



## Grau en Gestió Aeronàutica

MEMÒRIA DEL TREBALL FI DE GRAU:

**GESTIÓ DE LES DISRUPCIIONS: VAGA ATC FRANÇA 21-03-16**

Memòria del Treball de Fi de  
Grau en Gestió Aeronàutica

realitzat per

**Lidia Herrera Sánchez**

i dirigit per

**Dr. Ángel A. Juan**

Escola d'Enginyeria Sabadell, a 6  
de juliol de 2016

El sotasignat, DR. ÀNGEL A.JUAN PÉREZ,  
Professor de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

**CERTIFICA:**

Que el treball corresponent a la present memòria  
ha estat realitzat sota la seva direcció per  
na LIDIA HERRERA SÁNCHEZ

I per tal que consti signa la present.



Sabadell, Julio de 2014

-----

Signat: DR. ÀNGEL A.JUAN PÉREZ

## ÍNDIX

<b>0. Resum .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducció.....</b>	<b>7</b>
1.1 Interès i motivació.....	7
1.2 Objectius.....	11
1.2.1 Objectius globals .....	11
1.2.2 Objectius parcials .....	11
1.3 Metodologia .....	13
1.4 Planificació temporal.....	14
<b>2. Base teòrica: Gestió de les interrupcions .....</b>	<b>15</b>
2.1 Procediments de recuperació .....	17
2.2 Eines de recuperació .....	17
2.2 Eines de recuperació .....	17
2.2.1 <i>Buffers</i> .....	17
2.2.2 Difusió del retard.....	17
2.2.3 FIFO.....	17
2.2.4 Combinació de vols.....	18
2.2.5 Avions <i>sub-charter</i> .....	19
2.2.6 Denegació de l'embarcament .....	19
2.2.7 Aïllament del retard.....	19
2.3 MOC ( <i>Maintenance on Call</i> ) – <i>Aircraft recovery</i> .....	21
2.4 <i>Crew control</i> – <i>Crew recovery</i> .....	22
2.5 <i>Network</i> – <i>Passenger recovery</i> .....	23
2.6 <i>Duty Manager</i> .....	26
<b>3. Revisió de la literatura científica.....</b>	<b>28</b>
3.1 Evolució històrica del problema .....	28
3.2 <i>Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010</i> .....	30

<b>4. Descripció del problema</b> .....	<b>31</b>
4.1 Conceptes bàsics .....	31
4.1.1 Programació de vols .....	31
4.1.2 Elements clau en el problema .....	31
4.1.2.1 Aeroports.....	31
4.1.2.2 Flota .....	32
4.1.2.3 Tripulacions.....	32
4.1.2.4 Passatgers .....	32
4.1.2.5 Disrupcions .....	33
4.2 Presa de decisions .....	34
4.3 Funció objectiu .....	35
4.3.1 Costos operatius.....	35
4.3.2 Costos d'insatisfacció dels passatgers.....	35
4.3.3 Costos de retorn a la normalitat.....	35
4.4 Restriccions .....	36
4.4.1 Restriccions operatives.....	36
4.4.2 Limitacions funcionals .....	36
4.5 Mètode de resolució .....	37
4.5.1 Fase de construcció .....	38
<b>5. Algorisme</b> .....	<b>39</b>
5.1 Diagrama de flux.....	40
5.2 <i>Inputs</i> .....	41
5.3 Disseny de l'algorisme – Pseudocodi .....	42
5.4 Implementació de l'algorisme .....	49
5.4.1 Importació dels fitxers i cas a estudiar .....	51
5.4.2 Aplicació de les interrupcions.....	52
5.4.3 Comprovar rotacions i aplicar retard .....	52

5.4.4 Cancel·lar <i>legs</i> no viables.....	53
5.4.5 Possible creació de nous vols .....	54
5.4.6 Creació de nous vols.....	55
5.4.7 Actualització de nous vols .....	56
5.4.8 Impressió de la solució .....	57
<b>6. Anàlisi de resultats.....</b>	<b>59</b>
6.1 Resultats .....	60
6.2 Anàlisi i comparativa .....	62
<b>7. Cas d'estudi – Vaga ATC França 21-03-16 .....</b>	<b>64</b>
7.1 Introducció del cas .....	64
7.2 Implementació .....	65
7.3 Anàlisi de resultats .....	66
<b>8. Conclusions i treball futur .....</b>	<b>68</b>
8.1 Conclusions.....	68
8.2 Àmbits futurs de treball .....	70
<b>9. Referències bibliogràfiques .....</b>	<b>72</b>
<b>Annexes – Codi complet.....</b>	<b>73</b>

## 0. Resum

<b>Títol/Título/Title:</b> Gestió de les interrupcions: Vaga ATC França 21-03-16 Gestión de las interrupciones: Huelga ATC Francia 21-03-16 Disruption Management: ATC Strike France 21-03-16		
<b>Autores/Autores/Authors:</b> Lidia Herrera	<b>Data/Fecha/Date:</b> Juliol del 2016 Julio del 2016 July 2016	
<b>Tutor/Tutor/Tutor:</b> Dr. Ángel Juan Pérez		
<b>Titulació/Titulación/Titulation:</b> Gestió Aeronàutica Gestión Aeronáutica Aeronautical Management		
<b>Paraules clau:</b> - Interrupció - Recuperació d'aeronaus - Recuperació de passatgers - Retard i cancel·lació - Període de recuperació	<b>Palabras Clave:</b> - Interrupción - Recuperación de aeronaves - Recuperación de pasajeros - Retraso i cancelación - Período de recuperación	<b>Key Words:</b> - Disruption - Aircraft recovery - Passenger recovery - Delay and cancellation - Recovery period
<b>Resum:</b> El projecte consistirà en realitzar una <i>overview</i> de les interrupcions que tenen lloc en el departament d'OCC (Centre de Control d'Operacions), a més de la descripció dels problemes que es produeixen a causa d'aquestes i el procés de solució que es dur a terme. Posteriorment, s'analitzaran profundament els problemes d' <i>aircraft recovery</i> i <i>passenger recovery</i> , dels quals es buscarà una solució a través d'un algorisme. La finalitat és augmentar l'eficiència del procés de la presa de decisions en el Departament, per poder fer front al creixement del transport aeri mitjançant l'optimització i automatització dels processos.		
<b>Resumen:</b> El proyecto consistirá en realizar una <i>overview</i> de las interrupciones que tienen lugar en el departamento de OCC (Centro de Control de Operaciones), además de la descripción de los problemas que se producen a causa de éstas i el proceso de solución que se lleva a cabo. Posteriormente, se analizarán profundamente los problemas d' <i>aircraft recovery</i> y <i>passenger recovery</i> , de los cuáles se buscará una solución a través de un algoritmo. La finalidad es aumentar la eficiencia del proceso de la toma de decisiones en el Departamento, para poder hacer frente al crecimiento del transporte aéreo mediante la optimización i la automatización de los procesos.		
<b>Summary:</b> This project is based on an overview of the disruptions that take place in the OCC (Operations Control Center) department, as well as the description of the involved problems and the solution process that is carried out. Two of the main disruptions, Aircraft and passenger recovery problems, are analyzed in detail and a solution algorithm is sought. The aim is to increase the efficiency of the decision making process in the Department, in order to cope with the growth of the air transport industry through the optimization and automation of processes.		

## 1. Introducció

### 1.1 Interès i motivació

Operar una línia aèria és una tasca molt complexa.

Les companyies aèries gestionen els seus recursos d'acord amb una planificació optimitzada dels seus vols des del punt de vista dels ingressos. No obstant això, l'execució de la programació dels vols rarament és regular, és a dir, que la majoria de les vegades les operacions aèries són irregulars i requereixen d'accions correctives ràpides i eficients.

