



MÁSTER EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER ESTUDIO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FLUJO DE PASAJEROS EN UNA TERMINAL AEROPORTUARIA PARA UN ESCENARIO COVID-19

Autor: Alejandro Jerez Pozo
Director: Ignacio Tornos de Inza

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio y simulación del flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria para un escenario
COVID-19

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandro Jerez Pozo

Fecha: ..22../ ..06../ 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Ignacio Tornos de Inza

Fecha: 22 / 06 / 2021



MÁSTER EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ESTUDIO, MODELADO Y SIMULACIÓN DEL FLUJO DE PASAJEROS EN UNA TERMINAL AEROPORTUARIA PARA UN ESCENARIO COVID-19

Autor: Alejandro Jerez Pozo
Director: Ignacio Tornos de Inza

Madrid

Agradecimientos

Son numerosas las personas a las que debo
agradecimiento por ayudarme a culminar
esta etapa tan importante en mi vida.

En especial, a mis padres Mercedes y Teodoro,
por haber sido mi respaldo absoluto durante estos años de Máster.

Sin duda, también, a los mejores profesionales
y excompañeros de ALG que me abrieron las puertas
para hacer este proyecto con ellos
y se dispusieron a ayudarme sobre cualquier duda de la materia.

A Ignacio Tornos de Inza, el Director de este proyecto, por haberme
orientado de forma tan sensata en los lentos difíciles primeros pasos del proyecto.

Y sin duda alguna, al pilar fundamental de mi vida, María,
por darme todas esas lecciones de vida, haber sido el mejor refugio
en aquellos momentos bajos y mi apoyo incondicional
durante tantos años de mi vida,
gracias a ti también.

ESTUDIO Y SIMULACIÓN DEL FLUJO DE PASAJEROS EN UNA TERMINAL AEROPORTUARIA PARA UN ESCENARIO COVID-19

Autor: Jerez Pozo, Alejandro.

Director: Tornos de Inza, Ignacio

Entidad Colaboradora: ALG Infrastructure Consulting S.L.

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente estudio plantea el estudio y simulación de un flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria para diferentes escenarios afectados por el COVID-19. Para ello, se describen los diferentes procesos aeroportuarios que se llevan a cabo, las recomendaciones sanitarias emitidas por las agencias autorizadas y sus implicaciones. Una vez conocido el proceso, se crea el modelo de simulación en la herramienta informática AirTop. Con los resultados arrojados y un post-procesamiento, se encuentran el cuello de botella del proceso (Control de Seguridad), diferentes modelos temporales donde se superan los estándares de calidad y las potenciales soluciones para resolver los puntos críticos.

Palabras clave: Aeropuerto, pasajeros, simulación, AirTop, COVID-19, salidas, gestión aeroportuaria.

STUDY, MODELLING AND SIMULATION OF PASSENGER FLOW IN AN AIRPORT TERMINAL FOR A COVID-19 SCENARIO

Author: Jerez Pozo, Alejandro

Supervisor: Tornos de Inza, Ignacio

Collaborating Entity: ALG Infrastructure Consulting S.L.

ABSTRACT

This study proposes the study and simulation of a passenger flow in an airport terminal for different scenarios affected by COVID-19. To this end, the different airport processes that are carried out, the health recommendations issued by the authorised agencies and their implications are described. Once the process is known, the simulation model is created in the AirTop software tool. With the results and a post-processing, the bottleneck of the process (Security Control), different temporary models where the quality standards are exceeded and the potential solutions to solve the critical points are found.

Keywords: Airport, passengers, simulation, AirTop, COVID-19, departures, airport management.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Motivación del proyecto	5
1.2 Estado de la cuestión	6
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Metodología.....	8
Capítulo 2. Marco Teórico	10
Capítulo 3. Aeropuerto El Dorado – Terminal Satélite	15
3.1 El Dorado, Bogotá	15
Capítulo 4. Creación del Modelo en AirTop y Simulación	21
4.1 Descripción de modelo	21
4.2 Descripción de escenarios.....	31
4.3 Modelado restricciones COVID-19.....	35
4.4 Simulación	40
Capítulo 5. Análisis de Resultados.....	44
5.1 Escenario COVID.....	45
5.2 What-If I: Brote en personal Check-In	57
5.3 What-If II: Ampliación puestos de seguridad.....	62
Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	65
Capítulo 7. Bibliografía.....	72

Índice de figuras

Figura 1 Entrada principal aeropuerto El Dorado. Fuente: Skytraxratings	16
Figura 2 Terminal satélite Puente-Aéreo. Fuente: Wikipedia	17
Figura 3 Imagen Check-In terminal satélite. Fuente: Aviacol.....	17
Figura 4 Plano general del aeropuerto en el modelo de AirTop.....	22
Figura 5 Plano general de la terminal satélite.....	23
Figura 6 Plano de la terminal satélite en el modelo de AirTop	24
Figura 7 Plano de las estancias en el modelo de AirTop.....	24
Figura 8 Plano del recorrido de los pasajeros en el modelo AirTop	25
Figura 9 Objeto Check In	26
Figura 10 Objeto WaitingArea	27
Figura 11 Objeto Queue	28
Figura 12 Objeto DurationRandom	29
Figura 13 Plan de vuelo del modelo de AirTop.....	30
Figura 14 Condición para pasajeros con/sin Check-In hecho previamente.....	31
Figura 15 Perfil de llegadas pasajeros que deben hacer CheckIn.....	33
Figura 16 Perfil de llegadas pasajeros que no tienen que hacer CheckIn.....	33
Figura 17 Passenger Show Time Rule.....	35
Figura 18 Passenger Show Time Rule – Configuración.....	35
Figura 19 Time Duration para perfil de llegadas.....	36
Figura 20 Passenger Properties Generation Rule	36
Figura 21 Time Duration Random para Check-In COVID	37
Figura 22 Check-In con nuevo tiempo de proceso asignado.....	37
Figura 23 Tiempo de proceso de pasabordo en escenario COVID-19	38
Figura 24 Objeto distancia de seguridad	38
Figura 25 Adapter de la terminal.....	39
Figura 26 Modificación WaitingArea para reducir capacidad de asientos.....	40

Figura 27 Consola con controles de simulación.....	41
Figura 28 Listado de PassengerAreaReports creados en el modelo.....	41
Figura 29 Configuración PassengerAreaReport para Check-In	42
Figura 30 Log estado de la simulación con errores de las pistas del aeropuerto.....	42
Figura 31 Corrección error pistas del aeropuerto	43
Figura 32 Data Output del modelo en AirTop.....	44
Figura 33 Simulación escenario COVID – Terminal	46
Figura 34 Simulación escenario COVID – Seguridad + Embarque.....	47
Figura 35 Simulación escenario COVID – Sala de Embarque.....	48
Figura 36 Escenario COVID. Check-In. Pasajeros hora.	48
Figura 37 Escenario COVID. Check-In. Tiempo de cola.....	49
Figura 38 Escenario COVID. Check-In. Distancia de cola.....	50
Figura 39 Escenario COVID. Check-In. Ocupación media.	50
Figura 40 Escenario COVID. Control de seguridad. Pasajeros hora.....	51
Figura 41 Escenario COVID. Control de seguridad. Tiempo de cola	52
Figura 42 Escenario COVID. Control de seguridad. Distancia de cola.	53
Figura 43 Escenario COVID. Salas de embarque. Pasajeros hora.	54
Figura 44 Escenario COVID. Salas de embarque. Ocupación media.	55
Figura 45 Escenario COVID. Pasajeros terminados.	56
Figura 46 Mapa de calor terminal.....	57
Figura 47 Escenario What-If I. Check-In. Pasajeros de entrada.	58
Figura 48 Colas generadas en mostradores Check-In	58
Figura 49 Escenario What-If I. Check-In. Distancia cola.	59
Figura 50 Escenario What-If I. Check-In. Tiempo de espera.....	60
Figura 51 Escenario What-If I. Control de Seguridad. Pasajeros de entrada.	61
Figura 52 Escenario What-If I. Control de Seguridad. Distancia de cola.	62
Figura 53 Escenario What-If II. Control de Seguridad.	63
Figura 54 Escenario What-If II. Control de Seguridad. Distancia de cola.....	63

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de tiempos en el proceso de Seguridad.....	29
Tabla 2 Estándares exigidos en los diferentes procesos. Fuente: IATA	45

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se trata del trabajo “Estudio y simulación del flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria para un escenario COVID-19” desarrollado por el alumno Alejandro Jerez Pozo y con la dirección del profesor D. Ignacio Tornos de Inza.

El proyecto queda enmarcado dentro de la asignatura Trabajo Fin de Máster del Máster en Ingeniería Industrial del curso académico 2020/2021 que el alumno está cursando en la Universidad Pontificia de Comillas.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación que empuja el desarrollo de este trabajo surge debido al interés que poseo por el sector aéreo y todas sus implicaciones: aeropuertos, aeronavegabilidad, seguridad aérea, aerolíneas... Desde el primer momento quise aprovechar esta oportunidad para, después de 6 años de estudio, poder aplicar todas mis capacidades en un tema que además me motiva.

Coincide que a la vez, desarrollo mi periodo de prácticas universitarias en una compañía puntera en consultoría aeronáutica. Cuento con el acceso a datos reales diferentes aeropuertos por lo que de esta forma puedo trabajar sobre un modelo 100% realista. Esta consideración siempre ha sido una prioridad y requisito personal en cuanto al Trabajo Fin de Master, pues ansiaba el hecho de poder trabajar con escenarios y casos no-ideales a los que acostumbramos a lo largo de nuestra etapa universitaria.

Junto a estas motivaciones personales, me gustaría incluir los beneficios que aportará este trabajo a la sociedad, trabajando por una mejor experiencia del usuario en el aeropuerto o incluso ayudando a los operadores aeroportuarios a la explotación de la infraestructura limitada por las restricciones COVID-19. La simulación aporta un valor diferencial en la previsión de futuros escenarios que no se habían planteado hasta ahora y de los que no se tienen certezas. Nos ayudará a predecir el comportamiento de la infraestructura frente a todos los retos sanitarios y sociales que se plantean con la pandemia.

1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Puesto que nos encontramos en una situación tan excepcional dentro de la era moderna, actualmente apenas hay trabajos previos sobre cómo una pandemia de este tamaño afecta al flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria. Para el caso concreto del aeropuerto que se va a estudiar en este trabajo, no existe estudio previo del efecto de la pandemia sobre la terminal.

Sin duda, la excepcionalidad de los tiempos que correr, aportan un carácter muy novedoso al trabajo.

Sin embargo, existen proyectos relacionados con el estudio de los flujos de pasajeros en terminales. Estudios que se hacen para evaluar las capacidades de las infraestructuras aeroportuarias, comprobar los estándares recomendados por las agencias internacionales de transporte aéreo y para evaluar si las actuales terminales aeroportuarias serán capaces de absorber la futura demanda que se espera en el sector.

Este tipo de proyectos son trabajos encargados a firmas de consultoría especializadas en operatividad aeroportuaria y en infraestructura.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se enfocará a estudiar los efectos producidos en el flujo de pasajeros de una terminal aeroportuaria de salidas por las restricciones sanitarias exigidas por las autoridades competentes del sector aeronáutico. De este modo, el trabajo podrá arrojará resultados que concluirán con posibles limitaciones o eventos que alteren el correcto funcionamiento de las instalaciones de la terminal.

Del mismo modo, este trabajo ayudará al entendimiento de cómo plantear un estudio de diferentes escenarios que se ajusten a situaciones específicas para la simulación de la operatividad de un aeropuerto, como base se escenarios futuros para la antelación a limitaciones de capacidad.

Adicionalmente, este proyecto podría servir como documento de familiarización de la herramienta de simulación empleada ya que la creación del modelo será cuidadosamente explicada, particularmente, las funcionalidades que afectan a las restricciones sanitarias.

1.4 OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo queda definido como el estudio y análisis del flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria con los efectos del COVID-19. Se pretenden obtener métricas significativas para la operativa del aeropuerto tales como tiempo de espera medio por cada pasajero en cada cola, ocupación media por pasajero en cada sala del aeropuerto, distancia media de colas en cada proceso...

De esta forma se facilita la evaluación de las limitaciones propias de la infraestructura analizada y las necesidades de modificación o expansión debido a las recomendaciones sanitarias emitidas por IATA (International Air Transport Association) que permitan a las partes interesadas encarar las tomas de decisiones soportadas sobre un sólido análisis.

Para el desarrollo de este proyecto se precisa de una herramienta tecnológica que permita llevar a cabo tales tareas de modelización y simulación de los flujos. Por ello, se ha establecido un contacto con una empresa proveedora de una solución informática que será el principal soporte del trabajo. De esta forma, queda enmarcado dentro de este trabajo el esfuerzo realizado y las relaciones establecidas para lograr un acuerdo privado-universitario y un proyecto académico donde la empresa proveedora del software proporciona una licencia de la herramienta informática que funcione como base al alumno para desarrollar el proyecto.

En conclusión, una aceptable declaración de objetivos para el presente trabajo queda definida de las siguiente forma:

- Evaluación y compilación de las recomendaciones emitidas por las agencias internacionales de seguridad y sanidad para la lucha contra la actual pandemia de COVID-19 en terminales aeroportuarias.

- Definición y recogida de las variables necesarias y datos para la modelización de la experiencia del pasajero a lo largo de la terminal como inputs para el análisis.
- Creación y construcción del modelo de simulación en la herramienta informática AirTop.
- Proposición de escenarios What-If que ayuden a prever y anticipar futuros problemas de congestión en la terminal.
- Evaluación de impacto, evaluación de riesgos y propuesta de acciones conforme a los datos obtenidos en la simulación.

1.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se dispondrá de bibliografía y documentación correspondiente a las recomendaciones y obligaciones emitidas por las principales agencias internacionales de seguridad aeronáutica. Después de su posterior estudio y revisión, se establecerán los parámetros necesarios en el diseño de la infraestructura y condiciones de la circulación de los pasajeros en la terminal.

Se dispondrá del mismo modo de algunos recursos (como los planos de la terminal) facilitados por la empresa donde actualmente el autor de este trabajo se encuentra desarrollando su periodo de prácticas. También, documentación relacionada con métodos de análisis de capacidades operacionales en terminales aeroportuarias.

La metodología de trabajo implica también el uso de la herramienta AirTop comentada en uno de los puntos anteriores del presente documento. En un primer lugar, se hará una revisión de las medidas y restricciones exigidas por las autoridades competentes para la mitigación del riesgo de contagio entre pasajeros y personal dentro de la terminal.

Después, se procederá con la modelización de la infraestructura, disposiciones generales, áreas de la terminal, pasillos, parámetros de modelización etc.. A posteriori se procede con la inclusión de los detalles relacionados con la frecuencia de uso de cada una de las disposiciones que el pasajero hace uso en la terminal. Se definirán los KPIs específicos a estudiar en el proyecto. Por último, se correrá el modelo simulado en tiempo acelerado con

sus correspondiente análisis de resultados y obtención de conclusiones en forma de mejoras para la operatividad de la terminal.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 SIMULACIÓN APLICADA A AEROPUERTOS. BENEFICIOS.

En cuanto a la simulación del flujo de pasajeros, en la literatura (Ingolfsson et al., 2007; Stolletz, 2008) se proponen varios enfoques del desempeño de los sistemas de colas dependientes del tiempo. Los modelos existentes para terminales de pasajeros en aeropuertos que son capaces de simular y analizar los flujos de pasajeros se utilizan principalmente para la planificación y el diseño operativos (Wu y Mengersen, 2013). La mayoría modelos de planificación operativa existentes adoptan un enfoque de modelado basado en agentes (ABM). Estos modelos simulan el comportamiento y el movimiento de pasajeros individuales (los "agentes") dada la distribución espacial del edificio de la terminal, donde a los agentes se les asignan "objetivos" de acuerdo con los pasos del proceso de facilitación de pasajeros (Cheng et al., 2014; Verma et al., 2020).

Un enfoque para modelar la disposición de pasajeros es a través de modelos deterministas, enfoques estocásticos, estimaciones de servidor infinito y diagramas acumulativos. Dichos modelos proporcionan inherentemente un medio para capturar el flujo de pasajeros, ya que se basan en el flujo de pasajeros y su relación con el tiempo, es decir, el tiempo de espera y el tiempo de procesamiento (Tosic, 1992).

Además, (S. Appelt, R. Batta, Li Lin and C. Drury, 2007) establecen una serie de razones por las que utilizar la simulación para el estudio de diferentes escenarios "What-If" en un proceso aeroportuario:

- **Interdependencia de procesos:** Los procesos en un aeropuerto no pueden tratarse totalmente individuales. Forman una cadena de procesos que deben estar adaptados entre sí para crear un flujo suavizado de pasajeros dentro de los límites. En la simulación, estas interdependencias se pueden cuantificar y modelar. Los modelos de simulación nos permiten análisis "What-If".

- **Dinámicas:** Dado que los aeropuertos están orientados a la transferencia de personas, los horarios de los vuelos se configuran de manera que se creen tiempos de conexión cortos. Estas conexiones cortas provocan picos en la llegada y salida de aviones. A su vez, esto implica una fuerte dependencia del tiempo del número de pasajeros que caminan por las diferentes de la Terminal. Este comportamiento dinámico se puede ver detectar en un modelo de simulación, lo que hace posible encontrar la combinación correcta de organización e infraestructura de procesos, ya que incluso en situaciones pico debe ser posible llegar a su avión a tiempo.
- **Escenarios futuros:** Durante la fase de diseño y desarrollo de la infraestructura, se hizo evidente que existían muchas incertidumbres sobre los desarrollos futuros. No es posible esperar hasta que se produzca un cuello de botella en el sistema, puesto que se necesita de un largo tiempo para reaccionar modificando los procesos o aumentando la capacidad. Mediante la construcción de escenarios para diferentes combinaciones de escenarios potenciales, se pueden crear situaciones con un flujo de pasajeros mínimo, máximo y esperado. Los modelos de simulación proporcionan el rango que se puede esperar para el desempeño de los procesos futuros.
- **Evaluación de soluciones:** Cada solución potencial debe evaluarse para comprobar su en el rendimiento del sistema y los efectos integrales. La simulación se conoce como un buen método para comparar diferentes estrategias para la resolución de problemas y estimar la solidez de una solución de forma cuantitativa.

2.2 AIRTOP

Hoy en día, existen varias herramientas de simulación y técnicas disponibles para el modelado y simulación del comportamiento de los sistemas. Particularmente ArcPort (Transoft Solution), CAST (Airport Research Center), WITNESS, AirTop (Transoft), SIMIO (Simio LLC), FlexSim (FlexSim Software Product), MOSIMTEC (Mosimtec LLC), SimEvents from Mathlab (MathWorks) or ARENA Simulation (Rockwell Automation) son

interfaces completas y accesibles al usuario para conseguir robustos modelos de simulación en terminales aeroportuarias.

Airtopsoft, la solución de Transoft Solutions, desarrolla AirTop, el software líder de modelado, simulación y evaluación de la complejidad del tráfico aéreo en tiempo acelerado. Hoy en día, la herramienta AirTop es utilizada por los principales proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP), autoridades aeroportuarias, aerolíneas, laboratorios de investigación y empresas consultoras a nivel mundial.

Dentro de sus amplias funcionalidades, AirTop se utiliza para evaluar el tráfico aéreo y la complejidad del aeropuerto, medir la carga de trabajo del controlador, mejorar el espacio aéreo y la capacidad del aeropuerto...

En concreto, para este trabajo, se ha utilizado el módulo de simulación del lado tierra el cual, incluye las herramientas necesarias para el análisis de operaciones que tienen lugar tanto en las rodaduras del aeropuerto por parte de las aeronaves como las operaciones en las diferentes estancias de la infraestructura por parte de los pasajeros.

En comparación a las otras herramientas de simulación anteriormente mencionadas, AirTop es una herramienta particularmente diseñada para procesos aeroportuarios. Por esto, ofrece una considerable mayor adaptación de sus objetos y funcionalidades a al objetivo de la simulación: un proceso aeroportuario.

