

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
ACADEMIA DE CIENCIAS AERONAÚTICAS
SANTIAGO-CHILE



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE EMBARQUE DE
PASAJEROS MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE
SIMULACIÓN

JORGE FELIPE HERRERA GALLARDO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA	: SRA. ANAMARIA ARPEA I.
PROFESOR CORREFERENTE	: SR. PABLO PIÑEIRO C.

Agosto 2020

A mis padres y abuelos
Por ser el pilar fundamental

A María Azul
Por su apoyo incondicional

A mis amigos
Por los buenos momentos

A mis profesores guía
Por la oportunidad de realizar este trabajo

RESUMEN

El presente trabajo muestra la optimización del proceso de embarque de pasajeros, a través de la simulación de un sistema estocástico. Esto se debe a que la reducción del tiempo de embarque significa una reducción del turnaround y, por ende, que las aeronaves permanezcan menos tiempo en tierra, pudiendo volar por más tiempo y generando mayores ingresos.

El proceso de embarque fue optimizado en las aeronaves A320-200, B767-300 y B787-9, realizando modificaciones de ciertos parámetros críticos, de manera unilateral, observando el comportamiento del proceso y el impacto individual de cada uno de estos. Básicamente, fueron medidas como reducir el equipaje de mano permitido en cabina, realizar un pre-embarque y cambiar el método de embarque nuclear del modelo.

Estas modificaciones tuvieron el fin de mejorar la eficiencia del proceso, teniendo como referencia un escenario óptimo, el método Steffen, y, dentro de lo posible, entregar tiempos de embarque inferiores a este, lo que se tornó difícil, dependiendo de las características de cada aeronave en estudio y las restricciones presentes en el sistema.

Los resultados entregados, a partir de las simulaciones, muestran reducciones en el tiempo de embarque, respecto del modelo base, de hasta un 20% en la aeronave A320-200, sin embargo se tiene una ineficiencia, en el mejor de los casos, de un 10% respecto al método Steffen. Por otro lado, las aeronaves de fuselaje ancho entregan tiempos de embarque hasta un 4% más eficientes que el método Steffen, pero solo entregan reducciones en el tiempo de embarque de hasta un 9% para B767-300, y 7% para B787-9, aproximadamente.

Palabras Clave: optimización, embarque, turnaround, método Steffen.

ABSTRACT

The following investigation project presents the optimization of the passenger boarding process, through the simulation of a stochastic system. This is because the reduction in boarding times signifies a reduction in the turnaround time and, therefore, the airplane remains less time on ground, being able to fly longer and generating higher income.

The boarding process was optimized on aircraft A320-200, B767-300 and B787-9, making modifications to certain critic parameters, unilaterally, monitoring the behavior of the process and the individual impact of each. Basically, these were measures such as reducing carry-on baggage allowed in the cabin, pre-boarding passengers and changing the model's nuclear boarding method.

These modifications had the purpose to improve the efficiency of the process, having as reference an optimal scenario, the Steffen method, and, as far as possible, return boarding times below this, which became difficult, depending on the characteristics of each aircraft under study and the restrictions present in the system.

The given results, from the simulations, shows reductions in the boarding time, with respect to the base model, up to 20% on the aircraft A320-200, however it has an inefficiency, in the best case scenario, of 10% compared to the Steffen method. On the other hand, wide-body aircraft give boarding times up to 4% more efficient than the Steffen method, but only deliver reductions in boarding time up to 9% for B767-300 and 7% for B787-9, approximately.

Keywords: optimization, boarding, turnaround, Steffen method.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES.....	14
1.1. Justificación.....	14
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo General.....	17
1.2.2. Objetivos Específicos.	17
1.3. Metodología	18
1.4. Alcance.....	20
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	21
2.1. Antecedentes.....	21
2.1.1. Metodologías Estudiadas.....	22
2.2. Marco Teórico.....	25
2.2.1. Proceso de Embarque de Pasajeros	25
2.2.2. Optimización del Embarque	26
2.2.3. Teoría de Colas.....	27
2.2.4. Software de Simulación SIMIO	29
CAPÍTULO III: DESARROLLO.....	31
3.1. Simulación en Airbus A320-200.....	31
3.1.1. Características de la Aeronave.....	32
3.1.2. Modelamiento en SIMIO.....	32
3.1.3. Simulación del escenario	39

3.1.4. Optimización del Modelo.....	43
3.2. Simulación en Boeing 767-300	50
3.2.1. Características de la Aeronave.....	50
3.2.2. Modelamiento en SIMIO.....	51
3.2.3. Simulación del Escenario	53
3.2.4. Optimización del modelo	55
3.3. Simulación en Boeing 787-9	59
3.3.1. Características de la Aeronave.....	59
3.3.2. Modelamiento en SIMIO.....	60
3.3.3. Simulación del Escenario	61
3.3.4. Optimización del modelo	64
3.4. Análisis	68
3.4.1. Pasajeros Embarcados por Minuto.....	68
3.4.2. Escenarios más Eficientes	71
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS.....	79

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1: CARTA GANTT DEL TURNAROUND.....	14
FIGURA 2: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
FIGURA 3: EMBARQUE DE ATRÁS HACIA DELANTE.	22
FIGURA 4: MÉTODO WILMA.....	22
FIGURA 5: EMBARQUE POR BLOQUES.....	22
FIGURA 6: EMBARQUE STEFFEN.....	23
FIGURA 7: PASOS A SEGUIR EN EL AEROPUERTO PREVIO AL EMBARQUE.	25
FIGURA 8: INTERFERENCIAS DENTRO DE LA CABINA.	26
FIGURA 9: MAPA DE ASIENTO DE AVIÓN A320-200.	32
FIGURA 10: PUENTE DE EMBARQUE EN AMB.	33
FIGURA 11: PRIMERA ETAPA ESQUEMATIZACIÓN.	34
FIGURA 12: SEGUNDA ETAPA ESQUEMATIZACIÓN.	35
FIGURA 13: EMBARQUE POR BLOQUES.	46
FIGURA 14: EMBARQUE POR BLOQUES MODIFICADO.....	47
FIGURA 15: MODELO DE EMBARQUE ESCENARIO 5, A320.....	48
FIGURA 16: MAPA DE ASIENTOS BOEING 767-300.....	50
FIGURA 17: EMBARQUE POR BLOQUES, B767.....	56
FIGURA 18: MODELO DE EMBARQUE ESCENARIO 5, B767.....	58
FIGURA 19: EMBARQUE POR BLOQUES, B787.....	65
FIGURA 20: MODELO DE EMBARQUE ESCENARIO 5, B787.....	66
FIGURA 21: ESQUEMATIZACIÓN DEL MODELAMIENTO EN SIMIO.	80
FIGURA 22: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE EMBARQUE.	81

FIGURA 23: MAPA DE ASIENTOS BOEING 787-9.....84

ÍNDICE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: MOVIMIENTO ANUAL DE PASAJEROS EN CHILE.	16
GRÁFICO 2: DISTRIBUCIÓN TRIANGULAR.	28
GRÁFICO 3: DISTRIBUCIÓN DE AERONAVES DE LATAM AIRLINES.	31
GRÁFICO 4: DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES DE TIEMPOS DE EMBARQUE.	36
GRÁFICO 5: PRUEBA DE NORMALIDAD 100% FACTOR DE OCUPACIÓN.	39
GRÁFICO 6: DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES DE TIEMPOS DE EMBARQUE.	40
GRÁFICO 7: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN ENTRE TIEMPO Y ROTACIÓN.	41
GRÁFICO 8: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN ENTRE TIEMPO Y ROTACIÓN.	54
GRÁFICO 9: DIAGRAMA DE DISPERSIÓN ENTRE TIEMPO Y ROTACIÓN.	62
GRÁFICO 10: PASAJEROS EMBARCADOS POR MINUTO, MÉTODO STEFFEN.....	68
GRÁFICO 11: PASAJEROS EMBARCADOS POR MINUTOS, SIMULACIONES BASE.	69
GRÁFICO 12: PASAJEROS EMBARCADOS POR MINUTO, SIMULACIONES BASE Y ESCENARIO 3 A320.	70
GRÁFICO 13: PASAJEROS EMBARCADOS POR MINUTO, DEL ESCENARIO 5.....	70
GRÁFICO 14: CORRELACIÓN ENTRE TIEMPO DE EMBARQUE Y ROTACIONES, DE LAS AERONAVES.	72
GRÁFICO 15: SENSIBILIDAD TIEMPO DE EMBARQUE RESPECTO A ROTACIONES.....	72

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1: TIEMPOS DEL PROCESO DE EMBARQUE SEGÚN MÉTODO.	23
TABLA 2: COMPARACIÓN TIEMPOS DE EMBARQUE.....	36
TABLA 3: RESULTADOS MÉTODO STEFFEN, A320.....	37
TABLA 4: RESULTADOS ESCENARIO BASE, A320.	41
TABLA 5: COMPARACIÓN CON MÉTODO STEFFEN, A320.	42
TABLA 6: RESULTADOS ESCENARIO 1, A320.....	44
TABLA 7: RESULTADOS ESCENARIO 2, A320.....	44
TABLA 8: RESULTADOS ESCENARIO 3, A320.....	46
TABLA 9: RESULTADOS ESCENARIO 4, A320.....	47
TABLA 10: RESULTADOS ESCENARIO 5, A320.	49
TABLA 11: RESULTADOS MÉTODO STEFFEN, B767.....	52
TABLA 12: RESULTADOS ESCENARIO BASE, B767.....	53
TABLA 13: COMPARACIÓN CON MÉTODO STEFFEN, B767.	55
TABLA 14: RESULTADOS ESCENARIO 2, B767.....	56
TABLA 15: RESULTADOS ESCENARIO 4, B767.....	57
TABLA 16: RESULTADOS ESCENARIO 5, B767.....	58
TABLA 17: RESULTADOS MÉTODO STEFFEN, B767.....	60
TABLA 18: RESULTADOS ESCENARIO BASE, B787.	62
TABLA 19: COMPARACIÓN CON MÉTODO STEFFEN, B787.	63
TABLA 20: RESULTADOS ESCENARIO 2, B767.....	64
TABLA 21: RESULTADOS ESCENARIO 4, B767.....	66
TABLA 22: RESULTADOS ESCENARIO 5, B767.....	67

TABLA 23: EFICIENCIA DE LOS ESCENARIOS MÁS ÓPTIMOS	71
TABLA 24: RESULTADOS COMBINACIÓN ESCENARIO 1 Y 3, A320.	74
TABLA 25: ORDEN DE ACCESO, A320-200.	82
TABLA 26: ORDEN DE ACCESO, B767-300	82
TABLA 27: ORDEN DE ACCESO, B787-9	82
TABLA 28: FLOTA AERONAVES DE PASAJEROS.....	83

GLOSARIO

AMB: Aeropuerto Arturo Merino Benítez

Overhead Bins: Compartimientos superiores para equipaje de mano.

Factor de Ocupación: Proporción de pasajeros entre el número de pasajeros transportados y el total de asientos disponibles en una aeronave.

Ground Handling: Asistencia en tierra a aeronaves.

IATA: International Air Transport Association

JAC: Junta Aeronáutica Civil

Narrow Body Aircraft: Clasificación de aeronaves de fuselaje angosto.

Seat Pitch: Distancia desde cualquier punto en un asiento hasta el mismo punto exacto en el asiento delantero o trasero.

SIMIO: SIMulation Modeling framework based on Intelligent Objects; software de simulación.

Single Aisle: Alusión a aeronaves con un pasillo en su cabina.

TAT: Turn-Around Time

Turnaround: Tiempo de preparación de la aeronave desde su acoplamiento al puente de embarque hasta ser desacoplado para el despegue.

Twin Aisle: Alusión a aeronaves con dos pasillos en su cabina.

Wide Body Aircraft: Clasificación de aeronaves de fuselaje ancho.

INTRODUCCIÓN

La experiencia de volar, en general, para los pasajeros no consiste simplemente en subirse al avión y viajar a destino, sino que es un conjunto de procesos, desde que se llega al aeropuerto hasta que se aterriza en destino. Uno de estos procesos es el embarque, en el cual se permite el ingreso de los pasajeros a su vuelo.

El embarque de pasajeros es un proceso que ha estado presente en la aviación comercial desde sus orígenes, cumpliendo rigurosamente los estándares impuestos por las autoridades, resguardando como primera prioridad la seguridad operacional.

Con el paso del tiempo se han evaluado distintas alternativas para embarcar a los pasajeros, basándose en factores como la fila y letra del asiento asignado a cada pasajero. Existen una infinidad de *papers*, en los cuales se encuentran distintas metodologías de embarque, donde destaca la modalidad “de atrás hacia delante”, utilizada al comienzo de la década del 2010, esta trataba de separar a los pasajeros en 2 grupos y embarcarlos de atrás hacia delante, siendo comprobado que este era el “segundo peor método” (Steffen, 2008).

Al momento de adquirir un boleto para viajar en avión se especifica la hora de presentación en el aeropuerto, la que varía en 2 y 4 horas dependiendo de cada aerolínea y su destino, nacional o internacional. Sin embargo, con la llegada de el modelo de aerolíneas *low cost* se ha popularizado viajar solo con equipaje de mano o un artículo personal, lo que genera una holgura en el horario de presentación, permitiendo que los pasajeros adquirieran su tarjeta de embarque con anterioridad y se presenten en la sala de embarque minutos antes de que cierren las puertas del avión.

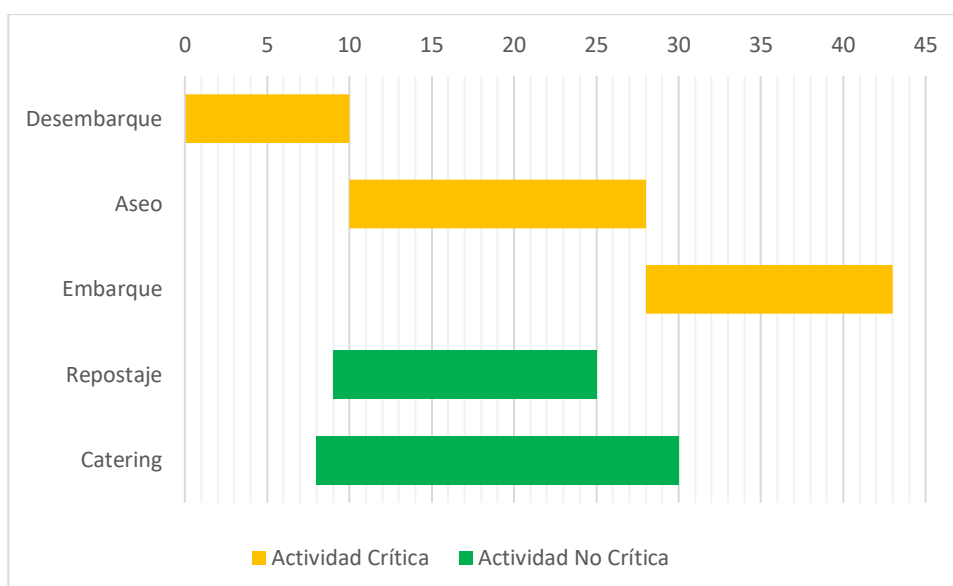
Esta investigación se buscará optimizar el procedimiento del embarque de pasajeros mediante el software de simulación SIMIO, evaluando también la factibilidad de la implementación sobre los escenarios que serán simulados.

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Justificación

El embarque de pasajeros es uno de los procesos que mas afecta el TAT ¹ de una aeronave (Neumann, 2019), el cual varía según su modelo. Por lo tanto, reducir el tiempo de embarque podría reducir el *turnaround*, lo que se traduce en una operación más eficiente, manteniendo las aeronaves menos tiempo en tierra y más tiempo volando, pudiendo recibir mayores ingresos.

Figura 1: Carta Gantt del Turnaround.



Fuente: Elaboración Propia.

El punto es que se les cobra a las aerolíneas por el derecho de embarcar y desembarcar pasajeros, ya sea utilizando puente de embarque o en posición remota, entonces el retraso de un par de minutos puede significar un sobrecargo que podría considerarse excesivo. Se puede tomar como ejemplo de lo anterior el cobro que se realiza en el aeropuerto Arturo Merino Benítez, que por brindar el servicio de embarque, y desembarque, se contempla una tarifa base por el uso del puente por 45 minutos, en vuelos nacionales, y que pasado dicho tiempo se

¹ TurnAround Time

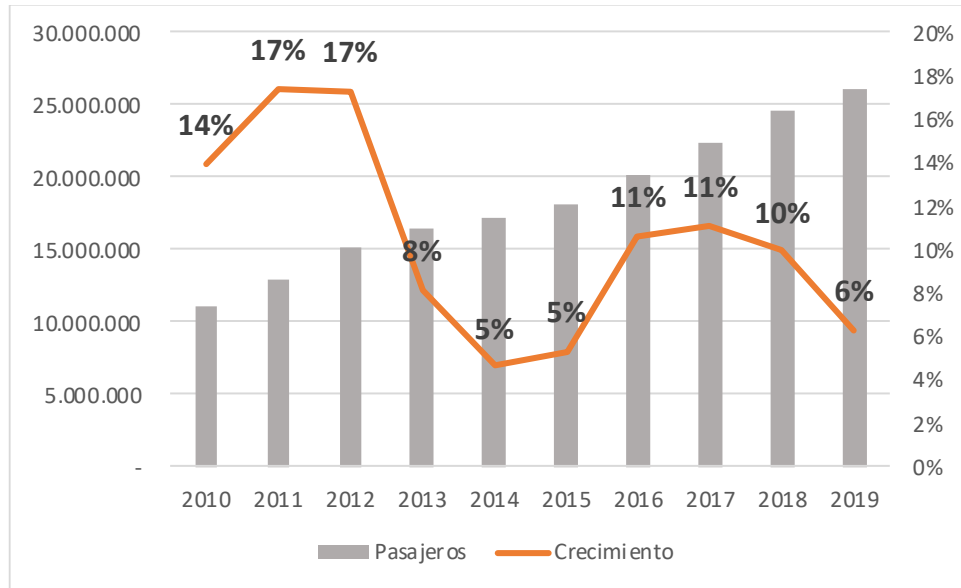
cobrará extra por cada 30 minutos o fracción². Entonces, en el caso de Santiago de Chile, las aerolíneas en sus vuelos domésticos, según la lógica, tratarían de mantener su TAT en máximo 45 minutos, pero un gran número de atrasos acumulados en este terminal se traduciría en un costo excesivo para un operador.