Les aerolínies triguen mesos planificant rigorosament les operacions futures. No obstant això, una vegada en l'operativa, el temps de recuperació es consumeix en minuts. Tot i disposar d'un marge de temps relativament curt que simplifica la gestió, resoldre problemes que requereixen de múltiples recursos, incrementa exponencialment la complexitat de la tasca (Sinclair, 2013); la qual és imprescindible de dur a terme per evitar l'efecte negatiu d'aquests problemes sobre els beneficis i l'eficiència operacional de la companyia, a més de tenir un visible i nociu impacte sobre la satisfacció i confiabilitat dels passatgers.

Les *disruptions* són aquelles situacions en les quals es retarda o s'interromp la programació prevista (Jafari, 2011); i la forma sistemàtica de tractar amb aquestes operacions irregulars és coneguda com *disruption management* (Barnhart, 2012). Les interrupcions poden classificar-se com internes i externes. Les primeres s'originen dins de la línia aèria traduint-se com la falta de disponibilitat d'una o més aeronaus i/o tripulacions. La manca d'avions és deguda als canvis d'horaris dels vols o problemes mecànics; mentre que la de tripulacions és a causa d'esdeveniments imprevistos –infermetats, vagues i altres absències no planificades, així com la conseqüència de les modificacions de l'horari de vol. Les segones s'originen en el món exterior i sorgeixen degut a la meteorologia adversa, els problemes de l'aeroport o problemes relacionats amb l'ATC.

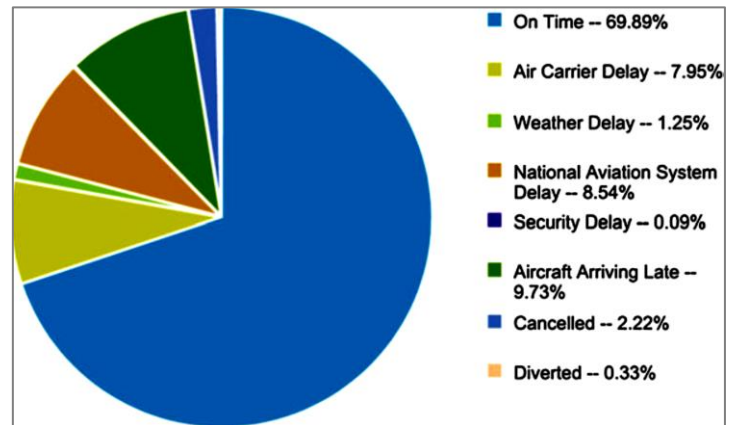


Fig. 1 Delays and cancellations June-August 2007 US (Barnhart 2012)

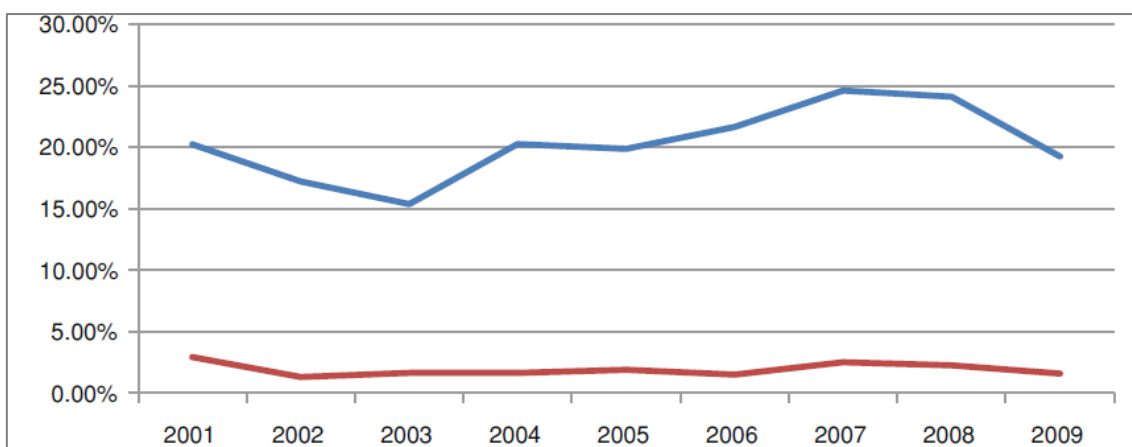


Fig. 2 Percentage of delayed (blue) and canceller (red) flights of US carriers (Barnhart, 2012)

Tot i que els objectius de qualsevol procés de recuperació són similars, els resultats són específics per cada aerolínia. Les *mega carriers* disposen d'un nombre elevat de possibles opcions de recuperació en una red *hub-and-spoke*, però la solució d'un problema en temps real endarrereix el procés de solució; en canvi les *low cost* que operen punt a punt, tenen un nombre limitat d'opcions, obtenint una resposta ràpida però de pitjor qualitat (Barnhart, 2012).

L'execució del programa sobre una base diària és gestionada a través del Centre de Control d'Operacions (OCC). L'OCC és el centre de les operacions i té la finalitat d'aconseguir els objectius de les companyies aèries de forma segura i fiable. Alguns dels objectius són maximitzar la puntualitat, el nombre de vols programats o la utilització de les aeronaus; amb el fi d'aconseguir millorar la competitivitat; assoliment que es tradueix en beneficis.



Per tal d'assolir els objectius anteriorment esmentats, l'OCC dur a terme accions com són la cancel·lació i el retard de vols, desviaments, *ferries*, posicionals i altres tàctiques operatives per aconseguir el millor horari possible de vol pels passatgers. Els problemes de recuperació d'aeronaus, tripulacions i passatgers són resolts en aquest ordre, essent aquest el procés de decisió d'OCC tradicional. Les decisions relacionades amb el *aircraft recovery* tenen repercussió sobre l'horari de la tripulació i els passatgers.

Donant solució al problema de les aeronaus, es creen models basats en una xarxa de fluxos utilitzant el mètode *Branch and Bound* (Teodorovic i Guberinic (1984)), però també utilitzant el mètode de camins més curt (Jarrah i Yu (1993)). Més tard, comencen a desenvolupar-se més models com el que es basa en la recerca aleatòria implementada en dues fases (Arguello, Bard y Yu (1997)), o els basats en programació lineal (Cao i Kanafani (1997)), i d'altres més recents com el que es basa en una heurística que redueix el nombre de rutes factibles (Rosenberger (2003)) o el model de recuperació basat en generació de columnes (Eggenberg, Salani i Bierlaire (2010)).

En relació al problema de *crew recovery*, el primer model creat està basat en una programació dinàmica que redueix els temps mínims de la tripulació en terra utilitzant el principi de *first-in-first-out* (Teodorovic i Stojkovic (1995)). Més endavant, en surten d'altres similars als que solucionen el problema *aircraft recovery* –el problema de recuperació és formulat com un *system-wide multi-commodity* on cada producte correspon a una tripulació, i és solucionat utilitzant l'algoritme *Branch and Bound* (Wei et al. (1997)).

Pel problema de recuperació dels passatgers, trobem models amb tècniques de xarxa de fluxos (Bratu i Barnhart (2006)) o models de programació no lineal (Zhang i Hansen (2008)).

Solucionar el problema per separat no és la forma més òptima. S'ha d'interactuar tant amb avions, com amb tripulacions i com amb passatgers, i així obtenir un dels avantatges competitiu primordial –la fidelitat per part dels passatgers, especialment la dels de negocis que són els que aporten beneficis considerablement importants a la companyia (Bratu, 2005).

Únicament es coneix un model que abordi el problema de la recuperació total creat per Petersen, Solveling, Johnson, Clarke i Shebalov (2010).

L'objectiu serà detectar les múltiples *disruptions* que es produeixen en el departament d'OCC d'una companyia aèria, a la que vegada que s'analitzen i es descriuen els problemes d'*aircraft recovery*, de *crew recovery* i de *passenger recovery*.