2.3 PROCEDIMIENTOS AEROPORTUARIOS

El flujo de pasajeros, como cualquier otro tipo de flujo, se puede definir como transiciones entre nodos. Sin embargo, en el caso del modelado de terminales de aeropuerto, los nodos no son solo elementos estáticos para conectar direcciones de flujo, sino que también sirven como objetos para afectar el flujo de pasajeros (Rodríguez et al., 2021).

La investigación de operaciones se utiliza ampliamente para respaldar decisiones en la planificación y gestión de actividades de aviación (Belobaba et al., 2015). Al analizar los requisitos para las operaciones de Check-In y Seguridad, el aspecto más desafiante es considerar los diferentes elementos que influyen en el desempeño de esos sistemas estocásticos dependientes del tiempo (Stolletz, 2011). Particularmente, las características clave son la llegada de pasajeros y su comportamiento en las colas (Correia et al., 2008). Esta sección revisará los temas de modelado de tasas de llegada, simulación de flujo de pasajeros y caracterización del comportamiento de las colas, y explora la literatura existente sobre estos temas.

La tasa de llegada de los pasajeros de un vuelo depende de la hora de salida programada y del vuelo en sí (Stolletz, 2011). La distribución de la tasa de llegada a lo largo del tiempo (también llamada perfil de anticipación de llegada del pasajero) se apoya, por ejemplo, en el destino, en la categoría de vuelo (negocios, estacional / ocio o chárter) o en la hora del día (De Barros y Tomber, 2007). El proceso de llegada tiene una naturaleza dinámica (variable en el tiempo) y estocástica. El modelo estático determina una planificación de recursos futura y demuestra si el control del proceso y los equipos previstos son suficientes para garantizar una calidad gestión de pasajeros.

Una buena terminal aeroportuaria está determinada no solo por la configuración óptima, sino también por proporcionar un entorno cómodo (y cumplir con ciertos requisitos de espacio) para el pasajero. Un aspecto importante en la evaluación del diseño de las instalaciones aeroportuarias es analizar la congestión y el flujo de pasajeros a través de la terminal del aeropuerto. La congestión de pasajeros dentro de las estancias del aeropuerto se considera un índice muy importante del rendimiento operacional del aeropuerto, al igual que el espacio entre los pasajeros es otro de los factores importantes que determinan los distintos niveles de servicio. Así, la ocupación se presenta como un índice para la evaluación del Nivel de Servicio (LOS) de los KPIs operacionales en un aeropuerto, y la ocupación se presenta como un índice global para la evaluación del LOS para toda la terminal de pasajeros (Correia et al., 2008).

Para estimar la congestión de pasajeros dentro de un área, la capacidad se puede determinar en función de los requisitos espaciales establecidos para cada nivel de servicio. La IATA (2004) ha establecido un conjunto completo de requisitos de ocupación que presenta una clasificación LOS según una escala con medidas que van de la “A” a la “F”. Sin embargo, esta norma no incluye pasarelas.

Capítulo 3. CONTEXTO: AEROPUERTO Y PANDEMIA

COVID-19

El presente capítulo del proyecto detalla el contexto en el que se enmarca el estudio del flujo de pasajeros. Tratará de describir la terminal del aeropuerto que se ha tomado como objeto para su correcto entendimiento por el lector.

Adicionalmente, se hará un contexto para detallar la actual pandemia mundial que azota a casi todos los países del mundo. Las implicaciones sociales que conlleva y cómo se está luchando por parte de los organismos mundiales.

3.1 EL DORADO, BOGOTÁ

El emplazamiento en el cual se llevará a cabo la realización del estudio de simulación se trata del Aeropuerto Internacional El Dorado, en la ciudad Colombiana de Bogotá.

El Aeropuerto Internacional El Dorado (con código IATA: BOG) es un aeropuerto internacional que sirve a Bogotá, Colombia y sus alrededores. El aeropuerto está situado principalmente en el distrito de Fontibón de Bogotá. Atendió a más de 32,7 millones de pasajeros y 741.000 toneladas de carga durante el curso de 2019 (IATA Air Traffic Statistics, 2019). Esto hace que El Dorado sea el tercer aeropuerto más ocupado de América Latina en términos de tráfico de pasajeros, y el más ocupado en términos de carga. El Dorado es también, con diferencia, el aeropuerto más activo e importante de Colombia, con algo menos de la mitad (49%) del tráfico aéreo del país.

El Dorado es un centro de operaciones para la compañía aérea de bandera colombiana Avianca, LATAM Colombia, Satena, Wingo y varias compañías de carga. Los principales accionistas del activo son la Operadora Aeroportuaria Internacional OPAIN (encargada de la explotación) con una participación aproximada del 35%, la empresa privada CSS-

Constructores, con alrededor de un 30% y un consorcio compuesto por empresas colombianas de construcción e ingeniería. Cabe destacar la peculiar participación de entorno al 1% de la compañía suiza Flughafen Zürich AG, siendo ésta la única accionista internacional de la concesión.



Figura 1 Entrada principal aeropuerto El Dorado. Fuente: Skytraxratings

El aeropuerto dispone de 2 pares de pistas (13L/31R y 13R/31L) de longitud 3.800 m a unos 2.648 m de elevación.

Para su operatividad, el aeropuerto cuenta con dos terminales. La terminal T1 construida en forma de “h”, se divide en dos diques: dique internacional en el lado Norte y dique doméstico en el lado sur. Esta terminal contiene 32 puertas: 10 para vuelos internacionales, 17 para vuelos domésticos y 5 puertas remotas. Sin embargo, debido a la alta demanda de pasajeros que experimentó el aeropuerto, en 2016 se replanteó el uso de la terminal satélite (hasta el momento prácticamente en desuso o empleada para vuelos militares) para operar vuelos domésticos por las compañías Satena y EasyFly. Fue denominada la Terminal Puente Aéreo.

Desde el 29 de abril de 2018, acoge operaciones domésticas con llegada y salida de vuelos a 25 destinos nacionales.



Figura 2 Terminal satélite Puente-Aéreo. Fuente: Wikipedia



Figura 3 Imagen Check-In terminal satélite. Fuente: Aviacol

3.2 PANDEMIA COVID-19

El Coronavirus 2019 (COVID-19) es una enfermedad contagiosa causada por el síndrome respiratorio agudo severo coronavirus 2 (SARS-CoV-2). El primer caso se identificó en Wuhan, China, en diciembre de 2019. Desde entonces se ha extendido por todo el mundo, lo que ha provocado la actual pandemia en curso.

Los síntomas de COVID-19 son variables, pero a menudo incluyen fiebre, tos, fatiga, dificultad para respirar y pérdida del olfato y el gusto.

El virus que causa COVID-19 se propaga principalmente cuando una persona infectada está en contacto cercano con otra persona. Las pequeñas gotas y los aerosoles que contienen el virus pueden propagarse desde la nariz y la boca de una persona infectada cuando respira, tose, estornuda, canta o habla. Otras personas se infectan si el virus entra en su boca, nariz u ojos. El virus también puede propagarse a través de superficies contaminadas, aunque no se cree que esta sea la ruta principal de transmisión.

Las medidas preventivas incluyen el distanciamiento físico o social, la cuarentena, la ventilación de los espacios interiores, cubrirse al toser y estornudar, lavarse las manos y mantener las manos sin lavar lejos de la cara. Se ha recomendado o incluso obligado, el uso de mascarillas o máscaras faciales en entornos públicos para minimizar el riesgo de transmisiones.

Los primeros esfuerzos por parte de las autoridades, dada la situación de total descontrol de la transmisión del virus, fueron cancelar vuelos que conectaban con destinos donde la incidencia fuese alarmante. Mas adelante, los gobiernos centrales de los países decidieron llevar a cabo una serie de confinamientos que ayudaran a erradicar la transmisividad local del virus entre los ciudadanos. Estos confinamientos tuvieron una duración variable, en función de la incidencia de cada país.

La pandemia, sin embargo, ha afectado en diferentes ritmos a varias partes del planeta: mientras que el origen del virus fue China, los primeros países en verse afectados fueron

asiáticos, mas tarde, el virus llegó a Europa y posteriormente América del Norte y América del Sur.

Cuando paulatinamente se levantaron dichas restricciones, se incorporaron al día a día de los ciudadanos una serie de recomendaciones y obligaciones, emitidas por las autoridades mundiales de la salud. Se pueden resumir en los siguientes 5 puntos:

- Uso de mascarilla en establecimientos públicos.
- Distancia social de 1,5 metros.
- Desinfección habitual de superficies.
- Reducciones de aforo en sitios cerrados.
- Toma de temperatura en lugares de mayor afluencia de público.

Estas han sido en general las medidas que se han tomado para hacer frente a la pandemia mientras se desarrolla una posible solución mas a largo plazo como podría ser el empleo de vacunas.

En el caso que nos concierne, los aeropuertos, la IATA ha ido emitiendo las nuevas medidas y restricciones que deben de llevar a cabo los operadores aeroportuarios para la operatividad del aeropuerto. En algunas ocasiones, estas medidas son promovidas por administraciones centrales o regionales del país del aeropuerto, como en el caso de los tests en origen o la obligatoriedad de presentar un test negativo las 48h antes del vuelo.

En general, las medidas que se han adoptado se pueden clasificar en dos tipos: aquellas que modifican tiempos de procesos o medidas alteran las capacidades físicas del entorno.

En el primer grupo quedan enmarcadas medidas como la realización de tests (test rápidos y PCR's) en el aeropuerto, la toma de temperatura, comprobaciones de documentación sanitaria...

En el segundo grupo, las restricciones que tienen efecto son la distancia de seguridad que afecta tanto a las colas como a las capacidades de algunas salas de espera o procesos.

Además, se han instaurado una serie de medidas a título de recomendación para los pasajeros como el adelantar en el tiempo la llegada a la terminal hasta 30 min. (puesto que en general, los tiempos de proceso han aumentado) o fomentar el auto-CheckIn para reducir interacción con personal aeroportuario.

Es importante remarcar que la distancia social entre los pasajeros ha de tenerse en cuenta tanto en la disposición de las colas como el rendimiento de los procesos ya que, por ejemplo, en los controles de seguridad, el espacio para que el pasajero deposite sus pertenencias en la cinta del escáner, también afecta al rendimiento en sí del proceso.

Capítulo 4. CREACIÓN DEL MODELO EN AIRTOP Y SIMULACIÓN

En este capítulo del proyecto se pretende describir cómo se ha creado el modelo de la terminal en la herramienta informática AirTop para su posterior simulación. Además, se pretenden esbozar los dos principales escenarios de simulación en los cuales se va a llevar el análisis mas profundo: un escenario pre-COVID de cómo funcionaba la terminal en un día previo a la pandemia, y, un escenario con restricciones COVID-19 y un plan de vuelo de situación pre-COVID.

Así mismo, se incorporará las modificaciones y restricciones sanitarias al modelo de AirTop y se correrán varias simulaciones después de depurar algunos errores que arroja el sistema.

4.1 DESCRIPCIÓN DE MODELO

La herramienta de simulación AirTop cuenta con un amplio abanico de funcionalidades que cubren procesos tanto del lado aire como del lado tierra. Sin embargo, resulta imposible aislar alguna de estas partes para la simulación de ella: se debe configurar todos los parámetros de ambas modalidades (aire y tierra) para su correcto funcionamiento.

Puesto que la parte del lado aire, tanto la aproximación de las aeronaves al aeropuerto como los procedimientos de rodadura y taxi en plataforma, queda fuera del alcance de este trabajo, se ha utilizado un proyecto de la empresa colaboradora, ALG Global Infrastructure, como base. Un proyecto realizado en el año 2018 en el que se pretendía analizar diferentes situaciones en la terminal internacional del aeropuerto. De hecho, esta terminal es la principal de operación y la que mas años lleva operativa. Como se puede apreciar en la Figura 4, ésta terminal corresponde a la situada en el centro de la imagen.

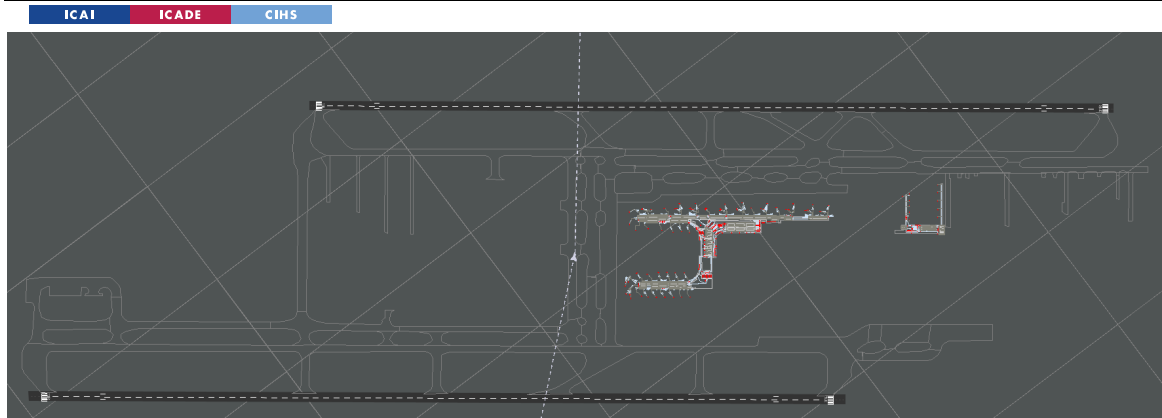


Figura 4 Plano general del aeropuerto en el modelo de AirTop

Sin embargo, se ha consultado con los compañeros de ALG del proyecto de 2018 la posibilidad de estudiar una terminal destinada a vuelos domésticos: se trata de la terminal satélite que aparece en la parte derecha de la Figura 4.

Para el modelado de la terminal satélite, se requiere de un archivo .dwg y original de AutoCAD donde se incluyan las delimitaciones físicas de la infraestructura. Este documento ha sido cedido por los compañeros de ALG.

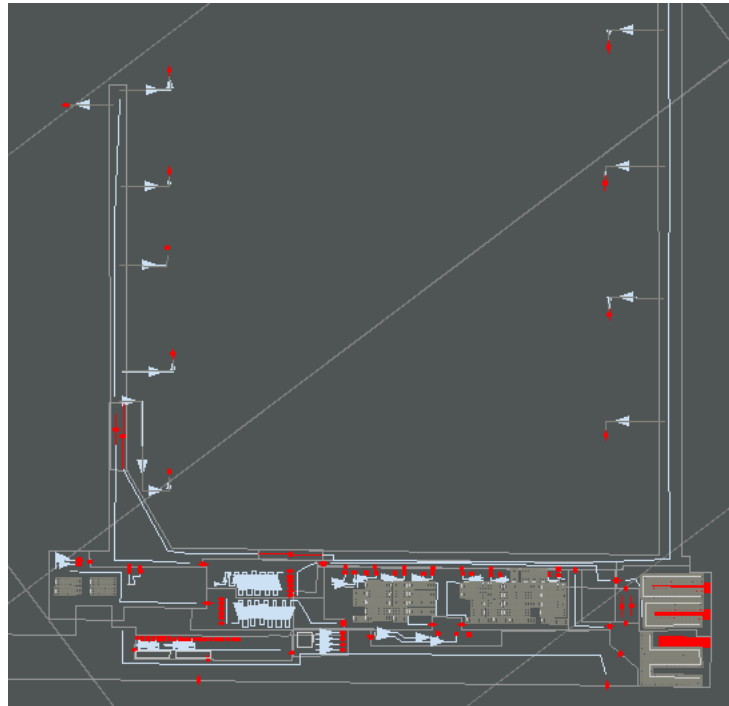


Figura 5 Plano general de la terminal satélite

En la Figura 5 se muestra una vista general de la terminal en forma de U. Los dos laterales corresponden a los diques de embarque en donde las aeronaves se posicionan para el embarque de los pasajeros. La parte inferior es la que alberga las distintas estancias tales como el hall de salidas, Check-In, Control de Tarjeta de Embarque, Control de Seguridad, Salas de Espera, Control de Inmigración/Emigración, Aduanas y Recogida de Equipaje. Del mismo modo, se adjunta en la Figura 6 un plano del detalle de estas áreas para su mejor visualización.

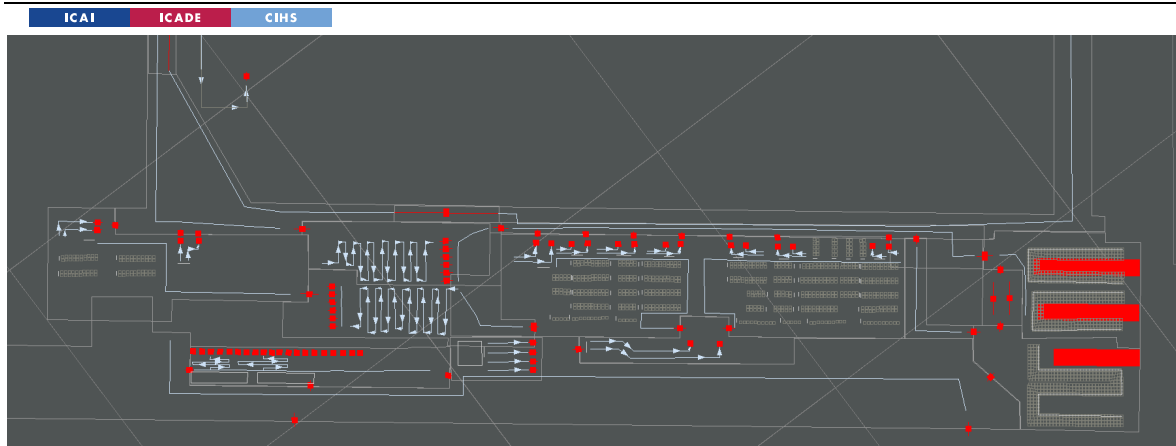


Figura 6 Plano de la terminal satélite en el modelo de AirTop

Una vez presentado el plano general de la terminal objeto, se adjunta en la Figura 7 el detalle de cada estancia de la terminal, identificando las principales estancias.

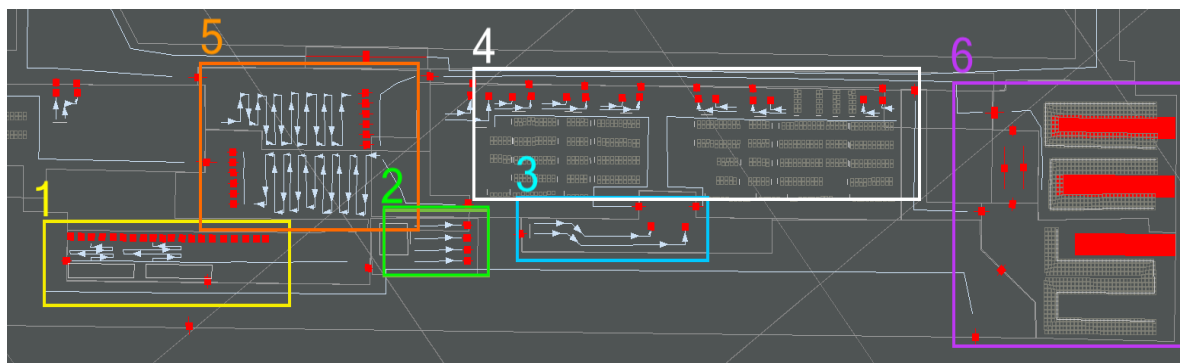


Figura 7 Plano de las estancias en el modelo de AirTop

Por orden de uso, las estancias representadas son:

- 1) Check-In
- 2) Control de tarjeta de embarque
- 3) Control de seguridad
- 4) Sala de espera vuelos DOM
- 5) Emigración/Inmigración
- 6) Recogida de equipaje

Además, en la Figura 8, queda representado el flujo normal que sigue un pasajero. En amarillo se muestra el proceso común para pasajeros DOM e INT. En verde, recorrido extra para los pasajeros INT.

