



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

ESTRATEGIAS DE EMBARQUE EN UN AIRBUS 380-800

Memoria del Trabajo de Fin de Grado

en

Gestión Aeronáutica

realizado por

Nuria Perelló Llompart

y dirigido por

Dr. Ángel A. Juan

Escola d'Enginyeria Sabadell, Julio de 2013

El abajo firmante, ***Ángel A. Juan Pérez***, profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria ha sido realizado bajo su dirección por

Nuria Perelló Llompart.

Y para que conste firma la presente.

Sabadell, ***Julio*** de ***2013***

Firmado:

Dr. Ángel A. Juan

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

Títol del projecte: ESTRATEGIAS DE EMBARQUE EN UN AIRBUS 380-800	
Autor[a]: NURIA PERELLÓ LLOMPART	Data: <i>JULIO 2013</i>
Tutor[a]/s[es]: Dr. Àngel A. Juan	
Titulació: GRADO EN GESTIÓN AERONÁUTICA	
Paraules clau (mínim 3) Anglès: Turn-around, boarding strategies, boarding hybrid strategies, group boarding, passenger transport, traditional or flag carriers, handling agent, transfer passengers, airport hub-and-spoke, finger or bridge Access, boarding interferences, main deck, upper deck, occupancy level. Castellà: proceso de escala , estrategias de embarque, estrategias híbridas de embarque, embarque en grupos, transporte de pasajeros, compañías de bandera o tradicionales, agente de asistencia en tierra, pasajeros en tránsito, aeropuerto hub-and-spoke, puente de acceso, interferencias de embarque, cubierta principal, cubierta superior, nivel de ocupación.	
Resum del projecte (extensió màxima 100 paraules) <ul style="list-style-type: none">Català: Es realitza una revisió de la literatura i s'aprofundeix en termes teòrics sobre l'embarcament de passatgers, després s'analitza quines estratègies de sis estudiades (<i>random, front to back, back to front, alternating rows, by block i optimization</i>) són les més eficients en un embarcament d'un avió Airbus 380-800, el qual conté doble coberta i doble passadís. Es porta a terme un tipus d'embarcament normal i un altre experimental que consisteix en embarcar 9, 10 o 11 files de la coberta principal de l'avió per la coberta superior mitjançant l'ús d'escales per accedir posteriorment al pis principal. Finalment, es conclou quina estratègia és la més eficient per dos nivells d'ocupació (90 i 100%).Castellà: Se realiza una revisión de la literatura y se profundiza en términos teóricos sobre el embarque de pasajeros, después se analiza qué estrategias de seis estudiadas (<i>random, front to back, back to front, alternating rows, by block y optimization</i>) son las más eficientes en un embarque de un avión Airbus 380-800, el cual contiene doble cubierta y doble pasillo. Se lleva a cabo un tipo de embarque normal y otro experimental que consiste en embarcar 9, 10 o 11 filas de la cubierta principal del avión por la cubierta superior mediante el uso de escaleras para acceder posteriormente al piso principal. Finalmente, se concluye qué estrategia es la más eficiente para dos niveles de ocupación (90 y 100%).	

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen	3
2. Introducción	3
Interés y motivación	3
Palabras clave	4
3. Objetivos del proyecto.....	4
Principal	4
Específicos	5
4. Metodología.....	5
5. Planificación temporal	6
SECCIÓN 1	10
6. Servicios en tierra	10
7. El proceso de embarque	12
8. Causas de retraso en el proceso de embarque	14
SECCIÓN 2	16
9. Estrategias de embarque	16
SECCIÓN 3	21
10. Revisión de la literatura	21
Visión Global	21
Casos de estudio específicos	22
SECCIÓN 4	45
11. El modelo de simulación	45
Avión estudiado	46
El proceso de embarque	50
Comportamiento de los pasajeros	53

Nivel de ocupación	53
Parámetros	53
SECCIÓN 5	54
12. Ejecución de la simulación.....	54
A. EMBARQUE NORMAL.....	54
B. EMBARQUE EXPERIMENTAL	62
13. Resultados de la simulación	82
14. Conclusiones de la simulación realizada en este estudio	85
15. Líneas de trabajo futuro	86
16. Bibliografía	87
17. Anexos	89

1. Resumen

Uno de los objetivos principales de una compañía aérea es reducir el máximo posible el tiempo total de *turnaround* ya que cuanto más tiempo se está en el aeropuerto, más tasas aeroportuarias deben pagar. De esta manera consiguen aumentar su eficiencia, la satisfacción del cliente y su rentabilidad.

El proceso de embarque de pasajeros es uno de los elementos del *turnaround* más importantes tanto para la satisfacción al cliente como por cuestiones financieras de la aerolínea. De ahí que se hayan estudiado muchos métodos para reducir el tiempo total de embarque.

En este proyecto se analizan y comparan diferentes estrategias de embarque en uno de los aviones más grandes existentes hasta el momento para después concluir qué estrategia es la más eficiente.

2. Introducción

Interés y motivación

El sector aeronáutico está caracterizado por ser un sector altamente competitivo donde cada una de las aerolíneas debe luchar para ganarse un sitio en el mercado. Así pues, para poder aumentar la rentabilidad y asegurar su sitio en el mercado los mayores esfuerzos se centran en optimizar los procesos operacionales sobre los cuales las compañías poseen el control y hacer un uso correcto de la infraestructura aeroportuaria para poder alcanzar la eficiencia y efectividad deseada.

La alta competencia entre aerolíneas tradicionales, sobre todo con las *low-cost*, y el precio actual del combustible obliga a éstas a ser altamente competitivas. Para ello, la mayoría de ellas se centran en reducir el tiempo de la aeronave en tierra (*Ferrari and Nagel, 2004; Van Landeghem and Beuselinck, 2002; Lewis and Lieber, 2005*), o *turn-around* en jerga aeronáutica, ya que las compañías aéreas no generan ningún ingreso mientras se encuentran en tierra (*Van de Briel et al., 2005*) y cuanto más tiempo se hallen estacionadas más tasas aeroportuarias deberán afrontar. Según *Van Landeghem and Beuselinck (2002)* el tiempo de *turn-around* de una aeronave, entendido por *turn-around* el tiempo que incluye la llegada de la aeronave a la plataforma y la colocación de los calzos hasta la eliminación de éstos y la salida de la aeronave, es de 30-60 minutos y el componente crucial de éste proceso es el embarque de pasajeros. En estudios previos se calcula que la disminución del coste asociado a la reducción del proceso de embarque para un avión activo es de 30\$/minuto. La disminución de un minuto en el proceso de embarque de cada vuelo supone

una reducción anual en costes de 5, 475, 000 \$ para una aerolínea que opera 500 vuelos al día (*Nyquist et al. 2008*).

Además, basándose en la cultura de la aerolínea y en el nivel de servicio que se quiere ofrecer se utiliza una estrategia de embarque u otra (*Van de Briel et al., 2005*). Se deben tener en cuenta también factores como la velocidad del pasajero, la cantidad de maletas de mano que se transportan y las diversas interferencias que pueden existir para que la estrategia sea eficiente pero también es muy importante considerar la robustez de la estrategia ya que muchas estrategias son eficientes pero pocas son robustas a la hora de implementarlas. Las estrategias más frecuentes en compañías aéreas de bandera son las llamadas *back to front* y *window to aisle* o *out-in*. Además, se utilizan de manera híbrida.

Este trabajo se centrará en el estudio y comparación de diferentes estrategias de embarque para aviones comerciales A380 usados en vuelos de medio/largo recorrido enfocándose en optimizar y mejorar una parte (el embarque), de los procesos que tienen bajo control las compañías aéreas tradicionales. Existen, mayoritariamente dos razones por las cuales este estudio se lleva a cabo: 1) existen muy pocos estudios sobre estrategias de embarque en aviones de gran envergadura ya que otros autores se han centrado en optimizar el proceso en aviones pequeños y 2) se cree que es más importante estudiar estrategias en aviones grandes debido al gran número de pasajeros, la existencia de más de un pasillo y puertas de embarque y, a veces, de dos pisos. Estos factores hacen que el proceso de embarque sea más complicado o con mayor número de interferencias que en un avión pequeño de una simple puerta, pasillo y piso. Además, cabe añadir que la posibilidad de llevar más de un bulto en este tipo de compañías aéreas aumenta la dificultad de proceder a un embarque eficiente.

Palabras clave

Proceso de escala, estrategias de embarque, estrategias híbridas de embarque, embarque en grupos, transporte de pasajeros, compañías de bandera o tradicionales, agente de asistencia en tierra, pasajeros en tránsito, aeropuerto *hub-and-spoke*, puente de acceso, interferencias de embarque, cubierta principal, cubierta superior, nivel de ocupación.

3. Objetivos del proyecto

Principal

En este estudio se analizarán algunas estrategias utilizadas actualmente, se simularán y decidirán una o varias estrategias de embarque para conseguir minimizar la media del tiempo total del proceso de embarque y así contribuir a reducir el tiempo total

de *turn-around* de la aeronave y maximizar la utilización de la misma. Se utilizará el modelo de avión A380-800.

Específicos

Para alcanzar el objetivo general de este trabajo se deben cumplir una serie de objetivos específicos:

- i. Primero de todo, se analizarán diferentes estudios y artículos realizados a lo largo de la historia para entender cuál es la metodología de análisis e investigación utilizada en cada uno de ellos y llegar a un alto nivel de entendimiento sobre el tema para poder realizar este trabajo.
- ii. Seguidamente, aprender sobre las diferentes y existentes estrategias de embarque; cómo funcionan y cuál es su nivel de eficiencia en diferentes escenarios.
- iii. A continuación, estudiar qué estrategias de embarque utilizan y cuáles no utilizan las aerolíneas tradicionales en sus vuelos de medio/largo radio.
- iv. Analizar qué factores influyen en el tiempo total de embarque y qué estrategia es mejor según éstos (infraestructura aeroportuaria, filosofía de la aerolínea, características de los pasajeros, etc).
- v. Para finalizar, si existe la posibilidad y tiempo necesario, simular un modelo de avión suficientemente grande teniendo en cuenta las características individuales de los pasajeros, las interferencias y otros factores causantes del aumento del tiempo de embarque, analizar diferentes estrategias, entre ellas alguna original y robusta que no se haya implementado aún y decidir cuál es la mejor en cada uno de los escenarios simulados.

4. Metodología

Un primer paso será analizar el estado del arte del proceso a tratar para después poder pasar al siguiente paso, analizar y buscar una solución óptima al problema.

La búsqueda de información ayuda a tener una base en la cual dirigir el proyecto y una cantidad de datos con los cuales poder trabajar. Se utilizarán documentos científicos, la mayoría extraídos de la base de datos *ScienceDirect*.

Analizar el problema conlleva una serie de tareas; análisis y descripción de los diferentes tipos de estrategias propuestas a lo largo de la historia y cuáles son los factores que impiden un proceso de embarque eficiente (interferencias).

Una vez se ha llegado a un nivel de entendimiento teórico será necesario pasar a la parte práctica. Saber qué métodos se han utilizado y cuáles se utilizan hoy en día será un paso a realizar. Seguidamente, se modificará el algoritmo del proyecto de *Silvia Mas* (2012) para poder llegar a una estrategia eficiente para aviones de medio/largo recorrido. Se utilizará *Visual Basic de Microsoft Excel* para poder modificar el algoritmo y la simulación de diversos escenarios (diferentes estrategias).

El siguiente paso a seguir, será la verificación y validación del modelo rediseñado, analizando los datos obtenidos en los diferentes escenarios y comparándolos en base a la información de la que se dispone de estudios previos. De esta manera, se podrá concluir el proyecto con una recomendación y aportación original de las mejores prácticas de embarque.

5. Planificación temporal

Se realizará una entrega continua, y a la vez mejorada, del proyecto durante todo su transcurso. Este proyecto consta de 4 entregas, las cuales son:

Entrega del Plan de Trabajo → 19 de Marzo de 2013

En esta primera entrega se presenta el Plan de Trabajo. Incluye una breve introducción, objetivos, metodología, planificación y referencias bibliográficas.

Entrega Primera Versión → 8 de Abril de 2013

Entrega de la primera versión del proyecto. Una primera parte de los objetivos específicos se habrán alcanzado en esta etapa.

Entrega Segunda Versión → 26 de Abril de 2013

En la segunda versión, la mayoría de los objetivos se habrán alcanzado y el proyecto estará altamente desarrollado.

Entrega Tercera Versión → 25 de Junio de 2013

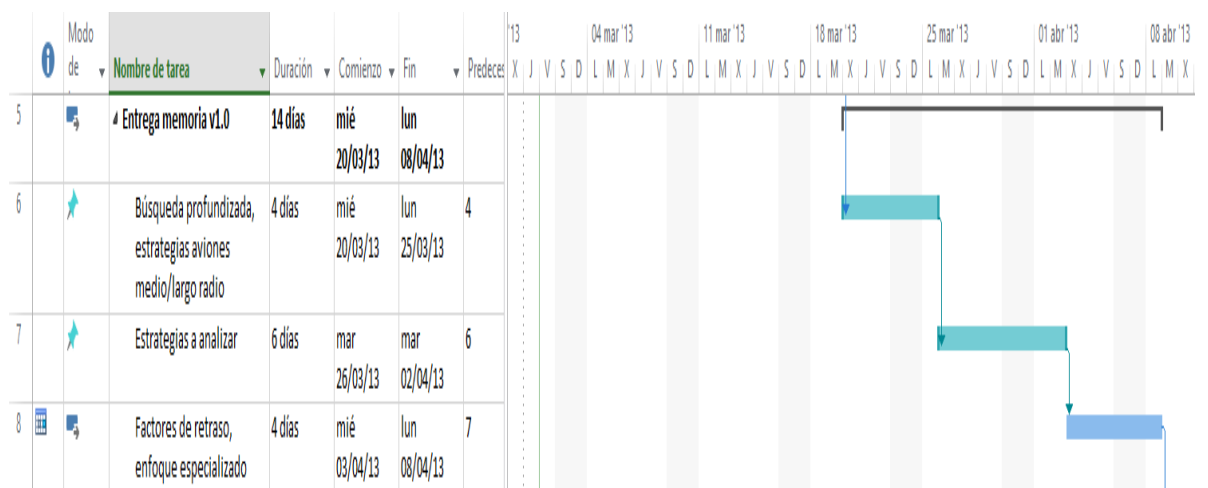
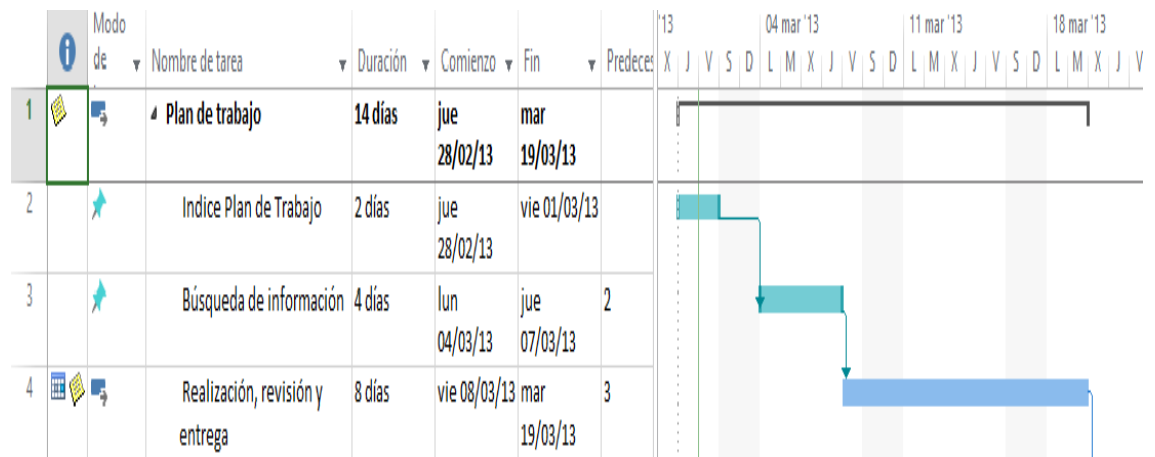
La versión final del proyecto será entregada, así como la presentación oral en formato Power Point.

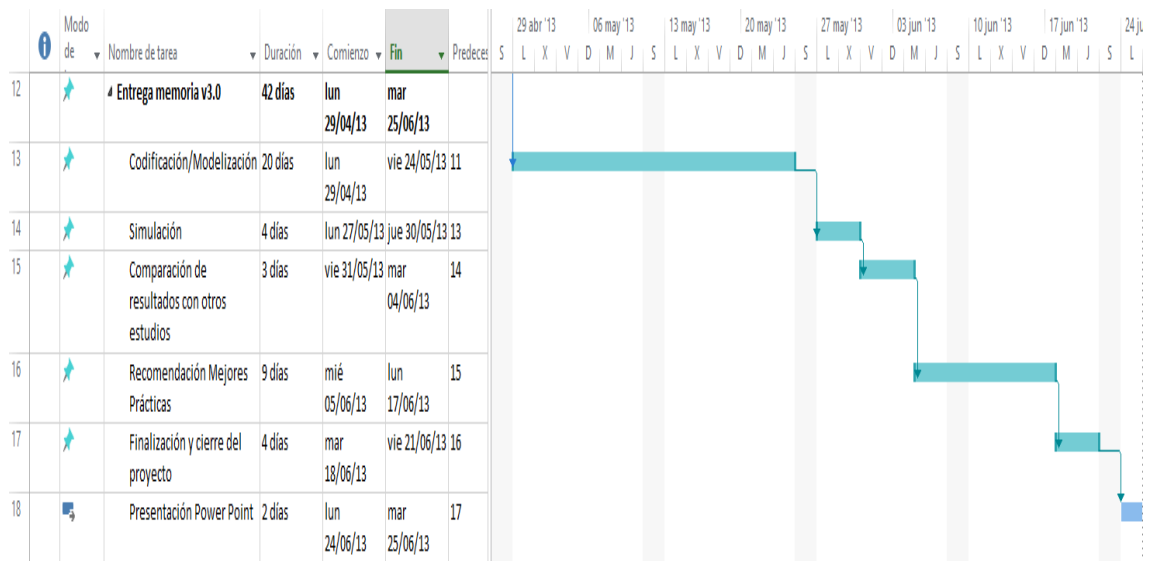
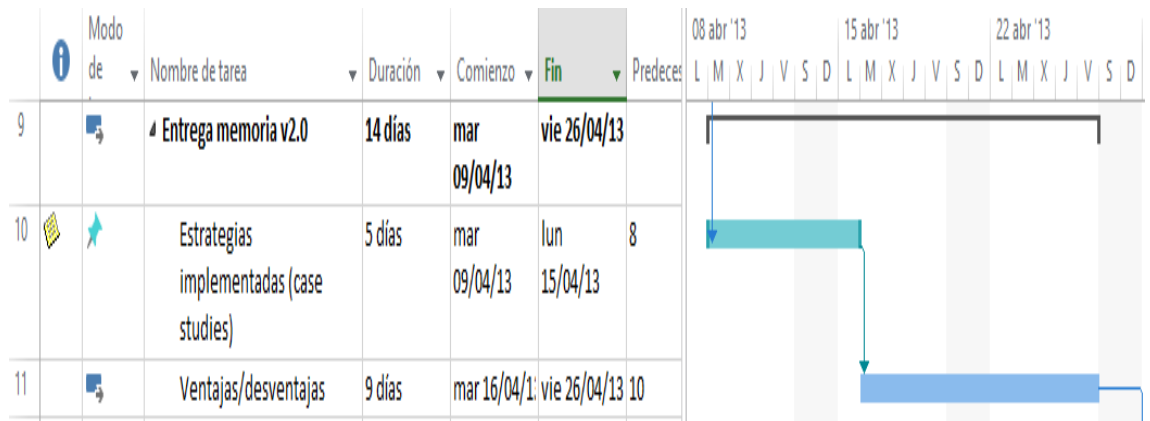
A continuación, mediante el diagrama de Gantt se muestran las diferentes actividades y sus respectivas tareas que se llevarán a cabo a lo largo del proyecto dentro de una planificación determinada.

Se asume que esta planificación dependerá de los adelantos o retrasos que puedan existir a lo largo del desarrollo del proyecto. Para ello, cualquier retraso o adelanto en el proyecto se readaptará en esta planificación para poder lograr los objetivos requeridos.

	Nombre de tarea ▼	Duración ▼	Comienzo ▼	Fin ▼	Predecesoras ▼
1	▲ Plan de trabajo	14 días	jue 28/02/13	mar 19/03/13	
2	Indice Plan de Trabajo	2 días	jue 28/02/13	vie 01/03/13	
3	Búsqueda de información	4 días	lun 04/03/13	jue 07/03/13	2
4	Realización, revisión y entrega	8 días	vie 08/03/13	mar 19/03/13	3
5	▲ Entrega memoria v1.0	14 días	mié 20/03/13	lun 08/04/13	
6	Búsqueda profundizada, estrategias aviones medio/largo radio	4 días	mié 20/03/13	lun 25/03/13	4
7	Estrategias a analizar	6 días	mar 26/03/13	mar 02/04/13	6
8	Factores de retraso, enfoque especializado	4 días	mié 03/04/13	lun 08/04/13	7
9	▲ Entrega memoria v2.0	14 días	mar 09/04/13	vie 26/04/13	
10	Estrategias implementadas (case studies)	5 días	mar 09/04/13	lun 15/04/13	8
11	Ventajas/desventajas	9 días	mar 16/04/13	vie 26/04/13	10

12	Entrega memoria v3.0	42 días	lun 29/04/13	mar 25/06/13	
13	Codificación/Modelización	20 días	lun 29/04/13	vie 24/05/13	11
14	Simulación	4 días	lun 27/05/13	jue 30/05/13	13
15	Comparación de resultados con otros estudios	3 días	vie 31/05/13	mar 04/06/13	14
16	Recomendación Mejores Prácticas	9 días	mié 05/06/13	lun 17/06/13	15
17	Finalización y cierre del proyecto	4 días	mar 18/06/13	vie 21/06/13	16
18	Presentación Power Point	2 días	lun 24/06/13	mar 25/06/13	17





SECCIÓN 1

6. Servicios en tierra

El proceso de embarque es uno de los procesos incluidos en el conjunto de actividades que se llevan a cabo durante el *turnaround* de un avión o proceso de escala. Como se definió anteriormente, es el proceso que se inicia en el momento que un agente de rampa pone los calzos al avión hasta el momento que vuelve a quitarlos y empieza el *pushback* del avión. La Figura 1 muestra un avión calzado.



Figura 1: Avión calzado

Durante el *turnaround*, aparte del proceso de embarque, se llevan a cabo otras actividades: desembarque de pasajeros y equipaje, revisiones de mantenimiento, limpieza, abastecimiento de combustible, catering, carga de equipaje y embarque de pasajeros. El servicio de *handling* puede prestarlo el propio aeropuerto por medio de personal a su cargo, pero en la actualidad es más frecuente que se ocupen del *handling* empresas especializadas en este tipo de tareas.

Estas empresas, independientes del aeropuerto donde desarrollan su actividad, son comúnmente denominadas agentes de *handling* y obtienen una concesión de la autoridad competente para prestar sus servicios en el aeropuerto, o bien son contratadas a tal efecto por las compañías aéreas, mientras que las entidades que administran y gestionan los aeropuertos pueden llegar a desligarse casi por completo de la asistencia en tierra. En el aeropuerto del Prat están las empresas de *handling* Lesma, GroundForce, Globalia e Iberia Handling, entre otras.

Algunas compañías aéreas confían en sus propios servicios de asistencia en tierra. De este modo crean su propia infraestructura para tales servicios, que se conoce como *autohandling*. Estas compañías aéreas que disponen de *autohandling* actúan como agentes de asistencia para otras compañías. Por ejemplo, compañías de bandera como Royal Air Maroc y

Lufthansa llevan a cabo su propio servicio en tierra y otras compañías de bajo coste como Ryanair y EasyJet también gestionan su propio *handling* en el aeropuerto de Barcelona, El Prat.

En ambos casos, la rapidez, la precisión y la eficiencia son lo más importante para minimizar el tiempo total de *turnaround*. La mayoría de ellas se pueden hacer a la vez que se realizan otras de las actividades. Sin embargo, existen actividades como el embarque y desembarque de pasajeros que no pueden realizarse paralelamente. En la figura 2 se muestran las diferentes actividades que se deben llevar a cabo en el proceso de escala.

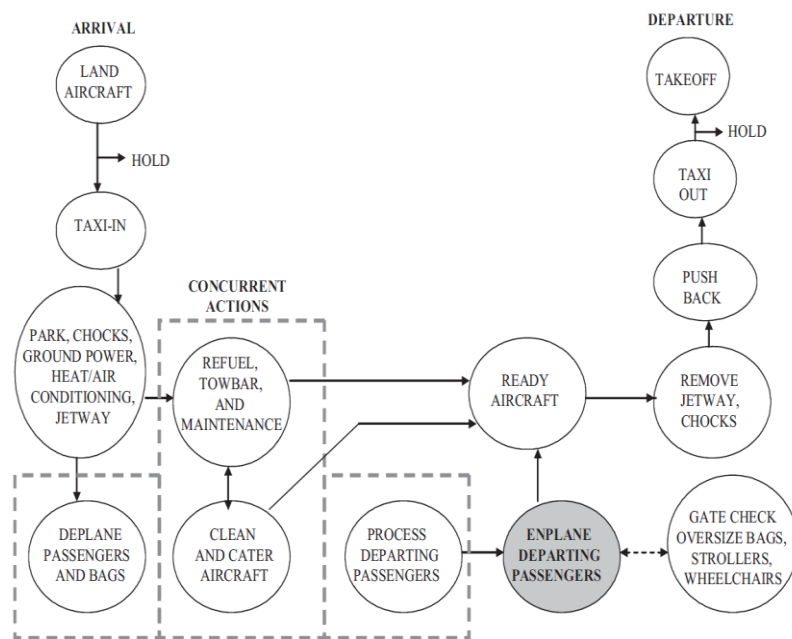


Figura 2: Proceso de *turnaround* en un avión comercial de pasajeros

La Figura 3 muestra un avión aparcado y cada uno de los elementos que interfieren en el proceso de *turnaround*.

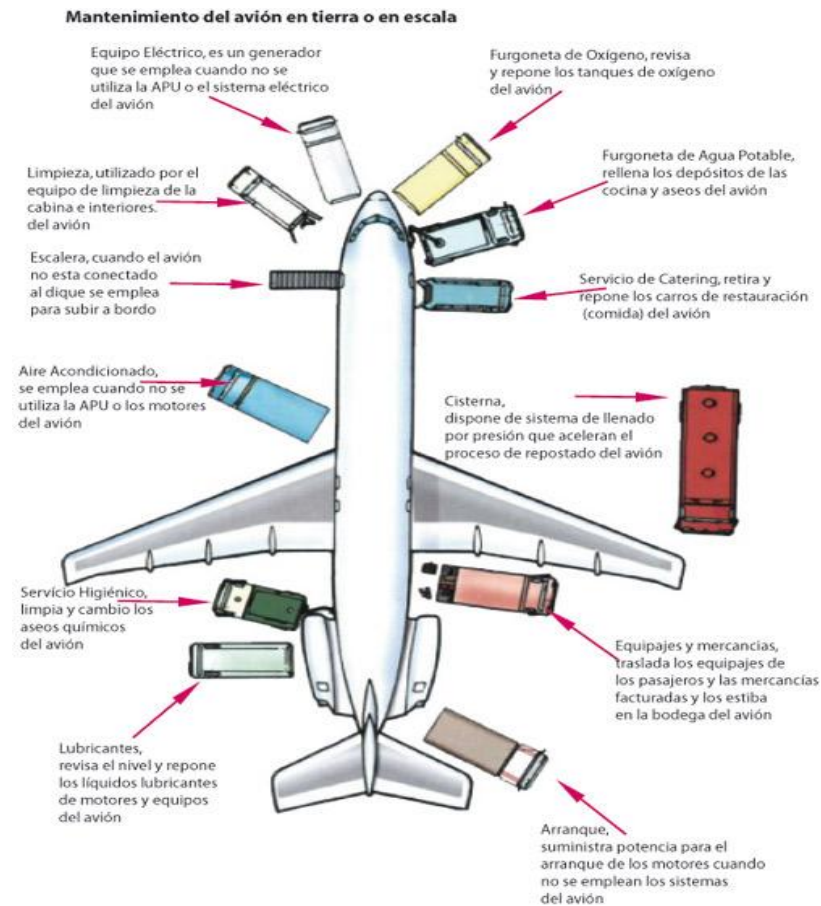


Figura 3: Avión con los elementos que intervienen en el *turnaround*

7. El proceso de embarque

Como se ha mencionado anteriormente, el embarque de pasajeros es una de las actividades críticas dentro del proceso de *turnaround* de una aeronave ya que no se puede empezar el embarque hasta que las otras actividades hayan sido finalizadas. Sin embargo, esta afirmación no es cierta si se tiene en cuenta que solo la limpieza del interior del avión es la única actividad que debe haber terminado para iniciar el embarque. El servicio de catering, que repone los carros de restauración del avión se puede realizar paralelo al embarque de pasajeros, así como el repostado de combustible si el equipo de bomberos es consciente de ellos. En conclusión, el proceso de embarque puede ser realizado al mismo tiempo que otras actividades.

La principal prioridad en un embarque es la seguridad aunque siempre se intente minimizar lo máximo posible el tiempo total de embarque con una estrategia de embarque determinada. Por eso los gestores de la compañía aérea deben estar al corriente de las diferentes estrategias de embarques existentes y más costo-efectivas y combinarlas con la satisfacción del cliente y la calidad.

El tiempo total del proceso de embarque depende de factores como el tamaño del avión, la infraestructura aeroportuaria, los servicios de asistencia en tierra, cantidad de personal, maletas de mano o comportamiento de los pasajeros. Unos son factores controlables y otros incontrolables.

El proceso de embarque consta de tres pasos:

1. Se anuncia a los pasajeros el inicio del embarque. Los pasajeros se pondrán en cola en la puerta de embarque. Los factores de retraso son los pasajeros que aun no han llegado o la llegada tardía de los pasajeros transfer. El aumento de los vuelos *hub-and-spoke* ha provocado este tipo de retraso considerablemente.

2. El agente encargado del embarque controla todas las tarjetas de embarque y registra su entrada con un lector de billetes. Las principales alteraciones son el atasco del lector de tarjetas de embarque, y el retiro de exceso de equipaje de mano en la puerta de entrada incluyendo la discusión entre el agente y el afectado. Este tipo de retraso también está aumentando debido al refuerzo del control sobre los límites del equipaje.