Finalment, serà creat un sistema de recuperació que integri els problemes d'aeronaus i de passatgers; capaç d'augmentar l'eficiència i la rapidesa del procés de la presa de decisions, a la vegada que es redueixen taxes d'error i costos.

## 1.2 Objectius

### 1.2.1 Objectius globals

A partir de l'anàlisi de les fonts bibliogràfiques i de percebre en primera persona la gestió que es duu a terme al departament de control d'operacions, es planteja com a objectiu principal d'aquest projecte estudiar a fons la gestió de les disruptcions en el departament de control operacional d'una companyia aèria i desenvolupar una metodologia que permeti resoldre el problema de recuperació d'aeronaus i de passatgers simultàniament en el cas de disruptcions a petita escala.

Assolir aquest objectiu permetrà agilitzar i optimitzar un procés que servirà de gran ajuda al *Duty Manager*, a l'hora de prendre decisions.

### 1.2.2 Objectius parcials

Per tal d'assolir l'objectiu global, es defineixen a continuació un sèrie d'objectius parcials que s'hauran de considerar per tal de poder definir una metodologia eficient per a donar resposta al problema plantejat.

A continuació s'enumeren aquests objectius parcials:

1. Estudiar i definir els processos de gestió de les disruptcions del departament de control operacional: serà necessari, per tal de poder abordar els problemes amb precisió, conèixer exactament en què consisteixen els processos que tenen lloc, quins elements hi intervenen i amb quins altres processos estan relacionats.
2. Seleccionar un problema i identificar i definir el conjunt de restriccions que afecten aquest: per tal d'aconseguir aproximar al màxim el problema plantejat amb el real, obtenint resultats òptims, caldrà conèixer el conjunt de restriccions que afecten a les qüestions plantejades i definir-les correctament.
3. Definir un algorisme capaç de facilitar la decisió a prendre respecte el problema plantejat: serà necessària la definició i programació d'una heurística que, a partir d'una solució factible inicial, sigui capaç d'aplicar diferents canvis per tal de millorar el resultat (minimitzant els costos). A més, es definirà una funció objectiu que permeti avaluar la millora obtinguda després d'aplicar aquesta heurística.

4. Dissenyar i executar una sèrie d'experiments que permetin identificar i quantificar els beneficis de la metodologia proposada i comprovar-ne la utilitat: per tal de quantificar i avaluar correctament els resultats obtinguts, es realitzaran un conjunt d'experiments per tal d'obtenir una sèrie de resultats, els quals seran analitzats per poder extreure les conclusions pertinents.

### 1.3 Metodologia

Amb la finalitat d'assolir els objectius parcials definits anteriorment i així respondre a l'objectiu global plantejat en el projecte, cal definir una metodologia que permeti assolir-los.

Inicialment serà necessari realitzar una recerca bibliogràfica sobre quin és l'actual estat de l'art de sistemes que solucionen el problema de la recuperació d'aeronaus, tripulacions i passatgers quan es produeixen interrupcions de petita escala. Es dedicarà un apartat de la memòria a realitzar una revisió d'aquest estat que serveixi com a base per dur a terme una contribució original en la metodologia de resolució del problema.

Amb la voluntat de poder satisfer el propòsit anterior, bases de dades documentals i revistes electròniques, així com edicions en paper, seran consultades a partir dels recursos que la Universitat posa a disposició dels alumnes –biblioteques, bases de dades, revistes, etc–.

Una vegada consolidada la base teòrica per dur a terme la definició clara i precisa dels problemes a estudiar, es dissenyarà un nou algoritme que millori els anteriors, i així, donar una millor solució que integri els problemes de recuperació dels aeronaus, tripulacions i passatgers en petites interrupcions.

La intenció és que el nou algorisme ofereixi un major nombre de solucions factibles en el mateix període que els altres, i sigui el *Duty Manager* qui esculli la més òptima en funció del problema a tractar.

Es realitzaran durant el treball, un conjunt d'entregues parcials i reunions amb el tutor que permetin discutir i avaluar el progrés del projecte, així com planificar i executar el conjunt d'accions correctives que permetin complir els objectius plantejats en els terminis de temps establerts.

## 1.4 Planificació temporal

Es pretén seguir, en la mesura que sigui possible (ja que poden sortir imprevistos) la planificació establerta seguidament. Aquesta recull les principals tasques del projecte, amb la seva corresponent data d'inici, duració i la data de finalització prevista.

Resulta de gran importància seguir-la, ja que servirà de referència temporal del treball en tot moment i permetrà desenvolupar les diferents tasques de manera ordenada i assolir els objectius plantejats; complint amb els terminis d'entrega del projecte. Cal tenir en compte que tot i que durant el desenvolupament pugin haver desviacions respecte la programació inicial, sempre es tindrà un punt de referència a seguir. A continuació, es presenta la programació temporal d'aquest projecte:

Nom de la tasca	Duració	Inici	Fi
<b>Realització del TFG</b>	<b>136 dies</b>	<b>lun 15/02/16</b>	<b>mié 29/06/16</b>
<b>Realització del Pla de Treball</b>	<b>10 dies</b>	<b>lun 15/02/16</b>	<b>mié 24/02/16</b>
<b>Revisió de l'estat de l'art</b>	<b>30 dies</b>	<b>lun 15/02/16</b>	<b>mar 15/03/16</b>
Recerca d'informació i documentació	20 dies	lun 15/02/16	sáb 05/03/16
Revisió de la literatura	10 dies	sab 05/03/16	mar 15/03/16
<b>Primera versió de la memòria</b>	<b>26 dies</b>	<b>mie 16/03/16</b>	<b>dom 10/04/16</b>
<b>Bases teòriques i definició del problema</b>	<b>26 dies</b>	<b>mie 16/03/16</b>	<b>dom 10/04/16</b>
Gestió de l'operativa diària d'una aerolínia	12 dies	mie 16/03/16	dom 27/03/16
Interrupcions en la operativa diària d'una aerolínia	15 dies	lun 28/03/16	dom 10/04/16
<b>Segona versió de la memòria</b>	<b>70 dies</b>	<b>lun 11/04/16</b>	<b>dom 19/06/16</b>
<b>Formulació del problema</b>	<b>35 dies</b>	<b>lun 11/04/16</b>	<b>dom 15/05/16</b>
Definició de la funció objectiu i restriccions sobre canvis	15 dies	lun 11/04/16	lun 25/04/16
Definició i disseny de l'algorisme, classes, inputs, outputs...	20 dies	mar 26/04/16	dom 15/06/16
<b>Modelització del problema i resultats</b>	<b>35 dies</b>	<b>lun 16/05/16</b>	<b>dom 19/06/16</b>
Programació del model	20 dies	lun 16/05/16	sáb 04/06/16
Verificació i validació del model	5 dies	vie 05/06/16	jue 09/06/16
Avaluació d'escenaris i extracció de resultats	10 dies	vie 10/06/16	dom 19/06/16
<b>Extracció de conclusions i verificació d'objectius</b>	<b>5 dies</b>	<b>lun 20/06/16</b>	<b>vie 24/06/16</b>
<b>Revisió de les memòries i entrega de la memòria final</b>	<b>5 dies</b>	<b>sáb 25/06/16</b>	<b>mié 29/06/16</b>

Fig. 3 Programació temporal del projecte

## 2. Base teòrica: Gestió de les interrupcions

Abans d'entrar en el detall del problema, s'analitzaran les directrius que segueix una companyia quan esdevenen interrupcions operatives en el Departament d'OCC.

### 2.1 Procediments de recuperació

1. Quan s'implementa un pla de recuperació, s'ha d'assegurar que la programació de vols del dia següent no es vegi afectada de manera adversa.

2. Les permutes d'aeronaus no s'activen, normalment, una vegada ha començat la STD (*Schedule Time Departure*), tret d'una situació de *curfew* en l'aeroport o l'existència d'implicacions de manteniment o de les tripulacions.