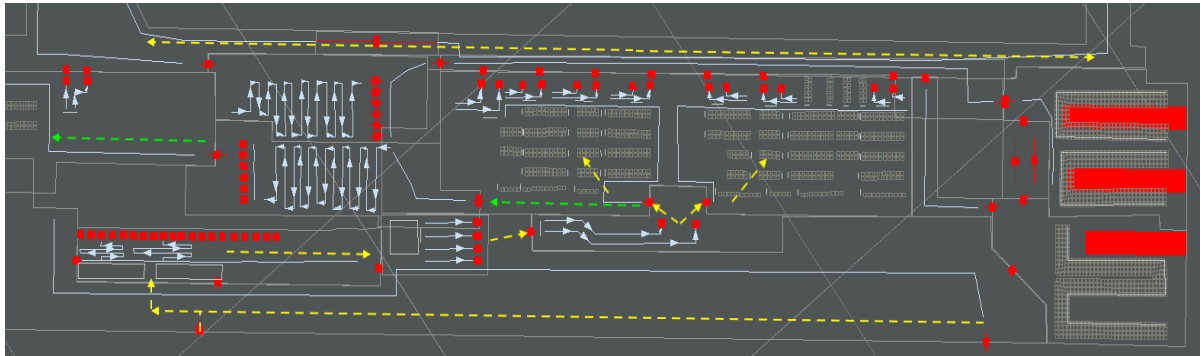


Figura 8 Plano del recorrido de los pasajeros en el modelo AirTop

Para el modelado de sistema, se han empleado diferentes objetos que se pueden encontrar en la herramienta: *Doors*, *Queue Paths*, *Waiting Areas*, *Duration Randoms*, *Building Levels*, *Time Processes*...

Cada elemento es individualmente configurable y necesita de objetos y reglas adicionales que conectan los distintos elementos del sistema y le dan una cohesión general. De esta forma, un puesto de Check-In quedaría configurado como se muestra en la Figura 9:

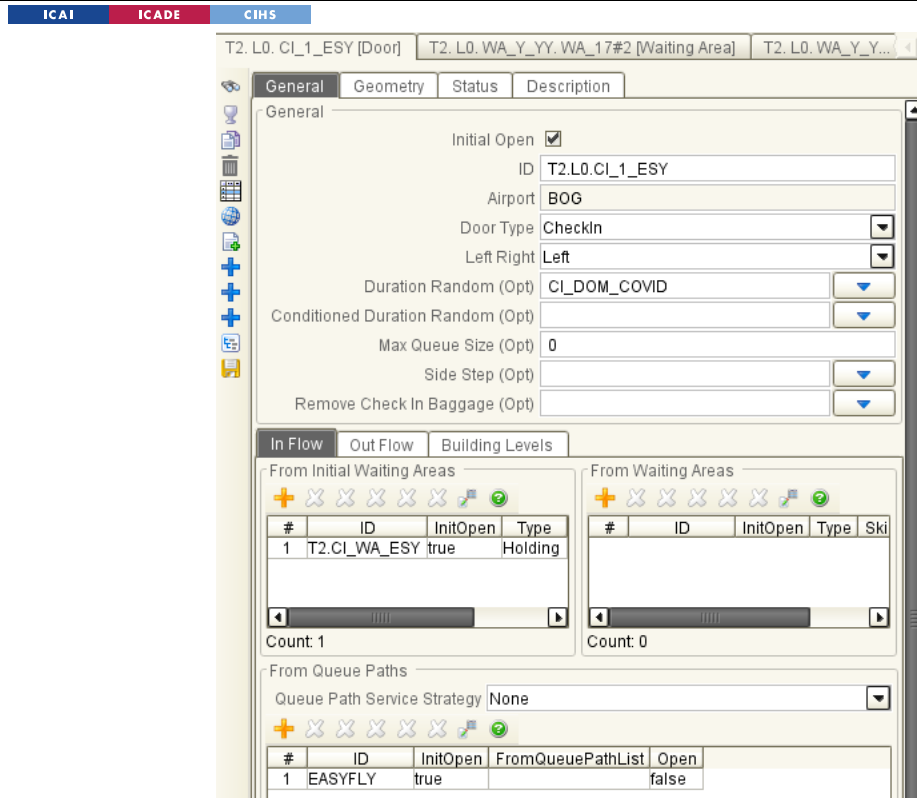


Figura 9 Objeto Check In

Cada proceso es asignado con un *InFlow*, de dónde toma el objeto elemental de la simulación (en nuestro caso, el pasajero), un *OutFlow*, proceso o área que sigue y diferentes parámetros específicos relacionados con geometría física de las estación y colas.

Una sala de espera queda definida como en la Figura 10:

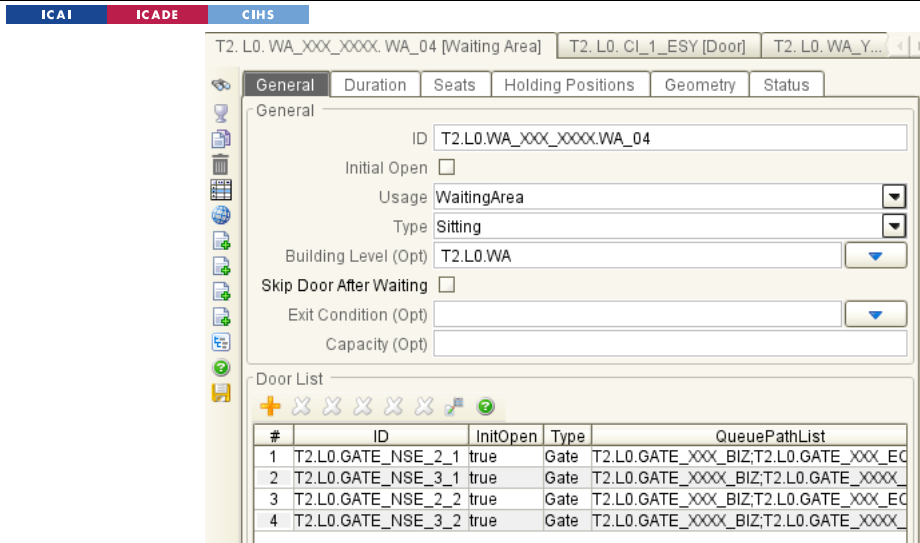


Figura 10 Objeto WaitingArea

En las salas de espera, los pasajeros pueden acomodarse en asientos o esperar de pie. Además, las *WaitingAreas* proveen de pasajeros a las puertas de embarque (relación que también debe ser modelada). Cada sala de espera está configurada el *Building Level* donde se encuentra ubicada, las puertas de acceso a ellas, es decir, los emplazamientos físicos de donde puede proceder cada objeto elemental de la simulación y otra serie de parámetros.

Otro elemento importante de nuestro modelo son las colas de espera. En la Figura 11 se puede ver cómo se configura este elemento.

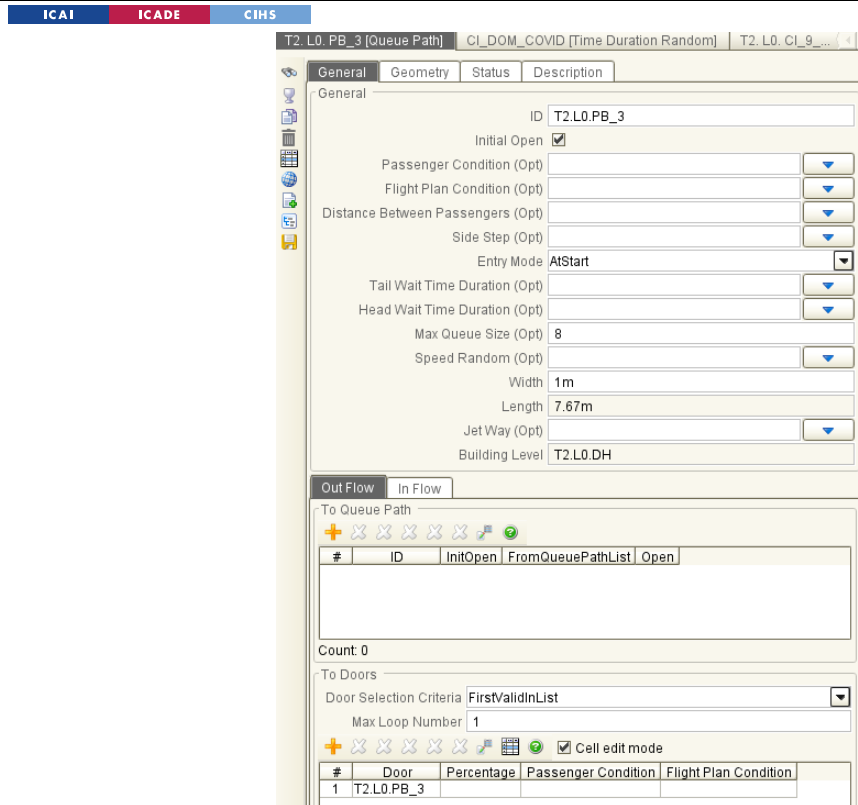


Figura 11 Objeto Queue

El objeto *Queue* puede ser ampliamente configurable: desde eligiendo el tipo o condición de pasajero que puede hacer la cola hasta criterios de selección de puertas para sacar el elemento de la cola, ancho y desviación media transversal de los pasajeros en la cola...

Cada proceso (Check-In, Control Tarjeta de Embarque, Control de Seguridad) lleva asociado un tiempo de proceso. Para ello, se definen varios perfiles de tiempos, como en la Figura 12, que quedan asignados a los procesos.

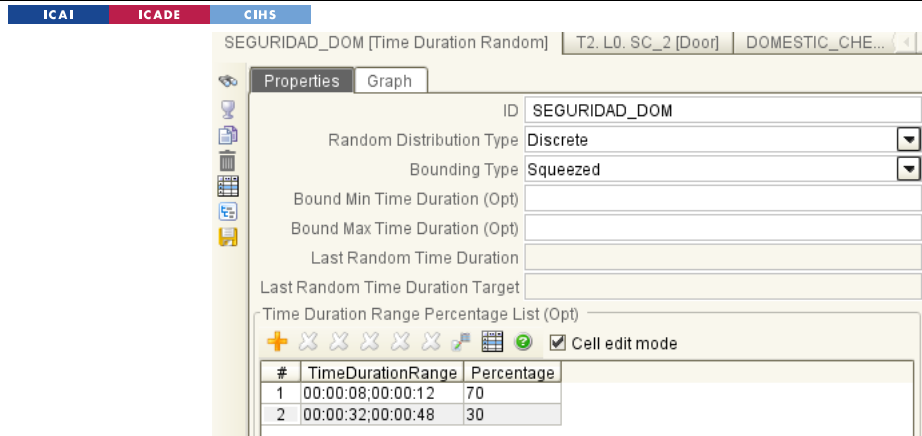


Figura 12 Objeto DurationRandom

Como se ve en la Figura 12, este objeto de duración del proceso de seguridad para vuelos domésticos. Se pueden seleccionar diferentes distribuciones, en este caso se toma una distribución discreta que asigna los siguientes porcentajes de la Tabla 1 a la duración del proceso:

Tabla 1 Distribución de tiempos en el proceso de Seguridad

#	Tiempo de proceso	Porcentaje
1	8 seg – 12 seg	70
2	32 seg – 48 seg	30

Estos datos han sido tomado mediante mediciones empíricas de los compañeros de ALG en la terminal internacional.

En otro orden, toda la creación de demanda de estos procesos, es activada mediante un plan de vuelo que se incorpora en el sistema como input. El plan de vuelo del aeropuerto ha sido obtenido de la página web oficial de IATA para un día con mayor ocupación en la terminal según las recomendaciones de los compañeros de ALG.

El plan de vuelo de la Figura 13 incorpora información de la actividad aeronáutica en el aeropuerto. Recoge datos tales como origen/destino del vuelo, tipo de aeronave, número de llamada, aerolínea, diferentes tiempos y horas de operación, *taxi point* asignado y algunos otros mas técnicos de navegación aérea...

#	Active	Callsign	Co..	Haul	Aircraft	Aircraft Type As String	Aircraft Type	Flight Type	Airline	Reference Ti
13	☒	9R8714_1		SHORT	FAC1192 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
20	☒	9R8722_1		SHORT	FAC1172 [no callsign]	EMB145(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
33	☒	VE9048_1		SHORT	HK5236 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
34	☒	VE9028_1		SHORT	HK5293 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
73	☒	VE9188_1		SHORT	HK5294 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
133	☒	VE9010_2		SHORT	HK5293 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
134	☒	9R8710_2		SHORT	FAC1180 [no callsign]	E70(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
135	☒	9R8724_2		SHORT	FAC1184 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
142	☒	9R8602_2		SHORT	FAC1172 [no callsign]	EMB145(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
143	☒	VE9040_2		SHORT	HK5292 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
149	☒	9R8686_2		SHORT	FAC1191 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
156	☒	VE9000_2		SHORT	HK5070 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
170	☒	9R8732_2		SHORT	FAC1193 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
186	☒	VE9104_2		SHORT	HK5294 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
205	☒	9R8604_2		SHORT	FAC1187 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
215	☒	VE7816_2		SHORT	HK5236 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
216	☒	VE9166_2		SHORT	HK5292 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
221	☒	9R8865_2		SHORT	FAC1192 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
235	☒	9R8615_2		SHORT	FAC1172 [no callsign]	EMB145(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
237	☒	9R8704_2		SHORT	FAC1180 [no callsign]	E70(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
247	☒	9R8645_2		SHORT	FAC1190 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
249	☒	VE9106_2		SHORT	HK5293 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
277	☒	9R8606_2		SHORT	FAC1184 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
280	☒	VE9036_2		SHORT	HK5070 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
284	☒	VE9044_2		SHORT	HK5294 [no callsign]	AT72(SHORT)	AT72(SHORT)	AirCarrier		Departure
285	☒	VE9006_2		SHORT	HK5282 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
292	☒	VE7836_2		SHORT	HK5236 [no callsign]	AT42(SHORT)	AT43(SHORT)	AirCarrier		Departure
309	☒	9R8767_2		SHORT	FAC1172 [no callsign]	EMB145(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure
312	☒	9R8710_2		SHORT	FAC1180 [no callsign]	E70(SHORT)	CRJ1 (SHORT)	AirCarrier		Departure

Figura 13 Plan de vuelo del modelo de AirTop

Como se explica, el plan de vuelo es el generador de “demanda” de pasajeros, es decir, el resto de parámetros de los procesos de la terminal y de los pasajeros se programan en función del plan de vuelo. Esto es, por ejemplo, diferentes reglas para la apertura de mostradores de Check-In con X tiempo de antelación a la apertura de la puerta de embarque. O como el perfil de llegadas de los pasajeros en función al tiempo con antelación a la salida de su vuelo que se muestra en la Figura 15.

Otro parámetro esencial que se debe configurar en el modelo es la regla que asigna a cada pasajero el tener que pasar o no por el proceso de Check-In (pues llega al aeropuerto con el Check-In ya realizado). Se muestra en la Figura 14:

ICAI			ICADE			CIHS		
Door	Simulation log	Problems	Passenger	Waiting Area	Door Selection Rule	Passenger Item Generation Rule	Flight Plan Door Selection Rule	
Excel mode								
#	ID	Active	Configuration	Airport	Flight Plan Condition	Passenger Condition		
1	DOMESTIC_CHECKIN_COVID	☐		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAG		
2	DOMESTIC_CHECKIN	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAG		
3	DOMESTIC_NO_CHECKIN_COVID	☐		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAG		
4	DOMESTIC_NO_CHECKIN	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAG		
5	INTERNATIONAL_CHECKIN	☒		BOG	INTERNATIONAL	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAG		
6	INTERNATIONAL_NO_CHECKIN	☒		BOG	INTERNATIONAL	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAG		

Figura 14 Condición para pasajeros con/sin Check-In hecho previamente.

Esto es, en términos generales, cómo se modela el sistema dentro de la herramienta AirTop.

4.2 DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS

Uno de los principales efectos que ha traído la pandemia a los aeropuertos de prácticamente todo el mundo ha sido la drástica caída de operaciones en las terminales. Además, aun no se has recuperado número de vuelos pre-pandemia. Por ello, hoy en día, no se conoce el comportamiento de los aeropuertos una vez que se recupere el ritmo normal pre-COVID de operaciones al día, pero con las particularidad de aplicar todas las restricciones sanitarias.

Para el estudio objeto de este trabajo, la simulación de un escenario COVID-19 con plan de vuelo anterior a la pandemia, es necesario plantear y conocer los datos de la situación normal antes de la crisis sanitaria. Una vez tengamos datos concretos de esta situación podremos comprar respecto a un escenario simulado.

Por lo tanto, el escenario principal que se propone en este trabajo es: terminal con restricciones sanitarias pero What-If se recupera el plan de vuelo pre-pandemia.

Para el trabajo, como se ha explicado, se van a simular dos escenarios cuyas características son:

Escenario Standard (Base)

Situación de la terminal antes de la pandemia con su operatividad normal. Los tiempos de cada proceso han sido tomados in-situ por los compañeros de ALG mediante mediciones empíricas para la terminal internacional. Como se trata de personal procedente de la misma empresa de seguridad y mismas aerolíneas las que operan en ambas terminales, se asume que el tiempo de proceso es el mismo en las dos terminales.

Escenario What-If

Se aplican las restricciones sanitarias y medidas recomendadas por los organismos pero con un plan de vuelo anterior a la pandemia. Con ello pretendemos analizar la capacidad de la terminal para una potencial situación en la que se recupere los niveles de operaciones previos.

Se procede a enumerar las restricciones y modificaciones que se llevarán a cabo:

- 1) Modificación del perfil de llegadas:** Los pasajeros generalmente llegan antes la terminal. Además, viajeros que apuraban anteriormente la hora de llegada al aeropuerto, ahora lo hacen con algunos minutos mas de antelación. Por último, pasajeros que estaban en el aeropuerto 4 o 5 horas antes de la salida de sus aviones (normalmente pasajeros que hacen conexiones o transbordos en aeropuertos para viajes de largo radio achacables a viajes de ocio), se han reducido. Estas tres hipótesis quedan reflejadas en la comparación de perfiles de llegadas pre-COVID y COVID-19 de las Figuras 15 y 16. Nótese la segregación de pasajeros con Check-In hecho a la llegada de la terminal y pasajero que aún lo tienen que hacer.

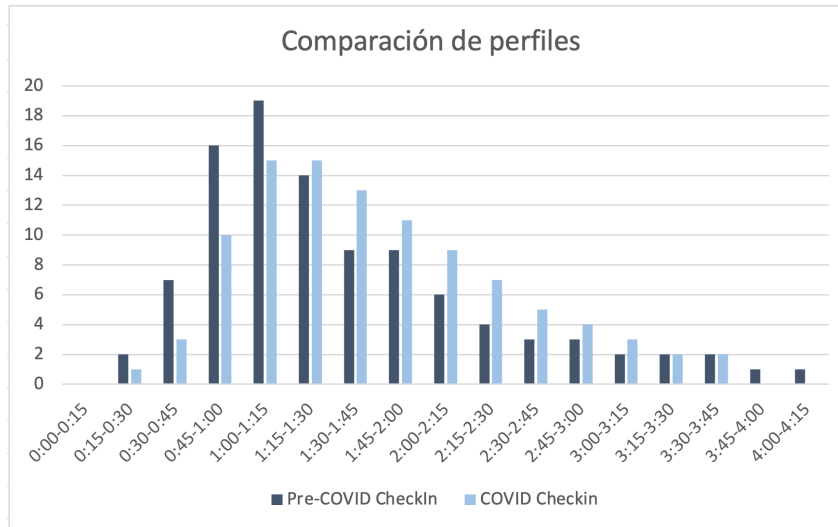


Figura 15 Perfil de llegadas pasajeros que deben hacer CheckIn

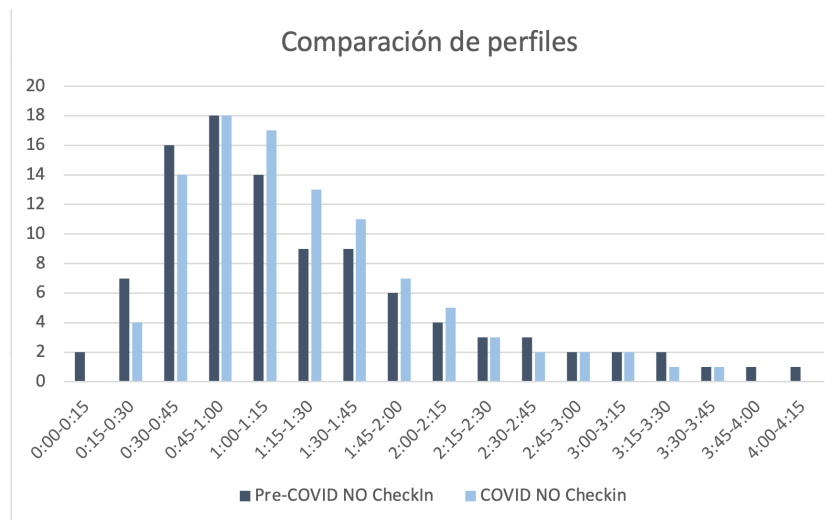


Figura 16 Perfil de llegadas pasajeros que no tienen que hacer CheckIn

- 2) Porcentaje de pasajeros con Check-In hecho a la llegada:** Las aerolíneas aconsejan encarecidamente a los usuarios hacer el Check-In con antelación a la llegada de la terminal. Partíamos de un 40% de pasajeros con Check-In hecho según los datos tomados por ALG en el proyecto de 2018 de la terminal internacional para

vuelos domésticos frente a la hipótesis actual que se plantea en este trabajo de un 60% de pasajeros.