Por otro lado, al existir un aumento en la cantidad de pasajeros es entendible que exista una saturación en las salas de embarque, esto puede deberse a la información entregada a los pasajeros sobre la hora de presentación en el aeropuerto. En general, para vuelos domésticos, las aerolíneas recomiendan llegar al terminal 2 horas antes de la salida de su vuelo, sin embargo, esa sugerencia no debería aplicar a todos los pasajeros, hasta antes de la llegada del modelo low cost a Chile lo habitual era que todos, o la mayoría, de los pasajeros viajaran con su equipaje en bodega, en cambio, ahora el gran porcentaje de los pasajeros viajan con equipaje de mano o solo con un artículo personal. Estos pasajeros que no envían su equipaje a bodega, y que hayan realizado su check-in con anterioridad, se dirigen directamente a la sala de embarque una vez que arriban al aeropuerto, entonces si estos llegan 2 horas antes de la salida de su vuelo, estarían sobre poblando la sala de embarque, reduciendo el nivel de servicio del aeropuerto.

Además, ante un crecimiento constante en la industria aérea nacional puede ser de utilidad tener un procedimiento de embarque expedito, teniendo en cuenta que un aumento en la demanda de puertas de embarque, ya sea puente o remoto, podría significar un alza de las tarifas exigidas por los concesionarios. El siguiente gráfico muestra los pasajeros transportados y el crecimiento de estos entre los años 2010 y 2018.

² Según Anexo A: Reglamento de Servicio de la Obra, AMB.

Gráfico 1: Movimiento anual de pasajeros en Chile.



Fuente: Elaboración a partir de datos de la Junta Aeronáutica Civil.

La constante optimización de los procesos, debería ser una práctica imprescindible en cada empresa u organización, y en este trabajo de investigación se busca optimizar el proceso de embarque, utilizando el software de simulación SIMIO, reduciendo el tiempo del proceso, pero asegurando una aceptable calidad en el servicio entregado a cada pasajero.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo que se pretende lograr luego de la investigación y desarrollo de este tema es:

Desarrollar una metodología para optimizar el proceso de embarque mediante el uso de modelos de simulación estocásticos, el cual permita obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de este proceso.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Realizar un levantamiento de información, el cual permita establecer parámetros que se ajusten a la realidad del proceso.
- Diseñar un modelo estocástico que simule el embarque de una aeronave, según la capacidad de esta.
- Proponer una metodología optimizada, operacionalmente factible y que cumpla con estándares de calidad demandados por los pasajeros.
- Implementar el estudio a la flota comercial de LATAM.

1.3. Metodología

La metodología a utilizar en este trabajo de titulación consiste en una investigación teórica, a través del uso del software de simulación SIMIO, buscando optimizar el embarque en distintas aeronaves.

Primero, realizar un levantamiento de información y datos relevantes para el modelo, en base a esta información se puede llevar a cabo el siguiente paso de la metodología de esta investigación.

Segundo, hay que definir todos los parámetros y supuestos a aplicar; siendo que se simularán metodologías de embarque, es imprescindible el ingreso de parámetros al sistema para que la simulación se acerque lo más que se pueda a la realidad.

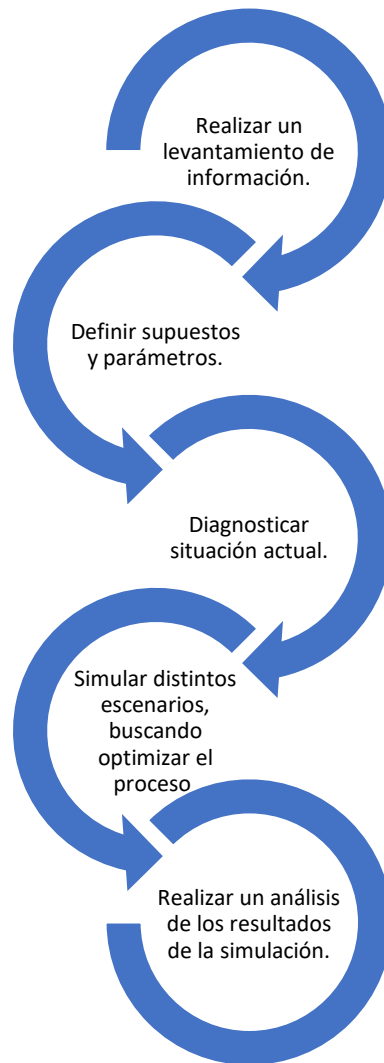
Tercero, se debe realizar un diagnóstico de la situación actual, utilizando como modelo de base el proceso de embarque de LATAM Airlines. Para esto se realizará una simulación inicial de este procedimiento, para poder diagnosticar e identificar las posibles falencias que tenga la metodología, y poder aplicar modificaciones que permitan mejorar, o reducir, los tiempos del proceso de embarque.

Cuarto, en base al diagnóstico realizado, se aplicarán modificaciones paulatinamente al modelo utilizado, con el fin de acercarse a un proceso óptimo o que, al menos, mejore los tiempos en una medida significativa.

Quinto, a partir de la información emitida por el software respecto a la simulación, se debe encontrar un modelo matemático que describa el proceso.

Por último, realizar un análisis de los resultados obtenidos, a partir de las simulaciones de los distintos escenarios propuestos.

Figura 2: Metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración Propia.

1.4. Alcance

En esta investigación se apreciarán dos tipos de alcances. En primer lugar, se tendrá un alcance del tipo descriptivo, debido a que se recopilará información respecto a los procedimientos de embarque actual, con la cual se dará pie a caracterizar variables, tales como, la cantidad de pasajeros preferentes, el tiempo en que se demora un pasajero en guardar su equipaje en los *overhead bins*³, entre otras variables que se identificarán durante el desarrollo de la investigación.

En segundo lugar, se tendrá un alcance correlacional, porque se buscará optimizar el proceso de embarque al modificar las variables identificadas. Se analizará la manera de modificar las variables, tal que, se encuentren resultados aplicables a la realidad de la industria, teniendo en consideración que el uso del software puede arrojar resultados que se puedan escapar de los rangos aceptables. Esto tiene la principal finalidad de encontrar un modelo que reduzca la variabilidad de los tiempos de embarque según cada aeronave.

Por último, para esta investigación se considera como alcance temporal el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, debido a que se utilizara como base de la simulación parte de la infraestructura de dicho terminal, como por ejemplo los puentes de embarque.

³ Compartimientos superiores en la cabina del avión, se utilizan para guardar el equipaje de mano.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

El proceso de embarque de pasajeros podría plantearse de una infinidad de ideas, las cuales se ven reducidas según la factibilidad de la implementación, y siendo realistas al respecto.

Actualmente, la metodología de embarque utilizada por LATAM Airlines consta de tres etapas. La primera etapa, en la que en primer lugar se procesan los pasajeros con necesidades especiales, dentro de los que están considerados los adultos mayores, embarazadas, infantes y pasajeros con movilidad reducida que requieran asistencia; posteriormente se procede con el embarque premium, en el que se contemplan los grupos 1, 2 y 3, partiendo con pasajeros premium con mayores beneficios, y a medida que se avanza en los grupos se va descendiendo en la categoría.

Posteriormente, se da inicio a la segunda etapa, en la cual se embarcan los pasajeros de los grupos 4, 5 y 6. Básicamente, en esta etapa se realiza la metodología “WILMA”, esta consiste en embarcar a los pasajeros de ventana a pasillo, respectivamente según los grupos de embarque.

Por último, la tercera etapa tiene un único grupo, el grupo 7, en el cual se procesan aquellos pasajeros que tienen pasajes con tarifa “basic”, que no incluye equipaje de mano, solo un artículo personal.

Ahora bien, si se realiza un diagnóstico al modelo recién explicado, se puede deducir que se producirían conflictos e incomodidades en el embarque; por ejemplo en ocasiones en que pasajeros del grupo 7 posean asientos en posiciones de ventana o centro, ya que al ser los últimos en embarcar obligarían a otros pasajeros de su misma fila pararse y salir hacia al pasillo para que este pasajero, del grupo 7, se pueda sentar. Esto tendría repercusiones en el tiempo del embarque.

Análogamente al modelo recién explicado, las aerolíneas pueden implementar a sus procesos de embarque distintas metodologías y así poder encontrar un equilibrio entre un embarque, que sea cómodo para los pasajeros y, al mismo tiempo, rápido y eficiente. Las metodologías sobre las que se hace alusión en este párrafo, obtenidos de un estudio experimental (Steffen & Hotchkiss, 2011), serán descritas en el siguiente apartado.

2.1.1. Metodologías Estudiadas

- De atrás hacia delante

Este método consiste en embarcar a los pasajeros “de atrás hacia delante” en un orden específico, empezando por la ventana, luego centro y, por último, pasillo.

- Método Wilma

La sigla “WILMA” esta constituida por las palabras “window” (ventana), “middle” (centro) y “aisle” (pasillo), realizando el embarque en esa secuencia de grupos, sin importar el orden de las filas.

- Por bloques

Este método consiste en agrupar a los pasajeros en tres grupos según las filas de sus asientos, dividiendo la cabina en tres segmentos; atrás, adelante y el medio, realizando el embarque en ese respectivo orden.

- Embarque aleatorio

Esta idea consiste en embarcar a los pasajeros sin un orden lógico, siendo embarcados en un único grupo, respetando el asiento asignado en la tarjeta de embarque de cada pasajero.

Figura 3: Embarque de atrás hacia delante.

Front						
						13
8	10	12		11	9	7
2	4	6		5	3	1

Figura 4: Método WILMA.

Front						
1	2	3		3	2	1
1	2	3		3	2	1
1	2	3		3	2	1
1	2	3		3	2	1
1	2	3		3	2	1
1	2	3		3	2	1

Figura 5: Embarque por Bloques.

Front						
2	2	2		2	2	2
2	2	2		2	2	2
3	3	3		3	3	3
3	3	3		3	3	3
1	1	1		1	1	1
1	1	1		1	1	1

- Método Steffen

Este método consiste en embarcar a los pasajeros en un orden particular, de ventana a pasillo y de atrás hacia delante, pero intercalando en el número de filas. Por eso, es importante que se haga una única fila, con los pasajeros ordenados como propone esta metodología, para el procesamiento antes de ingresar al puente de embarque.

Figura 6: Embarque Steffen.

Front						
12						9
6					15	3
11						8
5					14	2
10						7
4	16				13	1

Con respecto a los tiempos de embarque de estas metodologías, se realizaron pruebas experimentales en un fuselaje que imitaba un Boeing 757, probando cada modelo con 72 pasajeros.

Los resultados están expresados en dos tiempos, el tiempo oficial comprende el periodo entre que el primer pasajero entra a la aeronave y que el último se sienta, y el tiempo extendido desde que el primer pasajero es procesado y recibe la orden de avanzar hacia la aeronave hasta que el último pasajero este sentado.

Tabla 1: Tiempos del proceso de embarque según método.

Método	Tiempo Oficial	Tiempo Extendido
Atrás - Delante	06:11	06:16
WILMA	04:13	04:21
Por Bloques	06:54	06:56
Aleatorio	04:44	04:48
Steffen	03:36	03:40

Fuente: *Experimental Test of Airplane Boarding Methods (Steffen & Hotchkiss, 2011).*

Aunque, se puede inferir que alguna de estas metodologías es aplicable sujeta a su factibilidad. En primera instancia, se puede descartar inmediatamente el método Steffen, ya que es completamente infactible embarcar a los pasajeros de la manera planteada, debido a la complejidad que implica embarcar a los pasajeros en un orden tan particular.

Además, el método Steffen, si se quisiera implementar, requeriría el uso de mayores recursos, tales como aumentar el número de personal de aerolínea, para ordenar a los pasajeros previo al embarque, y una mayor utilización del espacio de la sala de embarque, lo que podría causar una congestión de pasajeros dentro de esta.

Ahora bien, si se quisiera aplicar alguno de los demás métodos se debe considerar que, por normativa, deben ser embarcados en primer lugar todos los pasajeros con necesidades especiales, y, posterior a eso, los pasajeros preferentes, si es el caso según aerolínea.

En definitiva, es imposible implementar alguna de las metodologías expuestas sin realizarle alguna modificación. Pero, estas sirven como una base para la creación de las distintas metodologías que utiliza cada aerolínea.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Proceso de Embarque de Pasajeros

El embarque de pasajeros a la aeronave es el último procedimiento, dentro de los procesos entre que el pasajero llega a su aeropuerto de origen y es embarcado en el avión correspondiente a su vuelo.

Figura 7: Pasos a seguir en el aeropuerto previo al embarque.



Fuente: IATA.

El proceso está comprendido desde el momento en que se hace el primer llamado a los pasajeros a acercarse a la puerta de embarque para comenzar con el embarque, hasta que el último pasajero se sienta en su puesto, concluyendo con el proceso.

También, es común ver aerolíneas que realicen un pre-embarque, lo que corresponde a comenzar el procesamiento de pasajeros, previo a que la cabina esté preparada para el embarque, dejando a los pasajeros listos para que, una vez que se pueda ingresar a la cabina, ingresen más rápido y, así, reducir el *TAT*, aunque se aumente tiempo en el proceso de embarque.

Lo que diferencia este proceso, sobre otras industrias de transporte de pasajeros, es el procesamiento de los pasajeros antes de pasar al puente de embarque. Los pasajeros deben mostrar, además de la tarjeta de embarque, su cédula de identidad o pasaporte que corresponde a la información de la tarjeta de embarque, por medidas de seguridad. Asimismo, se debe esperar a que cada pasajero, que haya despachado equipaje a bodega, sea embarcado para comenzar con el vuelo, y siendo el caso de que este no se presente su equipaje debe ser retirado de la bodega para proseguir con el vuelo.

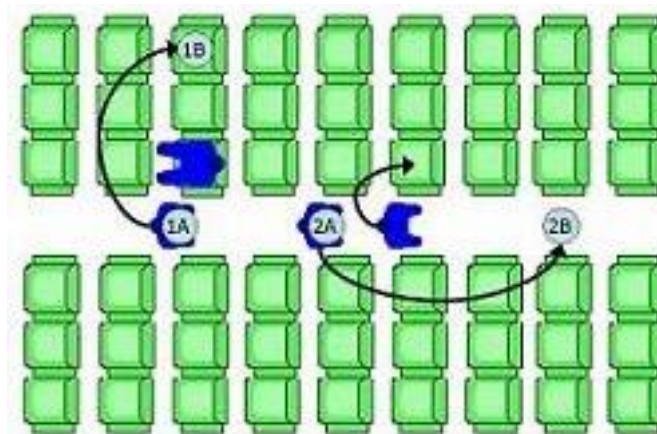
2.2.2. Optimización del Embarque

La minimización del tiempo de embarque se puede realizar reduciendo las interferencias dentro de la cabina (Qiang, Jia, & Huang, 2017), estas interferencias se definen como el impedimento del flujo debido a que pasajeros se encuentren estorbando el paso.

Las interferencias se dividen en dos tipos:

- Interferencias de Fila: Se refiere a las interferencias dentro de una fila. Como se muestra en la figura 7, que el pasajero 1 quiere llegar a su asiento en ventana, pero existe otro pasajero, sentado en pasillo estorbando la pasada.
- Interferencias de pasillo: Se refiere a la interferencia en el pasillo, ya sea porque un pasajero se desplaza demasiado lento, esta guardando su equipaje o se esta sentando, como se muestra en la figura 7.

Figura 8: Interferencias dentro de la cabina.



Fuente: Optimal Boarding Methods for Airline Passengers (Müller, 2009).

En esta investigación, se realizará la optimización en base a la reducción de las interferencias de fila, que se denotarán como “rotaciones”. Considerando que estas significan una demora superior y que este tipo de interferencias generan interferencias de pasillo.

Junto con lo anterior, para mejorar la eficiencia de el embarque, hay que promover la simultaneidad de las actividades dentro de la cabina, principalmente las rotaciones, debido a que son las demoras que más agregan tiempo al embarque, y la colocación de los equipajes de mano, y artículos personales, en los overhead bins (Steffen & Hotchkiss, 2011).

2.2.3. Teoría de Colas

La teoría de colas es el estudio de un sistema de líneas de espera mediante el uso de un conjunto de modelos matemáticos. Este estudio tiene el principal objetivo de buscar la estabilidad del sistema y determinar una capacidad de servicio apropiada.

