

Grado en Gestión Aeronáutica

Flight disruptions: Passenger recovery

Trabajo de Final de Grado

Memoria del Trabajo de Final de
Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por

Sandra Rubio Lago

y dirigido por

Dr. Ángel A. Juan Pérez

Escola d'Enginyeria
Sabadell, a 9 de Julio de 2014

El firmante, **Dr Ángel A.Juan Pérez**,
profesor de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

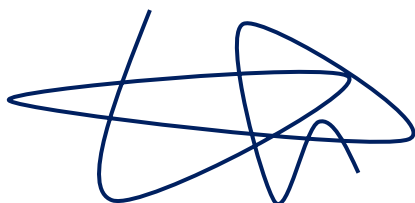
CERTIFICA:

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

Sandra Rubio Lago

Y para que conste firma la presente.

Sabadell, Julio de 2014



Firmado: **Dr Ángel A.Juan Pérez**

Índice

0. Resumen	5
------------	---

SECCIÓN 1 – INTRODUCCIÓN

1. Introducción	
1.1 Interés y motivación	7
1.2 Objetivos globales y parciales del proyecto	10
1.2.1 Objetivos globales	10
1.2.2 Objetivos parciales	10
1.3 Metodología	12

SECCIÓN 2 – BASE TEÓRICA Y EVOLUCIÓN DEL PROBLEMA

2. Estado de la cuestión	14
3. Revisión de la literatura	17
3.1 Evolución histórica del problema	17
3.2 <i>Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)</i>	19

SECCIÓN 3 – METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN

4. Metodología de resolución	
4.1 Descripción detallada del problema	24
4.1.1 <i>Inputs</i>	25
4.1.2 Definición de la función objetivo	35
4.1.3 Restricciones	36
5. Implementación y explicación del algoritmo	
5.1 Diagrama de bloques	38
5.1.1 Lector de ficheros	40
5.1.2 Aplicar <i>Disruption</i>	48
5.1.3 Comprobar Cancelaciones	49

5.1.4 Tiempo <i>Turn-around</i>	50
5.1.5 <i>Airport Capacity</i>	51
5.1.6 Mantenimientos	53
5.1.7 Comprobar conexiones	54
5.1.8 Vuelta a la normalidad	56

SECCIÓN 4 – EJECUCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6. Ejecución

6.1 Introducción	59
6.2 Resultados	60
6.2.1 Instancia B01	61
6.2.2 Instancia B02	62
6.2.3 Instancia B06	63
6.2.4 Instancia B07	64
6.3 Análisis de resultados y comparativa	66

SECCIÓN 5 – CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7. Conclusiones	70
8. Futuras líneas de trabajo	73
9. Referencias bibliográficas	75
10. Anexos	76

0. Resumen

Título del Proyecto: Flight disruptions: Passenger recovery	
Autora: Sandra Rubio Lago	Fecha: Julio del 2014
Tutor: Dr Ángel A.Juan Pérez	
Titulación: Gestión Aeronáutica	
Palabras clave: - Recuperación de pasajeros - Interrupciones en los vuelos - Retrasos y cancelaciones - Período de recuperación	
Resumen del proyecto: El proyecto consiste en desarrollar un algoritmo que ayude a las aerolíneas a encontrar la mejor solución cuando, después de interrupciones, se tiene que gestionar la planificación inicial de los vuelos, y conseguir recuperar tanto las aeronaves como a los pasajeros para que les afecte lo mínimo posible, y de esta manera, que estas interrupciones tengan un menor coste para las aerolíneas. Esto se realizará a partir de las referencias bibliográficas de <i>Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)</i> donde se intenta encontrar una solución óptima que se acerque lo máximo posible a la solución que proponen ellos en su artículo.	

SECCIÓN 1 – INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1 Interés y motivación

El sector de la aviación es una industria muy competitiva donde las aerolíneas trabajan duro para obtener una mayor utilización de sus aeronaves, que les producirá mayor productividad laboral y que les ayudará a ser aún más competitivas. Esto se consigue haciendo una programación optimizada de sus vuelos, considerando muchos factores como son el personal de cabina, la demanda de los pasajeros y otros aspectos operacionales constantes (Acuna,2009). Una utilización eficiente de estos recursos hace que se convierta en una ventaja competitiva para las compañías aéreas, además de generarles beneficios a éstas.

Pero día tras día, las aerolíneas tienen que enfrentarse a pequeñas disrupciones que hacen que no se cumpla su programación inicial. Las disrupciones son aquellas situaciones en las cuales se retrasa o se interrumpe la programación prevista (Jafari, 2011). Estas disrupciones pueden ser causadas por factores internos y externos como pueden ser ausencias de personal, fallos mecánicos, mal tiempo, problemas en ATC, entre muchos otros. Si no se gestionan bien estas pequeñas disrupciones, pueden tener un efecto muy negativo sobre las aerolíneas, tanto en términos de beneficio, como de eficiencia operacional, e incluso de satisfacción del cliente (Jafari, 2011).

Cuando esto ocurre, las compañías aéreas tienen que reorganizar su planificación inicial, y es por eso, que cada vez más, las aerolíneas están implementando sistemas de recuperación más automatizados y complejos que les ayuden a solucionar este problema, ya que es muy importante dentro de la compañía. Por ejemplo, en los EEUU sólo el 76,04 % de los vuelos llegaron a tiempo entre Enero y Diciembre de 2008, mientras que el resto, casi un 30%, llegó con 15 minutos de retraso o más tarde de su programación inicial (Acuna, 2009).

Además, cuando se producen estas interrupciones en la programación, el problema de recuperación debe ser resuelto en un periodo de tiempo muy corto, generalmente en cuestión de minutos, aspecto que aumenta más la complejidad del problema (*Sinclair, 2013*).

Estos sistemas deben saber interactuar tanto al personal como a los aviones, pero también hay que tener en cuenta a los pasajeros. Durante mucho tiempo, se implementaron sistemas de recuperación teniendo en cuenta solo los dos primeros aspectos, por separado, ya que el problema que suponía a los pasajeros suponían unos costes indirectos insignificantes (*Jafari, 2011*).

Solucionando el problema de las aeronaves, se crearon modelos basados en una red de flujos usando el método de *Branch and Bound* (*Teodorovic y Guberinic (1984)*) pero también usando el método del camino más corto (*Jarrah y Yu (1993)*). Pronto empezaron a desarrollarse más modelos como por ejemplo uno basado en búsqueda aleatoria implementada en dos fases (*Arguello, Bard y Yu (1997)*) o basados en programación lineal (*Cao y Kanafani (1997)*), y otros más actuales como el que utiliza una heurística que reduce el número de rutas factibles (*Rosenberger (2003)*) o un modelo de recuperación basado en generación de columnas (*Eggenberg, Salani y Bierlaire (2010)*).

Hasta en que en un estudio, se vio que cuando los pasajeros más importantes de una compañía se van a otra por culpa de un mal servicio, se reduce en factor de negocio de ésta. Además, este aspecto contribuye a que los beneficios de las aerolíneas se reduzcan, en algunos casos, hasta el 98% (*Bratu, 2005*).

Un ejemplo de esto viene dado en el período de entre 1995 y 2000, donde en Estados Unidos, el número de vuelos que tenía un tiempo de taxi-out superior a 1 hora había aumentado un 165%, y esto provocó que el número de quejas de los pasajeros aumentará considerablemente, tal y como podemos observar en la siguiente figura.

Table 1. Airline Passenger Dissatisfaction

	1995	2000	Ratio (2000/1995)
Number of articles in US newspapers	22	101	4.6
Complaints (per 100,000 passengers)	0.76	2.98	3.9

Fig. 1.1 Insatisfacción de los pasajeros de aerolíneas en EEUU (Bratu,2005)

Entonces empezaron a desarrollarse métodos que solucionaron este problema, es decir, únicamente la recuperación de pasajeros, donde encontramos modelos con técnicas de red de flujos (*Bratu y Barnhart (2006)*) o modelos de programación no lineal (*Zhang y Hansen (2008)*).

Aún así, solucionar este problema por separado (aeronaves, personal y pasajeros) no es lo más óptimo, por eso se ha intentado interactuar tanto aviones, como personal, como pasajeros, ya que, una de las ventajas competitivas que puede obtener una compañía viene dada por la confianza del servicio que se dé a los pasajeros, sobre todo a los de negocios que son lo que dan beneficios más importantes para las aerolíneas (*Bratu, 2005*).

Aunque tan solo se conoce un modelo que aborde el problema de la recuperación total creado por *Petersen, Solveling, Johnson, Clarke y Shebalov (2010)* existen varios modelos que abordan solo dos de los de los problemas, el que más es la integración entre aeronaves y pasajeros.

Para ello, el objetivo será crear un sistema de recuperación que integre aeronaves y pasajeros y que consiga que, después de una interrupción, se minimice el coste de operación de ésta, además de que, a su vez, haga crecer la lealtad y satisfacción del cliente hacia la compañía aérea.

1.2 Objetivos globales y parciales del proyecto

1.2.1 Objetivos globales

A partir del análisis de las fuentes bibliográficas y del estudio del modelo de recuperación de pasajeros de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*, donde a partir de una heurística de *large neighborhood search (LNS)* se conseguía encontrar un modelo que integrara tanto el problema de la recuperación de aeronaves como el de recuperación de pasajeros, se plantea como objetivo principal de este proyecto, **desarrollar un algoritmo de recuperación de pasajeros donde se nos permita extraer muchas soluciones para determinar cuál de ellas es la más óptima y deseada por la compañía aérea, para minimizar los costes que supone una disrupción de la programación prevista.**

Conseguir este objetivo nos permitirá poder realizar una comparación de resultados entre el modelo presentado por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*, y el nuevo modelo de recuperación que se quiere conseguir. De esta manera se pueden realizar experimentos sobre diferentes escenarios entre ellos y analizar hasta que punto podemos crear un modelo que pueda acercarse lo más próximo a los resultados obtenidos por el presentado por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*

1.2.2 Objetivos parciales

Para poder alcanzar el objetivo global, se definen a continuación una serie de objetivos parciales que conformaran el conjunto de hitos a corto plazo necesarios para definir una metodología eficiente para dar respuesta al problema planteado. Se numeran a continuación los objetivos parciales del proyecto:

- **Estudiar y analizar el modelo de recuperación de pasajeros de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin*:** será necesario estudiar el modelo inicial del cual se quiere realizar una modelo similar que pueda ayudarnos a abordar con precisión el problema, conocer exactamente en qué consiste el proceso de

recuperación de pasajeros y ver qué elementos forman parte de él para poder desarrollar una sistema parecido.

- **Definir un algoritmo que ejecute soluciones de recuperación de pasajeros en la reprogramación de vuelos cuando se han producido interrupciones en éste:** como parte más importante del proyecto, se definirá y programará una heurística que nos permita encontrar varias soluciones al problema de la recuperación de pasajeros cuando se han producido interrupciones de pequeña escala en uno o varios vuelos programados. Todo esto se realizará observando el modelo analizado anteriormente (*Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*) y dando por hecho que conocemos algunos datos actualizados, como podría ser la lista de pasajeros definitiva de un vuelo en concreto.
- **Diseñar y ejecutar una serie de experimentos que nos permita identificar y cuantificar el potencial de este nuevo sistema de recuperación de pasajeros:** para poder identificar los resultados finales del proyecto, se realizaran una serie de experimentos del nuevo sistema para poder extraer dichos resultados y, tras su análisis, una serie de conclusiones del proyecto.

1.3 Metodología

Resulta necesario definir una metodología que haga posible alcanzar los objetivos parciales definidos anteriormente y de esta manera, dar respuesta al objetivo global planteado en el proyecto.

Como punto de partida será imprescindible realizar una búsqueda bibliográfica sobre cuál es el actual estado del arte de sistemas que solucionen el problema de la recuperación de pasajeros cuando se han producido interrupciones de pequeña escala. Se dedicará un apartado de la memoria a realizar una revisión de este estado del arte que sirva como base para realizar una contribución original en la metodología de resolución del problema.

Para poder satisfacer este propósito, se consultaran bases de datos documentales y revistas electrónicas, así como ediciones en papel, a partir de los recursos que la Universidad pone a disposición de los estudiantes como bibliotecas, bases de datos, revistas...

Una vez estudiado el problema a resolver y contando con la base teórica necesaria que permita realizar una definición clara y precisa de ello, se diseñará un nuevo algoritmo que mejorará los encontrados hasta ahora, para poder realizar una mejor solución al problema de la recuperación de pasajeros en pequeñas interrupciones. De esta manera, se intentará que, el nuevo algoritmo dé más soluciones que los anteriores, en el mismo período de tiempo, dando así la oportunidad a las aerolíneas para que escojan la solución que sea más óptima para ese problema en concreto.