Els intercanvis dins d'aquest termini requereixen d'una consulta prèvia entre el departament OCC i l'Agent de *Handling* de l'aeroport de sortida, per considerar la logística d'aquest. Tots els canvis d'aeronaus s'han de comunicar als aeroports per telèfon i SITA.

3. La recuperació utilitzant avions de la mateixa companyia, només es realitza en el cas de disposar d'una aeronau de recanvi (*spare*), d'una tripulació disponible, o en el cas d'haver d'utilitzar avions o tripulacions "en actiu", que aquest fet tingui un mínim impacte sobre la resta de vols programats i horaris de les tripulacions –només afectant a un màxim de dos línies de vol.

4. Les tripulacions han d'estar a l'aeronau tan punt sigui possible.

5. S'eviten les estàncies nocturnes no programades de la tripulació, si és possible.

6. En totes les solucions de recuperació, *Network* s'ha d'implicar per considerar la logística de l'entorn aeroportuari, e.g el registre dels horaris d'apertura dels mostradors de facturació, les opcions de benestar dels passatgers, etc.

7. Si la recuperació no es pot realitzar mitjançant l'ús d'avions propis, el vol afectat i/o els altres vols de la línia afectada han de ser cancel·lats amb la condició que la majoria dels passatgers que encara vulguin volar tingui l'opció d'ésser transportats a la seva destinació en el mateix dia.

Les opcions per a la redistribució dels passatgers seguiria aquest ordre de preferència:

- a) Transferir-los a un altre vol de la mateixa companyia en l'aeroport original.
- b) Transferir-los a un altre vol de la mateixa companyia però amb un itinerari re-ruteat.
- c) Transferir-los en un vol d'una altra companyia.
- d) Transportar una aeronau i una tripulació de rescat (últim vol del dia o d'una ruta de baixa freqüència).
- e) *Sub-charter* (amb el mecanisme d'aprovació adequada, consultant al Manager d'OCC o al seu adjunt)

8. El mètode *First In - First Out* en general ha de ser aplicat en els vols que operen la mateixa ruta. Cal assenyalar, que en el cas de tractar-se d'una tripulació decisiva, de manteniment o de limitacions en quant a l'aeroport o als passatgers, no serà possible aplicar aquest procediment.

9. No està acceptat anunciar retards "indefinites" als passatgers. La informació relacionada amb aquests hauria de ser eliminada, fins i tot, en el cas de no haver cap altra informació disponible.

10. Si és possible, s'hauria d'evitar cancel·lar vols una vegada s'ha iniciat el procés de facturació. Aquesta decisió hauria de ser presa i comunicada a l'aeroport i als passatgers afectats com a mínim una hora i mitja abans de la STD.

11. Una vegada s'ha decidit cancel·lar el vol, és a dir, el missatge ha estat notificat als passatgers a través de l'agent de *handling*, el vol no ha de ser reinstal·lat.

12. Tots els passatgers han d'estar ben atesos en relació amb la política de servei al client de la companyia i de la regulació de la UE.

13. Els indicadors de puntualitat són clau per a la presa de decisions, i *Network* els ha de registrar per assegurar que els serveis al client estant essent correctes, i a més, per disposar d'informació pel passatger posterior al vol.



## 2.2 Eines de recuperació

El Departament d'OCC disposa d'una sèrie d'eines per fer front a les interrupcions operatives:

### 2.2.1 Buffers

Una aeronau en terra (AOG) no genera ingressos, fet que requereix disposar de suficients folgances (*buffers*) en l'horari per assolir els objectius de puntualitat i la maximització de la utilització dels avions. Els *buffers*, són per tant, una inversió en l'índex de puntualitat, i és responsabilitat del *Duty Manager* assegurar-se que són utilitzats de manera efectiva.

En el cas d'interrupcions greus s'han de tenir en compte dos punts:

1. La difusió del retard a través de diverses línies de vol maximitza l'ús de folgances curtes.
2. Les folgances més llargues s'han d'utilitzar per evitar un retard de llarga durada en una línia de vol.

### 2.2.2 Difusió del retard

Per exemple, val la pena retardar tres vols durant una hora, enlloc de retardar un pels tres?

La decisió de difondre un retard en altres línies de vol serveix per assolir els objectius de rendiment i reduir la interrupció de la programació. En canvi, un retard de tres hores, pot allargar-se a un límit de quatre hores fàcilment; de manera que és millor difondre el retard si és operativament viable.

Per una altra banda, els grans canvis en les tripulacions i en les aeronaus redueixen retards de dues hores a una hora, però sempre han de ser justificats. Cal destacar, que són les circumstàncies del dia les que indiquen la millor acció a realitzar.

### 2.2.3 FIFO (*First In – First Out*)

L'operació FIFO –és a dir, que siguin els passatgers que estan patint el retard més llarg en un aeroport els que surtin amb el primer avió disponible, independentment de la destinació que tingués programada l'aeronau–, és dels més justos pels passatgers i assegura el màxim ús de l'avió. Les limitacions operatives modifiquen l'ús del FIFO, i com major sigui la interrupció més adequat és modificar la utilització d'aquest mètode.

Les limitacions operatives a considerar són:

- *Curfews* aeroportuaris i altres restriccions aeroportuàries;
- La maximització de l'ús de la tripulació –respectant la seva activitat;
- Qualificacions de les tripulacions;
- Manteniment programat;
- Limitacions de les aeronaus

Els intercanvis d'aeronaus s'han de notificar de forma immediata a tots els interessats, ja que és crucial per l'èxit de la política anterior. *Network* és qui juga un paper fonamental a l'hora de garantir als aeroports i als agents de *handling* que reben informació actualitzada en relació a la situació.

### 2.2.4 Combinació de vols

Hi ha dos tipus de combinacions de vols:

- 1) Combinació perfecta, és a dir, quan tots el passatgers de dos o més vols volen en un mateix vol.
- 2) Combinació escalonada: quan els passatgers de dos o més vols volen en dos o més vols.

Les combinacions perfectes poden implicar dos vols de càrrega lleugera a una mateixa destinació o a diferents però adjacents, –és a dir, l'avió volaria fent un triangle–. Només es poden utilitzar aquestes combinacions en cas d'interrupció greu i no per motius purament comercials (a no ser autoritzat pel Departament Comercial). En qualsevol combinació, els vols de retorn han de ser considerats, ja que també han de ser combinats. A més, esmentar que aquesta opció només serà possible abans de l'apertura dels mostradors de facturació.

En canvi, les combinacions escalonades només s'apliquen en vols que tinguin la mateixa destinació, i com a mínim, han d'haver altres dos vols que volin cap a aquesta destinació dins de la jornada. *Network* pot negar-se a dur a terme la combinació prevista, si un dels aeroports en qüestió no és capaç de gestionar-la.

### 2.2.5 Avions *sub-charter*

El *Duty Manager* té l'autoritat per fer ús dels avions *sub-charter* com a sistema de recuperació de les interrupcions, i així, evitar retards de quatre hores. Tot i així, el *Manager* o Adjunt han d'estar informats abans de l'esdeveniment.

### 2.2.6 Denegació de l'embarcament

La denegació d'embarcament pot ocórrer en dues circumstàncies:

1. Quan l'avió està limitat i no pot operar en plena capacitat.
2. Al final d'una combinació escalonada, on el vol final està sobre-venut.