Un sistema de colas básico consiste en un proceso, o servidor, que genera una fila de espera de elementos provenientes de una entrada, y que posteriormente a la realización de este proceso se genera una salida.

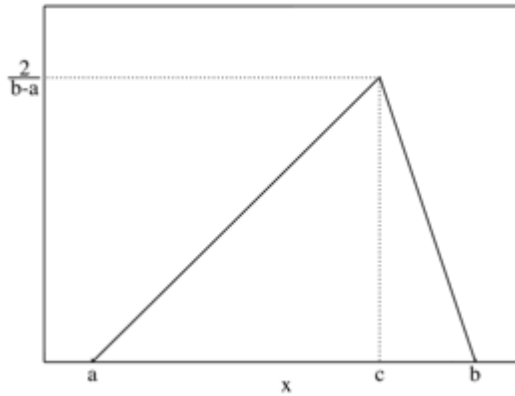
En general, para el estudio de las filas de espera, se pueden utilizar una variedad de distribuciones para describir el comportamiento de estas, pero en esta investigación en particular se utilizarán las siguientes:

- Distribución Triangular

Esta distribución se utiliza para determinar el comportamiento de un proceso a partir de un valor mínimo, uno máximo y, por último, el más probable. Esta distribución es de utilidad cuando se dispone de una escasa cantidad de datos.

A modo de referencia, se presenta a continuación la curva que describe la distribución triangular; donde “a” es el valor mínimo, “b” el máximo y “c” el mas probable.

Gráfico 2: Distribución Triangular.



Fuente: Wikipedia.

- Distribución Exponencial

$$P(X = x) = \begin{cases} \lambda e^{-x}, & \lambda > 0, \forall x \in \mathbb{N} > 0 \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Donde:

x: es el número de ocurrencias.

λ : es el promedio de ocurrencias en un intervalo.

- Distribución Poisson

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}, \lambda > 0, \forall x \in \mathbb{N} > 0$$

Donde:

x: es el número de ocurrencias.

λ : es el promedio de ocurrencias en un intervalo.

- Distribución Uniforme

$$P(X = x) = \begin{cases} \frac{1}{b - a}, & \forall x \in [a, b] \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Donde:

x: es el número de ocurrencias.

2.2.4. Software de Simulación SIMIO

En esta investigación se buscará optimizar el proceso de embarque de pasajeros en la aviación comercial mediante el uso de herramientas de simulación, con el fin de que este arroje resultados matemáticos.

La principal utilidad de las herramientas de simulador es para ver la factibilidad, o probar distintos procesos, incurriendo en gastos menores a lo que significaría realizar las pruebas en el mundo real, ya sea una sala de embarque o una habitación que simule la situación que se desea experimentar.

En este caso en particular se utilizará el software SIMIO, cuyo nombre viene de la frase “SIMulation Modeling framework based on Intelligent Objects” (SIMIO; Seat Guru, s.f.), o “marco de modelamiento de simulación basado en objetos inteligentes” en español.

SIMIO tiene la finalidad de construir y ejecutar modelos dinámicos de sistemas, con el fin de ver como funcionan; combinando objetos inteligentes, los cuales trabajando en conjunto generan flujos de entidades, buscando acercar la simulación a la realidad y entregar datos útiles para realizar estudios estadísticos.

El software cuenta con entidades, que se pueden entender como individuos o pasajeros, que pueden ser procesadas por una serie de objetos inteligentes. Los objetos son indispensables para la programación del sistema a simular ya que estos son los que dan forma al modelamiento a través de parámetros dados para

cada uno, y que pueden ser modificables; de todos los objetos disponibles en la aplicación se utilizarán los siguientes:

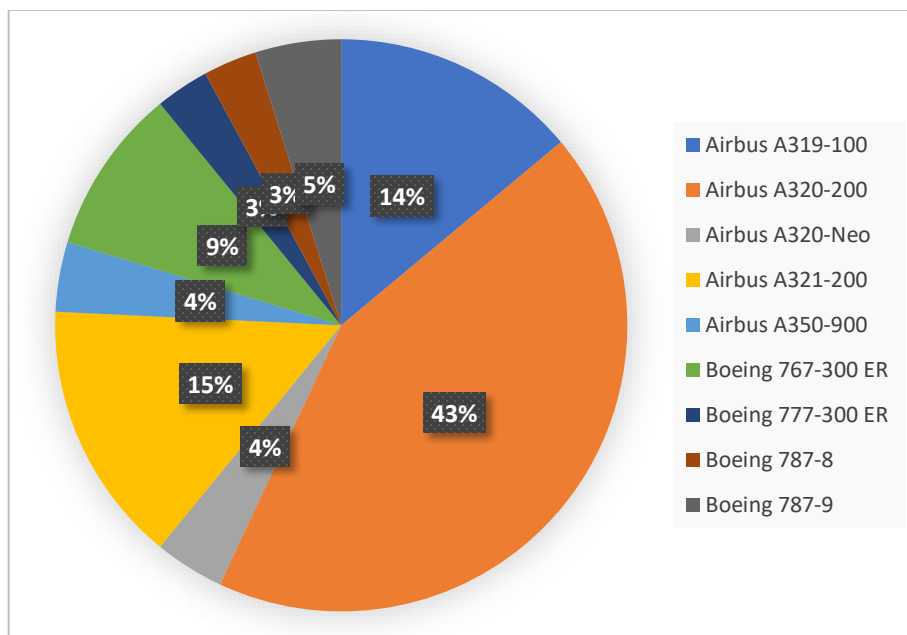
- **Source (entrada):** Utilizado para la creación e introducción de entidades al sistema, definiendo una frecuencia de creación y un máximo de entidades. Este objeto está descrito por la función distribución exponencial.
- **Sink (salida):** Objeto utilizado para “destruir” a las entidades y generar estadísticas; se le llama “destruir” porque las entidades no seguirán creando datos, entonces estos son retirados del sistema.
- **Server (servidor):** Corresponde a una estación de trabajo, donde las entidades realizan procesos dentro del sistema, este servidor está descrito por la función distribución triangular.
- **Worker (trabajador):** Representa a un trabajador que puede realizar tareas en la simulación, en este caso se pueden utilizar para el procesamiento de los pasajeros en el embarque.
- **Path (camino):** se utiliza como una conexión entre nodos, para que las entidades viajen entre ellos, pudiendo tener, o no, una velocidad, tiempo o distancia definida.
- **Node (nodo):** es un nodo que sirve para enlazar caminos.

CAPÍTULO III: DESARROLLO

3.1. Simulación en Airbus A320-200

Esta investigación busca, en parte, optimizar el procedimiento de embarque de LATAM es necesario tomar como referencia alguna de lo aeronaves pertenecientes a su flota. Debido esto, se presenta a continuación un gráfico de la distribución de su flota comercial de pasajeros:

Gráfico 3: Distribución de aeronaves de LATAM Airlines⁴.



Fuente: Memoria Integrada (LATAM Airlines Group, 2019).

A partir de este gráfico de torta, debido a su elevado porcentaje, de un total de 330 aviones, se ha decidido utilizar la configuración de un avión Airbus, modelo A320-200, para la simulación inicial, o de diagnóstico, del modelo de embarque de pasajeros de LATAM. La aerolínea cuenta con este modelo, y también en su versión A320-200 NEO, cabe destacar que la principal diferencia entre las dos versiones radica en su eficiencia, por lo que no debería verse afectado el proceso de embarque.

⁴ Flota correspondiente a Enero-Febrero 2020.

3.1.1. Características de la Aeronave

Esta aeronave posee una cabina de aproximadamente 28 metros de largo, y con una capacidad máxima de 174 pasajeros, y sus asientos están distribuidos en 29 filas de 6 asientos cada una, estas filas están separadas en la mitad por el pasillo de la cabina, dejando 3 pasajeros por lado. Además se cuenta con un *seat pitch* de 76 [cm] (Tianjin Airlines).

Otra característica importante de esta aeronave, es que tiene una capacidad de 114 equipajes de mano en sus compartimientos superiores (AirgWays, 2019), o overhead bins, lo que significa que aproximadamente solo el 66% de los pasajeros podrán ingresar su equipaje de mano a la cabina del avión.

Figura 9: Mapa de asiento de avión A320-200.



3.1.2. Modelamiento en SIMIO

La simulación digital es una herramienta que permite imitar, o simular, escenarios reales junto con el comportamiento de los objetos que lo componen; y para que la simulación sea efectiva, es decir que se asemeje, dentro de lo mas posible, a la realidad. Es por eso fundamental la configuración y caracterizar cada objeto que forme parte del escenario a simular.

En primer lugar, los pasajeros tendrán una velocidad de traslado, la cual se distribuye normal con una media de 1,23 [m/s] y una desviación estándar de 0,18 [m/s]. Una vez que ingresen a la cabina los pasajeros reducirán su velocidad media de 0,59 [m/s], con una desviación estándar de 0,15 [m/s] (Steiner & Philipp, 2009), debido al ancho del pasillo que dificulta la circulación de los pasajeros, más aún si circulan con su maleta.

Ahora, es importante mencionar que la velocidad de desplazamiento de los pasajeros de la Etapa 1, que se mencionará más adelante, no presentan una variación en su velocidad respecto del resto de los pasajeros, debido a que el aeropuerto, de Santiago en este caso, cuenta con un servicio para trasladar a los pasajeros con movilidad reducida desde AVSEC a su puerta de embarque en silla de ruedas (Concesionaria Nuevo Pudahuel S.A.).

Segundo, se dispone de un servidor que representa al personal de aerolínea que procesa a los pasajeros y les permite el ingreso al avión. Este servidor trabaja en un tiempo que distribuye exponencialmente con 5 segundos de media (Boarding at the Speed of Flight, 2007), se ha decidido utilizar estos parámetros teniendo en cuenta lo que puede demorarse el pasajero en sacar y mostrar sus documentos, tomando un valor mínimo si se encuentra con todo listo una vez que se tope con la persona que le haga el ingreso.

Tercero, una vez embarcado, el pasajero debe dirigirse a la aeronave a través de un puente de embarque, el cual tendrá un largo de 50 [m], tomando como referencia un puente de embarque del Aeropuerto Arturo Merino Benítez. A modo de aclaración, se ha decidido excluir el escenario de embarque a aeronave en plataforma remota, debido a que se pierde el orden de embarque al utilizar buses de acercamiento para llevar a los pasajeros al avión.

Figura 10: Puente de embarque en AMB.



Fuente: Google Earth.

Cuarto, todos los pasajeros tienen asignados sus asientos, filas de destino y un valor 0, 1 o 2, dependiendo si su posición de asiento es ventana, centro o pasillo respectivamente. Con estos valores se generarán tiempos de espera, los cuales son los causales de los embotellamientos habituales en las cabinas de vuelos comerciales. A continuación, se presentan los tiempos de espera mencionados:

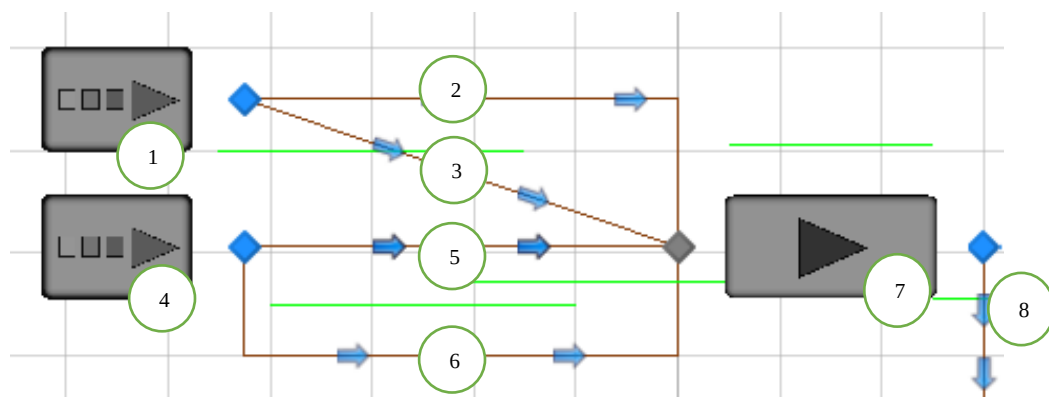
- Demora por guardar equipaje de mano: Distribución triangular, con parámetros (5, 10, 20) segundos (Schultz, 2008).
- Demora de ingreso a fila, o rotación: 15 segundos por pasajero⁵ (2007).
- Demora en sentarse: Distribución uniforme, con parámetros (10, 20) segundos (2007).

3.1.2.1. Esquematización del Modelo

El bosquejo donde se encuentra dibujado el modelo está básicamente separado en dos etapas, la primera que comprende el embarque hasta donde empieza la cabina del avión y una segunda parte que comprende la cabina.

El diseño completo se encuentra en el Anexo B.

Figura 11: Primera Etapa Esquematización.



Fuente: Elaboración Propia

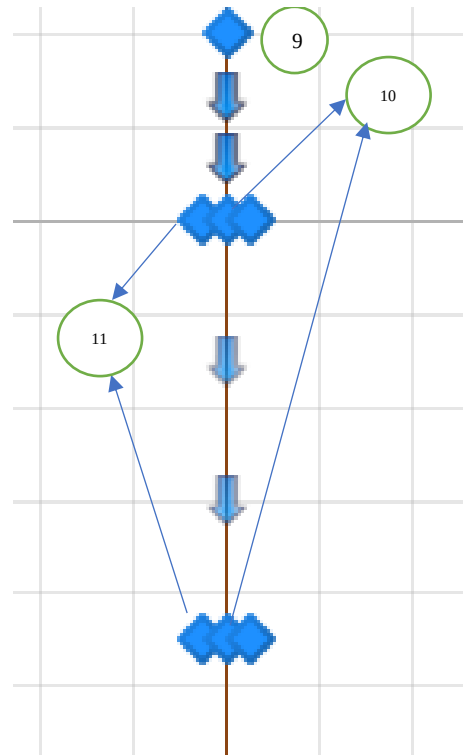
⁵ Pasajero que estorba el paso de otro a su asiento.

La Primera etapa esta compuesta por el servidor (1), que crea a los pasajeros, o entidades, de la etapa 1, y posteriormente distribuidos en los caminos (2) y (3). El segundo servidor (4) crea a los pasajeros de la etapa 2 y 3, los cuales son distribuidos en los caminos (5) y (6).

Posteriormente, los pasajeros pasan al server (7), que representa la puerta de embarque, donde los pasajeros son procesados para que transiten a la aeronave por el puente de embarque (8).

La segunda etapa, o la cabina, esta compuesta por un nodo inicial (9), que representa la entrada del avión, los nodos centrales (10) que representan el pasillo del avión y los nodos externos (11), que representan a las filas de asientos.

Figura 12: Segunda Etapa Esquematzación.



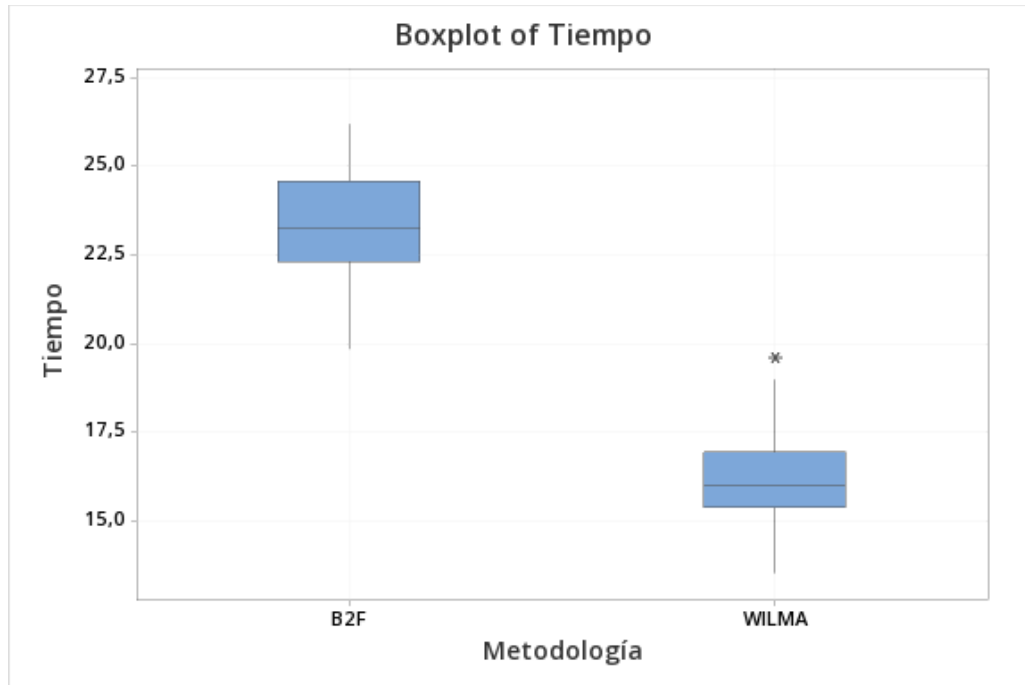
Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.2. Validación

Esta investigación, considerando que se trata de una simulación matemática, su validación es fundamental para comprobar que el modelamiento, o configuración, genere resultados acordes a la realidad.

Teniendo en cuenta que el modelo propuesto está compuesto nuclearmente por una metodología Wilma, se busca validar el modelamiento utilizando dicho modelo, además del modelo “Back to Front” para complementar la validación. Se han ejecutado 250 ciclos de cada modelo, para obtener valores estadísticamente significativos. A continuación, se presentan los resultados.