Se realizarán a lo largo del proyecto, un conjunto de entregas parciales y reuniones con el tutor que permitan discutir y evaluar el progreso del proyecto así como planificar y ejecutar el conjunto de acciones correctivas que permitan cumplir los objetivos planteados en los plazos de tiempo establecidos.

SECCIÓN 2 – BASE TEÓRICA Y EVOLUCIÓN DEL PROBLEMA

2. Estado de la cuestión

Antes de entrar en detalle el problema de la recuperación de aeronaves y pasajeros cuando se han producido alteraciones en el servicio, se analizarán datos importantes que hacen que este proyecto tenga una gran relevancia y sea necesario encontrar una solución factible para que las compañías aéreas no pierdan beneficios por culpa de este problema.

Estos datos que se verán a continuación han sido recogidos del *Airline passenger transportation system* (APTS) y están basados en datos estimados del año 2010, donde hay 421 millones de pasajeros que hacen 46.8 millones de itinerarios y que son transportados en unos 8.7 millones de vuelos.

Metric	Direct + Connecting
Flights	8,701,205
Itineraries	46,850,298
Passengers	421,011,740

Fig. 2.1 Estadísticas de vuelos, itinerarios y pasajeros

De todos estos pasajeros un 78.7% llegaron a tiempo a sus destinos, mientras que el resto, que sufrió retrasos en sus vuelos, tienen un tiempo de media de retrasos de 67 minutos.

En estas estadísticas también se puede observar cómo se reparte el porcentaje de pasajeros que sufrieron alguna alteración en su vuelo de la siguiente manera:

- 32% son pasajeros con ruta directa que se ha retrasado.
- 23% son pasajeros con rutas conectadas que se han cancelado.
- 16% son pasajeros con rutas conectadas que se han retrasado.
- 14% son pasajeros que llegaron a perder la conexión.
- 11% son pasajeros con ruta directa que se ha cancelado.

Por tanto, si se suman los porcentajes, da un resultado de que el 49% de pasajeros sufrieron retrasos en los vuelos de su itinerario, un 33% de pasajeros sufrieron

cancelaciones en su ruta, y el 14% de los pasajeros perdieron la conexión de su itinerario entre un vuelo y el siguiente. También se puede observar que un 67% de los casos era itinerarios directos y que el otro 33% de itinerarios eran con conexión.

Metric	Direct	% Total	Connecting	% Total
Flights	8,701,205			
Itineraries	6,128,665	13.1%	40,721,633	86.9%
Passengers	282,070,114	67.0%	138,941,626	33.0%

Fig. 2.2 Vuelos de pasajeros por tipo de itinerarios (Directo o con Conexión)

Metric	Direct	% Total	Connecting	% Total
Disrupted Itineraries	1,684,552	3.6%	9,898,091	21.1%
Passengers on Disrupted Itineraries	54,494,521	12.9%	35,088,939	8.3%
Total Trip Delay for Passengers on Disrupted Itineraries (Years)	5,367	46.0%	6,302	54.0%
Average Trip Delay for Passenger on Disrupted Itineraries (Minutes)	51		93	

Fig. 2.3 Alteraciones en vuelos de pasajeros por tipo de itinerarios (Directo o con Conexión)

En las tablas anteriores se pueden observar diferencias entre vuelos, itinerarios y pasajeros dependiendo de si son vuelos directos o con conexión. En la segunda tabla se centra más en información sobre pasajeros.

Como conclusiones de este estado de la cuestión, cabe comentar que este problema está disminuyendo poco a poco, como se puede observa en la siguiente tabla donde se encuentra una comparativa entre el año 2007 y el 2010.

Metric	2007	2010
Flights	9,839,578	8,701,205
Total Passenger Trip Delays (Years)	15,841	11,669
% Passengers on Connecting Itineraries	30.3%	33%
% Passengers on Disrupted Itineraries	25.7%	21.3%
Average Trip Delay for Passengers on Disrupted Itineraries (mins)	73	67

Fig. 2.4 Tendencias del 2007 al 2010

De esta tabla cabe destacar que el tiempo de retraso en los viajes de los pasajeros, anualmente, se ha reducido un 26%, además de que el tiempo medio de retrasos también ha disminuido en 6 minutos.

Finalmente, es de destacar lo importante que puede llegar a ser solucionar este problema, ya que en Estados Unidos, las alteraciones en los vuelos del país suponen en 2007 un coste de pérdida de productividad económica en el país de 32 billones (americanos) de dólares.

Comentar que estos datos, aún siendo de hace años, han sido los datos más recientes publicados por fuentes oficiales y más fiables para poder justificar este proyecto.

3. Revisión de la literatura

3.1 Evolución histórica del problema

Para realizar el estudio que se propone para este proyecto y alcanzar los objetivos que se plantean, es necesario disponer de una visión cronológica de cuál ha sido el origen del problema, que aportaciones se han realizado y cuál es el estado actual de la cuestión.

Son muchos los autores que, puede ser que refiriéndose con otras denominaciones, han establecido las bases necesarias y han abierto caminos de investigación que han llevado a discutir el problema de la recuperación de pasajeros para interrupciones de pequeña escala y de cómo lo entendemos hoy en día.

Para poder entender la gran complejidad del problema, primero hay que entender como las aerolíneas plantean su problema de programar los vuelos que hacen cada día. Éstos suelen resolverse en un orden secuencial y se dividen en cinco fases. Las aerolíneas primero deben determinar qué ciudades van ser las escogidas para recuperar sus planes de vuelo. A continuación, se determinan qué tipo de aviones se asignarán a cada plan de vuelo de la programación. En la tercera fase, las compañías aéreas deben crear, para cada aeronave, las rotaciones que conectan los diferentes tramos de vuelo, respetando siempre las limitaciones de mantenimiento. A continuación, las aerolíneas deben asignar la tripulación a cada aeronave y a cada rotación, respetando siempre las restricciones legales de los trabajadores. Y por último, se forman los diferentes horarios mensuales de todos los miembros de la tripulación.

Desde la existencia del mundo de la aviación, siempre ha existido el problema de las interrupciones (debidas al mal tiempo, al mantenimiento de los aviones, etc). Estas alteraciones de las programaciones iniciales repercuten directamente en los costes y beneficios de las aerolíneas. Se han propuesto varios enfoques para tratar por separado el problema de la recuperación de aeronaves (por ejemplo tenemos a *Argüello et al. 1997; Cao and Kanafani 1997a,b; Jarrah et al. 1993; Rakshit et al. 1996;*

Rosenberger et al. 2003; Teodorović and Guberinić 1984; Thengvall et al. 2003) o también el de la recuperación de la tripulación (como por ejemplo *Abdelghany et al. 2004; Lettovsky et al. 2000; Medard and Sawhney 2007; Nissen and Haase 2006; Stojković et al. 1998; Stojković and Soumis 2001; Yu et al. 2003*).

Los algoritmos para el problema de la recuperación de aeronaves suele basarse en modelos de flujo de red que se resuelven con métodos de Branch and Bound o con métodos basados en descomposiciones. *Cao and Kanafani (1997a,b)* abordan el problema como un programa de segundo grado que lo resuelven heurísticamente mediante linealizaciones, mientras que *Rosenberger et al. (2003)* aborda el problema como un problema conjunto de particiones. *Argüello et al. (1997)* desarrollaron un procedimiento aleatorizado adaptativo de búsqueda (GRASP) para este problema.

El problema de recuperación de la tripulación por lo general se modela como un problema conjunto de particiones (al igual que hacia *Rosenberger et al. 2003*) que se resuelve con técnicas de Branch and Bound y técnicas de Branch and Price.

El problema de recuperación de pasajeros se ha resuelto siempre por medio de técnicas de flujos de red por *Bratu and Barnhart (2006)* y por técnicas de programación entera no lineal por medio de *Zhang and Hansen (2008)*.

También ha habido autores que han resuelto problemas de aeronaves y de recuperación de la tripulación de manera conjunta (como por ejemplo *Abdelghany et al. 2008; Luo and Yu 1997; Stojković et al. 2002*). Los modelos y técnicas usados para resolver este tipo de problemas han sido programas lineales a gran escala mixtos o bien puros enteros.

Por último, es importante comentar que *Petersen, Solveling, Johnson, Clarke, and Shebalov (2010)* han enfocado sus estudios a resolver todo el problema, es decir, la recuperación tanto de aeronaves, como de tripulación como de pasajeros. Aún así, el problema es tan complejo no han llegado a ser muy importantes hasta ahora.

3.2 *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*

Para poder analizar más el problema que se quiere solucionar con este proyecto, se considera oportuno profundizar en uno de los artículos que se han abordado con más detalle y que han aportado más contribuciones en la forma de resolver dicho problema. *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* introducen en su artículo una heurística basada en LNS (*large neighbourhood search*) para solucionar el problema de recuperación en las aerolíneas tras interrupciones, combinando asignación de flota, enrutamiento de aeronaves y asignación de pasajeros.

Tal y como se ha hecho en este proyecto, *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* empiezan introduciendo el problema con una revisión histórica de la literatura para analizar cuál es el contexto actual del problema. Además de explicar que se inició el proyecto gracias al ROADEF Challenge, que en el año 2009 propuso solucionar el problema de la gestión de las alteraciones en la aviación comercial. El algoritmo propuesto por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* quedó segundo en el ranking del ROADEF Challenge.

Una vez descrito el problema con los conceptos básicos para poder introducirlo, una función objetivo que nos dará una solución y una serie de restricciones que se deben cumplir para ello, se describe el método de solución que proponen *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*. Este método se procesa en tres fases diferentes, construcción, reparación y mejora. Las dos primeras fases producen una solución inicial respetando las restricciones descritas con anterioridad, en cambio, la tercera fase intenta mejorar esta solución considerando grandes cambios en la planificación, creando así una solución más factible.

La visión general de este método se presenta en la figura siguiente, donde se puede observar como las dos primeras fases se repiten varias veces hasta encontrar una solución mejorada que luego será el punto de partida de la siguiente y última fase.

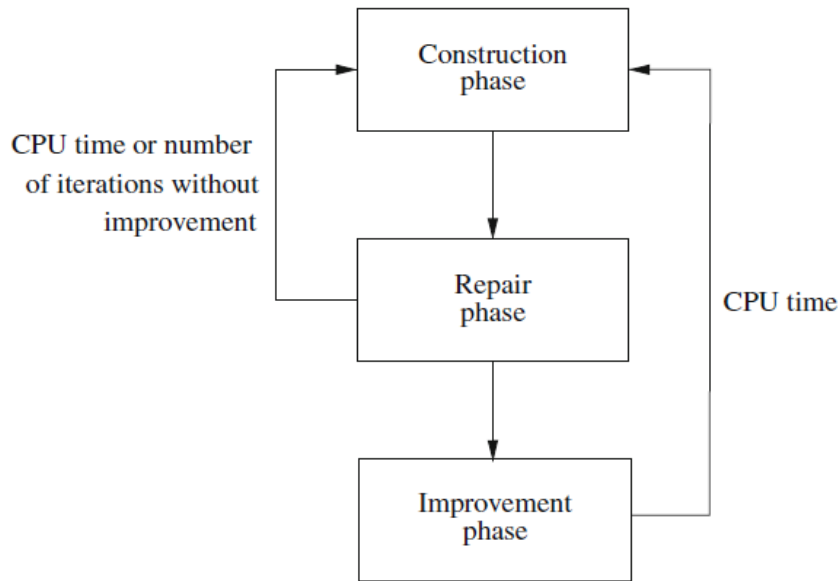


Fig. 3.1 Diagrama de bloques del algoritmo de *Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*

Para poder entender el problema a estudiar, hay que analizar cada fase del método que nos dará la solución adecuada.

- **Fase de construcción:** El primer paso de esta fase es ordenar al azar las aeronaves con el fin de tratar el problema en un orden diferente cada vez que se aplica la fase de construcción. A continuación, aplicamos todas las alteraciones conocidas, se intenta construir una rotación factible para aquellos vuelos que han sufrido dichas perturbaciones y por último se comprueba si esta rotación sigue siendo viable. En el caso en que no lo sigan siendo, se cogen aquellos vuelos que no pueden llevarse a cabo en su horario previsto y se retrasan 60 minutos hasta que las limitaciones de capacidad de los aeropuertos se satisfacen correctamente.

Si la rotación resultante es factible, se deja sin cambios. En caso contrario, se identifica cuál es el vuelo que produce una inviabilidad y se declara crítico. Esto puede venir causado por falta de capacidad en el aeropuerto, o bien porque la aeronave no pueda cumplir con la restricción de mantenimiento. También puede venir dado porque se haya cancelado un vuelo dentro de la rotación y por tanto, ésta no pueda realizarse.