3. Finalmente, los pasajeros acceden al avión a través del puente de acceso o *finger*. Sin embargo, cuando los pasajeros son trasladados en autobús al avión el problema se agrava. Llegan a la puerta del avión en grandes lotes o conjuntos. Una vez dentro del avión, deben hacer cola en línea recta, debido a la poca anchura del pasillo, hasta que al final llegan al asiento que tienen asignado. Existen varias causas de retrasos en esta fase. Para finalizar, el pasajero pone su equipaje de mano en el compartimento superior o debajo del asiento, se sienta y se ata el cinturón de seguridad.

8. Causas de retraso en el proceso de embarque

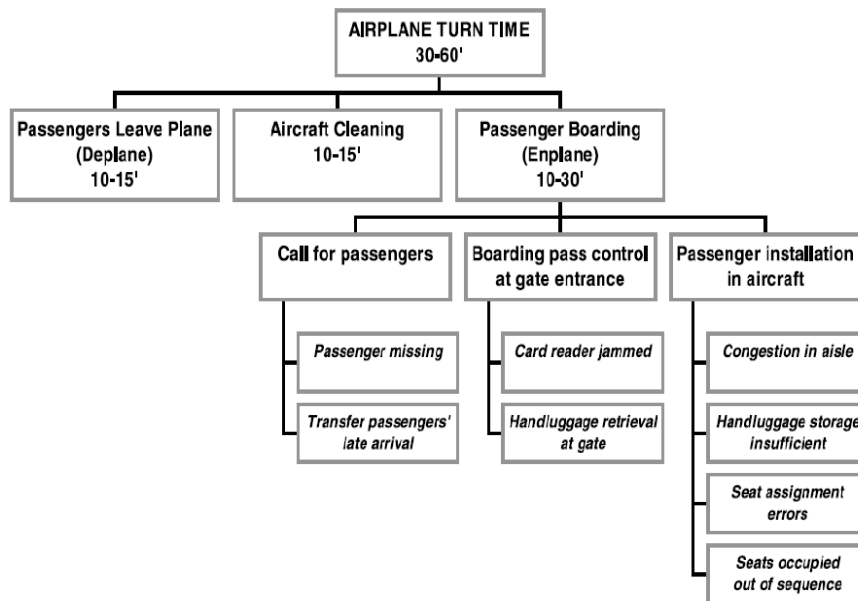


Figura 4: Elementos y alteraciones en el proceso embarque

i) Interferencias dentro del avión

Uno de los propósitos en reducir el tiempo de embarque se refiere a minimizar el número de interferencias entre los pasajeros dentro del avión. Así pues, la reducción del tiempo total de embarque tiene relación directa con la minimización de las interferencias entre pasajeros ya que un pasajero que no puede seguir adelante debido a otro pasajero que le bloquea el paso tardará más en llegar a su asiento.

Existen dos tipos de interferencias: interferencias entre asientos e interferencias en el pasillo. En la siguiente Figura 6 se explican gráficamente:

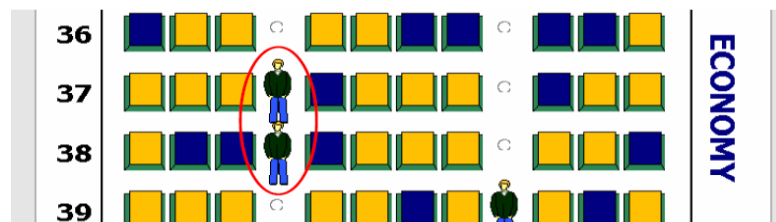


Figura 5: Interferencias en el pasillo

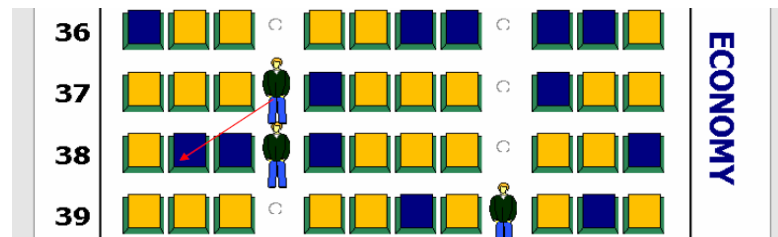


Figura 6: Interferencias entre asientos

Las interferencias entre asientos ocurren cuando otro pasajero está sentado entre el pasillo y el asiento asignado del pasajero que embarca.

Las interferencias en el pasillo ocurren cuando un pasajero está ocupando una fila y los pasajeros de detrás deben esperar hasta que el pasillo quede libre otra vez.

Interferencias fuera del avión

Existen otro tipo de interferencias que ocurren fuera del avión cuando se llama a los pasajeros a embarcar, como por ejemplo, la llegada tardía de los pasajeros que deberían haber entrado cuando era su turno o de los pasajeros transfer. Otro tipo de interferencias son las que ocurren en el control de la puerta de entrada donde los agentes pueden impedir el paso por exceso de equipaje o debido al lector de tarjetas ya que puede estropearse.

ii) Equipaje de mano

El equipaje de mano que llevan los pasajeros es un factor que está directamente relacionado con el tiempo total de embarque. A medida que los pasajeros van entrando en el avión, van guardando el equipaje en la parte superior de los asientos pero a medida que el avión se va llenando aumenta la dificultad en encontrar sitio para colocar el equipaje. De esta forma, existen pasajeros que deben desplazarse a otras filas para poder guardar su maleta de mano interfiriendo con otros pasajeros que se encuentran en el pasillo.

- iii) Pasajeros con asiento incorrecto

Otra posibilidad o causa del aumento del tiempo total de embarque es la del pasajero que se sienta en un asiento incorrecto. Este pasajero deberá moverse arriba o abajo cuando el pasajero del asiento llegue, molestando al resto de pasajeros que ya se encuentran sentados en la misma fila.

SECCIÓN 2

9. Estrategias de embarque

No existe una estrategia de embarque universal que sea eficiente en cada uno de los embarques que se llevan a cabo alrededor del mundo. Cada compañía aérea debe velar por implantar aquella estrategia que mejor se adapte a su cultura y su nivel de servicio al cliente, que sea flexible a las características del avión, al nivel de ocupación o a los pasajeros que llegan más temprano o más tarde a su turno de embarque. Además, el tiempo total de embarque varía dependiendo de si se realiza por *finger* o por remoto. Si se embarca por *finger* y con solo una puerta de embarque, el tiempo total de embarque es un poco mayor al del tiempo total de embarque por remoto ya que existen dos puertas de embarque, la delantera y la trasera. Si se habla de aviones de mayor envergadura la mejor opción es embarcar a los pasajeros por las diferentes puertas de embarque a través de los *fingers* (existen hasta tres puertas de embarque, con un *finger* para cada una).

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

A. *Back-to-front*

Es la estrategia más utilizada por la mayoría de aerolíneas con flota grande y pequeña. Si se lleva a cabo esta estrategia, primero se embarca la primera clase y luego se llama a los pasajeros por grupos para embarcar, siguiendo la secuencia de atrás hacia delante (3, 4, 5, 6, 7 y 8).

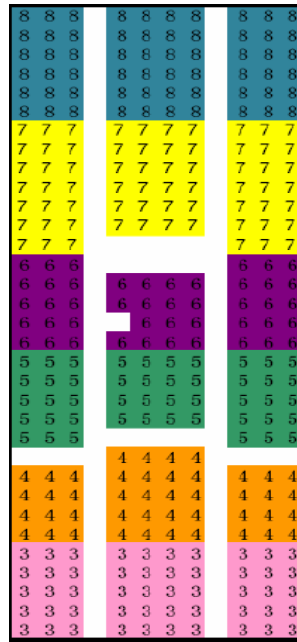


Figura 7: Estrategia back-to-front

Es la estrategia más común al ser simple de implementar y fácil de entender. También, permite a grupos y familias viajar juntas. Como desventajas, no existen evidencias de que sea la más eficiente y existen grandes interferencias entre asientos. Las compañías aéreas que la utilizan son American Airlines, British Airways y Air Canada, entre otras.

B. *Outside-Inside*

La estrategia *outside-inside* también conocida como estrategia WilMA (*window-middle-aisle*) consiste en embarcar a los pasajeros de primera clase, pasajeros con asiento asignado al lado de la ventana, luego los asientos de en medio y finalmente, los asientos del pasillo. Como ventajas esta estrategia tiene menos interferencias y si el embarque se realiza correctamente se eliminan las interferencias de asiento por completo. Como desventaja obliga a los pasajeros y grupos a embarcar separados y en diferentes momentos. Existe la posibilidad de combinar la estrategia WilMA con la estrategia *back-to-front* que resulta en una estrategia híbrida y, a veces, más eficiente.

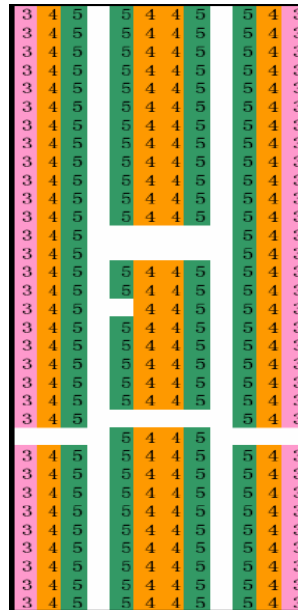


Figura 8: Estrategia WilMA

C. Zona de rotación o *rotating zone*

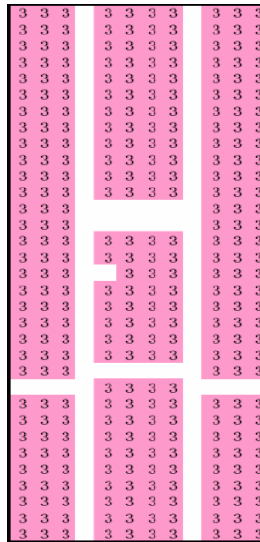
Esta estrategia consiste en embarcar por ultimo a los pasajeros que se sientan en medio del avión. Los pasajeros se agrupan por zonas y embarcan primero los de la parte delantera, luego parte trasera y otra vez delantera, así sucesivamente de manera que se va rotando. La primera clase siempre embarca primero.



Figura 9: Estrategia por zonas o bloques

D. *Random* o aleatoria

La estrategia *random* consiste en embarcar a los pasajeros de forma totalmente aleatoria por lo que solo existe una zona. Los pasajeros de primera clase vuelven a embarcar primero y luego van embarcando todos los otros pasajeros que tienen asiento asignado, es el proceso conocido como FIFO (*first in- first out*). El número de interferencias entre pasajeros suele reducirse ya que la gente va entrando aleatoriamente lo que hace reducir las interferencias entre pasajeros.



E. Asientos no asignados

Es la estrategia que consiste en embarcar a los pasajeros cómo y cuando quieran sin tener previo asiento asignado por lo que pueden sentarse donde quieran. El incentivo de este proceso es que el primero que entra, es el primero que encuentra el mejor sitio para luego poder desembarcar rápido. Sin embargo, este proceso no resulta ser de gran satisfacción para el cliente y normalmente, lo utilizan las compañías de bajo coste como Ryanair y Southwest Airlines. Como ventajas existe la posibilidad de que las interferencias entre pasajeros se reduzcan porque el pasajero se sienta en el primer asiento que ve libre. Como desventajas puede ser que las familias y grupos que viajan juntos no puedan sentarse en la misma fila si son los últimos en embarcar.

En la Figura 11 se pueden apreciar cada una de las estrategias utilizadas por las principales compañías aéreas estadounidenses.

Major US airlines	Boarding method
American Airlines	Traditional block method By groups, starting at the rear of the aircraft and moving forward, about 1/5 of the rows at a time
Continental Airlines	Traditional by-row method By rows, starting at the rear of the aircraft and moving forward, about 1/4 of aircraft at a time
Delta Airlines	Non-traditional method By zones, starting with the back few rows, followed by the middle and then front sections, then back to a rear section
Northwest Airlines	Random boarding method Passengers line up and take their assigned seat in no particular order
Southwest Airlines	Open seating method Passengers are assigned a group and boarding number based on check-in times. After group is called, passengers take a position next to the column representing their number and proceed onto the aircraft. Passengers choose their own seats once onboard
United Airlines	Non-traditional method WilMA—Window seats first, followed by middle, then aisles
US Airways (America West)	Non-traditional method Reversed pyramid— window seats first, followed by middle, then aisle and loading diagonally

Figura 11: Estrategias utilizadas por las principales compañías de EE.UU

La compañía aérea US Airways utiliza un método no tradicional llamado pirámide inversa (Figura 12). 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. Así pues, se puede considerar una estrategia híbrida entre la estrategia *back to front* y la estrategia WMA la cual permite acomodar pasajeros que viajen juntos. En este trabajo la llamaremos estrategia *optimization*.

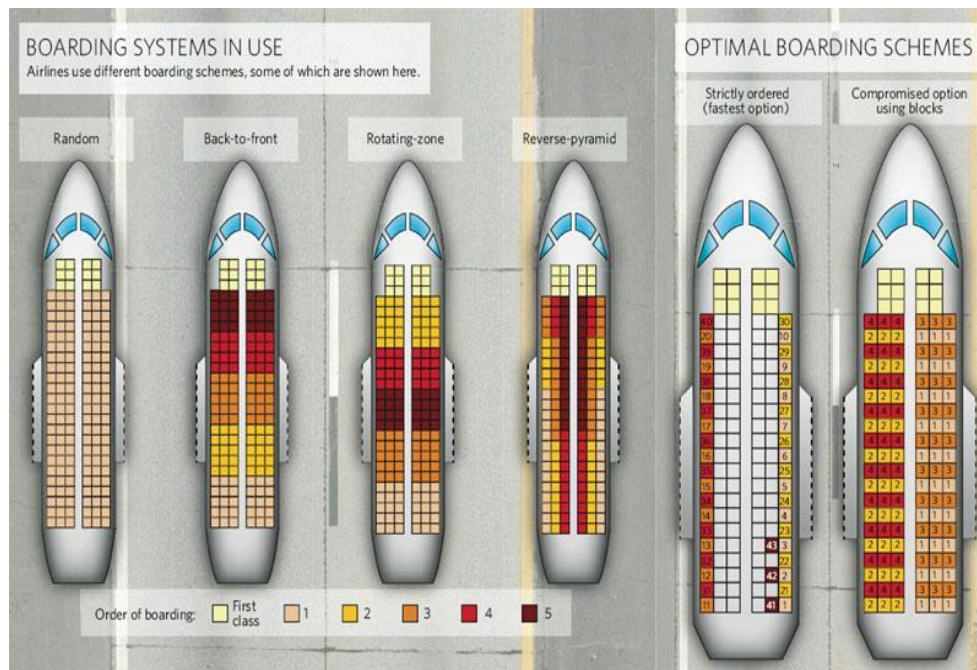


Figura 12: Diferentes estrategias en uso y estrategias óptimas

SECCIÓN 3

10. Revisión de la literatura

Visión Global

El embarque de pasajeros ha sido estudiado a lo largo del tiempo. Cabe decir que la mayoría de los estudios se enfocan más a la simulación que no a un enfoque analítico/teórico. **Marelli et al. (1998)** estudiaron un modelo de simulación de embarque y desembarque de pasajeros para probar diferentes estrategias con diferentes configuraciones de un avión Boeing 757; **Van Landeghem and Beuselink (2002)** exploraron diferentes patrones de embarque; **Van den Briel et al. (2003, 2005)** estudiaron el problema del embarque mediante programación entera, problemas de asignación no lineal y simulación con muestras de datos reales; **Ferrari y Nagel (2005)** usaron diferentes esquemas para evaluar diferentes estrategias y diseñaron un nuevo modelo que consistía en el embarque de grupos reducidos y concluyeron que las estrategias más eficientes eran las que separaban a grupos que viajaban juntos por lo que la satisfacción al cliente se veía afectada. Además, la estrategia *random* era la que peor funcionaba debido al desorden existente en el embarque, al aumento de interferencias mientras iba progresando el embarque y debido a que no era la más adecuada para la primera clase de pasajeros o *business class* en términos de satisfacción al cliente. Éstos coincidieron con **Van Landeghem y Beuselink (2000)** al decir que las estrategias *out-in* y *reverse pyramid* eran las más eficientes; **Bazargan (2007)** analizó las diferentes interferencias existentes entre pasajeros

que causaban el aumento del tiempo de embarque y diseñó un modelo de programación entera para minimizar dichas interferencias; **Bachmat y Elkin (2008)** estudiaron los límites del rendimiento de la estrategia *back-to-front*; **Nyquist y McFadden (2008)** analizaron algunas estrategias de embarque de la manera más efectiva en costes sin dejar aparte la satisfacción al cliente; **Steffen (2008)** utilizó el algoritmo de optimización Monte Carlo llamado *Markov Chain* y a través de simulación estudió el orden de los pasajeros para minimizar el tiempo de embarque; **Steiner y Philipp (2009)** exploraron varias acciones que se llevaban a cabo, dentro y fuera del avión, construyeron un modelo de simulación y usaron muestras de observaciones del aeropuerto de Zurich para calibrar el modelo.

Muchos de estos estudios no tienen en cuenta el total de factores que intervienen en el proceso de embarque y en su ralentización, como por ejemplo, las propiedades dinámicas de los pasajeros, por lo que no describen completamente el proceso de embarque. De los estudios considerados anteriormente, unos se centran en la estructura física del avión (*layout*) y la localización de los asientos y otros, por otra parte, se enfocan más explícitamente en las características individuales de los pasajeros, como es el caso de **Tang et al. (2012)** que usaron la teoría del flujo peatonal para estudiar el embarque de pasajeros.

Casos de estudio específicos

A continuación, se explican con más detalle algunas de las referencias seleccionadas.

Marelli et al. (1998) utilizaron el modelo PEDS (*Boeing Passenger Enplane/Deplane Simulation*) para simular algunas estrategias de embarque en un avión Boeing 757. El modelo permitía estudiar diferentes escenarios basándose en el comportamiento de los pasajeros en el embarque y con diferentes modelos de avión. Se concluyó que la estrategia *out-in* reducía el tiempo de embarque significativamente.

En la Figura 1 se observa que utilizando una estrategia tradicional en un Boeing 757-300 con capacidad para 240 pasajeros, el proceso de embarque duraba unos 26 minutos y el tiempo total de *turnaround* era de 59 minutos. Eran 6'5 minutos más que en el proceso de embarque en un Boeing 757-200 con una diferencia de 39 pasajeros.

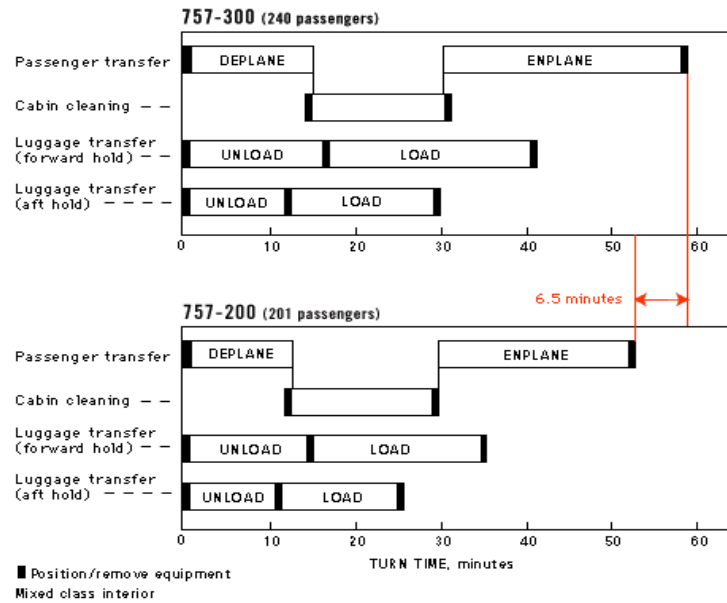


Figura 1: Tiempo de turnaround en diferentes aviones

Con el modelo PEDS se obtuvieron unos resultados sorprendentes. En la Figura 2, donde se puede observar una representación del tiempo de *turnaround*, se visualiza que utilizando sólo la puerta 2 el tiempo de embarque se reduce a un minuto y utilizando ambas se reduce a 5 minutos. También encontraron que utilizando la estrategia *out-in* y embarcando por ambas puertas, el tiempo total de embarque se reducía hasta 17 minutos.

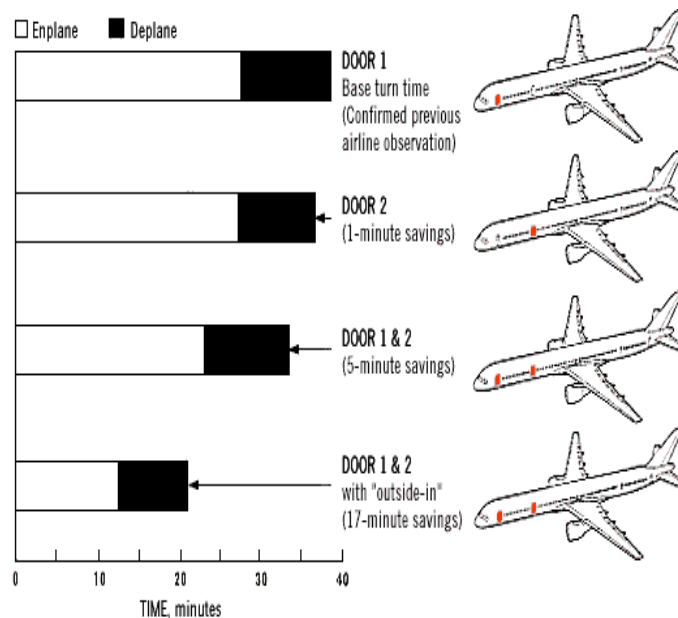


Figura 2: Ahorro en tiempo según puertas de embarque

Ferrari y Nagel (2005) pusieron especial énfasis en las perturbaciones existentes en el embarque de pasajeros. Su estudio se basó en el de **Van Landeghem y Beuselinck (VLB)**. Las

estrategias desarrolladas en este estudio fueron: *block*, *half_block*, *block_des*, *block_X_alt_Y*; *row*, *half_row*, *row_alt_Y*; *letter* y *seat*. La estrategia *letter* consistía en la llamada por parte de los agentes de *handling* de los siguientes grupos: *letter_wintocorr* (F, E, D, A, B, C), *letter_alt* (F, A, E, B, D, C) y *letter_outsidein* (F, A), (E, B) y (D, C). Las estrategias *letter* y *seat* obligaban a separar grupos de viajeros. Haciendo uso de sistemas de nombramiento de grupos de pasajeros, estos iban embarcando. En la Figura 3 se pueden comprobar dichas estrategias:

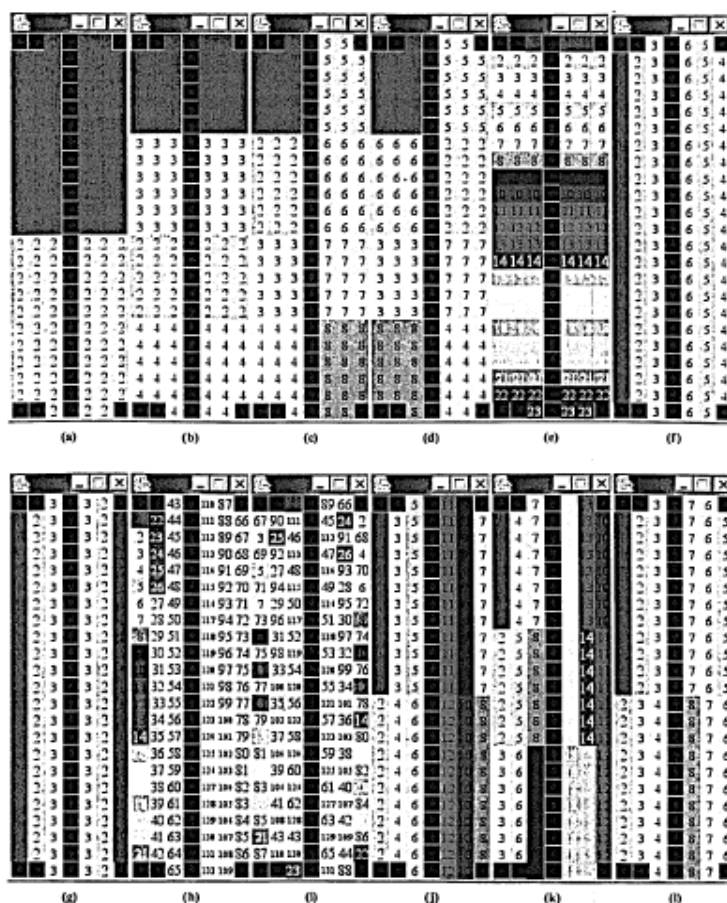


FIGURE 1 Graphical representation of boarding strategies: (a) block_2_des, (b) block_4_alt_1, (c) halfblock_4_des, (d) halfblock_4_des_mix, (e) halfrow_des, (f) letter_wintocorr, (g) letter_outsidein, (h) seat_des_row_letter, (i) seat_des_row_alt_letter, (j) seatgr_2_des_row_letter, (k) seatgr_3_des_row_letter, and (l) pyramid_2_des.

Figura 3: Diferentes estrategias de embarque

Cinco réplicas de cada estrategia fueron simuladas sin consideración de las perturbaciones y se concluyó que la mejor estrategia era por asientos (*by seat*), concretamente, la *seat_des_row_letter* y que el embarque por bloques (método *block*) era menos eficiente que el método *random* el cual no necesitaba un sistema *call-off*. Concluyeron que una mejora del método *block* sería ir alternando la secuencia de grupos de embarque.

Para poder analizar las estrategias incluyendo las perturbaciones eliminaron el concepto de tiempo total de embarque y se empezó a utilizar el tiempo promedio del peor caso de

embarque (*average worst case*). En la Figura 4 se puede observar que las estrategias que tienen un promedio de rendimiento bueno también tienen un buen rendimiento en el peor de los casos. La diferencia entre el promedio estándar y el promedio de bajo rendimiento aumenta a medida que el tiempo de embarque medio aumenta.

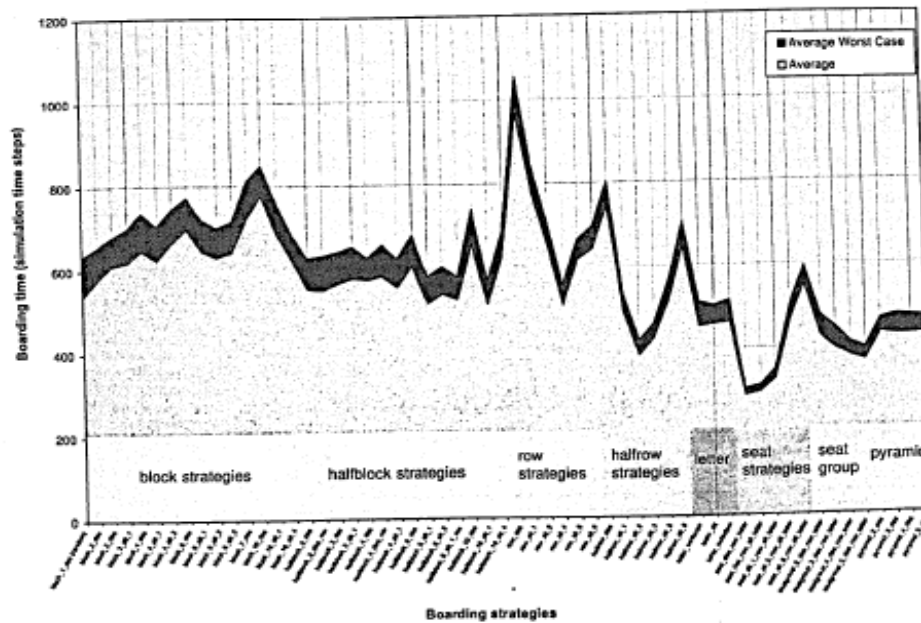
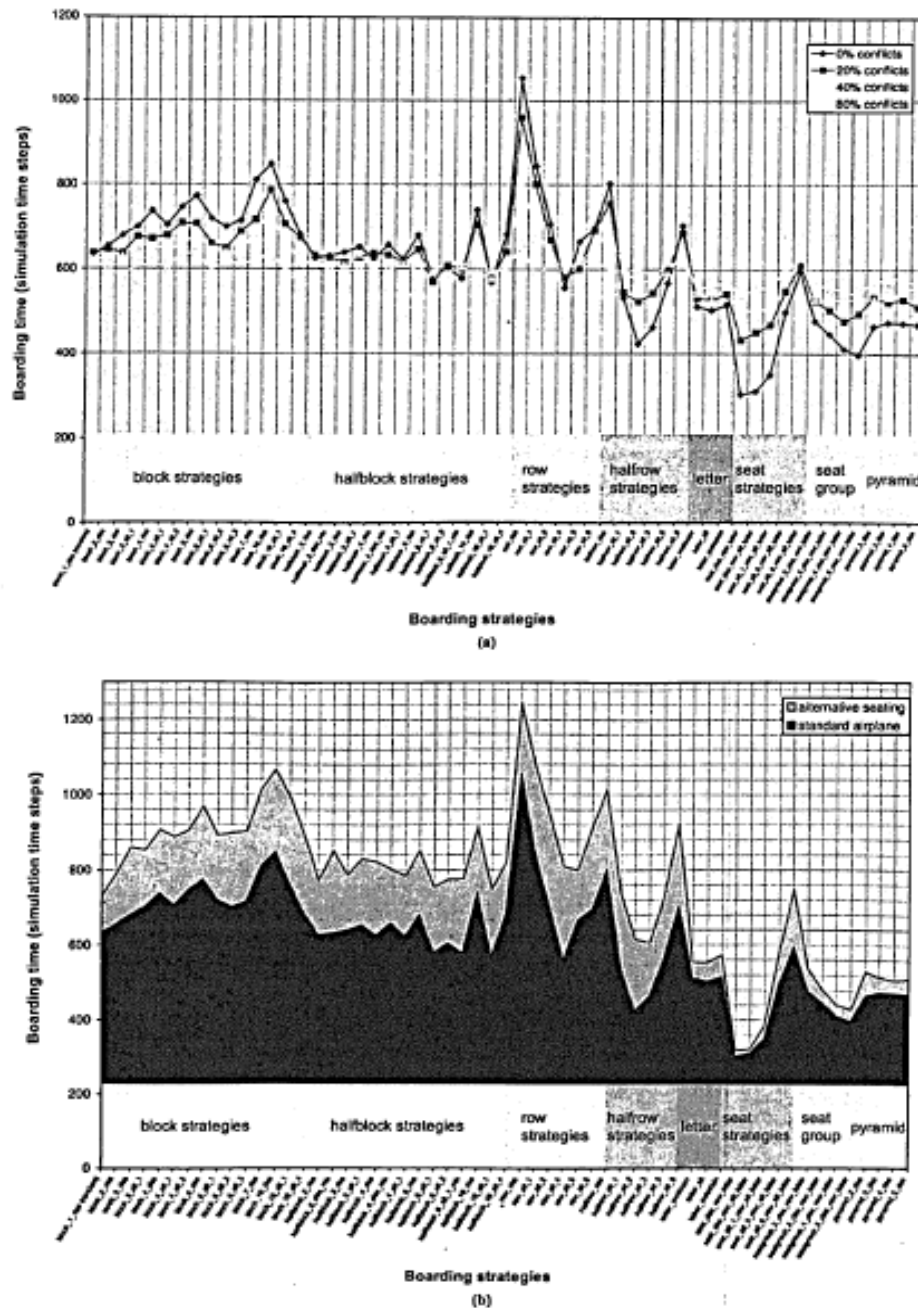


Figura 4: Rendimiento en el mejor y peor de los casos

A continuación, se estudió la robustez de estas estrategias bajo las perturbaciones, las cuales fueron incluidas en el modelo. Se estudió el efecto que tenían los pasajeros que llegaban tarde en el momento de embarcar. Así pues, se analizó el tiempo promedio de embarque en el peor de los casos (Figura 5a) con un 0%, 20%, 40% y 80% de pasajeros que entraban tarde. La Figura 5b muestra el promedio en el peor de los casos para un avión estándar de 8 asientos por fila, en vez de 6, y así se analizó el efecto que tenía el diseño interior del avión en el tiempo de embarque. Los resultados enseñaron que no existía gran diferencia entre las dos posibilidades. En otras palabras, si el 20% de los pasajeros embarcaban en el momento incorrecto, la mitad más tarde y la otra mitad más temprano, el efecto de las perturbaciones podía verse reducido al 10% si a todos los pasajeros que querían entrar antes de hora se les denegaba el embarque. También, se concluyó que al aumentar la fracción de pasajeros que llegaban tarde la eficiencia de la estrategia *random* aumentaba. Las simulaciones enseñaban que con la existencia de perturbaciones las estrategias por bloque (*block*) funcionaban peor que la estrategia *random*.