Gráfico 4: Diagrama de caja y bigotes de tiempos de embarque.



Fuente: Elaboración Propia

Para validar el modelo, en este caso, se realizará una comparación con otro estudio de simulación matemática (Schultz, 2008) similar a este, el cual estudia los tiempos de modelos de embarque en un avión A320-200 con la misma configuración propuesta en esta investigación.

Tabla 2: Comparación tiempos de embarque.

Modelo	Media		Variación
	Referencia	Modelamiento	
Wilma	16:08	16:09	0,11%
Back to Front	22:04	23:19	5,67%

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla se observa que los tiempos de embarque tienen un comportamiento similar, con variaciones de pequeña magnitud. Además, se cumple con la lógica que de la metodología Wilma se obtienen tiempos de embarque inferiores a los de la metodología de embarque “de atrás hacia delante”.

3.1.2.3. Método más Eficiente

En cuanto a la metodología de embarque, que puede entregar tiempos de embarque inferiores, la teoría dice que el método de embarque Steffen es el más eficiente en términos de tiempo de embarque, reduciendo las interferencias de fila a 0 y llevando las interferencias de pasillo a una cantidad mínima.

Por lo tanto, los resultados que se obtengan posteriormente serán analizados teniendo como referencia los resultados de esta metodología, la cual no tiene modificaciones en su modelo, es decir que no cuenta con embarque preferente o alguna perturbación que pueda significar pérdidas de eficiencia.

Tabla 3: Resultados Método Steffen, A320.

F.O.	Tiempo de Embarque	
	Media	Variabilidad
100%	15:37	7,35%
90%	14:20	7,66%
80%	13:07	7,49%
70%	12:07	7,39%

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2.4. Modelo de Embarque Propuesto

El modelo de embarque propuesto, que busca ser optimizado, trata de un embarque por grupos, separados en 3 etapas (LATAM Airlines Group, 2019):

- Etapa 1
 - Grupo 0 o pre embarque: Pasajeros con movilidad reducida, ya sea embarazadas, personas mayores de 60 años, que viajen con niños menores de 2 años o que requieran asistencia para embarcar. Este grupo tiene contemplado un total de 18 asientos dentro de las primeras 7 filas.
 - Embarque premium (grupos 1, 2 y 3): Pasajeros que compraron su pasaje con tarifa TOP, compraron asiento LATAM+ o que tengan algún tipo de categoría premium designada por la aerolínea. Este grupo tiene contemplado un total de 24 asientos en las primeras 7 filas.

- Etapa 2
 - Grupo 4: Pasajeros con posición de asiento en ventana.
 - Grupo 5: Pasajeros con posición de asiento en el centro.
 - Grupo 6: Pasajeros con posición de asiento en pasillo.
- Etapa 3
 - Grupo 7: pasajeros que compraron su pasaje con tarifa BASIC, que no incluye equipaje de mano. Este grupo tiene contemplado un 35% del total de los pasajeros.

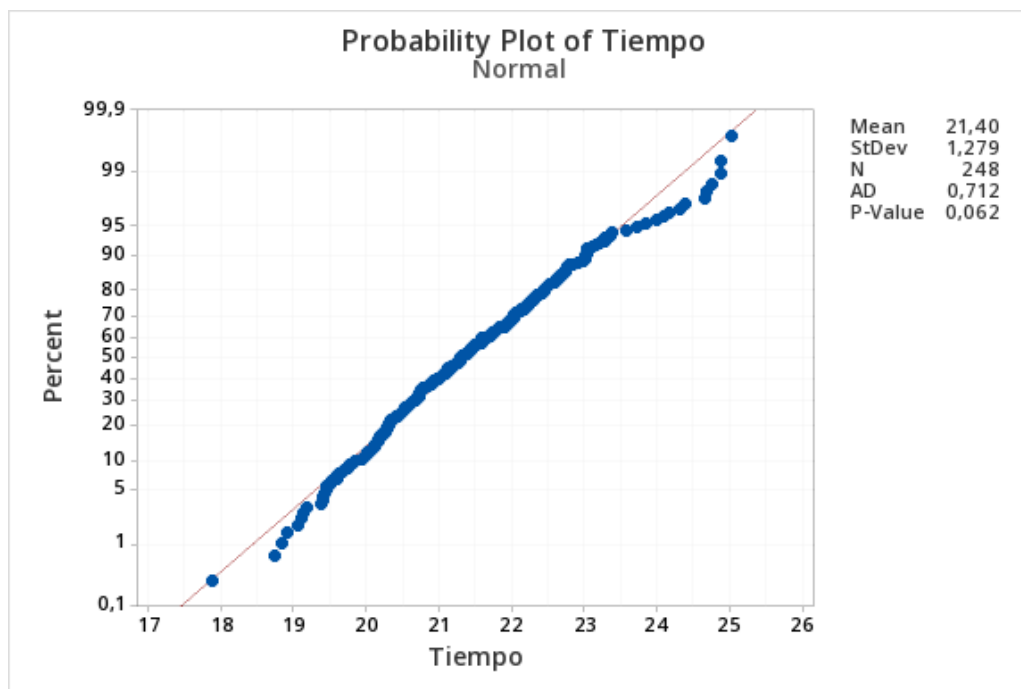
3.1.3. Simulación del escenario

El escenario modelado en el software fue simulado variando el factor de ocupación del avión entre 100%, 90%, 80% y 70%, siendo ejecutados cada uno 250 veces, buscando un comportamiento similar a una distribución normal.

3.1.3.1. Resultados

En primer lugar, se hizo una prueba de normalidad con los datos obtenidos de la simulación del escenario con un factor de ocupación del 100%, obteniendo un valor p de 6,2%, mayor a 5%, esto quiere decir el proceso tiene un comportamiento normal.

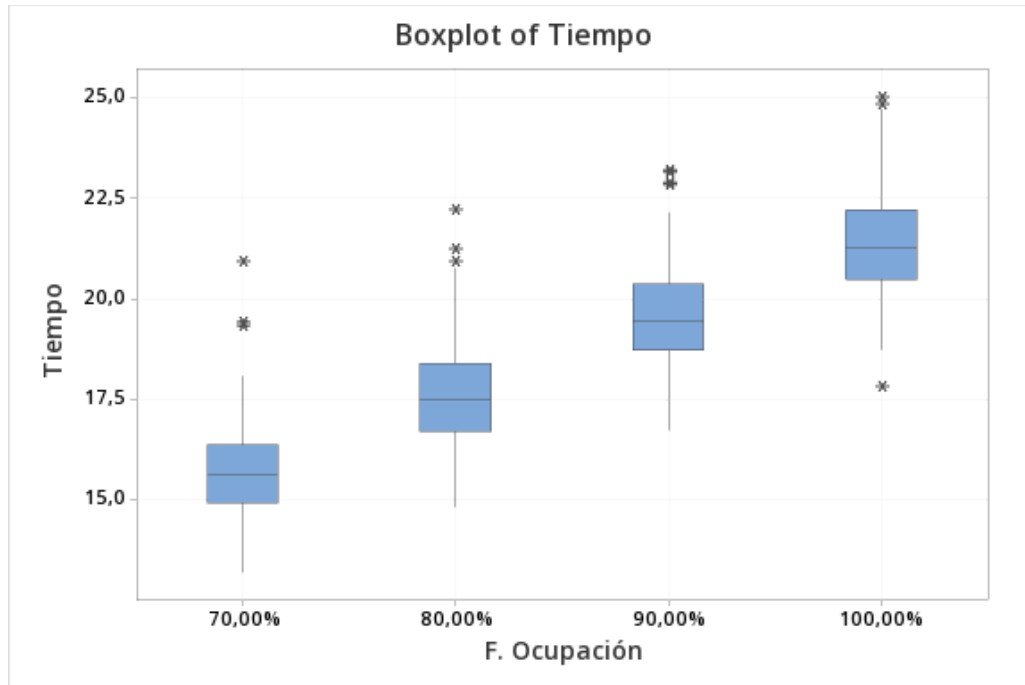
Gráfico 5: Prueba de Normalidad 100% Factor de Ocupación.



Fuente: Elaboración Propia.

En base al gráfico presentado, se observa, en general, una asimetría positiva, lo que significa que los datos se concentran hacia los tiempos de embarque superiores. Aparte, es trivial mencionar que los tiempos medios de embarque son directamente proporcionales a el factor de ocupación de el avión.

Gráfico 6: Diagrama de caja y bigotes de tiempos de embarque.

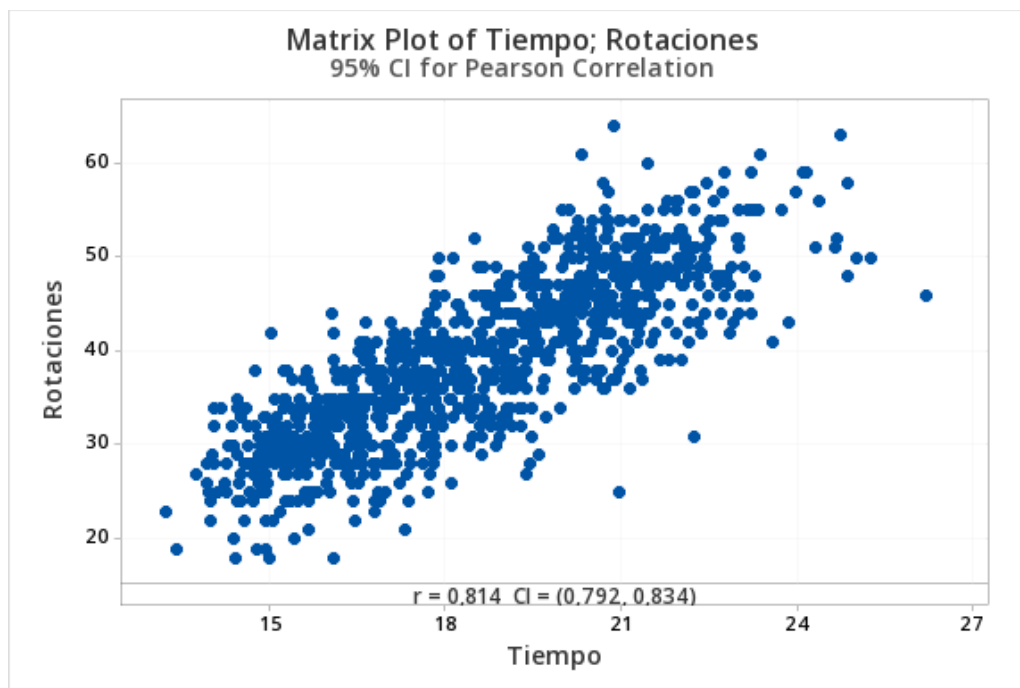


Fuente: Elaboración Propia.

Además, para complementar el análisis, se ha determinado un indicador de calidad “rotación”, antes mencionado como interferencia de fila. Este indicador es equivalente a la demora ocasionada por el impedimento de un pasajero para llegar a su asiento debido a que los restantes asientos de su fila se encuentran ocupados.

Estas rotaciones varían entre 15 y 30 segundos, dependiendo de la cantidad de pasajeros que tiene que salir de su asiento para permitir el ingreso a otro, lo que puede significar una molestia para los pasajeros involucrados en esta rotación, y afectando también el tiempo de embarque. Sin embargo, para tener certeza que las rotaciones afectan al tiempo de embarque es necesario conocer la correlación entre estas variables.

Gráfico 7: Diagrama de dispersión entre tiempo y rotación.



Fuente: Elaboración Propia.

A partir del gráfico, se obtiene una correlación de 81,4%, lo que se traduce en una alta correlación positiva y un coeficiente de determinación igual a 0,6626.

Por último, se presenta un resumen de los resultados obtenidos desde el software, donde se refleja una baja variabilidad en la simulación. Si bien, la variabilidad es cambiante entre los distintos factores de ocupación, esto ocurre debido a la velocidad de desplazamiento de los pasajeros, la cual varía según su distribución asignada. Además, mientras menor sea el factor de ocupación mayores son las distintas posibles distribuciones de pasajeros de la aeronave.

Tabla 4: Resultados escenario Base, A320.

F.O.	Tiempo de Embarque		Rotaciones	
	Media	Variabilidad	Media	Variabilidad
100%	21:24	5,98%	48,8	10,90%
90%	19:34	6,38%	42,5	11,78%
80%	17:37	7,00%	36,2	13,00%
70%	15:44	7,01%	29,5	13,64%

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.3.2. Diagnóstico

En base a los resultados expuestos, se puede aseverar que el proceso de embarque toma tiempos superiores a los deseados, considerando que se dispone de un TAT máximo de 45 minutos, si se quisiera reducir los costos asociados a embarque y desembarque. Por lo tanto, se presentan a continuación, los principales factores que se podrían modificar para optimizar el embarque.

En primer lugar, si se compara el tiempo de la simulación del escenario propuesto con el modelo Steffen, se evidencia una pérdida de la eficiencia con la cantidad de rotaciones, habiendo una diferencia de casi 6 minutos, siendo que el modelo Steffen no presenta rotaciones en su simulación. Entonces, se podría pensar que existe la posibilidad de reducir el tiempo de embarque si se eliminan, o reducen sustancialmente, las rotaciones.

Tabla 5: Comparación con método Steffen, A320.

	Proporción del TAT
Escenario base	47,6%
Método Steffen	34,7%

Fuente: Elaboración Propia.

Segundo, al analizar cualitativamente la simulación se da cuenta de el “cuello de botella” que se genera dentro de la cabina debido al tiempo que toma cada pasajero en guardar su equipaje de mano, además de las rotaciones.

Por último, si se da foco al procesamiento de los pasajeros antes de pasar al puente de embarque, se podría reducir el tiempo optimizando este paso, y así obtener una entrada más fluida a la aeronave.

Para los últimos dos puntos existe un estudio (Steiner & Philipp, 2009) que asegura la reducción del tiempo de embarque entre 2 y 4 minutos si se reduce el número de equipajes de mano en cabina, y aproximadamente 1 minuto si se realiza un “pre embarque”.

3.1.4. Optimización del Modelo

En base a los factores identificados, se han establecidos escenarios, realizando modificaciones sobre el modelo inicial, que posiblemente disminuyan el tiempo de embarque.

3.1.4.1. Escenario 1: Reducir el Equipaje de Mano

Este escenario consiste en reducir la cantidad de equipajes de mano permitidos dentro de la cabina, enviando el equipaje restante a bodega, una vez que se alcance la cantidad permitida.

El equipaje sería enviado directamente a bodega desde la puerta de embarque, o también se podría dar la posibilidad de entregar el equipaje en counter de check-in, pero siempre que cumpla con las características de equipaje de mano impuestas por la aerolínea.

No obstante, esta medida implicaría costos de ground handling y, además, de costos de personal y espacios relativos al proceso de check-in en caso de enviar el equipaje a través de un counter.

La reducción de el número de equipajes de mano en cabina debería reducir el tiempo entre 2 y 4 minutos, según A. Steiner y M. Philipp (2009), incluso se asegura que una gran reducción en el equipaje de mano podría significar ahorros mayores a pesar de los costos asociados a esta medida.

• Resultados

La simulación de este escenario entrega los resultados esperados, teniendo en cuenta que se buscaba reducir el tiempo de embarque hasta en 4 minutos. Se obtienen reducciones en el tiempo de 200 segundos, como máximo, lo que es equivalente a 3:20 minutos y que corresponde a un porcentaje de máximo 0% de la capacidad de equipajes de mano dentro de la cabina.

Por lo tanto, la implementación de esta medida se encuentra sujeta al *trade-off* entre los costos e ingresos asociados a esta medida.

Tabla 6: Resultados Escenario 1, A320.

F. Equipaje	F.O.	Tiempo de Embarque		
		Media	Variabilidad	Variación [Segundos]
50%	100%	19:21	6,53%	-127
	90%	17:45	7,71%	-108
	80%	16:14	7,49%	-83
	70%	14:38	8,97%	-66
0%	100%	18:07	6,33%	-198
	90%	16:12	6,15%	-200
	80%	14:32	8,33%	-184
	70%	12:45	9,72%	-179

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.4.2. Escenario 2: Realizar un Pre Embarque

Este escenario consiste en realizar un pre embarque, el cual consiste en empezar a procesar a los pasajero 150 segundos antes de dar inicio al embarque. Esta medida debería dar, inicialmente, una mayor fluidez al embarque, eliminando el tiempo de procesamiento de los pasajeros que alcance a ser tratado antes del comienzo del embarque oficial.

• Resultados

De este escenario se esperaban reducciones del tiempo de embarque de hasta 1 minuto, sin embargo, todos los escenarios entregaron una reducción menor, llegando a disminuir el embarque en hasta 28 segundos. Por lo tanto, la implementación de esta medida se encuentra sujeta al espacio disponible en la sala de embarque para que los pasajeros esperen luego de ser procesados.

Tabla 7: Resultados Escenario 2, A320.

F.O.	Tiempo de Embarque		
	Media	Variabilidad	Variación [Segundos]
100%	20:59	6,09%	-24
90%	19:05	6,52%	-28
80%	17:18	7,04%	-19
70%	15:17	7,12%	-27

. Fuente: Elaboración Propia.