### 2.2.7 Aïllament del retard

Un retard ben executat, amb les instal·lacions aeroportuàries apropiades i la informació precisa, és preferible a un retard més breu però mal gestionat. Quan un avió està en AOG fora de la seva base principal en relació a la tripulació o al manteniment, i la recuperació es dur a terme a través d'una flota de recanvi o d'un *sub-charter*, la probabilitat que es causi un retard de més de quatre hores continua essent una possibilitat, de manera que s'ha de considerar aïllar el retard. Aquest podria resultar en un retard significatiu afectant a un grup de passatgers, on entren en acció un conjunt de personal (enginyers, mecànics, etc.) i on s'ha de planejar el que pertoca a la tripulació. Una decisió ràpida, afavorint als passatgers i a la tripulació afectats, seria interrompre altres línies de vol per rescatar el vol. La decisió s'ha de basar en l'hora que ocorre la interrupció, la disponibilitat d'avions i de tripulacions per proporcionar un vol de rescat, en els *curfews* aeroportuaris, opcions de disposar de personal i/o *sparcs*, interrupcions per part de les tripulacions i/o els seus dies lliures, etc. El més idoni seria que al final del dia haguessin suficients bases operacionals on els avions poguessin dormir, suficients *stand-by* per poder redistribuir als passatgers a qualsevol aeroport no *curfew*.

Però tot l'anterior són directrius i en tots els casos és necessari mesurar la situació per a una presa de decisions correcta en quant a l'operativa. Ajuda reunir l'equip OCC, i així, utilitzar l'experiència col·lectiva i trobar altres alternatives per sortir del problema.

Finalment, tornar a destacar les possibles limitacions que han de ser revisades pel personal d'OCC:

- Hores del tancament de pista o *curfews*.
- Limitacions per part dels agents de *handling*.
- La disponibilitat de combustible.
- Limitacions del temps d'activitat de les tripulacions
- Limitacions en quant a les qualificacions de les tripulacions, e.g Categoria d'aeroport (CAT III...)
- Meteorologia.
- Assistència als passatgers.
- Si el rendiment de la pista és l'adequat, es disposen de coordinadors en l'aeroport, etc.

Posteriorment, es descriurà com afecten les interrupcions operatives a cada àrea del Departament d'OCC per individual, analitzant a la vegada el problema i el procés de recuperació a seguir. Finalment, s'analitzarà la posició del *Duty Manager*, lloc de treball amb molta responsabilitat, rebent totes les entrades d'informació, per poder prendre decisions.

### 2.3 MOC (*Maintenance on Call*) – *Aircraft recovery*

Primerament per una banda, esmentar que la MEL (*Minimum Equipment List*) és la que determina les condicions i els requisits per permetre o rebutjar el despatx de l'aeronau amb determinats sistemes o equips inoperatius, per tant, restringeix amb limitacions.

Suposant que una aeronau té un problema tècnic que no permet el seu vol, essent un possible AOG (*Aircraft on Ground*): la tripulació avisa al MOC, i aquest a Manteniment, que és qui va a l'avió per analitzar i posteriorment prendre acció.

Una vegada confirmada la discrepància, les dues preguntes a fer-se més importants són: Es disposa de material? En cas afirmatiu, es disposa de personal?

Moltes vegades no és possible que ambdues es compleixin i s'han de buscar alternatives: en el cas de falta de material (pèrdua d'aquest, entre d'altres motius), s'ha sol·licitar a AOG Desk i sinó es disposa, requerir-lo a altres companyies, i esperar el temps necessari fins a disposar-lo. Si es tracta de manca de personal, s'ha de buscar un mantenidor aliè.

Moltes vegades, la tripulació arriba tard a l'avió, i per tant, avisa tard al MOC del problema. En aquest cas, l'operativa ja es retarda més del que estava previst. Altres, la tripulació apunta la discrepància en l'avió però no avisa, i quan la següent arriba, veu l'anotació i quan avisa ha passat temps que podia haver estat estalviat.

Per últim, deixar constància de les revisions que han de passar les aeronaus (*daily, weekly...*), que en el cas de no haver estat executades en el seu moment hi ha un marge de 48 hores per poder-les realitzar, i passades aquestes 48 hores l'avió no pot ser despatxat.

## 2.4 Crew control – Crew recovery

La falta de disponibilitat de tripulacions esdevé quan ocorren esdeveniments imprevistos: infermetats, vagues i altres. En el cas que una ruta quedés descoberta –*sick*, excés d'activitat, no sigui complert l'espai de descans necessari–, la solució a prendre és treure imaginària. Si es tracta d'una tripulació justa d'activitat, prevenint aquest excés, si la tripulació té quatre salts assignats, podrien ser trets els dos últims.

Continuant amb l'anterior exemple, si els últims salts es treuen perquè la tripulació no excedeixi d'activitat, però resulta que el comandant està d'instrucció, les hores perdudes de *training* han de ser re-programades.

En el cas de manca de formació, la informació ha de ser contrastada amb el Departament de *Training* per comprovar si algun curs s'ha caducat, entre d'altres, i si existeix el problema després de verificar, si és possible, es duen a terme canvis entre ells mateixos.

Per exemple, degut a una meteorologia adversa, es requereix el *Low Visibility*, en el cas que un integrant d'una tripulació manqui d'aquest, s'haurà de buscar a un o a una de la mateixa categoria, que operi un vol a la mateixa hora a una destinació sense problemes de temps, i així poder fer l'intercanvi.

En el cas que la tripulació quedi fora de la seva base –motius tècnics, operacionals (causes internes); meteorologia adversa, altres problemes de caràcter extern–, aquesta ha de ser posicionada a la seva base.

Per exemple, té lloc una cancel·lació –solució presa pel *Duty Manager*– i en el vol que es cancel·la ve posicionada una tripulació, responnent a l'anterior esdeveniment, s'intenta posicionar aquesta mateixa en el següent vol.

## 2.5 Network – Passenger recovery

En el cas d'interrupcions de tipus intern –motius tècnics, de tripulacions, operacionals– i es pren com a solució el retard, es tractaria de retards imputables a la companyia:

- Si els retards són superiors a dues hores: s'autoritzen bons de menjar i/o canvis gratuïts en un període màxim de set dies.
- Si el retard és superior a cinc hores: s'autoritzen bons de menjar, canvis gratuïts i/o reemborsament –sempre que el passatger ho requereixi.

En canvi, en el cas d'interrupcions de tipus extern –meteorologia adversa, problemes d'aeroport, d'ATC–, i la solució a prendre és la del retard, serien retards no imputables a la companyia, i per tant:

- Retards superiors a dues hores: s'ofereixen canvis gratuïts i no existeix l'obligació de prestar un servei.
- Retards superiors a cinc hores: s'ofereixen canvis gratuïts i/o el reemborsament (sempre que el passatger ho requereixi).

Com a excepció, en el cas de vagues, es sol autoritzar canvi de destinació si el passatger ho requereix.

Quan la solució a prendre és un desviament, s'ha de garantir al passatger que arribarà a la seva destinació, ja sigui amb transport terrestre o amb un vol posicional, i en el cas de passatgers amb necessitats especials (cadires de rodes o UM), s'autoritzaria taxi si es pogués.

Els passatgers que es troben en la destinació per fer el vol de retorn, se'ls hi ofereixen canvis gratuïts.

Finalment si la millor solució a prendre és la cancel·lació, també es classificaria per ésser imputable o no a la companyia.

En el cas que sí: primerament s'ofereixen als passatger, si és possible, següents vols que siguin de la companyia; si no es pot, s'ofereixen vols amb altres companyies (acords FIM); i com a última opció si tampoc és possible l'anterior, es compra un bitllet amb una altra companyia.

En el cas que el passatger hagués de pernoctar, s'autoritza hotel. S'ha de tenir en compte, que sempre són possibles canvis gratuïts o el reemborsament.

Si la cancel·lació té lloc per una causa no imputable a la companyia, només s'ofereixen els canvis gratuïts o el reemborsament, però en molts casos, es pot arribar a autoritzar hotel.

### Exemples

BUENOS DÍAS,

XX INFORMA DE **RETRASO** EN EL XX1515/DTE BCNCE POR **METEOROLOGÍA ADVERSA** EN DESTINO.