Figuras 5 a y 5b: Tiempo promedio de embarque y tiempo promedio en el peor de los casos

Se continuó el trabajo analizando la estrategia *random* con la posibilidad de escoger el asiento por parte de los pasajeros y se concluyó que no se debía utilizar si el objetivo de la aerolínea era un embarque rápido y eficiente. Sin embargo, si la compañía centraba sus esfuerzos en mantener los costes generales de administración bajos y el avión normalmente no iba lleno, se aconsejaba dicha estrategia.

Finalmente, analizaban la susceptibilidad de los efectos que conllevaba la ocupación del avión (Figura 6). Con un nivel de ocupación mayor del 40% se podía observar que algunas estrategias funcionaban más eficientemente que otras. Con más del 50% no existía diferencia.

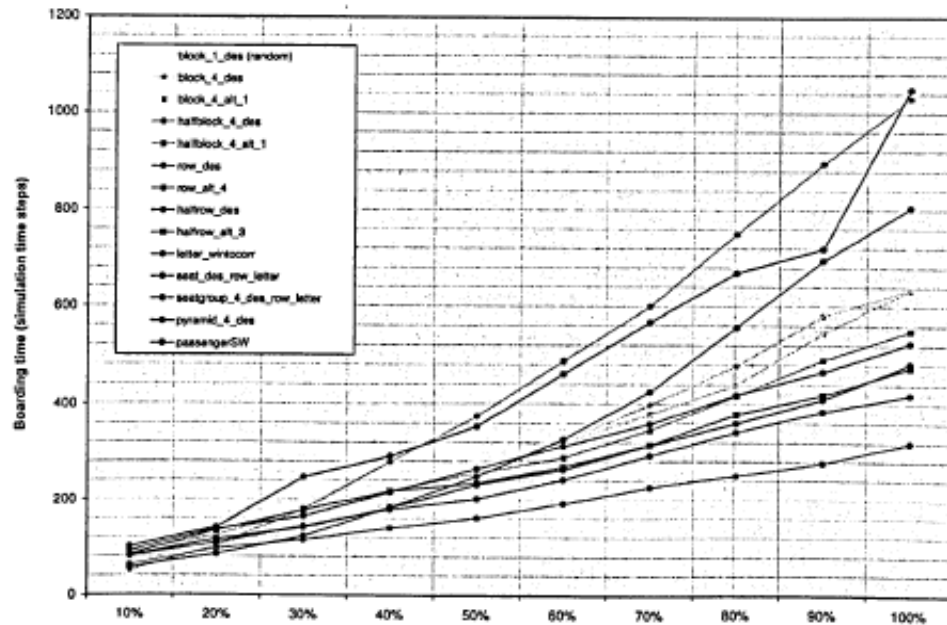


Figura 6: Efectos del cambio de nivel de ocupación

En conclusión, este estudio no recomendó las estrategias *half-block*, *row* and *half-row* y *letter (by column)*. Las estrategias por bloque eran ineficientes comparadas con la estrategia *random*. La mejor opción era la estrategia *seat group* ya que provee de excelente eficiencia y buena estabilidad combinada con un número pequeño de grupos de embarque. Además, existía la posibilidad de combinar la estrategia *seat group* con un patrón diagonal ya que funcionaba mejor que la estrategia *random* y se necesitaban pocos grupos de embarque. Y finalmente, que las buenas estrategias eran eficientes incluso en los cambios de diseño del avión y para ocupaciones menores al 100%.

Inman et al (2007) analizaron que estrategia era más eficiente dependiendo del tipo de avión considerado. Utilizando las tres estrategias, según ellos, más comunes (*back-to-front*, *outside-inside* y *random*) examinó si había diferencias significativas en la media del tiempo de embarque en cada tipo de avión utilizando ANOVA (*Analysis of Variance*).

La clasificación según el tipo de avión era la siguiente: a) pequeño: 150 pasajeros; b) mediano: 270 pasajeros y c) grande: 740 pasajeros, AirBus 380.

Su análisis concluyó que para aviones pequeños y medianos, la estrategia que mejor funcionaba era la *random* y para tamaños grandes la estrategia que tiene mayor rendimiento era la *outside-in*. Así pues, con estas conclusiones se dedujo que a medida que el tamaño del avión aumentaba la estrategia debía ser más estructurada para que fuera más eficiente. Finalmente, recomendaron eliminar la estrategia *back-to-front* e implementar estrategias de embarque menos estructuradas ya que para ellos prevalecía la satisfacción al cliente. Sin embargo, este trabajo presentaba una serie de limitaciones como, por ejemplo, la no consideración de la primera clase, clase *Business* y pasajeros con necesidades especiales. También se suponía que los pasajeros iban directamente a su sitio, sin equivocarse de asiento, ya que en este estudio se consideraba que este factor tenía muy pequeño efecto en el tiempo total de embarque.

Los resultados, en segundos, de este estudio fueron:

- **Avión Pequeño**

<i>Out to In</i>		<i>Random</i>		<i>Back to Front</i>	
Mean	1124.92	Mean	953.4	Mean	1517.36
Standard Deviation	59.6301	Standard Deviation	42.36094	Standard Deviation	87.42408

- **Avión Mediano**

<i>Out to In</i>		<i>Random</i>		<i>Back to Front</i>	
Mean	1733.78	Mean	1539.4	Mean	2768.96
Standard Deviation	68.8640453	Standard Deviation	57.6506014	Standard Deviation	134.3036401

- **Avión Grande**

<i>Out to In</i>		<i>Random</i>		<i>Back to Front</i>	
Mean	1538.74	Mean	1591.7	Mean	1589.98
Standard Deviation	12.86636	Standard Deviation	21.31996	Standard Deviation	16.53751

Con estos resultados, se concluyó que en cada tipo de avión existía una estrategia que funcionaba mejor en base a la media del tiempo de embarque. Para aviones pequeños y medianos, *random* y para aviones grandes, *out-to-in*.

Evan Herbst (2007) analizó las estrategias de la figura 7: rotación de zonas, *outside-in*, por bloques, pirámide invertida, *random* con asientos asignados y *random* con asientos sin asignar. El objetivo principal era estudiar qué estrategia encajaba en cada tipo de avión.

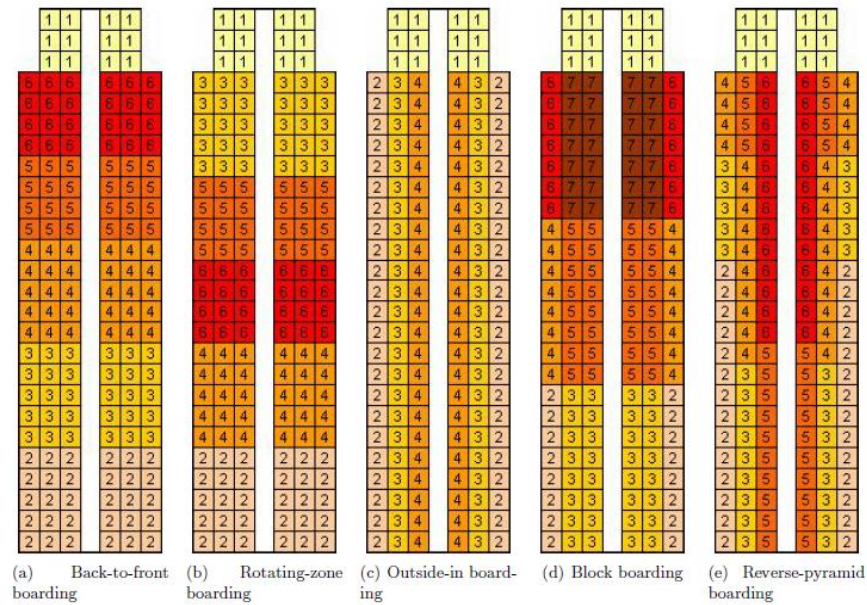


Figura 7: Estrategias analizadas por Herbst

Las medidas de rendimiento que se usaron fueron cuatro: tiempo medio de embarque total, tiempo medio individual, tiempo máximo individual y tiempo máximo de embarque total.

Se utilizaron tres tipos de avión (Figura 8). Para tamaño pequeño el Boeing 737, tamaño mediano el Boeing 757 y para tamaño grande el Boeing 747.

Model	Class	Rows	Row Configuration	Total Seats
Boeing 737-400	First	3	2-2	144
	Economy	22	3-3	
Boeing 757-300	First	6	2-2	234
	Economy	35	3-3	
Boeing 747-400	Business	4	2-2-2	504
	Economy	4	2-3-2	
	Economy	42	3-4-3	
	Economy	4	2-4-2	

Figura 8: Tres diferentes tipos de avión

El modelo tenía dos funciones: modelar la llegada de los pasajeros, al *finger* en caso de existir cola, o al avión en caso de no existir cola y segundo, modelar el movimiento de los pasajeros dentro del avión.

Los pasajeros de clase *Business* y primera clase embarcaban primero. Los pasajeros de atención especial, la aceptación de los pasajeros a seguir los pasos de la estrategia indicada y el modelo de almacenaje de equipaje no se incluían en el modelo.

Los resultados de la simulación para cada tipo de avión fueron:

Boarding Strategy	Average boarding time				Maximum boarding time		
	Aircraft	95% CI	Personal	95% CI	Personal	95% CI	Aircraft
Back-to-front	29.0	[28.8, 29.2]	15.3	[15.3, 15.4]	28.1	[28.0, 28.1]	29.7
Reverse-pyramid	32.8	[32.6, 33.0]	15.4	[15.4, 15.4]	32.2	[32.2, 32.2]	33.6
Rotating zone	33.0	[32.7, 33.2]	16.2	[16.1, 16.2]	32.0	[32.0, 32.1]	34.4
Outside-in	35.5	[35.4, 35.6]	16.5	[16.5, 16.5]	35.3	[35.2, 35.3]	36.2

Boarding Strategy	Average boarding time				Maximum boarding time		
	Aircraft	95% CI	Personal	95% CI	Personal	95% CI	Aircraft
Outside-in	17.2	[17.1, 17.4]	8.8	[8.8, 8.8]	17.0	[16.9, 17.0]	18.2
Reverse-pyramid	18.2	[18.1, 18.4]	9.4	[9.3, 9.4]	17.7	[17.6, 17.7]	19.0
Back-to-front	26.0	[25.7, 26.4]	13.7	[13.6, 1.7]	25.4	[25.3, 25.6]	28.7
Rotating zone	27.1	[26.8, 27.5]	14.0	[13.9, 14.0]	26.6	[26.4, 26.7]	29.0

Boarding Strategy	Average boarding time				Maximum boarding time		
	Aircraft	95% CI	Personal	95% CI	Personal	95% CI	Aircraft
Outside-in	10.5	[10.4, 10.6]	5.3	[5.3, 5.3]	10.3	[10.2, 10.3]	10.9
Reverse-pyramid	10.7	[10.6, 10.8]	5.7	[5.6, 5.7]	10.1	[10.1, 10.2]	11.2
Back-to-front	17.2	[16.8, 17.5]	9.0	[9.0, 9.1]	16.7	[16.5, 16.8]	18.9
Rotating-zone	18.4	[18.0, 18.8]	9.5	[9.4, 9.6]	17.9	[17.8, 18.1]	20.9

Figura 9: Resultados para los tres tipos de avión

Los resultados de la Figura 9 dejaban en evidencia que las estrategias *outside-in* y la pirámide inversa eran las mejores para aviones de tamaño pequeño y mediano. La estrategia *back-to-front* parecía ser la que mejor encajaba en aviones de gran envergadura. Esto último podía explicarse al hecho de que para aviones grandes, los grupos de embarque son muchos más grandes por lo que, consecuentemente, las interferencias en pasillo y asientos están más extendidas a lo largo del avión. En todos los casos, la peor estrategia era la de rotación de zonas.

Por último, se hizo referencia a las interferencias que no se tuvieron en cuenta en el modelo: el almacenaje de equipaje, la compresión de los pasajeros dentro del avión y los pasajeros que embarcan antes o después de que su grupo de embarque haya sido avisado para ello.

En **2007** se estudió el proceso de embarque en un avión A380 con capacidad para 555 personas. Se combinaron las estrategias *out-in* y *back-to-front* para minimizar las interferencias entre asientos. Además, gracias a la existencia de dos pasillos las interferencias entre pasajeros e interferencias entre pasillo eran mínimas por lo que se concluyó que el método escogido en este estudio era más rápido que el embarque de un avión de un solo pasillo y con mucha menos capacidad.

En la Figura 10 se puede ver como se realizaba el embarque. Por el PLB A (*Passenger Load Bridges*) se realiza el embarque de la sección 1, primera clase, donde también se incluyen las personas con discapacidad o necesidades especiales. Los pasajeros los cuales su sección era

la 4 y la 5 (clase *Business*) y la sección 6 (clase económica) embarcaban por el PLB C y, finalmente las personas de las cuales su asiento se encontraba en las secciones 2, 3 y X+Y, clase económica, embarcaban por el PLB B.

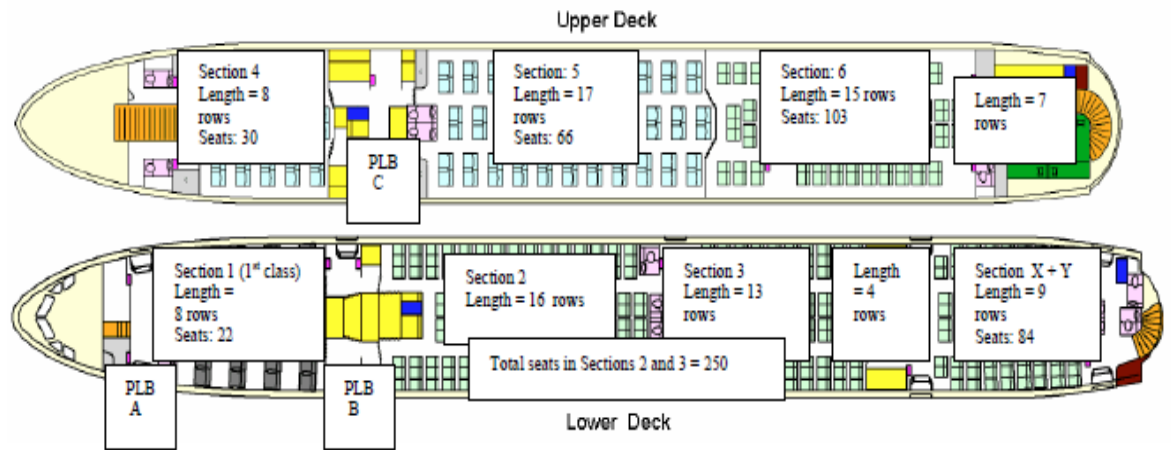


Figura 10: Tres puertas de embarque y diferentes secciones

La sección X+Y debía ser embarcada por los *fingers* PLB B y PLB C de manera que el tiempo de embarque se minimizara. La cuestión era decidir qué cantidad de pasajeros pasaría por cada uno. Así pues, X=7 filas y Y=2 filas.

En resumen, se puede observar en la Figura 11 la zona que se ocupaba mediante el PLB C y la zona que se ocupaba mediante el PLB B.

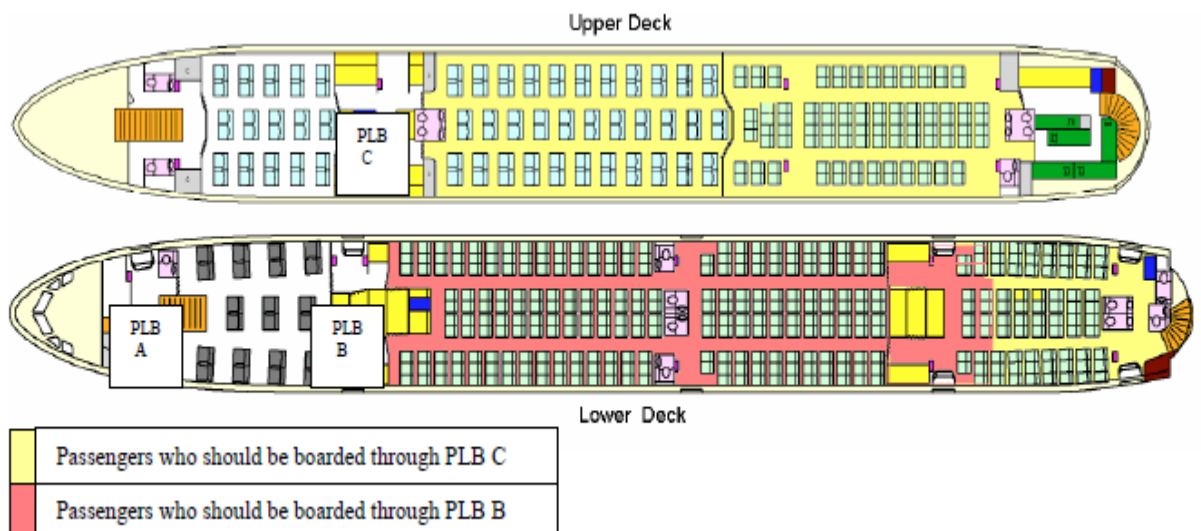
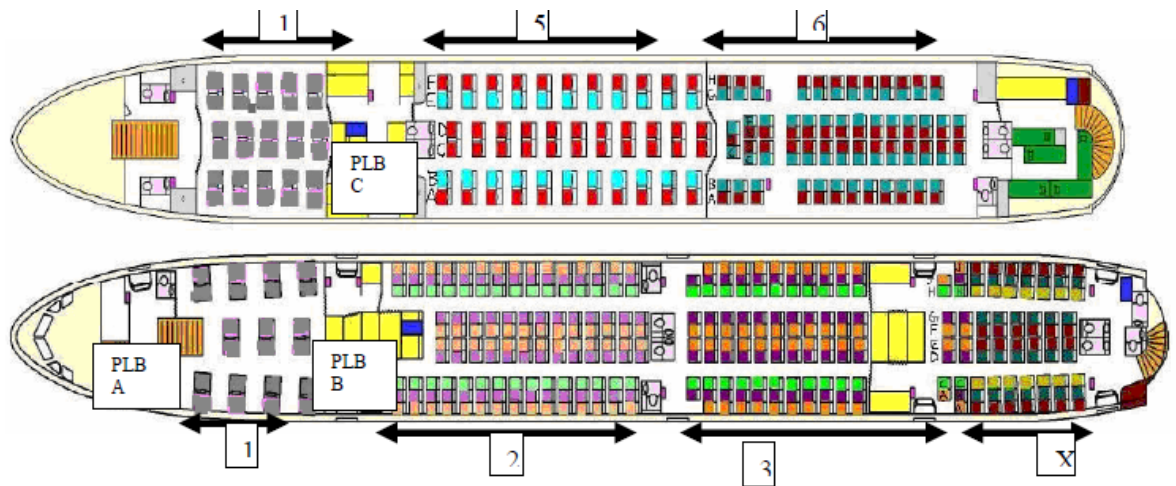


Figura 11: Distribución de pasajeros para cada una de las puertas de embarque

Por PLB A pasaban 52 pasajeros, por PLB B 268 y por PLB C 235 pasajeros. Para minimizar el tiempo de embarque se analizaron 4 métodos basados en el concepto básico de la estrategia *out-in* o *WILMA* y teniendo en cuenta que las últimas 7 filas de la parte trasera del primer nivel del avión se embarcaban por el PLB C y bajando luego unas escaleras. La Figura 12b corresponde al método 2 el cual fue el elegido como mejor método, tanto en la disminución del tiempo de embarque como en la facilidad para ser llevada a cabo en la práctica. Este método consistía en embarcar más pasajeros en la parte trasera del avión durante la 1 llamada de embarque (existían tres) y más pasajeros embarcando por la parte delantera del avión en las llamadas 2 y 3 manteniendo el método *WILMA*.

El método 1 y 4 resultaban en peores resultados. El método 1 consistía en embarcar al mayor número posible de pasajeros en cada una de las llamadas pero, sin embargo, en la última llamada de embarque existían muy pocos pasajeros. El método 4 consistía en llamar a los pasajeros de manera que se satisficiera la estrategia *WILMA* pero primero eran embarcados los pasajeros con asiento en la parte delantera, luego los pasajeros de en medio y finalmente, los pasajeros con asientos en la parte trasera. Este era el peor de los escenarios del método *WILMA* y se utilizaba, básicamente, para comparar cuánto mejor eran los tres métodos anteriores.

El método 3 (Figura 12a) resultó mejor que el método 2 (Figura 12b), pero debido a su falta de robustez a la hora de ponerlo en práctica se inclinó más por el método 2 el cual era más conveniente. El método 3 seguía la misma estrategia *WILMA* pero, además, utilizaba la estrategia *back-to-front*, por lo que el método 3 era una estrategia híbrida.



At each Passenger Loading Bridge (PLB), gate agents will make three calls as follows:

First Call for PLB A

Passengers with all seats in Sections 1 and 4

First Call for PLB B

Passengers with seats A, E, F and J in Section 3
Passengers with seats A, E, F and J in Section 2

First Call for PLB C

Passengers with seats A, E, F and H in Section X
Passengers with seats A, D, and H in Section 6
Passengers with seats A, C, D and F in Section 5

Second Call for PLB B

Passengers with seats B, D, G and I in Section 3
Passengers with seats B, D, G and I in Section 2

Second Call for PLB C

Passengers with seats B, D, G and I in Section X
Passengers with seats B, C, F and G in Section 6
Passengers with seats B and E in Section 5

Third Call for PLB B

Passengers with seats C and H in Section 3
Passengers with seats C and H in Section 2

Third Call for PLB C

Passengers with seats C and H in Section X
(Through calculations, we showed that X = the last seven rows of the last section of the lower deck)

Figura 12a: Método 3

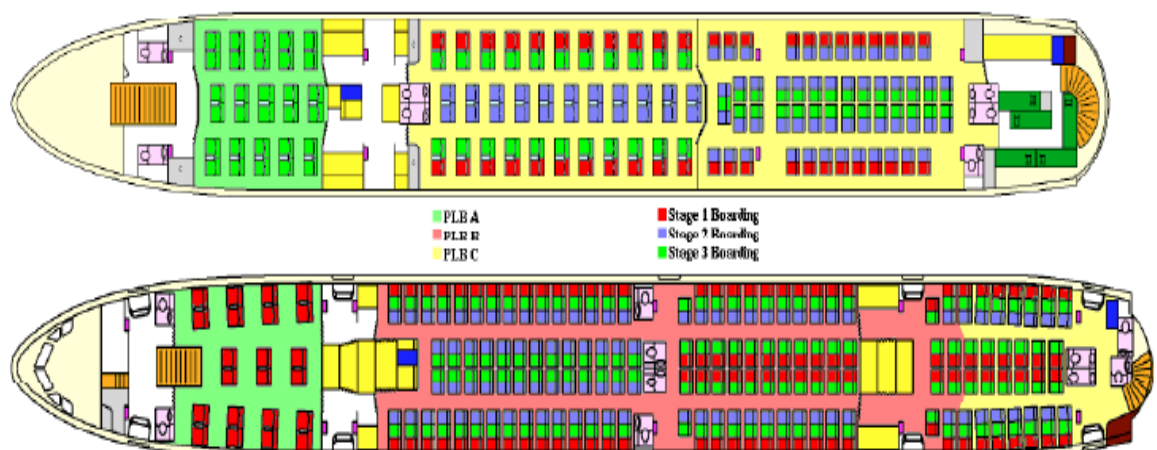


Figura 12b: Método 2

Al realizar la simulación observaron que el valor anteriormente encontrado para $X=7$ no era eficiente y que si se le añadía una fila más a la sección $X+Y$ el tiempo de embarque se reducía. Así pues, corrigieron el modelo por $X=8$ $Y=3$ por lo que se añadió una fila para embarcar por PLB C y se eliminó una fila para embarcar por PLB B.

Los resultados de la simulación en base a tres niveles de ocupación del avión eran:

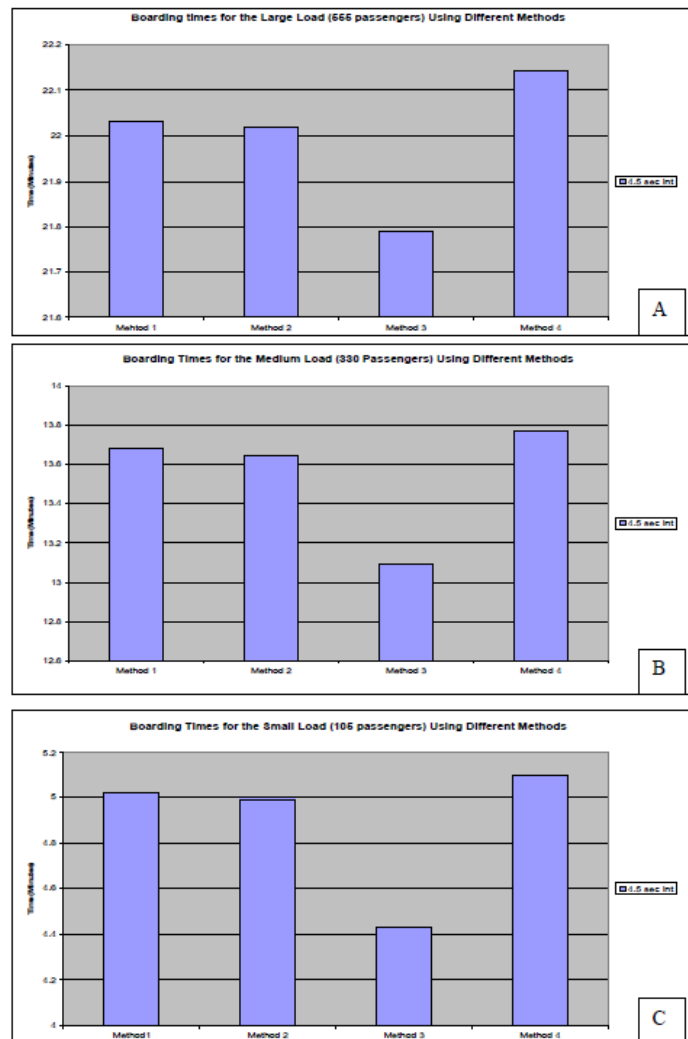


Figura 13: Resultados de la simulación en base a diferentes niveles de ocupación

Encontraron que el tiempo requerido para almacenar el equipaje de cabina tenía muy pequeño efecto para el tiempo total de embarque.

En resumen, el método 3 era 13 veces más rápido que el método 2 pero requería de dos llamadas más a pasajeros. Se escogió el método 2 porque era más simple para los despachadores de vuelo anunciar y gestionar el embarque.

Audenaert et al. (2009) no se basaron en las estrategias según la localización de los asientos sino que introdujeron nuevas estrategias basadas en las características individuales de los pasajeros las cuales también tenían que ser robustas a cualquier tipo de interferencia. Usaron la simulación basada en multi-agentes, es decir, que se podían modelar agentes autónomos y también las interacciones entre grupos de viaje. Se analizaron tres tipos de interferencias que no se habían tenido en cuenta hasta el momento; el grado de cumplimiento de la estrategia por parte de los pasajeros, los grupos de viaje y los pasajeros de tránsito. También se analizaron los diferentes efectos que tenía el nivel de ocupación de la aeronave en cada una de las estrategias.

Existen ocho tipos de parámetros (Figura 14), la mayoría basados en las características individuales de cada pasajero:

Parameter name	Parameter Value
Step multiplier	1
Path and seat ticks {min; modus; max}	{ 1.8 ; 2.4 ; 3 }
Install ticks {min; modus; max}	{ 6; 9; 30 }
Queue-delay ticks	5
Strategy compliance	100 %
air plane occupancy	100 %
Hand luggage distribution (1;2;3 pieces)	{60 % ; 30 % ;10 % }
Group Size {min; modus; max}	{ 1 ; 1 ; 1 }

Figura 14: Ocho parámetros basados en las características individuales de los pasajeros

El parámetro *path and seat ticks* se utilizó para modelar la velocidad de los pasajeros. El parámetro *group size* indica la cantidad de personas que viajan juntas las cuales son consideradas como un grupo. Por ejemplo, al primer miembro del grupo que sea llamado para embarcar le seguirá el resto del grupo y embarcarán todos juntos. Por último, comentar que el parámetro que hace referencia al modelo de almacenaje de equipaje es el mismo que utilizaron en su día **Ferrari y Nagel**. Sin embargo, en este modelo se incorpora la velocidad del pasajero suponiendo que si un pasajero se mueve lentamente también tarda en almacenar su maleta de mano.

Las estrategias tradicionales basadas en bloques y las estrategias pirámide fueron las analizadas en un primer punto en este trabajo. Como ejemplo, tenemos la estrategia por bloques *by_block_6_alt_3* (Figura 15) la cual significa que el avión está dividido en seis bloques saltando el bloque de tres en tres donde los pasajeros van embarcando según el bloque asignado. El embarque empieza por el final del avión y la secuencia es bloque 6, bloque 2, bloque 5, bloque 1, bloque 4 y bloque 3.