Si se ha cancelado un vuelo, primero se intenta crear un vuelo para ver si el resultado sería factible. En caso negativo, si eliminar un bucle entre el itinerario de este vuelo es factible, se elimina dicho bucle, si no, se cancelan todos los vuelos hasta llegar a aquel que no realice la inviabilidad de ésta. Cuando se habla de bucle se refiere a aquellos vuelos que comprenden un itinerario desde que sale desde un aeropuerto cualquiera, hasta que vuelve a dicho aeropuerto.

El tercer paso de esta fase es ver aquellos vuelos que no están cumpliendo con la restricción de mantenimiento, es decir, que no llegan a su estación (aeropuerto) donde deben realizar el mantenimiento de la aeronave. Para ello, si resulta factible eliminar un bucle entre el itinerario de este vuelo, se elimina dicho bucle, en caso contrario se cancelan todos los vuelos hasta llegar a aquel que tenía la inviabilidad.

Por último, se miran aquellos vuelos que no cumplen con las restricciones de capacidad de los aeropuertos y primeramente se intenta arreglar tal y como se define en el primer paso, es decir, retrasando los vuelos 60 minutos hasta que sea factible. En caso que esta manera no sea factible, se elimina un bucle de la rotación y si esto tampoco es factible, se cancelan todos los vuelos hasta llegar a aquel que ha producido la inviabilidad.

El pseudocódigo de esta fase de construcción se puede observar en el artículo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*.

- **Fase de reparación:** En esta fase cada aeronave es tratada en el mismo orden que en la fase anterior. Lo primero que se realiza es ver si hay alguna solución factible respetando la restricción de capacidad. En caso contrario, se intenta retrasar el vuelo a un período menos congestionado de ese aeropuerto. Si esto no es posible, entonces se elimina el bucle más pequeño que contenga el vuelo en su rotación, tal y como se realiza en la fase anterior. Si esto tampoco es posible, se elimina dicho bucle.

En segundo lugar, se trata de volver a insertar aquellos bucles eliminados en la fase de construcción. Para ello, se identifica aquellos intervalos de tiempo lo suficientemente largos de una aeronave que puedan dar cabida a aquellos bucles eliminados. Para cada intervalo, se comprueba si es posible insertarlo. Normalmente este proceso es muy rápido y por lo general produce mejoras significativas de costes en muy pocas iteraciones.

Finalmente, se dirige la atención a los pasajeros. Para respetar las restricciones de conexión de los pasajeros, todos aquellos itinerarios que no sean viables con el horario respecto a sus pasajeros, serán cancelados. Una vez realizada esta iteración, se trata de acomodar a los pasajeros cuyos itinerarios hayan sido cancelados mediante la resolución de la ruta más cortas durante repetidas ocasiones. Este paso se realiza para reducir el coste de penalización de pasajeros después de una cancelación de un itinerario.

El pseudocódigo de esta fase de reparación se puede observar en el artículo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*.

- **Fase de mejora:** En esta fase, se trata de mejorar la solución con un procedimiento simple que comporta grandes cambios en ésta. Cuando no hay ninguna mejora posible, esta fase se detiene y el algoritmo vuelve a realizar las fases de construcción y de reparación para crear una nueva solución.

Esta fase puede tener un gran impacto en la calidad de la solución. En las fases anteriores se realiza una búsqueda exhaustiva en general, y esta fase lo mejora de una manera significativa aplicando una búsqueda local.

Una vez analizado el algoritmo, se realizan unos experimentos computacionales que se podrán analizar en el apartado 6 de Ejecución, cuando se comparen con los resultados de este proyecto.

SECCIÓN 3 – METODOLOGIA DE RESOLUCIÓN

4. Metodología de resolución

4.1 Descripción detallada del problema

Contando con la base teórica y la revisión respecto diversas metodologías de resolución que permiten haber adquirido una visión detallada del problema a tratar, se presenta en esta sección de la memoria, la que se considera la principal contribución original de este proyecto: el diseño, desarrollo, implementación, ejecución y validación de un algoritmo que aporta una alternativa de resolución al problema tratado. Para hacerlo, se hace una descripción de los diferentes elementos que comportan la metodología desarrollada a la hora que se asume una mayor comprensión del problema abordado.

El algoritmo está basado en la heurística LNS (Large Neighbourhood Search) desarrollada para resolver el problema de ARP (Airline Recovey Problem). La heurística LNS es una heurística de búsqueda que se introdujo en el contexto del problema del enrutamiento de vehículos. La idea básica de esta heurística es mejorar la solución inicial realizando repetidamente partes de “destrucción” y partes de “reparación” a esta solución. El LNS se desarrolla en tres fases: fase de construcción, fase de reparación y fase de mejora. En este trabajo tan solo se ha llegado a realizar una fase de construcción y una de reparación, ya que la de mejora no se ha podido desarrollar. El objetivo de estas dos fases es proporcionar una solución factible para respetar las restricciones tanto operacionales como funcionales del problema que se describirán a continuación en el apartado de *Restricciones*.

Como ya se ha comentado anteriormente, la metodología se basa en el trabajo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* de aplicar este tipo de heurística para solucionar el problema de recuperación de aviones y de pasajeros después de una disrupción a pequeña escala. A diferencia de su metodología, nuestro problema no se trata como un ejercicio de optimización exacta, por tanto el objetivo no es buscar una solución óptima, sino encontrar una solución “lo suficientemente buena” (que no se aleje mucho de la solución más óptima) pero que tenga un coste de implementación más reducido.

La adopción de esta alternativa de resolución se basa, por un lado en la voluntad de aportar una metodología diferente pero a la vez eficaz, y por otra, en una serie de ventajas que aporta respecto al planteamiento dado por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*, y que más adelante se expresaran.

4.1.1 Inputs

Para poder realizar la metodología propuesta y para poder llevar a cabo una comparativa con los resultados de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*, los datos necesarios se han recogido del programa ROADEF Chanllege. Esta asociación de investigación operativa y de apoyo a las decisiones francesa organiza un reto dedicado a las aplicaciones industriales cada dos años en colaboración con un socio industrial. El del año 2009 fue un reto propuesto por Amadeus y se ocupaba de la gestión de las interrupciones en la aviación comercial. *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* utilizaron estos datos para realizar su investigación y por ello, se recogerán los datos de este proyecto desde el ROADEF.

ROADEF proporciona unos archivos .csv donde se pueden encontrar todos los datos necesarios para implementar el algoritmo, y en este caso, algunos archivos que no se utilizaran debido al desarrollo incompleto del proyecto.

Se describen a continuación cada archivo con los datos necesarios y se aportan ejemplos para una mayor claridad y detalle del problema:

1. Archivo Configuration: Este archivo proporciona los siguientes parámetros para la implementación del algoritmo:

- Período de recuperación: fecha y hora de inicio, fecha y hora de fin.
- Coste por minuto asociado al retraso dependiendo del tipo de cabina del pasajero y dependiendo del tipo de itinerario del vuelo.
- Costes asociados a la cancelación de un vuelo para pasajeros que no estén en tránsito (es decir que sea su único vuelo) dependiendo del tipo de cabina del pasajero y dependiendo del tipo de itinerario de vuelo.

- Costes asociados a la cancelación de un vuelo para pasajeros en tránsito (es decir que tengan conexión) dependiendo del tipo de cabina del pasajero y dependiendo del tipo de itinerario de vuelo.
- Costes asociados a la degradación de cabina de clase dependiendo del tipo de cabina del pasajero y dependiendo del tipo de itinerario del vuelo.
- Costes de penalización asociado a la violación de la restricción sobre la ubicación de una aeronave al final del período de recuperación.
- Peso de los diferentes costes de la función objetivo.

Todos los costes mencionados en este archivo son costes unitarios (por pasajero o por avión). Los costes de operación que no se mencionan en este archivo se encuentran en el archivo *aircraft.csv*.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Fecha Inicio	Hora Inicio	Fecha Fin	Hora Fin
01/03/2008	16:00	03/03/2008	4:00
Listado de Coste/min			
Tipo de Cabina	Tipo de Itinerario	Coste	
F	D	1,25	
F	C	1,25	
F	I	1,25	
B	D	0,8	
B	C	0,85	
B	I	0,9	
E	D	0,05	
E	C	0,15	
E	I	0,25	

Listado de Coste Cancelación Sin Conexión			
Tipo de Cabina	Tipo de Itinerario	Coste	
F	D	2500	
F	C	2750	
F	I	3000	
B	D	1500	
B	C	1750	
B	I	2000	
E	D	250	
E	C	600	
E	I	1000	
Listado de Coste Cancelación Con Conexión			
Tipo de Cabina	Tipo de Itinerario	Coste	
F	D	7500	
F	C	8250	
F	I	9000	
B	D	4500	
B	C	5250	
B	I	6000	
E	D	750	
E	C	1500	
E	I	3000	
Listado de Coste de Degradación de Cabina			
Tipo de Cabina	Tipo de Cabina	Tipo de Itinerario	Coste
F	B	D	150
F	B	C	400
F	B	I	750
F	E	D	200
F	E	C	500
F	E	I	1500
B	E	D	150
B	E	C	400
B	E	I	750
Penalizaciones			
P1	P2	P3	
20000	5000	1000	
Peso de los costes			
α	β	γ	
1	1	1	

Tabla 1 Fichero *Configuration*

(F: First Class, B: Business Class, E: Economy Class)

(D: Domestic, C: Continental, I: Intercontinental)

2. Archivo *Airport*: Este archivo proporciona las capacidades de los aeropuertos, tanto de salidas como de llegadas, y que corresponden a un número máximo de operaciones permitidas por intervalos de una hora. Estos umbrales dependen de la hora del día (horas pico, horas normales, horas de la noche).

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeropuerto	Listado de Capacidades por Intervalos			
	Salidas	Llegadas	Hora Inicio	Hora Fin
LCY	0	0	0:00	7:00
	0	2	7:00	8:00
	2	2	8:00	9:00
	2	1	9:00	10:00
	0	1	10:00	12:00
	1	1	12:00	14:00
	0	0	14:00	15:00
	0	1	15:00	16:00
	1	1	16:00	17:00
	1	0	17:00	18:00
	1	1	18:00	19:00
	2	2	19:00	20:00
	0	0	20:00	0:00

Tabla 2 Fichero *Airport*

En esta tabla se describe el movimiento que hay en un día normal en el aeropuerto de LCY:

- Entre las 00:00 hasta las 07:00 no hay ni llegadas ni salidas.
- A partir de las 07:00 hasta las 08:00 no hay salidas, pero sí que hay dos llegadas al aeropuerto.
- Y así por franjas horarias (en GMT) hasta las 20:00 donde ya no vuelve a haber ni llegadas ni salidas.

3. Archivo *Distance*: Este archivo proporciona los tiempos de vuelos que hay entre cada par de aeropuertos, así como el tipo de vuelo.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeropuerto Origen	Aeropuerto Destino	Distancia	Tipo de Itinerario
MAD	AMS	140	C
AMS	MAD	140	C
CDG	NCE	95	D
NCE	CDG	95	D
BCN	IST	197	I
IST	BCN	197	I

Tabla 3 Fichero Distance

En el ejemplo se puede observar los tiempos de vuelo entre los aeropuertos de Madrid-Adolfo Suárez y Amsterdam-Schiphol (140 minutos en ambas direcciones) y especifica que el vuelo es continental, también entre los aeropuertos de París-Charles de Gaulle y Nice (95 minutos en ambas direcciones) y especifica que el vuelo es doméstico, y por último entre los aeropuertos de Barcelona-El Prat y Estambul-Atatürk (197 minutos en ambas direcciones) y especifica que el vuelo es intercontinental.

4. Archivo Flight: Este archivo proporciona información sobre los vuelos operados por la aerolínea durante el período de recuperación. Para cada vuelo se proporciona la siguiente información:

- Número de identificación. Este número es único para cada vuelo.
- Aeropuerto de origen y aeropuerto de destino.
- Horario de salida y horario de llegada.
- Número de identificación del vuelo del salto anterior. En el caso de que no haya conexiones con ese vuelo, la información recibida será un 0.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Nº de Vuelo	Aeropuerto Origen	Aeropuerto Destino	Hora de Salida	Hora de Llegada	Nº de Vuelo Anterior
1	CDG	ORY	0:00	0:30	0
73	ORY	CDG	0:00	0:30	0
581	MAD	CDG	9:25	11:30	0
587	DUS	CDG	6:20	7:35	0
703	MUC	CDG	6:10	7:55	0
719	VIE	CDG	9:10	11:15	0

Tabla 4 Fichero *Flight*

En el ejemplo anterior, podemos observar como el vuelo con número 1, sale desde el aeropuerto Paris- Charles de Gaulle a las 0:00 GMT y llega a Paris-Orly a las 0:30 GMT. En este caso, no hay conexiones anteriores a este vuelo.