- 3) Tiempos de procesos:** Algunos procesos como el Check-In, han visto aumentado su tiempo de proceso debido a la comprobación de documentación adicional correspondiente a la validez de test diagnóstico de la enfermedad como obligación para poder volar. Por esto, se propone la hipótesis de aumentar en un minuto el tiempo de procesamiento de Check-In.

Además, se incorpora una toma de temperatura en el control de tarjeta de embarque que suma 10 segundos al tiempo de proceso de esta estación.

- 4) Distancia de seguridad en las colas:** Se aumenta a 1,5m la distancia obligatoria entre pasajeros que realizan una misma cola de espera. En general, esta norma es aplicable a toda la amplitud de la terminal pero particularmente necesaria en las colas de espera.

- 5) Reducción capacidad salas de espera:** Esta modificación es como consecuencia también de la distancia social requerida. En las salas de espera previas al embarque de los pasajeros, se bloquean la mitad de los asientos. Uno disponible, uno ocupado. Así sucesivamente en toda la sala. Con ello, se garantiza la distancia de 1,5m entre los usuarios.

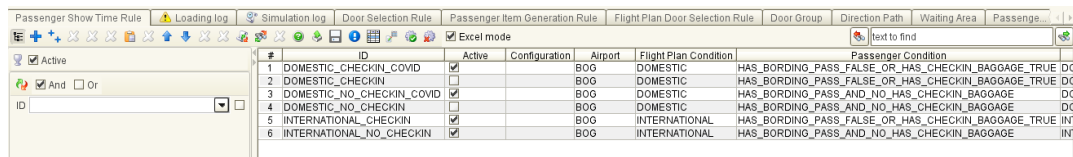
Entre las modificaciones enumeradas se pueden clasificar en dos tipos: unas relacionadas con cambio de patrones en el comportamiento de los pasajeros (puntos 1 y 2) y por otro lado, restricciones explícitas que se llevan a cabo en la terminal (puntos 3, 4 y 5).

Aparte de estos dos escenarios principales, una vez obtenidos y analizados los resultados, se plantearán dos escenarios What-If adicionales para la simulación de situaciones potenciales que se podrían dar con esos resultados y su correspondiente análisis.

4.3 MODELADO RESTRICCIONES COVID-19

En ese apartado se muestra cómo se han incluido las modificaciones enunciadas anteriormente en el modelo de AirTop. Para ello, se ha duplicado el archivo del proyecto para facilitar el uso de ambos modelos y no tener que hacer y deshacer las modificaciones continuamente.

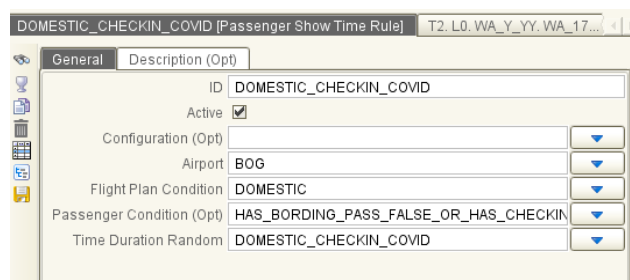
- 1) **Perfil de llegadas:** Esta modificación se ha llevado a cabo mediante los objetos *PassengerShowTimeRule* de la Figura 17 donde se han creado dos nuevas referencias para perfiles con o sin Check-In.



#	ID	Active	Configuration	Airport	Flight Plan Condition	Passenger Condition
1	DOMESTIC_CHECKIN_COVID	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAGE_TRUE
2	DOMESTIC_CHECKIN	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAGE_TRUE
3	DOMESTIC_NO_CHECKIN_COVID	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAGE
4	DOMESTIC_NO_CHECKIN	☒		BOG	DOMESTIC	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAGE
5	INTERNATIONAL_CHECKIN	☒		BOG	INTERNATIONAL	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN_BAGGAGE_TRUE
6	INTERNATIONAL_NO_CHECKIN	☒		BOG	INTERNATIONAL	HAS_BORDING_PASS_AND_NO_HAS_CHECKIN_BAGGAGE

Figura 17 Passenger Show Time Rule

Estas dos nuevas referencias, Figura 18, se han configurado con la regla que asigna o no a un pasajero si tiene que hacer el Check-In. Además se le ha incluido el perfil de tiempos *DOMESTIC_CHECKIN/NOCHECKIN_COVID* a cada una de ellas (Figura 19).



Field	Value
ID	DOMESTIC_CHECKIN_COVID
Active	☒
Configuration (Opt)	
Airport	BOG
Flight Plan Condition	DOMESTIC
Passenger Condition (Opt)	HAS_BORDING_PASS_FALSE_OR_HAS_CHECKIN
Time Duration Random	DOMESTIC_CHECKIN_COVID

Figura 18 Passenger Show Time Rule – Configuración

- 3) **Tiempos de procesos:** Para la modificación de los tiempos de proceso se han creado nuevos perfiles del escenario COVID-19 como el de la Figura 21 para el Check-In.

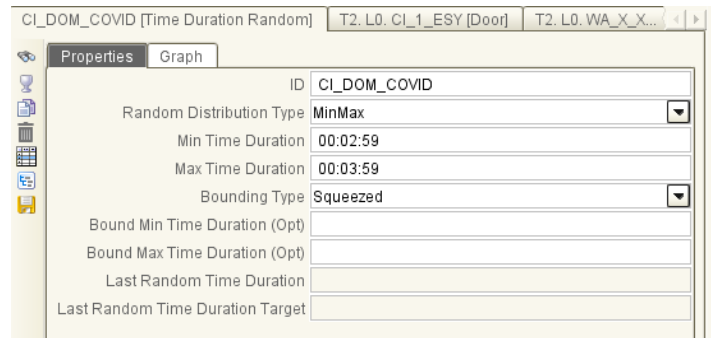


Figura 21 Time Duration Random para Check-In COVID

Además, los mostradores de Check-In tienen que quedar asignados con este nuevo *TimeDurationRandom*. En la Figura 22 se puede ver la configuración final del bloque Check-In.

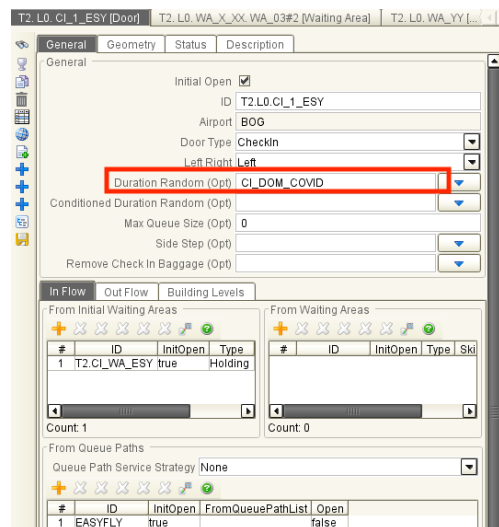
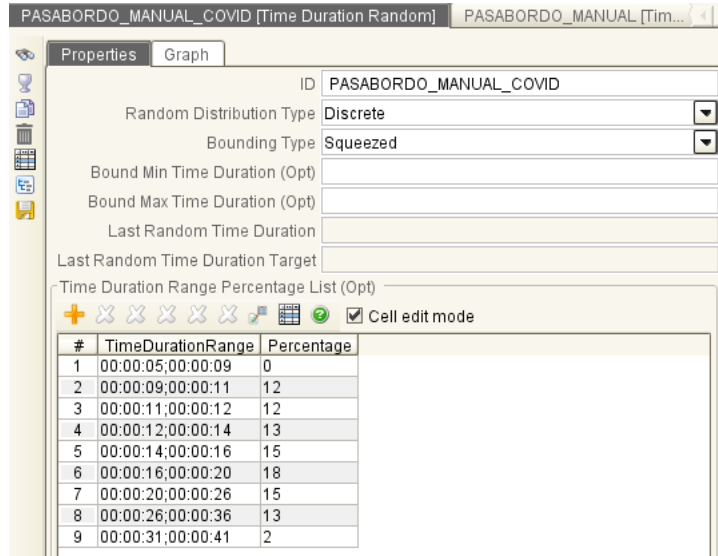


Figura 22 Check-In con nuevo tiempo de proceso asignado

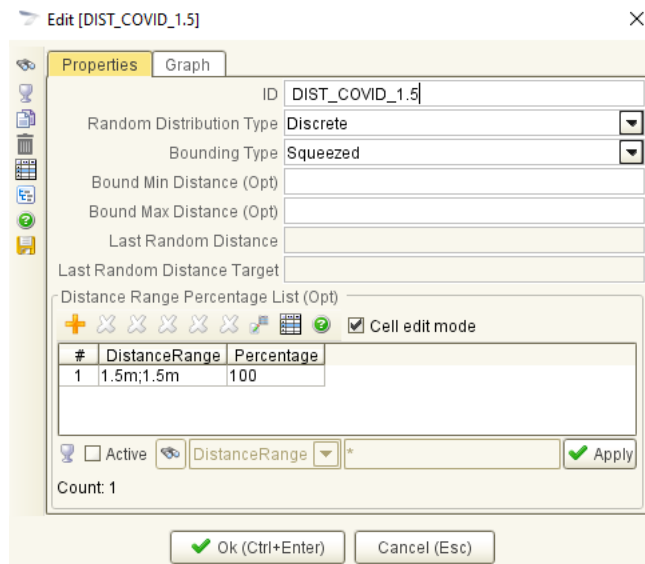
Esta mismas modificaciones se repiten en el otro proceso implicado, Pasabordo o Control de Tarjeta de Embarque. Pude comprobarse el nuevo de *TimeDurationRandom* para el escenario COVID-19 del control de Pasabordo en la Figura 23.



#	TimeDurationRange	Percentage
1	00:00:05;00:00:09	0
2	00:00:09;00:00:11	12
3	00:00:11;00:00:12	12
4	00:00:12;00:00:14	13
5	00:00:14;00:00:16	15
6	00:00:16;00:00:20	18
7	00:00:20;00:00:26	15
8	00:00:26;00:00:36	13
9	00:00:31;00:00:41	2

Figura 23 Tiempo de proceso de pasabordo en escenario COVID-19

- 4) **Distancia social en colas:** Esta modificación puede hacerse individualmente en cada una de las colas del sistema, sin embargo, al tratarse de una medida general aplicable a todas las colas, se puede implementar mediante lo que en AirTop se denomina *Adapter*. Para incluir la distancia de 1,5m, hay que propiamente crearla como en la Figura 24.



#	DistanceRange	Percentage
1	1.5m;1.5m	100

Figura 24 Objeto distancia de seguridad

Una vez definida esta distancia como objeto, puede incluirse en el *Adapter* del proyecto para que la aplique de forma general en todas las colas del sistema. La Figura 25 muestra la configuración del *Adapter*.

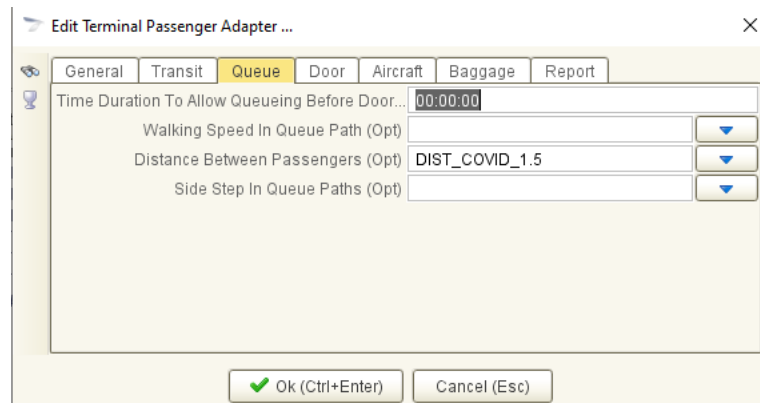
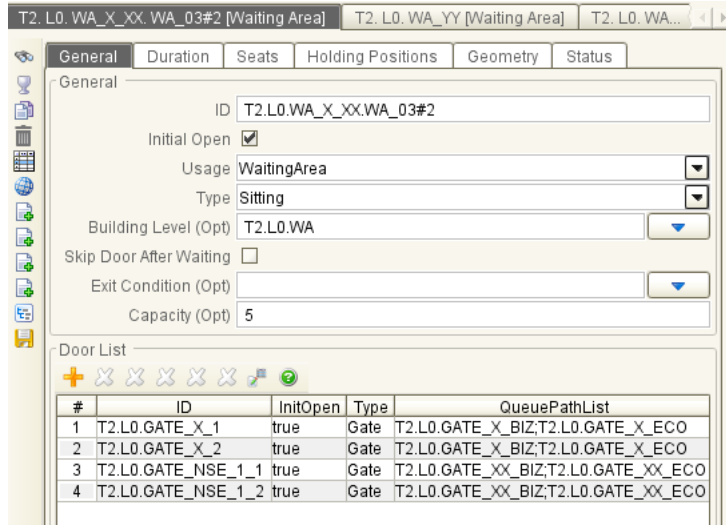


Figura 25 Adapter de la terminal

- 5) Distancia social en salas de espera:** Esta modificación se ha implementado de una forma peculiar. La herramienta AirTop no permite crear conjuntos de asientos de la sala de espera dejando un espacio entre ellos, o por ejemplo, solo asientos pares. La solución que se ha tomado ha sido reducir a la mitad la ocupación de cada conjunto de sientos ya que esto sí lo permite la herramienta. De esta forma, visualmente pueden aparecer dos pasajeros sentados de manera contigua, pero, en cómputo general, no afectará a la ocupación media de la sala.

Se han modificado todas las salas reduciendo a la mitad de asientos disponibles como capacidad máxima.

Por ejemplo, la Figura 26 se configura el *WaitingArea T2.L0.WA_X_XX_03* con un máximo de 5 asientos. Originalmente, éste área disponía de 10 asientos.



#	ID	InitOpen	Type	QueuePathList
1	T2.L0.GATE_X_1	true	Gate	T2.L0.GATE_X_BIZ;T2.L0.GATE_X_ECO
2	T2.L0.GATE_X_2	true	Gate	T2.L0.GATE_X_BIZ;T2.L0.GATE_X_ECO
3	T2.L0.GATE_NSE_1_1	true	Gate	T2.L0.GATE_XX_BIZ;T2.L0.GATE_XX_ECO
4	T2.L0.GATE_NSE_1_2	true	Gate	T2.L0.GATE_XX_BIZ;T2.L0.GATE_XX_ECO

Figura 26 Modificación WaitingArea para reducir capacidad de asientos

4.4 SIMULACIÓN

Para la simulación del sistema hay que elegir un *TimeWork* con el cual el programa correrá el modelo. Puesto que el *FlightPlan* introducido en AirTop comprende operaciones que abarcan mas de 24 horas, se ha estipulado lanzar la simulación desde las 12:00:00 del día 1. El propio programa establece automáticamente el tiempo de finalización de la simulación, en este caso, 09:21:22 del día 3. Estos parámetros pueden observarse en la Figura 27:

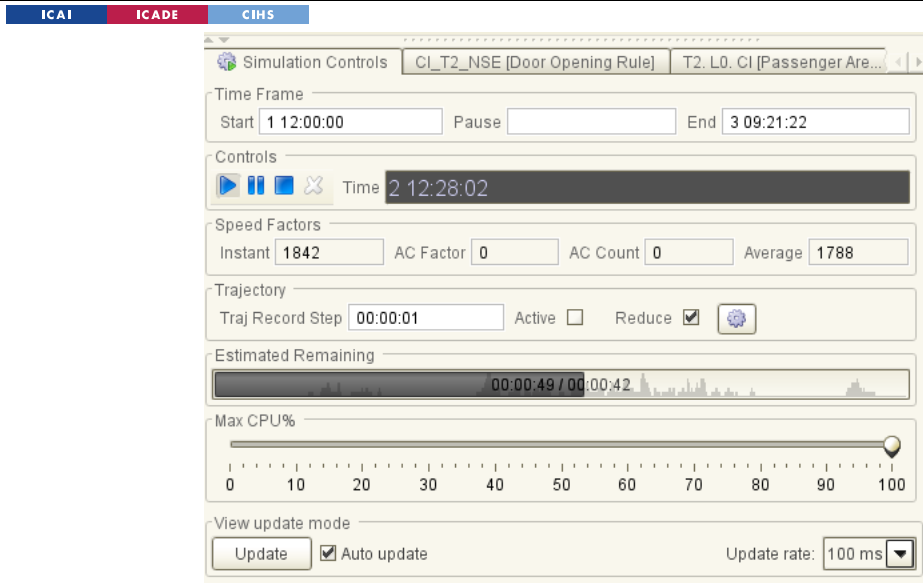


Figura 27 Consola con controles de simulación.

Además, es conveniente definir las áreas y procesos de los que se quieren obtener datos concretos. En nuestro caso, queremos analizar métricas de Check-In, Pasabordo, Seguridad y Salas de Embarque.

Para ello, se crean tantos objetos *PassangerAreasReport* como diferentes estancias y procesos queramos analizar: Check-In, Pasabordo, Seguridad y Salas de embarque (Figura 28 En ellos, se debe introducir la condición del pasajero que debe tener para ser leído por el objeto, en este caso, solo contabilizará pasajeros de salidas.

#	ID	Active	Passenger Condition	Door Condition	Building Level	Passenger Counting Area	Airport	Percentile
22	T1.L0.BC_INT	☒	ARRIVAL	BAGGAGE_CLAIM	T1.L0.BC_INT	BOG	N 04 41 54.322 V	
23	T1.L0.CU_CH	☒	ARRIVAL	CUSTOM_CHECK	T1.L0.CU_CHECK	BOG	N 04 41 55.296 W	
24	T1.L0.CU_CH	☒	ARRIVAL	CUSTOM_CHECK	T1.L0.CU_CHECK	BOG	N 04 41 55.296 W	
25	T2.L0.CI	☒	DEPARTURE	CHECK_IN	T2.L0.CI	BOG	N 04 41 37.177 V	
26	T2.L0.PB	☒	DEPARTURE	PASABORDO	T2.L0.PB	BOG	N 04 41 35.986 W	
27	T2.L0.SC	☒	DEPARTURE	SECURITY	T2.L0.SC	BOG	N 04 41 36.817 V	
28	T2.L0.WA	☒	DEPARTURE		T2.L0.WA	BOG	N 04 41 36.817 V	
29	T2.L0.DC	☒	ARRIVAL	BAGGAGE_CLAIM	T2.L0.DC	BOG	N 04 41 35.313 V	
30	T2.L0.DC	☒	ARRIVAL	BAGGAGE_CLAIM	T2.L0.DC	BOG	N 04 41 35.313 V	

Figura 28 Listado de *PassengerAreaReports* creados en el modelo

La Figura 29 muestra la configuración específica de una de ellas, *Check-In*.