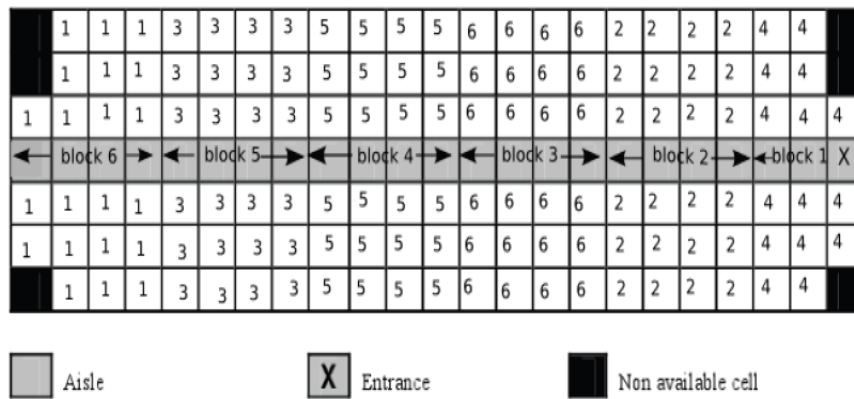


Figura 15: estrategia por bloques *by_block_6_alt_3*

Se concluyó que las estrategias *by_seat* y *by_pyramid* eran las que mejor funcionaban en comparación con la *random* pero al ser muy estructuradas, en la práctica, no podrían llevarse a cabo.

Como segundo punto, se analizaron tres estrategias basadas en las características de los pasajeros y se compararon con la estrategia *random*. La estrategia *by_pathticks* se basaba en el tiempo que un pasajero necesitaba para pasar de una celda a otra. Con esta estrategia se eliminaban la mayoría de las congestiones en el pasillo. Para poder eliminar las otras congestiones en el pasillo causadas por el almacenaje del equipaje se crearon dos estrategias más. *By_luggage_asc* la cual dejaba embarcar primero a los pasajeros con un equipaje de mano, luego dos y finalmente tres equipajes; *by_luggage_desc* funcionaba igual que la primera pero la cantidad de maletas era invertida. En la Figura 16 se puede apreciar que las nuevas estrategias funcionaban mejor que la *random* con una pequeña inclinación sobre la estrategia *by_luggage_desc*.

	Total Boarding			Individual boarding				Individual blocking			
			σ	Average		Maximum		Average		Maximum	
	Average			Average	σ	Average	σ	Average	σ	Average	σ
at_random	24,77	1,87		2,05	0,22	4,50	0,89	0,91	0,19	3,02	0,76
by_pathticks	23,95	2,11		1,95	0,15	4,39	0,51	0,81	0,13	2,78	0,59
by_luggage_asc	24,17	1,01		1,95	0, 11	4,65	0,45	0,81	0,10	3,16	0,53
by_luggage_desc	23,56	1,33		2,00	0,10	4,17	0,27	0,86	0,09	2,66	0,40

Figura 16: Comparativa de las tres nuevas estrategias con la estrategia *random*

En la sección donde se analizaban los grupos de viajeros se concluyó que las estrategias *by_seat* y *by_pyramid* funcionaban mejor aunque también cabe destacar que las estrategias diseñadas en este estudio también funcionaban bien.

Por último, cabe destacar que cada estrategia funcionaba de forma diferente dependiendo de cada interferencia y que cada aerolínea debía decidir qué estrategia utilizar dependiendo de unos parámetros como el nivel de ocupación o el tamaño del avión.

Bauer et al. (2009) desarrollaron un modelo de simulación para el proceso de embarque el cual tenía en cuenta diferentes estrategias y consideraba las variaciones individuales de los pasajeros. Lo más destacable de su trabajo fue el diseño de un nuevo método llamado parábola. El equipo descubrió que la mejor manera de embarcar era con la estrategia *out-in*. Además, el modelo fue diseñado de forma estocástica y usaron la teoría de colas para poder estudiar mejor los cuellos de botella y sus efectos en el proceso de embarque. Concluyeron que la estrategia más rápida era la *random* sin asientos asignados. Así pues, diseñaron un método de embarque en base a esta estrategia. Al conjunto de asientos se le atribuía una zona específica dependiendo del orden en que iban siendo ocupados, es decir, a los asientos que siempre se llenaban primero se les asignó la zona 1, al siguiente grupo de asientos que se ocupaban se les asignaba la segunda zona y así consecutivamente. La figura 17 ilustra el resultado de la simulación del método. El color azul-verde corresponde a los pasajeros que se sientan primero, mientras que el naranja-rojo representa a los pasajeros que son los últimos en sentarse. Se observa que las trazas de igual altura toman la forma de parábola. De aquí, el nombre del método.

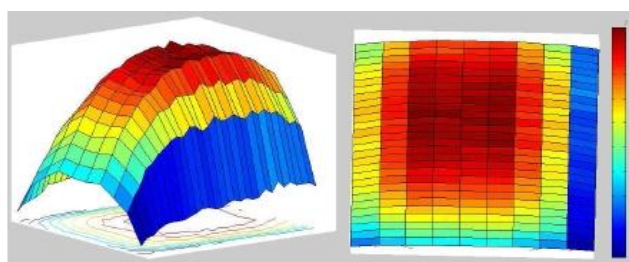


Figura 17: Método parábola

El equipo también investigó e hizo algunas conclusiones sobre el efecto de los parámetros. Analizaron el efecto de la velocidad del pasajero y concluyeron que no era importante para el embarque una velocidad muy elevada. En la figura 18 se puede observar como el tiempo del proceso de embarque no siempre disminuye con el aumento de la velocidad a la que caminan los pasajeros aunque cabe señalar que en la estrategia *back-to-front* sí que el tiempo de embarque se ve afectado por este parámetro.

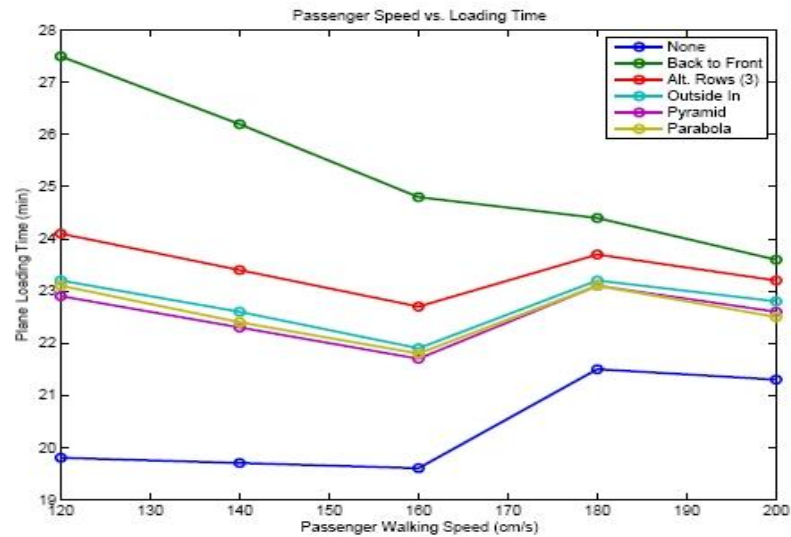


Figura 18: Velocidad del pasajero VS tiempo de embarque

Otro parámetro a analizar fue el efecto de los diferentes tiempos empleados para almacenar el equipaje (Figura 19). Mediante el cambio del tiempo medio de almacenaje en la simulación vieron que el tiempo de almacenaje debía ser lo mínimo posible ya que el tiempo total de embarque aumentaba considerablemente.

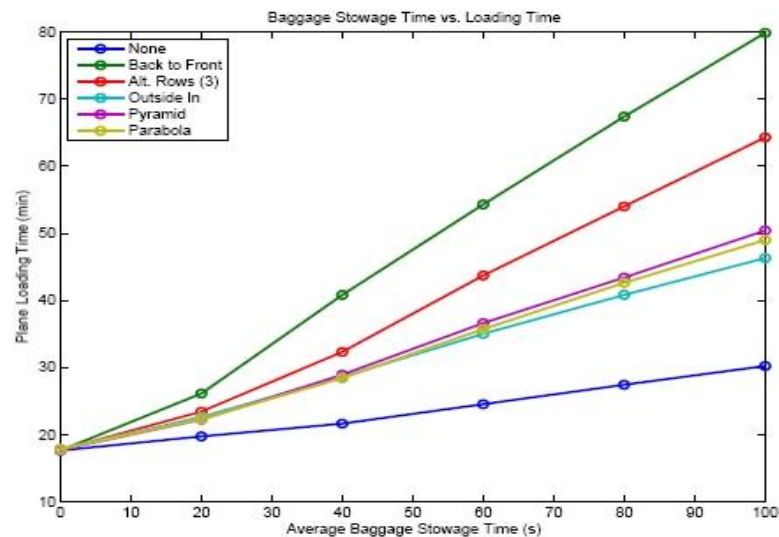


Figura 19: Tiempo de almacenamiento de equipaje VS tiempo de embarque

Después, estudiaron el efecto de cambiar la tasa de entrada al avión y concluyeron que era importante una adecuada velocidad de entrada (Figura 20). Así pues, se observaba una relación directamente proporcional entre el tiempo total de embarque y las sucesivas entradas al avión. Cuando aumentaba el retraso entre entradas, también aumentaba el tiempo total de embarque.

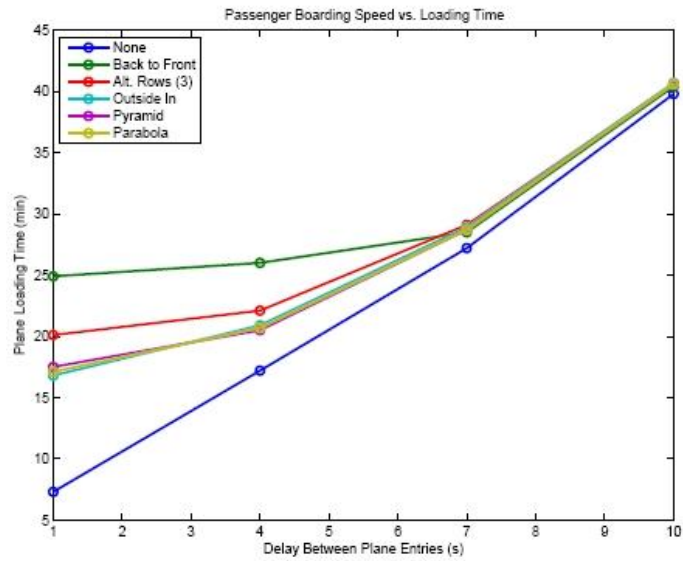


Figura 20: Velocidad de embarque del pasajero VS tiempo de embarque

Para verificar su modelo lo aplicaron a diferentes tamaños de aviones para comparar la velocidad de embarque (Figura 21). Las estrategias *out-in*, pirámide y parábola eran muy similares en el tiempo total de embarque.

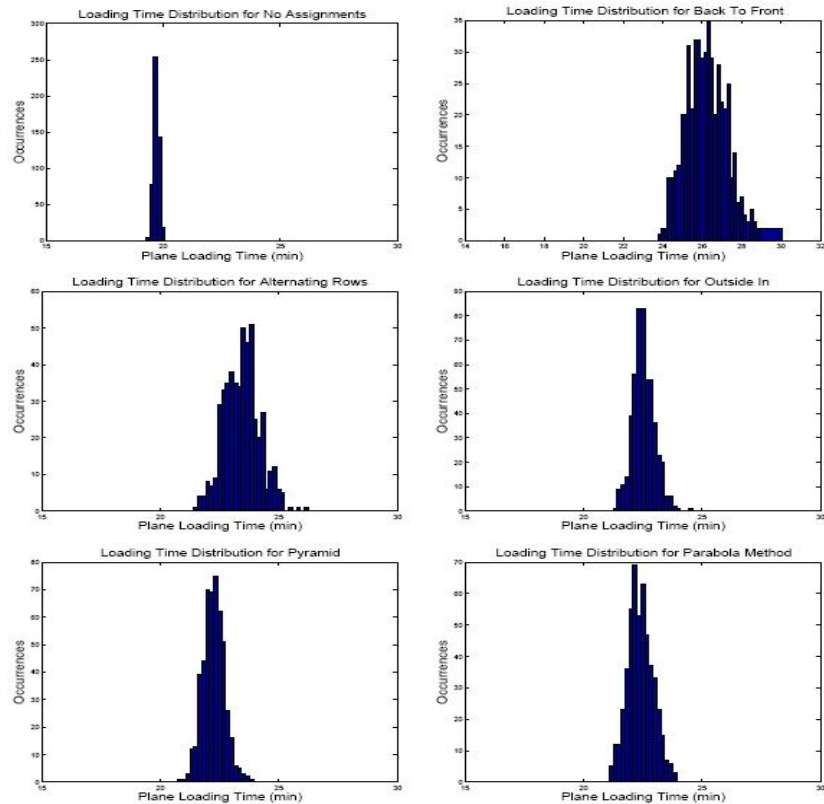


Figura 21: Distribuciones de tiempo para el embarque en cada tipo de avión

Bazargan et al. (2012) desarrollaron un modelo de simulación y optimización para un Airbus 380 el cual consta de dos pasillos y doble piso. El objetivo principal consistía en minimizar el número total de interferencias a través de la simulación. El avión utilizado es un Airbus 380-800 SQ de 471 plazas: 12 asientos en primera clase, 60 en clase *Business* y 399 asientos en clase *Economy*.

Configuration:
F12 C60 Y399
471 seats

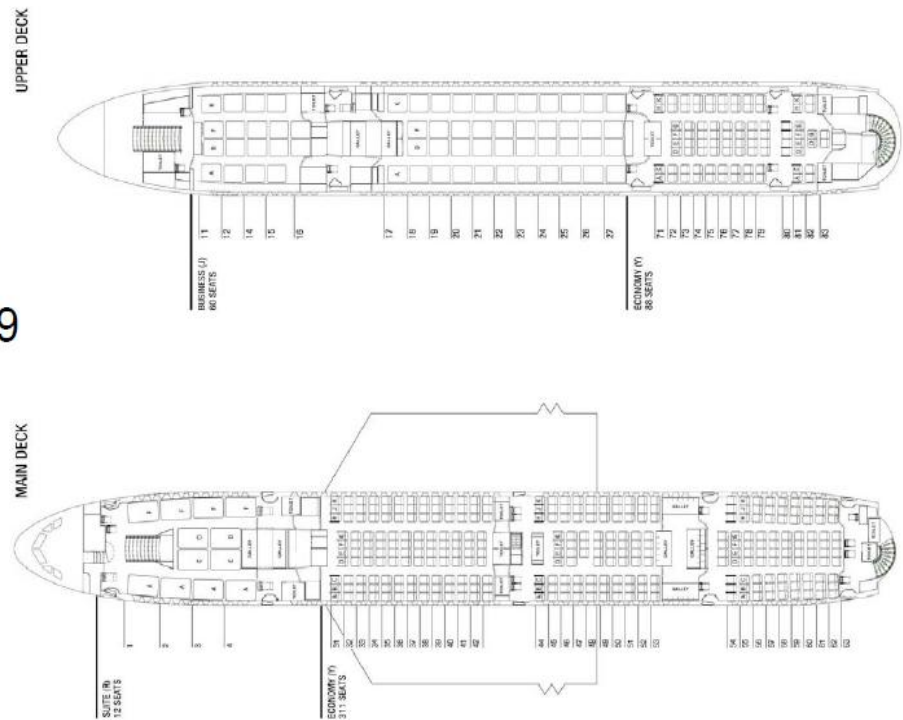


Figura 22: Modelo de Airbus 380-800

En este modelo no se incluyen diferentes zonas de embarque a través de diferentes puertas y no se simula menos de un 100% de nivel de ocupación ni el pre-embarque (familias con niños y pasajeros en silla de ruedas) ni los pasajeros sentados en asientos equivocados.

Tienen en cuenta parámetros como el tiempo de almacenaje de las maletas de mano, las interferencias entre los asientos de en medio y los del pasillo, la velocidad del pasajero entre filas, el tanto por ciento total de equipaje, el tiempo total para llegar del *finger* al avión, un 100% de nivel de ocupación y finalmente, la utilización de la primera, segunda y tercera puerta de embarque.

A partir de aquí, se va estudiando el tiempo total de embarque teniendo en cuenta el total de puertas de embarque disponibles, es decir, embarcar el avión entero por la puerta 1 y embarcando el piso de arriba mediante las escaleras. Después, se combina la puerta 1 con la puerta 2, es decir, el piso de arriba y primera clase se embarcan por la puerta 1 y el piso de abajo

a través de la puerta 2. Después de haber completado el embarque del piso de arriba, el cual abarca a menos pasajeros, se facilitará el acceso por la puerta 1 para seguir embarcando el piso de abajo. Finalmente se utiliza la combinación de las tres puertas para embarcar al total de pasajeros. Primeramente, se embarcan a los pasajeros de primera clase y a los pasajeros de las primeras filas del piso de abajo por la puerta 1. Paralelamente se embarcan a los pasajeros de las últimas filas del piso de arriba por la puerta 3 y a los pasajeros de las últimas filas del piso de abajo por la puerta 2. Finalmente, cuando se termine el embarque por las puertas 1 y 3 de los pasajeros del piso de arriba, se facilitará el paso para terminar de embarcar a los pasajeros de las últimas filas del piso de abajo.

Se utilizan las estrategias *back-to-front*, WilMA, *random* y una estrategia híbrida llamada *Optimization* la cual es una combinación de las estrategias *back-to-front* y WilMA.

Después de obtener el tiempo total de embarque para cada una de las estrategias y para cada uno de los escenarios comentados anteriormente, se disponen a comparar el tiempo total de embarque entre dos - tres puertas y entre una - dos puertas. Como se puede observar en las Figuras 23 y 24 se representan el tanto por ciento de pasajeros ya embarcados dependiendo de los minutos transcurridos.

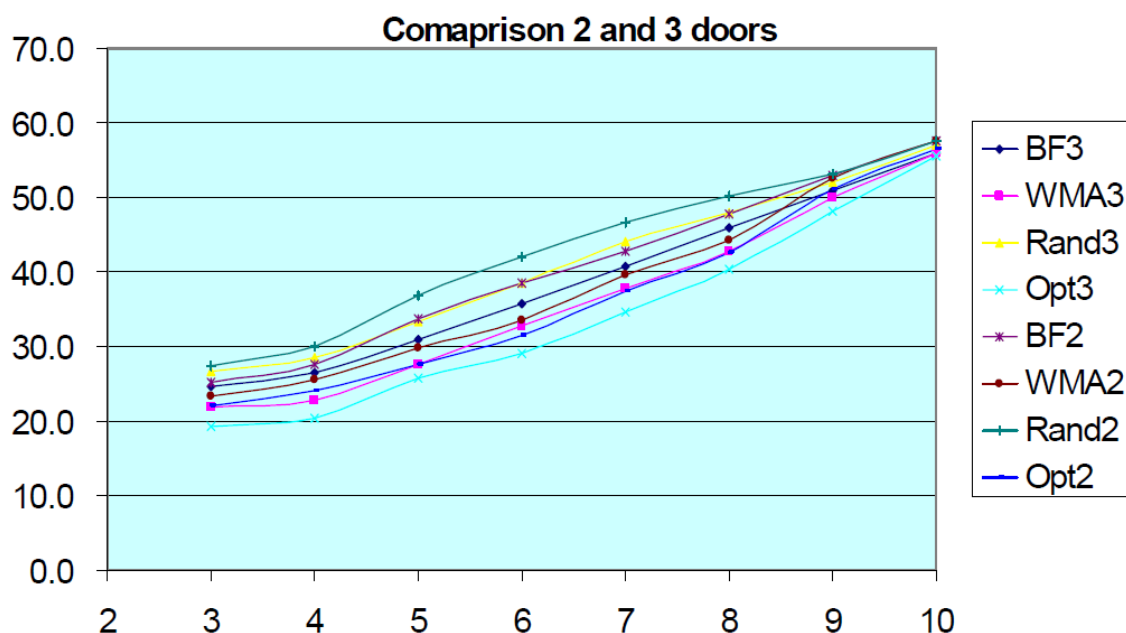


Figura 23: Comparativa de las estrategias para 2 y 3 puertas

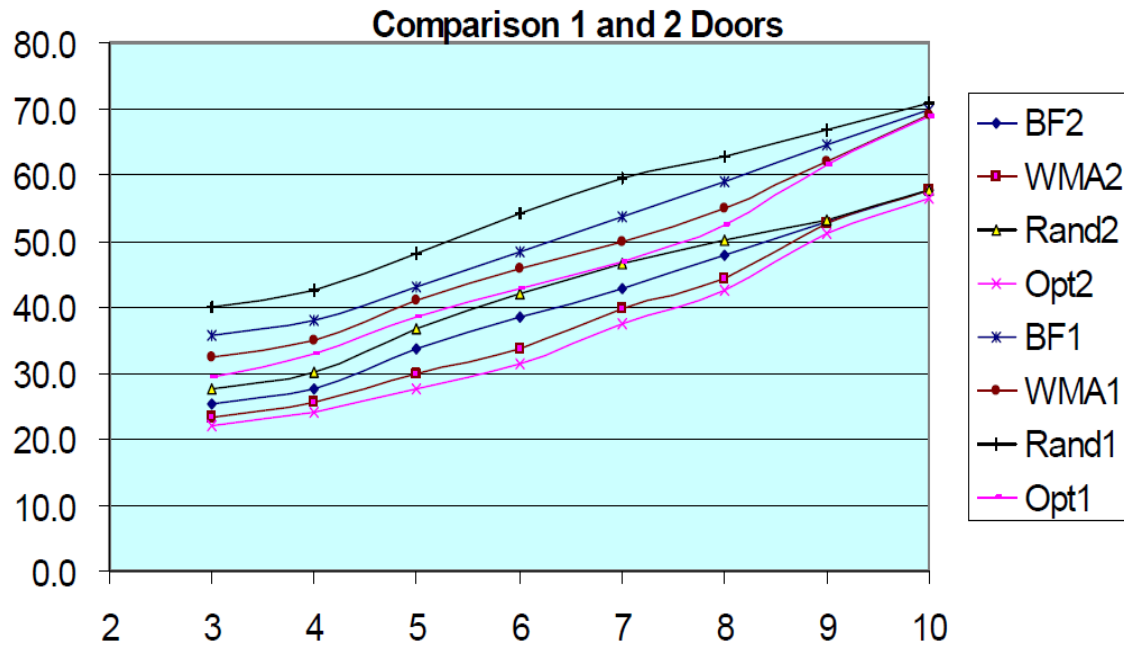


Figura 24: Comparativa de las estrategias para 1 y 2 puertas

Observando los dos gráficos anteriores se puede concluir que no existen grandes diferencias entre los tiempos totales de embarque para dos y tres puertas. Sin embargo, cabe señalar la existencia de principales diferencias entre los tiempos de embarque para una y dos puertas. Finalmente, la estrategia híbrida es la que encaja mejor en este tipo de aviones.

Cimler et al. (2012) analizaron las mismas cinco estrategias que Steffen y Hotchkiss. Se trataba de un modelo computacional basado en agentes, el objetivo del cual era minimizar las interferencias y, además, crear una nueva estrategia llamada *Kautzka 3*. Las cinco estrategias estudiadas fueron *random*, *wilma* o *out-in*, *back-to-front* en bloques de 4, *steffen* y *Kautzka 3* (Figura 22). La estrategia *kautzka 3* era una mejora del método *steffen* el cual tiene en cuenta el embarque en parejas para no separar familias o grupos que viajan juntos.

Front					
24					18
12					6
23					17
11					5
22					16
10				28	4
21					15
9				27	3
20					14
8				26	2
19					13
7				25	1

Front					
23	24				12 11
21	22				10 9
19	20				28 8 7
17	18				27 6 5
15	16				26 4 3
13	14				25 2 1

Figura 22: Método Steffen y Método Kautzka 3

La estrategia *steffen* que consistía en ir alternando los asientos de cada fila desde el fondo del avión hacia la entrada, funcionaba cuando el embarque se hacía por una puerta y el avión era solamente de un pasillo. Concluyeron que la media del tiempo de embarque para *steffen* era de 3'5 minutos, alrededor de 4 minutos para la *random* y *out-in*, 6 minutos para *back-to-front* y 7 minutos para la estrategia *block* en bloques de cuatro.

En cuanto a la longitud del avión comentar que a medida que iba aumentando, el método *steffen* aumentaba el tiempo total linealmente. Los métodos *wilma* y *random* eran menos eficientes debido a la distribución desigual de pasajeros que guardaban las maletas en paralelo en el compartimento. Este estudio permitía almacenar las maletas en paralelo, es decir, cada pasajero estaba adyacente al otro sin necesidad de espacio determinado entre los pasajeros.

En este estudio se llevaron a cabo dos experimentos:

- Comparación de las estrategias

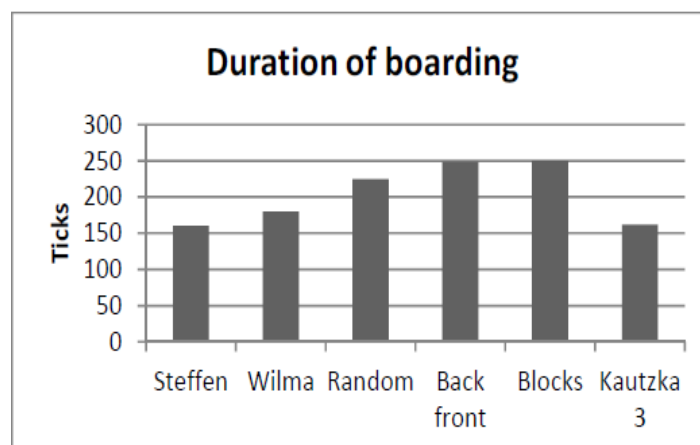


Figura 23: Comparativa de estrategias

En la Figura 23 se observa que el método *kautzka 3* es muy rápido y que los más ineficientes son los métodos *back-to-front* y por bloques. Los métodos *wilma*, *back-to-front* y *steffen* combinados (método *Kautzka 3*) eliminan todas las interferencias posibles entre los asientos y el pasillo. También permite embarcar en parejas, por lo que no obliga a separar familias o grupos.

- Impacto de últimos pasajeros (fuera de tiempo)

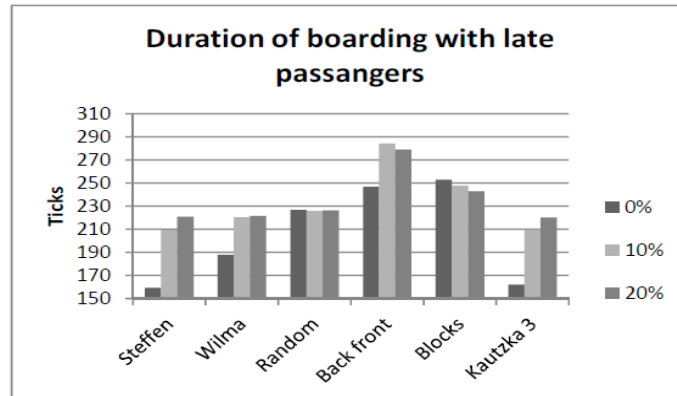


Figura 24: Duración del embarque con pasajeros que llegan tarde

En la Figura 24 podemos observar que los métodos *steffen* y *kautzka 3* son muy sensibles a la llegada fuera de tiempo de pasajeros debido al aumento de interferencias. Los métodos *wilma* y *back-to-front* no son tan sensibles pero sí que hay un aumento de media del 15%. Para el método *random* el factor de pasajeros que llegan tarde no afecta al tiempo de embarque. Para la estrategia de embarque por bloques se observa una relación inversamente proporcional con los pasajeros que llegan tarde. Finalmente, decir que esto es debido a que el aumento de pasajeros que llegan tarde hace cambiar gradualmente el método de bloques hacia el método *random* el cual obtiene mejores resultados.

Esta tabla nos resume algunos de los estudios mencionados en este trabajo:

Major studies	Authors	Journal	Method	Model	Major findings
Ghent University Study	Van Landeghem and Beuselinck (2000)	European Journal of Operational Research	Simulation	Bin occupancy model	<ul style="list-style-type: none"> • Best overall strategy: by seat • Best practical strategy: outside-in (seat group) • Average turn time: 30-60 min • Carry-on luggage causes the most congestion
Arizona State University Study	Van den Briel et al. (2005)	Interfaces	Binary integer programming (nonlinear assignment model)	Interference model	<ul style="list-style-type: none"> • Best strategy: outside-in and reverse-pyramid • Average turn time: 22.9 min • Optimal number of boarding zones: 4 • Two ticket agents: 39% time savings
Institute for Land and Sea Transport Systems Study	Ferrari and Nagel (2005)	Transportation Research Record	Computer simulation sensitivity analysis	The passenger model Average worst case boarding time model	<ul style="list-style-type: none"> • Best strategy: outside-in or by seat • Those boarding strategies that performed the best under optimal conditions also performed the best under the worst conditions
Boeing Corporation Study	Marelli et al. (1998)	AERO Magazine	Discrete event simulation	PEDS model	<ul style="list-style-type: none"> • Best strategy: outside-in • Boarding with 2 doors saved 5 min • Boarding with two doors using outside- in saved 17 min

Figura 25: Resumen diferentes estudios

SECCIÓN 4

11. El modelo de simulación

Se han realizado 24 simulaciones de diferentes escenarios (6 estrategias de embarque) de 30 iteraciones cada una para conseguir una mejor precisión en los resultados finales. Las doce primeras (6 al 90% de ocupación y 6 más al 100% de ocupación) coinciden con la parte principal del avión, la zona inferior. Las doce últimas coinciden con la parte superior del avión. La primera clase, la cual está compuesta por 12 asientos, no se ha modelado ya que cuenta con una puerta de embarque propia y es la zona que se embarca en menos tiempo.

El objetivo principal es observar el tiempo total de embarque en la parte inferior del avión y en la parte superior. Para cada una de las seis estrategias, el tiempo total de embarque del avión será el resultado del máximo tiempo entre los dos pisos. El siguiente objetivo será intentar equilibrar la cantidad de pasajeros que embarquen por ambas puertas (la superior y la inferior) para conseguir disminuir el tiempo total de embarque de la zona de máximo tiempo, para que de esta manera el tiempo total de embarque del avión sea el mismo en las dos zonas, una aproximación de ello se muestra en la Figura 1. Además, para el modelo de embarque final seleccionado se tienen en cuenta dos niveles de ocupación (90% y 100%) y se estudia qué estrategia funciona mejor en ambos casos.