5. Archivo *Aircraft*: Este archivo proporciona las características de las aeronaves.

Para cada aeronave se proporciona la siguiente información:

- Identificador de la aeronave.
- Modelo, familia y configuración de la aeronave.
- Horas de vuelo de la aeronave.
- Coste de la operación por hora.
- Tiempo de turn-around y tiempo de tránsito.
- Aeropuerto de origen, es decir, aeropuerto donde se encuentra la aeronave al inicio del período de recuperación.
- Mantenimiento, en el caso de que la aeronave tenga.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeronave	Modelo	Familia	Configuración	Horas de vuelo	Coste de la operación
A319#5	A319	AirbusSmall	0/12/124	510	1850
A320#7	A320	AirbusSmall	0/0/172	420	2000
A330#15	A330	AirbusBig	0/40/179	1100	5800
A318#35	A318	AirbusSmall	0/10/108	450	1800

Tiempo turn-around	Tiempo de tránsito	Aeropuerto de Origen	Mantenimiento
35	35	AMS	NULL
40	40	BCN	NULL
60	90	BEY	NULL
30	30	CDG	NULL

Tabla 5 Fichero *Aircraft*

En la tabla se describe, por ejemplo, que la aeronave A319#5 pertenece al modelo de los A319, a la familia de los AirbusSmall y con una configuración de 0 asientos en primera clase, 12 asientos en clase Business y 124 en clase económica. Además, esta aeronave puede hacer unas 510 horas de vuelo, con un coste de operación de 1850 euros, que tiene un tiempo de *turn-around* y de tránsito de 35 minutos, y que la aeronave se encuentra en Amsterdam-Schiphol al inicio del período de recuperación. En la columna de mantenimiento hay un NULL, ya que esta aeronave no necesita un mantenimiento.

6. Archivo *Rotation*: Este archivo describe las rotaciones para todas las aeronaves a lo largo del período de recuperación. Se proporciona la información siguiente:

- Número de vuelo.
- Fecha de salida.
- Aeronave que opera el vuelo.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Nº de Vuelo	Fecha de Salida	Aeronave
4081	01/03/2008	A320#1
4080	01/03/2008	A320#1
4085	01/03/2008	A320#1
5812	01/03/2008	A320#1

Tabla 6 Fichero *Rotation*

En este ejemplo, se puede observar como el número de vuelo 4081, 4080, 4085 y 5812 están operados por la aeronave A320#1.

7. Archivo *Itinerary*: Este archivo proporciona información acerca de los itinerarios de los pasajeros. Para cada itinerario se incluyen los siguientes datos:

- Número de identificación (único).
- Naturaleza del itinerario, es decir, si es entrante o saliente.
- Precio unitario en euros.
- Número de pasajeros con reserva en este itinerario. Un listado de los vuelos de ese itinerario, con el número de vuelo, la fecha de salida y el tipo de cabina que utiliza cada pasajero.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Nº de Identificación	Naturaleza del Itinerario	Precio Unitario	Nº de pasajeros	Vuelos en Conexión		
				Nº de Vuelo	Fecha de Salida	Tipo de Cabina
0	A	2525,3	1	145	01/03/2008	B
				586	01/03/2008	E

Tabla 7 Fichero *Itinerary*

En este cuadro se describe como el itinerario 0, que tiene una naturaleza de Salida, con un precio unitario de 2525,3 euros y donde 1 pasajero hace una conexión desde el vuelo 145 el día 01/03/2008 en clase Business hasta el vuelo 586 el día 01/03/2008 en clase económica.

8. Archivo *Aircraft positioning*: Este archivo proporciona el número de aeronaves de cada tipo requerida en cualquier aeropuerto al final del período de recuperación.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeropuerto	Aeronaves		
	Modelo	Configuración	Nº de aeronaves
BCN	F100	0/0/100	1
	A319	0/28/51	1
	A320	0/10/150	1
	ERJ135	0/0/37	1

Tabla 8 Fichero *Aircraft positioning*

El ejemplo describe que en el aeropuerto de Barcelona-El Prat tienen que haber, al final del período de recuperación, 1 aeronave F100 con una configuración de 0 asientos en primera clase, 0 asientos en clase Business y 100 asientos en clase económica, 1 aeronave A319 con una configuración de 0 asientos en primera clase, 28 asientos en clase Business y 51 asientos en clase económica, 1 aeronave A320 con una configuración de 0 asientos en primera clase, 10 asientos en clase Business y 150 asientos en clase económica, y por último, 1 aeronave ERJ135 con una configuración de 0 asientos en primera clase, 0 asientos en clase Business y 37 asientos en clase económica

9. Archivo *Flight disruption*: Este archivo proporciona las interrupciones que les suceden a los vuelos operados por la línea aérea considerada, es decir, retrasos y cancelaciones. Cada vuelo afectado consta con la siguiente información:

- Identificador de vuelo (único).
- Fecha de salida.
- Información sobre la interrupción. En caso de retraso la información dada es el tiempo de demora. En caso de cancelación, la información que se proporciona es un -1.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Nº de Vuelo	Fecha de Salida	Tiempo de retraso
146	01/03/2008	60
920	01/03/2008	20
980	01/03/2008	10
1319	01/03/2008	61

Tabla 9 Fichero *Flight disruption*

En este ejemplo, se puede observar como el vuelo 146, el día 01/03/2008 tiene un retraso de 60 minutos de su programación inicial, que el vuelo 920, el día 01/03/2008 tiene un retraso de 20 minutos de su programación inicial, que el vuelo 980, el día 01/03/2008 tiene un retraso de 10 minutos de su programación inicial y que el vuelo 1319, el día 01/03/2008 tiene un retraso de 61 minutos de su programación inicial.

10. Archivo *Aircraft disruption*: Este archivo proporciona los períodos de falta de disponibilidad de aeronaves. Se muestra la información siguiente:

- Identificador de la aeronave que no está disponible.
- Fecha y horario del inicio del período de indisponibilidad.
- Fecha y horario del final del período de indisponibilidad.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeronave	Fecha de Inicio	Hora de Inicio	Fecha de Fin	Hora de Fin
A320#72	01/03/2008	11:00	02/03/2008	15:00

Tabla 10 Fichero *Aircraft disruption*

En el ejemplo se puede observar como la aeronave A320#72 no estará disponible entre las 11:00 horas del día 01/03/2008 hasta las 15:00 horas del día 02/03/2008.

11. Archivo *Airport disruption*: Este archivo proporciona los períodos de reducción temporal de la capacidad de los aeropuertos. Se muestra la información siguiente:

- Código del aeropuerto donde se produce la reducción.
- Fecha y hora del inicio del período de reducción.

- Fecha y hora del final del período de reducción.
- Capacidad de salidas aplicables en el período de reducción.
- Capacidad de llegadas aplicables en el período de reducción.

Para clarificar el contenido de este archivo, se añade una tabla con un ejemplo explicado, a continuación.

Aeropuerto	Fecha de Inicio	Hora de Inicio	Fecha de Fin	Hora de Fin	Salidas	Llegadas
ORY	01/03/2008	18:00	01/03/2008	20:00	7	7

Tabla 11 Fichero *Airport disruption*

En este ejemplo se puede observar como el aeropuerto Paris-Orly tendrá una reducción de su capacidad desde las 18:00 horas del día 01/03/2008 hasta las 20:00 horas del día 01/03/2008 permitiendo 7 salidas y 7 llegadas.

4.1.2 Definición de la función objetivo

La definición de la función objetivo resulta un elemento fundamental de cara a diseñar una metodología que sea medible de acuerdo con el potencial real y que constituya una base sólida de referencia de cara a realizar comparaciones entre soluciones y poder derivar un conjunto de conclusiones que refuercen y potencien la difusión de la práctica desarrollada.

En este caso particular, se ha buscado una definición muy próxima a la que proponen *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* y compañía en su artículo de cara a realizar comparaciones con los resultados que se puedan obtener y poder derivar conclusiones reales respecto a la calidad de las soluciones que la heurística propuesta genere. Por otro lado, también se podrá observar desviaciones y la calidad relativa de las soluciones, ejecutando sobre las mismas instancias y de esta manera poder comparar de una manera más real.

Analicemos a continuación la formulación de la función objetivo. En primer lugar tenemos que en el problema de recuperación de aviones y de pasajeros para disrupciones de pequeña escala se consideran tres tipos diferentes de costes:

- **Costes Operativos:** Los costes relativos a la operación de un vuelo dependen del modelo de avión y están expresados en hora por tiempo de vuelo. Este coste debe ser añadido a la función objetivo en el caso de añadir nuevos aviones (por ejemplo cuando hemos cancelado uno y tenemos que sustituirlo) y debe ser quitado de la función objetivo cuando un vuelo se haya cancelado.
- **Costes de Insatisfacción de los pasajeros:** Este coste, tal y como define su nombre, valorará la insatisfacción del cliente por culpa de un retraso o de una cancelación en su vuelo, independientemente de la compensación que se le abonará. Este coste incluirá una penalización en el caso que el pasajero tenga que viajar en una clase de cabina inferior a la que tenía reservada.
- **Costes de “Vuelta a la normalidad”:** Lo ideal para una compañía es que sus aviones, al finalizar la jornada, se encuentren en el aeropuerto que se les asignó en la planificación inicial. Si esto no ocurre, se penalizará en costes a la compañía.

La función objetivo de este tipo de heurística consiste en minimizar la suma ponderada de estos tres tipos de costes.

4.1.3 Restricciones

Para realizar correctamente el problema, en este caso, existen dos conjuntos de restricciones que deben ser satisfechas para encontrar una solución. Los dos tipos de restricciones son:

1. **Restricciones operativas:** relacionadas con la asignación de aeronaves y rutas.
 - Si se cambia la aeronave asignada a un vuelo, la nueva aeronave debe pertenecer a la misma familia que el originalmente asignado.
 - Para cada vuelo, el número de pasajeros que viajan en cada cabina no puede exceder el número de plazas de dicha cabina. El aforo viene determinado por la configuración de la aeronave asignada al vuelo.

- La restricción de mantenimiento hace que una aeronave tiene que alcanzar su estación de mantenimiento antes de alcanzar el número máximo de horas antes de un mantenimiento. Esa aeronave no estará disponible durante este período.
- Se ha de cumplir las limitaciones de capacidad de los aeropuertos.
- Se deben cumplir los tiempos mínimos de conexión para los pasajeros: si un pasajero tiene dos vuelos consecutivos en su itinerario, éstos deben estar separados al menos por 30 minutos en el aeropuerto de conexión para que a los pasajeros les dé tiempo a realizar la conexión sin problemas.
- Dos vuelos consecutivos de una rotación deben cumplir al menos el tiempo de turn-around y el tiempo de tránsito mínimo de las aeronaves que operan los vuelos.

2. **Limitaciones funcionales:** relacionadas con la asignación de pasajeros y la modificación de sus itinerarios.

- El itinerario modificado debe tener el mismo destino del itinerario original.
- El itinerario modificado no deberá comenzar antes de la hora del primer vuelo del itinerario original.
- El máximo retraso total en el destino no puede exceder de 18 horas para los vuelos nacionales y continentales, y de 36 horas para los vuelos intercontinentales.