XX AUTORIZA A LOS 75 PAX APROX:

- CAMBIOS GRATUITOS EN LOS PRÓXIMOS 7 DÍAS.

---

GOOD EVENING,

XX INFORMS THAT FLIGHT XX7481/DTE ORNBCN IS **CANCELLED DUE TO TECHNICAL REASONS**.

XX AUTHORIZES:

- FREE CHANGES WITHIN NEXT 7 DAYS.

- REFUND IF PASSENGERS ASK FOR IT.

- HOTAC FOR AFFECTED PASSENGERS

ALTERNATIVES TO BE OFFERED TO THE 107 PAX BOARDED:

- MOVE 57PAX TO VY7481/18DEC ORNBCN 1320/1445

- MOVE 50PAX TO XX7393/18DEC ORNBCN 1005/1100 + MEAL IN ALC + XX1309/18DEC ALCBCN 1705/1815

IF THERE IS NO TICKET OFFICE IN ORN, PLEASE CHANGE PASSENGERS ON CHECK IN SYSTEM AND SEND THEM TO HOTEL ASAP. ONCE THE CHANGES ARE DONE, PLEASE CONTACT SALES SUPPORT ON NUMBER XXXXXXXXXXXXX TO CHANGE RESERVATIONS (THEY ARE ALREADY INFORMED).

PLEASE INFORM ABOUT NUMBER OF HOTEL ROOMS NEEDED WHEN POSSIBLE.

---



BUENOS DÍAS,

XX INFORMA QUE EL 3512 BCNIBZ STD 0930/1020LT (79PAX) **SE DESVÍA A BCN DEBIDO A MALA METEOROLOGÍA EN IBZ.**

EL PASAJE SE DESEMBARCARÁ EN BCN Y SERÁ ACOPLADO EN XX350D STD 1200LT.

XX AUTORIZA:

- CAMBIOS GRATUITOS EN LOS PRÓXIMOS DÍAS

- REEMBOLSO DEL BILLETE SI PAP LO SOLICITA

**\*\*FVR ENVIEN FDR CUANDO SEA POSIBLE\*\***

## 2.6 Duty Manager

Qui finalment pren la decisió és el *Duty Manager*, havent d'escollir entre les diferents alternatives o solucions:

- Retardar el vol o els vols
- Desviar el vol o els vols
- Re-programar el vol o els vols
- Re-rutear –desviament programat– el vol o els vols

El *Duty* és la persona que rep tots els *inputs*, els quals són classificats entre interns o externs.

En quant als interns, poden estar relacionats amb les tripulacions, o bé, amb les aeronaus.

Quan la interrupció és a causa de les tripulacions, una de les solucions a prendre són els canvis en execució, els quals poden ser forçosos –canvis que impliquen que la tripulació arribi a partir de dues hores més tard del que estava programat–, o no forçosos. Altra opció és retardar les firmes, és a dir, que comenci més tard. I per últim, una altra solució és treure imaginària.

En relació als avions, poden estar o no fora de servei, o estar en servei però amb limitacions operatives que poden restringir la destinació.

### **Limitacions** (a causa d'un problema tècnic)

- Nivell de vol limitat
- Només es pot operar de dia
- L'aeronau només pot operar en condicions meteorològiques no adverses
- L'avió pot consumir més combustible a causa de la limitació
- S'ha de limitar la categoria d'operació pel que fa a la meteorologia

Per altra banda, com s'ha esmentat prèviament, també intervenen factors externs:

- Meteorologia
- Vagues
- Incidents en aeroports
- Horaris aeroportuaris
- Permisos de sobrevolar
- Permisos aeroportuaris –si et concedeixen el *slot* o no.

## Exemples

### Factor intern:

La STD (*Schedule Time Departure*) d'un vol és a les 17:00 hores UTC, i en el moment que ha de firmar la tripulació –45 minuts abans, 16:15 hores–, un tripulant es dona de baixa. La solució a prendre, en relació a les tripulacions (*Crew Control*), és **treure imaginària**, que disposa d'una hora i quart per presentar-se a l'aeroport, des de que se'l avisa.

L'opció que agafa el *Duty Manager* és **retardar el vol**.

---

### Factor extern:

Un vol BCN-BLQ es desvia a PSA quan li faltava una hora per arribar a BLQ, degut a què en l'aeroport de BLQ s'havien causat danys en pista i l'aeroport passava a estar tancat – **desviament per una interrupció de tipus extern**.

Es podria haver desviat a FLR, aeroport més proper, però l'aeronau que estava volant era un A320, i en FLR només poden entrar avions més petits, com seria un A319.

En relació als passatgers (*Network*), s'autoritza transport terrestre, tant per l'anada com pel retorn, ja que el retorn també s'opera des de Pisa.

El *Duty* també podria haver pres la decisió d'operar un vol PSA-BLQ però el problema era que no hi havia informació de quan tornaria a ser obert l'aeroport de BLQ, i a més, la tripulació tenia un límit d'activitat.

### 3. Revisió de la literatura científica

#### 3.1 Evolució històrica del problema

Per realitzar l'estudi que es proposa en aquest treball, i assolir els objectius que són plantejats, és necessari disposar d'una visió cronològica de quin és l'origen del problema, quines aportacions s'han dut a terme, i quin és l'estat actual de la qüestió.

Són molts els autors –tot i referint-se amb altres denominacions– que han donat peu a la discussió del problema de recuperació d'una aerolínia (ARP) causat per interrupcions operatives de petita escala, gràcies al fet d'haver establert unes bases necessàries i haver obert camins d'investigació.

Per millorar la comprensió de la gran complexitat del problema, primerament és necessari entendre com les companyies aèries plantegen el seu problema de programar els vols, resolt en un ordre seqüencial (normalment) i dividit en cinc fases:

- 1) Les aerolínies escullen les ciutats per recuperar la seva programació de vols.
- 2) Es determina quines d'aeronaus són les assignades a cada pla de vol.
- 3) Per cada aeronau, s'han de crear les rotacions que connecten els diferents trams de vol, respectant sempre les restriccions de manteniment (posteriorment esmentades i explicades).
- 4) S'ha d'assignar una tripulació a cada aeronau i a cada rotació, respectant sempre les restriccions legals dels treballadors.
- 5) Es formen els diferents horaris mensuals de tots el membres de la tripulació.

Les interrupcions operatives són presents des de l'existència del món de l'aviació, esdevenint en alteracions de la programació inicial i repercutint directament en els costos, i per tant, en els beneficis de les companyies aèries.

S'han proposat diversos enfocaments per tractar el problema de la recuperació d'aeronaus per separat: *Argüello et al. (1997)*; *Cao and Kanafani (1997 a, b)*; *Jarrah et al. (1993)*; *Rakshit et al. (1996)*; *Rosenberger et al. (2003)*; *Teodorović and Guberinić, (1984)*; *Thengvall et al. (2003)*. O també el de la recuperació de la tripulació: *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)*.

Els algorismes pel problema de la recuperació d'aeronaus solen basar-se en models de flux de xarxa que es resolen amb mètodes *Branch and Bound* o amb mètodes basats en descomposicions. *Cao and Kanafani (1997 a, b)* aborden el problema com un programa de segon grau resolent-lo heurísticament mitjançant linealitzacions, mentre que *Rosenberger et al. (2003)* aborda el problema com un problema conjunt de particions. *Argüello et al. (1997)* desenvolupen un procediment aleatoritzat adaptatiu de recerca (GRASP) pel problema.

El problema de recuperació de la tripulació, generalment és modelat com un problema conjunt de particions, tal i com el resol *Rosenberger et al. (2003)* a través de tècniques de *Branch and Bound* i tècniques de *Branch and Price*.