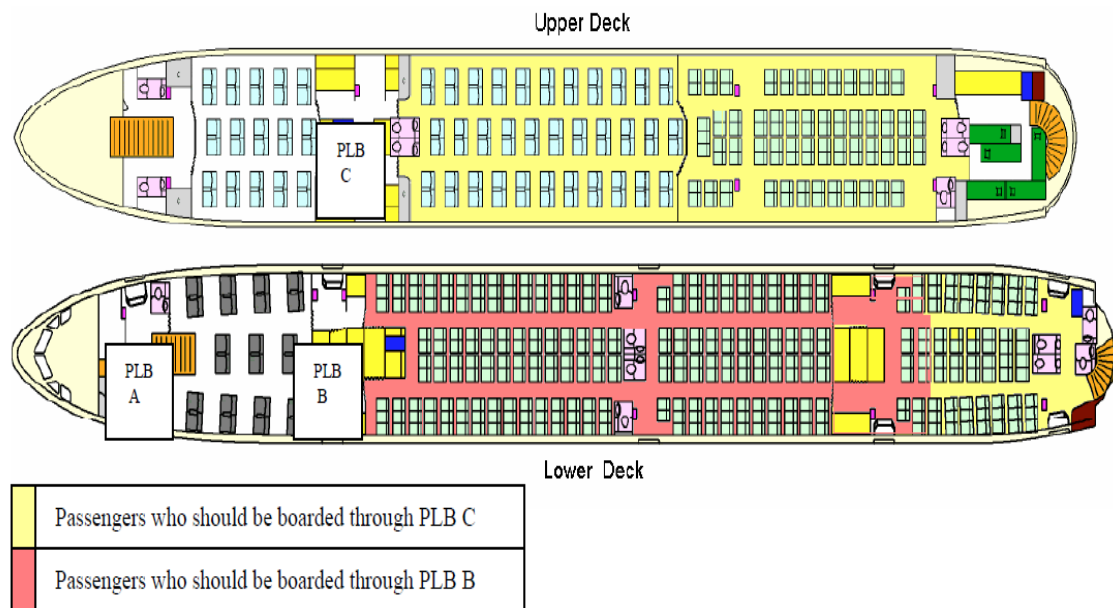


Figura 1: Forma en que se embarca a los pasajeros

De las seis estrategias estudiadas (*random*, *back to front*, *front to back*, *alternating rows*, *by blocks* y *optimization*), se supone que el enfoque *front to back* será el peor de los casos ya que tendrán lugar más interferencias entre pasajeros. Las seis estrategias permiten acomodar a pasajeros que viajan juntos, sean familias o grupos.

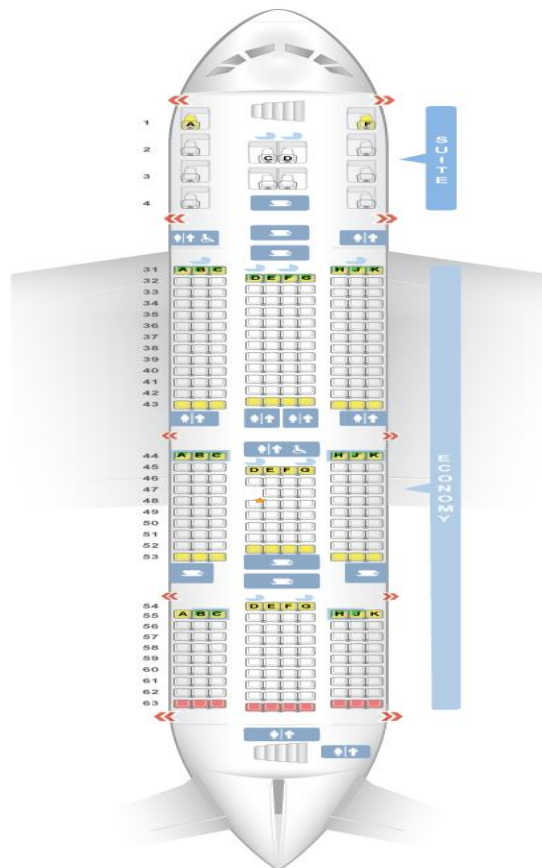
Avión estudiado

Teniendo en cuenta que este proyecto parte de la base del trabajo ya realizado por Silvia Mas (2012), nos hemos centrado en cambiar la configuración del tipo de avión mediante el código fuente del simulador ya que el objetivo de este proyecto es estudiar un solo tipo de avión, de configuración de asientos más heterogénea, con doble pasillo, doble piso y tres puertas de embarque. Así pues, la mayoría del código fuente ha sido modificado para atender a las nuevas necesidades incluyendo también tres tipos más de estrategias las cuales se ajustan más al nuevo modelo de avión.

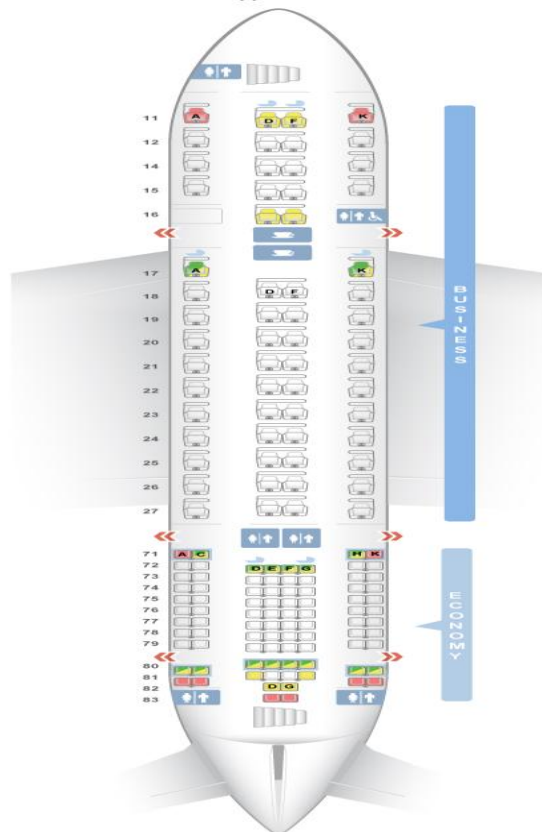
Existen muchos tipos de aviones de diferentes dimensiones. Cada uno de ellos se clasifica según la cantidad de pasajeros que puede llevar y la distancia que pueden cubrir. El avión estudiado en este proyecto es un Airbus 380-800 utilizado por la compañía aérea *Singapore Airlines SQ* (Figura 2) con 471 asientos, 12 de los cuales son de primera clase y que en este estudio no consideraremos. Este tipo de avión es el más pequeño de la familia Airbus 380 con tres tipos de clases: 12 asientos para la clase *Suite* y 311 asientos para la clase *Economy* en el piso inferior, 60 asientos *Business* y 88 asientos *Economy* en la parte superior del avión.

Existen tres puertas de embarque, una para la clase *Suite* que en este caso no se utilizará, una para la parte inferior y otra para la parte superior del avión. Como se muestra en las Figuras 3 o 4, el avión se representa mediante una cuadrícula donde se encuentran los asientos y los pasillos. Las columnas serán las mismas aunque el número de filas irá modificándose para encontrar el modelo óptimo de embarque.

Se observa en las Figuras 3 y 4 que el modelo que representa el avión no tiene la misma configuración de asientos que el avión real aunque sí tiene el mismo número de filas y asientos disponibles. Sin embargo, esto no afecta al tiempo total de embarque y se ha hecho de esta forma para facilitar la codificación de dicho modelo.



Upper Deck



© 2012 TripAdvisor LLC

Figura 2: Airbus 380-800 SQ

	SEAT									
ROW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	184	195	176	210	187	174	158	206	168	146
2	159	167	155	189	169	172	193	207	175	157
3	154	173	170	205	145	148	171	198	201	188
4	204	149	179	190	150	209	191	211	165	181
5	88	183	186	152	160	166	162	163	185	131
6	97	192	144	151	197	180	194	164	178	101
7	125	111	200	196	113	105	147	202	139	99
8	93	134	161	182	90	91	156	208	138	110
9	143	118	177	203	102	104	153	199	98	128
10	106	124	107	117	116	96	95	141	136	123
11	140	35	130	135	94	126	142	100	2	92
12	39	4	109	127	114	108	133	129	21	65
13	48	22	103					132	18	42
14	53	26	120					119	29	60
15	44	28	115	122	85	72	121	89	14	50
16	64	27	47	112	62	37	137	63	17	66
17	78	30	71		84	87	69	59	19	77
18	76	25	74	38	54	49	70	52	13	81
19	34	11	58	79	86	67	56	82	1	10
20	33	15	73	57	46	45	83	40	7	9
21	3	16	68	43	12	36	80	41	20	31
22	24	32	61					51	6	23

Figura 3: Configuración de la parte inferior del avión en el modelo.

	SEAT									
ROW	1	2	3	5	6	7	8		10	
1			215	202			232		216	
2			218	205			207		209	
3			220	228			208		238	
4			197	231			196		203	
5			235	227			213		223	
6										
7										
8										
9			230	212			210		206	
10			173	162			194		191	
11			183	174			172		170	
12			160	188			195		189	
13			181	190			169		182	
14			178	157			163		167	
15			185	192			176		175	
16			137	166			159		139	
17			132	155			141		149	
18			142	129			111		117	
19										
20			38	134					150	69
21			45	151	147	94	54	115	113	88
22			74	130	120	58	84	128	146	92
23			67	138	143	95	47	119	154	83
24			43	56	144	105	72	127	93	101
25			103	66	110	63	79	104	59	96
26			91	33	49	60	73	71	102	41
27			18	50	65	86	90	42	78	17
28			27	55	89	80	52	61	62	12
29										
30			16	2	28	9	5	15	32	25
31			13	11	22	1	10	8	7	3
32					14	4	24	23		

Figura 4: Configuración de la parte superior del avión en el modelo.

Las siguientes imágenes enseñan el avión real que utiliza nuestro modelo de simulación. Éste avión corresponde a la categoría de aviones de fuselaje ancho y doble cubierta, con pasillo doble y una configuración general de 10 asientos por fila estructurados de la forma 3-4-3. Se suele utilizar para viajes de larga distancia.



El proceso de embarque

El modelo de simulación está codificado para seguir la siguiente lógica: en primer lugar, el modelo hace una pre-asignación de varios parámetros y los mantiene en su memoria y en segundo lugar, este conjunto de datos se lanza en una cuadrícula, que representa el avión, con sus correspondientes asientos y pasillos. Antes de ejecutar la estrategia que se ha introducido, se pre-asignan los pasajeros a sus asientos de forma aleatoria, y luego se asignan estos asientos, que ya contienen el número del pasajero, al grupo de embarque que le toca, es decir, cada pasajero se asigna a un bloque concreto y dentro de un bloque determinado, los pasajeros se van sentando aleatoriamente.

Teniendo en cuenta la gran capacidad de un Airbus 380-800 (459 pasajeros en el modelo seleccionado) y la estructura heterogénea de asientos tanto arriba como abajo, cada estrategia se divide en diferentes grupos. Las estrategias *back to front*, *front to back* y *alternating rows* se dividen en 4 grupos, la estrategia *rotating zone* en 5 grupos para la parte de abajo y en 4 para la parte de arriba y la estrategia *optimization* en 6 grupos en ambas partes.

Entradas

Se han seleccionado un conjunto de entradas para poder obtener una visión representativa del avión y de su proceso de embarque, así como los resultados específicos sobre el comportamiento de los pasajeros y su localización en un determinado momento.

Primero de todo, se debe seleccionar el tipo de estrategia que se quiere ejecutar, de la 1 a la 6, correspondiendo cada número a un tipo de estrategia diferente. Después, se debe introducir el número de filas y asientos por fila que existen, así como el número total de pasajeros dependiendo de si se está simulando la parte de abajo o la zona de arriba del avión.

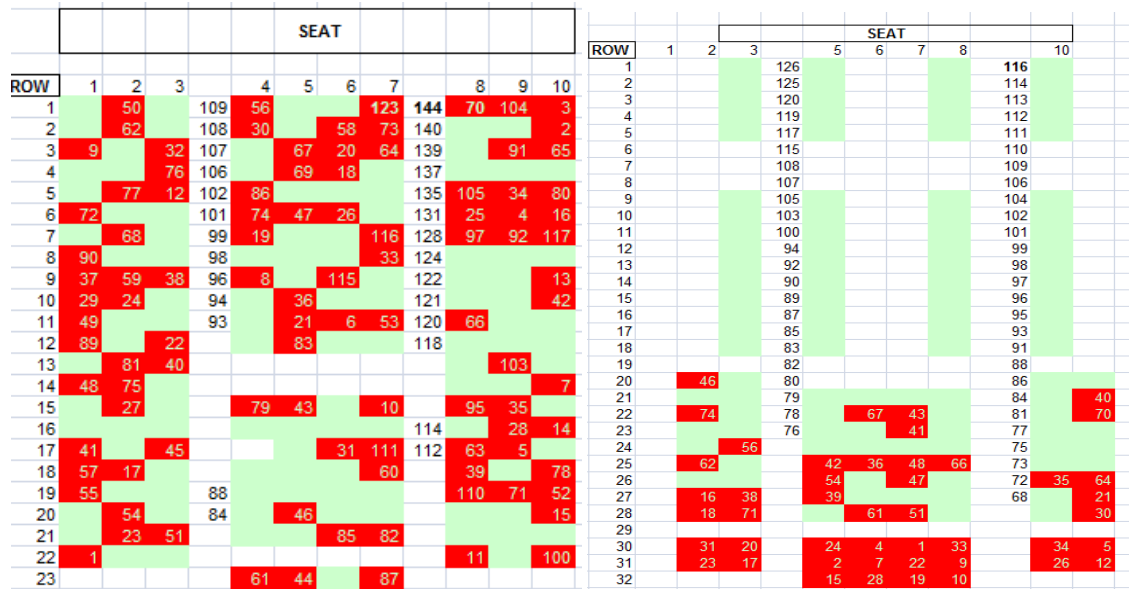
El tiempo requerido para un pasajero a la hora de caminar hasta su fila, guardar su equipaje de mano en el compartimento superior y el tiempo que transcurre cuando existe una

interferencia entre asientos son los tres parámetros que en este modelo han sido considerados constantes. Finalmente, se debe indicar la cantidad de veces que queremos repetir la simulación.

Salidas

Los resultados, después de haber realizado la pre-asignación de los diferentes parámetros y haber ejecutado la simulación, se representan mediante dos tablas. Cuando la simulación se lleva a cabo se puede observar como estas dos tablas van cambiando simultáneamente y siempre coincidiendo entre ellas.

La Figura 5a representa la parte inferior del avión y la Figura 5b la parte superior. Cada cuadrícula azul corresponde a un determinado asiento de una determinada fila y cada cuadrícula roja representa a un pasajero sentado en ese asiento, además se indica que numero de pasajero es.



Figuras 5a y 5b: Representación visual del avión

Las Figuras 6a y 6b muestran los resultados numéricos. La Figura 6a corresponde a la simulación cuando se está ejecutando y la Figura 6b cuando la simulación ya está completada. Se puede ver para cada pasajero, su fila y su asiento. También se puede identificar en que fila se encuentra cada pasajero durante la simulación y su estado (0= entrando al avión, 1= caminando por el pasillo, 2= esperando en el pasillo, 3= guardando equipaje de mano, 4= sentándose y 5=sentado). Algunos de estos estados provocan interferencias, por lo que si un pasajero se encuentra en uno de estos estados, el tiempo total de embarque para ese pasajero aumenta. La

tabla también nos enseña para cada pasajero si está sentado (1) o no (0) y el tiempo total que ha necesitado para llegar al estado de “sentado”, es decir, su tiempo total de embarque.

Passenger	Row	Seat	Current row	Status	Time in current status	Random time	Seated?	Time to seat
1	30	3006	30	5	N/A	N/A	1	36
2	31	3104	31	5	N/A	N/A	1	37
3	54	5406	54	5	N/A	N/A	1	66
4	30	3005	30	5	N/A	N/A	1	37
5	30	3009	30	5	N/A	N/A	1	43
6	55	5501	55	5	N/A	N/A	1	68
7	31	3105	31	5	N/A	N/A	1	47
8	54	5402	54	5	N/A	N/A	1	76
9	31	3107	31	5	N/A	N/A	1	50
10	32	3207	32	5	N/A	N/A	1	57
11	51	5106	51	5	N/A	N/A	1	82
12	31	3109	31	5	N/A	N/A	1	63
13	55	5508	55	5	N/A	N/A	1	93
14	48	4810	48	5	N/A	N/A	1	87
15	32	3204	32	5	N/A	N/A	1	55
16	27	2702	27	5	N/A	N/A	1	44
17	31	3103	31	5	N/A	N/A	1	55

Figura 6a: Resultados de la simulación ya completada

Passenger	Row	Seat	Current row	Status	Time in current status	Random time	Seated?	Time to seat
1	30	3003	27	1	0	N/A	0	N/A
2	32	3206	5	1	22	N/A	0	N/A
3	56	5601	26	1	0	N/A	0	N/A
4	30	3008	4	1	22	N/A	0	N/A
5	48	4801	25	1	0	N/A	0	N/A
6	49	4903	24	1	0	N/A	0	N/A
7	32	3204	23	1	0	N/A	0	N/A
8	49	4906	3	1	22	N/A	0	N/A
9	27	2702	22	1	0	N/A	0	N/A
10	31	3102	21	1	0	N/A	0	N/A
11	31	3105	20	1	0	N/A	0	N/A
12	30	3005	19	1	0	N/A	0	N/A
13	51	5101	18	1	0	N/A	0	N/A
14	31	3108	2	1	22	N/A	0	N/A
15	31	3103	17	1	0	N/A	0	N/A

Figura 6b: Resultados de la simulación cuando se está ejecutando

Una vez se hayan terminado todas las simulaciones, se analizarán los resultados que se encuentran en la pestaña “OUTPUTS” con MINITAB. MINITAB ANOVA nos ayudará a encontrar las diferencias, si existen, entre los resultados y si son significativas o no. Los resultados de tiempo se consideran ser unidades de tiempo.

Comportamiento de los pasajeros

Una vez dentro del avión, cada pasajero se dirige a su asiento en base a su velocidad al caminar (*walking time per row*) y deteniéndose si algún pasajero por delante de él le obstruye el paso. Se supone que los pasajeros no se equivocan de asiento y que, por lo tanto, no cometen errores cuando se dirigen a su asiento. Además, cada pasajero tiene un tiempo de retraso asociado para llegar a su asiento ya que necesita un tiempo determinado para ubicar su equipaje de mano en los compartimentos (*hand-luggage time*). Se supone cada pasajero lleva una maleta de mano. Además, se necesita tiempo para esperar a los pasajeros que ya están sentados a que se levanten para dejarle paso, tiempo para moverse entre la fila y tiempo para sentarse (*seating time if interference*).

Nivel de ocupación

El nivel de ocupación se refiere al total de pasajeros que intervienen en un proceso de embarque. Este parámetro es igual de importante que el tamaño del avión ya que cuantos más pasajeros haya, más interferencias existirán y, por eso, más tiempo se necesitará para embarcar. Así mismo, se analizará para determinar cómo afecta éste parámetro a cada una de los procesos de embarque.

En este modelo se considerarán dos niveles de ocupación, medio alto (90% de ocupación) y alto (100% de ocupación). No nos interesa estudiar niveles de ocupación bajos ya que cuantos menos pasajeros, menos interferencias y las estrategias se comportarán más o menos de igual manera.

Así pues, se analizarán los dos niveles de ocupación en cada una de las estrategias de embarque para el modelo de embarque seleccionado previamente.

Parámetros

Para determinar los parámetros, nos hemos basado en el estudio de Silvia Mas (2012) la cual tras observar varios procedimientos de embarque obtuvo tiempos reales de los cuales hizo un promedio de todos ellos. Los valores para cada uno de los parámetros, considerados constantes en ambos modelos, son los siguientes:

- Tiempo andado por fila (*walking time per row*) = 1 unidad de tiempo (0.5 segundos).
- Interferencia de tiempo para sentarse (*seating time interference*) = 10 unidades de tiempo (5 segundos).
- Tiempo para guardar el equipaje de mano (*baggage stowage time*) = 12 unidades de tiempo (6 segundos).

SECCIÓN 5

12. Ejecución de la simulación

Después de haber finalizado las simulaciones para el modelo de avión principal (embarque normal), dentro de las cuales se probaban las 6 estrategias de embarque, se han considerado otros tres tipos de escenarios (embarque experimental). Después de analizar el embarque normal se procederá a explicar el por qué de la creación de un embarque experimental.

Teniendo en cuenta el tipo de embarque y el nivel de ocupación de pasajeros, los siguientes resultados son los obtenidos para cada escenario:

A. EMBARQUE NORMAL

90% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 280
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 45 minutos
- Configuración:

N Passengers in regular class = 280
N Regular rows = 33
nIterations to run = 30
Hand-luggage time = 12
Seating time interference = 10
Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

Para poder detectar visualmente las diferencias entre las seis estrategias estudiadas se utiliza el diagrama de caja donde cada línea horizontal de éstas representa la media de cada proceso de embarque.

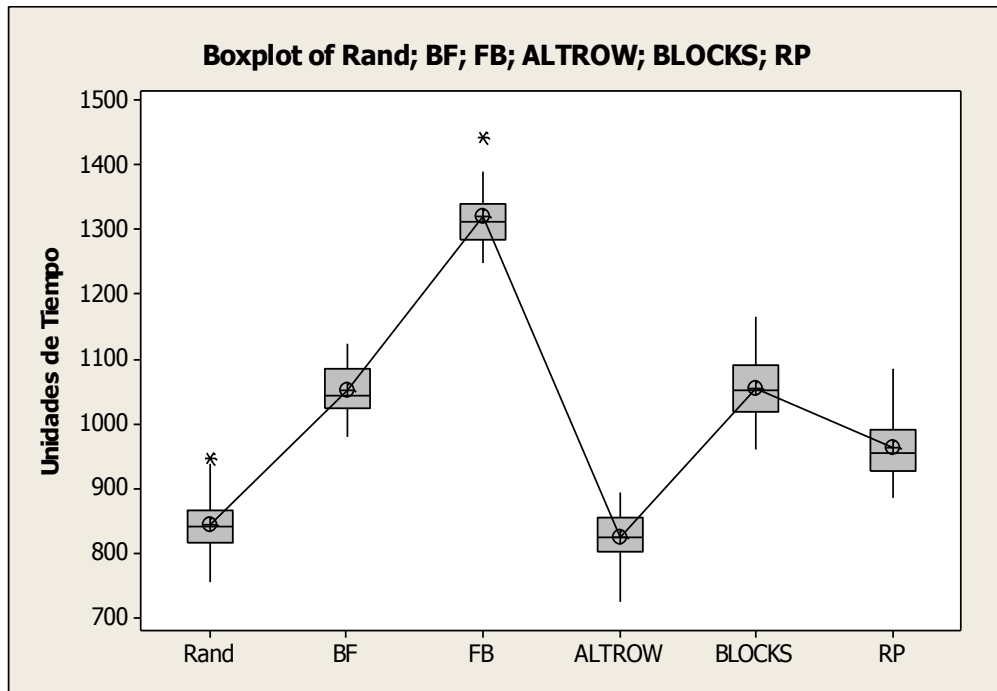
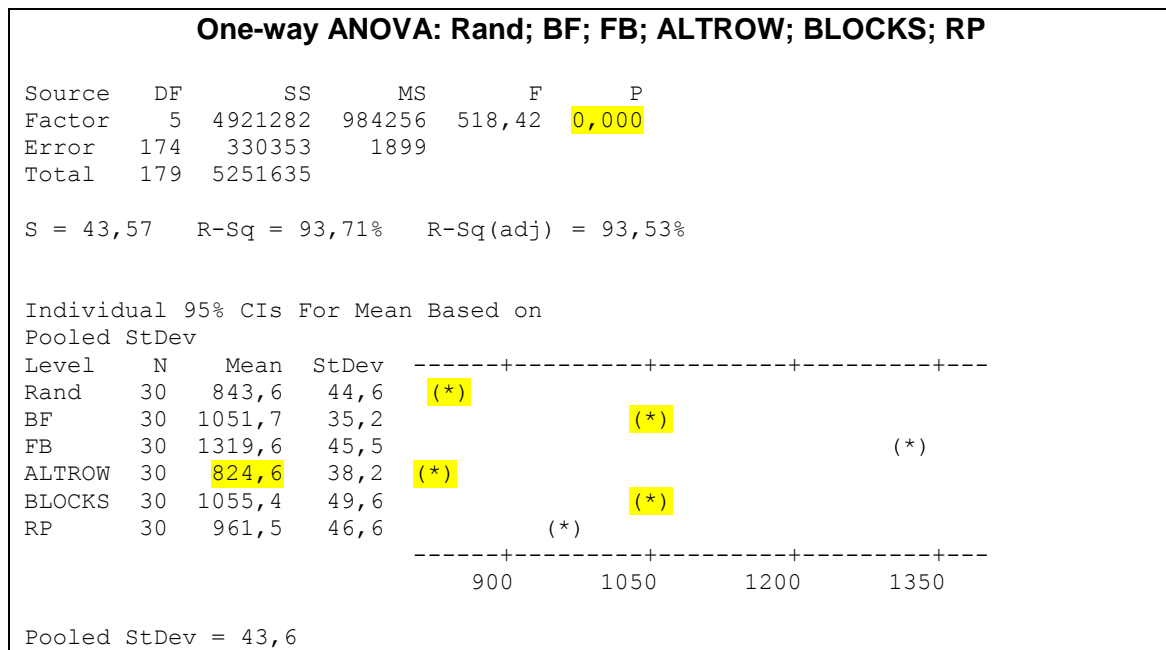


Figura 1: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen dos *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos (dentro de las 30 observaciones, 2 han tenido un valor más grande que la media). Estos valores se representan mediante un asterisco. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos, aunque la estrategia *random* también está dentro de las más rápidas. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

El propósito principal del Análisis de la Varianza (ANOVA) es analizar las diferencias significativas entre tres o más medias, en este caso seis. Esto se logra mediante el análisis de la varianza, es decir, mediante la partición de la varianza total en el componente que se debe a cierto error aleatorio (dentro del grupo) y los componentes que se deben a las diferencias entre las medias (entre el grupo). ANOVA realiza un contraste de hipótesis donde considera que la hipótesis nula (H_0) significa que todas las políticas requieren de la misma cantidad de tiempo para el embarque de pasajeros.



De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating rows* y, por otra parte, las estrategias *back to front* y *by blocks* se sobreponen, lo que significa que no existen muchas diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que la estrategia ***alternating rows*** funciona mejor en el piso principal, con un **nivel de ocupación del 90%**.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 133
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 45 minutos
- Configuración:

N Passengers in regular class = 133
 N Regular rows = 32
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

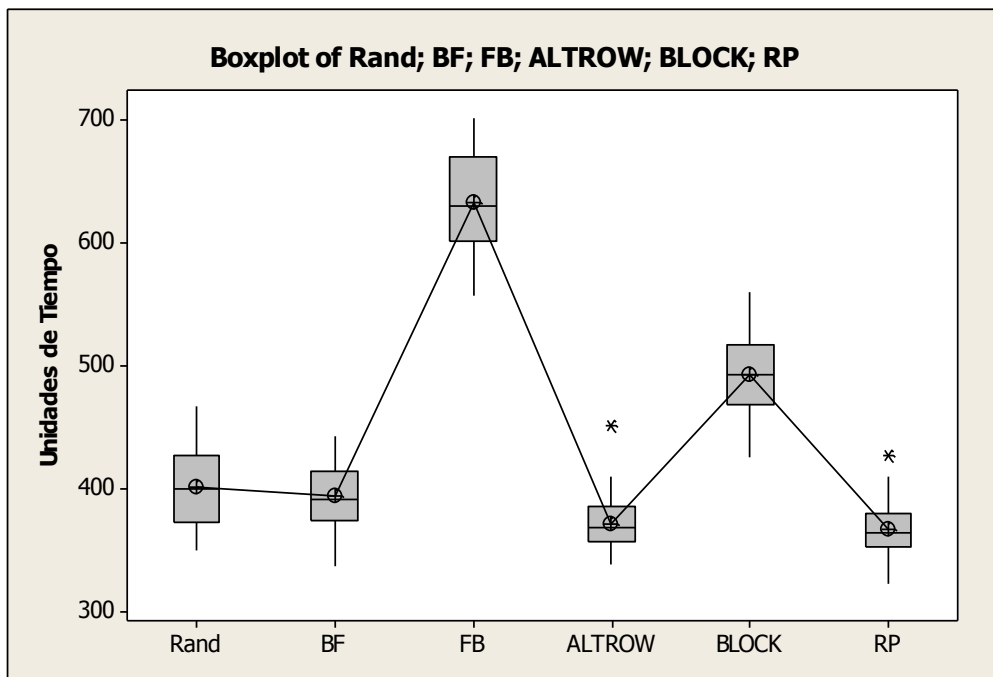


Figura 2: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen dos *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos (dentro de las 30 observaciones, 2 son atípicas). Estos valores se representan mediante los asteriscos. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* y *optimization* parecen ser los más bajos, aunque la estrategia *back to front* también está dentro de las más rápidas. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto, puesto que la caja es considerablemente más ancha.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	1610375	322075	356,62	0,000
Error	174	157144	903		
Total	179	1767519			

S = 30,05 R-Sq = 91,11% R-Sq(adj) = 90,85%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----	
Rand	30	400,47	31,44	(*)	
BF	30	393,73	25,29	(*-)	
FB	30	632,97	38,28		(*)
ALTROW	30	371,53	23,91	(*-)	
BLOCK	30	492,57	34,58		(-*)
RP	30	366,90	23,62	(*)	
				-----+-----+-----+-----	
				400	480 560 640

Pooled StDev = 30,05

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *back to front* y, por otra parte, las estrategias *alternating rows* y *optimization* se sobrepone, lo que significa que no existen muchas diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *optimization* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que la estrategia ***optimization*** funciona mejor en el piso de arriba, con un **nivel de ocupación del 90%**.

100% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 311
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 311
 N Regular rows = 33
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

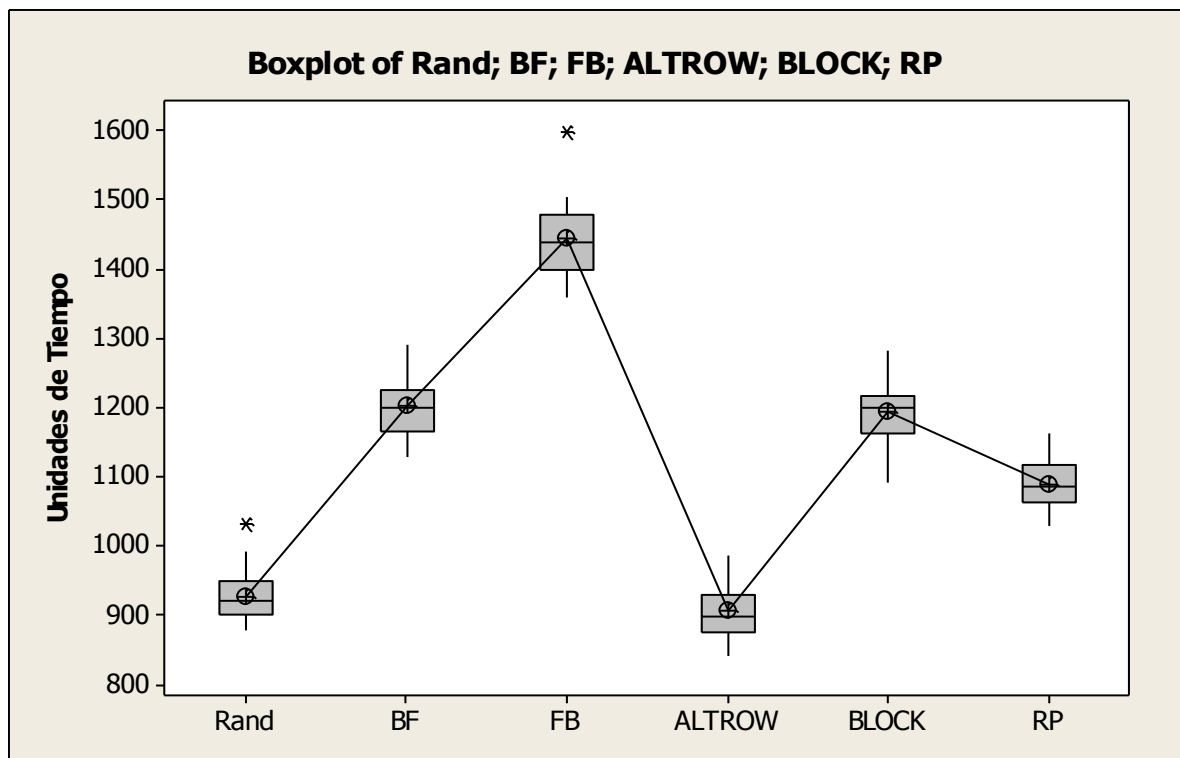
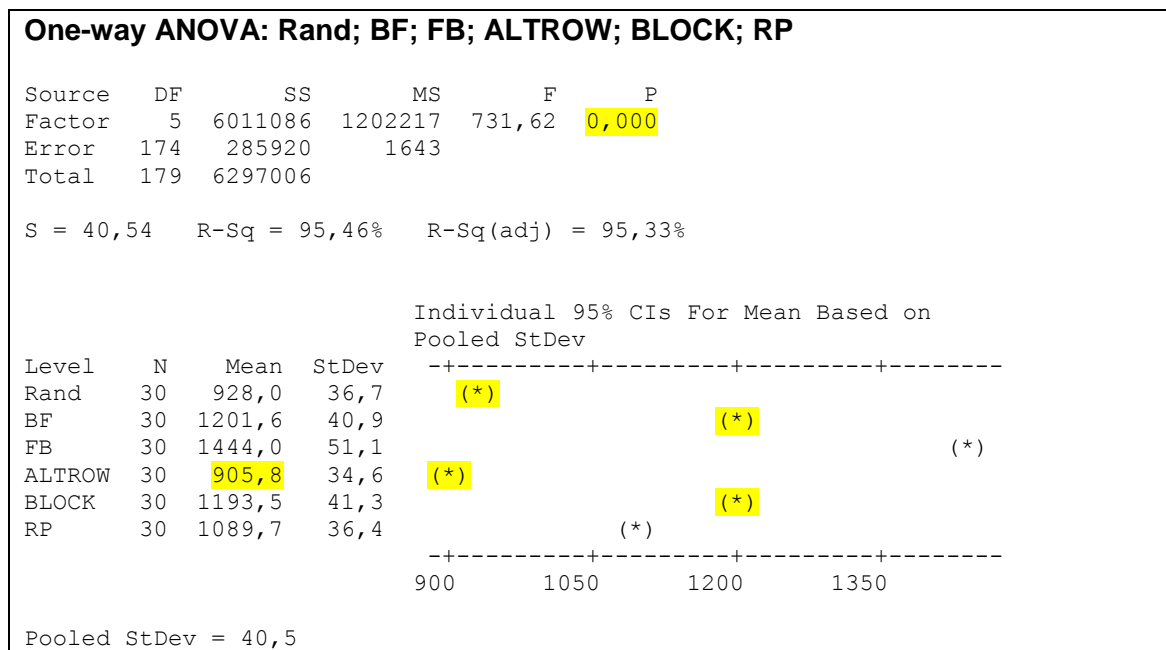


Figura 3: Diagrama de Caja

En este caso, existen dos valores atípicos, los cuales son valores extremos dentro del conjunto de observaciones. Es decir, durante la simulación de las estrategias *random* y *front to back* ha habido una ocasión donde el tiempo total ha sido mucho más grande que la media. Se puede observar también que los tiempos comprendidos en la estrategia *alternating rows* corresponden a un rango pequeño de tiempos debido a que la caja es más estrecha y es la que embarca a los pasajeros en el menor de los tiempos. Mientras la estrategia *front to back* tiende a ser la más lenta y sus tiempos oscilan en un rango mayor de tiempos al ser la caja más ancha.

En resumen, se puede observar como **los resultados son los mismos** que con un nivel de ocupación del 90% en la cubierta principal.

ANOVA:



ANOVA nos lleva a la conclusión de que las diferencias entre cada estrategia son estadísticamente significativas, ya que los intervalos de tiempo de las estrategias están totalmente separados entre ellos. Aunque existen cuatro intervalos, el de la estrategia *back to front* y por bloques, la *random* y la *alternating rows*, que sí coinciden. Por otra parte, podemos destacar que no todos los métodos de embarque duran la misma cantidad de tiempo, ya que el valor de p es 0,000.

Para concluir, la estrategia *alternating rows* es la más rápida con un **nivel de ocupación del 100%** para la planta principal.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 148
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min

- Configuración:

N Passengers in regular class = 148
 N Regular rows = 32
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de Caja (Box Plot):

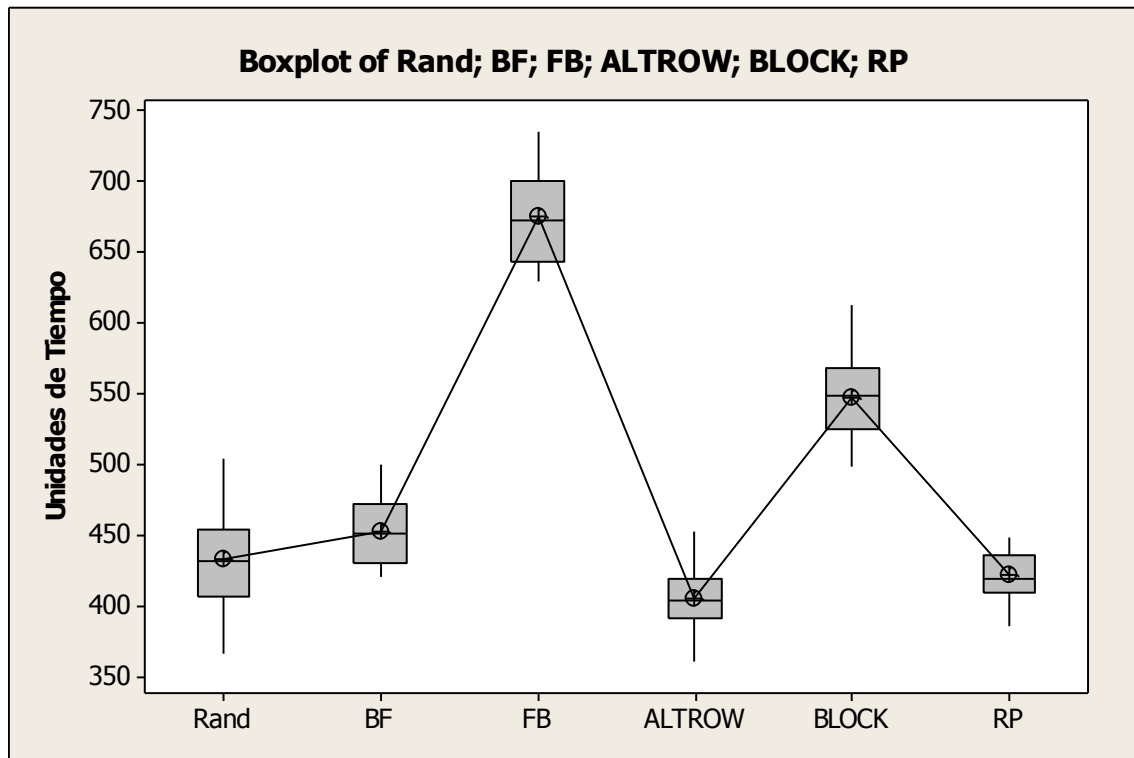
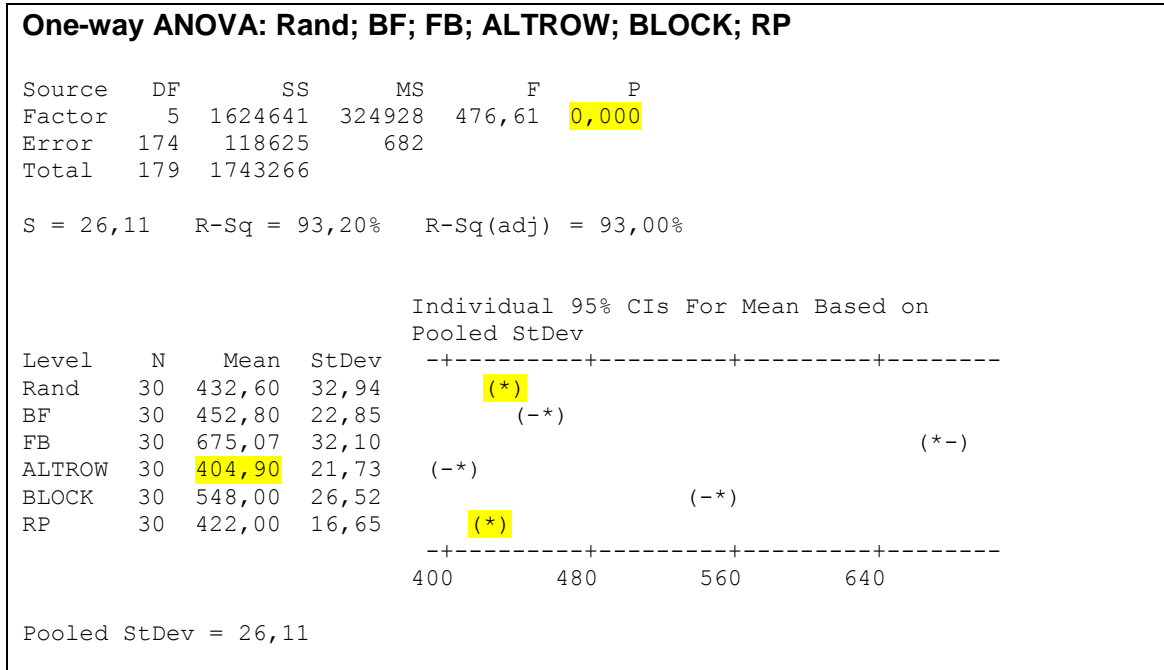


Figura 4: Diagrama de Caja

En el diagrama se puede observar que no existen *outliers* y que la mejor estrategia es la política *alternating rows* y, además su caja es la más estrecha, lo que significa que se mueve dentro de un rango pequeño de tiempos. La estrategia *front to back* es la que peor funciona y su rango de tiempos es el más grande de todos.

ANOVA:



El análisis ANOVA muestra como es de grande la diferencia entre las estrategias según los tiempos de embarque. Además, el bajo valor de p (0,000) nos hace rechazar la hipótesis nula, así pues que los tiempos esperados no son iguales.

Se confirma que el método *alternating rows* es más eficiente, considerando un **nivel de ocupación del 100%** para la parte superior del avión.

RESUMEN EMBARQUE NORMAL

Para finalizar, cabe destacar que **la estrategia *alternating rows* es la más eficiente tanto para un nivel de ocupación del 90% como del 100%**. Sin embargo, para un nivel del 90%, en la parte superior del avión, la estrategia *optimization* funciona mejor aunque con una diferencia poco significativa en comparación con la política *alternating rows*, 366'90-371'93, respectivamente.

	90% upper	90% main	100% upper	100% main
<i>Alternating rows</i>	371,53	824,6	404,90	905,8

Los datos numéricos nos indican que se tarda más del doble en embarcar la parte principal del avión que en la cubierta superior. Esto es debido a que la disposición de asientos en la parte superior hace que haya menos interferencias entre pasajeros y también debido al número total de asientos que es mucho menor que en la cubierta principal.

A continuación, se estudia de qué manera afecta que se embarquen 9, 10 y 11 filas traseras de la parte principal del avión por arriba llegando a la cubierta principal mediante unas escaleras.

B. EMBARQUE EXPERIMENTAL

9 filas

90% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 199
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 199
N Regular rows = 24
nIterations to run = 30
Hand-luggage time = 12
Seating time interference = 10
Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

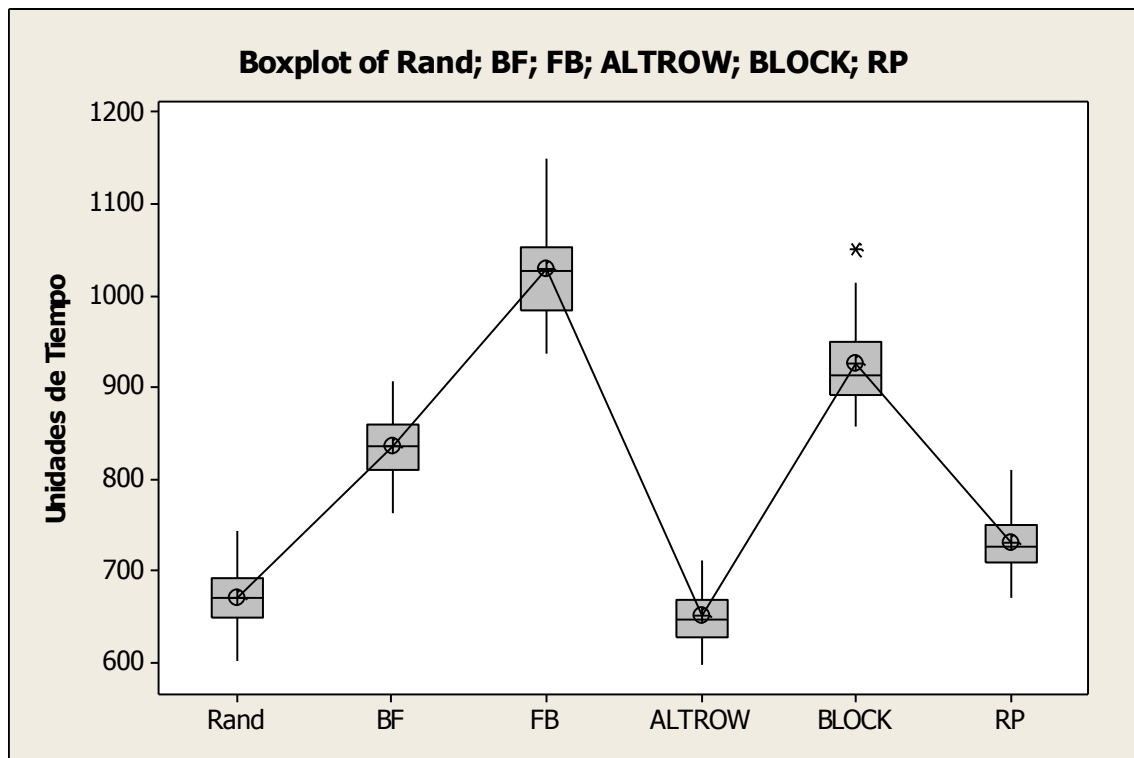


Figura 5: Diagrama de Caja

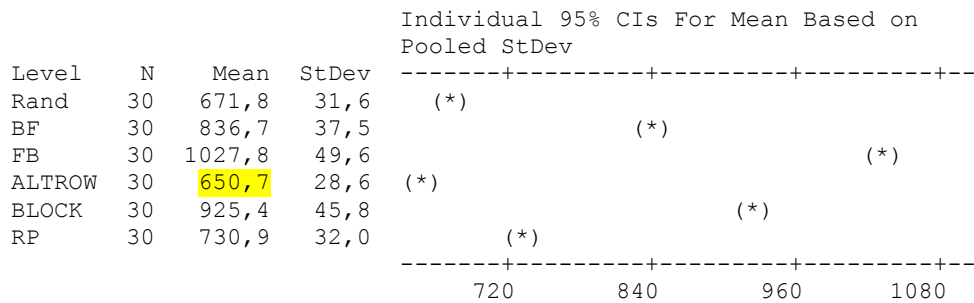
En este caso solo existe un outlier, es decir, durante la simulación de la estrategia *by blocks* ha habido un embarque que ha tardado más de la media del tiempo total de embarque. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	3364616	672923	458,52	0,000
Error	174	255364	1468		
Total	179	3619980			

S = 38,31 R-Sq = 92,95% R-Sq(adj) = 92,74%



Pooled StDev = 38,3

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating rows* casi se sobreponen, lo que significa que no hay mucha diferencia entre ambas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que la estrategia ***alternating rows*** funciona mejor en el piso principal cuando se eliminan 9 filas, con un **nivel de ocupación del 90%**.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 214
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 214
 N Regular rows = 56
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

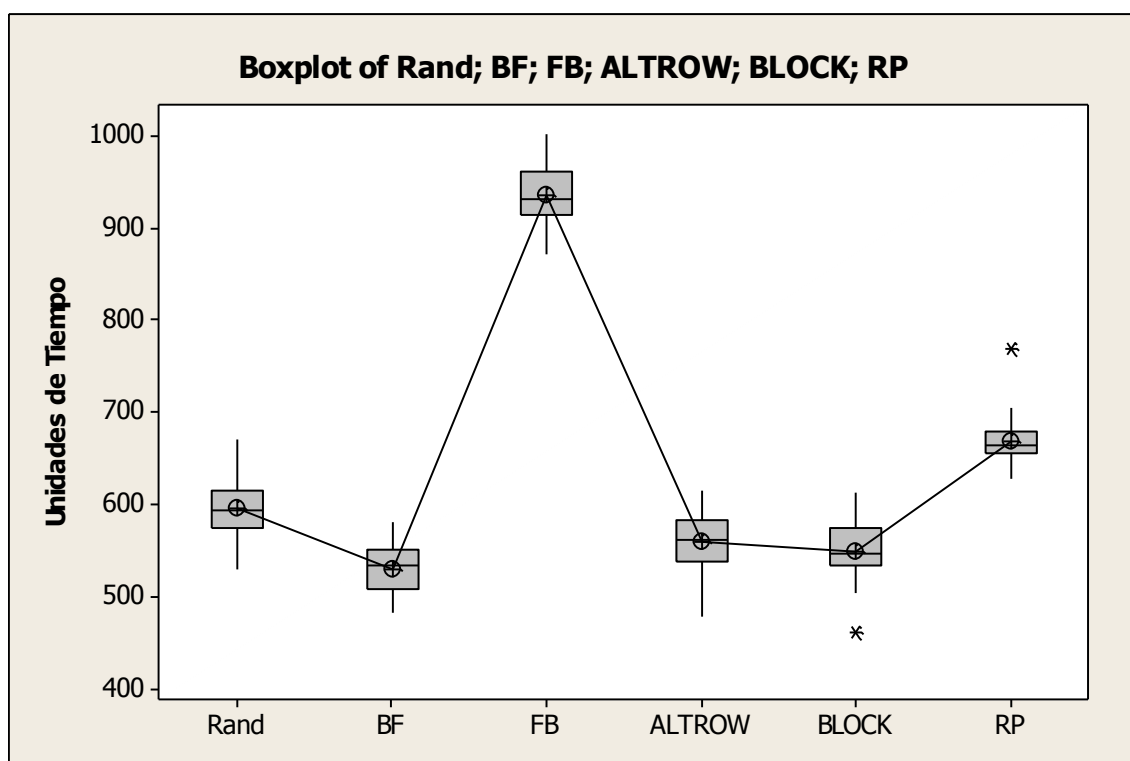


Figura 6: Diagrama de Caja

En este caso existen dos outliers. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *back to front* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	3502090	700418	748,93	0,000
Error	174	162729	935		
Total	179	3664819			

S = 30,58 R-Sq = 95,56% R-Sq(adj) = 95,43%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI Lower	CI Upper
Rand	30	595,70	29,89	550,00	641,40
BF	30	530,97	27,71	475,00	586,94
FB	30	935,90	35,11	865,00	1006,80
ALTROW	30	559,57	30,90	510,00	609,14
BLOCK	30	550,20	32,30	500,00	600,40
RP	30	668,20	26,82	615,00	721,40

Pooled StDev = 30,58

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *by blocks* y *alternating rows* se sobreponen, lo que significa que no hay diferencias significativas entre ambas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *back to front* contienen los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que las estrategias ***back to front*** funciona mejor en el piso de arriba cuando se añaden 9 filas, con un **nivel de ocupación del 90%**.

100% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 221
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 221
 N Regular rows = 24
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

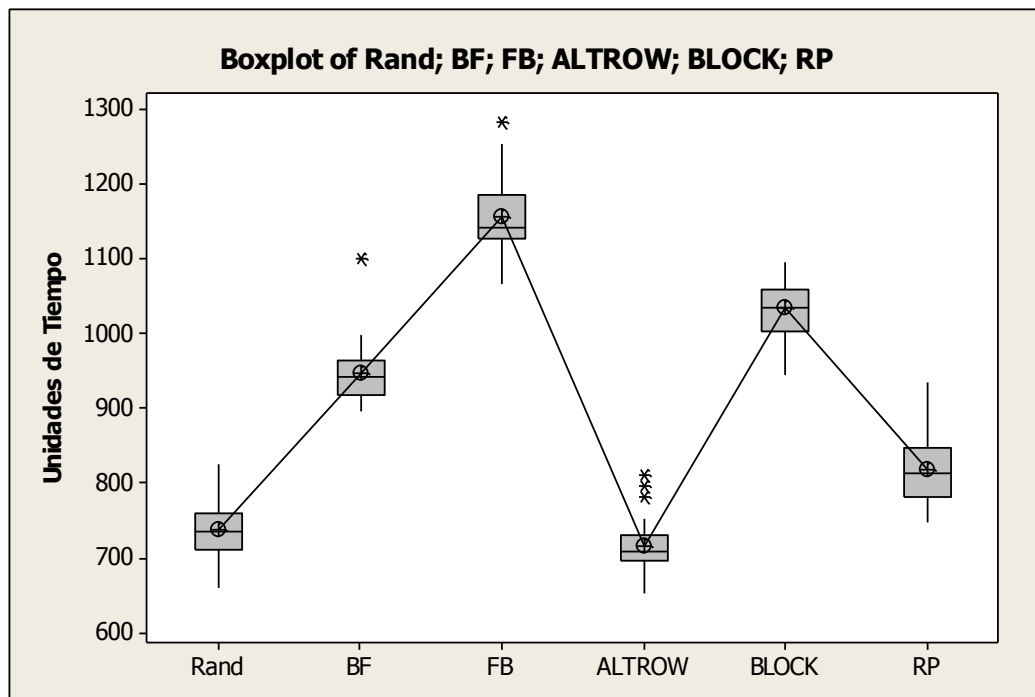
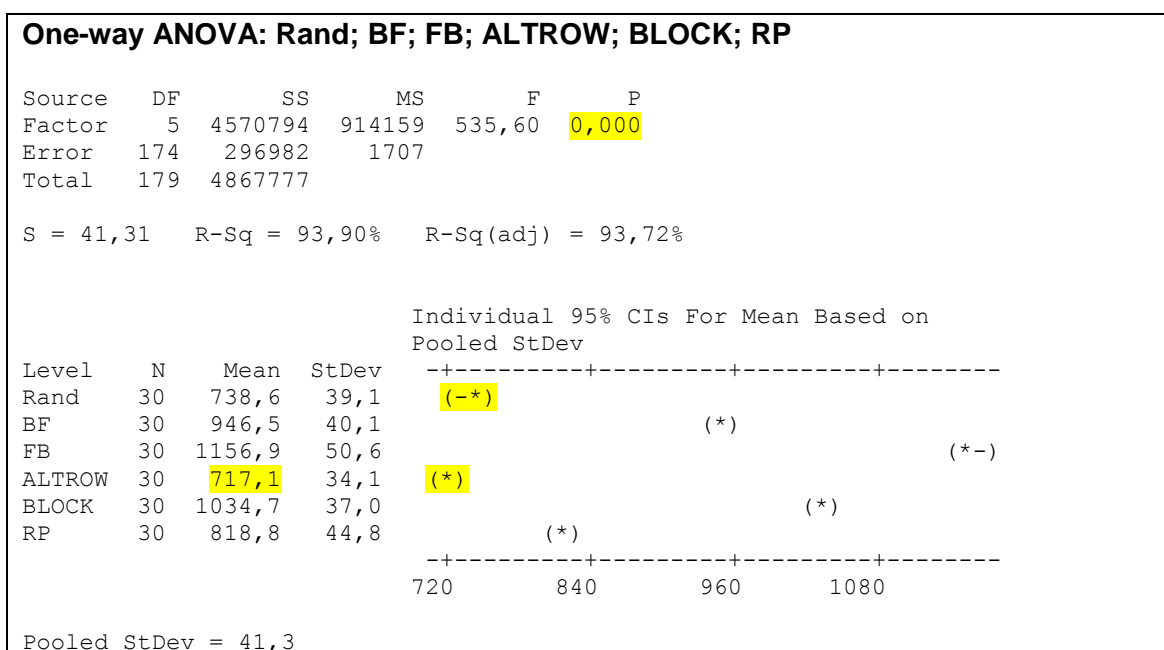


Figura 7: Diagrama de Caja

En este caso, existen cinco valores atípicos, los cuales son valores extremos dentro del conjunto de observaciones. Es decir, durante la simulación de las estrategias *back to front*, *front to back* y *alternating rows* ha habido algún embarque donde el tiempo total ha sido mucho más grande que la media. Se puede observar también que los tiempos comprendidos en la estrategia *alternating rows* corresponden a un rango pequeño de tiempos debido a que la caja es más estrecha y es la que embarca a los pasajeros en el menor de los tiempos. Mientras la estrategia *front to back* tiende a ser la más lenta y sus tiempos oscilan en un rango mayor de tiempos al ser la caja más ancha.

En resumen, la estrategia que mejor funciona cuando se eliminan 9 filas las cuales se embarcan por la parte superior del avión con un **nivel de ocupación del 100%** es la política *alternating rows*.

ANOVA:



ANOVA nos lleva a la conclusión de que las diferencias entre cada estrategia son estadísticamente significativas, ya que los intervalos de tiempo de las estrategias están totalmente separados entre ellos. Aunque entre la estrategia *random* y *alternating rows*, sí coinciden lo que significa que no hay diferencias significativas entre estas dos estrategias en cuanto al tiempo total de embarque. Por otra parte, podemos destacar que no todos los métodos de embarque duran la misma cantidad de tiempo, ya que el valor de p es 0,000.

En resumen, la estrategia que mejor funciona cuando se embarcan 9 filas por la parte superior del avión con un **nivel de ocupación del 100%** es la *alternating rows*.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 238
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min

- Configuración:

N Passengers in regular class = 238
 N Regular rows = 56
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de Caja (Box Plot):

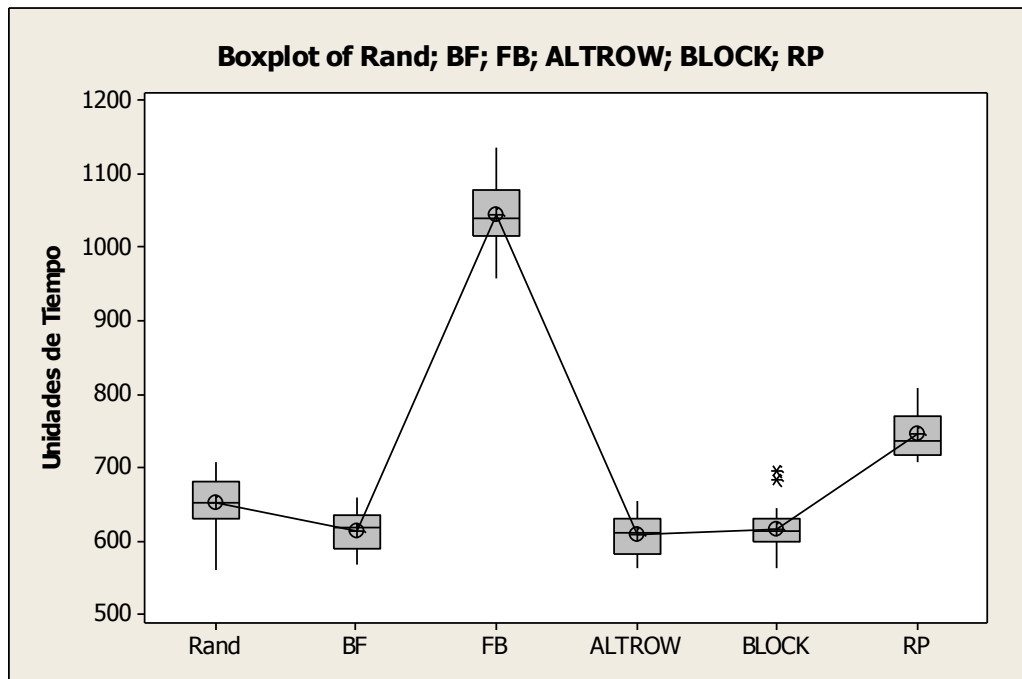
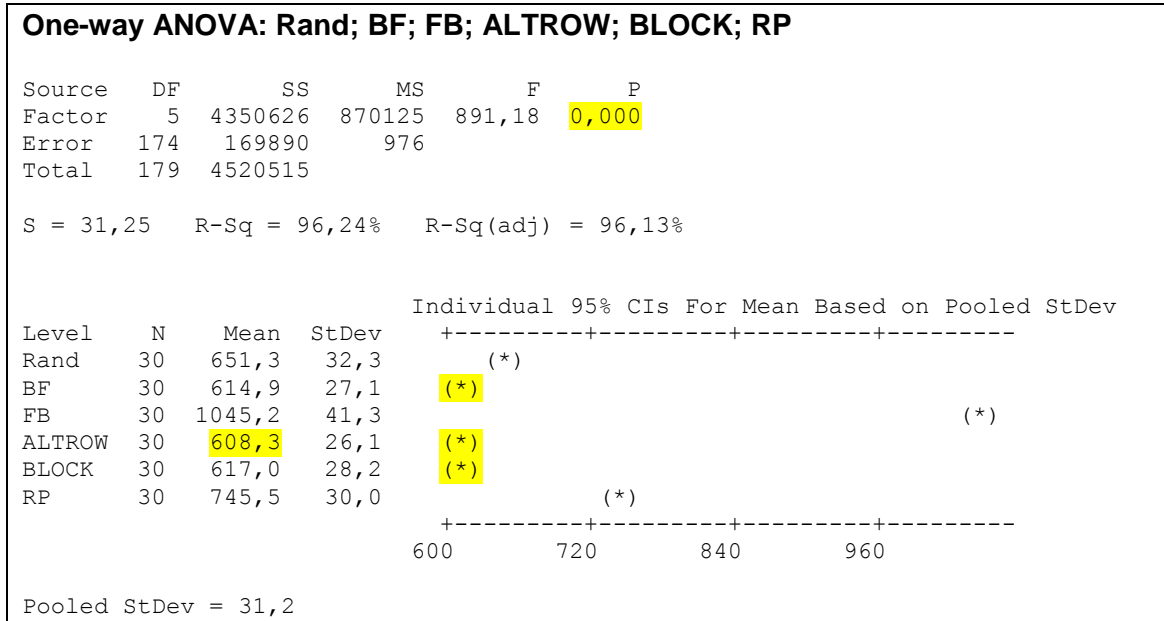


Figura 8: Diagrama de Caja

En este caso, existen dos valores atípicos, los cuales son valores extremos dentro del conjunto de observaciones. Es decir, durante la simulación de la estrategia *by blocks* ha habido dos embarques donde el tiempo total ha sido mucho más grande que la media. Se puede observar también que los tiempos comprendidos en la estrategia *by blocks* corresponden a un rango pequeño de tiempos debido a que la caja es más estrecha y es la que embarca a los pasajeros en el menor de los tiempos. Mientras la estrategia *front to back* tiende a ser la más lenta y sus tiempos oscilan en un rango mayor de tiempos al ser la caja más ancha.