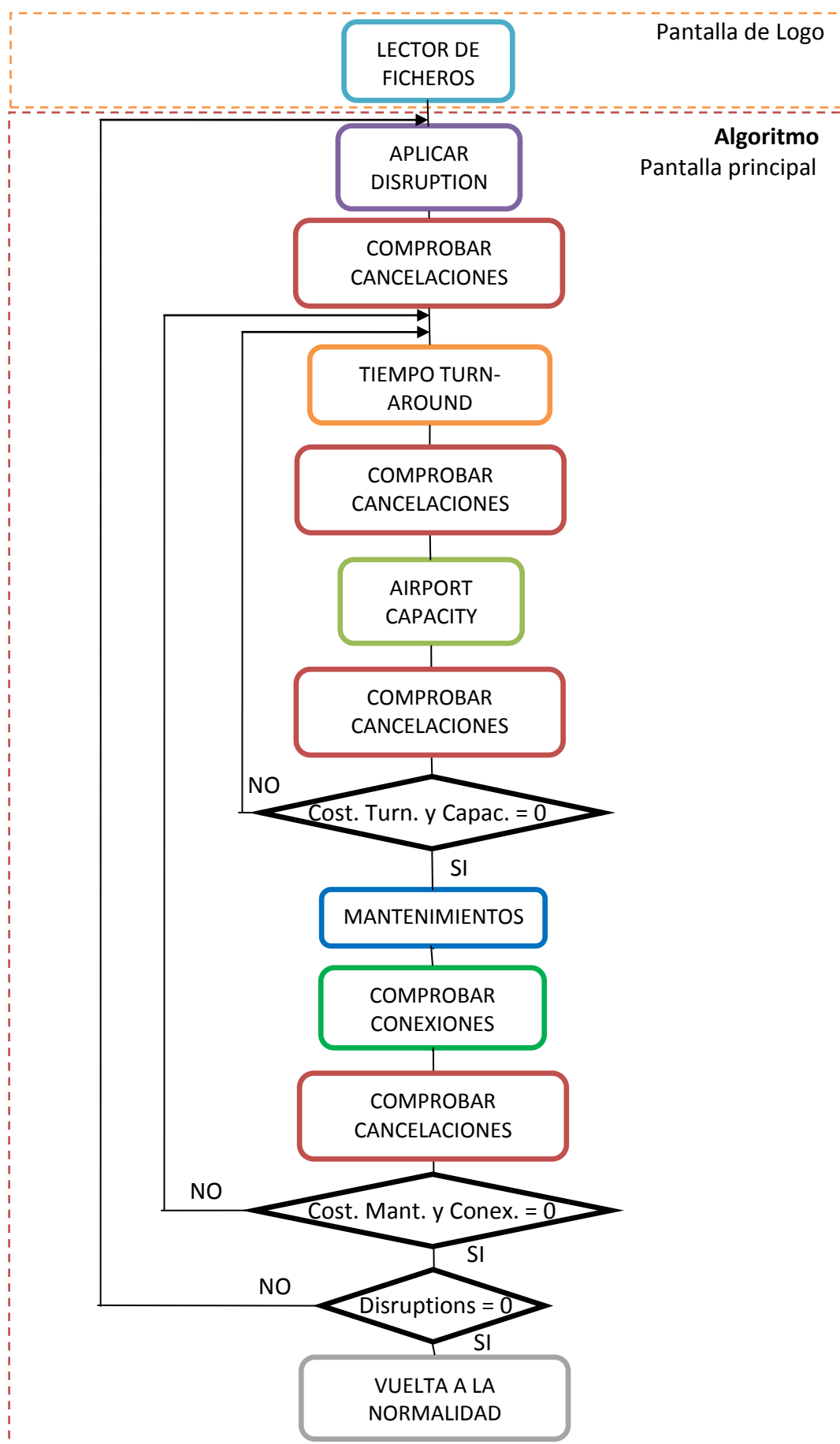
La longitud del período de recuperación puede ser diferente para diferentes casos. Puede ser uno o varios días.

5. Implementación y explicación del algoritmo

Una vez presentado y explicado de forma genérica cuál es la aproximación propuesta para este proyecto de cara a resolver el problema que se ha descrito con anterioridad y contando con una descripción clara de los diferentes elementos que intervienen en él, en esta sección se explica de forma detallada en qué consiste el algoritmo y como se ha constituido. Para hacerlo se presentaran diferentes fragmentos de pseudocódigo que, en este caso, se han implementado en lenguaje de programación C# y se acompañará con explicaciones que ayuden a su comprensión.

5.1 Diagrama de bloques

En este apartado se explicará el hilo principal del programa *Disruption Management*, indicando las partes propias de algoritmo y las necesarias para poder ejecutar correctamente dicho programa y su versión en pseudocódigo para un conocimiento más profundo sobre su resolución.



5.1.1 Lector de ficheros

Este modulo es el encargado de leer los datos de los ficheros comentados en el apartado anterior inputs y transformarlos en las clases necesarias para poder aplicar el algoritmo.

Las clases aplicadas en el proyecto se basan en el diseño de los ficheros pero además se han incluido campos auxiliares para facilitar los cálculos computacionales. A continuación se describen de forma resumida dichas clases.

Aeropuerto	
Campo	Descripción
Código	Identificador de tres letras.
Lista Operación	Lista de operaciones permitidas. (ver clase Operación)
Vuelos Llegadas	Lista de vuelos que llegan. (ver clase Vuelo)
Vuelos Salidas	Lista de vuelos que salen. (ver clase Vuelo)
Aviones Final	Lista de aviones al final del periodo de recuperación. (ver clase Avión)

Tabla 12 Clase Aeropuerto

Operación	
Campo	Descripción
Salidas	Número máximo de salidas permitidas.
Llegadas	Número máximo de llegadas permitidas.
Hora Inicio	Hora de inicio de la operación.
Hora Fin	Hora del final de la operación.

Tabla 13 Clase Operación

Avión	
Campo	Descripción
Identificador	Código único del avión.
Modelo	Modelo de la aeronave.
Familia	Familia de la aeronave
Pasajeros Primera	Número de pasajeros que permite la aeronave en primera clase.
Pasajeros Business	Número de pasajeros que permite la aeronave en clase business.
Pasajeros Turista	Número de pasajeros que permite la aeronave en clase turista.
Horas Vuelo	Número máximo de horas de vuelo de la aeronave.
Coste Por Hora	Coste estimado de operación de la aeronave por hora.
Tiempo Turn-Around	Tiempo mínimo de Turn-Around.
Tiempo de tránsito	Tiempo mínimo de tránsito.
Aeropuerto Origen	Aeropuerto des de donde parte la aeronave al inicio del período de recuperación. (vea clase Aeropuerto)
Mantenimiento	Mantenimiento al que debe atender la aeronave. Puede no tener. (vea clase Mantenimiento)

Tabla 14 Clase Avión

Configuración	
Campo	Descripción
Fecha Inicio	Fecha de inicio del periodo de recuperación.
Fecha Fin	Fecha de fin del periodo de recuperación.
Lista Coste Retraso	Lista con los costes por retraso. (vea clase Coste Retraso)
Lista Coste Cancelación Anterior	Lista de costes por cancelaciones sin conexión. (vea clase Coste Cancelación Anterior/Posterior)
Lista Coste Cancelación Posterior	Lista de costes por cancelaciones con conexión. (vea clase Coste Cancelación Anterior/Posterior)
Lista Coste Degradación	Lista de costes por degradaciones de billetes de los pasajeros. (vea clase Coste Degradación)
Coste sin Avión Familia	Valor del coste aplicado por no tener aviones de la misma familia en el aeropuerto al final del periodo de recuperación.
Coste sin Avión Modelo	Valor del coste aplicado por no tener aviones del mismo modelo en el aeropuerto al final del periodo de recuperación.
Coste sin Avión Configuración	Valor del coste aplicado por no tener aviones de la misma configuración en el aeropuerto al final del periodo de recuperación.
Peso Coste 1	Valor del porcentaje de consideración del Coste sin Avión Modelo.
Peso Coste 2	Valor del porcentaje de consideración del Coste sin Avión Familia.
Peso Coste 3	Valor del porcentaje de consideración del Coste sin Avión Configuración.

Tabla 15 Clase Configuración

Coste Cancelación Anterior/Posterior

Campo	Descripción
Tipo Billete	Identificador de la clase del pasajero (F,B,E)
Tipo Itinerario	Identificador del tipo de itinerario (D,C,I)
Coste	Valor del coste asociado.

Tabla 16 Clase Coste Cancelación**Coste Degradación**

Campo	Descripción
Tipo Billete Anterior	Identificador de la clase inicial del pasajero (F,B,E)
Tipo Billete Posterior	Identificador de la clase final del pasajero (F,B,E)
Tipo Itinerario	Identificador del tipo de itinerario (D,C,I)
Coste	Valor del coste asociado.

Tabla 17 Clase Coste Degradación**Coste Retraso**

Campo	Descripción
Tipo Billete	Identificador de la clase del pasajero (F,B,E)
Tipo Itinerario	Identificador del tipo de itinerario (D,C,I)
Coste Minuto	Valor del coste asociado por minuto.

Tabla 18 Clase Coste Retraso

Distancia	
Campo	Descripción
Aeropuerto Origen	Aeropuerto inicial del trayecto. (vea la clase Aeropuerto)
Aeropuerto Destino	Aeropuerto final del trayecto. (vea la clase Aeropuerto)
Tiempo	Tiempo estimado del trayecto.
Tipo Itinerario	Identificador del tipo de itinerario (D,C,I)

Tabla 19 Clase Distancia

Flota	
Campo	Descripción
Modelo	Modelo de la flota
Pasajeros Primera	Número de pasajeros que permite la flota en primera clase.
Pasajeros Business	Número de pasajeros que permite la flota en clase Business.
Pasajeros Turista	Número de pasajeros que permite la flota en clase turista.
Cantidad	Cantidad de aeronaves de la flota al final del periodo de recuperación.

Tabla 20 Clase Flota

Interrupciones Aeropuerto	
Campo	Descripción
Aeropuerto	Aeropuerto con alteración. (vea la clase Aeropuerto)
Operación Reducción	Operación afectada por la alteración. (vea la clase Operación).

Tabla 21 Clase Interrupciones Aeropuerto

Interrupción Avión

Campo	Descripción
Avión	Aeronave con alteración. (vea la clase Avión)
Fecha Inició Interrupción	Fecha inicial de la interrupción del servicio de la aeronave.
Fecha Fin Interrupción	Fecha final de la interrupción del servicio de la aeronave.

Tabla 22 Clase Interrupción Avión**Interrupción Vuelo**

Campo	Descripción
Vuelo	Vuelo con alteración. (vea la clase Vuelo)
Fecha Salida	Fecha salida del vuelo.
Retraso	Valor en minutos del retraso a aplicar. En caso de ser inferior a 0 se considera cancelación.

Tabla 23 Clase Interrupción Vuelo**Itinerario**

Campo	Descripción
Identificador	Identificador único del itinerario de los pasajeros.
Estado Itinerario	Identificador del estado del itinerario (A,R).
Precio	Precio unitario estimado del itinerario.
Pasajeros	Cantidad de pasajeros que cumplen el itinerario.
Serie de Vuelos	Listado de los diferentes vuelos que cumplen el itinerario. (vea la clase Serie Vuelo)

Tabla 24 Clase Itinerario

Mantenimiento	
Campo	Descripción
Aeropuerto	Aeropuerto en el que se realiza el mantenimiento. (vea clase Aeropuerto)
Fecha Inicio	Fecha de inicio del mantenimiento.
Fecha Fin	Fecha de fin del mantenimiento.
Horas de Vuelo Disponible	Horas máximas de vuelo de la aeronave después de realizar el mantenimiento.

Tabla 25 Clase Mantenimiento

Posición Aeropuerto	
Campo	Descripción
Aeropuerto	Aeropuerto con seguimiento de flota. (vea la clase Aeropuerto)
Lista de Flota	Lista con la flota necesaria al final del periodo de recuperación. (vea la clase Flota)

Tabla 26 Clase Posición Aeropuerto

Rotación	
Campo	Descripción
Vuelo	Vuelo de la rotación. (vea la clase Vuelo)
Fecha Salida	Fecha de salida del vuelo.
Avión	Aeronave encargada de realizar el vuelo. (vea la clase Avión)

Tabla 27 Clase Rotación

Serie Vuelo	
Campo	Descripción
Vuelo	Vuelo dentro de un itinerario. (vea la clase Vuelo)
Fecha Salida	Fecha de salida del vuelo.
Tipo Billete	Identificador de la clase del pasajero (F,B,E) en el vuelo.

Tabla 28 Clase Serie Vuelo

Vuelo	
Campo	Descripción
Identificador	Código único del vuelo.
Aeropuerto Origen	Aeropuerto de salida del vuelo. (vea la clase Aeropuerto)
Aeropuerto Destino	Aeropuerto de llegada del vuelo. (vea la clase Aeropuerto)
Hora Salida	Hora de salida del vuelo.
Hora Llegada	Hora de llegada del vuelo.
Identificador Vuelo Anterior	Código del vuelo anterior asociado.
Minutos retrasado	Valor de los minutos que se ha retrasado del vuelo desde su hora inicial.
Cancelado	Valor verdadero o falso que indica si el vuelo ha sido cancelado o no.
Conexiones	Lista de vuelos los cuales hacen conexión con el vuelo actual.

Tabla 29 Clase Vuelo

- Seudocódigo:

```

1: Por cada fichero en lista de ficheros hacemos
2:   variable linea = LeerUnaLinea(fichero);
3:   si (linea es diferente de #) hacemos
4:     variable claseFichero = MapearTextoAClase(linea);
5:     listaClase.Añadimos(claseFichero);

```

Tal y como se muestra en el pseudocódigo, por cada fichero distinto comentado anteriormente, se lee línea por línea y se aplica una función capaz de transformar el archivo de texto en las clases anteriormente comentadas. Para indicar que el fichero de texto ha terminado se incluye el marcador #.

5.1.2 Aplicar Disruption

Este módulo se dedica exclusivamente a obtener los tiempos de retraso que nos indica el fichero y aplicarlo en la lista de las rotaciones de las diferentes aeronaves. La cantidad de retrasos aplicables viene definida según los inputs de ROADEF.

Cada iteración del algoritmo se obtiene, al azar, una alteración de vuelo que será aplicada. Esto permite así, poder obtener diferentes resultados de costes dependiendo de la aplicación inicial de estas alteraciones produciendo así un resultado fiable.

Además se calcula el coste asociado a los minutos de retraso indicados según el archivo de *Configuration*. También es posible que algunos retrasos impliquen la cancelación directa del vuelo.