ICAI ICADE CIHS

T2.L0.CI [Passenger Area Report] T2.L0.PB_3 [Queue Path] CI_DOM_COVID [Ti...]

ID T2.L0.CI

Active ☒

Time Distribution Setup Status

Current Values Update Step 00:05:00

Step Duration (Opt)

Period Step Count (Opt)

Percentile (Opt)

Passenger Condition (Opt) DEPARTURE

Door Condition (Opt) CHECK_IN

Building Level (Opt) T2.L0.CI

Passenger Counting Area (Opt)

Calculated Surface 360.4

Surface (Opt) 125.0

Calculated Average Passenger Processing Time 00:03:31

Average Passenger Processing Time (Opt)

Add Waiting Time To Queueing Time ☐

Figura 29 Configuración PassengerAreaReport para Check-In

Por último, conviene remarcar que durante las simulaciones del sistema, aparte de una serie de “Warnings” que no afectaban a la simulación pues eran achacables a configuraciones del lado aire, se han encontrado dos errores que no permitían correr el modelo sin ser solventados (Figura 30).

Problems									
Door Passenger Trajectory Passenger Area Report Flight Plan Door Opening Rule Passenger Waiting Area									
Excel mode									
#	Problem Type	Time	Message	Object Type	Index	Object	Property	Value	Value2
1	Error		No Runway...	Airport	0	BOG	RunwayList		
2	Error		No Runway...	Airport	0	BOG	RunwayList		
3	Warning		Airport has ...	Airport	0	BOG	RunwayList		
4	Warning		Airport has ...	Airport	0	BOG	RunwayList		

Figura 30 Log estado de la simulación con errores de las pistas del aeropuerto

Se trata de la configuración específica de cada una de las pistas de aterrizaje y despegue. Se debe especificar, al menos, un punto de salida de las aeronaves por las pistas. La corrección del error se muestra en la Figura 31:

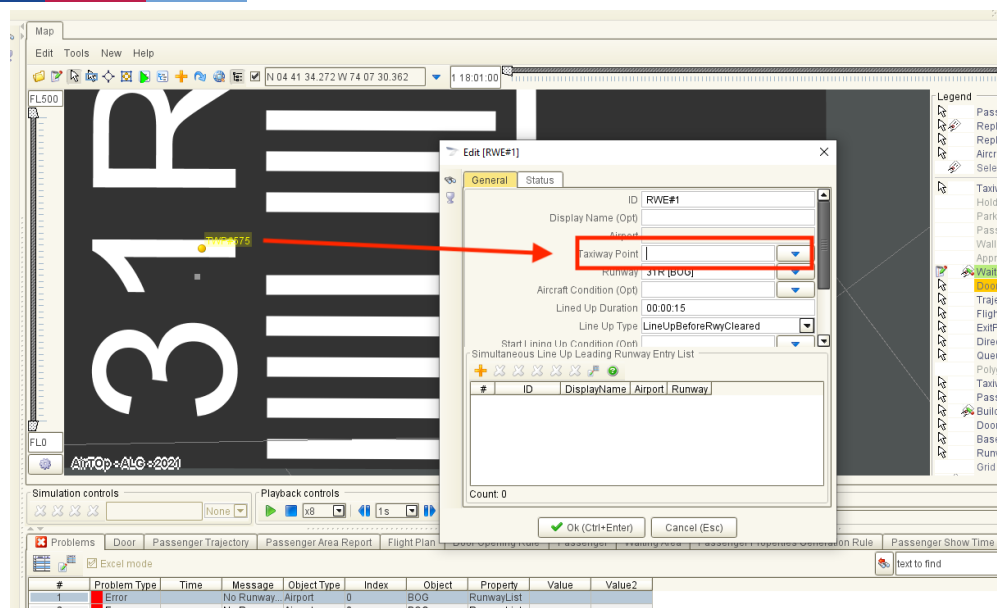


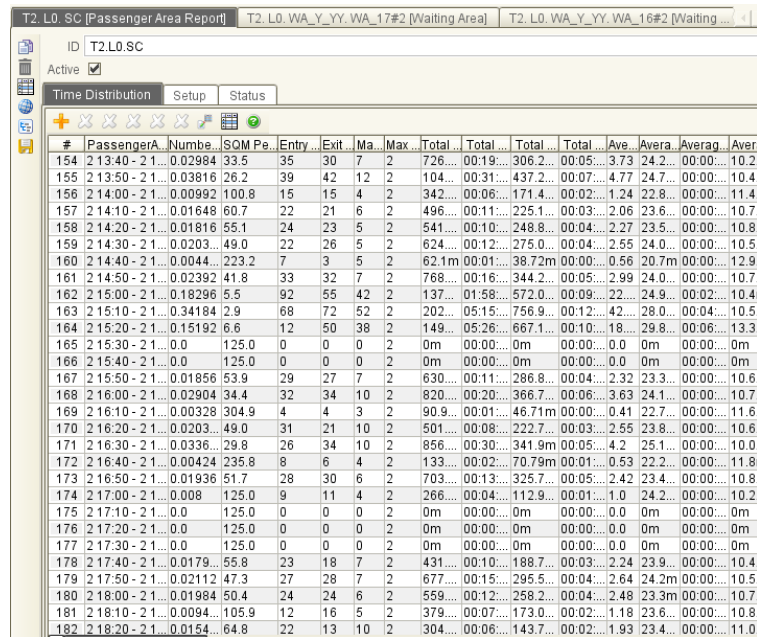
Figura 31 Corrección error pistas del aeropuerto

Para finalizar el presente apartado, conviene resaltar que la duración media de cada simulación se encuentra en torno a los 7/8 minutos de media.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se pretenden describir los resultados de los diferentes escenarios que se han simulado en AirTop.

Para ello, conforme a lo comentado en el Capítulo 4, se hará uso de las *PassengerAreaReport*. Estos objetos devuelven una serie de valores de diferentes métricas que se toman durante la simulación. En la Figura 32 se puede ver la apariencia de los datos de salida. Para su correcto entendimiento, conviene aplicar un contundente pre-procesamiento de los mismos. El programa AirTop permite la exportación a Excel.



ID	PassengerArea	Numbe	SOM	Pe	Entry	Exit	Ma	Max	Total	Total	Total	Total	Ave	Avera	Averag	Averag
154	2 13:40 - 2 1...	0.02984	33.5	35	30	7	2	726...	00:19...	306.2...	00:05...	3.73	24.2...	00:00...	10.2...	
155	2 13:50 - 2 1...	0.03816	26.2	39	42	12	2	104...	00:31...	437.2...	00:07...	4.77	24.7...	00:00...	10.4...	
156	2 14:00 - 2 1...	0.00992	100.8	15	15	4	2	342...	00:06...	171.4...	00:02...	1.24	22.8...	00:00...	11.4...	
157	2 14:10 - 2 1...	0.01648	60.7	22	21	6	2	496...	00:11...	225.1...	00:03...	2.06	23.6...	00:00...	10.7...	
158	2 14:20 - 2 1...	0.01816	55.1	24	23	5	2	541...	00:10...	248.8...	00:04...	2.27	23.5...	00:00...	10.8...	
159	2 14:30 - 2 1...	0.0203...	49.0	22	26	5	2	624...	00:12...	275.0...	00:04...	2.55	24.0...	00:00...	10.5...	
160	2 14:40 - 2 1...	0.0044...	223.2	7	3	5	2	62.1m	00:01...	38.72m	00:00...	0.66	20.7m	00:00...	12.9...	
161	2 14:50 - 2 1...	0.02392	41.8	33	32	7	2	768...	00:16...	344.2...	00:05...	2.99	24.0...	00:00...	10.7...	
162	2 15:00 - 2 1...	0.18296	5.5	92	55	42	2	137...	01:58...	572.0...	00:09...	22...	24.9...	00:02...	10.4r	
163	2 15:10 - 2 1...	0.34184	2.9	68	72	52	2	202...	05:15...	756.9...	00:12...	42...	28.0...	00:04...	10.5...	
164	2 15:20 - 2 1...	0.15192	6.6	12	50	38	2	149...	05:26...	667.1...	00:10...	18...	29.8...	00:06...	13.3...	
165	2 15:30 - 2 1...	0.0	125.0	0	0	0	2	0m	00:00...	0m	00:00...	0.0	0m	00:00...	0m	
166	2 15:40 - 2 1...	0.0	125.0	0	0	0	2	0m	00:00...	0m	00:00...	0.0	0m	00:00...	0m	
167	2 15:50 - 2 1...	0.01856	53.9	29	27	7	2	630...	00:11...	286.8...	00:04...	2.32	23.3...	00:00...	10.6...	
168	2 16:00 - 2 1...	0.02904	34.4	32	34	10	2	820...	00:20...	366.7...	00:06...	3.63	24.1...	00:00...	10.7...	
169	2 16:10 - 2 1...	0.00328	304.9	4	4	3	2	90.9...	00:01...	46.71m	00:00...	0.41	22.7...	00:00...	11.6...	
170	2 16:20 - 2 1...	0.0203...	49.0	31	21	10	2	501...	00:08...	222.7...	00:03...	2.55	23.8...	00:00...	10.6...	
171	2 16:30 - 2 1...	0.0336...	29.8	26	34	10	2	856...	00:30...	341.9m	00:05...	4.2	25.1...	00:00...	10.0...	
172	2 16:40 - 2 1...	0.00424	235.8	8	6	4	2	133...	00:02...	70.79m	00:01...	0.53	22.2...	00:00...	11.8r	
173	2 16:50 - 2 1...	0.01936	51.7	28	30	6	2	703...	00:13...	325.7...	00:05...	2.42	23.4...	00:00...	10.8...	
174	2 17:00 - 2 1...	0.008	125.0	9	11	4	2	266...	00:04...	112.9...	00:01...	1.0	24.2...	00:00...	10.2...	
175	2 17:10 - 2 1...	0.0	125.0	0	0	0	2	0m	00:00...	0m	00:00...	0.0	0m	00:00...	0m	
176	2 17:20 - 2 1...	0.0	125.0	0	0	0	2	0m	00:00...	0m	00:00...	0.0	0m	00:00...	0m	
177	2 17:30 - 2 1...	0.0	125.0	0	0	0	2	0m	00:00...	0m	00:00...	0.0	0m	00:00...	0m	
178	2 17:40 - 2 1...	0.0179...	55.8	23	18	7	2	431...	00:10...	188.7...	00:03...	2.24	23.9...	00:00...	10.4...	
179	2 17:50 - 2 1...	0.02112	47.3	27	28	7	2	677...	00:15...	295.5...	00:04...	2.64	24.2m	00:00...	10.5...	
180	2 18:00 - 2 1...	0.01984	50.4	24	24	6	2	559...	00:12...	258.2...	00:04...	2.48	23.3m	00:00...	10.7...	
181	2 18:10 - 2 1...	0.0094...	105.9	12	16	5	2	379...	00:07...	173.0...	00:02...	1.18	23.6...	00:00...	10.8...	
182	2 18:20 - 2 1...	0.0154...	64.8	22	13	10	2	304...	00:06...	143.7...	00:02...	1.93	23.4...	00:00...	11.0...	

Figura 32 Data Output del modelo en AirTop

Los principales KPIs que se proponen para analizar correctamente la capacidad de las estancias son:

- Pasajeros de entrada en la estancia [pax/h]
- Tiempo medio de espera en cola [min]
- Distancia media de la cola [metros]

- Ocupación media de la estancia [pax/m^2]

Además, según Standars, Manuals & Guidelines (IATA, 2019) se establecen una serie de estándares que deben de cumplir los operadores aeroportuarios para la explotación de este tipo de infraestructura. En concreto, los límites establecidos se indican en la Tabla 2.

Tabla 2 Estándares exigidos en los diferentes procesos. Fuente: IATA

Proceso	Espera en cola [min]	Distancia de cola [metros]	Ocupación [pax/m^2]
Check-In	20	225	0,77
Pasabordo	3	100	1
Seguridad	8	175	1
Sala de embarque	-	-	0,8

Cabe señalar que espera máxima y distancia máxima de cola en las salas de embarque no aplican pues dependerán del propio pasajero y su antelación de llegada al aeropuerto.

En la presentación de resultados se mostrarán recursos gráficos y visuales de la situación de la terminal, con la representación de los pasajeros en los diferentes procesos. Del mismo modo, se incluirán gráficas creadas por el autor a partir de los datos exportados de AirtTop que ilustran los KPIs anteriormente mencionados.

Por último comentar, durante el análisis de los resultados, se comprueba que el proceso de Pasabordo es un proceso superfluo en el que apenas existe variaciones significativas en los diferentes escenarios y simulaciones que se han llevado a cabo. En el capítulo 6 de Conclusiones de este trabajo se desarrollará una explicación a estos resultados.

5.1 ESCENARIO COVID

En este punto, conviene recordar que este escenario implica simular un plan de vuelo (número de operaciones) de un día pre-pandemia, con las restricciones sociales y sanitarias que están vigentes hoy en día.

La descripción de los resultados de la simulación se llevará a cabo mediante una comparación con el escenario pre-COVID.

A primera vista, en la Figura 33, se aprecia claramente una cola de pasajeros en el área de seguridad que sobre pasa las limitaciones físicas de la infraestructura.

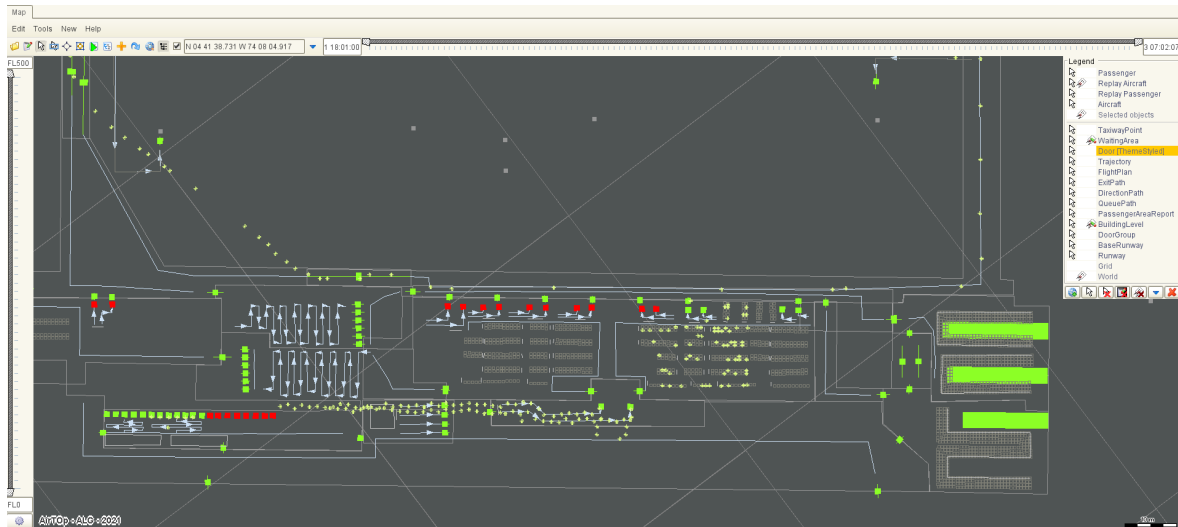


Figura 33 Simulación escenario COVID – Terminal

En una visual mas en detalle, se puede comprobar (Figura XX) cómo la cola en el área de seguridad va disminuyendo a consta de aumentar la ocupación de las salas de embarque y a su vez, pasajeros embarcando por el dique Este de la terminal.

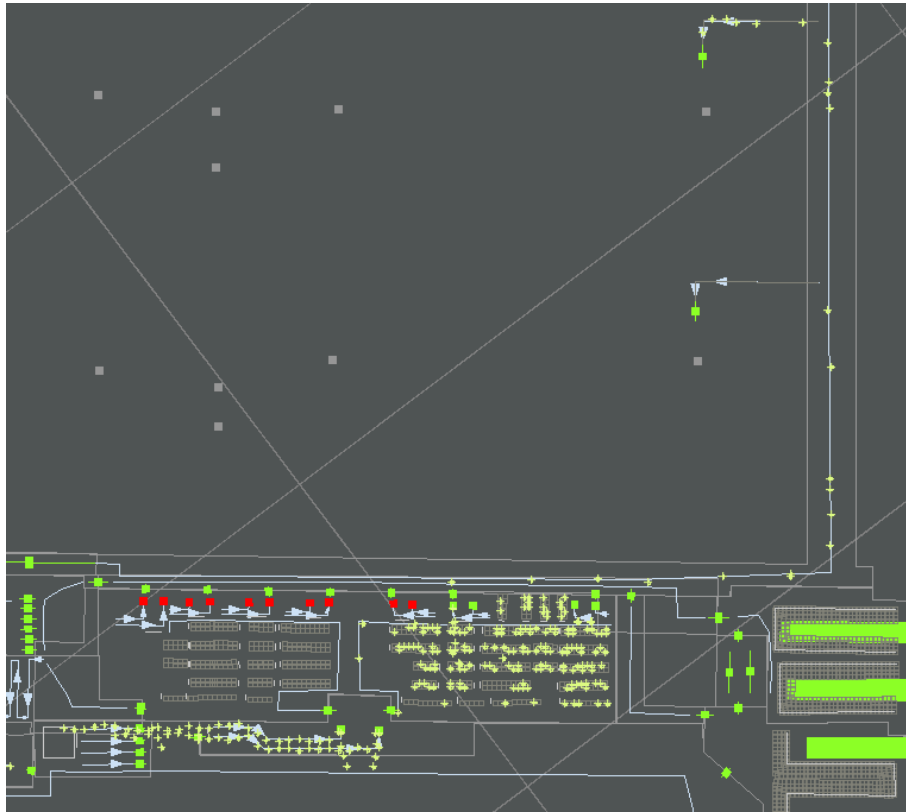


Figura 34 Simulación escenario COVID – Seguridad + Embarque

Como se discutía en la sección 4.3 apartado 5) de este trabajo, la reducción en la ocupación de las salas de embarque para permitir la distancia de seguridad entre los pasajeros, no se puede apreciar visualmente (Figura 34).

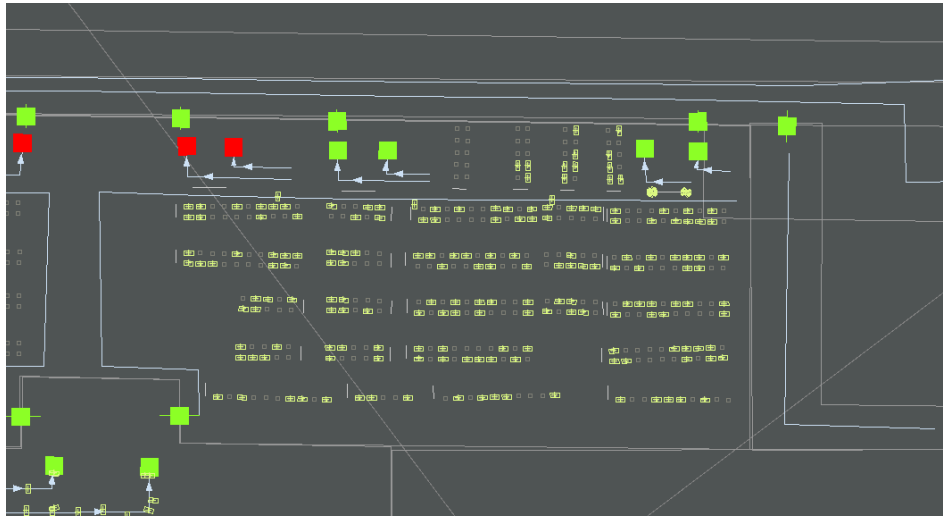


Figura 35 Simulación escenario COVID – Sala de Embarque

En esta Figura 35, aparecen pasajeros sentados de forma contigua. Sin embargo, el cómputo general de asientos ocupados es de la mitad de la ocupación.