ANOVA:



ANOVA nos lleva a la conclusión de que las diferencias entre cada estrategia son estadísticamente significativas, ya que los intervalos de tiempo de las estrategias están totalmente separados entre ellos. Aunque entre las estrategias *back to front*, *by blocks* y *alternating rows*, sí coinciden lo que significa que no hay diferencias significativas entre estas tres estrategias en cuanto al tiempo total de embarque. Por otra parte, podemos destacar que no todos los métodos de embarque duran la misma cantidad de tiempo, ya que el valor de p es 0,000.

En resumen, la estrategia que mejor funciona cuando se añaden 9 filas por la parte superior del avión con un **nivel de ocupación del 100%** es la política *alternating rows*.

10 filas

90% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 190
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 190
 N Regular rows = 23
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

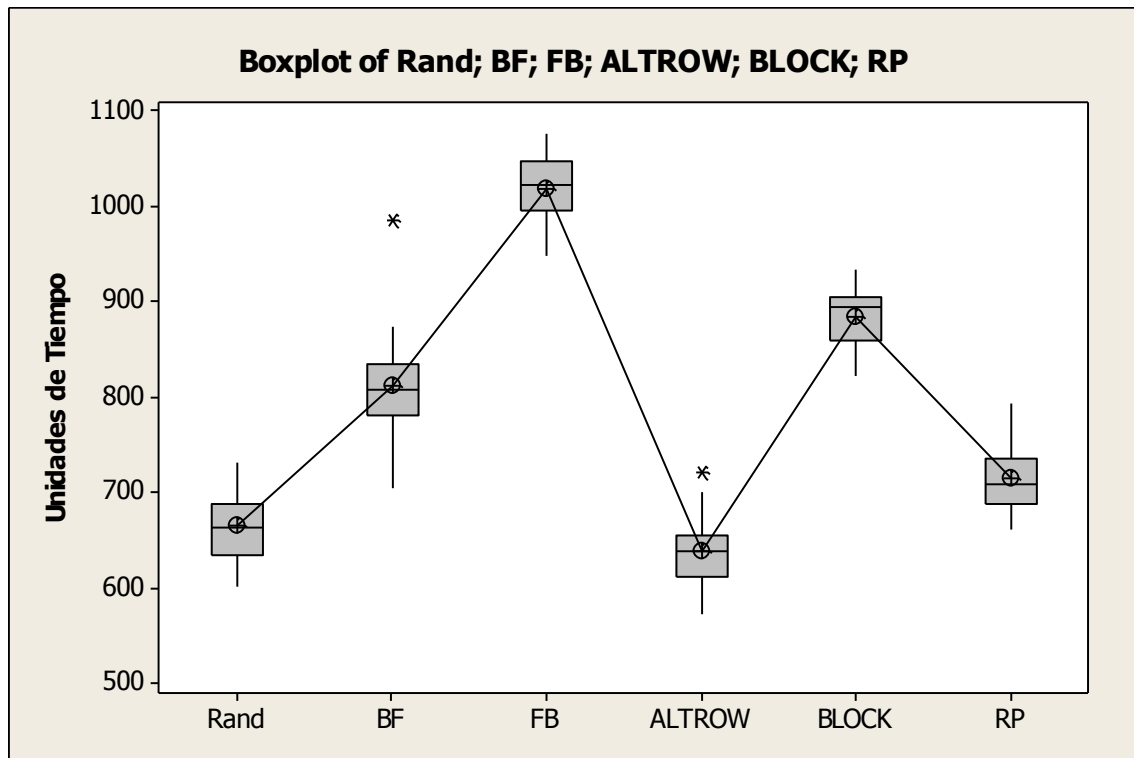


Figura 9: Diagrama de Caja

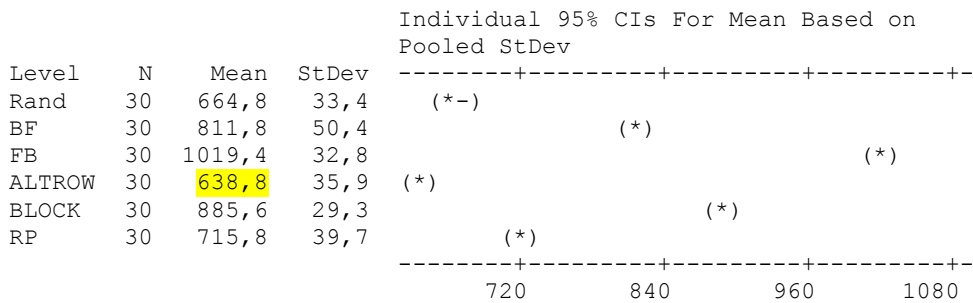
Se puede observar que existen dos *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos (dentro de las 30 observaciones, 2 ha tenido un valor más grande que la media). Estos valores se representan mediante un asterisco. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	3188463	637693	452,15	0,000
Error	174	245404	1410		
Total	179	3433867			

S = 37,55 R-Sq = 92,85% R-Sq(adj) = 92,65%



Pooled StDev = 37,6

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating rows* casi se sobreponen, lo que significa que no hay mucha diferencia entre ambas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que la estrategia *alternating rows* funciona mejor en el piso principal cuando se eliminan 10 filas, con un **nivel de ocupación del 90%**.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 223
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 223
N Regular rows = 57
Iterations to run = 30
Hand-luggage time = 12
Seating time interference = 10
Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

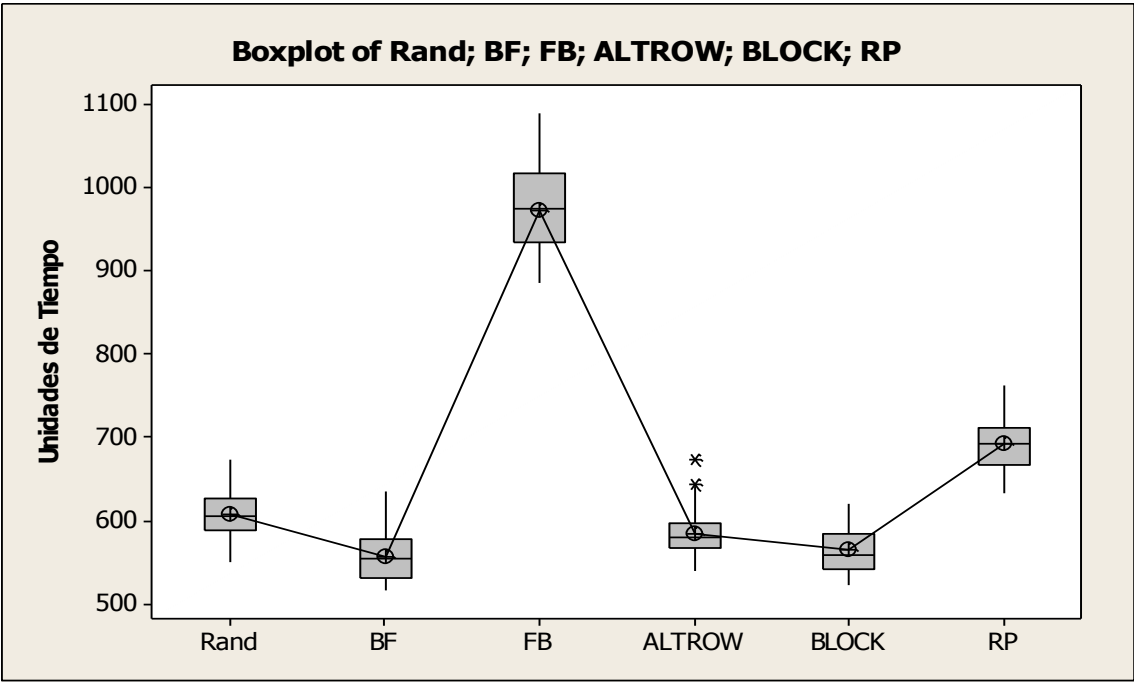


Figura 10: Diagrama de Caja

En este caso, existen dos valores atípicos, los cuales son valores extremos dentro del conjunto de observaciones. Es decir, durante la simulación de la estrategia *alternating rows* ha habido dos embarques donde el tiempo total ha sido mucho más grande que la media. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *back to front* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	3794571	758914	621,93	0,000
Error	174	212324	1220		
Total	179	4006895			

S = 34,93 R-Sq = 94,70% R-Sq(adj) = 94,55%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----	
Rand	30	607,57	30,35	(*)	
BF	30	557,87	31,28	(*)	
FB	30	972,63	52,90	(*)	
ALTROW	30	585,23	28,47	(*)	
BLOCK	30	565,50	26,38	(*)	
RP	30	693,60	33,42	(*)	
				-----+-----+-----+-----+-----	
				600 720 840 960	

Pooled StDev = 34,93

ANOVA nos lleva a la conclusión de que las diferencias entre las últimas tres estrategias son estadísticamente significativas, ya que los intervalos de tiempo de las estrategias están totalmente separados entre ellos. Sin embargo, entre las estrategias *back to front* y *by blocks*, sí coinciden lo que significa que no hay diferencias significativas entre estas dos estrategias en cuanto al tiempo total de embarque. Además, el método *alternating rows* está muy cerca de los tiempos de éstas dos últimas. Por otra parte, podemos destacar que no todos los métodos de embarque duran la misma cantidad de tiempo, ya que el valor de p es 0,000.

En resumen, la estrategia que mejor funciona cuando se añaden 10 filas por la parte superior del avión con un **nivel de ocupación del 90%** es la política *back to front*.

100% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 211
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 211
 N Regular rows = 23
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

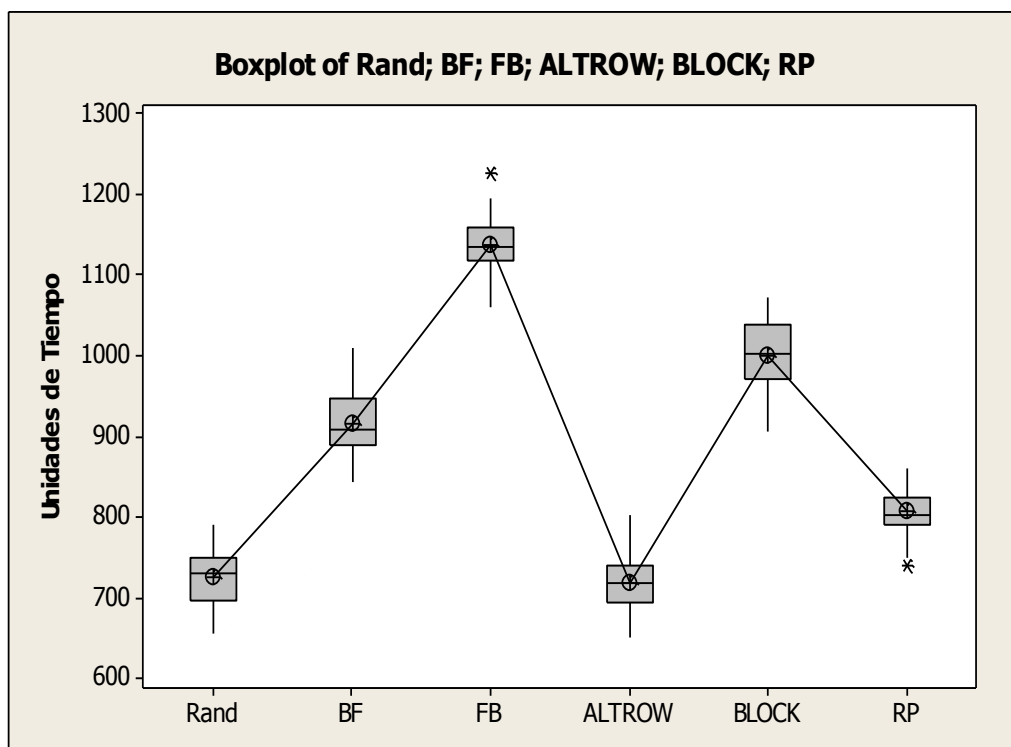
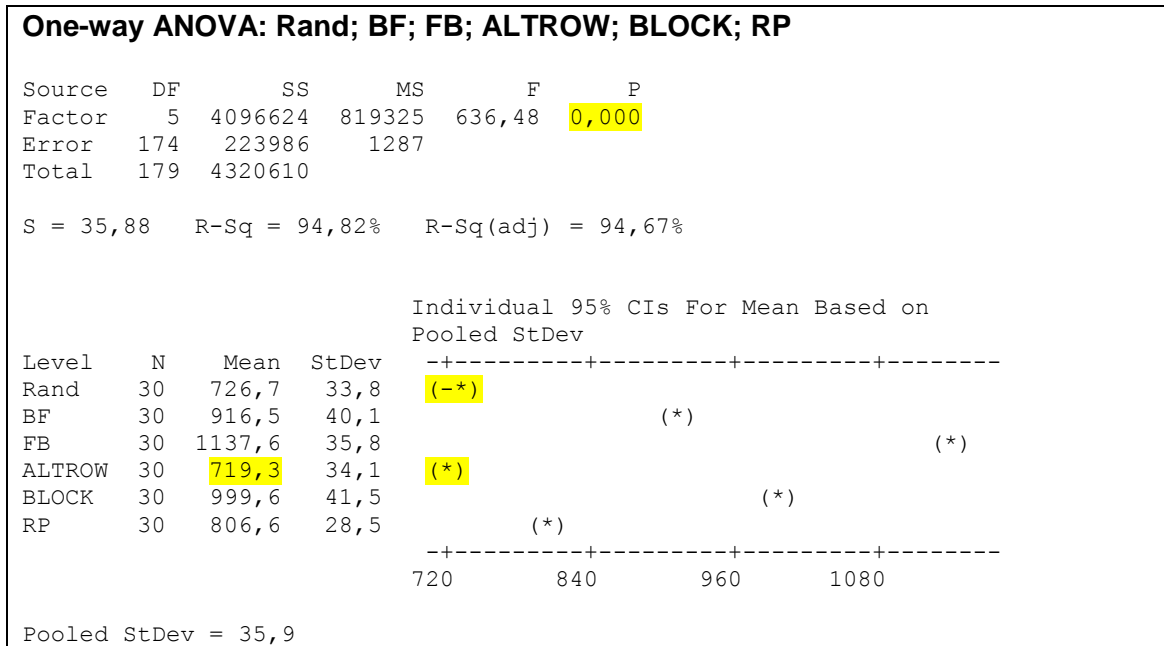


Figura 11: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen dos *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos (dentro de las 30 observaciones, 2 ha tenido un valor más grande y más pequeño que la media). Estos valores se representan mediante un asterisco. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos, aunque la estrategia *random* también está dentro de las más rápidas. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:



De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating* se sobreponen, lo que significa que no existen muchas diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

Para concluir, la estrategia que mejor funciona cuando se eliminan 10 filas (se embarcan por arriba) con un **nivel de ocupación del 100%** es la *alternating rows*.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 248
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min

- Configuración:

N Passengers in regular class = 248
 N Regular rows = 57
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de Caja (Box Plot):

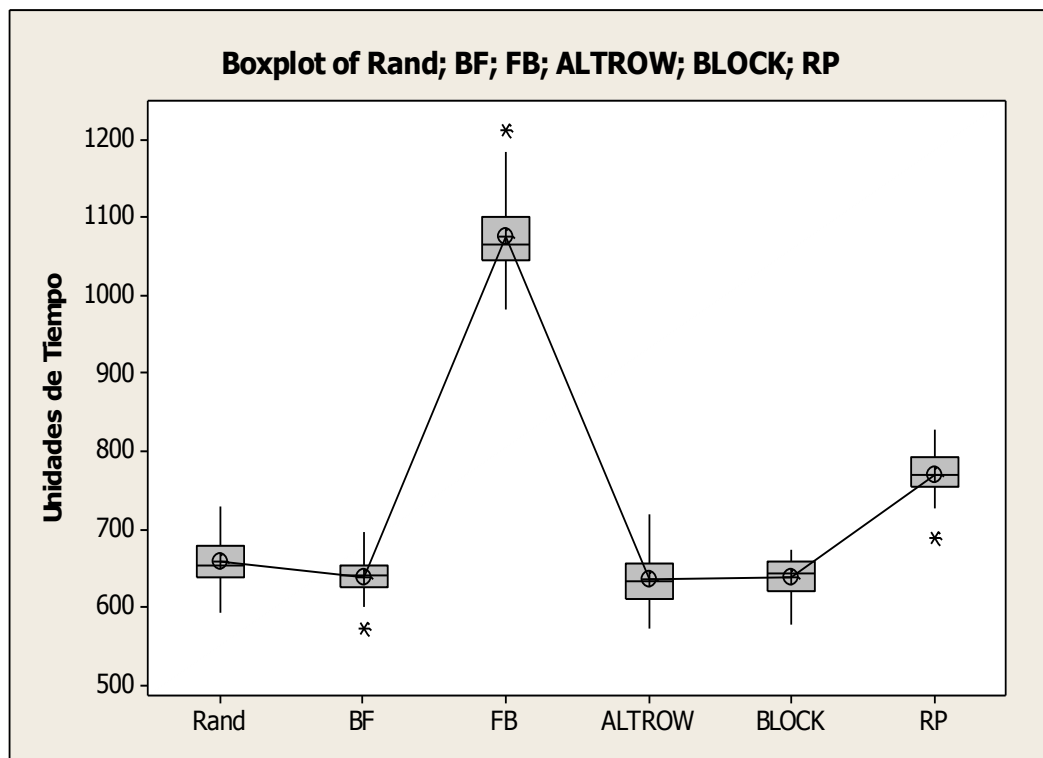


Figura 12: Diagrama de Caja

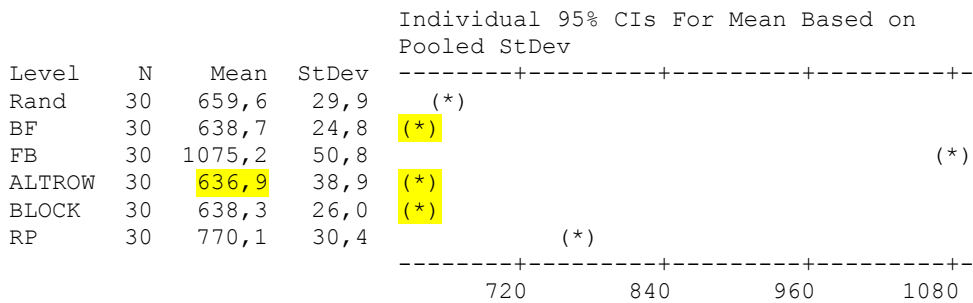
Para éste escenario (el cual contiene 10 filas de la parte principal del avión) se puede observar que existen tres *outliers*. Dos de éstos inferiores a la media del tiempo total de embarque y otro superior a la media del tiempo total de embarque de la estrategia *front to back*. Las estrategias *back to front*, *alternating rows* y *by blocks* son las que mejor funcionan en este escenario aunque la estrategia *back to front* contiene la caja más estrecha que las otras políticas por lo que sus tiempos están contenidos en un rango mucho menor que las restantes. Obviamente, la estrategia *front to back* es la que menos se ajusta a este escenario.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	4526195	905239	754,16	0,000
Error	174	208858	1200		
Total	179	4735053			

S = 34,65 R-Sq = 95,59% R-Sq(adj) = 95,46%



Pooled StDev = 34,6

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *back to front*, *by blocks* y *alternating* se superponen, lo que significa que no existen diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobreposición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

Para concluir, la estrategia que mejor funciona cuando se embarcan 10 filas más con un **nivel de ocupación del 100%** es la política *alternating rows*.

11 filas

90% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 186
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 186
N Regular rows = 22
Iterations to run = 30
Hand-luggage time = 12
Seating time interference = 10
Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

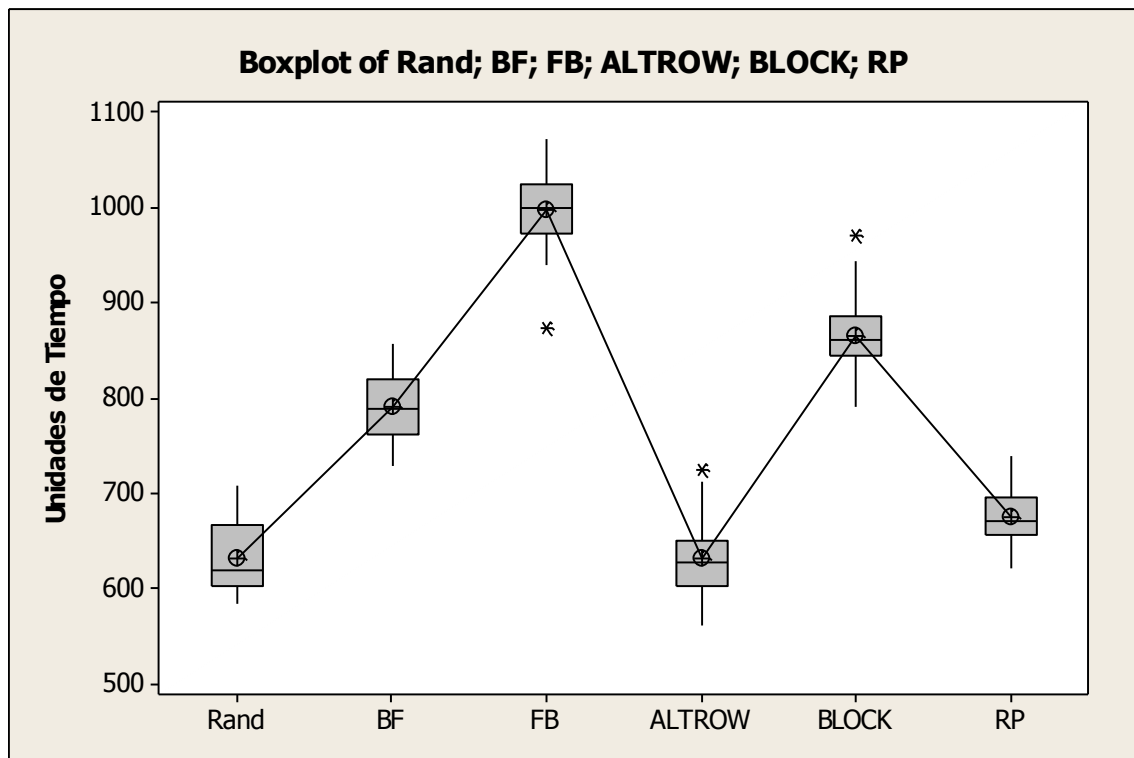
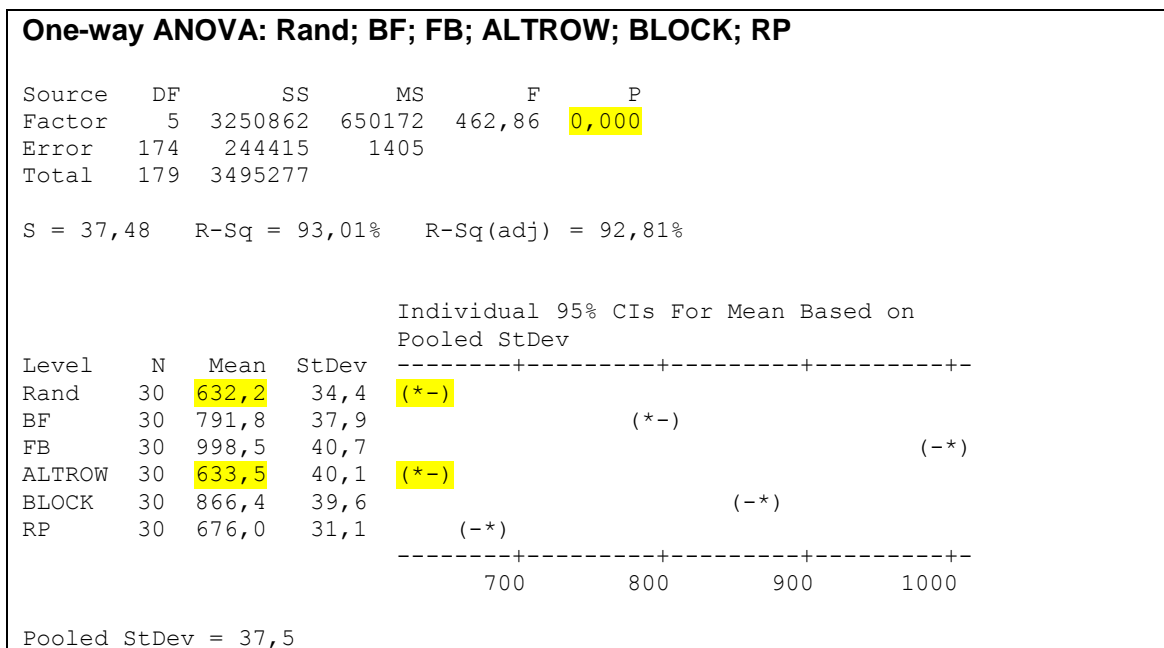


Figura 13: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen tres *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* y *random* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:



De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating rows* se sobreponen, lo que significa que no hay diferencias significativas entre ambas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *random* y *alternating rows* contienen los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que las estrategias ***alternating rows*** y ***random*** funcionan mejor en el piso principal cuando se eliminan 11 filas, con un **nivel de ocupación del 90%**.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 227
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 227
 N Regular rows = 58
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

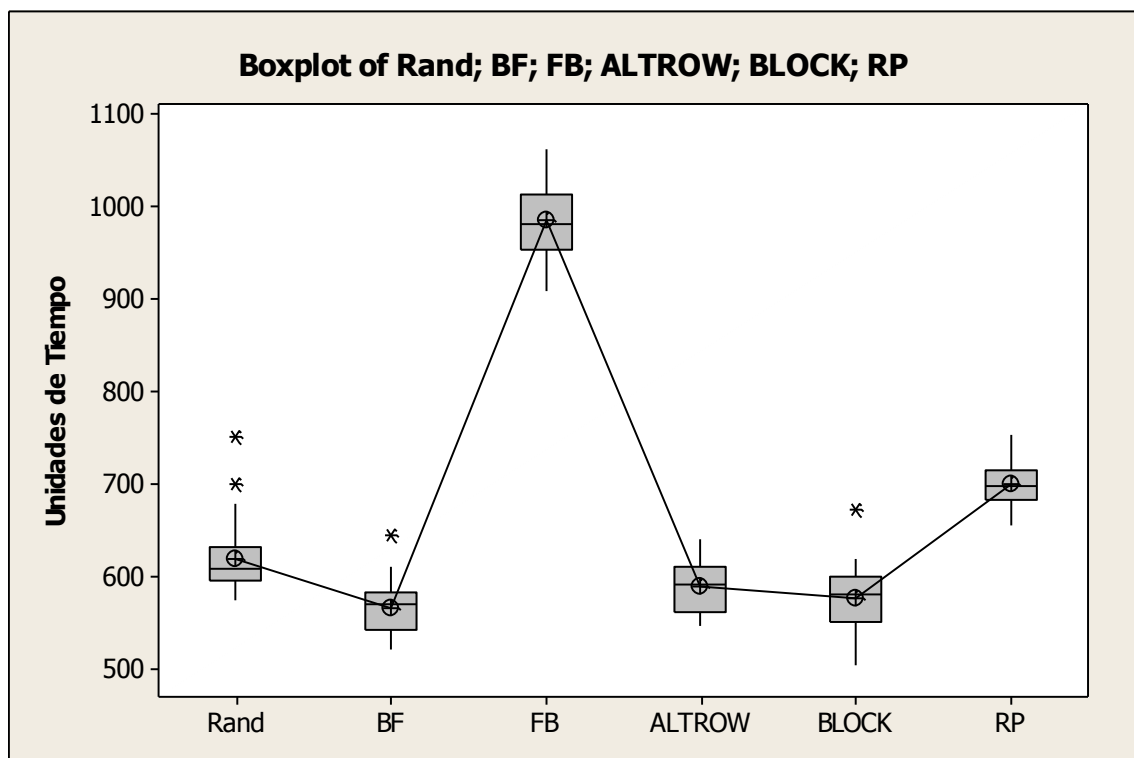
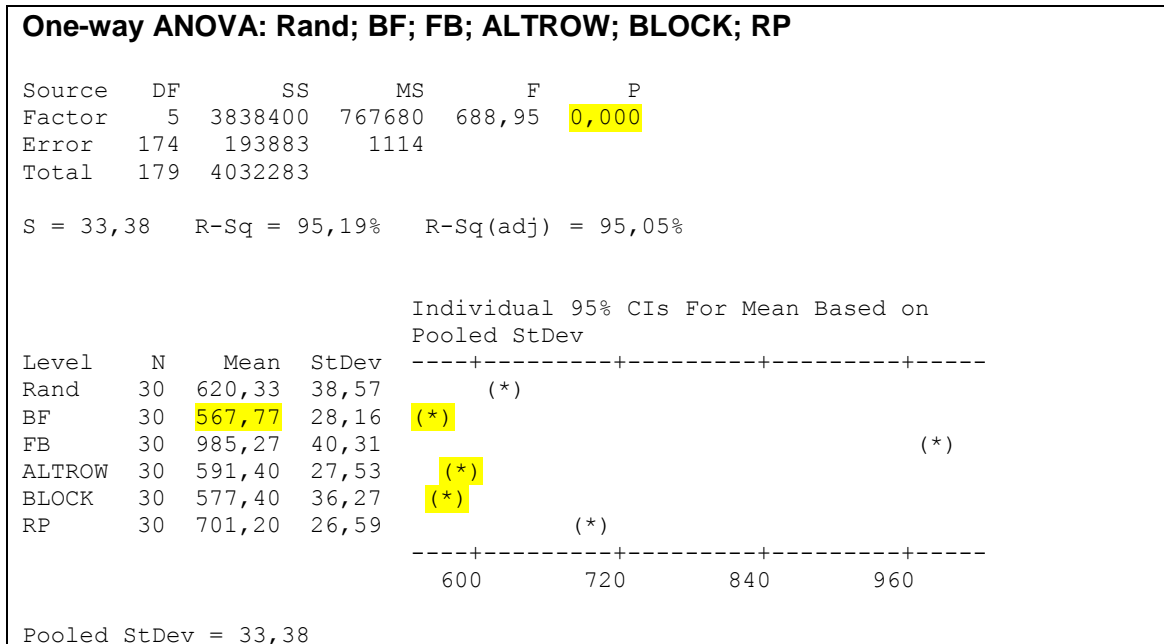


Figura 14: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen cuatro *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *back to front* parecen ser los más bajos. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:



De acuerdo con el p-valor, que en este caso es 0,000, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de las estrategias *back to front*, *alternating rows* y *by blocks* se sobreponen, lo que significa que no hay diferencias significativas entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *back to front* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

En resumen, se puede afirmar que la estrategia *back to front* funciona mejor en el piso de arriba cuando se añaden 11 filas, con un **nivel de ocupación del 90%**.