El problema de recuperació de passatgers és resolt sempre a través de tècniques de fluxos de xarxa per *Bratu and Barnhart (2006)* i de tècniques de programació sencera no lineal per mitjançant de *Zhang and Hansen (2008)*.

Per altra banda, hi ha autors que resolen els problemes d'aeronaus i de tripulació simultàniament: *Abdelghany et al. (2008)*; *Luo and Yu (1997)*; *Stojković et al. (2002)*. Els models i les tècniques utilitzats per resoldre aquest tipus de problema són programes lineals a gran escala mixtos, o bé, purs sencers.

Finalitzar amb *Petersen, Solveling, Johnson, Clarke, and Shebalov (2010)*, que se centren en resoldre conjuntament els tres problemes –aeronaus, tripulacions i passatgers–, essent de gran complexitat, i requerint una solució actualment.

### 3.2 Bisailon, Cordeau, Laporte i Pasin, 2010

Tal i com es realitza en aquest projecte, també *Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010* introdueixen el problema amb una revisió històrica de literatura per analitzar quin és el context actual del problema. El projecte s'inicia gràcies al *ROADEF Challenge*, el qual proposa solucionar el problema de la gestió de les interrupcions en l'aviació comercial, l'any 2009, aconseguint l'algoritme la segona posició en el rànquing.

L'heurística proposada i utilitzada per la resolució del problema (*aircraft recovery* i *passenger recovery* simultàniament), és la de LNS (*Large Neighbourhood Search*) –una heurística de recerca que és introduïda en el context del problema de l'encaminament de vehicles, on la idea bàsica, és millorar la solució inicial realitzant repetidament parts de “destrucció” i parts de “reparació” d'aquesta.

Aquesta metodologia es desenvolupa en tres fases: fase de construcció, fase de reparació i fase de millora. Les dues primeres produeixen una solució inicial, respectant unes restriccions (descrites posteriorment). En canvi, en la tercera fase s'intenta millorar la solució considerant grans canvis en la planificació, creant així, una solució més factible.

La visió general d'aquest mètode es presenta en la figura següent, on pot ser observada la repetició de les dues primeres fases fins trobar una solució millorada, que posteriorment, esdevé el punt de partida de la següent i última fase.

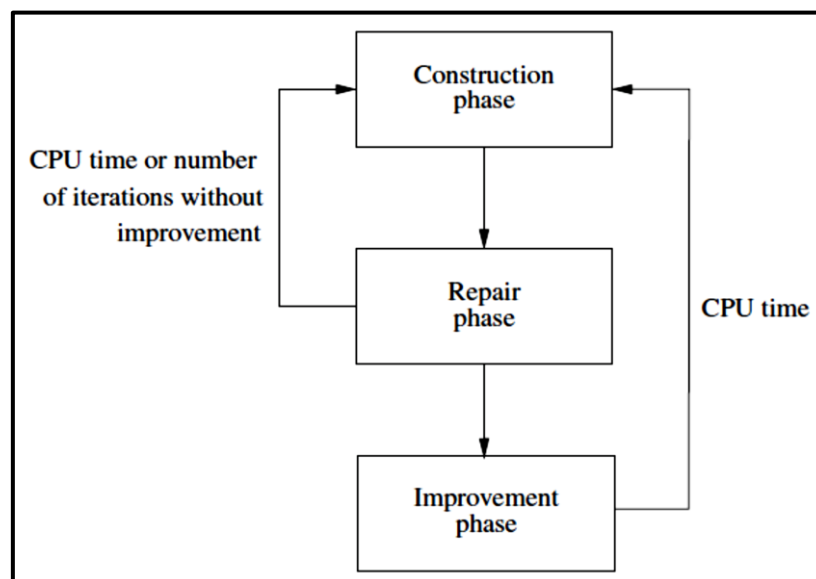


Fig. 4 Diagrama de blocs de l'algoritme de (*Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010*)

## 4. Descripció del problema

Per poder analitzar més el problema que es pretén solucionar amb aquest projecte, es considera idoni a l'hora de definir-lo, basar-se en el que és proposat per ROADEFF Challenge l'any 2009 –gestió de les interrupcions en l'aviació comercial.

En primer lloc, s'introdueixen els conceptes bàsics utilitzats per definir el problema de re-assignar aeronaus i passatgers simultàniament en el cas de interrupcions a petita escala. A continuació, s'especifiquen les decisions a prendre, juntament amb la funció objectiu i les restriccions a satisfer a l'hora de prendre aquestes decisions.

### 4.1 Conceptes bàsics

#### 4.1.1 Programació de vols

Una **programació de vols** conté un conjunt de vols operats per una companyia donat un període de temps.

Cada vol és definit per:

- Un número de vol;
- Un aeroport d'origen i un aeroport de destinació, així com la definició de la duració del vol, com el seu tipus (domèstic, continental, o intercontinental);
- La data i l'hora de sortida, i la d'arribada.

La seqüència de vols assignats a una aeronau s'anomena **rotació**. Aquesta satisfà la **continuitat** de les operacions: l'aeroport d'origen d'un vol és el mateix que l'aeroport de destinació del vol anterior; a més, la seva hora de sortida és més tard que la d'arribada del vol previ, essent aquest el temps d'escala de l'avió –el temps mínim per preparar l'aeronau pel següent vol: desembarcament/embarcament de passatgers, neteja de la cabina, etc.

#### 4.1.2 Elements clau en el problema

##### 4.1.2.1 Aeroports

La xarxa de l'aerolínia és el conjunt de *legs* –vols que van des de l'aeroport d'origen fins a l'aeroport de destinació sense parada– oferts per la companyia.

Els aeroports es caracteritzen per les restriccions, de les quals es tindrà en compte el màxim nombre de sortides i d'arribades en l'aeroport. Per a cada aeroport, es donen les capacitats de sortides i d'arribades en períodes d'una hora.

### 4.1.2.2 Flota

La flota està composta per un conjunt d'aeronaus d'una companyia aèria. Cada avió és definit:

- Un únic **número d'identificació**;
- Un **model** –A319, A320, A321–;
- Una **classe** de cabina –primera, *business*, econòmica.

Una aeronau pot no estar disponible durant un període de temps a causa de manteniment. Les accions de manteniment requereixen una gran quantitat de recursos (personal i materials).

### 4.1.2.3 Tripulacions

El personal de tripulació es divideix en dos categories: tripulació de cabina de pilot –pilot i copilot– i tripulació de cabina. La grandària de la tripulació depèn del model i configuració de l'aeronau.

Tot i ser un element imprescindible, el problema de recuperació de les tripulacions no es tindrà en compte en el projecte.

### 4.1.2.4 Passatgers

Els passatgers són els que duen a terme la realització de la reserva de vols oferts per la companyia aèria. La reserva es defineix com:

- Un únic **número de reserva**;
- El **nombre de passatgers** per cada reserva;
- Una **mitjana de preu** per cada passatger;
- La descripció de l'itinerari, compostat per una o diverses *flight legs*, amb una classe de cabina especificada per cada *leg*.



### 4.1.2.5 Disrupcions

Hi ha tres tipus d'interrupcions que poden pertorbar la programació planificada. En una *flight disruption*, el vol és retardat o cancel·lat. En una *aircraft disruption*, una aeronau no està disponible durant un període de temps. I per últim en una *airport disruption*, les capacitats de sortides i d'arribades d'un aeroport estan temporalment reduïdes.

## 4.2 Presa de decisions

L'objectiu és desenvolupar una metodologia que permeti reprendre l'operativa normal tan aviat com sigui possible, en el cas d'interrupcions en la programació de vols planificada.

El **període de recuperació** determina tant la programació de vols com la rotació per cada aeronau, tenint en compte que poden tenir lloc el següents casos:

- Els retards, causats per un embarcament lent, una vaga del personal de *handling*, una escala més llarga del que és normal, o espera per connexió de tripulació o passatgers.
- Cancel·lacions de vols.
- Aeronau no disponible durant un període de temps.
- Nombre limitat d'operacions durant un període de temps, a causa de condicions adverses en la meteorologia –reduint les capacitats de sortides i arribades en l'aeroport–, o a causa d'una vaga.