A continuación, se muestra un mayor detalle, ahora con datos, de cada uno de los procesos.

Check-In



Figura 36 Escenario COVID. Check-In. Pasajeros hora.

En la Figura 36, se muestran los pasajeros de entrada por cada hora. Se aprecia un claro pico hacia las 5 a.m. de entorno a 370 pasajeros por hora debido a la planificación de vuelos sobre esa hora. A lo largo del día, la curva del escenario pre-COVID es replicada en el nuevo escenario, en menor medida, pero con la misma morfología de curva. En general, la entrada de pasajeros al proceso de Check-In se ha reducido en un 60%.

Cabe destacar un moderado retraso que existe entre las dos curvas: la curva del escenario COVID-19 adelanta al escenario base.

En otro aspecto, el tiempo medio de cola de la Figura 37 muestra una mejora significativa en el escenario COVID-19, solventando algunos momentos puntuales en los que se sobrepasaban los estándares de calidad establecidos por las autoridades. En este escenario contamos con un margen de hasta el 25% en caso de querer reducir el número de recursos y quedar dentro de los estándares.



Figura 37 Escenario COVID. Check-In. Tiempo de cola.

Mismo comportamiento ocurre con la gráfica de distancia media en cola, de la Figura 38: Ciertos momentos del día donde se sobrepasaba los requisitos de calidad, ahora, quedan dentro de los parámetros. El mayor pico produce colas de hasta 325 metros. De media, se ha reducido el tiempo de espera en un 45%. Se ha de destacar del mismo modo la volatilidad mayor que presenta esta gráfica frente a las vistas anteriormente.

Distancia media de colas - Metros

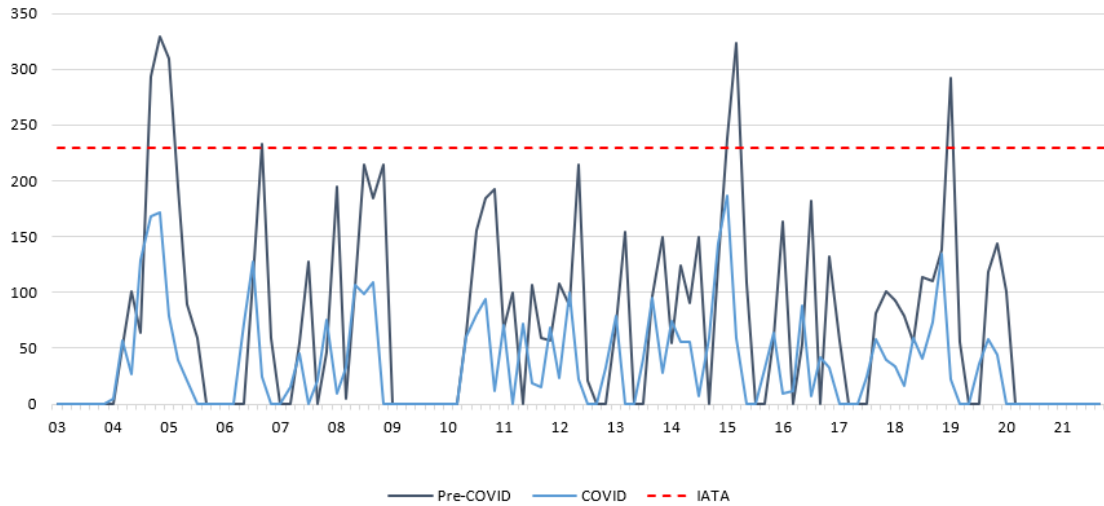


Figura 38 Escenario COVID. Check-In. Distancia de cola.

La ocupación del proceso de Check-In queda reflejada en la gráfica de la Figura 39 En el escenario COVID-19, al haber un número menos de pasajeros haciendo el Check-In, se traduce en una menor ocupación media. Se aprecia que existe un holgado margen pues la superficie tomada para el cálculo de esta métrica incluye espacio del hall de salidas ya que puede usarse para las colas del Check-In.

Ocupación media - Pasajeros/m2

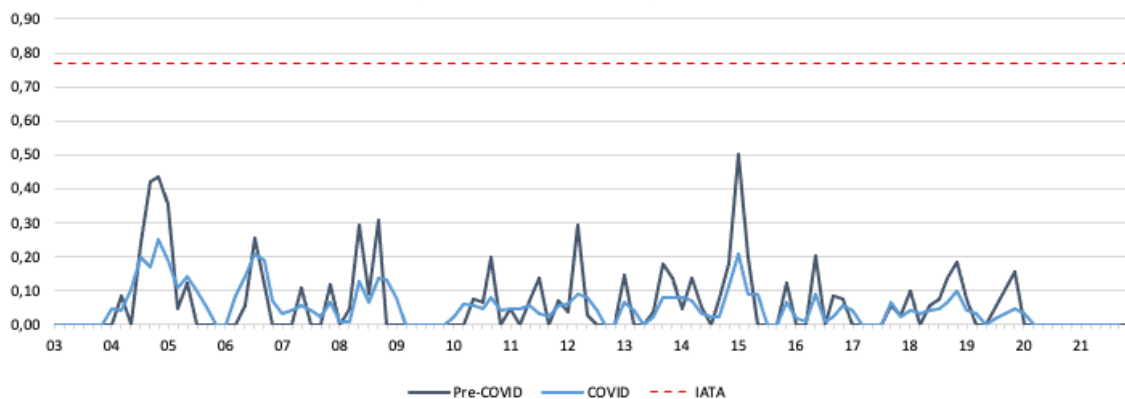


Figura 39 Escenario COVID. Check-In. Ocupación media.

Control de Seguridad

Como se vio al inicio de esta sección con las imágenes de la simulación, el proceso de Control de Seguridad es el que sufre mayor impacto. Es conveniente resaltar que en el caso del Control de Seguridad, la curva que muestra datos del escenario COVID-19 (azul claro), ahora queda por encima de la curva del escenario base (azul oscuro). Contrario a lo que ocurría anteriormente en el proceso de Check-In.

Se procede a un desglose analítico de los KPIs acordados.

Comenzando con la Figura 40 que muestra el número de pasajeros de entrada por hora, se aprecia un incremento significativo a lo largo de todo el periodo de simulación de los usuarios. Esto tendrá sus implicaciones en el resto de figuras que se muestra mas adelante. Como ocurría en el proceso de Check-In, existe cierto retraso entre las curvas de los dos escenarios. En el Capítulo de Conclusiones se tratará de explicar y desarrollar estos resultados.

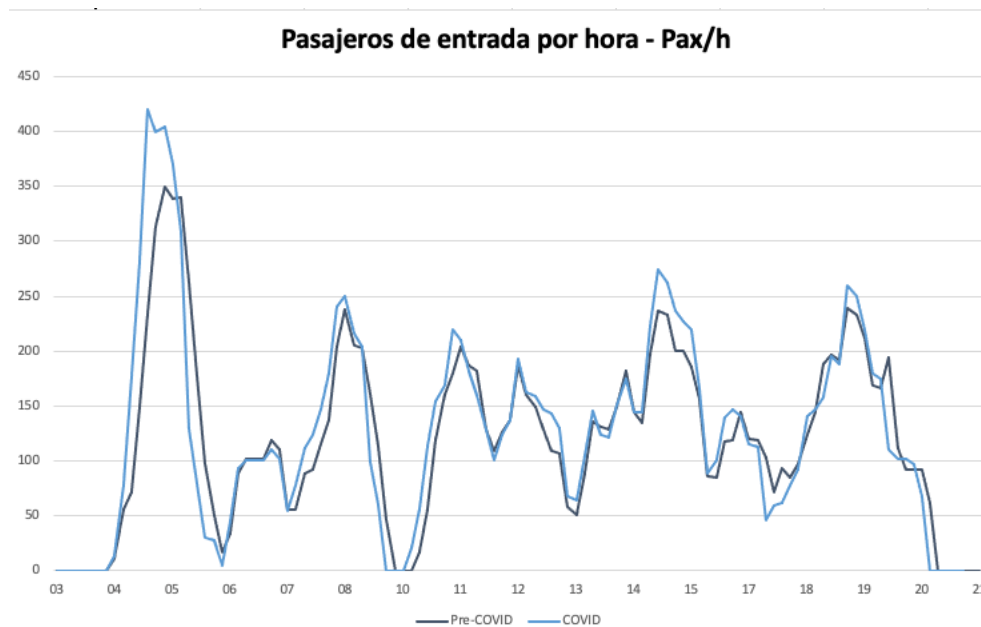


Figura 40 Escenario COVID. Control de seguridad. Pasajeros hora.

La siguiente gráfica de la Figura 41, se aprecian dos importantes picos de tiempo de espera frente a una curva plana del escenario base. El primero de ellos prácticamente duplica los estándares de calidad hasta los 14 minutos de cola. Salvo en los picos de entrada, el tiempo de espera se mantiene prácticamente constante entorno a 4 minutos.

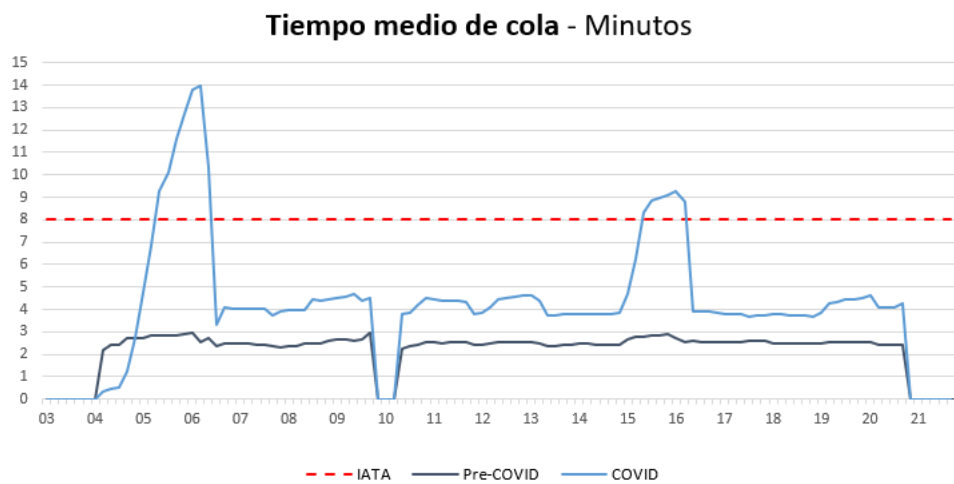


Figura 41 Escenario COVID. Control de seguridad. Tiempo de cola.

Por último, la Figura 42 muestra la distribución de la distancia media de las colas de ambos escenarios. Se aprecia, de nuevo, el primer pico de demanda que prácticamente triplica los valores esperados hasta los 449 metros. Además, junto a las imágenes mostradas al inicio de este apartado, se corrobora que excede los límites físicos de la estructura no siendo posible esta situación en la realidad. El resto de picos, entorno a 150 y 270 metros, exceden los estándares pero se encuentra dentro de las limitaciones físicas de la terminal.

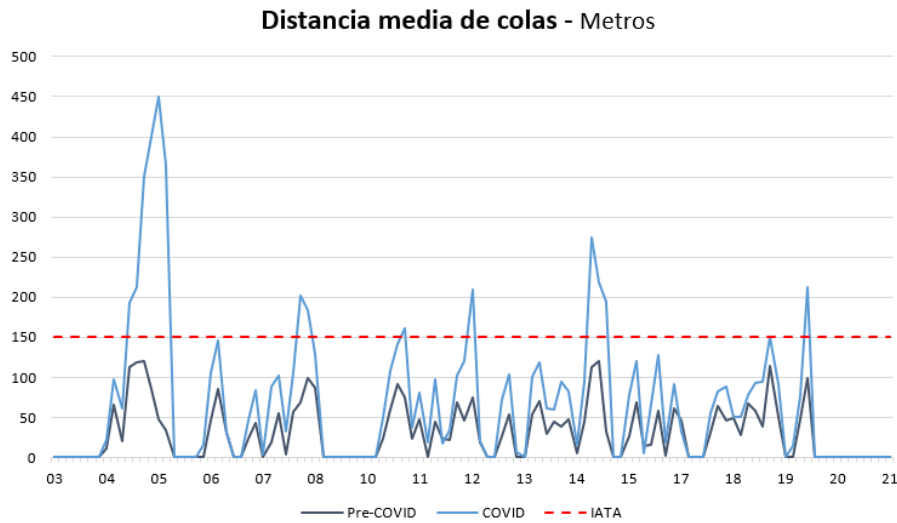


Figura 42 Escenario COVID. Control de seguridad. Distancia de cola.

Salas de embarque

La sala de embarque no presenta resultados significativos al aplicar las medidas COVID-19.

En la Figura 43 se muestra la entrada de pasajeros a la salas de embarque. El escenario COVID-19 sigue una curva muy parecida al escenario base. Sin embargo, visualmente parece mas suavizada y no se llega, por poco, a los picos del estado anterior. Además, se vuelve a observar ese patrón de retraso del escenario base frente al escenario COVID-19.



Figura 43 Escenario COVID. Salas de embarque. Pasajeros hora.

Por último, se muestra la gráfica de ocupación media en las salas de embarque en la Figura 44. Se ve claramente que en no se excede el requerimiento máximo en ninguno de los dos casos. La ocupación media en ambos escenarios es muy parecida. Como en el resto de gráficas, el patrón principal que se encuentra es un ligero desfase de tiempo entre ambas curvas.

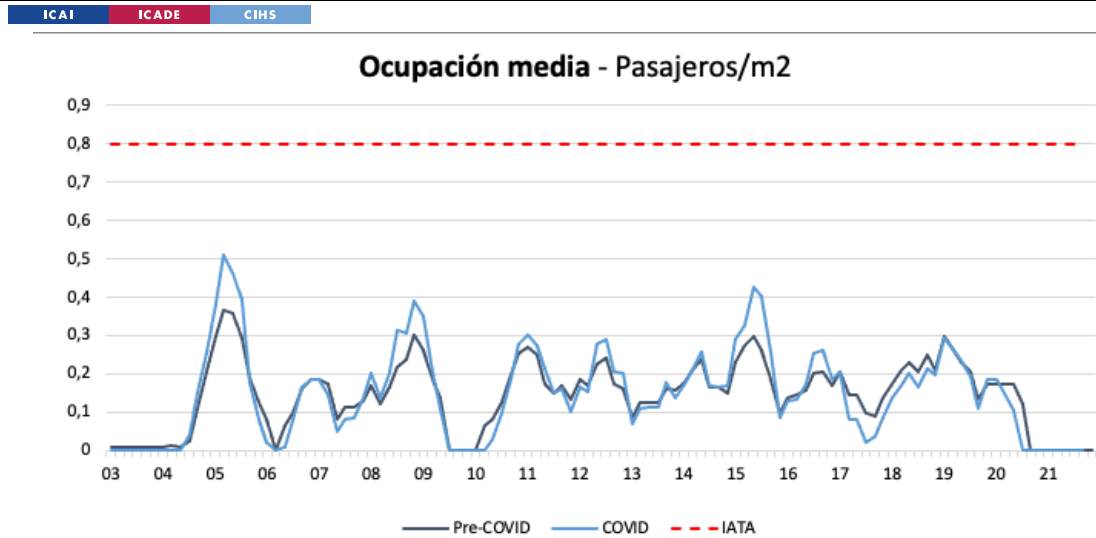


Figura 44 Escenario COVID. Salas de embarque. Ocupación media.

Para un análisis mas representativo de las salas de embarque, convendría calcular la distancia media que existe entre todos los pasajeros a lo largo de el día. Sin embargo, con las funcionalidades que actualmente cuenta la herramienta informática, no es posible hacer este cálculo. Además, supondría un esfuerzo computacional notable.

En este escenario, se ha comprobado del mismo modo que un gran número de pasajeros ha perdido su vuelo ya que cuando llegaron a sus puertas de embarque, éstas ya estaban cerradas. Por esto, han tenido que ser terminados. Este evento se muestra en la Figura 45.

ICAI			ICADE			CIHS								
Queue Path Passenger Area Report Simulation log Problems Passenger Show Time Rule Passenger Properties Generation Rule Time Duration Random Door Waiting Area Distance Random														
Excel mode text to find														
#	Problem Type	Time	Message	Object Type	Index	Object	Property							
245	Error	3:05:10:01	Passenger [9R8604_3_5_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8604_3] already closed.	Passenger	2	9R8604_3...	FlightPass...	9						
246	Error	3:05:10:01	Passenger [9R8604_3_2_ECO_COQ] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8604_3] already closed.	Passenger	2	9R8604_3...	FlightPass...	9						
247	Error	3:05:10:01	Passenger [9R8604_3_15_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8604_3] already closed.	Passenger	2	9R8604_3...	FlightPass...	9						
248	Error	3:05:20:01	Passenger [9R8615_3_15_ECO_COQ] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8615_3] already closed.	Passenger	2	9R8615_3...	FlightPass...	9						
249	Error	3:05:20:01	Passenger [9R8615_3_42_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8615_3] already closed.	Passenger	2	9R8615_3...	FlightPass...	9						
250	Error	3:05:20:01	Passenger [9R8615_3_29_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8615_3] already closed.	Passenger	2	9R8615_3...	FlightPass...	9						
251	Error	3:05:20:01	Passenger [9R8615_3_21_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8615_3] already closed.	Passenger	2	9R8615_3...	FlightPass...	9						
252	Error	3:05:36:01	Passenger [9R8702_3_8_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
253	Error	3:05:50:01	Passenger [9R8732_3_26_ECO_NCL] terminated for being late. Check in desks for FlightPlan [9R8732_3] already closed.	Passenger	2	9R8732_3...	FlightPass...	9						
254	Error	3:06:06:01	Passenger [9R8702_3_44_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
255	Error	3:06:06:03	Passenger [9R8702_3_51_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
256	Error	3:06:06:27	Passenger [9R8702_3_45_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
257	Error	3:06:06:40	Passenger [9R8702_3_64_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
258	Error	3:06:06:51	Passenger [9R8702_3_1_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
259	Error	3:06:07:04	Passenger [9R8702_3_26_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
260	Error	3:06:07:08	Passenger [9R8702_3_34_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
261	Error	3:06:07:23	Passenger [9R8702_3_28_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
262	Error	3:06:07:34	Passenger [9R8702_3_47_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
263	Error	3:06:07:44	Passenger [9R8702_3_32_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
264	Error	3:06:07:56	Passenger [9R8702_3_14_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
265	Error	3:06:08:08	Passenger [9R8702_3_19_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
266	Error	3:06:08:23	Passenger [9R8702_3_41_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
267	Error	3:06:08:35	Passenger [9R8702_3_48_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
268	Error	3:06:08:38	Passenger [9R8702_3_2_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
269	Error	3:06:08:50	Passenger [9R8702_3_61_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
270	Error	3:06:08:52	Passenger [9R8702_3_30_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
271	Error	3:06:09:00	Passenger [9R8702_3_27_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
272	Error	3:06:09:07	Passenger [9R8702_3_55_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
273	Error	3:06:09:18	Passenger [9R8702_3_6_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
274	Error	3:06:09:28	Passenger [9R8702_3_23_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
275	Error	3:06:09:42	Passenger [9R8702_3_46_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
276	Error	3:06:09:42	Passenger [9R8702_3_42_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
277	Error	3:06:09:55	Passenger [9R8702_3_9_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
278	Error	3:06:09:56	Passenger [9R8702_3_13_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
279	Error	3:06:10:11	Passenger [9R8702_3_35_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
280	Error	3:06:10:30	Cannot find AircraftDoorBusDoor for FlightPlan[9R8702_3] with ParkingPosition[PE_23]; Check FlightPlan ParkingPosition, AircraftD...		-1			P						
281	Error	3:06:10:41	Passenger [9R8702_3_4_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
282	Error	3:06:10:48	Passenger [9R8702_3_31_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
283	Error	3:06:11:32	Passenger [9R8702_3_25_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
284	Error	3:06:11:34	Passenger [9R8702_3_7_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
285	Error	3:06:11:44	Passenger [9R8702_3_5_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
286	Error	3:06:11:58	Passenger [9R8702_3_21_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
287	Error	3:06:12:11	Passenger [9R8702_3_58_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
288	Error	3:06:12:27	Passenger [9R8702_3_59_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
289	Error	3:06:12:41	Passenger [9R8702_3_54_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
290	Error	3:06:12:47	Passenger [9R8702_3_11_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
291	Error	3:06:12:53	Passenger [9R8702_3_40_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
292	Error	3:06:12:59	Passenger [9R8702_3_66_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
293	Error	3:06:13:07	Passenger [9R8702_3_60_ECO_NCL] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						
294	Error	3:06:13:13	Passenger [9R8702_3_16_ECO_COQ] terminated for being late. Gates for FlightPlan [9R8702_3] already closed.	Passenger	2	9R8702_3...	FlightPass...	9						

Figura 45 Escenario COVID. Pasajeros terminados.