- Seudocódigo:

```

1: variable índice_aleatorio = NumeroAleatorio(Entre 0 y listaInterrupcionesVuelo.Tamaño);
2: variable interrupción_vuelo = listaInterrupcionesVuelo[indice_aleatorio];
3: variable rotacion = ObtenerRotacionDelVueloInterrumpido(interrupcio_vuelo);
4: si (interrupción_vuelo.Retraso < 0) hacemos
5:     interrupción_vuelo.Vuelo.Cancelado = verdadero;
6:     CalcularCosteCancelacion(interrupción_vuelo.Vuelo);
7: sino
8:     RetrasarVuelo(interrupción_vuelo.Retraso,interrupción_vuelo.Vuelo);
9:     CalcularCosteRetraso(interrupción_vuelo.Retraso,interrupción_vuelo.Vuelo);
10: listaInterrupcionesVuelo.Eliminar(interrupción_vuelo);
11: GuardarRegistroCoste();
12: devolver listaInterrupcionesVuelo.Tamaño;

```

Primeramente, se obtiene un número aleatorio entre el 0 y el tamaño actual de la lista de interrupciones de vuelo el cuál nos indica que elemento de la lista es el aplicado en esta iteración. Una vez obtenido, buscamos la rotación del vuelo al que se le aplicará el retraso. Si este retraso es menor a 0, implica que este vuelo quedará cancelado y por tanto calculamos su coste asociado. En otro caso, retrasamos la hora de salida y de llegada del vuelo que está en la rotación y calculamos su coste por retraso.

Para no repetir las interrupciones, la actual la eliminamos de la lista y guardamos un registro que nos permitirá luego mostrar los resultados.

Finalmente, se devuelve el tamaño actual de la lista de interrupciones para saber cuando finalizar las iteraciones, tal y como se muestra en el diagrama de bloques.

5.1.3 Comprobar Cancelaciones

Este módulo comprueba de toda las rotaciones que existen en el archivo si el total de minutos retrasados supera o iguala la marca de 960 minutos. Esta limitación viene dada por el algoritmo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* y que se ha considerado oportuno aplicar.

En el caso de que supere dicha limitación el vuelo pasará a estado cancelado y se aplicaran los costes asociados a la cancelación según el archivo de *Configuration* y dependiendo del tipo de billete y si la cancelación es con conexión o sin.

- Seudocódigo

```

1: Por cada vuelo en listaVuelos hacemos
2:   si (vuelo.MinutosRetrasado mayor o igual a 960)
3:     vuelo.Cancelado = verdadero;
4:     vuelo.MinutosRetrasado = -1;
5:     CalcularCosteCancelacion(vuelo);
6: GuardarRegistroCoste();

```

A partir de la lista de vuelos, se localizan todos aquellos vuelos que superan el límite de 960 minutos de retraso acumulado. En ese caso, indicamos que el vuelo está cancelado y modificamos los minutos retrasados por -1 para evitar volver a calcular su coste en otras iteraciones. Finalmente, calculamos el valor del retraso y al finalizar guardamos los resultados.

5.1.4 Tiempo Turn-Around

Este módulo se encarga de comprobar que después de aplicar los retrasos oportunos no se haya visto afectado el tiempo mínimo que necesita la aeronave entre un vuelo y otro (limpiar, repostar combustible, comprobar seguridad, etc). Este tiempo se denomina tiempo de *turn-around*.

En el caso que no se cumpla se aplicará un retraso de 60 minutos sobre el vuelo posterior. Este valor de retraso se basa en el utilizado por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* en su algoritmo para que los resultados de este proyecto y los de ellos puedan compararse con mayor realidad posible. Aunque a ciencia cierta no se indique porque se utiliza este número y no el mínimo de *turn-around*, se cree que es porque de esta manera no se crean más retrasos posteriores.

Esto implica que se calculen los costes correspondientes al retraso aplicado. Después de aplicar este módulo, se comprueban las cancelaciones de nuevo tal y como se puede observar en el diagrama de bloques.

- Seudocódigo

```

1: hacer
2: variable costeInicial = CosteTotal;
3: Por cada avión en listaAviones hacemos
4:   variable rots_ord = ObtenerRotacionesOrdenadas(avión);
5:   Por cada rotacion en rots_ord hacemos
6:     variable rotacionAnterior = ObtenerRotacionAnterior(rotacion);
7:     variable diferencia = FechaSalida(rotacion) – FechaLlegada(rotacionAnterior);
8:     si (diferencia.Minutos < avión.TiempoTurnAround) hacemos
9:       RetrasarVuelo(60,rotacion.Vuelo);
10:      CalcularCosteRetraso(60, rotacion.Vuelo);
11: mientras que costeInicial sea diferente de CosteTotal
12:   GuardarRegistroCoste();
13: devolver CosteTotalModificado();

```

Para comprobar que todos los vuelos cumplan el tiempo mínimo de *TurnAround*, primeramente se busca por cada avión las rotaciones ordenadas por la fecha de salida. A continuación por cada rotación, se obtiene la rotación anterior y se calcula la diferencia entre el tiempo de llegada de la rotación anterior y la fecha de salida de la rotación actual. Después se comprueba que dicha diferencia en minutos cumpla el tiempo de *TurnAround* indicado en la clase Avión. Si este no se cumple, retrasamos el vuelo 60 minutos y calculamos su coste. Si al realizar dichas comprobaciones, no se aplica ningún coste adicional, guardamos los resultados y devolvemos *Verdadero* o *Falso* si se ha modificado dicho coste.

5.1.5 [Airport Capacity](#)

Este módulo se encarga de comprobar que se cumplan las restricciones de salidas y llegadas de los aeropuertos. Esta información la encontramos en el archivo de *Airports*. Para ello se comprueba por cada franja de una hora, por ejemplo, entre las 00.00 y las 00.59 todos aquellos vuelos que llegan y que salen del aeropuerto en cuestión.

Para agilizar estos cálculos, anteriormente, se ha realizado una carga en la clase aeropuerto de los vuelos que salen y llegan formando una lista para no tener que calcular los datos a partir de la lista de vuelos.

Si se superan los vuelos de llegada o de salida, se aplicará un retraso de 60 minutos a la hora de salida a aquellos vuelos más tardíos que excedan la diferencia entre lo permitido y lo real. Al ser retrasos, esto implica nuevos costes a aplicar en la función objetivo.

Después de aplicar este módulo, se comprueban las cancelaciones de nuevo tal y como se puede observar en el diagrama de bloques.

Si al finalizar las comprobaciones de *turn-around* y *airport capacity* no se ha aplicado ningún coste adicional pasaremos a los siguientes módulos. En caso contrario, volveremos a repetir dichas comprobaciones.

- Seudocódigo

```

1: Por cada aeropuerto en listaAeropuertos hacemos
2: variable horamin = 00:00
3: variable horamax = 00:59
4:   mientras (horamin < 23:00) hacemos
5:     variable max_sal_per = ObtenerMaximasSalidas(horamin,horamax,aeropuerto);
6:     variable listasalidas = ObtenerVuelosSalida(horamin, horamax, aeropuerto.VuelosSalida);
7:     si (listasalidas.Tamaño > max_sal_per) hacemos
8:       Por cada vuelo en vuelosDeMas hacemos
9:         RetrasarVuelo(60,vuelo);
10:        CalcularCosteRetraso(60,vuelo);
11:     variable max_lleg_per = ObtenerMaximasLlegadas(horamin,horamax,aeropuerto);
12:     variable listallegadas = ObtenerVuelosLlegada(horamin, horamax, aeropuerto.VuelosLlegada);
13:     si (listallegadas.Tamaño > max_lleg_per) hacemos
14:       Por cada vuelo en vuelosDeMas hacemos
15:         RetrasarVuelo(60,vuelo);
16:         CalcularCosteRetraso(60,vuelo);
17:     horamin.AñadirHora();
18:     horamax.AñadirHora();
19: GuardarRegistroCoste();
20: devolver CosteTotalModificado();

```

Por cada aeropuerto que existe en el fichero y por cada franja horaria (utilizando las variables de *horamin* y *horamax*, se obtienen las máximas salidas permitidas y las salidas reales que se han calculado previamente con la lista *VuelosSalida* en la clase *aeropuerto*. En el caso que las salidas reales superen las permitidas, aplicamos el retraso de 60 minutos y calculamos su coste.

A continuación, se realiza el mismo proceso con los vuelos calculados de llegada en la lista *VuelosLlegada* de la clase *aeropuerto*. Finalmente, pasamos a la siguiente franja horaria hasta llegar al final del día. Como en otros bloques, guardamos los datos de coste en un registro y indicamos si se ha aplicado algún coste adicional o no.

5.1.6 Mantenimientos

Este módulo se encarga de comprobar que los mantenimientos que se deben aplicar a las aeronaves no se salten. Según el archivo de *Aircrafts* no todas las aeronaves deben cumplir un mantenimiento.

Para aquellos que sí que tienen que cumplir esta condición, se comprueba que el destino del vuelo anterior a la fecha de inicio de mantenimiento sea la estación (aeropuerto) encargado de realizarle el mantenimiento.

En caso contrario, se busca el último vuelo con destino a dicha estación (aeropuerto) y los vuelos posteriores se cancelan. Además, se cancelan también aquellos vuelos que están dentro del período de mantenimiento debido a los posibles retrasos que hayan sufrido.

Si, por consiguiente, no existe ningún vuelo anterior con destino a dicha estación (aeropuerto), se verá cancelado todo el itinerario del avión, ya que el mantenimiento es una de las restricciones obligatorias.

Todas estas cancelaciones implican un cálculo de costes asociados que después repercutirán en la función objetivo.

- Seudocódigo

```

1: Por cada avión en avionesConMantenimiento hacemos
2:   variable vuelosanteriores = ObtenerVuelosAnterioresAlMantenimiento(avión);
3:   si (vuelosanteriores.Ultimo.Aeropuerto != avión.Mantenimiento.Aeropuerto) hacemos
4:     variable ultimovuelo = ObtenerUltVueloAeropuertoMantenimiento();
5:     si ultimovuelo existe hacemos
6:       variable vuelosan = CancelarVuelosPosteriores(ultimovuelo);
7:       CalcularCostesCancelacion(vuelosan);
8:     sino
9:       CancelarVuelos(vuelosanteriores);
10:      CalcularCostesCancelacion(vuelosanteriores);
11:   variable vuelos_mant = ObtenerVuelosDuranteMantenimiento();
12:   CancelarVuelos(vuelos_mant);
13: GuardarRegistroCoste();
14: devolver CosteTotalModificado();

```

Por cada avión que esté obligado a realizar un mantenimiento, se obtienen la lista de vuelos anterior a la fecha de mantenimiento. Si el último vuelo no corresponde al aeropuerto del mantenimiento, se busca el último que tenga como destino dicho aeropuerto. Si este existe, cancelamos todos los vuelos posteriores a este hasta llegar al último vuelo anterior a la fecha de mantenimiento. Si no existe ningún vuelo anterior que llegue al aeropuerto de mantenimiento, se cancelan todos los vuelos. A continuación, se cancelan todos los vuelos que están dentro del periodo de mantenimiento. Finalmente, se registran todos los datos de los costes y se indica con verdadero o falso si este módulo ha sufrido costes adicionales o no.

5.1.7 Comprobar conexiones

Este módulo se encarga de comprobar que las conexiones que tienen los pasajeros cumplan el tiempo mínimo establecido de 30 minutos. Este tiempo queda reflejado en la documentación de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* como tiempo mínimo de interconexiones entre vuelos.

Para agilizar este cálculo, se ha ampliado la información de la clase vuelos con una lista de sus vuelos conexiónados para evitar recorrer muchas veces la lista de itinerarios de todos los vuelos.

Lo primero que se realiza es la cancelación de aquellos vuelos conexiónados que su vuelo anterior ya esté cancelado. Después, se realiza la comprobación, tal y como se implementa en el apartado de Tiempo de *turn-around* y se aplica los retrasos de 30 minutos correspondientes.

Así pues, en este módulo tenemos costes que afectan tanto a cancelaciones como a retrasos, siendo una de las partes más costosas del problema.

Como se aplican retrasos, debemos volver a comprobar las cancelaciones a aquellos vuelos que superen el límite establecido. Y además, implica volver a la parte inicial del algoritmo para comprobar que no se han visto afectados los módulos anteriores del algoritmo ya descritos.

Una vez comprobados que en todos los módulos ya no hay costes adicionales, se pasa al último módulo que se describe a continuación.