11 filas

100% nivel de ocupación

Main Deck

- Número de pasajeros en total: 207
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min

- Configuración:

N Passengers in regular class = 207
 N Regular rows = 22
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de caja (Box Plot):

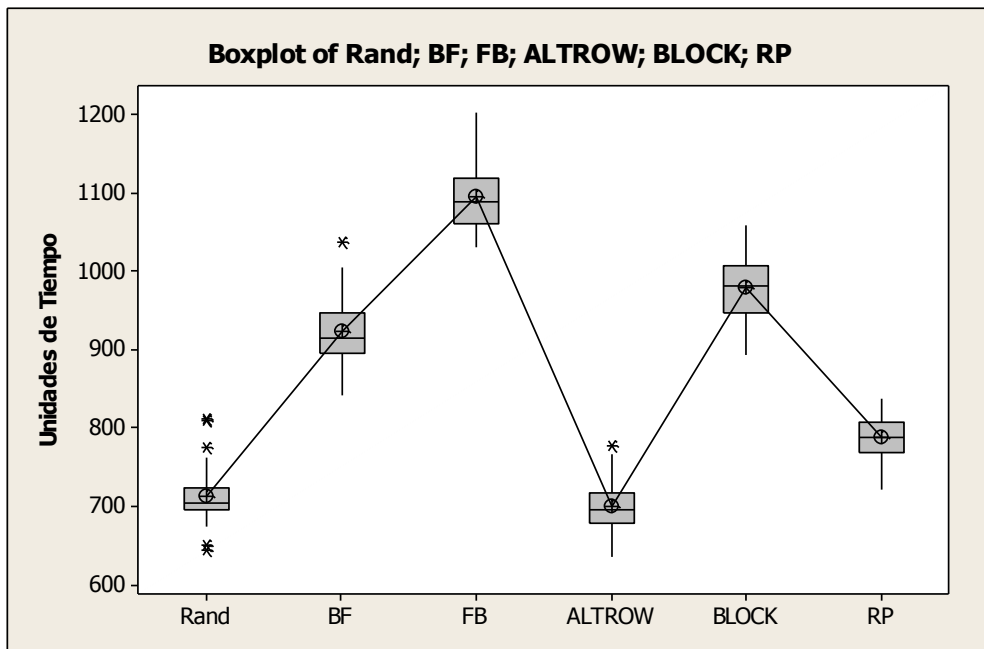


Figura 15: Diagrama de Caja

Se puede observar que existen seis *outliers* o valores atípicos, los cuales son los valores extremos del conjunto de datos (dentro de las 30 observaciones, 4 ha tenido un valor más grande y 2 más pequeños que la media). Estos valores se representan mediante un asterisco. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos, aunque la estrategia *random* también está dentro de las más rápidas. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:

One-way ANOVA: Rand; BF; FB; ALTROW; BLOCK; RP

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	3783345	756669	529,14	0,000
Error	174	248819	1430		
Total	179	4032164			

S = 37,82 R-Sq = 93,83% R-Sq(adj) = 93,65%

				Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev	
Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----	
Rand	30	712,3	37,7	(*)	
BF	30	923,7	42,5		(*)
FB	30	1095,5	42,9		(*)
ALTROW	30	699,4	33,0	(*)	
BLOCK	30	979,0	41,2		(-*)
RP	30	788,7	26,9	(*)	
				-----+-----+-----+-----	
				720	840 960 1080

Pooled StDev = 37,8

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *random* y *alternating* se sobreponen, lo que significa que no existen diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe sobre posición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

Para concluir, la estrategia que mejor funciona cuando se eliminan 11 filas (se embarcan por arriba) con un **nivel de ocupación del 100%** es la política *alternating rows*.

Upper Deck

- Número de pasajeros en total: 252
- Tiempo requerido para ejecutar la simulación: 1h 30 min
- Configuración:

N Passengers in regular class = 252
 N Regular rows = 58
 nIterations to run = 30
 Hand-luggage time = 12
 Seating time interference = 10
 Walking time per row = 1

Diagrama de Caja (Box Plot):

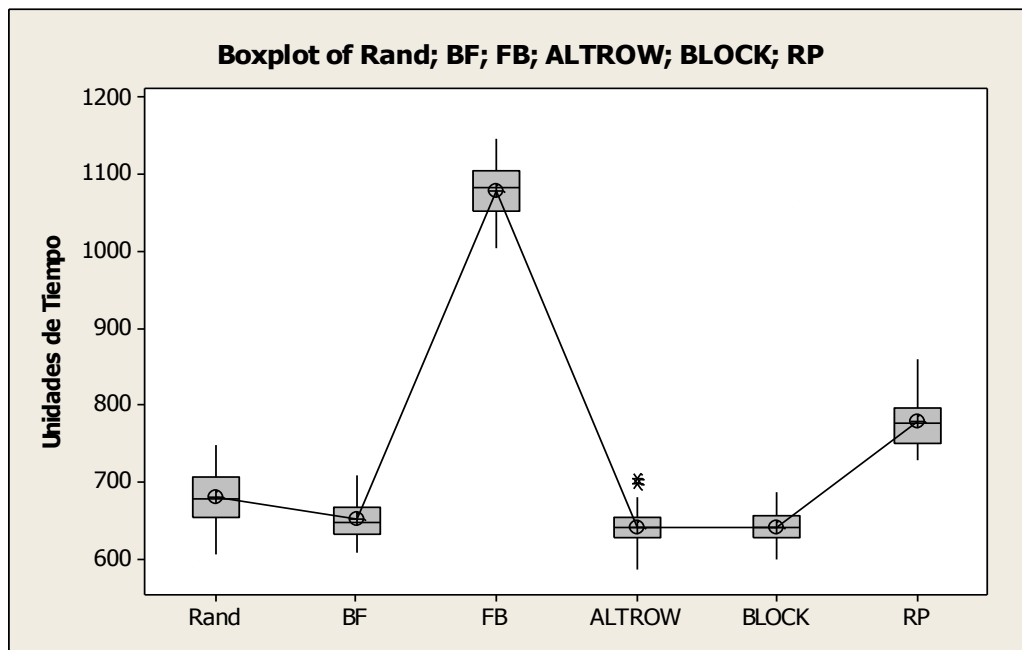
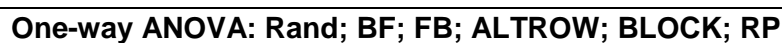


Figura 16: Diagrama de Caja

Se puede observar que existe un *outlier* o valor atípico. Estos valores se representan mediante un asterisco. Con referencia a la media, se observa que los tiempos de la estrategia *alternating rows* parecen ser los más bajos, aunque la estrategia *by blocks* también está dentro de las más rápidas. Los tiempos de la estrategia *front to back* son claramente mucho mayores que el resto.

ANOVA:



Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	4403684	880737	960,73	0,000
Error	174	159512	917		
Total	179	4563196			

$$S = 30,28 \quad R\text{-Sq} = 96,50\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 96,40\%$$

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Rand	30	679,7	37,5	(*)
BF	30	652,0	25,5	(*)
FB	30	1078,9	35,5	(*)
ALTROW	30	641,9	26,6	(*)
BLOCK	30	641,7	22,7	(*)
RP	30	778,0	31,1	(*)

Pooled StDev = 30,3

De acuerdo con el p-valor, que en este caso es $0,000 < 0,005$, rechazamos la hipótesis nula lo que significa que no todos los seis tiempos de embarque son iguales. Se puede observar que los tiempos de la estrategia *back to front*, *by blocks* y *alternating* se superponen, lo que significa que no existen diferencias entre ellas. Para las otras estrategias, no existe superposición por lo que se considera que las diferencias entre ellas son considerables. Además, se observa que la estrategia *alternating rows* contiene los tiempos más bajos junto con la política *by blocks*, mientras la estrategia *front to back* es la peor de todas.

Para concluir, la estrategia que mejor funciona cuando se añaden 11 filas de la parte principal con un **nivel de ocupación del 100%** son las políticas *by blocks* y *alternating rows*.

13. Resultados de la simulación

Se han llevado a cabo dos experimentos. Un embarque normal, es decir, un embarque donde el total de pasajeros de la cubierta principal se embarcan por la puerta de embarque principal y otro embarque donde el total de pasajeros de la cubierta superior embarcan por la puerta de embarque superior. Por otro lado, se ha realizado un embarque experimental con el cual se ha analizado la variabilidad del tiempo total de embarque cuando se embarcan las últimas filas de la cubierta principal por el piso superior con ayuda de unas escaleras. Todo esto, analizando que estrategia de embarque es la más eficiente (*random*, *back to front*, *front to back*, *alternating rows*, *by blocks* y *optimization*) y para unos niveles de ocupación del 90 y 100%.

Así pues, se han obtenido los siguientes resultados:

- Para el 100% de nivel de ocupación:

9 filas

MAIN	UPPER
Alternating rows <u>717,1</u>	Alternating rows 608,3

10 filas

MAIN	UPPER
Alternating rows <u>719,3</u>	Alternating rows 636,9

11 filas

MAIN	UPPER
Alternating rows <u>699,4</u>	By blocks 641,7 Alternating rows 641,9

Para un **nivel de ocupación del 100%** la estrategia que mejor funciona es la *alternating rows* con un tiempo total de embarque de todo el avión de 699,4 unidades de tiempo (máximo entre *main* y *upper deck*). Así pues, el embarcar **11 filas** por arriba disminuye considerablemente el tiempo total de embarque.

- Para el 90% de nivel de ocupación:

9 filas

MAIN	UPPER
Alternating rows <u>650,7</u>	Back to front 530,97

10 filas

MAIN	UPPER
Alternating rows <u>638,8</u>	Back to front 557,87

11 filas

MAIN	UPPER
Random 632,2 Alternating rows <u>633,5</u>	Back to front 567,77

Para un **nivel de ocupación del 90%** las estrategias que mejor funcionan son la *alternating rows* y la *random* con un tiempo total de embarque de todo el avión de 633 unidades de tiempo (máximo entre *main* y *upper* deck). Así pues, el embarcar **11 filas** por arriba disminuye considerablemente el tiempo total de embarque.

Análisis de los tiempos de embarque para cada nivel de ocupación:

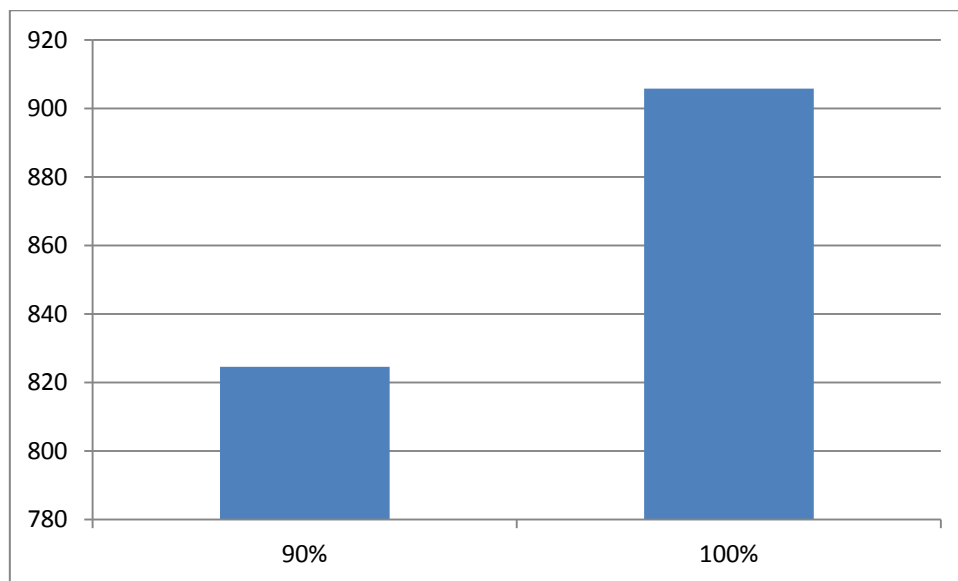


Figura 17: Estrategia alternating rows (más eficiente) en un embarque normal

En este gráfico se muestra como en un **embarque normal** y para un nivel de ocupación del 90%, el total del tiempo de embarque es bastante inferior a cuando el avión viaja completamente lleno. Como se ha comentado anteriormente existe una gran diferencia entre los tiempos de embarque de cada cubierta (*main* y *upper* deck) y por eso se ha llevado a cabo el embarque experimental.

90%e	100%e
650,7	717,1
638,8	719,3
633,5	699,4

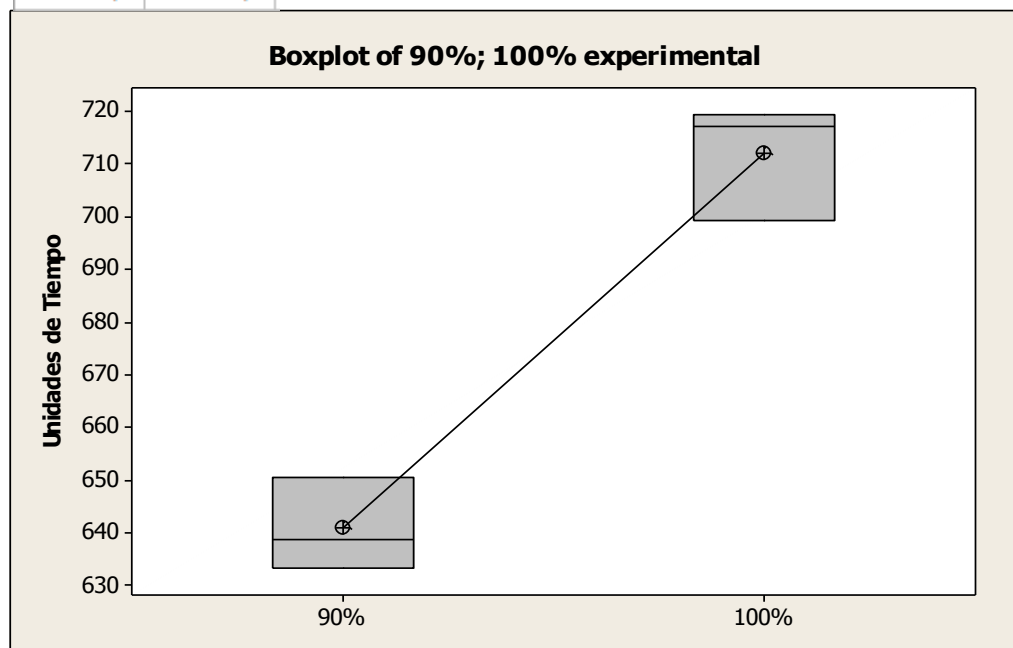


Figura 18: Diagrama de Caja para la estrategia más eficiente (*alternating rows*)

En este gráfico se muestra como en un **embarque experimental** (9-10-11 filas) los tiempos de embarque oscilan entre rangos pequeños de tiempo. Además, para un nivel de ocupación del 90% la media del tiempo de embarque es considerablemente inferior a cuando el avión viaja completamente lleno.

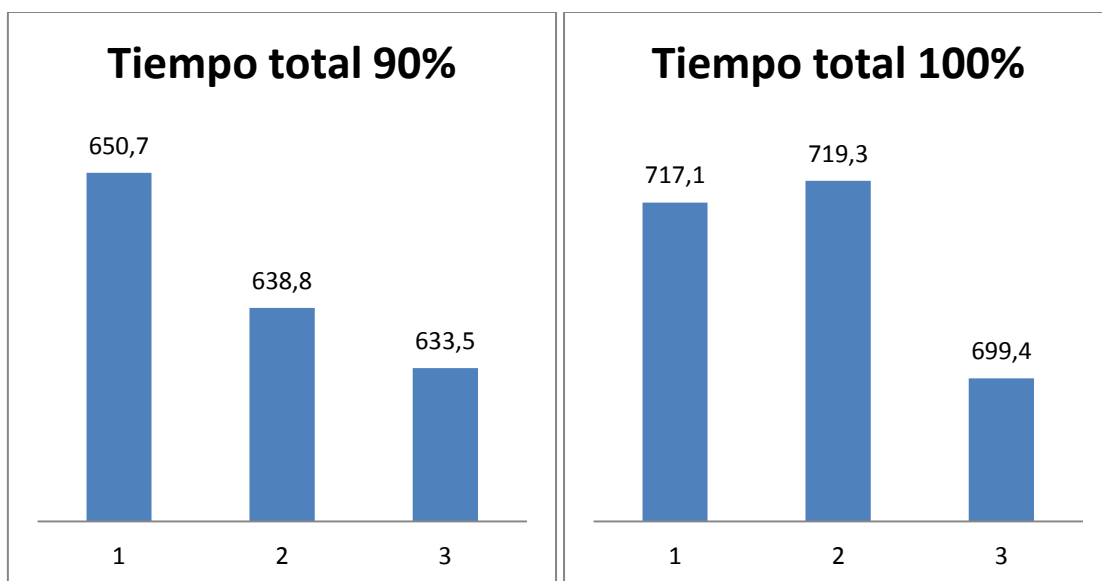


Figura 19: Tiempo total de embarque para 9, 10 y 11 filas

En la figura 19 podemos observar cómo, con un nivel del 90% de ocupación, a medida que se van añadiendo filas a embarcar por la parte de arriba el tiempo total de embarque va disminuyendo. Para un nivel del 100%, al aumentar una fila más (de 9 a 10) el tiempo de embarque aumenta ligeramente pero al aumentar de 10 a 11 filas el tiempo cae considerablemente hasta casi alcanzar al tiempo total de embarque para el 90% de ocupación.

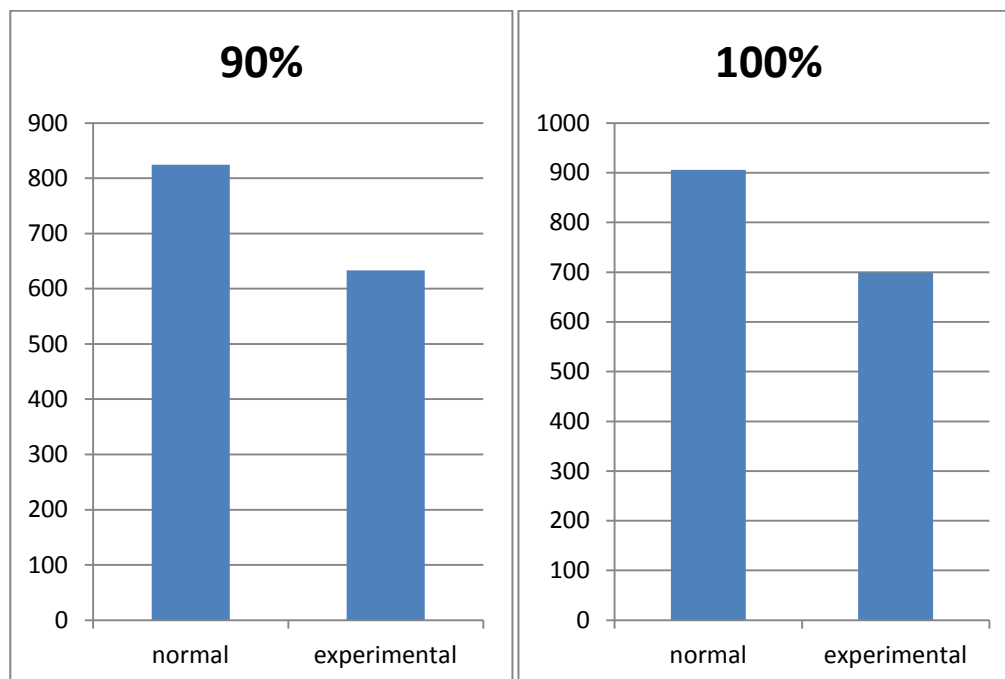


Figura 20: Disminución tiempo total con embarque experimental

En la figura 20 se observa que para un nivel de ocupación del 90% se ha pasado de un tiempo total de embarque normal de 824,6 unidades de tiempo a 633,5 unidades de tiempo para el tiempo total del embarque experimental (11 filas).

Para un nivel de ocupación del 100% se ha pasado de un tiempo total de embarque normal de 905,8 unidades de tiempo a 699,4 unidades de tiempo para el tiempo total del embarque experimental (11 filas).

14. Conclusiones de la simulación realizada en este estudio

Después de haber analizado estudios anteriores sobre el proceso de embarque en un avión y de haber realizado un modelo de simulación se puede concluir que de acuerdo al p-valor, que en todos los casos es 0'000, existen diferencias significativas entre algunos de los seis tiempos totales de embarque.

La estrategia más tradicional y más común utilizada por las compañías aéreas que corresponde al método *back to front* (Evan Herbst 2007) no es la más eficiente pero sí una de las que mejor encaja en un Airbus 380 junto con la estrategia *by blocks* y *alternating rows*. Por el contrario, la estrategia más eficiente en todos los escenarios ha sido la *alternating rows* usada en el modelo experimental, exactamente embarcando 11 filas de la cubierta inferior por arriba.

En cuanto a la revisión de la literatura cabe destacar que cada aerolínea debe escoger un método u otro según el tipo de avión utilizado, el nivel de ocupación del vuelo y el servicio al cliente dado. Además, como punto positivo la estrategia *alternating rows* se puede llevar a cabo en la práctica. Si esta no encajara en la filosofía de la aerolínea, cabe destacar que las estrategias *back to front* y *by blocks* son las dos más eficientes después del método *alternating rows*. Al existir pocos estudios en aviones transatlánticos la única conclusión que se puede extraer es que la estrategia *optimization*, la cual es una combinación del método *back to front* y *WilMa* y la más eficiente en el estudio de **Bazargan et al. (2012)** es una de las menos eficientes en la mayoría de los escenarios. La estrategia *outside-in*, que no se ha considerado en este estudio, es la más eficiente para un Airbus 380 según **Inman et al. (2007)**. Sin embargo, este autor también concluye, igual que se puede concluir de este estudio, que a mayor tamaño de avión, más estructurados son los métodos de embarque para que sean eficientes pero el problema reside en que una estrategia muy estructurada afecta al servicio al cliente ya que separa a grupos que viajan juntos (**Ferrari y Nagel 2005**).

En cuanto a las interferencias entre pasajeros, es obvio que en la cubierta inferior existen más interferencias debido a la disposición y número de asientos existentes. Por tanto, el tiempo total de embarque de un avión siempre dependerá del tiempo total de embarque en el *main deck*. Sin embargo, en el *upper deck* las interferencias entre pasajeros son mínimas y el embarque se lleva a cabo con más facilidad.

Finalmente, se ha comprobado en la simulación al igual que en varios estudios analizados anteriormente (**Ferrari y Nagel 2005, Audenaert 2009**) que el nivel de ocupación de pasajeros no es de importante consideración si solo se tiene en cuenta un 10% menos de ocupación (90-100%). Los resultados de la simulación muestran como no existen diferencias entre los métodos de embarque (sigue siendo el método *alternating rows* el más eficiente) y obviamente al haber un menor número de pasajeros los tiempos totales de embarque son inferiores.

15. Líneas de trabajo futuro

En este trabajo, se ha desarrollado una primera aproximación a un modelo que podría representar un proceso de embarque de pasajeros real. Así, se ha realizado un modelo simple que podría mejorarse y completarse en un estudio futuro. Las limitaciones de este modelo son:

- No se tiene en cuenta la primera clase ya que cuenta con puerta de embarque propia y es la zona por la cual se tarda menos en embarcar.
- Se embarcan a todos los pasajeros por las dos puertas de embarque restantes sin tener en cuenta el embarque de forma remota.
- En la simulación el tiempo de embarque no está en segundos sino en unidades de tiempo. En este caso, una unidad de tiempo representa el tiempo que conlleva pasar de una fila a otra por el pasillo. En un embarque real se tarda 0.5 segundos, sin embargo, el código utilizado no acepta decimales y se han convertido en unidades de tiempo.
- En cuanto al comportamiento de los pasajeros solo se han tenido en cuenta tres parámetros. Éstos son los mismos que en el estudio de Silvia Mas (2012) con el que

se basa este estudio (velocidad al caminar, tiempo de almacenaje del equipaje y tiempo de interferencia a la hora de sentarse). Como comenta Silvia Mas en su estudio “no diferenciamos si uno o dos pasajeros deben levantarse para dejar pasar al que quiere sentarse dentro de la fila”. Así pues, se hace un promedio de tiempo necesario cuando solo un pasajero debe levantarse y cuando dos pasajeros deben hacerlo.

- Este modelo asume que todos los pasajeros están haciendo cola cuando el embarque comienza. Por eso, pasajeros que llegan tarde, pasajeros con necesidades especiales o pasajeros viajando juntos no se han tenido en cuenta.
- Otros aspectos que afectarían al tiempo total de embarque y que no se han incluido son la edad o género del pasajero que modificarían la velocidad al caminar o, por otro lado, el tamaño y cantidad del equipaje de mano.
- Se puede estudiar cómo afecta el número de puertas de embarque disponibles (1, 2 o 3) en el tiempo total de embarque.

16. Bibliografía

Audenaert, J., Verbeeck, K., Vanden Berghe, G., 2009. Multi-agent based simulation for boarding. *The 21st Belgian-Netherland Conference on Artificial Intelligence. BNAIC. Eindhoven.*

Bachmat, E., Berend, D., Sapir, L., Skiena, S., Stolyarov, N., 2009. Analysis of Airplane boarding times. *Journal Operations Research. Volume 57, Issue 2.*

Bazargan, M., 2007. A LP approach for aircraft boarding strategy. *European Journal of Operational Research, Volume 45, Issue 16.*

Bazargan, M., 2004. *Airline Operations & Scheduling. Ashgate Publishing Co.*

Bazargan, M., Vasigh, S., 2003. Size versus efficiency – a case study on US commercial airports. *Journal of Air Transport Management 9, 187–193.*

Ferrari, P., 2005. Improving passenger boarding in airplanes using computer simulations. *International Airport Review.*

Ferrari, P., Nagel, K., 2004. Robustness of Efficient Passenger Boarding in Airplanes, *Transportation Research Board Annual Meeting '05, Preprint Number 05-0405.*

Herbst, Evan., February 2007. A tale of two aisles, *Control #2158.*

Inman, J., Jones, K., Thompson, K., 2007. The Airplane Boarding Problem. *The Electronic Journal of Mathematics and Technology, Volume 1, Number 2, ISSN 1933-2823.*

Lewis, C., Lieber, R., 2005. Testing the latest boarding procedures; Airlines try new strategies to load passengers faster; The new meaning of groups. *Wall Street Journal, New York, NY, 2 November 2005.*

Marelli, S., G. Mattocks, R. Merry. 1998. The role of computer simulation in reducing airplane turn time. *Boeing Aero Magazine, Issue 1.*

- Mas, Silvia. 2012. Aircraft Boarding Strategies: A study of the airline boarding problem.
- Nagel, K., Ferrari, P., 2005. The secrets to faster boarding. *International Airport Review* 3, 41-45.
- Nyquist, D., McFadden, K., 2008. A study of the airline boarding problem. *Journal of Air Transport Management*, Volume 14, Issue 4.
- Scott Marelli, Gregory Mattocks, Remick Merry. The Role of Computer Simulation in Reducing Airplane Turn Time. Feb. 9 2007. <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_01/textonly/t01txt.htm>177
- Steffen, J., 2008a. Optimal boarding method for airline passengers. *Journal Air Transport Management*, Volume 14, Issue 3.
- Steffen, J., 2008b. A statistical mechanics model for free-for-all airplane passenger boarding. *American Journal of Physics* 76, 1114-1119.
- Steffen, J.H., Hotchkiss, J.: Experimental test of airplane boarding methods. *Journal of Air Transport Management*. 18 (1), pp 64-67, 2012.
- Steiner, A., Philipp, M., 2009. Speeding up the airplane boarding process by using pre-boarding areas. 9th Swiss Transport Research Conference.
- Tang, T., Wu, Y., Huang, H., Caccetta, L., 2012. An aircraft boarding model accounting for passengers' individual properties. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 22.
- Van den Briel, M., J. Villalobos, G. Hogg. 2003. The aircraft boarding problem. *Proc. Of the 12'th Industrial Eng. Res. Conf., IERC, CD ROM, article number 2153.*
- Van den Briel, M., J. Villalobos, G. Hogg, T. Lindemann, A.V. Mule. 2005. America West Airlines develops efficient boarding strategies. *Interfaces* 35, 191-201.
- Van Landeghem, H., A. Beuselinck. 2002. Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation approach. *European J. of Operations Research*, 142, 294-308.
- Van de Briel, M.H.L., Villalobos, J.R., Hogg, G.L., Lindemann, T., Mule', A.V., 2005. America West Airlines develops efficient boarding strategies. *Interfaces* 35, 191-201.
- Van Landeghem, H., Beuselinck, A., 2002. Reducing passenger boarding times in airplanes: A simulation based approach. *European Journal of Operational Research* 142, 294-308.
- Sitios Web
- Bureau of Transportation Statistics** http://www.bts.gov/programs/airline_information/
- EU Commission on Mobility & Transport - Air** <http://ec.europa.eu/transport/air>
- EUROCONTROL - Statistics** <http://www.eurocontrol.int/articles/statistics>
- IATA** <http://www.iata.org>

UK Airport Statistics <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=80&pagetype=88&sglid=3>

Airbus. www.airbus.com

Boeing. www.boeing.com

Flightglobal. www.flightglobal.com

Flight Journal. www.flightjournal.com

ScienceDirect. www.sciencedirect.com

17. Anexos

(Disponibles en el CD)