Por último, en la Figura 46 se muestra un mapa de calor de la terminal que colorea las zonas mas transcurridas por los pasajeros. A priori, este mapa no muestra mucha información adicional a nuestro análisis, sin embargo, ayuda a visualizar cuales son los movimientos principales de los pasajeros en la infraestructura.

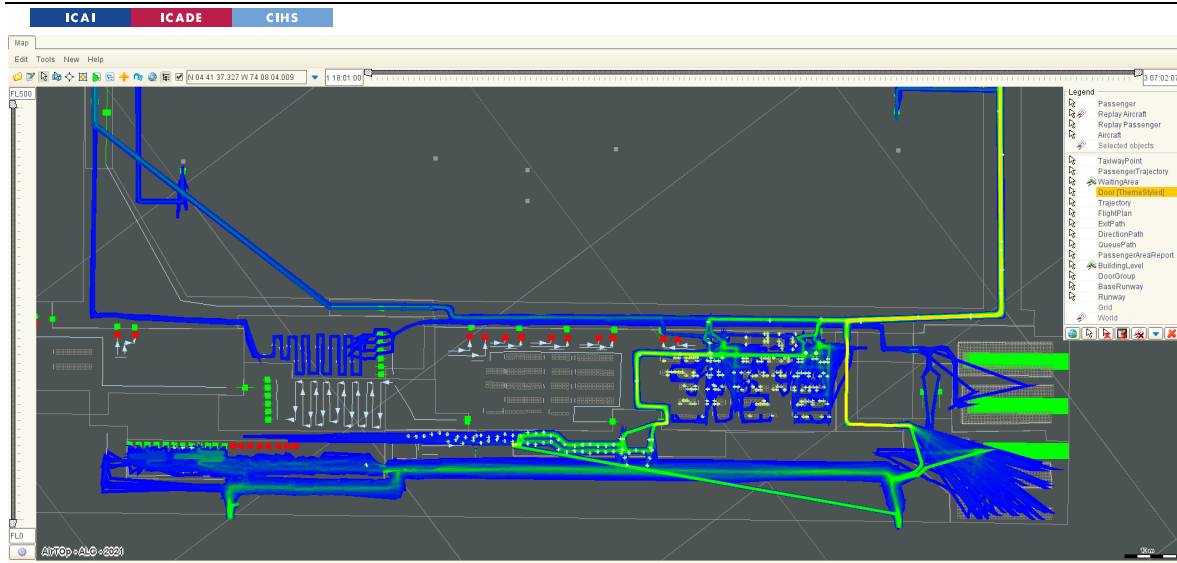


Figura 46 Mapa de calor terminal

5.2 WHAT-IF I: BROTE EN PERSONAL CHECK-IN

Para un análisis de posibles situaciones futuras que se puedan dar en la terminal, se ha planteado un escenario en el que ocurra un brote de infectados entre el equipo de Check-In. Se ha escogido esta situación pues la sustitución de este personal, no se podría llevar a cabo de una manera tan ágil y rápida como con otros equipos, por lo que la aerolínea se vería obligada a cerrar alguno de los mostradores del Check-In. De este modo, se cierran 5 de los 10 mostradores de Check-In que hay habitualmente abiertos. 2 de ellos corresponden a una de las aerolíneas y 3 de ellos a la otra.

En primer lugar, la curva de pasajeros de entrada a este proceso, (Figura 47), no se ve alterada. Las curvas del escenario COVID-19 y What-If I se superponen.

Pasajeros de entrada por hora - Pax/h

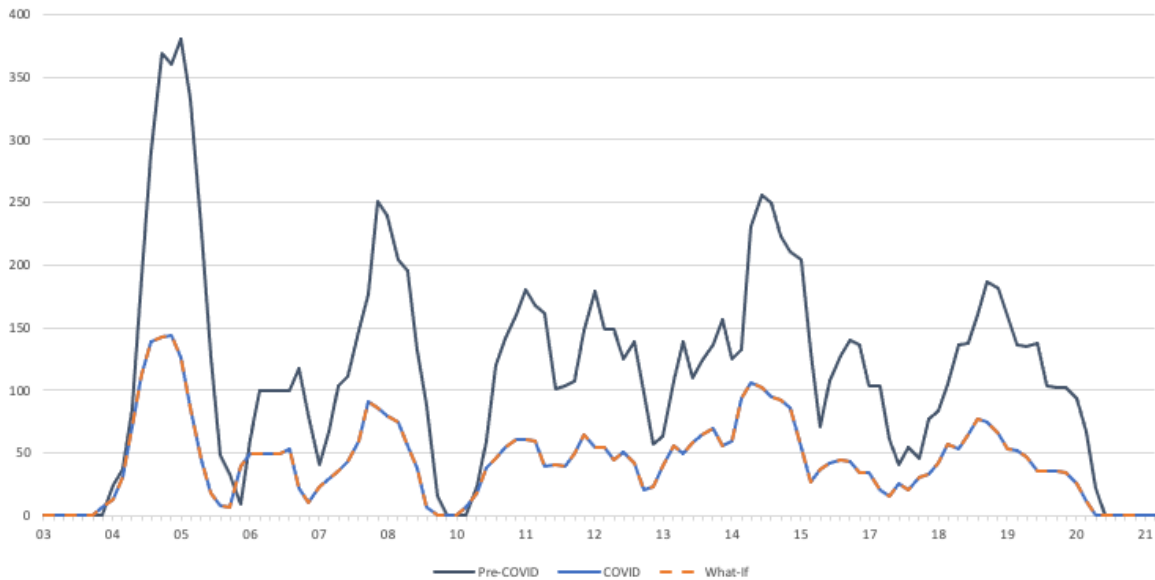


Figura 47 Escenario What-If I. Check-In. Pasajeros de entrada.

Visualmente, en la Figuran 48, se aprecia cómo la cola del Check-In aumenta considerablemente.

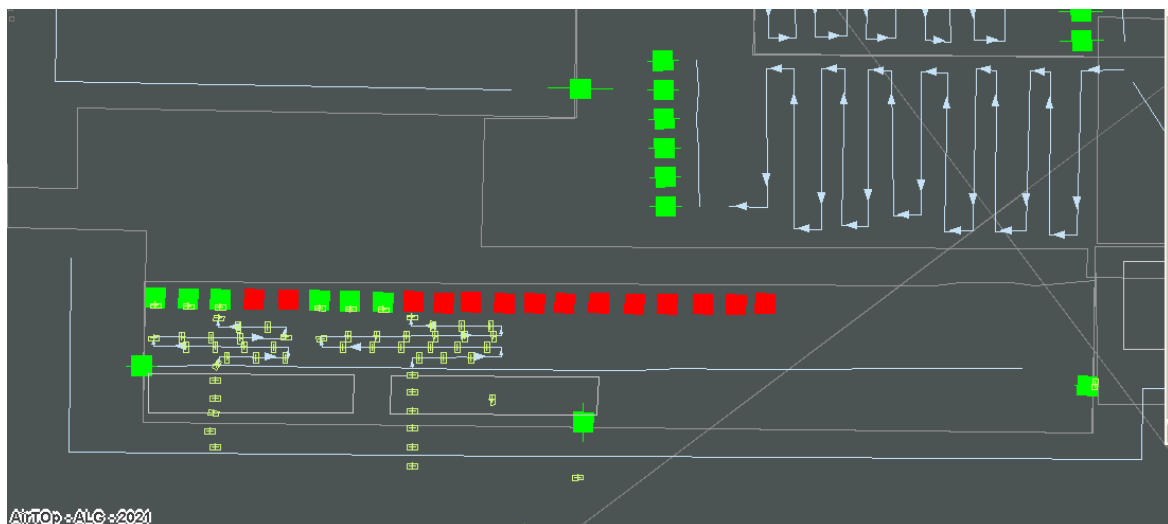


Figura 48 Colas generadas en mostradores Check-In

Además, este mismo hecho, se puede comprobar en la curva de la distancia de cola de na Figura 49. Se supera notablemente la situación pre-COVID. Además, son 3 los picos de colas (390, 393 y 350m) los que más destacan. Sobrepasan con creces los estándares de IATA. El incremento medio experimentado es de un 18,7% en la distancia de las colas.

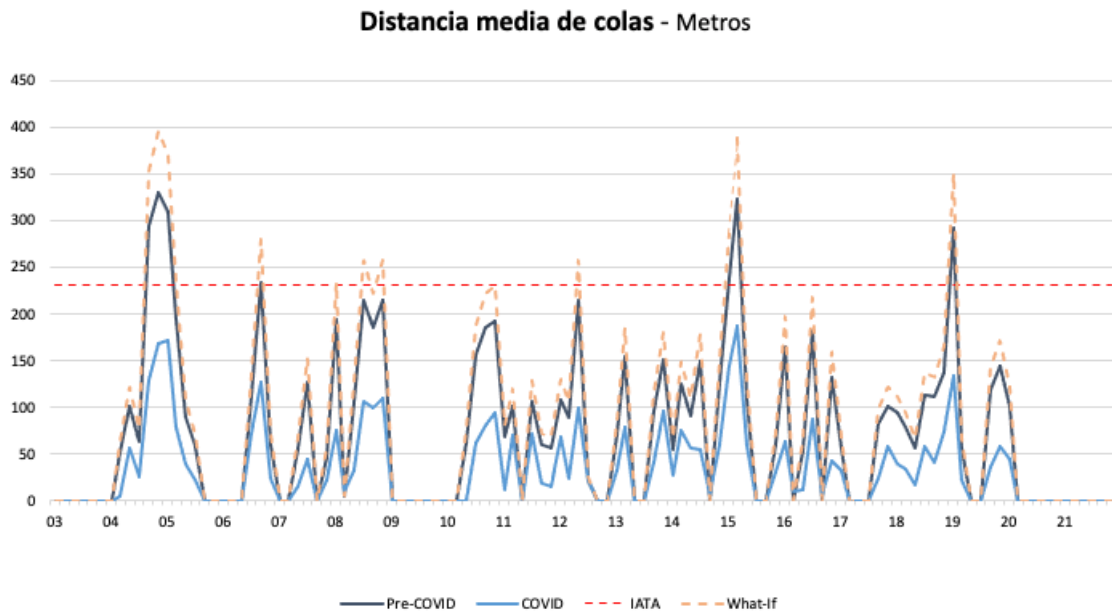


Figura 49 Escenario What-If I. Check-In. Distancia cola.

Por ultimo, conviene mostrar cómo el tiempo de espera medio en cola aumenta +39% respecto al escenario anterior (Figura 50) No se llegan a superar los estándares de calidad ni la situación pre-pandemia. Sin embargo, al tener un menor número de operadores, el tiempo de espera se duplica.

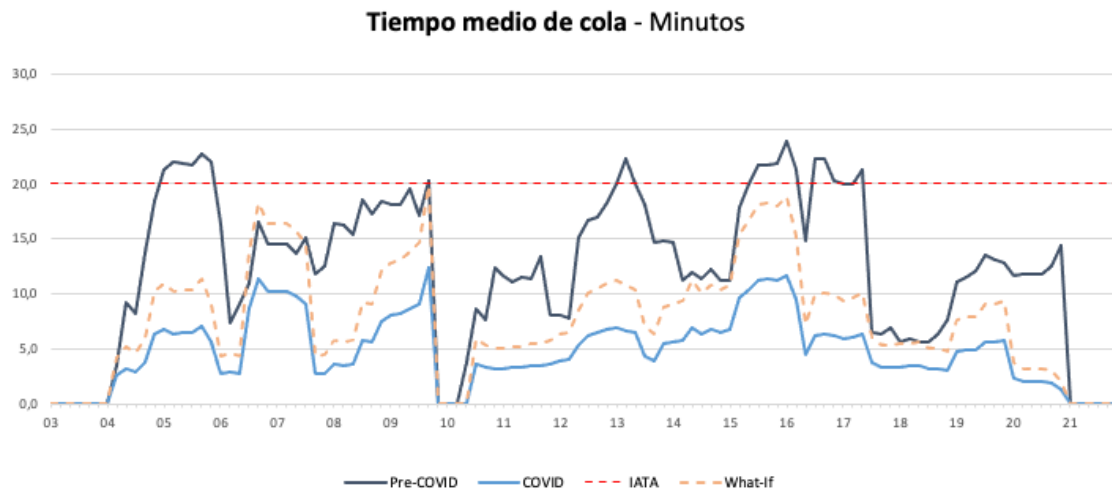


Figura 50 Escenario What-If I. Check-In. Tiempo de espera.

Sin embargo, el principal efecto de esta modificación en el número de operadores, se produce en el Control de Seguridad. La entrada a este proceso (Figura 51) parece retrasarse respecto al escenario COVID-19, pues ahora, los pasajeros provenientes del Check-In, llegan ahora de forma laminada. Además, los picos de demanda se disminuyen un 13,8%.

Pasajeros de entrada por hora - Pax/h

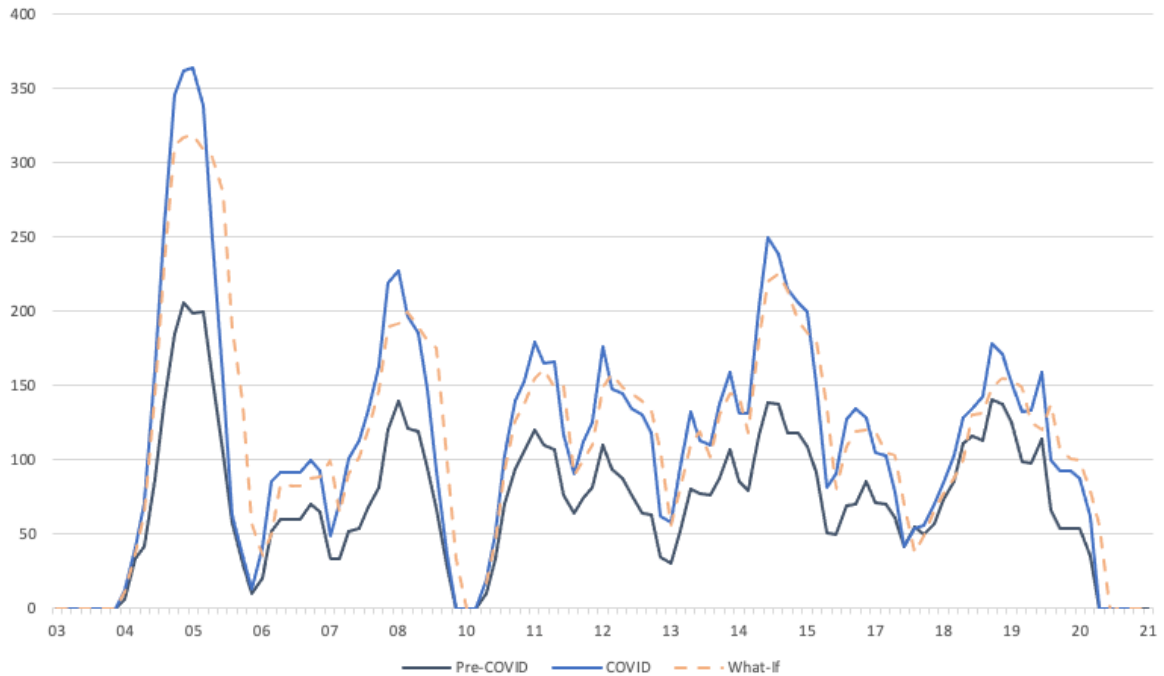


Figura 51 Escenario What-If1. Control de Seguridad. Pasajeros de entrada.

Otro efecto directo que tiene esta modificación es la disminución de las distancias del Control de Seguridad. En la Figura 52 se comprueba cómo, en los momentos de pico, la distancia de cola de los pasajeros disminuye un 22,2%. Además, esto hace entrar dentro de los requisitos de calidad en algunos momentos del día.

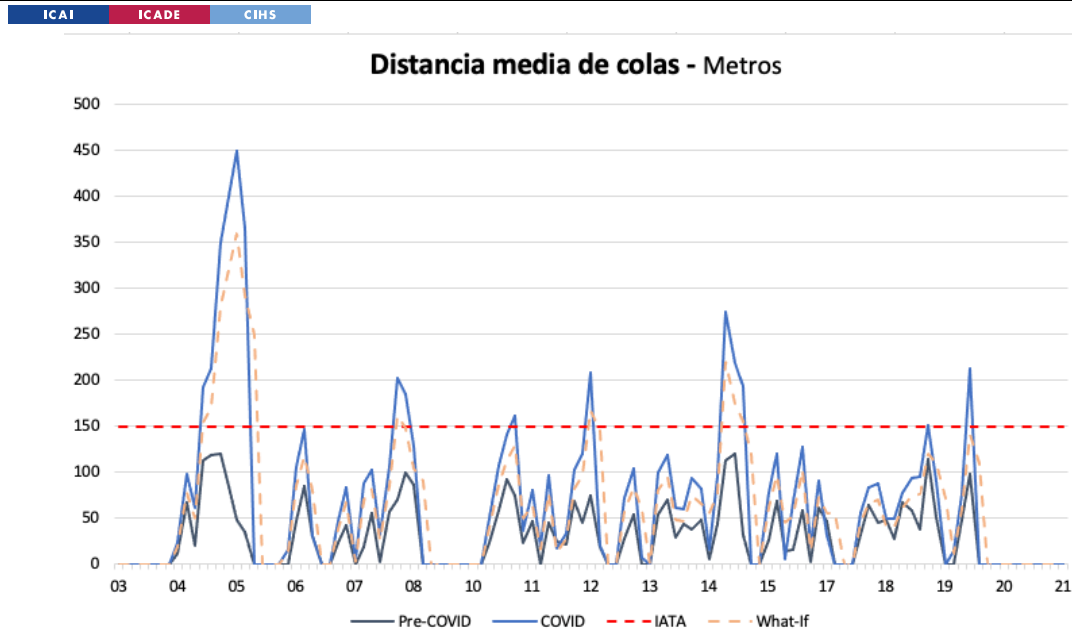


Figura 52 Escenario What-If I. Control de Seguridad. Distancia de cola.

5.3 WHAT-IF II: AMPLIACIÓN PUESTOS DE SEGURIDAD

El último escenario que se ha modelado y simulado ha sido la hipotética situación en la que se incluya un arco de seguridad adicional (con su respectivo staff), en el Control de Seguridad.

Para ello, primero se debería comprobar las limitaciones físicas de la infraestructura y comprobar si puede ser factible su implementación. En ese trabajo se ha asumido que habría suficiente espacio para ello.

Lo primero que resultad a la vista (Figura 53) en la simulación es que, en el momento de mayor pico que hemos visto en los escenarios anteriores, sobre las 5 a.m., ahora, la cola de pasajeros queda dentro de las limitaciones de la infraestructura, sin rebasar las zonas de Pasabordo y Check-In como ocurría con anterioridad.

