice_asiento) *
21                                        distancia_asiento
22                                else: # If the seat is not next to IP
23                                    and aisle
24                                        dist_total = distancia_pasillo + abs
25                                            (j - indice_asiento) *
26                                            distancia_asiento
27                            else:
28                                if j in [0, 1]: # If the column is next
29                                    to the aisle
30                                        dist_total = abs(i - indice_asiento)
31                                            * distancia_fila + abs(j -
32                                                indice_fila) * distancia_fila
33                                else: # If the column is not next to the
34                                    aisle
35                                        dist_total = distancia_fila + abs(i
36                                            - indice_asiento) *
37                                            distancia_fila + abs(j -
38                                                indice_fila) * distancia_asiento
39
40                            # Calculate the infection probability
41                            considering the distance
42                            probabilidades[i, j] =
43                                calcular_probabilidad_contagio(dist_total
44                                                                    )
```

Listing B.4: Calcular probabilidad de contagio

-
- Se traza un gráfico de la cabina del avión con las probabilidades de contagio calculadas, utilizando `imshow` para mostrar la matriz de probabilidades como una imagen, y se añade una barra de color para indicar la probabilidad de contagio.

Bibliografía


- [1] Organización Mundial de la salud (OMS). *Coronavirus*. 2020. URL: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-\(covid-19\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/coronavirus-disease-(covid-19)) (visitado 10-02-2024).
- [2] Joseph T Wu, Kathy Leung y Gabriel M Leung. «Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study.» En: *The Lancet* (2020), pág. 10. DOI: 10.4271/2021-01-0036.
- [3] Dalin Li et al. «Estimating the scale of COVID-19 Epidemic in the United States: Simulations Based on Air Traffic directly from Wuhan, China». En: *medRxiv* (2020). DOI: 10.1101/2020.03.06.20031880.
- [4] Nicola Murphy et al. «A large national outbreak of COVID-19 linked to air travel, Ireland, summer 2020». En: *Eurosurveillance* (2020). DOI: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.42.2001624.
- [5] Panayotis Christidis y Aris Christodoulou. «The Predictive Capacity of Air Travel Patterns During the Global Spread of the COVID-19 Pandemic: Risk, Uncertainty and Randomness». En: *International Journal of Environmental Research and Public Health* (mayo de 2020). DOI: 10.3390/ijerph17103356.
- [6] Raymond Horstman y Hamid Rahai. «A Risk Assessment of an Airborne Disease inside the Cabin of a Passenger Airplane». En: vol. 3. Mar. de 2021, págs. 1263-1271. DOI: 10.4271/2021-01-0036.
- [7] Organización Mundial de la Salud. *Virus de la Gripe*. 2020. URL: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(seasonal\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(seasonal)) (visitado 10-02-2024).
- [8] John S. Brownstein, Cameron J. Wolfe y Kenneth D. Mandl. «Empirical evidence for the effect of airline travel on inter-regional influenza spread in the United States». En: *PLoS Medicine* (2006). DOI: 10.1371/journal.pmed.0030401.
- [9] C. Viboud et al. «Air Travel and the Spread of Influenza: Important Caveats». En: *PLoS Medicine* (2006). DOI: 10.1371/journal.pmed.0030503.
- [10] D. Balcan et al. «Modeling the spatial spread of infectious diseases: the GLObal Epidemic and Mobility computational model». En: *Journal of Computational Science* (2010). DOI: 10.1016/j.jocs.2010.07.002.
- [11] W. O. Kermack y McKendrick. «A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics». En: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 115 (1927), págs. 700-721. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:3670796>.
- [12] Varsha Tolani Bhagtani. «Generalización del Modelo SIR para la Predicción de Propagación de Epidemias». En: *Tesis Fin de Máster del Máster Universitario de*

- Inteligencia Artificial - Universidad Politécnica de Madrid (UPM)* (jul. de 2022), págs. 19-26.
- [13] Javier García Moreno et al. «On-line platform for the short-term prediction of risk of expansion of epidemics: Proof-of-concept based on COVID-19 evolution». En: Publisher Copyright: © ATM 2021. All rights reserved.; 14th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, ATM 2021 ; Conference date: 20-09-2021 Through 24-09-2021. 2021.