3.1.4.3. Escenario 3: Eliminar Etapa 3

Consiste en eliminar la etapa 3, el grupo 7, del proceso de embarque, incluyendo a los pasajeros de esta en los grupos 4, 5 y 6, lo que resultaría en un escenario más parecido al embarque WILMA, respecto del modelo inicial.

Esta medida busca minimizar los tiempos de embarque reduciendo el número de rotaciones dentro de la cabina, considerando la alta correlación positiva entre estas dos variables.

La única modificación que se debe hacer a la simulación es la adición de 1 segundo al tiempo mínimo del procesamiento de pasajeros, ya que al incluir a los pasajeros del grupo 7 a la etapa 2, se debe hacer una revisión extra para que los pasajeros no tengan equipaje de mano o traten de infringir de alguna manera las normas que deben seguir por haber pagado la tarifa básica.

• Resultados

La simulación del escenario entrega los resultados esperado, evidenciando que la disminución del tiempo esta directamente relacionada con la disminución de las rotaciones.

Además, la inclusión de los pasajeros que no tienen equipaje de mano dentro de la etapa 2, que no generan interferencias de pasillo al no tener que guardar equipaje en los overhead bins, generan un aumento en la simultaneidad de los eventos que ocurren dentro de la cabina y un mejor flujo dentro de ella.

Este escenario es fácilmente aplicable, ya que no existirían costos asociados por incluir una etapa dentro de otra, salvo la demora extra contemplada en el procesamiento de pasajero, la que evidentemente afecta menos que una rotación dentro de la cabina.

Tabla 8: Resultados Escenario 3, A320.

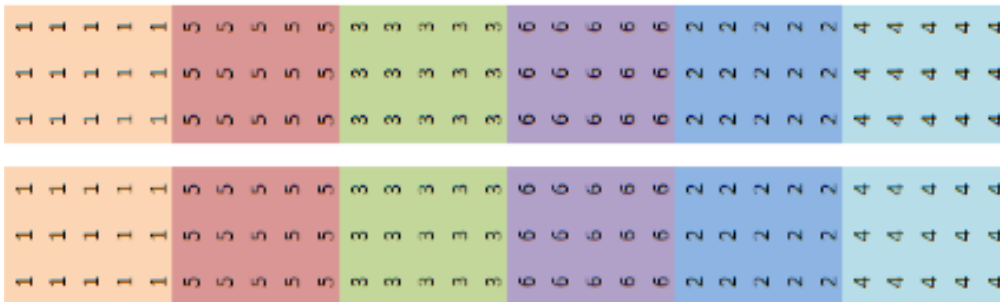
F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación [Segundos]	Media	Variabilidad	Variación
100%	18:16	6,75%	-188	17,4	16,68%	-31
90%	17:04	6,78%	-149	17,4	16,76%	-25
80%	15:52	7,81%	-104	16,9	17,91%	-19
70%	14:26	7,58%	-78	15,9	18,26%	-14

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.4.4. Escenario 4: Embarque por Bloques

A modo experimental, se propone un embarque por bloques, pero manteniendo a los pasajeros de la etapa 1, cumpliendo con el estándar de embarcar a los pasajeros de la etapa 1 primero sin tener que agregar modificaciones considerables al modelo. A continuación, se presenta el esquema del orden de los grupos de embarque.

Figura 13: Embarque por bloques.



Fuente: Modelo de Simulación en Entorno Comercial Para Validar Políticas de Embarque (Capilla, 2017).

El modelo fue propuesto por M. Capilla (2017) y afirma que este embarque da como resultados tiempos de embarque inferiores, incluso menores que el modelo WILMA, en contra de todos los estudios que coinciden que este modelo es el que toma tiempos menores.

Al modelo planteado se le deben hacer algunas modificaciones, para que se ajuste al modelo de embarque. Principalmente, se parte con un primer grupo de 7 filas, correspondiente a la etapa 1, y los siguientes grupos se distribuyen entre 4 y 5

filas cada uno, como consecuencia de esto se debe eliminar la etapa 3, tal como en el escenario 3; resultando en un total de 9 grupos de embarque, considerando los 4 de la primera etapa.

Figura 14: Embarque por bloques modificado.

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4

Fuente: Elaboración Propia.

• Resultados

Los resultados entregados son negativos, ya que existe un aumento en los tiempos medios de embarque y, más aún, en las rotaciones, deduciendo que este modelo solo promueve la reducción de las interferencias de pasillo.

Por lo tanto, no se justifica aplicar este escenario en la optimización del embarque, pensando que lo buscado con esta investigación es minimizar el tiempo del proceso de embarque.

Tabla 9: Resultados Escenario 4, A320.

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación [Segundos]	Media	Variabilidad	Variación
100%	26:36	5,38%	312	67,2	7,65%	18
90%	23:27	5,60%	234	56,4	8,21%	14
80%	20:36	6,47%	180	46,4	9,86%	10
70%	17:39	6,85%	116	36,8	11,21%	7

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.4.5. Escenario 5: Implementación de “The Flying Carpet”

Este escenario consiste en la implementación de “The Flying Carpet”, una alfombra que tiene dibujado el mapa de asientos de la aeronave sobre ella. Esta

fue diseñada como una herramienta para agilizar el embarque, buscando generar ahorros para las aeronaves y mejorar la experiencia del pasajero (The Flying Carpet, 2020).

Esta alfombra posee una capacidad de entre 30 y 40 pasajeros, y puede colocarse en la sala de embarque o, incluso, en los puentes de embarque, dependiendo de la superficie disponible, siempre buscando no afectar al correcto funcionamiento de la sala de embarque.

La metodología de uso de la alfombra agrega un paso al proceso, respecto de lo que se conoce convencionalmente como embarque. Los pasajeros luego de ser procesados, por grupos, pasan a la alfombra y se ordenan según su asiento asignado, posteriormente se les permite la entrada al avión según el orden designado (Ver Anexo C).

En cuanto a la metodología de embarque a realizar, se formula según un orden específico, similar al método Steffen, pero sin afectar a la etapa 1 del modelo. Por consiguiente, la etapa 2 esta compuesta por 4 grupos, los cuales, una vez en la alfombra, se permitirá el ingreso a la aeronave por posición, o columna, según el orden dispuesto a continuación (Ver Anexo D).

Figura 15: Modelo de embarque escenario 5, A320.

		Fila																											
		1-7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29					
Posición	L		22	11	21	10	20	9	19	8	18	7	17	6	16	5	15	4	14	3	13	2	12	1					
	K		11	33	10	32	9	31	8	30	7	29	6	28	5	27	4	26	3	25	2	24	1	23					
	J		22	33	21	32	20	31	19	30	18	29	17	28	16	27	15	26	14	25	13	24	12	23					
	C		33	22	32	21	31	20	30	19	29	18	28	17	27	16	26	15	25	14	24	13	23	12					
	B		11	33	10	32	9	31	8	30	7	29	6	28	5	27	4	26	3	25	2	24	1	23					
	A		11	22	10	21	9	20	8	19	7	18	6	17	5	16	4	15	3	14	2	13	1	12					

Grupos 0 - 3

Grupo 4

Grupo 5

Grupo 6

Grupo 7

Fuente: Elaboración Propia.

Este escenario, a diferencia de los otros, propone un cambio total, respecto del modelo base, reemplazando la metodología WILMA por el método presentado. Además, se ha tomado la misma consideración tomada del escenario 3, respecto

de la eliminación de la etapa 3. En consecuencia, es importante mencionar que el grupo 7, de este escenario, corresponde a la etapa 2 del embarque.

- **Resultados**

La simulación del escenario entrega los resultados similares al escenario 3, respecto al número de rotaciones y, más aún, entregando una mayor disminución de los tiempos de embarque, evidenciando que además de las rotaciones, el modelo propuesto genera un flujo mas eficiente al interior de la cabina.

Tabla 10: Resultados escenario 5, A320.

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación [Segundos]	Media	Variabilidad	Variación
100%	17:09	6,20%	-255	17,4	16,62%	-31
90%	16:11	6,64%	-202	17,3	16,63%	-25
80%	15:05	6,75%	-151	16,8	17,85%	-19
70%	13:54	7,76%	-110	15,9	18,15%	-14

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Simulación en Boeing 767-300

Siguiendo en línea con lo que dice la metodología, el paso que sigue en esta investigación es repetir el proceso realizado anteriormente en otra aeronave, evitando elegir otro avión de corto alcance, o narrow body, como un Airbus A321, A319 o similares porque es probable que se consigan resultados similares y, por lo tanto, que haga la investigación redundante.

Por consiguiente, se ha decidido realizar el proceso de optimizar el proceso de embarque con la aeronave Boeing 767-300, teniendo en consideración que es un avión de largo alcance, o wide body, y es la aeronave de pasajeros wide body que más posee LATAM Airlines en su flota (Ver Anexo E), tomando en consideración el último objetivo específico de este trabajo.

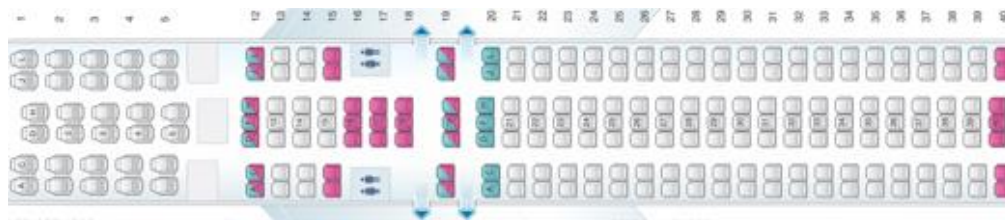
Al ser una aeronave de largo alcance, se asume que solo realiza vuelos internacionales. Este dato se utilizará más adelante para analizar los resultados.

3.2.1. Características de la Aeronave

Este avión tiene una capacidad de 221 pasajeros, los cuales están distribuidos en 3 columnas, de 34 filas, teniendo una cabina con 2 pasillos, o *twin aisle*, lo que es característico de las aeronaves de largo alcance.

Además, la cabina se encuentra separada en dos categorías, la “premium business”, que considera las primeras 5 filas, y la clase economy, compuesta por el resto de los asientos hacia atrás, tal como se muestra en el mapa de asientos dentro de la cabina a continuación.

Figura 16: Mapa de Asientos Boeing 767-300.



Fuente: seatmaestro.es

Cabe destacar que las dos clases de asientos se diferencian principalmente, para ámbitos de la simulación, por su seat pitch, la clase premium business tiene un seat pitch de 188 [cm] y clase economy 81 [cm] (Seatmaestro). Los asientos premium business, al tener un seat pitch tan grande, permiten que no existan rotaciones, debido a que el espacio generado permite que los pasajeros lleguen a su asiento sin tener que pedirle a otro que salga.

3.2.2. Modelamiento en SIMIO

El modelamiento del proceso de embarque de esta aeronave se ha realizado a partir del escenario base del A320-200, aplicándole modificaciones para ajustarse a las características del Boeing 767 y todas las consecuencias que su configuración de cabina implica.

La principal modificación que se le debe realizar al modelo es que, al ser una aeronave de largo alcance, se asume que todos los pasajeros viajen con equipaje, ya sea de mano o en bodega, y un artículo personal; generando que se elimine la etapa 3 de este proceso de embarque.

3.2.2.1. Método más Eficiente

En cuanto a la metodología de embarque, que puede entregar tiempos de embarque inferiores, la teoría dice que el método de embarque Steffen es el más eficiente en términos de tiempo de embarque, reduciendo las interferencias de fila a 0 y llevando las interferencias de pasillo a una cantidad mínima.

Por lo tanto, los resultados que se obtengan posteriormente serán analizados teniendo como referencia los resultados de esta metodología, la cual no tiene modificaciones en su modelo, es decir que no cuenta con embarque preferente o alguna perturbación que pueda significar pérdidas de eficiencia.

Tabla 11: Resultados Método Steffen, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque	
	Media	Variabilidad
100%	20:11	6,69%
90%	18:24	6,99%
80%	16:27	7,50%
70%	14:41	8,27%

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2.2. Modelo de Embarque

El modelo de embarque es similar al utilizado en la simulación del A320-200, sin embargo, se debe eliminar la etapa 7, debido a que este tipo de aeronave realiza vuelos internacionales.

- Etapa 1
 - Grupo 0 o pre embarque: Pasajeros con movilidad reducida, ya sea embarazadas, personas mayores de 60 años, que viajen con niños menores de 2 años o que requieran asistencia para embarcar. Este grupo tiene contemplado un total de 21 asientos dentro de la cabina.
 - Embarque premium (grupos 1): Pasajeros con asientos en clase Premium business, compuesta por las primeras 5 filas.
 - Embarque preferente (grupos 2 y 3): Pasajeros que compraron su pasaje con tarifa TOP, compraron asiento LATAM+ o que tengan algún tipo de categoría premium designada por la aerolínea. Este grupo tiene contemplado todos los asientos entre las filas 12 y 15.
- Etapa 2
 - Grupo 4: Pasajeros con posición de asiento en ventana.
 - Grupo 5: Pasajeros con posición de asiento en el centro.
 - Grupo 6: Pasajeros con posición de asiento en pasillo.

3.2.3. Simulación del Escenario

El escenario, tal como en el modelo de embarque del A320-200, fue simulado variando el factor de ocupación entre 100%, 90%, 80% y 70%, y ejecutando cada variante 250 veces, buscando resultados estadísticamente significativos.

3.2.3.1. Resultados

La respuesta recibida de las ejecuciones muestra un bajo nivel de rotaciones, debido a que los pasajeros de la clase business, que representan gran porcentaje de los pasajeros de la etapa 1, no generan rotaciones.

Por otro lado, al comparar el tiempo de embarque, con factor de ocupación del 100%, respecto del tiempo base de TAT, 60 minutos, resulta ser un 34,1% del turnaround.

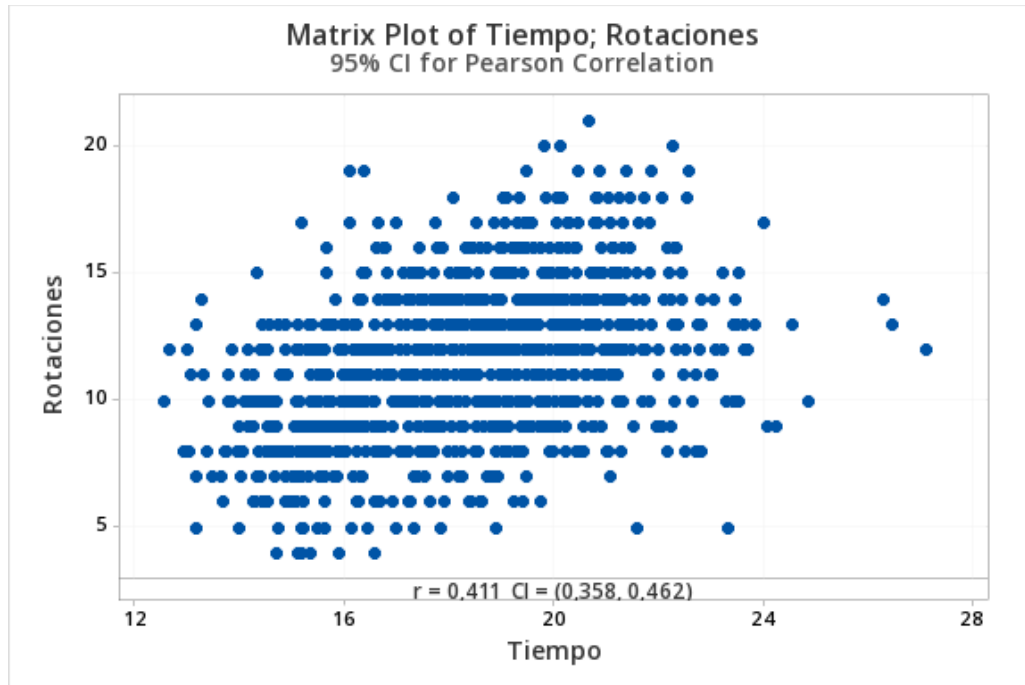
Tabla 12: Resultados Escenario Base, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque		Rotaciones	
	Media	Variabilidad	Media	Variabilidad
100%	20:50	6,51%	13,3	21,25%
90%	19:13	7,69%	12,2	22,33%
80%	17:19	8,18%	10,7	24,72%
70%	15:26	8,80%	9,3	27,61%

Fuente: Elaboración Propia.

Además, al comparar los tiempos de embarque con las rotaciones, para ver si existe relación entre estas variables, se obtiene una correlación igual a 41,1%, es decir, una moderada correlación positiva.

Gráfico 8: Diagrama de dispersión entre tiempo y rotación.



Fuente: Elaboración Propia.

3.2.3.2. Diagnóstico

Los resultados de la simulación, apuntan a que el proceso de embarque en esta aeronave es relativamente sano, con un número menor de rotaciones, básicamente por la ausencia de la etapa 3 en los vuelos internacionales. Además, al tener 2 pasillos dentro de la cabina se genera una mayor fluidez dentro de esta.

Para contrastar los resultados, se compararon las proporciones del tiempo de embarque respecto del tiempo de TAT base⁶, entre el tiempo medio de embarque, con 100% de factor de ocupación y el método Steffen, evidenciando que no existe gran pérdida en la eficiencia en el proceso.

⁶ 45' para vuelo domésticos; 60' para vuelos internacionales.

Tabla 13: Comparación con método Steffen, B767.

	Proporción del TAT
Escenario base	34,7%
Método Steffen	33,6%

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4. Optimización del modelo

En base a los resultados obtenidos de la simulación del escenario base, se buscará minimizar, o disminuir, los tiempos medios de embarque, a través de la modificación de ciertas características, respecto del modelo inicial.

Buscando reiterar el procedimiento el procedimiento de optimización del embarque en el A320-200, dentro de todos los casos, el escenario 1 no es posible de replicar en esta aeronave, ya que al realizar vuelos de largo alcance los pasajeros llevan principalmente un artículo personal en la cabina, mas que equipaje de mano. Además, ocurre lo mismo con el escenario 3, debido a que la etapa 3 del embarque no se realiza en vuelos de largo alcance.

Por lo tanto, se replicarán los escenarios restantes, independiente de si entregaron resultados positivos, ya que existe la posibilidad que la configuración de cabina de esta aeronave entregue resultados diferentes para cada caso.

3.2.4.1. Escenario 2: Realizar un Pre Embarque

Este escenario consiste en realizar un pre embarque, al igual que en la optimización del A320-200, el cual consiste en empezar a procesar a los pasajeros 150 segundos antes de dar inicio al embarque, buscando generar una mayor fluidez en los primeros minutos del proceso.

- **Resultados**

La simulación del escenario entrega una disminución en los tiempos medios de embarque, de hasta 66 segundos. En base a los resultados, se puede inferir que este escenario es más efectivo que en el A320, probablemente debido a la configuración de cabina del B767, principalmente por tener dos pasillos en la

cabina. De todos modos, la reducción de los tiempos observados no son lo suficientes para optimizar el proceso de manera significativa.

Tabla 14: Resultados Escenario 2, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque		
	Media	Variabilidad	Variación
100%	19:51	6,98%	-58
90%	18:16	7,56%	-56
80%	16:14	7,06%	-65
70%	14:21	8,61%	-66

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4.2. Escenario 4: Embarque por Bloques

Este escenario consiste en replicar el embarque por bloques simulado en la optimización del A320-200, pero con modificaciones debido a las características de la aeronave y del modelamiento. La distribución de los grupos del embarque se muestra a continuación.

Figura 17: Embarque por Bloques, B767.

1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6 6 6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6 6 6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6 6 6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5
1 1 1 1 1	2 2 2 2 2	6 6	4 4 4 4 4	7 7 7 7 7	3 3 3 3 3	5 5 5 5 5

Fuente: Elaboración Propia.

Si bien, este modelo entregó resultados negativos anteriormente, puede que esta configuración de 2 pasillos promueva esta metodología y entregue reducciones en los tiempos de embarque.

- **Resultados**

Los resultados entregados no son satisfactorios, se observa un pequeño, se podría decir marginal, aumento en los tiempos de embarque y un gran aumento en el número de rotaciones.

Por lo tanto, no se justifica aplicar este escenario en la optimización del embarque, pensando que lo buscado con esta investigación es minimizar el tiempo del proceso de embarque. Además, como este modelo implica un aumento en las interferencias de fila, este se convertiría en un embarque menos agradable, desde la perspectiva del pasajero.

Tabla 15: Resultados Escenario 4, B767

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación	Media	Variabilidad	Variación
100%	21:25	5,19%	36	48,8	10,90%	35
90%	19:32	6,19%	19	42,5	11,78%	30
80%	17:32	6,38%	13	36,2	13,00%	25
70%	15:37	6,94%	10	29,5	13,64%	20

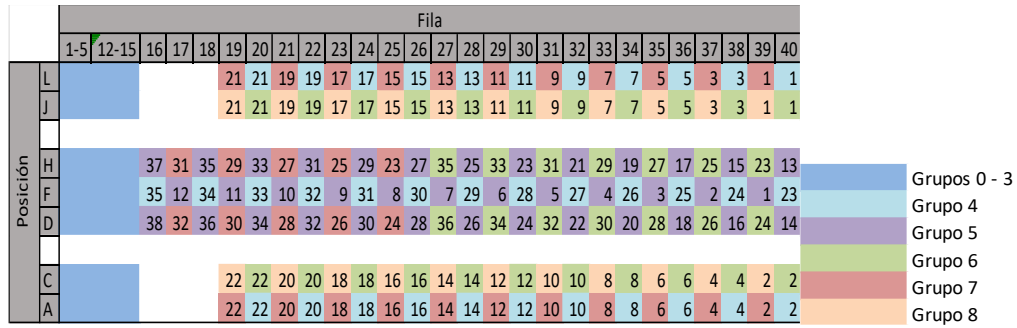
Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4.3. Escenario 5: Implementación de “*The Flying Carpet*”

Este escenario consiste en la implementación de *The Flying Carpet*, utilizando un método similar al embarque planteado en dicho escenario. Así pues, las modificaciones del método se deben a la capacidad de la alfombra y la composición de los grupos, buscando una distribución simétrica de los pasajeros para tener un embarque ordenado.

Respecto a la metodología de uso de la alfombra, esta se mantiene sin modificaciones, una vez en la alfombra, se permitirá el ingreso a la aeronave por posición, o columna, según el orden dispuesto a continuación (Ver Anexo D).

Figura 18: Modelo de embarque escenario 5, B767.



Fuente: Elaboración Propia.

• Resultados

La simulación del escenario entrega una pequeña disminución en los tiempos medio de embarque, básicamente debido a disminución de interferencias de pasillo.

Asimismo, no existe una variación en las rotaciones, ya que tanto el modelo base como en este, están diseñados para tener un nivel de rotaciones mínimo, siendo que son causadas por la etapa 1, la cual no se ve modificada con la optimización.

Tabla 16: Resultados Escenario 5, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación	Media	Variabilidad	Variación
100%	20:35	6,86%	-14	13,2	21,38%	0
90%	18:45	7,81%	-27	12,2	22,89%	0
80%	16:55	9,63%	-24	10,7	24,88%	0
70%	15:10	9,97%	-16	9,3	28,07%	0

Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Simulación en Boeing 787-9

En cuanto a la investigación, se ha elegido una última aeronave, Boeing 787-9, para contrastar los resultados entre las distintas aeronaves seleccionadas y poder generar un análisis y conclusiones representativas para toda la flota. Para la selección de esta aeronave se han tomado las siguientes consideraciones

Principalmente, descartar todas las aeronaves narrow body, debido a que todas poseen una configuración de cabina idéntica al modelo de A320 ya simulado, habiendo solo variaciones en la capacidad de pasajeros. Si bien el avión A321 tiene algunas de sus filas con un número reducido de asientos, esto no debería generar gran impacto en los resultados de la simulación.

Por lo tanto, dentro de las opciones restantes, de los aviones wide body, se ha seleccionado para este apartado de la investigación la aeronave Boeing 787-9, debido a que es la aeronave de pasajeros que más posee LATAM Airlines, después de B767-300 (Ver Anexo E).

3.3.1. Características de la Aeronave

Esta aeronave tiene una capacidad de 303 pasajeros, los cuales se encuentran separados, dentro de la cabina, las categorías Premium Business, LATAM+ y Economy, los asientos de estas categorías tienen un seat pitch de 196 [cm], 89 [cm] y 81 [cm] respectivamente (Seat Guru; Seatmaestro, s.f.; The Flying Carpet, 2020).

La configuración de asientos de este avión consta de 3 columnas de asientos, teniendo una cabina con 2 pasillos, pero, a diferencia del B767-300, cada fila esta compuesta por grupos de 3 pasajeros, a excepción de los asientos de categoría Premium Business. De esta manera, al tener una configuración de cabina distinta, los resultados de la optimización del embarque en esta aeronave servirán para verificar la eficacia de los escenarios propuestos.

El mapa de asientos de la aeronave Boeing 787-9 se encuentran en el Anexo F.

3.3.2. Modelamiento en SIMIO

El modelamiento del proceso de embarque de esta aeronave se ha realizado a partir del escenario base del B767-300, aplicándole modificaciones para ajustarse a las características del Boeing 787 y todas las consecuencias que su configuración de cabina implica.

3.3.2.1. Método más Eficiente

En cuanto a la metodología de embarque, que puede entregar tiempos de embarque inferiores, la teoría dice que el método de embarque Steffen es el más eficiente en términos de tiempo de embarque, reduciendo las interferencias de fila a 0 y llevando las interferencias de pasillo a una cantidad mínima.

Por lo tanto, los resultados que se obtengan posteriormente serán analizados teniendo como referencia los resultados de esta metodología, la cual no tiene modificaciones en su modelo, es decir que no cuenta con embarque preferente o alguna perturbación que pueda significar pérdidas de eficiencia.

Tabla 17: Resultados Método Steffen, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque	
	Media	Variabilidad
100%	27:37	6,04%
90%	25:08	6,90%
80%	22:38	7,00%
70%	20:05	7,12%

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2.2. Modelo de Embarque

El modelo de embarque es similar al utilizado en la simulación del B787-300, pero teniendo diferencias en la distribución de los pasajeros, como se muestra a continuación.

- Etapa 1
 - Grupo 0 o pre embarque: Pasajeros con movilidad reducida, ya sea embarazadas, personas mayores de 60 años, que viajen con niños menores

de 2 años o que requieran asistencia para embarcar. Este grupo tiene contemplado un total de 21 asientos dentro de la cabina.

- Embarque premium (grupos 1): Pasajeros con asientos en clase Premium business, compuesta por las primeras 8 filas.
- Embarque preferente (grupos 2 y 3): Pasajeros que compraron su pasaje con tarifa TOP, compraron asiento LATAM+ o que tengan algún tipo de categoría premium designada por la aerolínea. Este grupo tiene contemplado todos los asientos entre las filas 12 y 18.

- Etapa 2

- Grupo 4: Pasajeros con posición de asiento en ventana.
- Grupo 5: Pasajeros con posición de asiento en el centro.
- Grupo 6: Pasajeros con posición de asiento en pasillo.

3.3.3. Simulación del Escenario

El escenario, tal como en el modelo de embarque simulado en las aeronaves anteriores, fue simulado variando el factor de ocupación entre 100%, 90%, 80% y 70%, y ejecutando cada variante 250 veces, buscando resultados estadísticamente significativos.

3.3.3.1. Resultados

La respuesta recibida de las ejecuciones muestra un bajo nivel de rotaciones, que son generadas por los pasajeros de los grupos 0, 2 y 3, según el modelo de embarque mostrado anteriormente.

Por otro lado, al comparar el tiempo de embarque, con factor de ocupación del 100%, respecto del tiempo base de TAT, 60 minutos, resulta ser un 47,4% del turnaround.

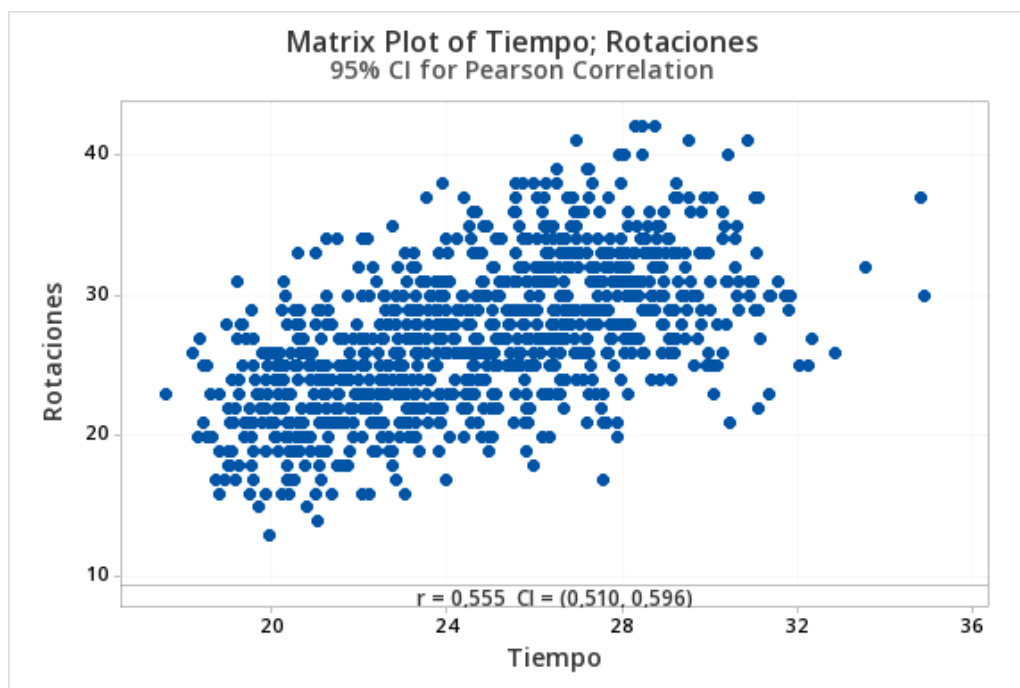
Tabla 18: Resultados escenario Base, B787.

F.O.	Tiempo de Embarque		Rotaciones	
	Media	Variabilidad	Media	Variabilidad
100%	28:27	5,87%	31,2	13,73%
90%	25:57	5,94%	28,8	14,38%
80%	23:35	7,09%	25,9	14,92%
70%	20:51	7,31%	22,4	16,33%

Fuente: Elaboración Propia.

Además, al comparar los tiempos de embarque con las rotaciones, para ver si existe relación entre estas variables, se obtiene una correlación igual a 55,5%, es decir, una moderada correlación positiva.

Gráfico 9: Diagrama de dispersión entre tiempo y rotación.



Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3.2. Diagnóstico

Los resultados de la simulación, apuntan a que el proceso de embarque en esta aeronave es adecuado, de la perspectiva del pasajero, debido a la poca cantidad de rotaciones, o interferencias de fila.

Para contrastar los resultados, se compararon las proporciones del tiempo de embarque respecto del tiempo de TAT base⁷, entre el tiempo medio de embarque, con 100% de factor de ocupación y el método Steffen, evidenciando que no existe gran pérdida en la eficiencia en el proceso, similar a como ocurre con B767-300.

Tabla 19: Comparación con método Steffen, B787.

	Proporción del TAT
Escenario base	47,4%
Método Steffen	46,1%

Fuente: Elaboración Propia.

⁷ 45' para vuelo domésticos; 60' para vuelos internacionales.

3.3.4. Optimización del modelo

En base a los resultados obtenidos de la simulación del escenario base, se buscará minimizar, o disminuir, los tiempos medios de embarque, a través de la modificación de ciertas características, respecto del modelo inicial.

Buscando reiterar el procedimiento el procedimiento de optimización del embarque en el B767-300. Por lo tanto, se replicarán los escenarios restantes, independiente de si entregaron resultados positivos, ya que existe la posibilidad que la configuración de cabina de esta aeronave entregue resultados diferentes para cada caso.

3.3.4.1. Escenario 2: Realizar un Pre Embarque

Este escenario consiste en realizar un pre embarque, al igual que en las optimizaciones anteriores, el cual consiste en empezar a procesar a los pasajeros 150 segundos antes de dar inicio al embarque, buscando generar una mayor fluidez en los primeros minutos de este.

- **Resultados**

La simulación del escenario entrega una disminución en los tiempos medio de embarque, de hasta 94 segundos. En base a los resultados, se puede inferir que este escenario es más efectivo que en el A320 debido a la configuración de pasillo del B787, principalmente por tener dos pasillos en la cabina. Aún así, esta sigue entregando reducciones de tiempo marginales, o que no contribuyen significativamente en la optimización del proceso.

Tabla 20: Resultados Escenario 2, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque		
	Media	Variabilidad	Variación
100%	27:23	5,92%	-64
90%	25:35	6,42%	-53
80%	22:02	7,87%	-94
70%	19:37	9,43%	-74

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4.2. Escenario 4: Embarque por Bloques

Este escenario consiste en replicar el embarque por bloques simulado en las optimizaciones anteriores, pero con modificaciones debido a las características de la aeronave y del modelamiento. La distribución de los grupos del embarque se muestra a continuación.

Figura 19: Embarque por Bloques, B787.

1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5			
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5			
	1	1	1	2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	5	5	5	5
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	5	5	5	5
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
				2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	7	7	7	7	7	3	3	3	3	3	5	5	5</				

Fuente: Elaboración Propia.

Si bien, este modelo entregó resultados negativos anteriormente, puede que esta configuración de 2 pasillos promueva esta metodología y entregue reducciones en los tiempos de embarque.

• Resultados

Los resultados entregados no son satisfactorios, se observa un aumento en los tiempos de embarque y un gran aumento en el numero de rotaciones.

Por lo tanto, no se justifica aplicar este escenario en la optimización del embarque, pensando que lo buscado con esta investigación es minimizar el tiempo del proceso de embarque. Además, como este modelo implica un aumento en las interferencias de fila, este se convertiría en un embarque menos agradable, desde la perspectiva del pasajero.

Tabla 21: Resultados Escenario 4, B767

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación	Media	Variabilidad	Variación
100%	30:28	4,38%	121	79,4	7,68%	48
90%	27:29	5,14%	92	64,2	8,65%	35
80%	24:44	6,41%	68	50,0	9,73%	24
70%	21:54	6,80%	63	38,5	12,12%	16

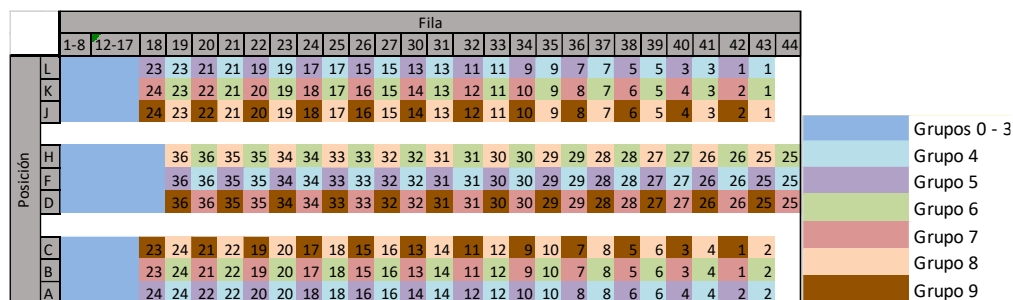
Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4.3. Escenario 5: Implementación de “The Flying Carpet”

Este escenario consiste en la implementación de *The Flying Carpet*, utilizando un método similar al embarque planteado en dicho escenario. Así pues, las modificaciones del método se deben a la capacidad de la alfombra y la composición de los grupos, buscando una distribución simétrica de los pasajeros para tener un embarque ordenado.

Respecto a la metodología de uso de la alfombra, esta se mantiene sin modificaciones, una vez en la alfombra, se permitirá el ingreso a la aeronave por posición, o columna, según el orden dispuesto a continuación (Ver Anexo D).

Figura 20: Modelo de embarque escenario 5, B787.



Fuente: Elaboración Propia.

• Resultados

La simulación del escenario entrega una disminución en los tiempos medio de embarque, la cual se va reduciendo junto al factor de ocupación de la aeronave.

Por otro lado, virtualmente no existe una variación en las rotaciones, ya que tanto el modelo base como en este, están diseñados para tener un nivel de rotaciones

mínimo, siendo que son causadas por la etapa 1, la cual no se ve modificada con la optimización.

Tabla 22: Resultados Escenario 5, B767.

F.O.	Tiempo de Embarque			Rotaciones		
	Media	Variabilidad	Variación	Media	Variabilidad	Variación
100%	28:06	6,03%	-21	31,8	13,69%	1
90%	25:29	5,87%	-28	29,3	14,08%	0
80%	23:10	6,08%	-25	26,2	14,80%	0
70%	20:47	8,03%	-4	22,6	16,20%	0

Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Análisis

A partir de toda la información y datos obtenidos, se puede realizar un completo análisis y sacar conclusiones, sobre el comportamiento del proceso de embarque en las distintas aeronaves estudiadas.

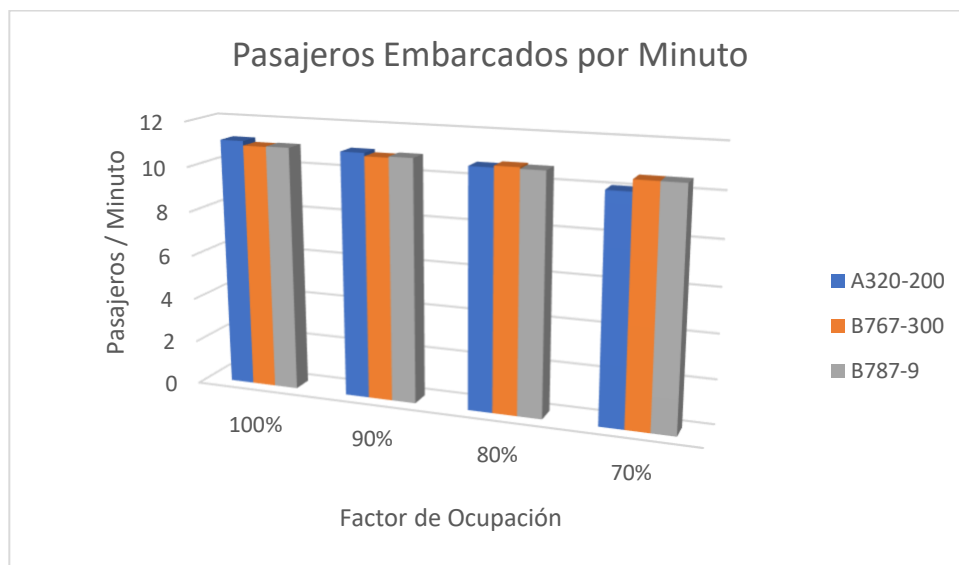
3.4.1. Pasajeros Embarcados por Minuto

El indicador, pasajeros embarcados por minuto, es de utilidad para observar la eficiencia del embarque, desde un punto de vista distinto al *TAT*, permitiendo ver como es el comportamiento del proceso en los distintos aviones y escenarios simulados.

Para comenzar, si se compara la tasa de pasajero embarcados por minuto del la metodología más eficiente, la Steffen, se observa una cierta linealidad en este indicador, que varía entre 10 y 11 pasajeros por minutos, aproximadamente.

Siendo que se trata de la metodología Steffen y no existen interferencias, de fila y pasillo, en el proceso, de los distintos aviones, se puede descartar la premisa de que los aviones de fuselaje ancho, al tener 2 pasillos en la cabina, cuentan con un proceso de embarque más fluido.

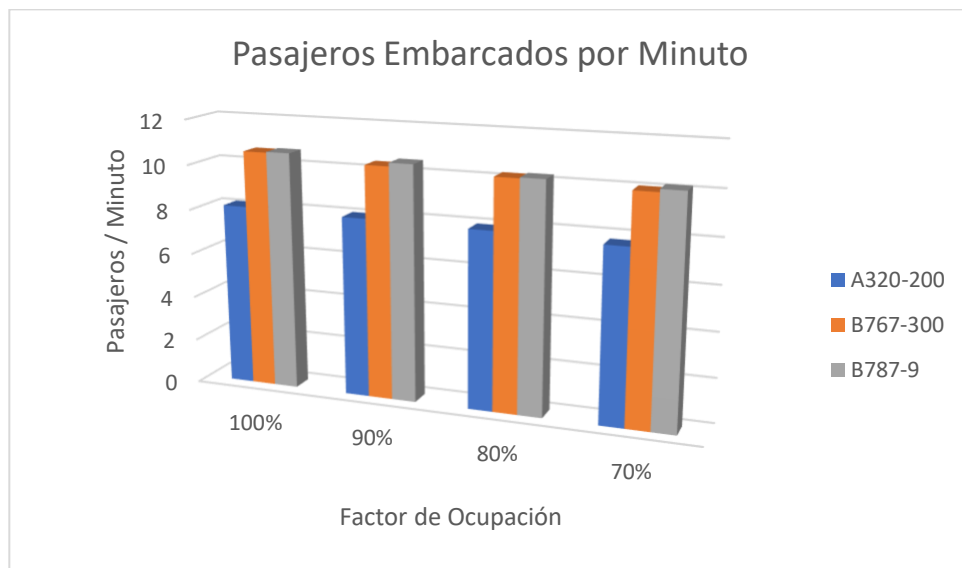
Gráfico 10: Pasajeros Embarcados por Minuto, método Steffen.



Fuente: Elaboración Propia.

Ahora, si se comparan los escenarios base de las distintas aeronaves, se puede observar un mayor contraste entre los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, principalmente por el impacto observado en el A320 por los pasajeros pertenecientes a la etapa 3 del modelo de embarque. Además, como se comentó anteriormente en los diagnósticos, no existe gran diferencia entre los tiempos observados por el método Steffen y el modelo base, de las aeronaves de fuselaje ancho.

Gráfico 11: Pasajeros Embarcados por Minutos, Simulaciones Base.

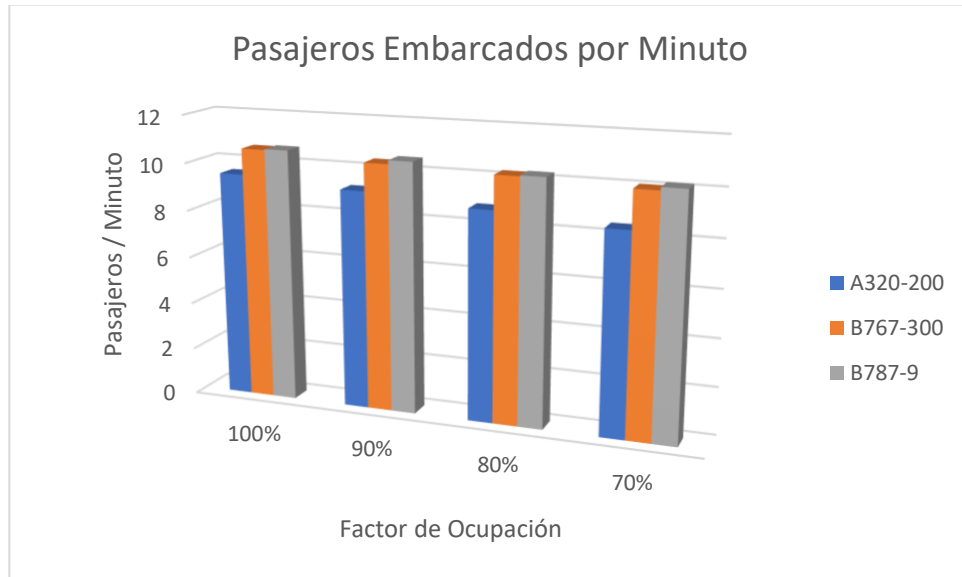


Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, no es considerable válida la comparación anterior, debido a que el embarque base del A320-300 cuenta con la etapa 3, o grupo 7, en el modelo de embarque. Por lo tanto, es prudente realizar una comparación similar, pero reemplazando el embarque base por el escenario 3 de esta aeronave.

El resultado de esta sustitución entrega una menor diferencia de los tiempos de embarque del A320, respecto de las otras aeronaves. No obstante, se sigue viendo una notoria desventaja.

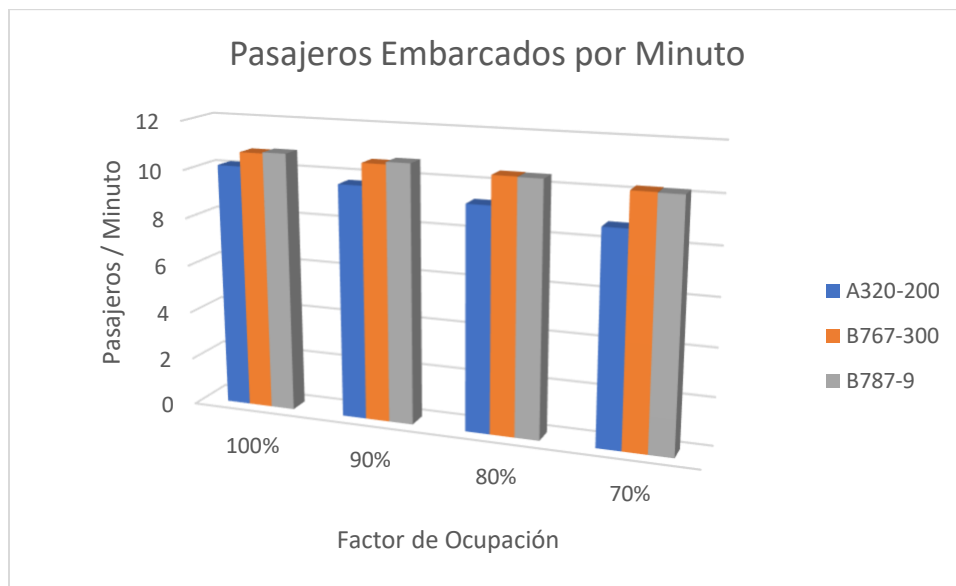
Gráfico 12: Pasajeros Embarcados por Minuto, simulaciones base y escenario 3 A320.



Fuente: Elaboración Propia.

Por último, al observar el comportamiento de la tasa de pasajeros embarcados por minuto del escenario 5, el más eficiente en A320-200, se ve que disminuye la diferencia respecto de las otras aeronaves, pero esta sigue siendo importante.

Gráfico 13: Pasajeros Embarcados por Minuto, del escenario 5.



Fuente: Elaboración Propia.

3.4.2. Escenarios más Eficientes

En cuanto a la eficiencia de la optimización del embarque, si se mide respecto a la metodología Steffen, solo se observan tiempos de embarque inferiores al método Steffen en el escenario 2 de las aeronaves de fuselaje ancho.

Tabla 23: Eficiencia de los Escenarios más Óptimos

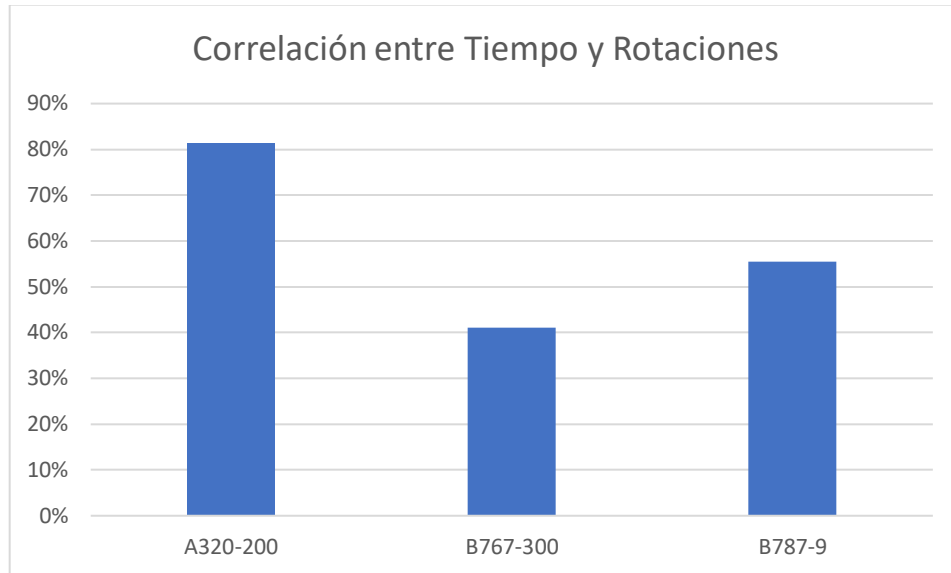
Aeronave	F.O.	Eficiencia	Rotaciones
A320-200	100%	-9,9%	17,4
	90%	-12,9%	17,3
	80%	-15,1%	16,8
	70%	-14,6%	15,9
B767-300	100%	1,6%	13,3
	90%	0,7%	12,2
	80%	1,3%	10,7
	70%	4,3%	9,3
B787-9	100%	0,8%	31,2
	90%	0,2%	28,8
	80%	2,7%	25,9
	70%	2,3%	22,4

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que el escenario 2 del B767-300 es el más eficiente, además de mostrar un número de rotaciones inferior a las otras aeronaves. Por otro lado, el escenario 2 del avión B787-9 también registra tiempos inferiores al método Steffen, pero registrando el mayor número de rotaciones.

Entonces, ya teniendo descartada la idea de que una cabina con dos pasillos implicaría un embarque más fluido, se puede afirmar que el tiempo de embarque se ve menos afectado por las interferencias de fila en aeronaves que cuentan con dos pasillos dentro de su cabina, considerando los antecedentes presentados anteriormente y las correlaciones, entre el tiempo de embarque y las rotaciones, presentado a continuación,

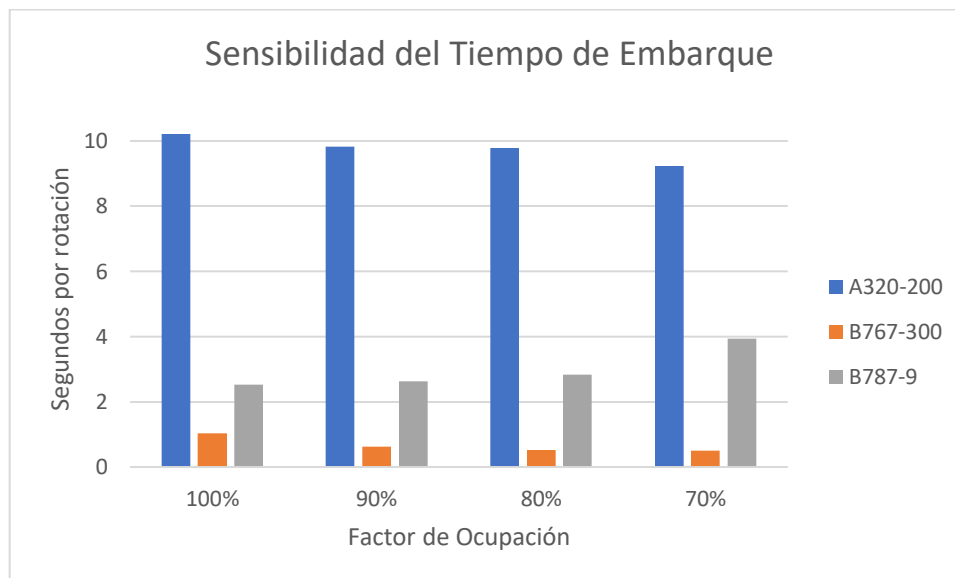
Gráfico 14: Correlación entre Tiempo de Embarque y Rotaciones, de las aeronaves.



Fuente: Elaboración Propia.

Además, a modo de comparación, al estudiar el comportamiento de la sensibilidad de los tiempos de embarque respecto de las rotaciones, entre el escenario base (escenario 3 para A320) y el embarque por bloques de cada aeronave, se observa un comportamiento similar al gráfico anterior.

Gráfico 15: Sensibilidad Tiempo de Embarque Respecto a Rotaciones.



Fuente: Elaboración Propia.

Por lo tanto, en base a los datos anteriores, se podría decir que la aeronave A320 no logra un nivel de eficiencia cercano al método Steffen, ya que las rotaciones generadas en la etapa 1 de su modelo de embarque generan un impacto no menor en la performance del proceso.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

El estudio no fue enfocado en la totalidad de la flota comercial de LATAM Airlines, ya que se analizó una flota representativa para la optimización del embarque, considerando similitudes y diferencias entre las distintas aeronaves pertenecientes a la flota.

En base a la investigación realizada, se puede concluir que se deben tomar en consideración distintos escenarios para determinar si los resultados de las simulaciones son atractivos u óptimos.

La aeronave A320-200 es la que presenta más deficiencias respecto al modelo de embarque Steffen, inicialmente, por la existencia de un grupo 7 en su proceso de embarque. Pero, aún con este componente se logra una disminución significativa del tiempo de embarque, de aproximadamente un 15%, al reducir el equipaje de mano permitido en la cabina en su totalidad, generando una reducción de las interferencias de pasillo.

Asimismo, la eliminación del grupo 7 también entrega una reducción importante, entre 8% y 15% aproximadamente, a partir de una importante reducción de las interferencias de fila. Si se quisieran obtener reducciones del tiempo de embarque aún más elevadas, de hasta un 25%, se podría hacer una combinación de las medidas mencionadas anteriormente, reduciendo ambos tipos de interferencias, de fila y de pasillo.

Tabla 24: Resultados Combinación Escenario 1 y 3, A320.

F. Equipaje	F.O.	Tiempo de Embarque		
		Media	Variabilidad	Variación [Segundos]
50%	100%	16:28	6,91%	-296
	90%	15:13	6,82%	-260
	80%	14:06	6,56%	-211
	70%	13:05	7,25%	-159
0%	100%	16:08	7,22%	-316
	90%	14:43	8,07%	-290
	80%	13:15	7,87%	-262
	70%	11:47	9,29%	-237

Fuente: Elaboración Propia.

De igual forma, realizar el embarque con un modelo similar al Steffen mediante el uso de *The Flying Carpet* produjo reducciones del tiempo de embarque de aproximadamente un 20%, superior al escenario que considera la disminución del equipaje en cabina o al que considera la eliminación el grupo 7.

Si bien, este último escenario registra una máxima reducción del tiempo de embarque entre todos los escenarios simulados individualmente, no se logra reducir al nivel del método Steffen por aproximadamente dos minutos. Al mismo tiempo, la implementación de esta herramienta para el embarque podría ser la más compleja de aplicar, tal como se mostró en la simulación del escenario 5, entre todos los escenarios propuestos.

Las aeronaves Boeing, 767-300 y 787-9, presentan un comportamiento similar entre sí, y su ineficiencia respecto al método Steffen no supera el minuto. Con respecto a la optimización, el escenario que propone realizar un pre-embarque ha logrado ser el único más eficiente, en un 4%, que el método Steffen. Sin embargo, este registra una disminución del tiempo de embarque de tan solo un 5%, la máxima entre estos aviones.

En base al análisis, se identifica que las aeronaves twin aisle poseen una ventaja respecto de las single aisle, ya que al dividir el flujo de pasajeros en dos pasillos se duplicaría, en promedio, la frecuencia de las llegadas a cada pasillo.

El efecto de esto se refleja en cómo se ve afectado, o influido, el embarque por las interferencias, específicamente en la sensibilidad del tiempo de embarque en relación de las rotaciones, resultando una mayor tasa de segundos por rotación en la aeronave A320-200.

Los resultados del análisis de sensibilidad del tiempo de embarque permiten inferir que, si se quisiera minimizar aún más el tiempo de embarque, especialmente en aeronaves de fuselaje angosto, se debería considerar la modificación de los grupos pertenecientes al Embarque Premium o, más bien, la reducción de su tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

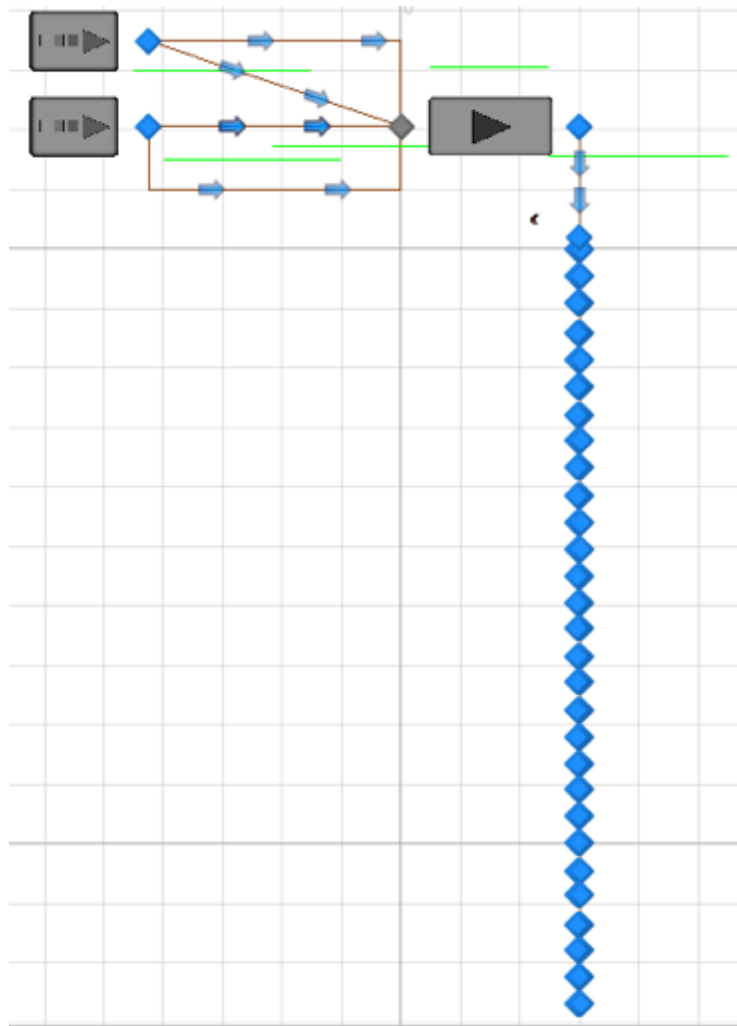
- Airbus. (2005). *A320-Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning*.
- AirgWays. (30 de Abril de 2019). Recuperado el 10 de Mayo de 2020, de Airgways: <https://airgways.com/2019/04/30/aviones-sin-espacio-maletas-de-mano/>
- Capilla, M. (2017). MODELO DE SIMULACIÓN EN ENTORNO COMERCIAL PARA VALIDAR POLÍTICAS DE EMBARQUE. *Universidad Autónoma de Barcelona*.
- Concesionaria Nuevo Pudahuel S.A. (s.f.). *Pasajeros con movilidad reducida*. Recuperado el 10 de Mayo de 2020, de Nuevo Pudahuel: <https://www.nuevopudahuel.cl/pasajeros-con-movilidad-reducida>
- Junta Aeronáutica Civil. (2018). *Anuario de Transporte Aéreo*.
- LATAM Airlines Group. (2019). *Memoria Integrada*.
- LATAM Airlines Group. (2019). *Proceso de Embarque*. Recuperado el 13 de Mayo de 2020, de LATAM: https://www.latam.com/es_cl/informacion-para-tu-viaje/prepara-tu-viaje/proceso-de-embarque/
- Müller, J. (2009). Optimal Boarding Methods for Airline Passengers. *Hamburg University of Applied Sciences*.
- Neumann, S. (2019). Is the boarding process on the critical path of the airplane turn-around? *European Journal of Operational Research*, 9.
- Nuevo Pudahuel. (12 de Marzo de 2015). *Nuevo Pudahuel*. Obtenido de Reglamento de Servicio de la Obra: https://www.nuevopudahuel.cl/sites/default/files/Reglamento_de_Servicio_de_la_Obra-AIAMB_n3.pdf

- Qiang, S., Jia, B., & Huang, Q. (2017). Evaluation of Airplane Boarding/Deboarding Strategies: A Surrogate Experimental Test. *Symmetry*, 1-15.
- SIMIO. (2020). *The Story of SIMIO*. Recuperado el 25 de Marzo de 2020, de SIMIO: <https://www.simio.com/about-simio/>
- Schultz, M. (2008). Efficiency of Aircraft Boarding Procedures . *Research Gate*, 2-8.
- Seat Guru. (s.f.). *LATAM Seat Maps*. Recuperado el 5 de Junio de 2020, de [Seatguru: https://www.seatguru.com/airlines/LATAM_Chile/LATAM_Airlines_Boeing_787-9.php](https://www.seatguru.com/airlines/LATAM_Chile/LATAM_Airlines_Boeing_787-9.php)
- Seatmaestro. (s.f.). *Mapa de asientos LATAM Airlines Boeing B767 300 – Plano del avión*. Recuperado el 18 de Mayo de 2020, de Seatmaestro: <https://www.seatmaestro.es/airplanes-seat-maps/latam-airlines-boeing-b767-300/>
- Steffen, J. H. (2008). Optimal boarding method for airline passengers. *Journal of Air Transport Management*, 1.
- Steffen, J. H., & Hotchkiss, J. (2011). Experimental test of airplane boarding methods. *Journal of Air Transport Management*.
- Steiner, A., & Philipp, M. (2009). Speeding up the airplane boarding process by using preboarding areas. *Swiss Transport Research Conference*, (págs. 7-20).
- Team 2053. (2007). Boarding at the Speed of Flight. *Duke Mathematics Department*, 17-18.
- The Flying Carpet. (2020). Recuperado el 15 de Junio de 2020, de The Flying Carpet: <http://the-flying-carpet.com>

- Tianjin Airlines. (s.f.). *Our Fleet*. Recuperado el 5 de Mayo de 2020, de Tianjin Airlines Web site: <https://global.tianjin-air.com/CN/GB/travel-with-us/our-fleet/A320>

Anexo B: Esquematización del Modelamiento.

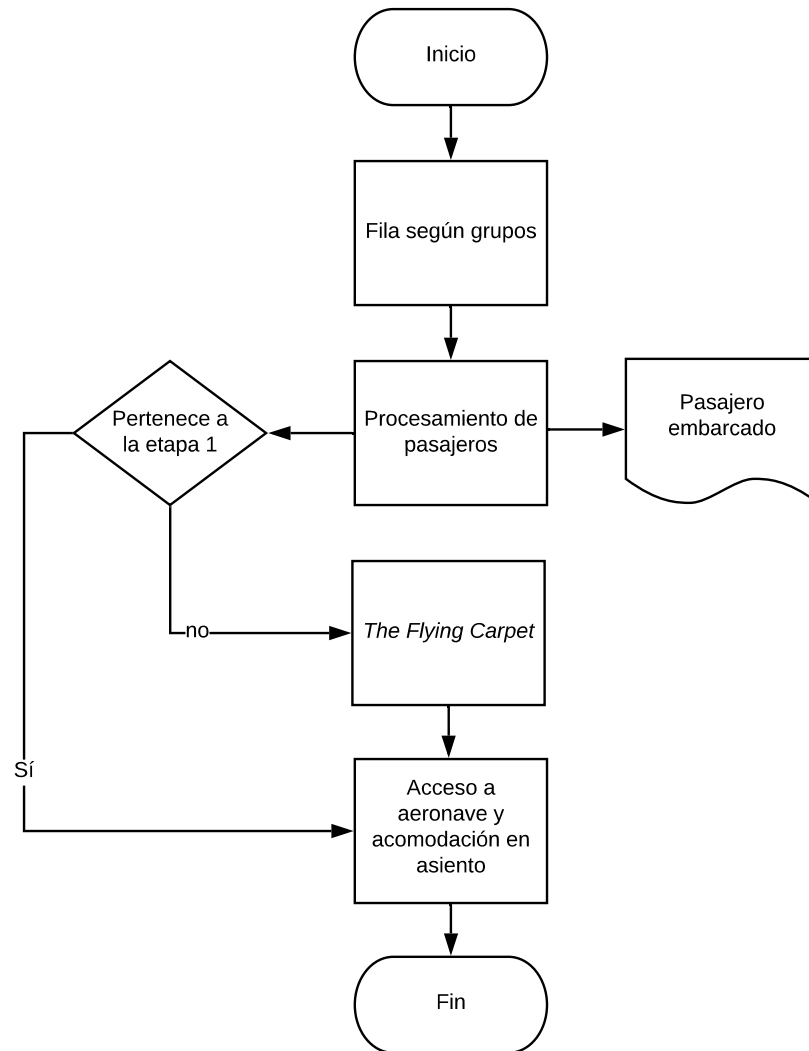
Figura 21: Esquematización del Modelamiento en SIMIO.



Fuente: Elaboración Propia

Anexo C: Diagrama de Flujo del Proceso de Embarque por Pasajero.

Figura 22: Diagrama de Flujo del Proceso de Embarque.



Fuente: Elaboración Propia

Anexo D: Orden de Acceso a Aeronave Posterior a *The Flying Carpet* en escenario 5.

Tabla 25: Orden de Acceso, A320-200.

Orden	1	2	3
Grupo 4	L	A	K
Grupo 5	A	L	B
Grupo 6	K	C	J
Grupo 7	B	J	C

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26: Orden de Acceso, B767-300

Orden	1	2
Grupo 4	A/L	F
Grupo 5	F	D/H
Grupo 6	C/J	D/H
Grupo 7	A/L	D/H
Grupo 8	C/J	No Aplica

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27: Orden de Acceso, B787-9

Orden	1	2
Grupo 4	A/L	F
Grupo 5	A/L	F
Grupo 6	B/K	H
Grupo 7	B/K	D
Grupo 8	C/J	H
Grupo 9	C/J	D

Fuente: Elaboración Propia

Anexo E: Flota Aeronaves de Pasajeros de LATAM Airlines.

Tabla 28: Flota Aeronaves de Pasajeros⁸.

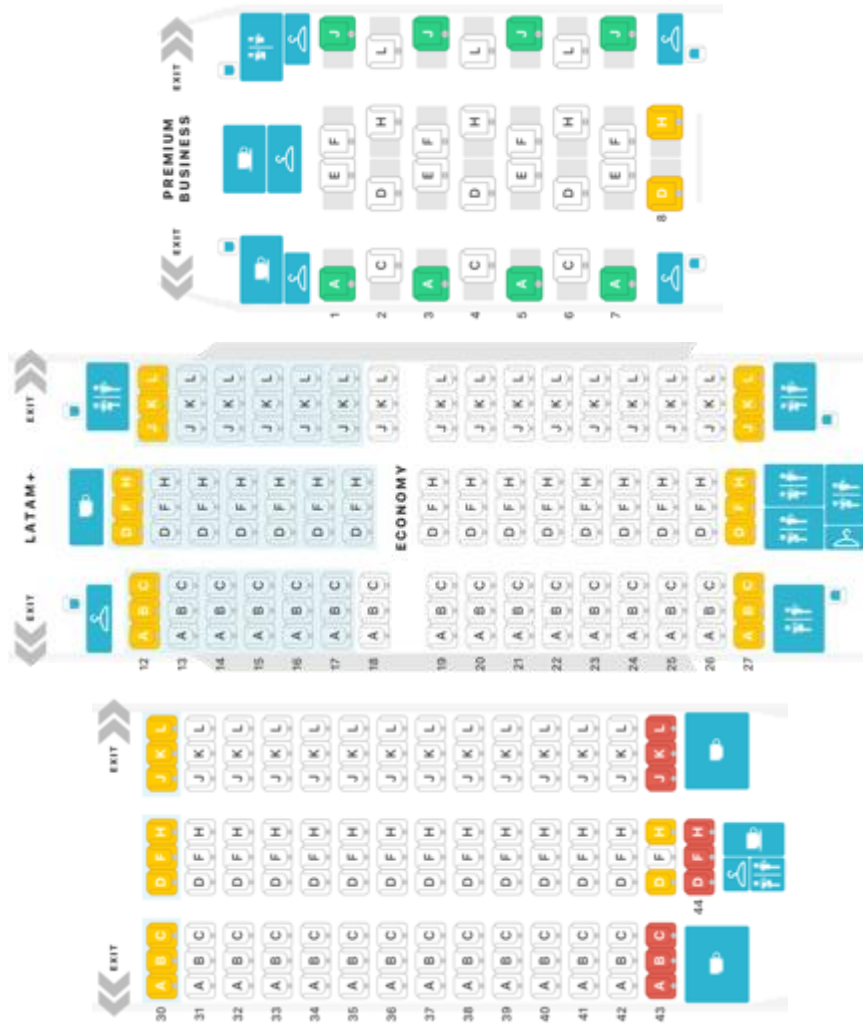
Flota Pasajeros	Total	Porcentaje
Airbus A319-100	46	13,94%
Airbus A320-200	142	43,03%
Airbus A320-Neo	13	3,94%
Airbus A321-200	49	14,85%
Airbus A350-900	13	3,94%
Boeing 767-300 ER	31	9,39%
Boeing 777-300 ER	10	3,03%
Boeing 787-8	10	3,03%
Boeing 787-9	16	4,85%
Total	330	

Fuente: Memoria Integrada (LATAM Airlines Group, 2019).

⁸ Flota correspondiente a Enero-Febrero 2020.

Anexo F: Configuración de Cabina, Boeing 787-9.

Figura 23: Mapa de Asientos Boeing 787-9.



Fuente: Seatguru.com