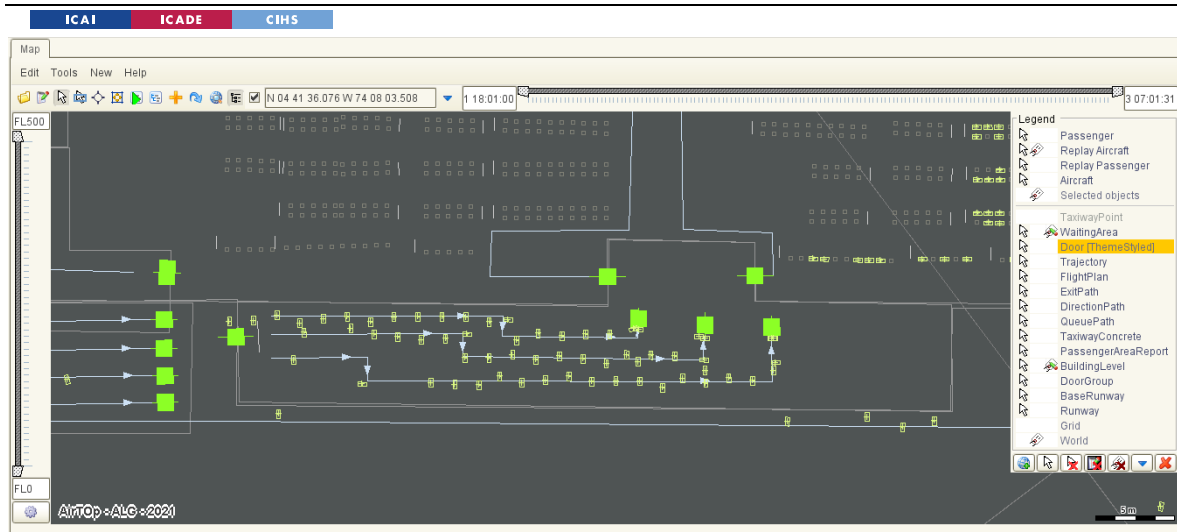


Figura 53 Escenario What-If II. Control de Seguridad.

Este hecho se ve claramente en la gráfica de la distancia de cola de la Figura 54.

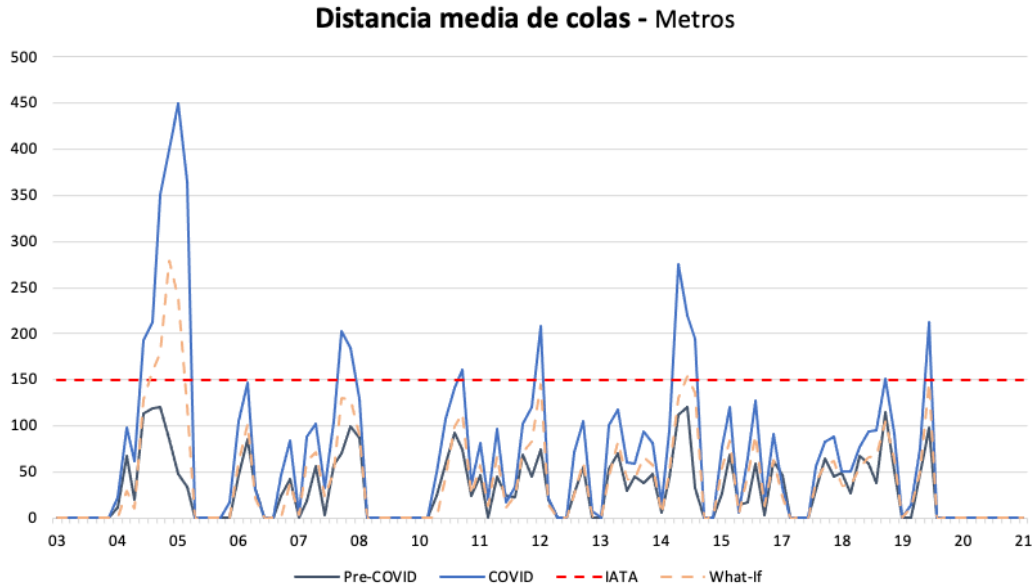


Figura 54 Escenario What-If II. Control de Seguridad. Distancia de cola.

Con la inclusión de una nueva cola de seguridad, los picos de demanda se ven reducidos entorno a un 40%. El transcurso del resto del día, la distancia media de las colas se ve

ligeramente reducida. En el Capítulo de Conclusiones se esbozarán las implicaciones y posibles utilidades que podría tener este escenario.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente capítulo del trabajo describirá cuales han sido las conclusiones del proyecto, destacando el trabajo realizado para alcanzarlas, explicando los objetivos del trabajo que se han cubierto y una serie de aportaciones e implicaciones propuestas a partir del análisis de los resultados. Del mismo modo, se esbozarán las posibles líneas de trabajo futuro para dar continuidad a este estudio.

Antes de comenzar a describir cuales han sido las conclusiones de este proyecto, conviene destacar de nuevo el carácter tan novedoso y actual de este trabajo y cuales son implicaciones. Queda claro que prácticamente la población mundial se está enfrentando a una situación sin precedentes en la historia moderna. De ahí, la complejidad de la situación, la incertidumbre y la rapidez de cambio. Por ello, las situaciones concretas y estado de la cuestión que se describe en este proyecto, podrían quedar invalidadas u obsoletas en un corto/medio plazo, en función de la evolución de la pandemia: las restricciones emitidas por los organismos pueden variar como lo han hecho a lo largo del último año de crisis sanitaria.

Sin embargo, lo que si podría trascender en el tiempo de este proyecto es la metodología empleada para el estudio de escenarios futuros, el modelo aeroportuario creado para las simulaciones y conclusiones de algunos escenarios que puedan asimilarse a otro tipo de casuística, esto es por ejemplo, el escenario donde se incluye un nuevo arco de seguridad o el escenario donde se reduce a la mitad la plantilla que opera el proceso de Check-In.

Sin mas preámbulo, a continuación se describen las conclusiones del presente trabajo.

En primer lugar, en el Capítulo 3 del trabajo se han recogido las principales medidas y restricciones implantadas por los organismos internacionales de seguridad aérea para el correcto y seguro funcionamiento de la operativa de una terminal aeroportuaria. En concreto

se destacan las medidas que afectan al flujo de pasajeros de salidas ya que se trata del objeto de estudio de este trabajo. Estas acciones podrían resumirse en:

- Medidas que afectan a procesos:
 - Inclusión de nuevos procesos:
 - Tests Rápidos
 - PCR's
 - Toma de temperatura
 - Incremento tiempo de procesos:
 - Comprobación de documentación sanitaria
 - Preguntas sanitarias obligatorias a pasajeros
 - Distancia seguridad
- Medidas que afectan a la capacidad física:
 - Distancia social en colas
 - Capacidad de salas de espera

Adicionalmente, las recomendaciones de hacer auto-CheckIn y de anticipar hasta 30min. la llegada al aeropuerto afecta directamente al Perfil de Llegadas y con ello a la operatividad de los procesos.

Con este análisis, queda claro cuál es la nueva situación que se puede encontrar un pasajero a la llegada de un aeropuerto para tomar un vuelo. Esta recopilación podría ser útil también para futuros estudios sobre impacto de la pandemia COVID-19 en terminales aeroportuarias, experiencia del pasajero, afecciones a la operativa de compañías que presenten servicios aeroportuarios...

En otro orden, se han estimado cuales son las variables de entrada o inputs para la simulación de un flujo de pasajeros en una terminal aeroportuaria. La principal de ella se trata del Plan de Vuelo o *FlightPlan*. Define cual es la planificación de operaciones de las aeronaves a lo largo de un día en la terminal. Contiene información que condiciona al resto de operaciones

en la terminal (tiempos de llegada, posición de parking, desplazamiento por las calles de rodadura, aerolíneas, capacidad de asientos...).

Adicionalmente, se necesitan de otros inputs como pueden ser:

- *Lay-out* de la terminal: disposiciones de las diferentes áreas, limitaciones físicas de la infraestructura. Para la importación del *lay-out* en AirTop se utiliza un archivo procedente de AutoCAD.
- Tiempos de proceso: duración de cada uno de las operaciones por las que transcurren, al menos, algunos de los pasajeros. Se pueden incluir como distribuciones discretas o probabilísticas.
- Secuencia de procesos de los pasajeros: en función a características como el tipo de vuelo (doméstico/internacional), Check-In online o no, pasaporte... cada pasajero ha de ser configurado con una secuencia de procesos diferentes.
- Perfil de llegadas de los pasajeros: tiempo de antelación con los que los usuarios llegan a la terminal.

Se ha de comentar que la casuística en este tipo de sistemas es muy amplia y podría abarcar una gran cantidad de variables desde, por ejemplo, el nº de acompañantes por cada pasajero hasta el tiempo que el pasajero pasa revisando paneles de información. Sin embargo, es conveniente ceñirse a las variables que tiene un mayor impacto en el sistema.

A continuación, se explican las conclusiones obtenidas del modelado del sistema.

Al modelado del sistema le precede un estudio exhaustivo y detallado del proceso real. Hubiese sido conveniente visitar *in-situ* la terminal para conocer de primera mano el proceso, tomar una serie de mediciones de tiempo y poder conversar con el personal que gestiona la infraestructura. Sin embargo, debido al aeropuerto analizado y la situación actual no ha sido posible hacer una visita de las instalaciones. En su defecto, este trabajo se ha apoyado en información y documentación de los compañeros de ALG para un proyecto previo que tenían en la terminal.

De la Figura 17 a la Figura 26 se muestran los diferentes objetos y elementos necesarios para crear el modelo en la herramienta AirTop. Cabe resaltar que el uso de la herramienta no es intuitivo y necesita de un previo entendimiento completo de todas las funcionalidades y elementos existentes y necesarios para la correcta compilación de los objetos del modelo.

El principal escenario objeto de estudio es el que se describe en el apartado 4.2 del documento: un escenario donde manteniendo las nuevas restricciones de la pandemia, se retoma una actividad de operaciones y vuelos de la situación pre-pandemia. De este modo se comprueban qué procesos constituyen una limitación para la operatividad de la terminal.

Los principales hallazgos que se han encontrado se podrían dividir en cada uno de los procesos estudiados:

- **Check-In:** La Figura 36 muestra cómo se reduce sustancialmente la entrada de pasajeros al proceso este proceso. Esto es como consecuencia del aumento de pasajeros que llega a la terminal con el Check-In previamente hecho. Otro de los efectos directos es la reducción del tiempo de espera de la Figura 37. Pese a aumentar el tiempo de proceso, el tiempo medio disminuye gracias a la reducción de pasajeros. Además se consigue ajustar a los estándares de calidad (por debajo de los 20 minutos de espera).
- **Pasabordo:** Como se ha comentado a lo largo del trabajo, este proceso es un proceso superfluo que apenas supone implicación en el sistema. Se trata de un sistema automático de lectura de la tarjeta de embarque. Pese a incluir una toma de temperatura en este punto, al ser del mismo modo, de forma digital mediante un escáner térmico, apenas tiene efecto en el flujo de pasajeros.
- **Control de Seguridad:** Este proceso queda mucho mas expuesto a la llegada de los pasajeros a la terminal pues, ahora, el 60% de los pasajeros, llegan directamente a este trámite (después del Pasabordo). Por ello, en la Figura 40 se comprueba como los pasajeros llegan con mas antelación a la terminal y como se

comprime la llegada respecto a la situación anterior. En general, el número de pasajeros es el mismo en ambos escenarios.

El tiempo medio de cola se ve incrementado exponencialmente en dos momentos del día, entorno a las 5 AM y a las 3:30 PM. El proceso colapsa y se dispara el tiempo de espera hasta los 14 y 10 minutos superando con creces los límites de IATA.

La distancia media de colas sufre un efecto similar: cuando el proceso colapsa, se alcanzan colas de hasta 449 metros. Sin embargo, en este proceso si que se superan hasta en 5 ocasiones a lo largo del día los límites de calidad. De hecho, como se aprecia en la Figura 42 se excede físicamente los límites de las dependencias de seguridad.

Sin duda, este es uno de los procesos que debe experimentar modificaciones antes de alcanzar los niveles de operatividad previos a la pandemia.

- **Sala de embarque:** Estas estancias no experimentan grandes cambios ya que se ha comprobado que el cuello de botella del sistema es el Control de Seguridad. El goteo de pasajeros procedente del cuello hacia las salas de embarque es el mismo en ambos escenarios.

Como se comprueba en la Figura 44, no se superan en ningún momento los límites de calidad. Esto es claramente gracias a la amplia superficie que hay destinada a las Salas de Embarque.

Como medida de mitigación para los momentos puntuales donde existe un fuerte pico de demanda, se podría modificar Plan de Vuelo, espaciando en el día la salida de vuelos para distribuir uniformemente la demanda de la terminal. Esta recomendación tiene un mayor impacto ya que implica a otros agentes como los coordinadores de SLOTS, control aéreo y planificación interna de aerolíneas. Su implementación quedaría sujeta a la disponibilidad de estos agentes.

Por último, en relación con los escenarios What-If que se han simulado, se puede concluir:

- **Escenario brote en personal Check-In:** Como se comprueba en la Figura 49, el punto crítico se encuentra en la distancia de las colas. La reducción de personal hace aumentar significativamente las distancias de las colas en los puntos mas altos haciendo que se superen hasta en 6 ocasiones los límites de calidad. Una posible solución pasaría por fomentar u obligar al pasajero que no tiene que facturar ningún equipaje a traer el Check-In hecho antes de la llegada a la terminal. De este modo, aumentamos aun mas el porcentaje de viajes con Check-In y los mostradores pasarían ser utilizados exclusivamente por pasajeros que tengan que embarcar maletas facturadas.

Otra posible solución sería la incorporación de máquinas de Check-In automáticas para que el proceso quede descongestionado. De esta forma, los pasajeros realizarían el proceso de forma automática prescindiendo de interacción con personal. Además, esta solución podría del mismo modo descongestionar el proceso en otros momentos del día pudiendo enmarcar dentro de las limitaciones las distancias de las colas que en algunas ocasiones del escenario base también se superaba. Convendría llevar a cabo un estudio de penetración de estas máquinas entre los usuarios de la terminal.

- **Escenario ampliación puesto de seguridad:** Este escenario se presenta como una solución a uno de los problemas identificados en el proyecto: la capacidad del proceso de Control de Seguridad. Como se aprecia visualmente en la Figura 53 o en la gráfica de la Figura 54, se consigue disminuir el pico de la distancia de las colas para encajarlo dentro de los límites. Para que esta solución no suponga un derroche de recursos de personal en horas valle, el nuevo arco de seguridad podría activarse en aquellos momentos en los que se estime un pico de demanda de pasajeros. Con una antelación de 30 minutos frente al pico para evitar que colapse este proceso. Además, como se comentó en el Capítulo de Análisis de Resultados, habría que analizar las limitaciones físicas de la infraestructura para comprobar la viabilidad de agregar una tercera fila de pasajeros asegurando la distancia de 1,5m transversalmente entre las colas.

Este proyecto ha llevado a cabo un estricto estudio y simulación del flujo de pasajeros en la terminal satélite del aeropuerto de El Dorado analizando las capacidades de los diferentes procesos, identificando los puntos críticos del sistema para un escenario donde se retome la operativa pre-pandemia manteniendo las restricciones sanitarias propuestas por las autoridades.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Appelt, S., Batta, R., Lin, L., & Drury, C. (2007, December). Simulation of passenger check-in at a medium-sized US airport. In *2007 Winter Simulation Conference* (pp. 1252-1260). IEEE.
- [2] Belobaba, P., Odoni, A., & Barnhart, C. (Eds.). (2015). *The global airline industry*. John Wiley & Sons.
- [3] Cheng, L., Reddy, V., Fookes, C., & Yarlalagadda, P. K. (2014). Agent-based modelling simulation case study: assessment of airport check-in and evacuation process by considering group travel behaviour of air passengers. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 568, pp. 1859-1864). Trans Tech Publications Ltd.
- [4] Correia, A. R., Wirasinghe, S. C., & de Barros, A. G. (2008). A global index for level of service evaluation at airport passenger terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(4), 607-620.
- [5] de Barros, A. G., & Tomber, D. D. (2007). Quantitative analysis of passenger and baggage security screening at airports. *Journal of Advanced Transportation*, 41(2), 171-193.
- [6] Ingolfsson, A., Akhmetshina, E., Budge, S., Li, Y., & Wu, X. (2007). A survey and experimental comparison of service-level-approximation methods for nonstationary M (t)/M/s (t) queueing systems with exhaustive discipline. *INFORMS journal on computing*, 19(2), 201-214.
- [7] Rodríguez-Sanz, Á., de Marcos, A. F., Pérez-Castán, J. A., Comendador, F. G., Valdés, R. A., & Loreiro, Á. P. (2021). Queue behavioural patterns for passengers at airport terminals: A machine learning approach. *Journal of Air Transport Management*, 90, 101940.
- [8] Stolletz, R. (2011). Analysis of passenger queues at airport terminals. *Research in Transportation Business & Management*, 1(1), 144-149.
- [9] Tošić, V. (1992). A review of airport passenger terminal operations analysis and modelling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 26(1), 3-26.
- [10] Verma, A., Tahlyan, D., & Bhusari, S. (2020). Agent based simulation model for improving passenger service time at Bangalore airport. *Case Studies on Transport Policy*, 8(1), 85-93.

-
- [11] Wu, P. P. Y., & Mengersen, K. (2013). A review of models and model usage scenarios for an airport complex system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 47, 124-140.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio y simulación del flujo de pasajeros en una terminal
aeroportuaria para un escenario COVID-19

Anexo I

Autor: Alejandro Jerez Pozo

Director: Ignacio Tornos de Inza

Junio 2021

Madrid

Capítulo 1. ANEXO I

1.1 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (en adelante ODS), quedan enmarcados como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible y como principal motivación la de erradicar la pobreza mundial, la protección del planeta y la intención de asegurar la prosperidad para todos. Cada objetivo tiene una serie de hitos internos que deben de cumplirse dentro de los próximos 15 años. Pueden consultarse en la página web de las Naciones Unidas a través del siguiente enlace:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Para alcanzar estas metas, se precisa de la colaboración de todas las partes interesadas ya sean gobiernos, sector privado, sociedad civil e individuos. Por ello, con la realización del presente Trabajo Fin de Máster se pretende aportar el esfuerzo individual del autor para ayudar a alcanzar estos ODS establecidos por la ONU.

En un análisis preliminar de los ODS, se pueden identificar una serie de ellos que se ven directamente beneficiados por la elaboración de este proyecto. Del mismo modo existen algunas acciones que podrían tener una menor implicación en estos objetivos pero quedan en un segundo plano.

Los principales ODS que se trabajan en este proyecto son:

- 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.
- 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.

- 9: Construir unas industrias resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

A continuación, se procede a realizar un estudio mas en profundidad de las implicaciones que tiene este proyecto en cada uno de los ODS.

Objetivo 3: Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.

Es evidente que este trabajo no se enmarca dentro de un proyecto sanitario, sin embargo, se estudia el impacto que está teniendo la actual pandemia de COVID-19 sobre los pasajeros en una terminal aeroportuaria. De esta forma, se pretenden hallar puntos críticos en el flujo de personas que puedan comprometer las condiciones sanitarias de los individuos ya sea por aglomeraciones en colas de espera, duración de la estancia de pasajeros en las diferentes áreas de la terminal... Así, este trabajo puede concluir en la mejora de las condiciones sanitarias y bienestar de una parte de la sociedad civil (como el propio Objetivo de Desarrollo Sostenible indica) que hace uso de terminales aeroportuarias.

Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos.

Este trabajo puede aportar una base analítica y científica para la toma de decisiones de las partes interesadas de un aeropuerto. Decisiones enfocadas a la operativa de las terminales y que tienen por supuesto un significativo impacto en el crecimiento económico del aeropuerto, ciudad y país donde se encuentre ubicado.

Objetivo 9: Construir unas industrias resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.

En un situación adversa y excepcional como la que nos acontece es imprescindible el empleo de las técnicas mas sofisticadas para paliar los efectos de la pandemia en todos los sectores que se están viendo afectados. Con este trabajo se pretende aportar un estudio que ayude a la reconstrucción de la industria aérea para concluir con un sector mas resiliente ante este tipo de excepcionalidades.