- Seudocódigo

```

1: Por cada vuelo en listaVuelosConexion hacemos
2:   si (vuelo.Cancelado = verdadero) hacemos
3:     variable vuelos_cancelados = CancelarVuelosConexion(vuelo);
4:     CalcularCosteVuelos(vuelos_cancelados);
5:   sino
6:     variable fecha_vuelo = ObtenerFechaVuelo(vuelo);
7:     Por cada vueloconexionado en vuelo.Conexiones hacemos
8:       variable fecha_vuelo_con = ObtenerFechaVuelo(vueloconexionado);
9:       si (fecha_vuelo_con – fecha_vuelo < 30 minutos) hacemos
10:        RetrasarVuelo(30,vueloconexionado);
11:        CalcularCosteRetraso(30,vueloconexionado);
12: GuardarRegistroCoste();
13: devolver CosteTotalModificado();

```

Por cada vuelo que tenga conexión, si este está cancelado, se cancelan los vuelos conexiónados para evitar la pérdida de pasajeros en destino y calculamos su coste. En caso contrario, se obtiene la diferencia de tiempo entre el vuelo y sus conexiones. Si esta diferencia es menor a 30 minutos, se aplica al vuelo un retraso de 30 minutos para mantener la conexión activa y se calcula su retraso. Finalmente, se registra todos los costes aplicados y se devuelve un valor de verdadero o falso si se han aplicado.

5.1.8 Vuelta a la normalidad

Este módulo se encarga de comprobar que al final del período de recuperación las flotas de aeronaves indicadas en el archivo de *Position* estén en el aeropuerto que les corresponde.

Para ello, anteriormente, se realiza un cálculo adicional para incluir en la clase Aeropuertos la lista de las aeronaves que están en el momento final de la configuración en dicho aeropuerto y poder así agilizar la carga computacional.

Los costes asociados a la vuelta a la normalidad dependen de tres factores:

- Aeronaves del mismo modelo
- Aeronaves de la misma familia
- Aeronaves con la misma configuración

Así pues, según la lista que se ha creado con el cálculo anterior, se agrupan todas las aeronaves según estos factores, haciendo un cálculo de cantidades necesarias.

Si éstas no se satisfacen porque son menores a las indicadas, se aplicaran los costes oportunos indicados en el archivo de *Configuration* y multiplicados por la diferencia de aeronaves que falten.

- Seudocódigo

```

1: Por cada posición en listaPosiciones hacemos
2:   variable listamodeloscantidad = CalcularModelosFlota(posición.Flota);
3:   Por cada modelocantidad en listamodeloscantidad hacemos
4:     si (modelocantidad > posición.Aeropuerto.AvionesFinalModelo) hacemos
5:       CalcularCosteAvionesSinModelo(modelocantidad);
6:   variable listafamiliascantidad = CalcularFamiliasFlota(posición.Flota);
7:   Por cada familiacantidad en listafamiliascantidad hacemos
8:     si (familiacantidad > posición.Aeropuerto.AvionesFinalFamilia) hacemos
9:       CalcularCosteAvionesSinFamilia(familiacantidad);
10:  variable listaconfigcantidad = CalcularConfiguracionFlota(posición.Flota);
11:  Por cada configcantidad en listaconfigcantidad hacemos
12:    si (configcantidad > posición.Aeropuerto.AvionesFinalConfiguracion) hacemos
13:      CalcularCosteAvionesSinConfiguracion(configcantidad);
14:  GuardarRegistroCoste();

```

Por cada posición en el fichero de posiciones cargado, primero se calculan la cantidad de los diferentes modelos que son obligatorios. A continuación, se buscan los diferentes modelos de aviones que han terminado el proceso de recuperación en el aeropuerto en cuestión. Esta búsqueda se realiza a partir de la lista adicional calculada en la clase Aeropuerto. En el caso que los modelos permitidos no se cumplan, se calcula el coste asociado a la vuelta a la normalidad que se indica en el fichero de configuración. Este mismo proceso se repite dos veces más aunque las comprobaciones se realizan sobre las familias y configuraciones obligatorias. Finalmente registramos los costes aplicados.

SECCIÓN 4 – EJECUCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6. Ejecución

6.1 Introducción

Una vez descrita la metodología de resolución propuesta y explicado en forma de diagrama de bloques y pseudocódigo la estructura de todo el algoritmo, tal y como se apunta en la sección de objetivos planteados para este proyecto, resulta esencial realizar una serie de ejecuciones del problema, que permitan evaluar el rendimiento del algoritmo planteado, así como cuantificar el potencial de la metodología desarrollada y analizar la calidad de las soluciones generadas.

Antes de mostrar los resultados del algoritmo planteado, se exponen las limitaciones y las características de los inputs respecto al proyecto de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* que se cogerán como referencia para llevar a cabo las ejecuciones del algoritmo.

Se llevarán a cabo ejecuciones sobre diferentes instancias del mismo escenario para poder relativizar los resultados obtenidos versus los generados mediante la metodología desarrollada por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*. Las instancias aplicadas en esta ejecución son las presentadas en el ROADEF como B01, B02, B06 y B07. En todas ellas únicamente aparecen alteraciones en los vuelos, no hay alteraciones ni en la capacidad de los aeropuertos ni en el mantenimiento de las aeronaves. Esta decisión se plantea por el coste temporal que supone incluir además estas alteraciones en el proyecto.

Por otro lado, una vez obtenidos los resultados de las ejecuciones, se realizará una comparación entre *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* y el proyecto desarrollado en el apartado de Análisis de resultados y Comparaciones. Aún así, también se mostrará un listado de costes parciales y unas estadísticas adicionales que nos aportarán más información para las conclusiones pero que no se podrán comparar con el trabajo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*.

En la siguiente tabla se resumen las características principales de estas instancias.

	B01	B02	B06	B07
Tiempo de recuperación (h)	36	36	36	36
Número de aeronaves	255	256	256	256
Número de aeropuertos	45	45	45	45
Número de vuelos	1422	1422	1422	1422
Número de itinerarios	11214	11214	11565	11565
Alteraciones en los vuelos	230	255	230	255
Alteraciones en los aeropuertos	0	0	0	0
Alteraciones en las aeronaves	0	0	0	0

Tabla 30 Características de las instancias B01, B02, B06 y B07

Además no está incluida en el cálculo de costes la recuperación de aquellos vuelos cancelados y que permiten una reconexión para los pasajeros. Esto implica que el coste sea más elevado pero a su vez puede quedar compensado por el coste de degradación de los pasajeros en el caso de que no se pudieran recuperar según su clase en la cabina de la aeronave.

Esta limitación también es debida al coste temporal que supone incluir además estas alteraciones en el proyecto, no obstante, se plantea como posible proyecto de futuro tal y como se comenta en el último apartado de conclusiones.

6.2 Resultados

Tomando como referencia los experimentos realizados por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* y los resultados presentados en su artículo, se realizan una serie de ejecuciones del algoritmo presentado con anterioridad utilizando las instancias descritas en el apartado anterior.

Por tanto, en este apartado se muestra por cada instancia planteada, el coste final de su recuperación además de unos conceptos estadísticos que nos permiten evaluar la afectación que tienen las alteraciones en una fase.

También se incluye un listado de los costes parciales que suponen cada apartado del algoritmo comentado en puntos anteriores. A continuación se realizará un análisis de cada una de las instancias ejecutadas.

6.2.1 Instancia B01

RESULTADOS						
Coste Total (M. euros)	Tiempo de ejecución	Iteraciones	Vuelos cancelados	Vuelos retrasados	% de cancelados	% de retrasados
10.738.594,15	2,82 min.	679	630/1422	846/1422	44,30%	59,49%
10.956.789,65	3,58 min.	714	640/1422	848/1422	45,01%	59,63%
10.872.127,15	3,77 min.	649	638/1422	844/1422	44,87%	59,35%
10.853.410,15	2,92 min.	629	635/1422	842/1422	44,66%	59,21%
10.969.119,15	3,02 min.	715	640/1422	851/1422	45,01%	59,85%
10.878.008,05	3.22 min.	677,2	636,6	846,2	44,77%	59,51%

Tabla 31 Resultados de la Instancia B01

	Coste
-----Calcular retrasos-----	1,50
-----Retrasos por capacidades-----	246,00
-----Retrasos por TurnAround-----	84,00
-----Retrasos por capacidades-----	444,00
-----Retrasos por TurnAround-----	267,00
-----Retrasos por capacidades-----	117,00
-----Retrasos por TurnAround-----	66,00
-----Costes por mantenimiento-----	72.250,00
-----Coste Parcial-----	530.479,50

Tabla 32 Costes Parciales Instancia B01

* El resto de resultados parciales están incluidos en el anexo.

6.2.2 Instancia B02

RESULTADOS						
Coste Total (M. euros)	Tiempo de ejecución	Iteraciones	Vuelos cancelados	Vuelos retrasados	% de cancelados	% de retrasados
11.010.176,40	3,13 min.	726	667/1422	834/1422	46,91%	58,65%
11.370.298,40	2,97 min.	735	685/1422	844/1422	48,17%	59,35%
11.047.976,90	2,77 min.	670	664/1422	832/1422	46,69%	58,51%
10.989.466,40	2,67 min.	641	660/1422	828/1422	46,41%	58,23%
11.028.206,40	2,62 min.	650	662/1422	828/1422	46,55%	58,23%
11.089.244,90	2,83 min.	684,4	667,6	833,2	46.95%	58,59%

Tabla 33 Resultados de la Instancia B02

	Coste
-----Retrasos por TurnAround-----	1.833,00
-----Costes por conexiones-----	882,00
-----Coste Parcial-----	6.915.567,35
-----Retrasos por TurnAround-----	2.496,00
-----Costes por conexiones-----	835,50
-----Coste Parcial-----	6.946.648,85
-----Retrasos por TurnAround-----	1.344,00
-----Costes por conexiones-----	702,00

Tabla 34 Costes Parciales Instancia B02

* El resto de resultados parciales están incluidos en el anexo.

6.2.3 [Instancia B06](#)

RESULTADOS						
Coste Total (M. euros)	Tiempo de ejecución	Iteraciones	Vuelos cancelados	Vuelos retrasados	% de cancelados	% de retrasados
10.973.929,60	2,98 min.	773	635/1422	851/1422	44,66%	59,85%
10.637.993,60	2,84 min.	684	621/1422	844/1422	43,67%	59,35%
10.892.907,60	2,93 min.	772	629/1422	847/1422	44,23%	59,56%
11.003.310,10	3,04 min.	773	637/1422	854/1422	44,80%	60,04%
10.952.146,60	2,86 min.	748	634/1422	859/1422	44,59%	60,41%
10.892.057,50	2,93 min.	750	631,2	851	44,39%	59,84%

Tabla 35 Resultados de la Instancia B06

	Coste
----Retrasos por TurnAround----	420,00
----Costes por mantenimiento----	25.500,00
----Costes por conexiones----	79.146,00
----Coste Parcial-----	2.293.459,00
----Retrasos por TurnAround----	1.629,00
----Cancelar vuelos-----	15.000,00
----Costes por mantenimiento----	17.000,00
----Coste Parcial-----	2.406.433,50
----Retrasos por TurnAround----	936,00

Tabla 36 Costes Parciales Instancia B06

* El resto de resultados parciales están incluidos en el anexo.

6.2.4 Instancia B07

RESULTADOS						
Coste Total (M. euros)	Tiempo de ejecución	Iteraciones	Vuelos cancelados	Vuelos retrasados	% de cancelados	% de retrasados
11.183.514,00	3,28 min.	827	669/1422	845/1422	47,05%	59,42%
10.978.419,00	2,86 min.	734	659/1422	833/1422	46,34%	56,58%
11.182.683,00	3,15 min.	797	668/1422	842/1422	46,98%	59,21%
11.110.159,50	2,99 min.	775	660/1422	850/1422	46,41%	59,77%
11.002.564,50	2,99 min.	782	656/1422	848/1422	46,13%	59,63%
11.091.468	3,05 min.	783	662,4	843,6	46,58%	58,92%

Tabla 37 Resultados de la Instancia B07

	Coste
-----Cancelar vuelos-----	15.000,00
-----Coste Parcial-----	8.134.624,75
-----Cancelar vuelos-----	12.750,00
-----Retrasos por TurnAround-----	12,00
-----Costes por conexiones-----	25.500,00
-----Coste Parcial-----	8.172.889,80
-----Calcular retrasos-----	9,15
-----Retrasos por TurnAround-----	18,00
-----Costes por conexiones-----	34,50
-----Coste Parcial-----	8.172.951,45

Tabla 38 Costes Parciales Instancia B07

* El resto de resultados parciales están incluidos en el anexo.

6.3 Análisis de resultados y comparativa

Si se analizan los datos de las cuatro instancias de forma unificada, se observa como primer factor a destacar la similitud de costes. Esto es debido a la estructura creada por ROADEF en el muestreo de los inputs que a pesar de representar instancias diferentes, los datos de vuelos, aviones, aeropuertos son muy similares en cuanto a interrupciones. Esto puede tener su sentido ya que están realizando un análisis de una situación para concurso.