- [14] Y. Ling et al. «Persistence and clearance of viral RNA in 2019 novel coronavirus disease rehabilitation patients». En: *Chinese Medical Journal* 133.9 (2020), págs. 1039-1043. DOI: 10.1097/CM9.0000000000000774.
- [15] Fiona P. Havers, Carrie Reed y ... Natalie J. Lim. «Seroprevalence of Antibodies to SARS-CoV-2 in 10 Sites in the United States, March 23-May 12, 2020». En: *JAMA Internal Medicine* (2020). DOI: 10.1001/jamainternmed.2020.4130.
- [16] Arnold Barnett y Fleming K. «Covid-19 Risk Among Airline Passengers: Should the Middle Seat Stay Empty?» En: *medRxiv* 2020 (2020), pág. 31. DOI: 10.1101/2020.07.02.20143826.
- [17] Hongyong Wang et al. «Study on evolution characteristics of air traffic situation complexity based on complex network theory». En: *Aerospace Science and Technology* 2020 (), pág. 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.09.016>.
- [18] Shanmei Li et al. «Data-Driven Modeling of Systemic Air Traffic Delay Propagation: An Epidemic Model Approach». En: *Journal of Advanced Transportation* (ago. de 2020). DOI: 10.1155/2020/8816615.
- [19] «Airborne Contagion and Air Hygiene: An Ecological Study of Droplet Infections». En: *Journal of the American Medical Association* (sep. de 1955). DOI: 10.1001/jama.1955.02960180092033.
- [20] G. Buonanno, L. Stabile y L. Morawska. «Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment». En: *Environment International* 141 (2020), pág. 105794.
- [21] Edward C. Riley, George Murphy y Richard L. Riley. «Airborne spread of measles in a suburban elementary school». En: *American Journal of Epidemiology* 107 (1978), págs. 421-432.
- [22] C. Sun y Z. Zhai. «The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission». En: *Sustainable Cities and Society* 62 (2020), pág. 102390.
- [23] Z. Zhang et al. «Disease transmission through expiratory aerosols on an urban bus». En: *Physics of Fluids* 33.1 (2021), pág. 015116.
- [24] M. Konstantinov y C. Wagner. «Numerical simulation of the thermal comfort in a train cabin». En: *International Journal of Railway Technology* 4.3 (2015), págs. 69-88.
- [25] Rui You et al. «Evaluating the commercial airliner cabin environment with different air distribution systems». En: *Indoor Air* (2019). DOI: 10.1111/ina.12578.
- [26] Mingxin Liu et al. «Experimental investigation of air distribution in an airliner cabin mockup with displacement ventilation». En: *Building and Environment* 191 (2021), pág. 107577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107577>.
- [27] Mingxin Liu et al. «Evaluation of different air distribution systems in a commercial airliner cabin in terms of comfort and COVID-19 infection risk». En:

BIBLIOGRAFÍA

- Building and Environment* 208 (2022), pág. 108590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108590>.
- [28] Feng Wang et al. «Evaluation of infection probability of Covid-19 in different types of airliner cabins». En: *Building and Environment* 234 (2023), pág. 110159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110159>.
- [29] Florian Webner et al. «A Direct Infection Risk Model for CFD Predictions and Its Application to SARS-CoV-2 Aircraft Cabin Transmission». En: *Indoor Air* 9927275 (2024), pág. 18. DOI: 10.1155/2024/9927275.
- [30] Nobarrelrolls. *Fairchild Dornier 728: Una Apuesta Muy Arriesgada*. <https://nobarrelrolls.blogspot.com/2023/08/fairchild-dornier-728-una-apuesta-muy.html>. 2023. (Visitado 21-05-2024).

Este documento esta firmado por



Firmante	CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
Fecha/Hora	Sun Jun 02 20:23:17 CEST 2024
Emisor del Certificado	EMAILADDRESS=camanager@etsiinf.upm.es, CN=CA ETS Ingenieros Informaticos, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
Numero de Serie	561
Metodo	urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature)