

MODELO DE SIMULACIÓN EN ENTORNO COMERCIAL PARA VALIDAR POLÍTICAS DE EMBARQUE

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Memòria del Treball Fi de Grau en
Gestió Aeronàutica

realitzat per

Miriam Capilla Campomar

i dirigit per

Miquel Àngel Piera Eroles

Sabadell, Febrer de 2017

El sotasignat, Dr. Miquel Angel Piera.
Professor/a de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per na Miriam Capilla

I per tal que consti firma la present.

Signat:

Sabadell, 7deFebrer de 2017

FULL DE RESUM – TREBALL FI DE GRAU DE L'ESCOLA D'ENGINYERIA

<p>Títol del Treball Fi de Grau</p> <p>Model de simulació en entorn comercial per validad politiques d'embarcament Modelo de simulación en entorno comercial para validar políticas de embarque Simulation model in a comercial environment for the validation of passenger boarding polices</p>	
<p>Autor[a]: Miriam Capilla Campomar</p>	<p>Data: <i>Febrero 2017</i></p>
<p>Tutor[a]/s[es]: Miquel Àngel Piera Eroles</p>	
<p>Titulació: Grado en Gestión Aeronáutica</p>	
<p>Paraules clau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Català: Procés d'escala, Estratègies d'embarcament, Optimització, Simulació. • Castellà: Proceso de escala, Estrategias de embarque, Optimización, Simulación. • Anglès: Turn-around, Boarding strategies, Optimization, Simulation. 	
<p>Resum del Treball Fi de Grau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Català: La optimització del procés d'embarcament de passatgers en aeronaus és una de les vies a través de la qual les companyies aèries poden reduir el temps d'escala als aeroports i maximitzar la utilització dels seus avions. Aquest projecte tracta en l'estudi del problema d'embarcament dels passatgers amb l'objectiu de dissenyar una estratègia d'embarcament eficient que resulti en una minimització del temps total d'embarcament tenint en compte les característiques individuals dels passatgers i les relacions existents entre ells. • Castellà: La optimización del proceso de embarque de pasajeros en aeronaves es una de las vías a través de la cual las compañías aéreas pueden reducir el tiempo de escala en los aeropuertos y maximizar la utilización de sus aviones. Este proyecto consiste en el estudio del problema del embarque de los pasajeros con el objetivo de diseñar una una estrategia de embarque eficiente que resulte en una minimización del tiempo total de embarque teniendo en cuenta las características individuales de los pasajeros y las relaciones existentes entre ellos. • Anglès: The optimization of the passenger boarding process is one of the key factors for airlines to reduce their stopover time at airports and maximize the actual flying time of their aircraft. This project aims to analyze the passengers boarding process in order to design an efficient boarding strategy which helps minimize the overall boarding time whilst taking into account the particular aspects of each passenger and the relationships among them. 	

Índice

Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
0. Resumen.....	9
1. Introducción	10
1.1 Interés y motivación	12
1.2 Estado del arte	14
1.2.1 Estrategias de embarque	16
1.2.2 Conflictos en el embarque de pasajeros	21
1.2.3 Estrategia de embarque eficiente	21
1.3 Estudios previos	23
1.4 Objetivos del proyecto	26
1.4.1 Objetivos generales	26
1.4.2 Objetivos específicos	27
1.5 Riesgos del proyecto	28
1.5.1 Evaluación de los riesgos	28
1.5.2 Catalogación de los riesgos	28
1.5.3 Plan de contingencia	29
1.6 Planificación temporal del trabajo	30
2. Modelización del modelo	31
2.1 Introducción	33
2.2 Teoría del modelo	35
2.2.1 Avión	35
2.2.2 Personas	39
2.2.3 Estimación de tiempos	43
2.2.4 Asignación de asientos de pasajeros	44
2.2.5 Conflictos a tener en cuenta en la simulación	45
2.3 Construcción del modelo en SIMIO	46
2.3.1 Introducción	46
2.3.2 Avión	46
2.3.3 Pasajeros	48

2.3.4	Modelo en SIMIO	51
3.	Simulación del modelo	57
3.1	Resultados de la simulación del modelo	59
3.1.1	Elementos de las simulación del modelo	59
3.1.2	Resultados de la simulación del modelo	60
3.2	Validación del modelo	63
3.3	Estrategia propuesta por bloques	65
3.3.1	Simulación considerando distintos número de bloques	65
3.3.2	Simulación considerando 6 bloques y distinto orden	68
4.	Conclusiones	72
4.1	Conclusiones	74
4.2	Líneas de trabajo futuro	76
5.	Referencias bibliográficas	78

Índice de figuras

Figura 1: Escala de una aeronave 15

Figura 2: Esquema de las tareas de la escala de una aeronave 16

Figura 3: Estrategia *Back-to-front* 17

Figura 4: Estrategia *Front -to-back* 18

Figura 5: Estrategia WilMA 18

Figura 6: Estrategia por bloques 19

Figura 7: Estrategia piramidal inversa 20

Figura 8: Estrategia *Back-to-front* por bloques 21

Figura 9: Conflicto de pasillo 21

Figura 10: Estrategia de Steffen 25

Figura 11: Tiempo de embarque de cada estrategia 25

Figura 12: Tabla de las tareas que componen el proyecto, su duración,
fecha de inicio y fin 30

Figura 13: Dimensiones del A320 EC-LVB 37

Figura 14: Esquema de los asientos del A320 con configuración 180Y 37

Figura 15: Asientos y sus elementos 38

Figura 16: Puertas de cabina 38

Figura 17: Nomenclatura de los asientos 46

Figura 18: Representación de lo entrada a la cabina y las filas 47

Figura 19: Tipo de butacas del avión y leyenda 49

Figura 20: Hoja de creación de entidades de Excel 49

Figura 21: Pasajeros Tipo 6 y butacas prohibidas para pasajeros Tipo 6 50

Figura 22: Política de embarque *Back-to-front* 51

Figura 23: Los 6 tipos de entidades a crear 53

Figura 24: Propiedades de la entidad Tipo 1 53

Figura 25: Propiedades del Source 54

Figura 26: Proceso *Iralfinger* 54

Figura 27: Propiedades del Transfer 54

Figura 28: Pasajeros en el Finger, el contador muestra que se han
creado las 180 entidades 54

Figura 29: Proceso Contar 55

Figura 30: Decide que comprueba si se han creado las 180 entidades 55

Figura 31: Proceso Embarque1 55

Figura 32: Propiedades del Search 55

Figura 33: Propiedades del Transfer 55

Figura 34: Proceso Contar2 56

Figura 35: Proceso ColocarMaleta 56

Figura 36: Propiedades Decide 56

Figura 37: Pasajeros embarcando 59

Figura 38: Interferencia en el pasillo 59

Figura 39: Interferencia resuelta 60

Figura 40: Minutos que requiere un pasajero para embarcar 61

Figura 41: Comparación resultados entre el modelo y el estudio de Steffen 63

Figura 42: Escenario con 4 bloques..... 65

Figura 45: Escenario con 5 bloques 66

Figura 46: Escenario con 6 bloques 66

Figura 47: Escenario con 7 bloques 67

Figura 48: Escenario con 6 bloques homogéneos 68

Figura 49: Escenario con 6 bloques sin pasajeros prioritarios 69

Figura 50: Escenario con variación en el orden de embarque de los bloques 70

Figura 51: Escenario 2 con variación en el orden de embarque de los bloques 71

Índice de tablas

Tabla 1: Catalogación de riesgos	28
Tabla 2: Contingencias	29
Tabla 3: Número de menores por acompañante	40
Tabla 4: Velocidad estimada	43
Tabla 5: Relación tipo pasajero/velocidad de desplazamiento	43
Tabla 6: Configuración de pasajeros utilizada en la simulación	48
Tabla 7: Total de entidades con ocupación del 100%	48
Tabla 8: Total de entidades con ocupación del 80%	48
Tabla 9: Tabla Pax en SIMIO	52
Tabla 10: <i>Sequence Table</i> del asiento SB_F11_B	52
Tabla 11: Resultados simulación con ocupación 100%	60
Tabla 12: Resultados simulación con ocupación 80%	60

0. Resumen

El sector aéreo ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años, este hecho ha dado lugar a un incremento de la competencia. Las compañías aéreas se han visto forzadas a optimizar todos aquellos procesos en los que pueden incidir. El tiempo que permanecen en tierra las aeronaves repercute de forma significativa en ingresos de las aeronaves, por lo tanto, un factor clave es reducir el tiempo de los aviones en tierra. Una de las vías para reducir el tiempo de escala en los aeropuertos es la optimización del proceso de embarque de pasajeros en la aeronave, objetivo principal de este proyecto.

En primer lugar, se han definido las principales estrategias de embarque existentes y se ha llevado a cabo una revisión científica de estudios previos, con el objetivo de estudiar el problema de embarque de pasajeros y conocer cuáles han sido las contribuciones principales y conclusiones en otros estudios. Esto permite identificar aquellos factores claves a la hora de definir una estrategia de embarque eficiente, así como posibles áreas de mejora y seleccionar una estrategia como base a la solución de dicho problema, la estrategia de embarque por bloques.

Una vez seleccionados los factores que se consideran que tienen una repercusión significativa en el tiempo total de embarque, y se selecciona un entorno y condiciones iniciales como base para desarrollar dicho proyecto, se ha utilizado el programa de simulación SIMIO para desarrollar un modelo que permita obtener estimaciones, lo más realistas posible, sobre el tiempo total de embarque dependiendo de la estrategia utilizada. Una vez corroborada la validez del modelo, se ha proseguido a desarrollar una estrategia eficiente, partiendo de la estrategia por bloques, ya que a pesar de que estudios anteriores demuestran que no es la más rápida, es la que permite que pasajeros que viajan juntos no deban separarse durante el proceso de embarque, hecho que se considera clave a la hora de implementar una estrategia de embarque en la operativa real.

Finalmente, se exponen las principales conclusiones del estudio y se proponen posibles líneas de trabajo futuros para facilitar una continuación en la investigación y optimización del proceso de embarque de pasajeros en la aeronave.

Sección 1: Introducción

1.1 Interés y motivación

La industria del transporte aéreo se encuentra en un entorno altamente competitivo, donde las compañías aéreas se ven forzadas a buscar estrategias de negocio inteligentes basadas en la flexibilidad y la eficiencia, con el propósito principal de minimizar sus costes. Para ello, invierten gran parte de sus recursos en la búsqueda continua de la eficiencia y eficacia de todos aquellos elementos, procesos y operaciones sobre los cuales tienen control, con la finalidad de aumentar la rentabilidad y, por ende, sus beneficios para poder sobrevivir en este sector.

La finalidad de las compañías aéreas es dar una respuesta satisfactoria a la demanda, para ello resulta imprescindible aumentar la eficiencia de las operaciones que llevan a cabo. Dado que las aeronaves solo generan ingresos cuando están volando, uno de los procesos más estudiados y del cual se pretende disminuir su duración el máximo posible es el proceso de *turn-around*.

Se puede definir *turn-around* como el tiempo que pasa un avión en tierra desde que llega hasta que se vuelve a ir; es decir, es el tiempo de escala de los aviones en los aeropuertos, desde la llegada de la aeronave a la plataforma y la colocación de los calzos¹, hasta que estos son retirados y la aeronave parte de nuevo. El tiempo de esta operación suele oscilar entre los 35 minutos² en el caso de las compañías *low-cost*, hasta una hora aproximadamente para las aerolíneas tradicionales, e incluso dos horas para los vuelos chárter o de largo recorrido.

Este tiempo permite llevar a cabo las operaciones necesarias para preparar la nave para el siguiente vuelo. La gestión eficiente del *turn-around* no es una tarea simple, dado la cantidad de procesos que se llevan a cabo en ese periodo y el número de actores que trabajan de forma coordinada y conjunta para que estos procesos se realicen de forma fluida y eficiente. Las compañías aéreas se centran en reducir al máximo posible la

¹ Block-time

² Con cambio de tripulación puede llegar a ser de 45 minutos en A320 y A319 y 10 min más en el caso de los A321.

duración de los procesos que se llevan a cabo durante el *turn-around*.

Reducir este tiempo permite, por una parte, aumentar la frecuencia de saltos, vuelos, que puede realizar la aeronave, y por otra parte, contar con un margen de tiempo extra para responder de forma eficaz a posibles retrasos o imprevistos en cualquiera de sus operaciones diarias. Es necesario mencionar que cuanto más tiempo se hallen estacionadas las aeronaves en un aeropuerto, más tasas aeroportuarias deberán afrontar. Por lo tanto, reducir el tiempo de *turn-around* implicará también un ahorro en los costes de la compañía.

Aunque hay muchos procesos que se llevan a cabo durante la escala de un avión en los que las compañías no pueden incidir, uno de los procesos que sí pueden controlar, y en el que más se centran las compañías en mejorar, es el embarque de los pasajeros en la aeronave. Así pues, este proyecto pretende abordar el problema de embarque de los pasajeros en aeronaves de un solo pasillo y definir el orden en el que los pasajeros deben abordar la aeronave de manera que el tiempo de embarque sea mínimo y, por lo tanto, se reduzca el tiempo total de escala.

1.2 Estado del arte

Es necesario analizar el estado del arte de este proyecto y conocer los estudios realizados con anterioridad sobre el tema en cuestión, con la finalidad de lograr una mayor comprensión y poder encontrar una solución óptima al problema planteado.

Todas las compañías aéreas del mundo realizan la misma reunión cada día, en diferentes formatos pero con la misma esencia y finalidad: *Maitines*. A primera hora de la mañana, de ahí su nombre, los responsables de cada uno de los departamentos de la compañía se reúnen para estudiar e identificar las causas de los retrasos de los vuelos del día anterior. Los retrasos de los vuelos se producen en la operativa en tierra, es decir, durante el *turn-around*. Analizar estos retrasos, buscar e incorporar medidas para reducirlos, es uno de los principales propósitos de todas las compañías.

El *turn-around* se compone de una serie de procesos que se llevan a cabo de forma coordinada, muchos de ellos paralelos o consecutivos; la optimización de estos procesos es vital para reducir los retrasos de los vuelos. El tiempo de *turn-around* de una aeronave oscila entre 30 - 60 minutos. Aunque el componente crucial de este proceso es el embarque de pasajeros, hay otras operaciones que se realizan durante el *turn-around* y algunas de forma simultánea al embarque. Por ejemplo, en algunos casos el repostaje de combustible de la aeronave puede realizarse a la vez que se embarcan los pasajeros, el servicio de catering puede reponer los carros de restauración, los trabajadores de *handling* pueden cargar las maletas y se pueden llevar a cabo los procedimientos de mantenimiento de la aeronave. Por lo tanto, el desembarque de los pasajeros anteriores y la limpieza del interior del avión son las únicas actividades que deben haber terminado antes de iniciar el embarque.

A continuación se muestra una imagen de las tareas que se llevan a cabo en la aeronave durante el tiempo de escala de este.

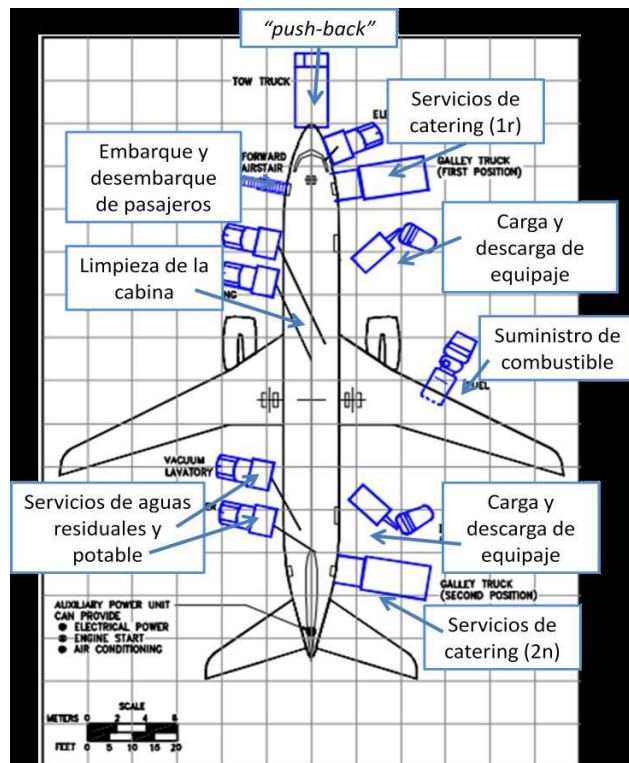


Figura 1: Escala de una aeronave

En la siguiente imagen (Figura 2), podemos contemplar la relación existente entre las distintas tareas: aquellas que son consecutivas, las que pueden realizarse simultáneamente, así como aquellas tareas críticas en la duración de la escala. Se denominan «tareas críticas» aquellas cuyo retraso implica directamente un aumento en la duración de la escala.

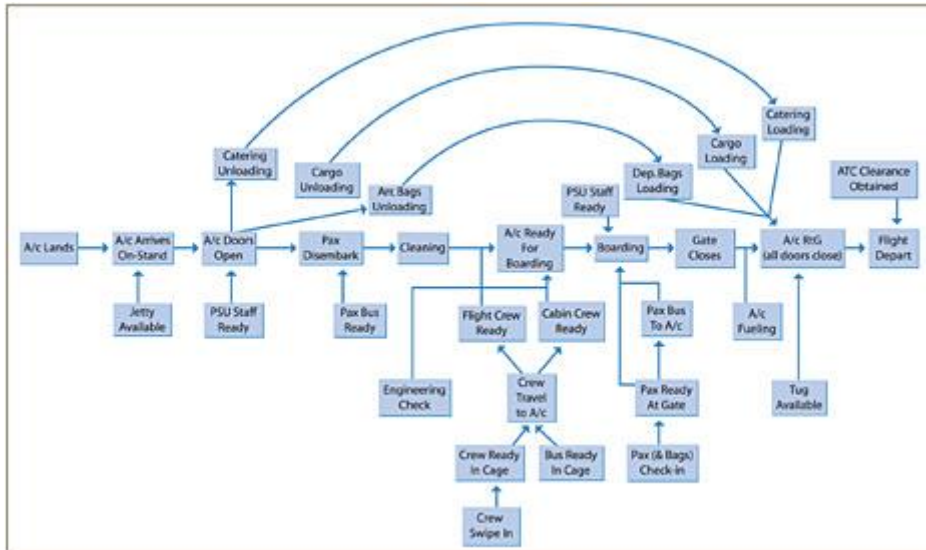


Figura 2: Esquema de las tareas de la escala de una aeronave

Como se ha comentado anteriormente, el embarque es uno de los procesos en el cual las aerolíneas pueden incidir directamente. Se define como proceso de embarque aquel en que los pasajeros de un vuelo determinado abordan la aeronave, acomodan su equipaje en los compartimentos correspondientes, si llevan, y ocupan un asiento. Así pues, se considera tiempo total de embarque aquel comprendido entre el instante en que el primer pasajero aborda la nave y el último ocupa su asiento dentro de la nave.

Estudios previos que se han llevado a cabo sobre este tema, calculan que la reducción del tiempo del proceso de embarque de una aeronave conlleva un ahorro en coste de 30 USD/minuto. Por lo tanto, la disminución de un minuto en el proceso de embarque de cada vuelo en una aerolínea que opera 500 vuelos al día supondría una reducción anual en costes de 5.475.000 USD (Nyquist et al. 2008).

1.2.1 Estrategias de embarque

Existen diferentes técnicas de embarque que han sido estudiadas e implementadas por diferentes compañías. Cada una de estas técnicas pretende definir el orden óptimo en el cual deben embarcar los pasajeros en la aeronave, con la finalidad de que se lleve a cabo este proceso en el menor tiempo posible. La utilización de una técnica u otra viene

determinada por diferentes elementos, los más destacables son el tipo de aeronave³ y las puertas disponibles, relacionados estrechamente con la cultura de la compañía y el nivel de servicio que ofrecen.

A continuación se explicarán las técnicas de embarque más utilizadas actualmente, con especial énfasis en la técnica de embarque por bloques, objeto de estudio de este proyecto.

Las estrategias más utilizadas por las compañías aéreas son las siguientes:

- **Back-to-front:**

Es la estrategia más utilizada por la mayoría de las compañías debido a su facilidad de implementación, además permite que pasajeros que viajan en grupo puedan sentarse juntos. Esta técnica de embarque, como bien indica su nombre, consisten en embarcar a los pasajeros de atrás hacia adelante, teniendo en cuenta siempre que los pasajeros de primera clase embarcan primero. Ejemplos de compañías que implementan esta estrategia de embarque son Continental Airlines, Air Canada, British Airways y Virgin Atlantic.

1	2	3	4	5	6	175	176	177	178	179	180
7	8	9	10	11	12	169	170	171	172	173	174
13	14	15	16	17	18	163	164	165	166	167	168
19	20	21	22	23	24	157	158	159	160	161	162
						151	152	153	154	155	156
						145	146	147	148	149	150
						139	140	141	142	143	144
						133	134	135	136	137	138
						127	128	129	130	131	132
						121	122	123	124	125	126
						115	116	117	118	119	120
						109	110	111	112	113	114
						103	104	105	106	107	108
						97	98	99	100	101	102
						91	92	93	94	95	96
						85	86	87	88	89	90
						79	80	81	82	83	84
						73	74	75	76	77	78
						67	68	69	70	71	72
						61	62	63	64	65	66
						55	56	57	58	59	60
						49	50	51	52	53	54
						43	44	45	46	47	48
						37	38	39	40	41	42
						31	32	33	34	35	36
						25	26	27	28	29	30

Figura 3: Estrategia *Back-to-front*

- **Front-to-back:**

De forma inversa a la estrategia *Back-to-front*, la estrategia *Front-to-back* consiste en embarcar a los pasajeros por orden de fila ascendiente, teniendo en cuenta también que los pasajeros de primera clase embarcan primero.

³ *Narrow body or wide body.*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 4: Estrategia *Front-to-back*

- ***Outside-Inside (WilMA):***

Esta estrategia de embarque, conocida también como estrategia WilMA (*window-middle-aisle*), consiste en embarcar primero a los pasajeros de primera clase, luego a los pasajeros con asiento asignado al lado de la ventana, luego a los que ocuparán los asientos centrales y finalmente a los que tienen asignado los asientos que dan al pasillo del avión. Esta estrategia persigue reducir las interferencias entre los pasajeros que se producen en otras técnicas de embarque y conseguir un embarque más rápido. Sin embargo, se implementa con menor frecuencia porque obliga a los grupos de pasajeros que viajan juntos a embarcar por separado y en diferentes momentos. United Airlines es una de las aerolíneas que embarca a los pasajeros siguiendo esta estrategia.

1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4						
1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4												
1	1	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4																		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4

Figura 5: Estrategia WilMA

- ***Bloques - rotating zone:***

El presente proyecto se centra en estudiar la técnica de embarque por bloques, también llamado en algunos estudios como técnica de *rotating zone*. Esta estrategia consiste en embarcar a los pasajeros por bloques, embarcando primero el bloque de la parte

delantera del avión, en el cual se encuentran los pasajeros que ocuparán los asientos de primera clase, luego los de la parte trasera y otra vez delantera, embarcando por último los de la zona central. Delta Airlines es una de las aerolíneas que pone en práctica esta estrategia de embarque.

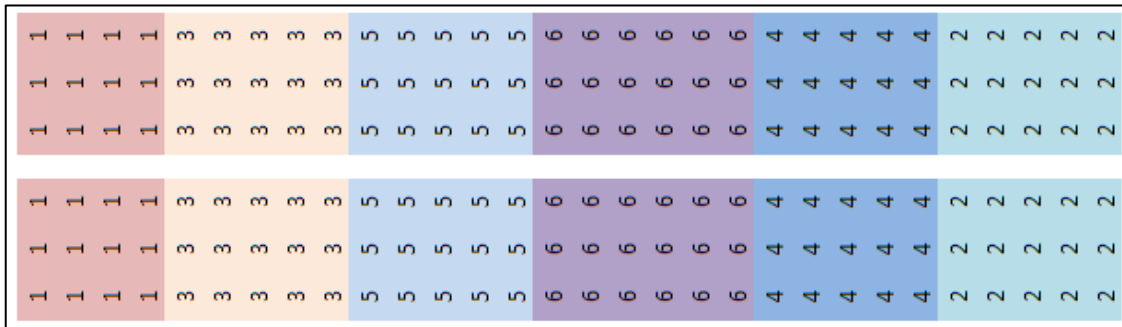


Figura 6: Estrategia por bloques

- **Random o aleatoria:**

Otra de las estrategias que se suele implementar es la estrategia *random* o aleatoria, consiste en embarcar primero a los pasajeros de primera clase y luego al resto de pasajeros sin ningún orden determinado, ya que como todos tienen un asiento asignado previamente, cada uno ocupará el asiento que le corresponde. Este detalle es el que diferencia la estrategia *random* con la estrategia de embarque de pasajeros sin asiento asignado. Northwest Airlines es un ejemplo de aerolínea que implementa esta estrategia de embarque de pasajeros.

- **Asiento sin asignar:**

Es la estrategia que consiste en embarcar a los pasajeros y se vayan sentando donde quieran, ya que no tienen asiento asignado previamente. Pero este hecho puede provocar que grupos de pasajeros que viajan juntos deban sentarse separados si son los últimos en embarcar y no quedan asientos juntos. Ryanair utiliza esta técnica de embarque en sus aviones.

- **Estrategia piramidal inversa:**

Otra estrategia es la estrategia de embarque piramidal diseñada por Menkes Van den Briel en un estudio realizado el año 2005. Se considera una estrategia híbrida entre WilMA y *Back-to-front*, ya que consiste en embarcar primero a los pasajeros con asiento en la ventana, seguido por los de en medio y finalmente, los asientos del pasillo y siempre embarcando diagonalmente.

Diversos estudios coinciden en que esta estrategia es muy eficaz y permite obtener tiempos de embarque más bajos que con otras estrategias. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes es la complejidad que supone implementarla en la operativa real. Al igual que la estrategia WilMa, no tiene en cuenta las relaciones existentes entre los pasajeros, ya que pasajeros que viajan juntos y tienen asientos contiguos asignados tienen que separarse durante el proceso de embarque.

La única compañía que implementa esta estrategia es US Airways.

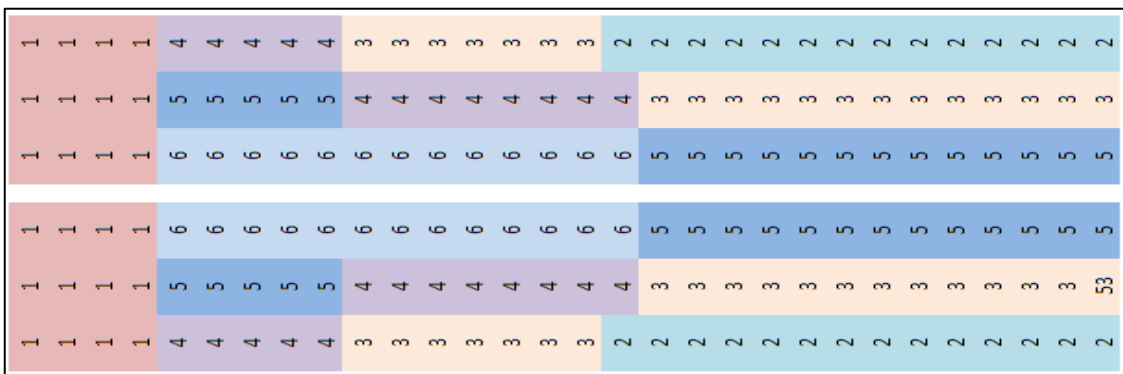


Figura 7: Estrategia piramidal inversa

- **Back-to-Front por bloques:**

Dejando de lado la teoría, en la realidad se implementan estrategias híbridas como la anterior comentada pero que resultan mucho menos complejas. Un ejemplo es el caso de la estrategia *Back-to-front*; resulta imposible ordenar a los pasajeros en la fila de embarque según la fila que le corresponda en la aeronave, por lo tanto, la estrategia *Back-to-front* por filas resulta muy difícil de implementar en la operativa real. La estrategia híbrida que si se implementa es la *Back-to-front* por bloques, que permite

embarcar zonas de la aeronave embarcando a los pasajeros por grupos en función de la fila de asiento que tengan asignado. Esta estrategia permite embarcar de atrás hacia adelante por bloques.

Vueling es una de las compañías aéreas que implementa esta estrategia de embarque de pasajeros híbrida.

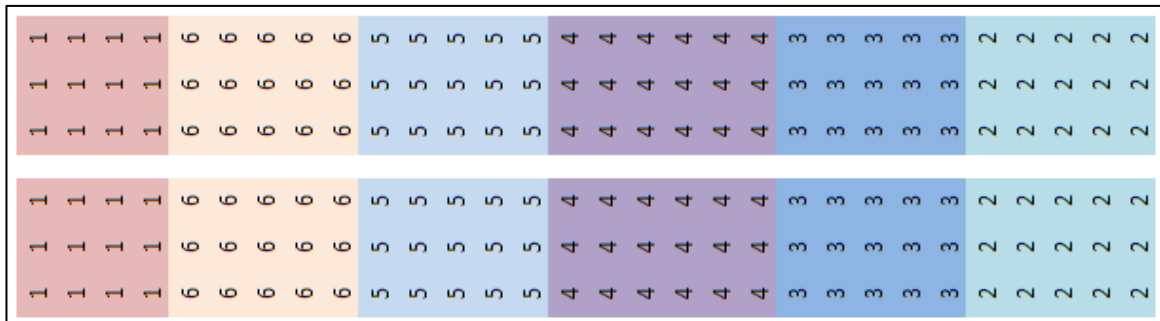


Figura 8: Estrategia *Back-to-front* por bloques

1.2.2 Conflictos en el embarque de pasajeros

Durante el proceso de embarque las limitaciones de espacio de la cabina de pasajeros dan lugar a interferencias entre los pasajeros a la hora de embarcar, estas interferencias o conflictos se reflejan en un retraso en el tiempo total de embarque. Un ejemplo claro de estos conflictos es aquel que se produce cuando un pasajero se encuentra obstaculizando el pasillo de la aeronave mientras coloca su equipaje de mano.

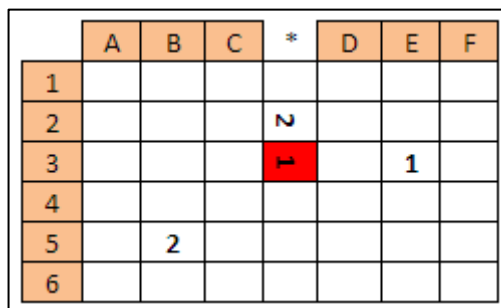


Figura 9: Conflicto de pasillo

En la figura anterior se muestra como el pasajero 2 que tiene asignado el asiento 2B se encuentra obstaculizado por el pasajero 1, que tiene asignado el asiento 1E y está

colocando su equipaje. El pasajero número 2 debe esperar que el pasajero número 1 deje libre el pasillo para poder llegar a la fila de su asiento asignado; esto implica un retraso en el tiempo de embarque del pasajero número 2.

1.2.3 Estrategia de embarque eficiente

Una vez conocemos las diferentes técnicas de embarque, los pros y los contras de cada una de ellas extraídos de estudios que las analizan, es posible determinar los factores que han de tenerse en cuenta para diseñar una estrategia de embarque eficiente que permita minimizar el tiempo total de embarque. Concretamente, los puntos clave a tener en cuenta para definir una estrategia eficiente son los siguientes:

- ✓ Minimizar el número total de conflictos en el pasillo originados por pasajeros que impiden a otros pasajeros acceder a su asiento asignado.

- ✓ Maximizar el nivel de actividad dentro de la cabina de la aeronave, es decir, que el máximo número de pasajeros posible lleven a cabo de forma simultánea la colocación del equipaje.

Esto permitirá lograr reducir el tiempo total del proceso de embarque.

A la hora de diseñar una estrategia de embarque eficiente, además de lo anterior mencionado, es importante tener en cuenta la capacidad de la aeronave, las relaciones existentes entre los pasajeros y las características de cada uno de ellos, como es el caso de que no todos los pasajeros se desplazan a la misma velocidad

1.3 Estudios previos

El problema del embarque de pasajeros en aeronaves ha sido foco de estudio en diversos estudios a lo largo de los últimos años. Este apartado consiste en una revisión de la literatura científica existente, resumiendo aquellos estudios más destacables y relacionados con el presente proyecto. Esto permitirá identificar posibles aplicaciones al presente estudio, así como posibles áreas de mejora.

En el año **1998**, **Malelli, Mattock y Merry** junto con el fabricante Boeing, llevaron a cabo una simulación de eventos discretos llamada Boeing Passenger Enplane Deplane Simulation (PEDS), con la finalidad de evaluar distintas estrategias de embarque en la cabina de un Boeing 757-200. Concluyeron que el tiempo total de embarque utilizando una única puerta y una estrategia de embarque tradicional (por filas o por bloques) era, aproximadamente, de 26 minutos. En cambio, utilizar dos puertas para llevar a cabo el embarque permitía reducir el tiempo total de éste a 21 minutos. Por otro lado, la implementación de la estrategia WilMa junto con la utilización de dos puertas, permitía reducir la duración del tiempo de embarque en 17 minutos.

Van Ladeghem y Beuselinck también determinaron que la estrategia de embarque más eficiente era aquella que embarca los pasajeros desde los asientos exteriores hacia los interiores, el tiempo del cual era aproximadamente 10,5 minutos. Además, determinaron que el principal causante de congestiones en la aeronave es el proceso de colocación del equipaje de mano. Este último hecho permite concluir que las estrategias de embarque más eficientes son aquellas que permiten que el mayor número de pasajeros posible depositen su equipaje de mano de manera simultánea.

Debido a las anteriores conclusiones, **Van de Brien** (2003-2005), con la colaboración de America West Airlines, llevó a cabo un estudio en el cual se pretendía diseñar una estrategia de embarque que disminuyese las interferencias causadas en la cabina de la aeronave, ya que reducir el número de estas interferencias durante el proceso de embarque reduciría el tiempo total de éste. El resultado fue el desarrollo de una nueva

estrategia de embarque llamada Reverse Pyramid, explicada anteriormente.

En el año 2007, **Inman, Jhones y Thompson** realizaron diversos estudios con ANOVA para determinar las diferencias significativas en los tiempos de duración de tres estrategias de embarque distintas (*Back-to-front*, *WilMa* y *Random*) con tres dimensiones distintas de aeronave. Concluyeron que independientemente de las dimensiones de la aeronave, existen diferencias significativas entre los tiempos de duración entre una estrategia y otra. Este hecho es importante ya que supone que, la eficiencia de cada estrategia respecto a otra se mantienen aunque varíen las dimensiones de la aeronave.

Audenaert (2009) utilizó un modelo de simulación basado en agentes múltiples para proponer estrategias de embarque robustas ante posibles perturbaciones y que además no perjudicaran la satisfacción de los pasajeros. Este estudio, a diferencia del resto, tenía en cuenta características individuales de los distintos tipos de pasajeros que formaban la simulación, como son: la velocidad a la que se desplazan por el pasillo y el número de piezas que forman su equipaje de mano. Otro punto importante es que cada estrategia fue evaluada siguiendo distintos factores de ocupación de la aeronave, con lo que concluyó que, si el factor de ocupación era mayor al 66%, el hecho de utilizar estrategias de embarque no aleatorias permitía mejorar de forma significativa el tiempo total de embarque.

Steffen y Hotchkiss (2011) realizaron una serie de pruebas con 75 pasajeros voluntarios para calcular su tiempo de embarque en un Boeing 757 siguiendo diferentes estrategias. Se evaluaron las siguientes estrategias de embarque: *Back-to-front*, por bloques, *WilMa* y *Random*. Steffen propuso una nueva estrategia que distribuye de forma homogénea la actividad en toda la cabina de la aeronave, permitiendo que diferentes pasajeros coloquen su equipaje de mano de manera simultánea, reduciendo así en número de interferencias entre ellos.

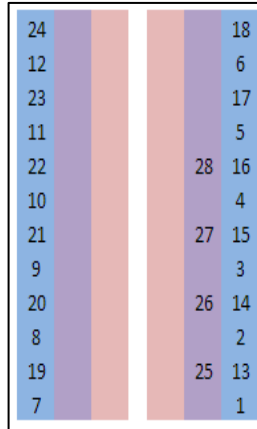


Figura 10: Estrategia de Steffen

Steffen demostró que su estrategia era la más eficiente, tal y como se puede observar en la siguiente figura en la que se muestran los tiempos extraídos en su estudio.

Method	Official Time
Back-Front	6:11
Blocks	6:54
Wilma	4:13
Steffen	3:36
Random	4:44

Figura 11: Tiempo de embarque de cada estrategia

1.4 Objetivos del proyecto

1.4.1 Objetivos generales

Para las compañías aéreas que operan vuelos nacionales o de corto y medio recorrido, un dato que refleja su eficiencia operativa es el número de saltos diarios que pueden llegar a hacer. Por lo tanto, les resulta de especial interés el problema de embarque de pasajeros en las aeronaves.

El tiempo de embarque determinará el tiempo total de escala en cada salto y este limitará el total de vuelos que se podrán realizar con un mismo avión en un día. Esto implica que la optimización del proceso de embarque es esencial para la operativa de las compañías *low-cost*. Por esta razón, el presente proyecto se centrará en estudiar las diferentes estrategias de embarque en aeronaves de un único pasillo, propias de compañías de corto y medio radio, como pueden ser el Airbus A320 y el Boing 737.

Hay varios estudios que han determinado las estrategias de embarque más eficientes para este tipo de aviones; las más aplicadas por las compañías de corto y medio recorrido son: *Back-to-front*, *Front-to-Back* WilMA (window-middle-aisle), por bloques y *Random*.

Tras analizar las técnicas de embarque nombradas anteriormente, se ha escogido como foco de estudio la estrategia de embarque por bloques. Ya que es una estrategia que tiene en cuenta la relación entre los pasajeros, y permite que pasajeros que viajan juntos y tienen asignados asientos contiguos puedan embarcar juntos, cosa que otras estrategias no contemplan.

El objetivo del proyecto, por tanto, consiste en determinar el número de bloques óptimo para aplicar esta estrategia, cuántos pasajeros componen cada bloque, así como el orden en el que deben embarcar los distintos bloques para que el tiempo de embarque se reduzca al mínimo posible. Para ello, se desarrollará en el software de simulación Simio un modelo que represente el procedimiento de embarque por bloques en aviones de un solo pasillo utilizando una sola puerta de embarque y se evaluarán los resultados obtenidos con la finalidad de que dicho estudio pueda servir de ayuda en la toma de decisiones futuras.

1.4.2 Objetivos específicos

Para poder alcanzar los objetivos generales del proyecto, es necesario definir una serie de objetivos específicos que permitirán determinar el número óptimo de bloques de pasajeros, la composición de estos y su orden de embarque en la aeronave. A continuación se especifican los objetivos específicos del proyecto:

- Identificar y analizar las diferentes estrategias de embarque existentes en la actualidad, estudiar su eficiencia y cómo se aplican.
- Seleccionar y estudiar aquellas estrategias de embarque que utilizan las compañías *low-cost* y que se consideren más interesantes para evaluar su eficiencia.
- Profundizar en aquellas estrategias que utilizan bloques de pasajeros para realizar el embarque en la aeronave. Analizar los estudios que se centran en este tipo de técnica que embarque.
- Analizar cuáles son los factores que influyen en el tiempo total de embarque e identificar los atributos de los pasajeros que se tendrán en cuenta a la hora de implementar la resolución del problema y del modelo de simulación.
- Definir y diseñar la estrategia de resolución del problema, obtener los datos e *inputs* necesarios. Establecer los distintos escenarios en los cuales se llevara a cabo la simulación
- Implementar el modelo a resolver con el programa de simulación SIMIO.
- Análisis de los resultados obtenidos en cada simulación.
- Extraer conclusiones a partir del resultado de la solución obtenida e incluir posibles mejoras.

1.5 Riesgos del proyecto

1.5.1 Evaluación de los riesgos

A continuación se enumeran una serie de riesgos asociados al proyecto.

- ✓ Riesgo 1. Las tareas planificadas no se llevan a cabo dentro del periodo establecido, lo que se reflejaría en un consecuente retraso en el proyecto.
- ✓ Riesgo 2. No cumplir con alguno de los objetivos o tareas por algún motivo.
- ✓ Riesgo 3. Elegir erróneamente el software que se emplear para la realización del proyecto.
- ✓ Riesgo 4. Falta de información que puede provocar un retraso en la realización del proyecto o disminuir la calidad del mismo.
- ✓ Riesgo 5. Realización incorrecta de la simulación.
- ✓ Riesgo 6. Abandono del proyecto antes de su finalización por no ser capaz de realizar la simulación, con el consecuente abandono del proyecto.

1.5.2 Catalogación de los riesgos

Los riesgos anteriores se han clasificado de acuerdo a la probabilidad de que se cumplan y en tal caso, el impacto que generaría este en el proyecto.

RIESGO	PROBABILIDAD	IMPACTO
R1	Media	Alto
R2	Media	Alto
R3	Bajo	Alto
R4	Media	Crítico
R5	Media	Crítico
R6	Baja	Crítico

Tabla 1: Catalogación de riesgos

1.5.3 Plan de contingencia

Se ha realizado un plan de contingencia para prevenir que se cumplan los riesgos anteriormente comentados, o intentar que su impacto afecte lo menos posible a la realización exitosa del proyecto.

Riesgo	Solución
R1	Incrementar el número de horas dedicadas al proyecto.
R2	Dedicar tiempo y recursos modificando la planificación.
R3	Modificar la planificación de forma que con el software correcto se pueda desarrollar el proyecto.
R4	Lograr la mejor calidad posible con la información de la que se dispone.
R5	Trabajar con intervalos de tiempo en las simulaciones.
R6	Buscar asesoramiento.

Tabla 2: Contingencias

1.6 Planificación temporal del trabajo

En la siguiente tabla se muestran las tareas que se le llevarán a cabo en el proyecto, así como la duración de estas y las fechas estimadas de inicio y fin.

Tareas	Inicio	Finalización
Informe previo	15-oct-16	11-nov-16
1. Interés y motivación	15-oct-16	20-oct-16
2. Objetivos del proyecto	18-oct-16	21-oct-16
2.1 Objetivos generales	18-oct-16	20-oct-16
2.2 Objetivos específicos	19-oct-16	21-oct-16
3. Introducción al estado del arte del tema propuesto	22-oct-16	02-nov-16
4. Estudio de viabilidad del proyecto	30-oct-16	05-nov-16
5. Planificación temporal del trabajo	15-oct-16	09-nov-16
6. Referencias bibliográficas	15-oct-16	09-nov-16
Memoria del trabajo: 1ra versión	08-nov-16	02-dic-16
7. Ampliación del estado del arte	08-nov-16	17-nov-16
7.1 Búsqueda y análisis sobre estudios anteriores	08-nov-16	15-nov-16
7.2 Búsqueda y análisis de estrategias de embarque	08-nov-16	17-nov-16
7.3 Seleccionar aquellos datos relevantes que tengan relación con la estrategia de bloques	18-nov-16	25-nov-16
8. Análisis sobre factories causantes de retrasos en el proceso de embarque de PAX	23-nov-16	30-nov-16
8.1 Búsqueda de información	23-nov-16	26-nov-16
8.2 Explicación sobre los diferentes factores	26-nov-16	30-nov-16
9. Ampliación de las referencias bibliográficas	08-nov-16	30-nov-16
Modelización y simulación	01-dic-16	28-ene-17
10. Definición del modelo conceptual y los escenarios a simular	01-dic-16	10-dic-16
11. Implementación del modelo y los diferentes escenarios	10-dic-16	23-dic-16
11.1 Modelado de inputs del modelo	10-dic-16	27-dic-16
12. Ejecución de la simulación	27-dic-16	15-ene-17
13. Recopilación de los datos obtenidos en la simulación	27-dic-16	20-ene-17
14. Análisis de los datos de cada escenario	30-dic-16	25-ene-17
15. Conclusiones de cada escenario	30-dic-16	28-ene-17
Memoria del trabajo: 2nda versión	28-ene-17	04-feb-17
Revisión y corrección de la memoria	28-ene-17	04-feb-17
Entrega de la memoria final	06-feb-17	06-feb-17

Figura 12: Tabla de las tareas que componen el proyecto, su duración, fecha de inicio y fin

Sección 2: Modelización del modelo

2.1 Introducción

El objetivo de este trabajo consiste en realizar una simulación del embarque de pasajeros en una aeronave de un solo pasillo, por ello cabe destacar algunos conceptos importantes sobre simulación y más concretamente sobre el software con el que se llevara a cabo dicho estudio: Simio.

Se define «simulación» como la investigación de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos. Un modelo es una representación lo más simplificada posible de las dinámicas internas del sistema, que permita entender, explicar, cambiar y prever y posiblemente controlar el comportamiento del sistema. Más concretamente, la simulación digital es una técnica que permite emular en un ordenador, el comportamiento de un sistema a partir de un conjunto de situaciones determinadas por el contexto en el que se sitúa el sistema.

Las ventajas de la simulación digital son las siguientes:

- Permite aumentar el conocimiento sobre la dinámica del proceso que se está estudiando.
- Permite prever comportamientos del sistema en diferentes situaciones en las que cualquier decisión puede tener grandes repercusiones económicas.
- Permite evaluar la sensibilidad de los parámetros del sistema.
- Puede contribuir a mejorar el comportamiento del sistema.
- Permite explorar aquellas situaciones en las que la experimentación con el sistema puede ser peligrosa, problemática, cara o prácticamente imposible.

Dennis Pedgen y **David Sturrock** desarrollaron el software de simulación más utilizado en el mercado actualmente, Arena. Posteriormente vendieron la marca y presentaron una nueva alternativa de simulación orientada a objeto, llamada Simio (Simulación basada en Objeto Inteligente), que es el software escogido para llevar a cabo este proyecto.

Simio ofrece las siguientes ventajas:

- La capacidad de definir y personalizar objetos utilizando lógica de procesos en lugar de código, lo que permite que usuarios sin conocimientos de programación puedan controlar los diferentes objetos de la simulación.
- Un paradigma que permite que objetos que fueron diseñados de manera independiente tengan interacciones complejas entre ellos.
- La opción de realizar simulación orientada a objeto, a proceso, de evento discreto, continuo y basado en agente, y combinarlas en un solo modelo.
- Animación en 3D automática de los modelos para lograr un mayor impacto en la presentación.

En Simio los modelos se construyen típicamente basados en una orientación a objeto. Se insertan objetos en la ventana "Facility" (instalación) y se conectan en un ambiente en 3D. En la ventana "Proceso" se define la lógica en forma de diagramas similares a los de Arena. Los objetos definen tanto la lógica como la animación del modelo, construyéndose ambos aspectos en un solo paso.

2.2 Teoría del modelo

Para la realización del modelo de simulación que se propone, se trabajará con tres componentes claves fundamentales para simular un embarque, el avión, los pasajeros y los movimientos que realizan los pasajeros dentro de un avión cuando embarcan. En este capítulo se explica toda la parte teórica de estos factores fundamentales.

2.2.1 Avión

El fuselaje es el cuerpo estructural del avión, que aloja a los pasajeros y carga, junto con los sistemas y equipos que dirigen el avión. Se considera la parte central de la aeronave porque a ella se acoplan directa o indirectamente el resto de partes que componen el avión, como las superficies aerodinámicas (las alas), el tren de aterrizaje y el grupo motopropulsor. En aviones monomotores, el fuselaje contiene al grupo motopropulsor, la cabina del piloto sirve también de soporte a las alas y estabilizadores; y lleva el tren de aterrizaje. En aviones multimotores, el fuselaje no contiene al grupo motopropulsor; los motores van dispuestos en barquillas o mástiles, sobre o bajo las alas, o en la cola.

La forma del fuselaje obedece a una solución de compromiso entre una geometría suave con poca resistencia aerodinámica y ciertas necesidades de volumen o capacidad para poder cumplir con sus objetivos. Así pues, el fuselaje puede variar en función de las tareas que el avión va a desempeñar. Un avión comercial busca un promedio entre volumen para carga y pasajeros, y aerodinámica.

En aviones comerciales la sección recta del fuselaje tiende a ser circular para aliviar las cargas de presurización de la cabina, ya que de esta forma la presión se reparte de igual manera por todo el interior. Gran parte del volumen está dedicado a la cabina de pasajeros cuya disposición variará según diversos factores (duración del vuelo, política de la aerolínea, salidas de emergencia...). La mercancía o carga se suele albergar en las bodegas del avión situadas en la parte inferior del avión. En aviones exclusivamente cargueros, la forma del fuselaje depende de la carga que se vaya a transportar y se

acomoda en función de la mercancía y su salida/entrada de la aeronave, disponiendo en el fuselaje de puertas o accesos especiales para la carga y descarga.

En función del fuselaje, se distingue entre aviones de fuselaje estrecho y aviones de fuselaje ancho, a continuación se definen los dos tipos.

Un avión de fuselaje estrecho o avión de pasillo único tiene un diámetro de fuselaje en cabina, normalmente, de 3 a 4 metros con los asientos dispuestos en filas de 2 a 6 con un único pasillo central. Los aviones de fuselaje estrecho, debido a la autonomía de la que disponen, no pueden realizar vuelos transatlánticos o intercontinentales, por lo que son comúnmente conocidos como aviones regionales o de corto/medio radio.

Los aviones de fuselaje ancho, son aviones de pasajeros más grandes y por lo general están configurados con asientos para distintas clases de pasajero, con un diámetro del fuselaje de 5 a 7 metros y pasillos individuales. Los pasajeros normalmente se acomodan en asientos de 7 a 10 filas.

Como comparación, los aviones de fuselaje ancho típicos pueden alojar de 200 a 600 pasajeros, mientras que actualmente el avión de fuselaje estrecho más grande en servicio lleva a un máximo de 250-275.

✓ Modelo avión propuesto:

Anteriormente se han descrito algunos conceptos aeronáuticos necesarios para entender este proyecto. A continuación se detalla el modelo de avión propuesto para la realización de las simulaciones pertinentes. En este caso, se trata de un avión comercial de transporte de pasajeros de fuselaje estrecho, es decir, de un solo pasillo del fabricante europeo Airbus, el Airbus A320 en su versión 200 y configuración de 180 asientos.

Se ha escogido un avión de la compañía Vueling para realizar la simulación, la matrícula de dicho avión es EC-LVB un A320-214, de motor B4 *Wingtips*⁴.

⁴ Son dispositivos aerodinámicos utilizados en los extremos de las alas.

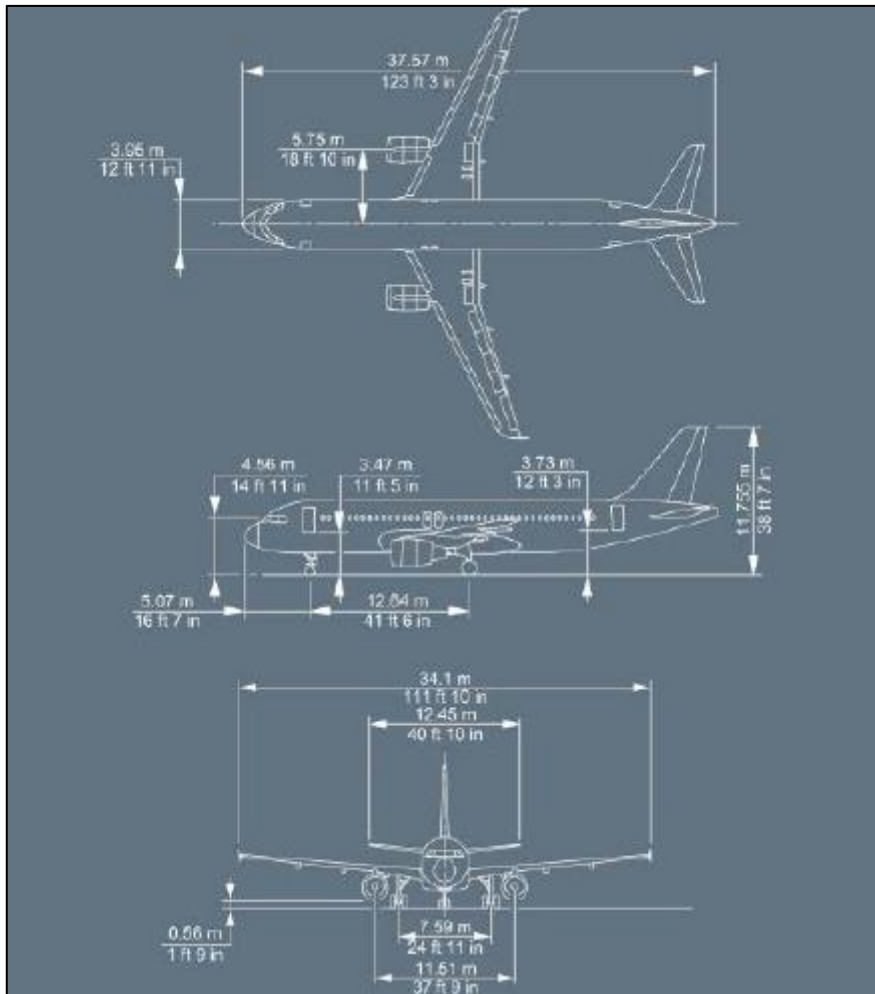


Figura 13: Dimensiones del A320 EC-LVB

- Configuración de los asientos: 180Y.

Hay 6 asientos por fila, 3-3 en cada columna. Se compone de 30 filas (la fila numero 13 no existe, por lo que están numeradas hasta la 31).



Figura 14: Esquema de los asientos del A320 con configuración 180Y

Hay un asiento para cada persona mayor de 2 años y, está equipado con un cinturón de seguridad. No se permite el transporte de carga o de correo en los asientos.

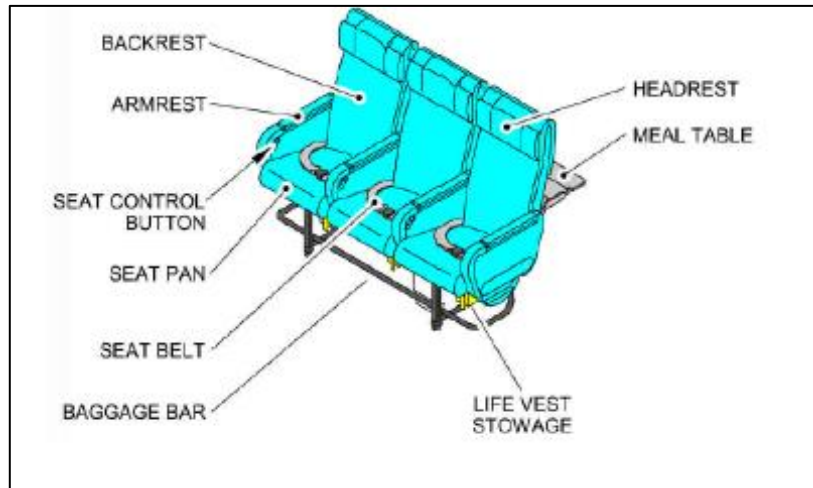


Figura 15: Asientos y sus elementos

- Composición de la tripulación: Standard 2/4
- Puertas de Cabina:
 - 4 salidas de emergencia tipo "I" de pasajeros/tripulación (2 en cada lado).
 - 4 salidas de emergencia tipo "III" (2 en cada lado)
 - Ventanas de emergencia en *cockpit* (1 en cada lado)
 - Puertas de acceso al compartimento de aviónica.

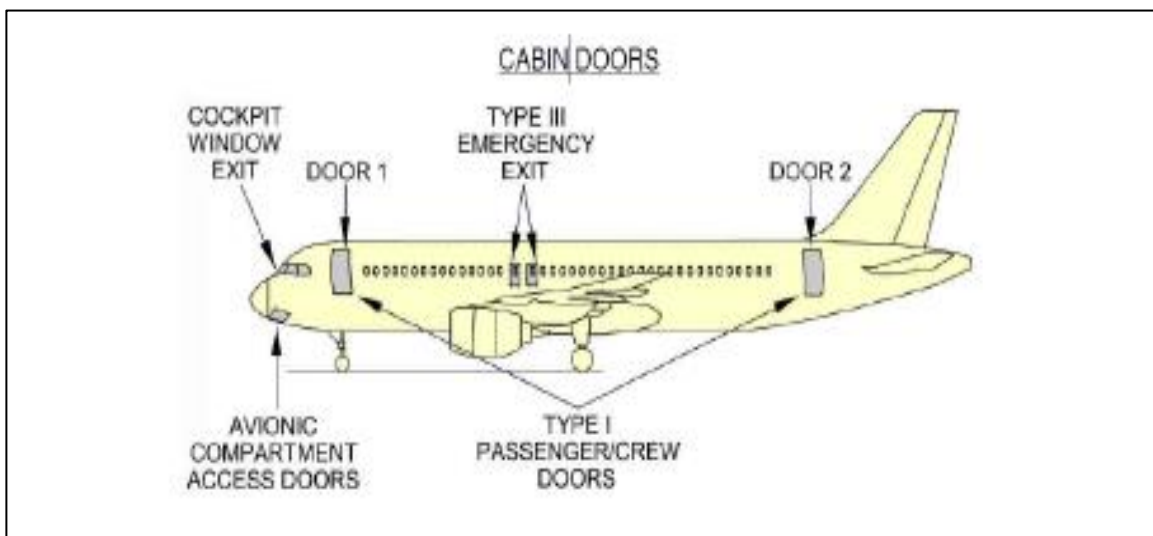


Figura 16: Puertas de cabina

2.2.2 Personas

Este capítulo se focaliza en el eslabón más importante en el cual se enmarca este estudio, en las personas, o en este caso más concretamente en las personas a bordo del avión, los pasajeros.

En los siguientes apartados se explica con mayor detalle lo referente al factor humano en vuelo y como se define en el software de simulación.

Con el fin de incrementar o mejorar la seguridad de las personas que viajan a bordo de una aeronave y del vuelo en sí, la normativa distingue entre diferentes tipos de pasajeros en función fundamentalmente de la capacidad de reacción individual en caso de ser necesaria una evacuación.

Generalmente, se pueden diferenciar tres grupos bien diferenciados, los pasajeros estándar, pasajeros con necesidades especiales y pasajeros con movilidad reducida. Se pueden considerar pasajeros estándar aquellos que no son pasajeros con movilidad reducida ni necesitan ningún tipo de atención especial por parte de la aerolínea o del servicio que puede proporcionar la entidad gestora del Aeropuerto correspondiente. A continuación se define a los pasajeros no estándar y algunas directrices que establece la normativa acerca de los mismos.

- ✓ Pasajeros con necesidades especiales

Se trata de pasajeros que sin ser personas con discapacidad ni enfermos, sí necesitan una cierta ayuda del personal de las compañías para sus trámites de salida o llegada, como puedan ser personas de avanzada edad, personas no acostumbradas a volar, etc.

Las ayudas requeridas a estas personas, en la mayoría de casos, las prestan las compañías sin obligación contractual y en la medida de lo posible dentro de las disponibilidades de personal en el momento de embarque y desembarque.

En este grupo también se contemplan los menores y embarazadas, en cada caso, tanto las compañías operadoras de los vuelos como el ente explotador del aeropuerto están obligadas a cumplir con la normativa en vigor correspondiente.

Infantes (bebés), se considera a los niños que no hayan cumplido 2 años en el momento de la fecha del vuelo, no tienen derecho a asiento, pero sí a la misma franquicia de equipaje que los pasajeros.

Menor, se considera a aquellas personas entre 2 y 12 años sin cumplir. Tienen derecho a asiento y franquicia de equipaje. Las aerolíneas no tienen ninguna restricción sobre el número de menores a bordo, la única restricción es que no pueden viajar en asientos que sean salidas de emergencia.

Especial atención se requiere en el caso de menores que no vayan acompañados, cada aerolínea utiliza sus propias políticas y recursos, aunque siempre dentro de lo establecido por la normativa.

Dependiendo del número de menores, la normativa exige un determinado número de acompañantes. La siguiente tabla muestra la relación entre menores entre 5 años y 12 sin cumplir y acompañantes mínimos mayores de edad.

Hasta 23 menores 1 acompañante
Entre 24-35 menores 2 acompañantes
Entre 36-47 menores 3 acompañantes

Tabla 3: Número de menores por acompañante

Embarazadas, al cumplir 28 semanas de gestación (calculadas usando la fecha estimada de alumbramiento), la pasajera deberá presentar certificado médico expedido por su médico en los últimos 7 días previos a la fecha del vuelo, confirmando la conveniencia a volar.

Las compañías no aceptan en sus vuelos a mujeres en estado más allá de las 36 semanas de gestación. No obstante, si la mujer necesita viajar en esas fechas deberá consultar obligatoriamente a su médico, quien decidirá sobre la conveniencia o no de volar.

Después del parto, las mujeres podrán volar pasado una semana del mismo.

Enfermos, son aquellos pasajeros cuya condición física o mental es tal que requieren una atención especial por parte del transportista. Para ser aceptado al vuelo, es condición indispensable presentar un certificado médico que establezca que el enfermo está en condiciones de viajar. Asimismo deberá firmar un descargo de responsabilidad antes de embarcar.

✓ Pasajeros con movilidad reducida

Se considera persona con discapacidad o movilidad reducida a toda persona cuya movilidad para utilizar el transporte se halle reducida por motivos de discapacidad física (sensorial o locomotriz, permanente o temporal), discapacidad o deficiencia intelectual, o cualquier otra causa de discapacidad, o por la edad, y cuya situación requiera una atención adecuada y la adaptación a sus necesidades particulares del servicio puesto a disposición de los demás pasajeros.

La normativa considera que estos pasajeros no podrán ocupar los asientos situados junto a las salidas de emergencia.

✓ Acompañante capacitado

No se exige Acompañante Capacitado a cualquier persona auto-suficiente capaz de asistirse a sí misma en su propia evacuación de la aeronave. En la práctica, se considera auto-suficiente cualquier pasajero que sea capaz de desabrocharse el cinturón de seguridad, abandonar su asiento, alcanzar una salida de emergencia sin ayuda, obtener y ajustarse un chaleco salvavidas, ponerse una mascarilla de oxígeno sin asistencia y, capaz de entender las instrucciones de seguridad y, cualquier asesoramiento o instrucción proporcionada por la tripulación en una situación de emergencia (incluyendo información comunicada en los formatos accesibles).

Un acompañante capacitado será cualquier persona mayor de 12 años en vuelos domésticos o 15 años en vuelos internacionales que esté dispuesta y sea capaz de asistir físicamente al pasajero con movilidad reducida en caso de emergencia o para entender y aplicar las instrucciones de seguridad.

La normativa también establece que un ciego podrá volar con su perro lazarillo, el cual viajará en cabina con él aun cuando supere los 8 kg de peso. Dicho perro deberá viajar con bozal y con cartilla de vacunaciones en regla.

Para que el modelo sea lo más realista posible se ha escogido la configuración de pasajeros siguiente, la cual contempla hombres y mujeres mayores de 50 años, hombre y mujeres menores de 60, infantes (I) y pasajeros con movilidad reducida (PMR).

- **Tipo 1:** Hombre < 50 años
- **Tipo 2:** Hombre > 50 años
- **Tipo 3:** Mujer < 50 años
- **Tipo 4:** Mujer > 50 años
- **Tipo 5:** Infantes
- **Tipo 6:** Pasajeros de Movilidad Reducida PMR

2.2.3 Estimación de tiempos

Para cada tipo de pasajero se debe asignar una velocidad de desplazamiento por el cual se mueve a lo largo del pasillo.

Inicialmente, se parte de la base de dos tiempos estimados (Tabla 4) que conformará un intervalo para cada tipo de pasajero, a partir del cual se estima una velocidad de desplazamiento media.

NOTACIÓN	DEFINICIÓN
V_m	Velocidad mínima
V_r	Velocidad media
V_x	Velocidad máxima

Tabla 4: Velocidad estimada

Se ha recurrido a diversas fuentes de la red a partir de las cuales se concluye que el tiempo promedio en el cual una persona no atlética camina puede variar entre los 4 y 4,6 km/h. Así pues, se ha considerado dicho intervalo para las entidades de tipo 1 y 3. Como es obvio, la velocidad es menor en el caso de pasajeros de movilidad reducida (PMR), considerados en el modelo como entidades de tipo 6, en los niños como el tipo 5, y en los pasajeros mayores de 50 años, tipo 2 y 4. La siguiente tabla muestra los intervalos de velocidad asignados de desplazamiento a cada tipo de entidad.

	Desplazamiento (km/h)
Tipo1	(4 - 4,6)
Tipo2	(3,6 - 4,3)
Tipo3	(4 - 4,6)
Tipo4	(3,6 - 4,3)
Tipo5	(2 - 4)
Tipo6	(1 - 3,6)

Tabla 5: Relación tipo pasajero/velocidad de desplazamiento

2.2.4 Asignación de asientos de pasajeros

La asignación de asientos de pasajeros está restringida por la disposición del asiento y el tipo de pasajero. A continuación se explican las restricciones existentes en una compañía como Vueling.

Los siguientes pasajeros no podrán sentarse en OW⁵ ni salidas de emergencia:

1. Pasajeros menores de 15 años.
2. Pasajeros con discapacidad mental o física.
3. Pasajeros cuya vista u oído estén afectados al grado de no poder percatarse rápidamente de las instrucciones de la tripulación de cabina de pasajeros para iniciar la evacuación del avión (hupoacusia, invidencia).
4. Personas en custodia y aquellos en proceso de deportación.
5. Pasajeros cuyo tamaño corporal les impida moverse rápidamente (obesos).
6. Pasajeras embarazadas.
7. Ancianos y enfermos.
8. Pasajeros con PETs o perro lazarillo.

Está prohibida la ocupación múltiple de asientos a excepción de los casos en los que un bebe (infante) acompañe a un adulto. En este caso será necesario que la tripulación de cabina confirme previamente que el número de máscaras del sistema de oxígeno de presentación automática es de 4 por fila. Se recuerda que no se permite la asignación de un asiento de fila de OW ni salidas de emergencia a un bebé.

⁵ Salidas de emergencia sobre las alas.

2.2.5 Conflictos a tener en cuenta en la simulación

Como se ha comentado anteriormente, las interferencias entre los pasajeros en el pasillo de la aeronave, mientras colocan su equipaje de mano, repercuten de forma significativa negativamente en la duración total del proceso de embarque.

No obstante, hay otro tipo de interferencia que ocurren durante el embarque, aquel que se produce cuando un pasajero intenta acceder a su asiento pero ya hay un pasajero sentado en la misma fila en la que se encuentra su asiento, lo que obliga al pasajero ya sentado a levantarse para que el segundo pueda acceder a su asiento. Este tipo de interrupciones son consideradas interferencias por asiento.

Este último tipo de interferencia Steffen demuestra que no tienen una repercusión significativa en el tiempo total de embarque, ya que en muchos casos estas interferencias no repercuten en conflictos en el pasillo. Por ejemplo, si se está embarcando las primeras filas del avión, interferencias de asiento causadas en las últimas filas de la aeronave no tendrán efecto sobre el tiempo total de embarque.

Por esta razón, en la simulación llevada a cabo en el presente proyecto solo se tendrán en cuenta los conflictos entre los pasajeros en la aeronave, es decir, aquellos que se producen cuando un pasajero está colocando su equipaje de mano e impide a otros pasajeros avanzar por el pasillo de la aeronave.

2.3 Construcción del modelo en SIMIO

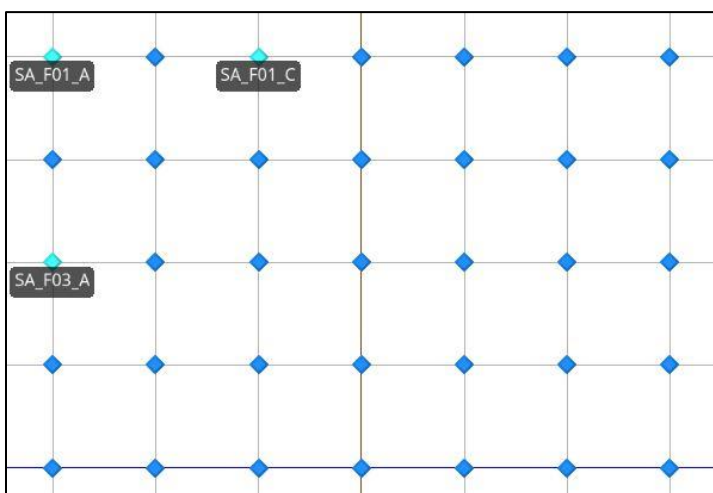
2.3.1 Introducción

Este apartado se detalla paso a paso las instrucciones más relevantes que se han seguido para la realización del modelo en el software de simulación SIMIO. Así como la creación del avión en dicho programa, la asignación de asientos y la modelización de los distintos escenarios (estrategias de embarque).

✓ 2.3.2 Avión

La Figura 17 muestra la disposición de la configuración de asientos del avión que se ha modelado. La cabina de pasajeros se encuentra dividida en 4 zonas (A, B, C, D) y cada una de las zonas tiene asignada unas filas determinadas. Cada asiento, tiene una nomenclatura distinta correspondiente a la sección, fila y butaca, con un total de 180 asientos.

Los asientos se representan a partir de un TransferNode con la nomenclatura correspondiente, las butacas son los únicos nodos no conectados con otros nodos en el modelo.



En la imagen podemos ver, por ejemplo, la butaca SA_F01_A que hace referencia al asiento de la Fila 1 en la columna A, y la butaca SA_F01_C que hace referencia al asiento de la Fila 1 de la columna C.

Figura 17: Nomenclatura de los asientos



Figura 18: Representación de lo entrada a la cabina y las filas

Para representar la fila en la que se ubican los asientos también se ha utilizado un TransferNode, estos sí que se encuentran unidos entre ellos con un Path para representar el pasillo de la aeronave, por el cual caminan las entidades hasta llegar a su asiento. El TransferNode1 representa la puerta de la aeronave por la que acceden los pasajeros.

Los Path que unen el TransferNode1 y el resto de TransferNode que representan las filas están definidos de forma que los pasajeros no pueden adelantarse unos a otros a lo largo del pasillo, a su vez se han representado tomando como referencia las dimensiones del avión, para que el pasillo por el cual circulan las entidades tenga la longitud real.

2.3.3 Pasajeros

Para realizar la simulación es necesaria la creación de los pasajeros, los cuales se representan con entidades.

Como se ha comentado en un apartado anterior, se ha escogido la configuración de pasajeros siguiente, la cual contempla hombres y mujeres mayores de 50 años, hombre y mujeres menores de 60, infantes (I) y pasajeros con movilidad reducida (PMR).

TIPO DE ENTIDADES		
ENTIDAD	GÉNERO/EDAD	OCUP. MAX
Tipo 1	H < 50	44%
Tipo 2	H > 50	3,50%
Tipo 3	M < 50	40%
Tipo 4	M > 50	1,50%
Tipo 5	I	10%
Tipo 6	PMR	2%

Tabla 6: Configuración de pasajeros utilizada en la simulación

GENERACIÓN ENTIDADES		
ENTIDAD	OCUPACIÓN	PAX
Tipo 1	44%	78
Tipo 2	3,50%	6
Tipo 3	40%	72
Tipo 4	1,50%	3
Tipo 5	10%	18
Tipo 6	2%	3
TOTAL	100%	180

Tabla 7: Total de entidades con ocupación del 100%

GENERACIÓN ENTIDADES		
ENTIDAD	OCUPACIÓN	PAX
Tipo 1	44%	63
Tipo 2	3,50%	5
Tipo 3	40%	58
Tipo 4	1,50%	2
Tipo 5	10%	14
Tipo 6	2%	2
TOTAL	80%	144

Tabla 8: Total de entidades con ocupación del 80%

Para la creación de entidades y la pertinente asignación de asientos a estos se tienen en cuenta las restricciones mencionadas anteriormente sobre las salidas de emergencia. La siguiente figura muestra las butacas que están en una salida de emergencia y que, no pueden ser ocupadas por pasajeros PRM y aquellas butacas en las que es preferible que vayan infantes.

Section	Row nº	ROW LETTER					
		A	B	C	* D	E	F
0A	1	V-X	V-X	V-X	V-X	V-X	V-X
	2	V	V	V	V	V	V
	3	V	V	V	V	V	V
	4	V	V	V	V	V	V
	5	I	I	I	.	.	.
	6	.	.	.	.	.	.
0B	7	I	I	I	.	.	.
	8	.	.	.	I	I	I
	9	.	.	.	.	.	.
	10	.	.	.	I	I	I
	11	I-X	I-X	I-X	X	X	X
	12	E-X	E-X	E-X	E-X	E-X	E-X
	14	E-X	E-X	E-X	E-X	E-X	E-X
15	X	X	X	I-X	I-X	I-X	
0C	16	I	I	I	.	.	.
	17	.	.	.	.	.	.
	18	I	I	I	.	.	.
	19	.	.	.	I	I	I
	20	.	.	.	.	.	.
	21	.	.	.	I	I	I
	22	I	I	I	.	.	.
	23	.	.	.	.	.	.
0D	24	I	I	I	.	.	.
	25	.	.	.	I	I	I
	26	.	.	.	.	.	.
	27	.	.	.	I	I	I
	28	I	I	I	.	.	.
	29	.	.	.	.	.	.
	30	I	I	I	.	.	.
31	X	X	X	X	X	X	

E = Emergency exit I = Infant preference rows/seats
 / = Seat without moving back * = Aisle
 V = Seat left vacant/offered last
 X = Forbidden for PRM passenger

Figura 19: Tipo de butacas del avión y leyenda

A partir de las restricciones anteriores se procede a crear las entidades con la ayuda de una hoja de Excel y la aplicación de macros en dicha hoja de cálculo.

GENERACIÓN ENTIDADES			PAX	BUTACAS
T. ENTIDAD	OCUPACIÓN	PAX	Tipo 1	SA_F01_A
Tipo 1	44%	78	Tipo 3	SA_F02_A
Tipo 2	3,50%	6	Tipo 3	SA_F03_A
Tipo 3	40%	72	Tipo 3	SA_F04_A
Tipo 4	1,50%	3	Tipo 3	SA_F05_A
Tipo 5	10%	18	Tipo 1	SA_F06_A
Tipo 6	2%	3	Tipo 3	SB_F07_A
TOTAL	100%	180	Tipo 1	SB_F08_A
	100%		Tipo 1	SB_F09_A
	80%		Tipo 3	SB_F10_A
			Tipo 1	SB_F11_A
			Tipo 1	SB_F12_A
			Tipo 1	SB_F14_A
			Tipo 1	SB_F15_A
COMPROBACION Nº PAX			Tipo 1	SC_F16_A
Tipo 1	78	CHECK OK	Tipo 3	SC_F17_A
Tipo 2	6	CHECK OK	Tipo 3	SC_F18_A
Tipo 3	72	CHECK OK	Tipo 3	SC_F19_A
Tipo 4	3	CHECK OK	Tipo 4	SC_F20_A
Tipo 5	18	CHECK OK		
Tipo 6	3	CHECK OK		

Crear PAX

Pintar

COMPLETAR

Figura 20: Hoja de creación de entidades de Excel

En la tabla **Generación Entidades** se puede seleccionar el porcentaje de capacidad de ocupación del avión (100% o 80%). A partir de esta tabla se crea el número de entidades de cada tipo de pasajeros.

El botón **Crear PAX** genera el número de entidades seleccionado y de forma aleatoria les asigna una butaca. A modo de ejemplo, en la figura anterior se ve como en el asiento SA_F01_A se ubicará un pasajero de Tipo 1. La tabla **Comprobación nº PAX** corrobora que efectivamente se creen el número deseado de pasajeros de cada tipo.

El botón **Pintar** colorea en rojo las casillas en las cuales hay un pasajero Tipo 6 a su vez que colorea en amarillo aquellas butacas que no pueden ser asignadas a pasajeros Tipo 6 (PMR) por estar en filas en las que se encuentra una salida de emergencia. Por lo tanto, no podemos encontrar nunca un pasajero Tipo 6 con una butaca asignada resaltada en amarillo. En la figura siguiente podemos ver un ejemplo.

Tipo 3	SB_F14_B	F14_B	Fila14
Tipo 5	SB_F15_B	F15_B	Fila15
Tipo 1	SC_F16_B	F16_B	Fila16
Tipo 6	SC_F17_B	F17_B	Fila17
Tipo 3	SC_F18_B	F18_B	Fila18
Tipo 5	SC_F19_B	F19_B	Fila19
Tipo 3	SC_F20_B	F20_B	Fila20
Tipo 6	SC_F21_B	F21_B	Fila21
Tipo 1	SC_F22_B	F22_B	Fila22

Figura 21: Pasajeros Tipo 6 y butacas prohibidas para pasajeros Tipo 6

El botón **Completar** copia los pasajeros generados con los asientos asignados en cada una de las hojas y se ordenan a su vez en estas de acuerdo a la prioridad de embarque de los pasajeros según el asiento que tengan asignado en cada política de embarque. En la figura siguiente la columna **Prioridad** indica el orden en la cual embarcan los pasajeros. La columna FILAS y FILA se explican más adelante.

PRIORIDAD	PAX	BUTACAS	FILAS	FILA						
									SA_F01_A	1
1	Tipo 1	SA_F01_A	F01_A	Fila1					SA_F01_B	2
7	Tipo 3	SA_F02_A	F02_A	Fila2					SA_F01_C	3
13	Tipo 3	SA_F03_A	F03_A	Fila3					SA_F01_D	4
19	Tipo 3	SA_F04_A	F04_A	Fila4					SA_F01_E	5
175	Tipo 3	SA_F05_A	F05_A	Fila5					SA_F01_F	6
169	Tipo 1	SA_F06_A	F06_A	Fila6					SA_F02_A	7
163	Tipo 3	SB_F07_A	F07_A	Fila7					SA_F02_B	8
157	Tipo 1	SB_F08_A	F08_A	Fila8					SA_F02_C	9
151	Tipo 1	SB_F09_A	F09_A	Fila9					SA_F02_D	10
145	Tipo 3	SB_F10_A	F10_A	Fila10					SA_F02_E	11
139	Tipo 1	SB_F11_A	F11_A	Fila11					SA_F02_F	12
133	Tipo 1	SB_F12_A	F12_A	Fila12					SA_F03_A	13
127	Tipo 1	SB_F14_A	F14_A	Fila14					SA_F03_B	14
121	Tipo 1	SB_F15_A	F15_A	Fila15					SA_F03_C	15
115	Tipo 1	SC_F16_A	F16_A	Fila16					SA_F03_D	16
109	Tipo 3	SC_F17_A	F17_A	Fila17					SA_F03_E	17
103	Tipo 3	SC_F18_A	F18_A	Fila18					SA_F03_F	18
97	Tipo 3	SC_F19_A	F19_A	Fila19					SA_F04_A	19

Figura 22: Política de embarque *Back-to-front*

2.3.4 Modelo en SIMIO

Seguidamente, las tablas de cada política de embarque se pueden importar a SIMIO mediante la opción de “Importar archivo”, pero antes se ha de crear la tabla llamada “Pax” dentro del software como se explica a continuación.

En la pestaña Data insertamos una tabla, la cual se llamará a partir de ahora “Pax”. Se procede a insertar 5 columnas.

- Una columna de Standard Property del tipo entero llamada “**Prioridad**”.

En la cual se inserta la primera columna que del Excel “Prioridad” que indica el orden en el cual han de embarcar las entidades.

- Una columna de Standard Property del tipo entero llamada “**Tipo Entidad**”.

En esta columna se insertan las entidades a crear, indicando el tipo de pasajeros de cada una de ellas.

- Una columna de Object Reference del tipo nodo llamada “**Asiento**”.

Esta columna servirá para insertar la butaca que ha sido asignada a cada pasajero.

- Una columna de Standard Property del tipo Sequence Table llamada “**Seq**”.

Se inserta la columna del Excel “Filas”, la cual hace referencia a las tablas de secuencia que se crearan para indicar a cada pasajero el camino que debe seguir para llegar a su asiento asignado.

- Una columna de Standard Property del tipo string llamada “Fila”.

La columna “Fila” indica en que fila se encuentra la butaca del pasajero, este dato servirá para indicarle a la entidad en que fila debe colocar su equipaje de mano.

Con estos pasos, los datos necesarios para la simulación quedan insertados tal y como se muestra en la Tabla 9.

	Prioridad	Tipo Entidad	Asiento	Seq	Filas
1	1	Tipo1	SA_F01_A	F01_A	Fila1
2	2	Tipo1	SA_F01_B	F01_B	Fila1
3	3	Tipo5	SA_F01_C	F01_C	Fila1
4	4	Tipo3	SA_F01_D	F01_D	Fila1
5	5	Tipo5	SA_F01_E	F01_E	Fila1
6	6	Tipo1	SA_F01_F	F01_F	Fila1
7	7	Tipo3	SA_F02_A	F02_A	Fila2
8	8	Tipo1	SA_F02_B	F02_B	Fila2
9	9	Tipo1	SA_F02_C	F02_C	Fila2
10	10	Tipo3	SA_F02_D	F02_D	Fila2
11	11	Tipo5	SA_F02_E	F02_E	Fila2
12	12	Tipo3	SA_F02_F	F02_F	Fila2
13	13	Tipo3	SA_F03_A	F03_A	Fila3
14	14	Tipo3	SA_F03_B	F03_B	Fila3
15	15	Tipo1	SA_F03_C	F03_C	Fila3

A continuación, en la misma pestaña Data se insertan tantas Sequence Table como asientos tiene el modelo, y en cada una de ellas se detallará el camino a seguir por el pasajero asignado a cada asiento. El pasajero que tiene asignado el asiento SB_F11_B deberá seguir el camino de la tabla de secuencia F11_B que se muestra a continuación.

Tabla 9: Tabla Pax en SIMIO

F10_F	F11_A	F11_B	F11_C
	Sequence		
1	Fila1		
2	Fila2		
3	Fila3		
4	Fila4		
5	Fila5		
6	Fila6		
7	Fila7		
8	Fila8		
9	Fila9		
10	Fila10		
11	Fila11		
▶ 12	SB_F11_B		

Este pasajero debe pasar de TransferNode en TransferNode hasta llegar al TransferNode llamado Fila11, y una vez en él dirigirse a su asiento. Esta secuencia se asigna a cada ModelEntity en la pestaña Routing Logic.

Tabla 10: Sequence Table del asiento SB_F11_B

En el objeto ModelEntity hay que definir las columnas de la tabla como atributos de cada entidad. Para ello, en la opción States de la ventana Definitions se crean dichos atributos como variables del modelo:

- **Tipo:** Integer State Variable. Hace referencia al tipo de entidad que es cada

pasajero.

- **Asiento:** Node Reference State Variable. Hace referencia al asiento asignado de cada pasajero.
- **Prioridad:** Integer State Variable. Hace referencia al orden en el cual deben embarcar los pasajeros.
- **Filas:** Node Reference State Variable. Hace referencia a la fila en la cual se encuentra el asiento asignado al pasajero. Esta variable permitirá indicar al modelo donde debe colocar el pasajero su equipaje de mano.

Para la velocidad de desplazamiento no es necesario declarar ninguna variable en estados, ya que se asignará a Desired speed, que es un estado que ya incorpora el programa, mediante la función `Random.Uniform()`.



Figura 23: Los 6 tipos de entidades a crear

Properties: Tipo1 (ModelEntity)	
<input type="checkbox"/> Show Commonly Used Properties Only	
[-] Travel Logic	
[-] Initial Desired Speed	Random.uniform(4,4.6)
Units	Kilometers per Hour
Initial Travel Mode	Network Only
Initial Network	Global
Network Turnaround Method	Rotate In Place
Free Space Steering Behavior	Direct To Destination
[-] Routing Logic	
Initial Priority	1.0
Initial Sequence	Pax[Fila].Seq

Figura 24: Propiedades de la entidad Tipo 1

Para crear los distintos tipos de pasajeros se inserta un *Source* llamado “**Llegada**”, el cual crea entidades de tipo **Pax.TipoEntidad**, mediante la tabla Pax y la fila de dicha tabla se incrementa cada vez que se crea una entidad. Cada vez que se crea una entidad se le pasa a sus variables la información del asiento asignado, la fila en la que éste se encuentra y el orden en el que debe embarcar.

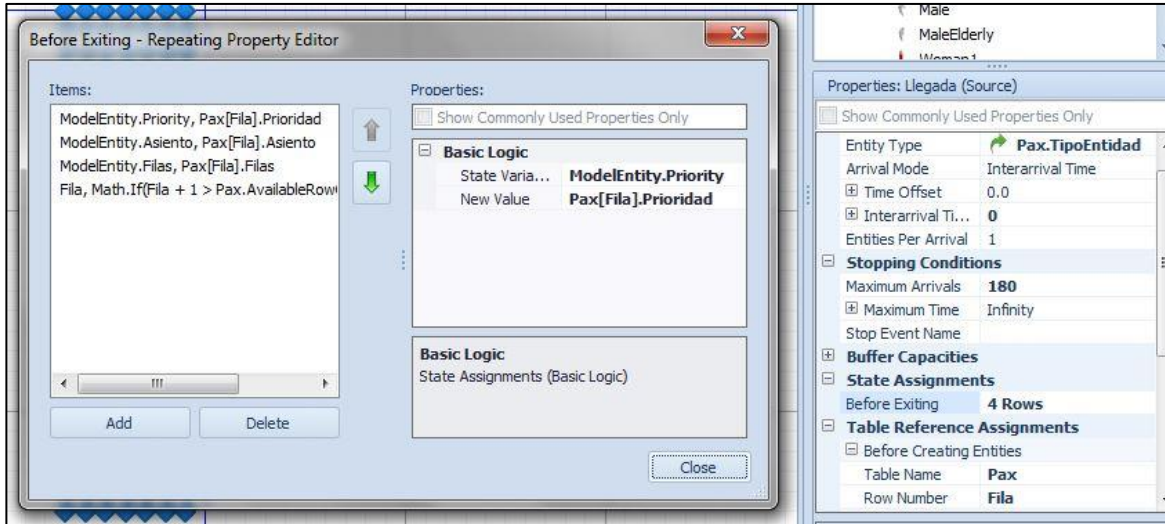


Figura 25: Propiedades del Source

Cada vez que se crea una entidad ésta se coloca en la **Station1** que se ha creado para representar el *Finger* a través del cual embarcan los pasajeros. Para ello se utiliza el proceso **IralFinger** que se ejecuta cada vez que crea una entidad nueva.

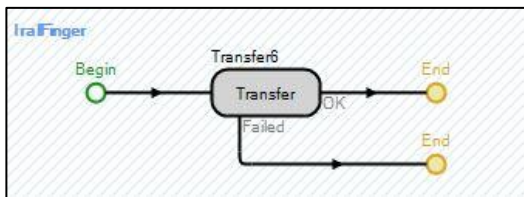


Figura 26: Proceso IralFinger

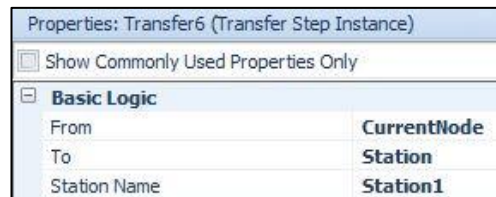


Figura 27: Propiedades del Transfer

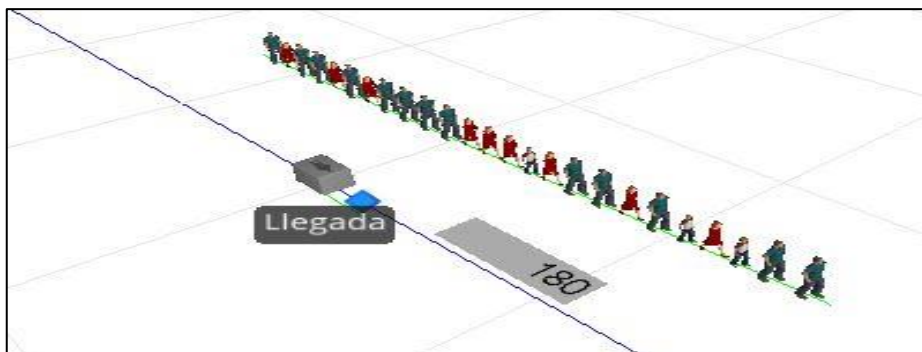


Figura 28: Pasajeros en el *Finger*, el contador muestra que se han creado las 180 entidades

Una vez creadas todas las entidades, el proceso **Contar** manda las entidades a la puerta el avión (TransferNode1) para que inicien el embarque de acuerdo a la prioridad de embarque asignada a cada pasajero.

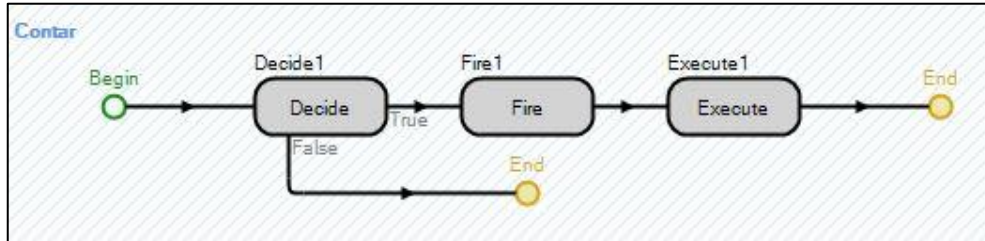


Figura 29: Proceso Contar

El proceso Contar se ejecuta cada vez que sale una entidad del *Source*, comprueba si se han creado las 180 entidades y si es así dispara el Evento **EntidadesCreadas** que ejecuta el proceso **Embarque1**, el cual manda la primera entidad al TransferNode1.



Figura 30: Decide que comprueba si se han creado las 180 entidades

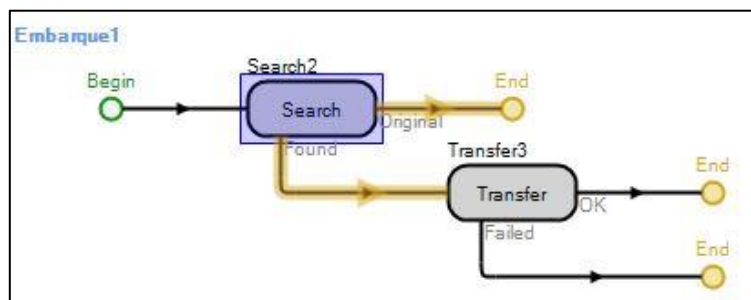


Figura 31: Proceso Embarque1

El **Search** selecciona el primer elemento de la Station1, y el **Transfer** lo mueve de la Station1 al TransferNode1.

Basic Logic	
Collection Type	QueueState
Queue State Name	Station1.Contents

Figura 32: Propiedades del Search

Basic Logic	
From	CurrentStation
To	Node
Node Name	TransferNode1

Figura 33: Propiedades del Transfer

Cada vez que sale una entidad del TransferNode1 se ejecuta el proceso **Contar2**, que tiene en cuenta la cantidad de entidades que se encuentran en el pasillo (Decide2). Si hay menos de 30 pasajeros y aún quedan entidades en la Station1 (Decide3), manda una nueva entidad al pasillo según el orden de embarque asignado a cada pasajero.

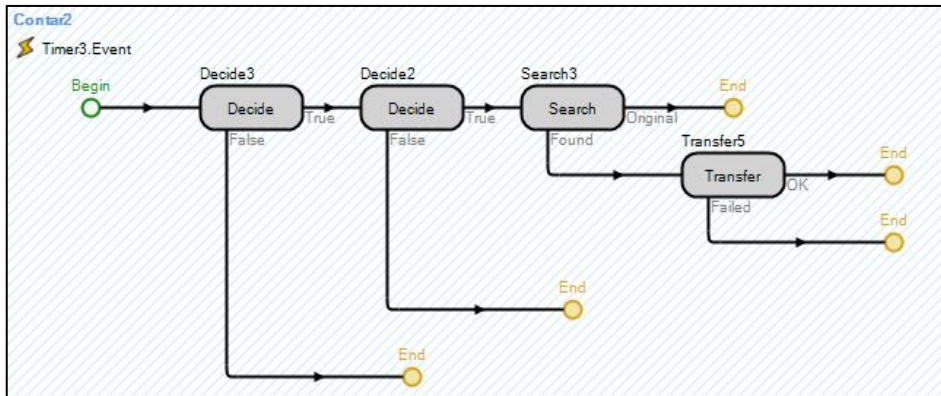


Figura 34: Proceso Contar2

Finalmente, el proceso **ColocarMaleta** se ejecuta cada vez que una entidad entra a los TransferNode que forman el pasillo. Si el nombre el nodo coincide con la fila en el que se encuentra el asiento asignado al pasajero que entra al nodo, se dispara un Delay que representa el tiempo que tarda un pasajero en colocar su equipaje de mano.

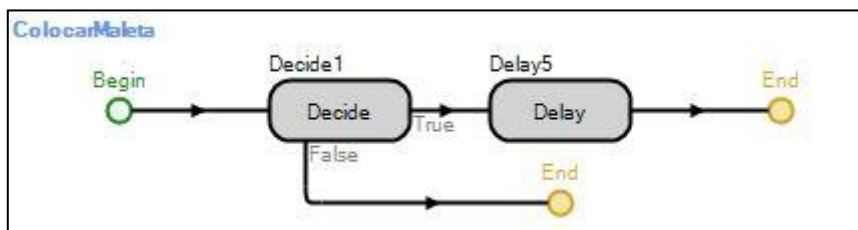


Figura 35: Proceso ColocarMaleta

Properties: Decide1 (Decide Step Instance)	
<input type="checkbox"/> Show Commonly Used Properties Only	
<ul style="list-style-type: none"> Basic Logic <ul style="list-style-type: none"> Decide Type: ConditionBased Condition Or Probability: Node.Name == ModelEntity.Filas Advanced Options General 	

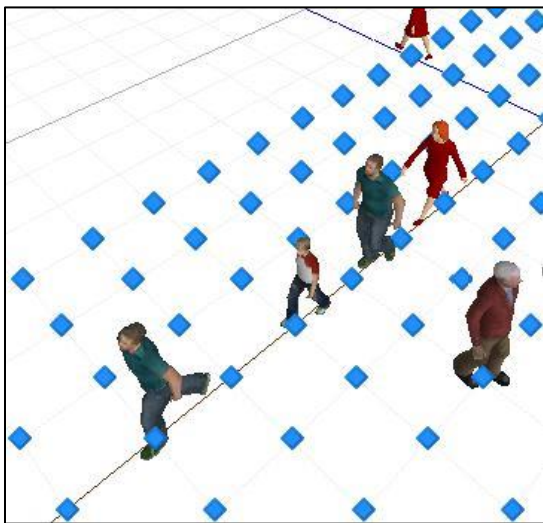
Figura 36: Propiedades Decide

Sección 3: Simulación del modelo

3.1 Resultados de la simulación del modelo

3.1.1 Elementos de la simulación del modelo

Una vez generado el modelo se ha llevado a cabo la simulación de las distintas estrategias de embarque a estudiar. Para ello se han tenido en cuenta dos escenarios para cada estrategia, una con un porcentaje de ocupación del 100% y otra del 80%.



Este instante de la simulación muestra como la entidad representada como un niño se desplaza a una velocidad por el pasillo de la aeronave más lenta que la entidad representada como un hombre, causando así que las entidades que le preceden tengan que ajustar también su velocidad a la del niño ya que no pueden adelantarle.

Figura 37: Pasajeros embarcando

La siguiente figura muestra un instante de la simulación en el que se ha producido una interferencia de pasillo, la entidad representada como un niño se encuentra colocando su equipaje de mano, por lo que la entidad que le precede debe esperar a que el acabe para seguir avanzando por el pasillo y dirigirse a su asiento asignado.

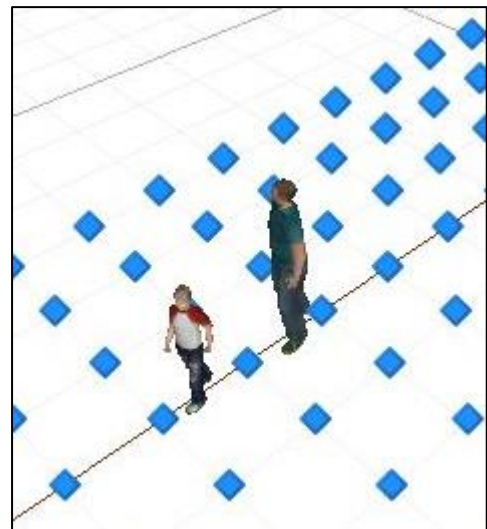
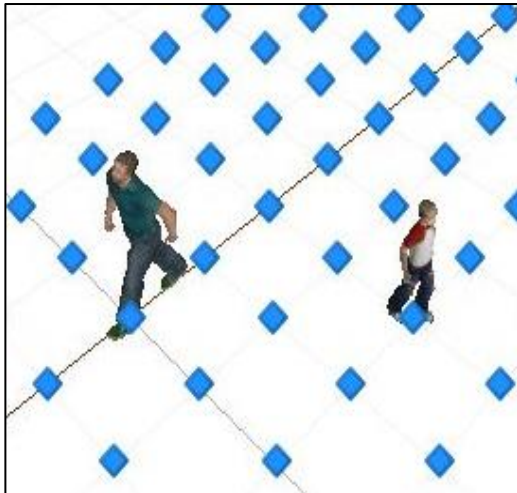


Figura 38: Interferencia en el pasillo



Una vez la entidad deja libre el pasillo la entidad que le precede puede continuar avanzando por éste.

Figura 39: Interferencia resuelta

3.1.2 Resultados de la simulación del modelo

Tras la simulación de las distintas estrategias de embarque, las tablas que se muestran a continuación muestran los tiempos de simulación que se han obtenido de cada una de ellas.

✓ FACTOR DE OCUPACION DE: 100%.

Estrategia de embarque	Tiempo total (min)
Back-to-front	23:23
Front-to-back	23:37
WilMa	16:28
Piramidal Inversa	22:00
Random	20:49

Tabla 11: Resultados simulación con ocupación 100%

✓ FACTOR DE OCUPACION DE: 80%.

Estrategia de embarque	Tiempo total (min)
Back-to-front	13:11
Front-to-back	13:28
WilMa	12:45
Piramidal Inversa	11:46
Random	15:42

Tabla 12: Resultados simulación con ocupación 80%

Teniendo en cuenta los datos anteriores se puede concluir que tanto la estrategia *Back-to-front* como la *Front-to-back* son poco eficientes ya que dejan mucho espacio disponible sin utilizar, por lo que resultan más efectivas estrategias que permiten distribuir a los pasajeros a lo largo del pasillo de forma que coloquen su equipaje de mano simultáneamente evitando así dar lugar a conflictos en el pasillo de la aeronave. Este hecho es el que provoca que, tal y como se muestran en las tablas, la estrategia WilMa es la que logra un tiempo de embarque menor, ya que permite reducir el tiempo ocioso de los pasajeros al distribuir a éstos a lo largo del pasillo. Esto queda reflejado en el siguiente gráfico, el cual muestra los minutos que requiere un pasajero para embarcar siguiendo cada estrategia de embarque.

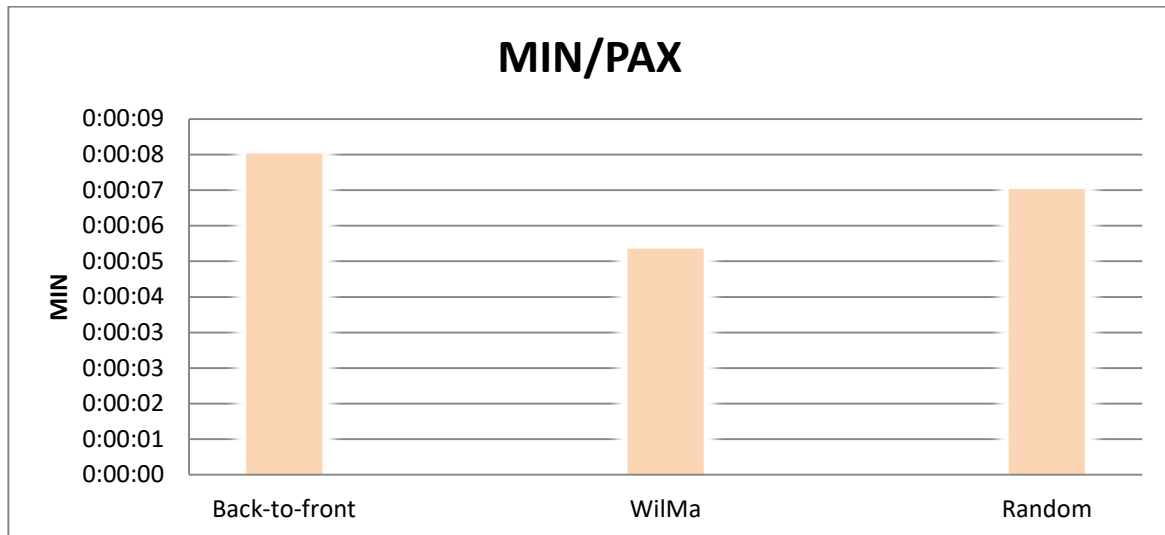


Figura 40: Minutos que requiere un pasajero para embarcar

No obstante, como se ha comentado en apartados anteriores, esta estrategia de embarque, junto con la estrategia Piramidal Inversa no tienen en cuenta la satisfacción de los pasajeros ya que tienen a separar familias o grupos de pasajeros que viajan juntos. Por estos motivos, considero más conveniente utilizar estrategias basadas en las características de los pasajeros, con la finalidad de tener en cuenta la relación con el servicio ofertado por la compañía aérea y el trato recibido por esta.

De lo cual extraemos las siguientes conclusiones para diseñar una estrategia de embarque eficiente:

- ✓ Una estrategia eficiente no debe separar pasajeros que viajen conjuntamente en ningún proceso a lo largo del embarque.
- ✓ No está permitido realizar discriminaciones de ningún tipo entre los pasajeros.
- ✓ Se han de tener las interferencias ocasionadas en el pasillo entre los pasajeros mientras estos colocan el equipaje de mano.

3.2 Validación del modelo

Este apartado pretende corroborar la validación del modelo llevado a cabo, para ello se realiza una comparación entre los datos obtenidos en la simulación (los del apartado anterior), con los de estudios previos realizados sobre el tema.

Debemos que ser conscientes que no todos los estudios previos tienen en cuenta los mismos factores que se han considerado en el presente proyecto, como son los distintos tipos de pasajeros y la velocidad al desplazarse de estos. Así como también hay que tener en cuenta que los otros estudios no se han realizado todos con las mismas dimensiones y la misma distribución de asientos de la aeronave que este estudio. Este hecho dificulta, por lo tanto, la comparativa de los tiempos obtenidos con el de los otros estudios

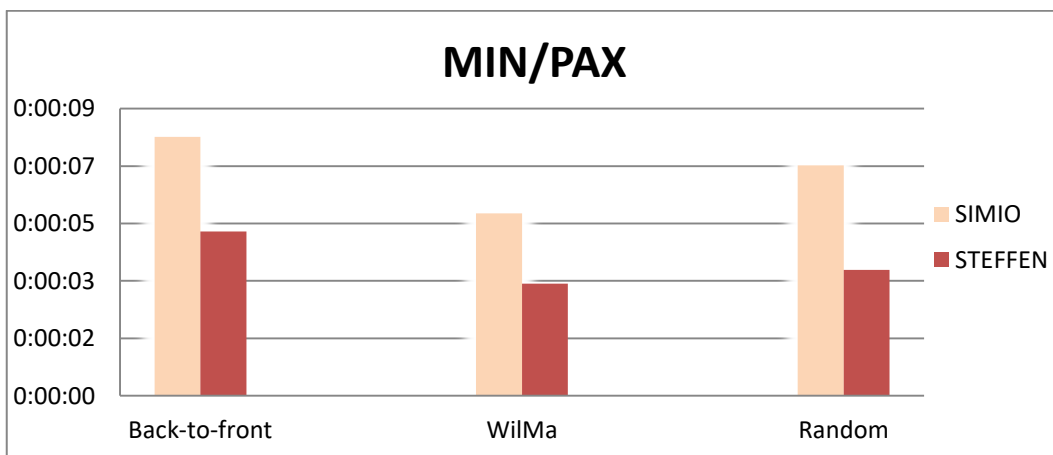


Figura 41: Comparación resultados entre el modelo y el estudio de Steffen

El grafico muestra los segundos que requiere un pasajero para embarcar según cada política de embarque, comparando los resultados obtenidos en la simulación del presente proyecto y los obtenidos por Steffen en su estudio. Se ha de tener en cuenta que Steffen realizó su estudio con 75 PAX y las dimensiones de cabina de pasajeros de un Boing757, y que tampoco tuvo en cuenta en su estudio las características diferenciales de cada pasajero, así como la velocidad al desplazarse por el pasillo.

No obstante, en el apartado anterior podemos ver que las conclusiones obtenidas a partir de la simulación del modelo desarrollado coinciden con las del resto de estudios

previos hechos sobre el mismo tema.

Por lo tanto podemos concluir, de acuerdo a los estudios previos realizados sobre las estrategias de embarque explicados en el apartado 1.3, y tras consultar distintas fuentes en la red, los resultados extraídos de la simulación del modelo llevado a cabo en SIMIO son fiables, por lo que el modelo es válido para proseguir con el proyecto y llevar a cabo el objetivo de éste.

3.3 Estrategia propuesta por bloques

El presente proyecto tiene como objetivo el análisis de la estrategia de embarque por bloques y la composición más eficiente de ésta, es decir, encontrar el número de óptimo de bloques que formen la estrategia y el orden en el que se embarcará cada uno de estos bloques.

Se ha escogido la estrategia por bloques porque considero que una estrategia de embarque óptima debe tener en cuenta las relaciones entre los pasajeros, es decir, no deben separar grupos de pasajeros que viajen juntos. La estrategia de embarque por bloques a diferencia de otras estrategias tradicionales permite que familias y grupos de pasajeros no se separen durante el proceso de embarque.

Se han llevado a cabo diversas simulaciones con diferentes escenarios para encontrar la combinación óptima de bloques.

3.3.1 Simulaciones considerando distintos número de bloques

El objetivo de este apartado es concluir que numero de bloques es el más eficiente a la hora de embarcar la aeronave.

✓ **Escenario 1:**

Para la simulación del siguiente escenario se han usado 4 bloques, el primero en embarcar es el de los pasajeros prioritarios, el resto están formados cada uno por 8 filas, menos el cuarto bloque que cuenta con 10 filas.

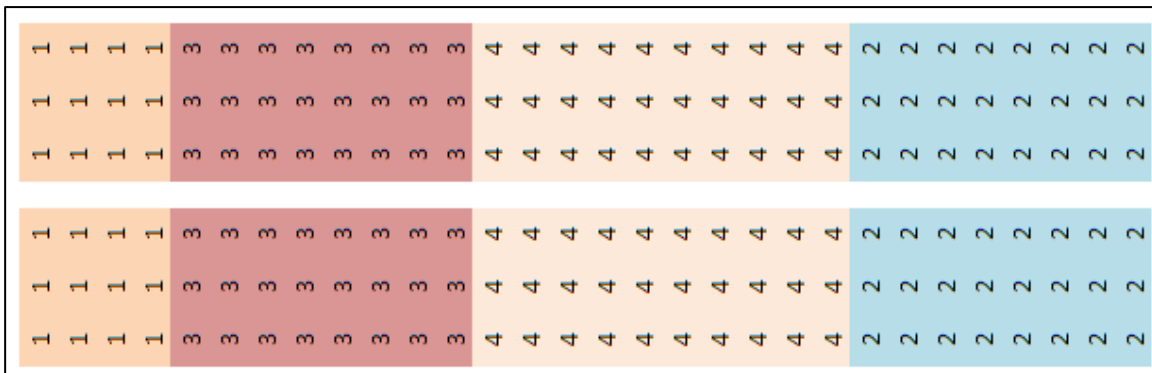


Figura 42: Escenario con 4 bloques

- El tiempo de embarque obtenido ha sido de 15:21.

✓ **Escenario 2:**

Se ha simulado un escenario con 5 bloques, como podemos comprobar en el tiempo de embarque obtenido en este caso es menor que en el que se han utilizado 4 bloques para embarcar.

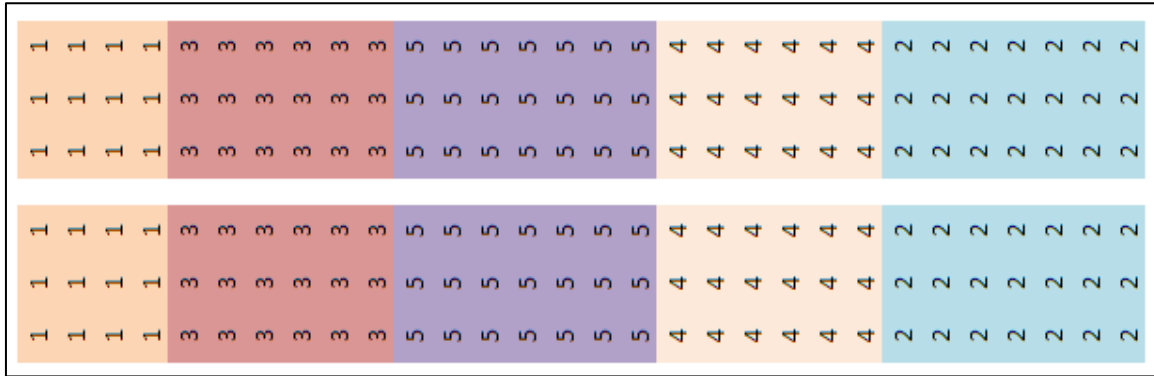


Figura 45: Escenario con 5 bloques

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:44.

Por lo que podemos concluir que el tiempo total de embarque es más elevado cuando se utiliza un menor número de bloques, de lo que deducimos que una estrategia de embarque eficiente debe tener más de 4 bloques.

✓ **Escenario 3:**

Se ha tenido en cuenta el embarque de los pasajeros prioritarios, después se han utilizado 5 bloques más de pasajeros, embarcando primero el bloque del final del avión, tal y como se ha hecho en los anteriores escenarios.

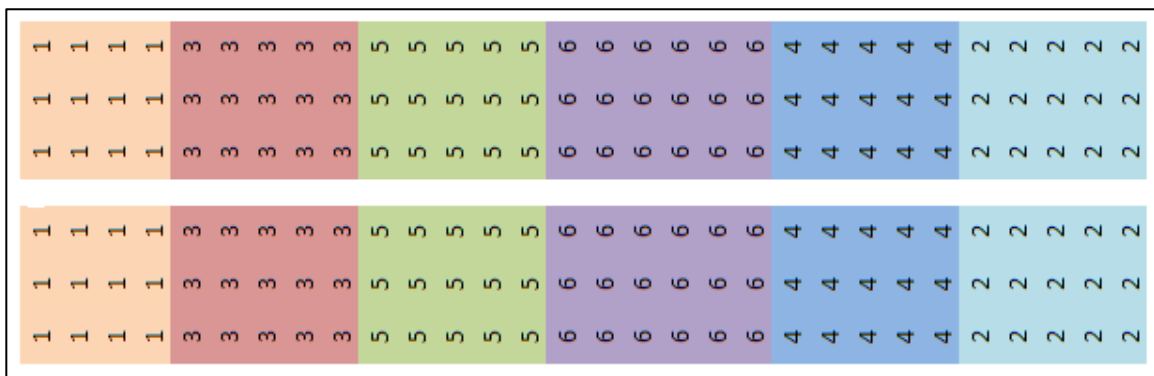


Figura 46: Escenario con 6 bloques

Al considerar las 4 primeras filas como asientos de los pasajeros prioritarios los bloques

creados no son homogéneos, siendo el último bloque de 6 filas a diferencia del resto que es de 5.

- El tiempo de embarque obtenido ha sido de 14:26.

El tiempo de embarque es el más bajo conseguido hasta ahora, así que una combinación de 6 bloques es mejor que una de 5.

✓ **Escenario 4:**

Siguiendo la lógica de las conclusiones extraídas en los anteriores escenarios, si incrementamos el número de bloques se reduce el tiempo total de embarque, en este escenario se ha llevado a cabo una simulación con 7 bloques de pasajeros.

Todos los bloques están formados por 4 filas, excepto los dos últimos bloques en embarcar que se componen de 5 filas cada uno.

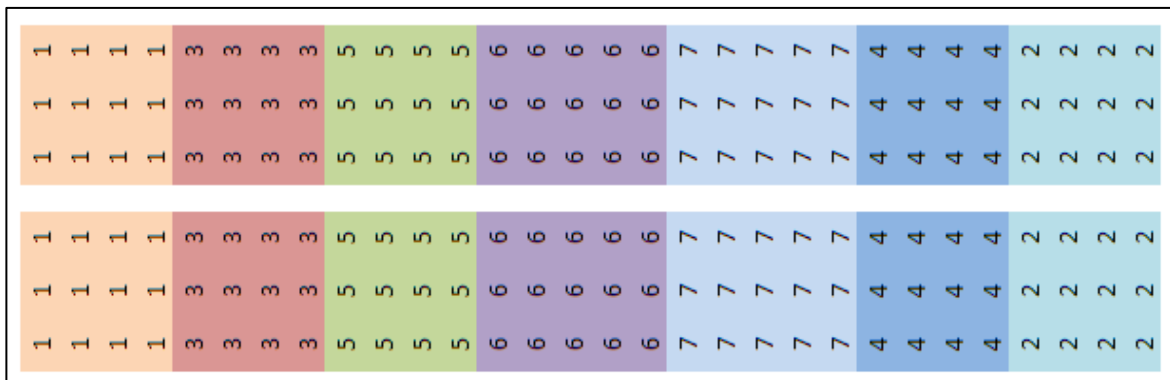


Figura 47: Escenario con 7 bloques

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:33.

El tiempo obtenido con 7 bloques es mayor que el obtenido siguiendo el mismo criterio de embarque de los bloques utilizando 6.

3.3.2 Simulaciones considerando 6 bloques y distinto orden de embarque de éstos

Una vez concluido que el número de bloques más eficientes es 6, debemos encontrar el orden en el cual el embarque de estos bloques reduce la duración del proceso de embarque.

✓ **Escenario 1:**

Para la simulación de este escenario se ha tenido en cuenta el embarque de los pasajeros prioritarios, pero para que todos los bloques tengan las mismas filas se ha añadido la siguiente fila de asientos al grupo de pasajeros prioritarios.

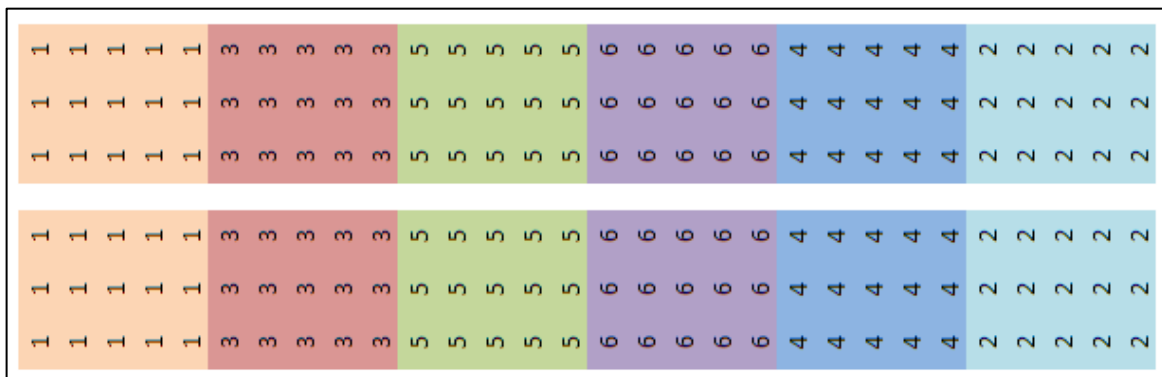


Figura 48: Escenario con 6 bloques homogéneos

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:26.

Como se puede observar el resultado el mismo que en el escenario del apartado anterior que utilizaba 6 bloques, ya que no supone ninguna diferencia incorporar una fila más al primer bloque que embarca. Por lo tanto, se puede concluir que utilizar la estrategia por bloques embarcando de manera que el primer bloque en entrar ocupe las primeras filas, no supone ninguna diferencia entre considerar los pasajeros prioritarios o no.

✓ **Escenario 2:**

En este escenario no se han tenido en cuenta los pasajeros de asientos prioritarios, por lo que se han simulado 6 bloques de 5 filas cada uno, empezando el embarque por el final del avión.

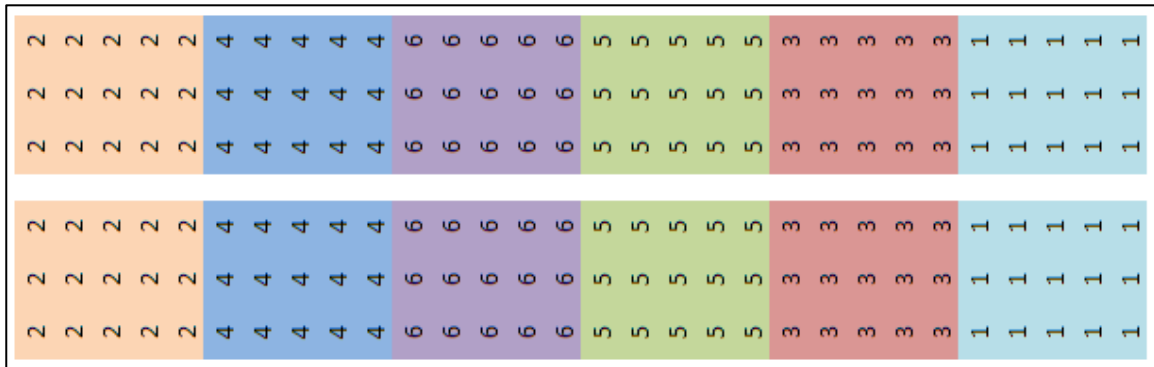


Figura 49: Escenario con 6 bloques sin pasajeros prioritarios

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:04.

Al no tener en cuenta los pasajeros prioritarios podemos simular la estrategia de embarque por bloques embarcando primero el bloque del final de la aeronave. Como vemos, permite reducir el tiempo de simulación, esto es porque cuando entra el segundo bloque no hay ningún pasajero interfiriendo en el pasillo de manera que afecte al tiempo de embarque total, debido a que cuando se producen interferencias en el pasillo al final de la aeronave mientras se embarcan las filas delanteras, esta interferencia no tienen ninguna repercusión en la duración del embarque.

No obstante, la estrategia de embarque debe tener en cuenta los pasajeros prioritarios, por lo que debemos encontrar la combinación de bloques que, considerando éstos, tengan el menor tiempo de embarque posible.

✓ **Escenario 3:**

En la simulación de este escenario se ha cambiado el orden de embarque de los bloques utilizado hasta ahora.

Se embarca primero el bloque formado por las filas de los pasajeros prioritarios más la siguiente fila. Seguidamente, embarca el bloque que ocupa las filas anteriores a las del

bloque que ocupa las filas finales del avión. Después lo mismo con el bloque de delante, finalmente se embarca el bloque que ocupa las filas del final del avión seguido del bloque de las filas a continuación de los pasajeros prioritarios, acabando la simulación embarcando el bloque que ocupa las filas centrales.

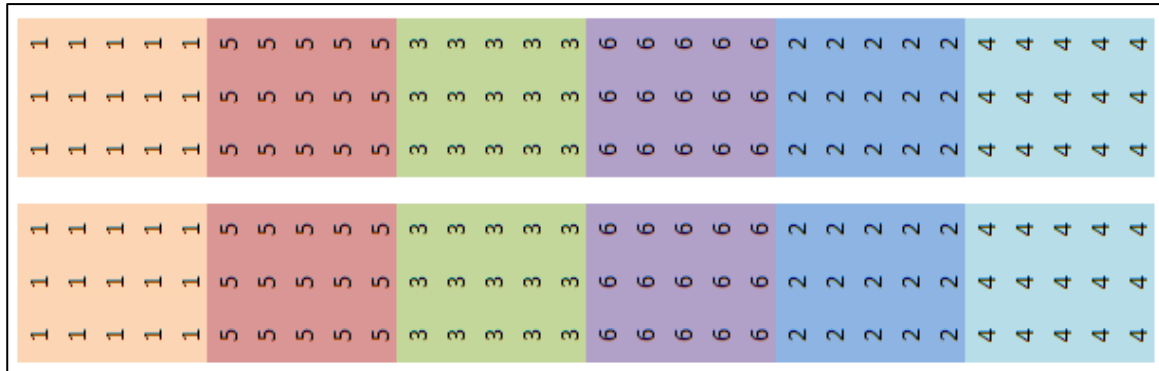


Figura 50: Escenario con variación en el orden de embarque de los bloques

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:17, el menor conseguido hasta el momento.

La explicación de tal suceso es, tal y como se muestra en la simulación, los conflictos de pasillo entre los pasajeros, aquellos que se producen cuando un pasajero debe esperar a que otro coloque su equipaje de mano para poder seguir avanzando, son prácticamente inexistentes.

✓ **Escenario 4:**

En este escenario el primer bloque en embarcar (después del de los pasajeros prioritarios, es aquel formado por los pasajeros que ocupan las filas centrales del avión.

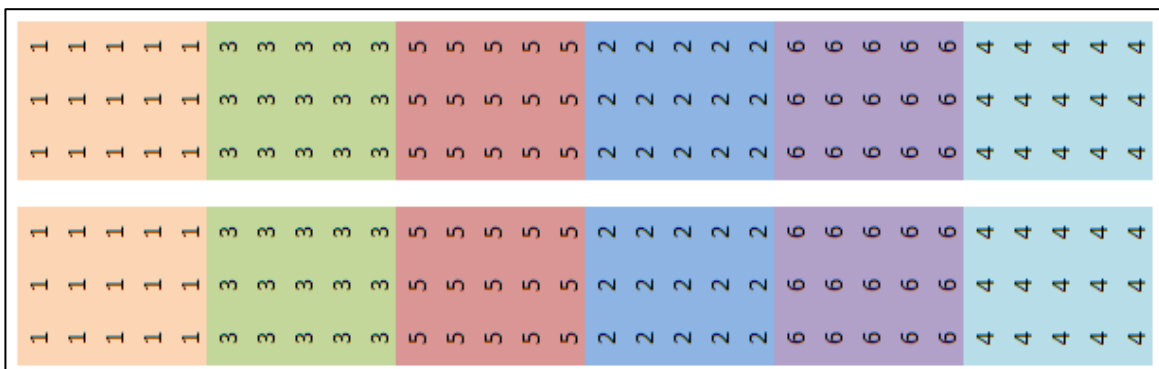


Figura 51: Escenario 2 con variación en el orden de embarque de los bloques

- El tiempo de embarque obtenido en este escenario ha sido de 14:43.

En la simulación se puede observar como el embarque del bloque 5 causa que el bloque 6 tenga que esperar en el pasillo para poder avanzar, este hecho retrasa el tiempo total de embarque de la aeronave.

Sección 4: Conclusiones

4.1 Conclusiones

El proceso de embarque de pasajeros en una aeronave es muy complejo y depende un número elevado de factores. Su estudio resulta de especial interés, ya que como se ha comentado, la eficiencia de este es clave para las compañías aéreas y los pasajeros.

A partir de la revisión de estudios anteriores realizados sobre el proceso de embarque se ha podido observar como dicho problema ha estado enfocado de diversas perspectivas y mediante metodologías distintas. Dichos estudios han permitido tener un mayor conocimiento sobre el problema y conocer en detalle las diferentes conclusiones y soluciones propuestas en cada caso, hecho que ha contribuido de forma positiva a la hora de diseñar una estrategia eficiente y realista.

Después de analizar los diferentes estudios y las diversas estrategias de embarque existentes, se ha podido observar como algunas de las estrategias propuestas no son aplicables en la operativa real, ya que no tienen en cuenta características individuales de los pasajeros ni las relaciones existentes entre estos. No obstante estudios que si contemplaban estos elementos, han permitido identificar factores que repercuten significativamente en el proceso de embarque de pasajeros para tenerlos en cuenta en el presente proyecto e incorporarlos a la simulación. Como es el caso de tener en cuenta distintos tipos de pasajeros y la velocidad de desplazamiento de cada uno de ellos, así como el tiempo que se tarda en colocar el equipaje de mano, lo que da lugar a interrupciones en el pasillo, y, como factor clave y foque principal del proyecto, las relaciones existentes entre los pasajeros y la imposibilidad de separar a pasajeros que viajan juntos durante el proceso de embarque. Estos elementos han permitido concluir en una definición estrategia de embarque de pasajeros eficiente y realista, y seleccionar la estrategia de embarque por bloques como base de estudio para desarrollar dicho proyecto.

Una vez identificados estos factores se ha llevado a cabo una macro en Excel con el objetivo de asignar asientos a los pasajeros, teniendo en cuenta las restricciones de

asientos situados en salidas de emergencia a la hora de asignarlos a los distintos tipos de pasajeros considerados. Y una vez realizada dicha asignación, identificar el orden de embarque de los pasajeros de acuerdo a las distintas estrategias de embarque seleccionadas para estudiar.

A continuación, se ha desarrollado un modelo de simulación en SIMIO para calcular la efectividad de cada una de las estrategias de embarque, los resultados obtenidos han permitido demostrar que existen diferencias significativas en el tiempo de embarque dependiendo de la estrategia que se utilice. Las estimaciones sobre el tiempo total de embarque obtenidas en las simulaciones ha permitido concluir que, como se ha observado en otros estudios, la estrategia de embarque WilMa es la que permite obtener tiempos totales de embarque más bajos, ya que distribuye a los pasajeros a lo largo de las dimensiones de la aeronave lo que permite que puedan colocar su equipaje de mano simultáneamente, reduciendo así las interferencias de pasillo entre pasajeros.

Seguidamente, se ha proseguido trabajar con la estrategia de embarque seleccionada como base de dicho proyecto, el embarque por bloques. Como se ha comentado, esta ha sido considerada la más eficiente y aplicable a la operativa real porque permite que pasajeros que viajen juntos puedan embarcar a la vez, sin perjudicar así la satisfacción de los pasajeros, a diferencia de estrategias de embarque tradicionales que separan a los pasajeros.

Después de identificar que la utilización de un número de bloques pequeño repercute de forma negativa en la duración del proceso de embarque, se ha podido identificar el número de bloques óptimo, 6. Ya que el aumento o la disminución de ellos incrementa la duración del embarque. Así como también se ha concluido que el menor tiempo de embarque se obtiene con el orden de embarque de los bloques de la Figura 50, ya que permite reducir el número de interferencias en el pasillo que se producen con otro orden de embarque por bloques. Se concluye, por lo tanto, que esta estrategia de embarque a la vez que es la más rápida es la más satisfactoria para los pasajeros.

4.2 Líneas de trabajo futuro

En este proyecto se ha llevado a cabo un modelo de simulación que ha permitido representar, de forma simplificada, el proceso de embarque de pasajeros en una aeronave, con la finalidad de obtener estimaciones sobre el tiempo total de embarque de estos dependiendo de la estrategia de embarque utilizada.

Una posible línea de trabajo futuro podría consistir en perfeccionar y refinar el modelo de simulación para que represente el proceso de embarque de una manera aún más realista mediante la introducción de elementos que permitan representar el comportamiento estocástico e imprevisible de la naturaleza humana. Concretamente algunos de los factores que sería interesante contemplar son los siguientes:

- Contemplar la posibilidad de pasajeros que lleguen a la puerta de embarque tarde, por lo que no pueden cumplir la estrategia de embarque utilizada, así como la presencia de pasajeros “no-shows”, son aquellos pasajeros que no se presentan en la puerta de embarque aunque hayan facturado.
- Redefinir el tiempo necesario de los pasajeros para depositar su equipaje de mano en función de la cantidad de piezas que lleven, así como de las dimensiones de estas, el peso y el espacio disponible en los compartimentos superiores de la cabina.
- Contemplar los conflictos de asientos entre dos pasajeros y el tiempo necesario para resolverlos, y ver si realmente influyen de forma significativa en la duración total del proceso de embarque.

A demás, se podrían definir nuevos modelos de simulación con la finalidad de estudiar el comportamiento de las distintas estrategias de embarque de acuerdo a otros factores y condiciones iniciales del entorno que en este proyecto no se han tenido en cuenta.

- Tener en cuenta diferentes tipos y dimensiones de aeronaves.

- Variar el número de puertas a través de los que embarcan los pasajeros a la aeronave.
- Definir nuevos tipos de pasajeros.

5. Referencias bibliográficas

Mucha de la información utilizada en este proyecto se ha obtenido a partir de documentos oficiales de Vueling que por motivos de confidencialidad no se pueden nombrar ni adjuntar a los anexos de dicho proyecto.

Bachmat, E., 2005. "Analysis of airplane boarding via space-time geometry and random matrix theory". *Journal of Physics A: Mathematical and General*, Vol. 39, pp. 453- 459.

Steffen, J.H., 2008. "Optimal boarding method for airline passengers". *Journal of Air Transport Management*, 2008, Vol. 14(3), pp.146-150, 14(3), pp.146–150.

Steffen, J.H., 2011. "Experimental test of airplane boarding methods". *Journal of Air Transport Management*, 2012, Vol. 18, pp. 64-67.

Nyquist, D.C., 2008. "A study of the airline boarding problem" K. L. McFadden, ed. *Journal of Air Transport Management*, 2008, Vol. 14(4), pp.197-204, 14(4), pp. 197–204.

Bazargan, M., 2007. "A linear programming approach for aircraft boarding strategy". *European Journal of Operational Research*, 2007, Vol. 183, pp. 394-411.

Van Landeghem, H., 2002. "Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation based approach" A. Beuselinck, ed. *European Journal of Operational Research*, 2002, Vol.142(2), pp.294-308, 142(2), pp. 294–308.

Bazargan, Massoud, 2010. *Airline Operations and Scheduling*. 2n edición. USA: Ashgate Publishing Limited.

Carmona, Aníbal Isidoro, 2010. *Operaciones aeroportuarias*, Madrid: AENA.

Clausen, Tommy, 2011. "Airport Ground Staff Scheduling". PhD Thesis. DTU Management Engineering, Department of Management Engineering.

Dohn, Anders y Kolind, Esben, 2008 "Optimizing Manpower Allocation for Ground Handling Tasks in Airports using Column Generation". Technical University of Denmark,

Department of Management Engineering.

Domingo Calvo, Mariano, 2005. Descubrir el handling aeroportuario, Madrid: AENA.

Fricke, Hartmut y Schultz, Michael, 2009. "Delay Impacts onto Turnaround Performance". USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009).

Gomez, F. y Scholz, D., 2009. "Improvements to ground handling operations and their benefits to direct operating costs". Hamburg university of Applied Sciences.

Hoeg Dohn, Anders, 2010. "Manpower Planning: Task Scheduling". DTU Management Engineering, Department of Management Engineering.

Jörg Herbers, 2005. "Models and Algorithms for Ground Staff Scheduling on Airports". PhD diss. Universitätsbibliothek.

Kazda, Antonín y Hromádka, Martin (2011). "How to improve airport operation". University of Zilina, Air transport department.

Loth, Steffen, 2011. "Concept and prototype of a ground handling vehicle management system". Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2011).

Luethi, Marco, Kisseleff, Beat y Nash, Andrew, 2009. "De-peaking strategies for improving airport ground operations productivity at mid-sized hubs". Institute for Transport Planning and Systems.

Simio LLC, 2010. Introduction to Simio.

Wikipedia, 2016. "Asistencia en tierra a aeronaves". <http://es.wikipedia.org/wiki/Asistencia_en_tierra_a_aeronaves> [Consulta: 23 de Noviembre de 2016].

Wikipedia, 2016. "Discrete event simulation".

<http://en.wikipedia.org/wiki/Discrete_event_simulation> [Consulta: 20 de Diciembre de 2016].

Wikipedia, 2017. "Wigtips". <https://es.wikipedia.org/wiki/Dispositivo_de_punta_alas> [Consulta 3 de Enero de 2017].

Youtube, 2016. "SIMIO Procesos".

<<https://www.youtube.com/watch?v=BQHFeuZfwRU>> [Consulta: 3 de Diciembre de 2016].

Youtube, 2017. "The better way to board an airplane".

<https://www.youtube.com/watch?v=cMgarcFkXz4> [Consulta: 10 de Enero de 2017]