No obstante, si observamos en el valor de los resultados, se contempla que el coste suele rondar los 11 millones de euros. De este resultado se puede concretar que partiendo de 230 interrupciones (únicamente de vuelos), es decir, un 16% de vuelos del total con afectación, el valor de recuperación puede ser muy elevado. Es importante comprender viendo el coste que no sólo se trata de resolver las diferentes interrupciones o alteraciones que puedan surgir sino también que su resolución de coste sea lo mínima posible y esto refuerza la importancia de estos algoritmos en su cálculo.

Si se continúa observando los resultados, también se puede remarcar la afectación creciente que tienen éste 16% de vuelos con retrasos sobre los otros vuelos. Como se muestra en las tablas de resultados anteriores, puede rondar la afectación sobre un 60% de los vuelos totales, cuadruplicando así la afectación inicial. Es importante, también remarcar que esta afectación debe responder también a la recuperación de vuelos en estado cancelado que permitan así reducir costes o aumentar satisfacción de clientes a pesar de tener que aplicar en algunos casos *downgrounding*.

Como información adicional, también se muestra las iteraciones que debe gestionar el programa para poder llevar a cabo la parte del algoritmo aquí presentado. De media, estas instancias están rodando los 700 ciclos de CPU en un tiempo medio de 3 minutos. Este tiempo es asequible, incluso incluyendo la parte de los pasajeros, para un PC o servidor convencional. En este caso, se utilizó un PC con procesador *Pentium-DualCore* de 2.30Ghz. No obstante, la tecnología actual permite cálculos importantes en tiempos muy reducidos con sistemas de *clusters* de PC's.

Si se revisan los datos desglosados que se incluyen en el anexo y que en el apartado anterior se muestran resumidamente, se puede observar que los costes que suponen un porcentaje mayor en el coste total son los costes de Mantenimiento y Conexión entre pasajeros. Se puede entender ya que los aviones con mantenimiento necesitan una regulación de tiempo especial y eso impide que cualquier variación de retraso pueda afectar en cancelaciones, y el conexionado de clientes implica tanto costes de retraso, como de cancelación, como de satisfacción de clientes y de reagrupación. Es por ello, que es la parte más costosa de describir en problema y decidir la mejor heurística para reducir su coste ya que puede depender de muchos factores.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por el algoritmo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* obtenidos para las instancias analizadas.

	B01	B02	B06	B07
Coste	983.731,75	1.522.452,75	3.789.254,05	5.488.693,00
Coste promedio	2.195.715,33	3.688.140,59	7.443.229,07	10.311.353,33
Iteraciones	211	211	211	211

Tabla 39 Resultados de las instancias por el algoritmo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*

Si se compara el coste definitivo que se muestra en la primera fila, podemos observar que nuestro resultado está un poco alejado de la optimización que se puede conseguir. No obstante, si se analiza con otros datos mostrados en el documento nuestros resultados están en el promedio.

No obstante, como se puede observar en el coste promedio de las fases 1 y 2 de su algoritmo, tiene un crecimiento más rápido llegando casi a equiparar costes en la instancia B07 con los resultados obtenidos. Esto hace indicar que las instancias B01 y B02 tienen un coste de recuperación de vuelos y de pasajeros más elevados que en las instancias B06 y B07. Esto nos permite concluir que nuestros resultados están muy

próximos a su algoritmo en la aplicación de costes reducidos de las interrupciones de vuelos. Así pues, con los datos obtenidos y los datos publicados por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* permiten analizar los inputs más exhaustivamente y poder tomar diferentes decisiones más centradas en los pasajeros.

La comparativa a nivel de complejidad computacional e iteraciones del programa no es aplicable ya que la información respectiva sobre sus iteraciones repercute a un nivel más alto y no se llega a un nivel de detalle que se ha implementado en el algoritmo propuesto. No obstante, sí que permite analizar que tanto sus resultados como los mostrados tienden a un nivel de iteraciones único. A nivel computacional es satisfactorio ya que el propio programa tiende a un estado estable y evita así obtener resultados muy alejados de la solución óptima.

En resumen, los resultados obtenidos a partir del algoritmo generado proporcionan, a nivel de costes con interrupciones de vuelos, un coste total muy aproximado al coste promedio que aporta el algoritmo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* considerado el número 1 del ranking de ROADEF para 2009. No obstante, la parte de recuperación de clientes con vuelos cancelados implica una reducción de coste importante si está es posible, reduciendo en algunos casos, hasta una décima parte.

SECCIÓN 5 – CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7. Conclusiones

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio detallado en relación al problema de recuperación de aeronaves y de pasajeros tras unas alteraciones del servicio, previamente discutido por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* o *Sinclair, Cordeau y Laporte (2012)* entre otros y se ha elaborado, diseñado, implementado y validado una metodología de resolución innovadora basada en un proceso con la misma heurística pero que ha permitido generar soluciones, no óptimas del todo, pero si cercanas a ellas, en un tiempo computacional reducido.

Para realizarlo, ha sido necesario, en primer lugar, realizar una descripción detallada y disponer de una base teórica fundamental para soportar un enfoque del problema completo para poder desarrollar la metodología propuesta y derivar unas conclusiones de éste. Con este objetivo, se ha iniciado el proyecto con una introducción que ha servido como presentación genérica de la temática a tratar y se ha aportado una base teórica necesaria para comprender y contextualizar el problema de la recuperación de aeronaves y pasajeros, así como aquel conjunto de actividades que están estrechamente vinculadas y que tienen una afectación directa.

A continuación, como resulta necesario para llevar a cabo cualquier trabajo de investigación, se ha realizado un análisis bibliográfico en que se ha estudiado las diferentes aproximaciones realizadas al problema desde sus inicios hasta describir cuál es el estado actual de la cuestión. De esta manera, inicialmente se ha realizado una revisión cronológica en que se ha seguido la evolución del problema durante los últimos años, y después, una sección, donde se ha llevado a cabo un análisis más exhaustivo en relación al estudio abordado al problema a tratar con mayor detalle y que se ha considerado como principal referencia a la hora de realizar la contribución original presentada, que es el artículo de *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)*.

Contando ya con una base teórica bastante sólida, se ha continuado la memoria con una descripción detallada del problema y con la presentación de la metodología desarrollada; se han descrito cuales son los conjunto de datos necesarios a tener en cuenta, los conceptos fundamentales de la metodología desarrollada, la descripción de

la función objetivo y los conjuntos de restricciones que les afectan. Después, se ha realizado una descripción de cuál ha sido la manera en que se ha implementado la metodología desarrollada y se han expuesto y explicado en forma de pseudocódigo todo el diagrama de bloques que forma el algoritmo.

Finalmente, para poder verificar, validar y analizar el rendimiento y calidad de las soluciones generadas por el algoritmo desarrollado, se ha diseñado y ejecutado un programa de experimentos al cual se ha sometido el algoritmo con diferentes instancias del problema a partir del cual se han extraído una serie de resultados que han estado validados y posteriormente discutidos y analizados.

De la valoración de las actividades llevadas a cabo en este proyecto y del análisis de los resultados obtenidos, se han derivado una serie de conclusiones que se resumen a continuación:

- En primer lugar, no se puede discutir que el problema de la recuperación tanto de aeronaves como de pasajeros después de una interrupción tanto a pequeña como a gran escala es un problema que vale mucho la pena estudiar teniendo en cuenta el contexto competitivo actual presente en la industria del transporte aéreo y la creciente necesidad por parte de los operadores aéreos de mejorar su eficiencia productiva de cara a generar propuestas que sean más atractivas para los clientes finales. La metodología desarrollada en este trabajo constituye una aportación de valor gracias a que, sin la necesidad de realizar inversiones adicionales, se puede conseguir reducir los costes, acercándose así a la solución más óptima.
- Por otro lado, la experiencia recogida haciendo el proyecto, pone de manifiesto que se trata de un problema de gran complejidad, que hace falta conocer en profundidad para poder contribuir en él de una manera relevante. Esta complejidad pasa por una banda por la necesidad de interactuar diferentes actividades en un mismo algoritmo, así como la construcción y ejecución de éste, y por otro lado, teniendo conciencia de

todas las restricciones que afectan y que hay que tener en cuenta a la hora de desarrollar metodologías que puedan alterar este algoritmo.

- Se considera que los resultados generados a partir de la aplicación práctica y la experimentación de la metodología desarrollada son coherentes y constituyen una nueva fuente de referencia respecto otras alternativas de solución de este problema, tal y como se puede comprobar en el apartado de resultados y comparaciones.
- El algoritmo desarrollado en este proyecto genera unos resultados bastante buenos, acercándose así a las soluciones más óptimas propuestas por *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* en su artículo.
- Finalmente, hace falta comentar que abarcar más de una recuperación a la vez, como por ejemplo recuperar pasajeros y aeronaves, es mucho más costoso en ámbito temporal que el problema inicial, y que en este proyecto se han intentado llevar a cabo dando alguna solución óptima del problema.

Finalmente, teniendo en cuenta el objetivo global planteado al inicio del proyecto y tomando como referencia el itinerario definido a partir de los objetivos parciales formulados, se considera que se ha dado una respuesta satisfactoria a cada uno de los objetivos posibilitando en conjunto, que se ha cumplido el objetivo global planteado.

8. Futuras líneas de trabajo

En este proyecto se ha concebido y presentado una metodología diferente que ha constituido una alternativa para las herramientas de solución del problema de la recuperación de aeronaves y de pasajeros tras interrupciones a pequeña escala. Evidentemente la metodología presentada es una primera versión del algoritmo, considerando, por tanto, que abre muchas puertas de cara a su mejora y a la obtención de mejores resultados en el futuro.

Haciendo una revisión de los resultados obtenidos de este proyecto y considerando algunas conclusiones extraídas, se enumeran a continuación los que se consideran las principales y posibles líneas futuras de trabajo que pueden dar continuidad al proyecto presentado:

- Para dar una mejora de los resultados obtenidos gracias a este algoritmo, se debería incluir en el proceso, un nuevo algoritmo que permita la recuperación de pasajeros, tal y como hacen *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* en su trabajo. De esta manera, la solución generada sería más óptima y se podría acercar más a los resultados que proporcionan *Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin (2010)* en su algoritmo.
- También sería interesante poder probar este algoritmo con otros inputs que puedan existir y que tengan una amplia variedad de ejemplos. Ya que los obtenidos por ROADEF, tal y como se ha comentado con anterioridad, son parecidos entre ellos y no son del todo reales, como comentan en su descripción del proyecto.
- Otra contribución que se podría realizar es la de modificar el programa informático para que este realice el algoritmo como si fuera un simulador y poder realizar experimentos más realistas a la hora de comparar resultados con compañías aéreas, por ejemplo.

- Algo que estaría relacionado con poder cambiar los inputs y probar con otros datos, sería el hecho de incluir alteraciones tanto en aeropuertos como en las aeronaves para que el resultado sea aún más real. De esta manera, el algoritmo llegaría a ser más complejo, ya que no tan solo se tendrían alteraciones en los vuelos.
- Finalmente, para darle un toque también más realista al proyecto, y aunque supondría una gran complejidad del algoritmo, sería interesante crear o incluir un algoritmo que ayudara a resolver el problema de la recuperación de la tripulación para llevar a cabo una solución mucho más óptima.

9. Referencias Bibliográficas

- Morata, A. (2012) "Sistemas de recuperación de pasajeros tras disrupciones de pequeña escala"
- Jafari, N., Hessameddin, S. (2011) "Simultaneous recovery model for aircraft and passengers", Journal of the Franklin Institute 384 1638- 1655.
- S. Bartu, C. Barnhart, "Flight operations recovery: new approaches considering passenger recovery", journal of Scheduling 9 279-298.
- R. Acuna-Agost, D. Feillet, P. Michelon, and S. Gueye; (2009) \Rescheduling Flights, Aircraft, and Passengers Simultaneously under Disrupted Operations - A Mathematical Programming Approach based on Statistical Analysis", AGIFORS . Anna Valicek Medal 2009,
- R. Acuna-Agost, M. Boudia, N. Jozefowicz, c. Mancel, F. Mora-Camino, " Passenger-Improver- A Second Phase Method for Integrated Aircraft_Passenger Recovery Systems.
- K. Sinclair, JF.Cordeau, G.Laporte (2013), "Improvements to a large neighborhood search heuristic for an integrated aircraft and passenger recovery problem".
- S. Bisailon, JF.Cordeau, G.Laporte, F.Pasin (2010) "A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem".
- M.Le, C.Zhan, C.Wu (2012) "Solving the airlines recovery problem considering aircraft rerouting and passengers".
- Clarke (2005) "Passenger reaccommodation".
- "Passenger trip delay statistics for 2010", Airline Passenger Transportation System (APTS).
- ROADEF Challenge 2009.

ANEXOS