La programació actualitzada de vols és el resultat de les decisions en relació als vols que ho havia previstos per la programació original: retards i cancel·lacions intencionals, canvis d'aeronaus, i possible creació de vols addicionals.

Les decisions a prendre, a més, impliquen re-assignar els passatgers en un nou itinerari o cancel·lar el seu viatge. Així doncs, en aquestes modificacions s'ha d'avaluar tant en termes de costos de retards o de cancel·lacions, com en termes de confort –problema d'optimització bo-objectiu (equilibri entre els costos i el nivell de servei).

### 4.3 Funció objectiu

L'objectiu és minimitzar la suma ponderada dels següents paràmetres –relacionats amb els costos addicionals degut a la modificació de la programació de vols planificada– els quals estan inclosos en la **funció objectiu**: els costos operatius dels vols afegits, la deducció dels costos operatius dels vols cancel·lats, els costos dels vols inclosos en la programació original a causa de retards i/o cancel·lacions, així com els costos d'insatisfacció per part dels passatgers.

#### 4.3.1 Costos operatius

Els costos d'explotació inclouen tots els costos relacionats amb l'operació d'un vol:

- Costos operatius de l'aeronau –combustible, manteniment, tripulació– els quals depenen del model d'avió i del temps de vol (temps de porta a porta), i estan expressats per hora de temps de vol.
- Costos dels serveis (serveis de terra, els costos associats a l'ús de pistes d'aterratge, pàrquings, portes).

#### 4.3.2 Costos d'insatisfacció dels passatgers

Són el costos que valoren la insatisfacció del passatger provocada per la presa d'alguna de les decisions per minimitzar la duració i l'impacte de la/es interrupcions, comentades anteriorment, independentment de les compensacions que se li puguin abonar. El cost inclourà una penalització en el cas que el passatger hagi de viatjar en una classe de cabina inferior a la que tenia reservada.

#### 4.3.3 Costos de retorn a la normalitat

El més ideal per una companyia aèria és que els seus avions finalitzin la seva jornada en l'aeroport assignat en la planificació inicial. En el cas que no ocorri aquest fet, es penalitza en costos a la companyia.

## 4.4 Restriccions

Per realitzar correctament el problema s'han de satisfer dos conjunts de restriccions per poder arribar a trobar una solució.

### 4.4.1 Restriccions operatives –assignació d'aeronaus i rutes

- Si l'aeronau assignada a un vol és canviada, la nova ha de pertànyer a la mateixa família que la que estava assignada originalment.
- Per cada vol, el nombre de passatgers que viatgen en cabina no pot excedir el nombre de places d'aquesta. L'aforament ve determinat per la configuració de l'aeronau assignada al vol.
- La restricció de manteniment fa que una aeronau hagi d'assolir la seva estació de manteniment abans d'assolir el nombre màxim d'hores abans d'un manteniment. L'aeronau no està disponible durant aquest període.
- Les limitacions de capacitat dels aeroports han de ser complertes.
- S'han de complir els temps mínims de connexió perquè els passatgers tinguin temps suficient per poder dur a terme la connexió –30 minuts com a mínim, en el cas de tenir lloc dos vols consecutius en l'itinerari d'un passatger.
- En dos vols consecutius d'una rotació s'ha complir el temps mínim d'escala (*turn-around time*) en relació al model d'aeronau que opera el vols i l'aeroport on té lloc l'escala.

### 4.4.2 Limitacions funcionals –assignació de passatgers i modificació dels seus itineraris

- L'itinerari modificat ha de tenir la mateixa destinació que l'itinerari original.
- L'itinerari modificat no hauria de començar abans de l'hora del primer vol de l'itinerari original.
- El màxim retard total en la destinació en arribar a la destinació no pot excedir de les 18 hores pels vols nacionals i continental, i de 36 hores pels vols intercontinentals. La longitud del període de recuperació pot ser diferent pels diferents casos, podent ser d'un o diversos dies.

## 4.5 Mètode de resolució

Donada una programació inicial, una llista de disruptcions, un període de recuperació, el problema consisteix en construir rutes d'avions i itineraris de passatgers perquè el període de recuperació permeti la represa de les operacions normals el més ràpid possible, a la vegada que es minimitzen els costos operacionals i els impactes sobre els passatgers, descrits anteriorment.

Amb aquesta finalitat, els vols poden ser cancel·lats o retardats de forma intencionada, es poden afegir nous vols a la programació i l'assignació d'aeronaus a vols pot ser canviada; tenint en compte un gran nombre de restriccions a l'hora de re-programar vols i re-rutejar aeronaus. Aquestes inclouen la capacitat de seients, els requeriments de manteniment, les capacitats d'aeroports, els mínims temps d'escala, etc. A més, les limitacions funcionals restringeixen com han de ser acomodats en un vol nou o existent, els passatgers afectats pels canvis en la programació.

La metodologia a seguir per resoldre el problema, es basa en l'heurística LNS (*Large Neighbourhood Search*), introduïda en l'article de *Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010*.

Tot i l'adopció d'aquesta alternativa de resolució, el problema en el projecte no consistirà en un exercici d'optimització exacta, sinó en trobar una solució factible propera a la solució òptima, on el cost d'implementació de l'algoritme sigui menor.

En aquest treball es dur a terme una fase de construcció amb l'objectiu de proporcionar una solució suficientment bona, que respecti les restriccions tant operatives com funcionals, especificades en l'apartat anterior.

Per millorar la comprensió del problema, cal profunditzar en l'article previ –*Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010*–, el més complet a l'hora d'aportar contribucions en la forma de resoldre l'assumpte.

### 4.5.1 Fase de construcció

Amb la finalitat de tractar el problema en un ordre diferent cada vegada que s'apliqui la fase de construcció, el primer pas a seguir és ordenar a l'atzar les aeronaus. A continuació, s'apliquen totes interrupcions conegudes, s'intenta construir una rotació factible per aquells vols que pateixen perturbacions, i es comprova que aquesta sigui factible. En el cas que no continuï essent-ho, s'agafen els vols que no poden dur-se a terme en el seu horari previst i es retarden 60 minuts fins que les limitacions de capacitat dels aeroports són satisfetes correctament.

Si la rotació resultant és factible, es manté sense canvis. En cas contrari, s'identifica quin és el vol que produeix una inviabilitat i es declara crític. Allò pot esdevenir degut a una falta de capacitat en l'aeroport, o bé, perquè l'avió no pot satisfer la restricció de manteniment, o perquè un vol de la rotació s'ha cancel·lat i aquesta no es pot realitzar.

Si és aquest últim cas, s'intenta crear un vol per comprovar si el resultat seria factible. En cas negatiu, si eliminar un bucle de la rotació –l'aeroport d'origen del primer vol correspon amb la destinació de l'últim vol–, si no, es cancel·len tots els vols fins a arribar a aquell que no realitzi la inviabilitat de la rotació.

El tercer pas de la fase, és veure aquells vols que no compleixen amb la restricció de manteniment, és a dir, que l'aeronau no finalitza en l'estació on ha de realitzar el manteniment. Per allò, resulta factible eliminar un bucle de la rotació. En cas contrari, es cancel·len tots els vols fins a arribar a aquell que té la inviabilitat.

Finalment, es miren aquells vols que no compleixen amb les restriccions de capacitat dels aeroports, i primerament s'intenta arreglar tal i com es defineix en el primer pas –retardant els vols 60 minuts fins que sigui factible. En el cas que no funcioni, s'elimina un bucle, i si tampoc és factible allò, es cancel·len tots els vols fins arribar a aquell que produeix la inviabilitat.

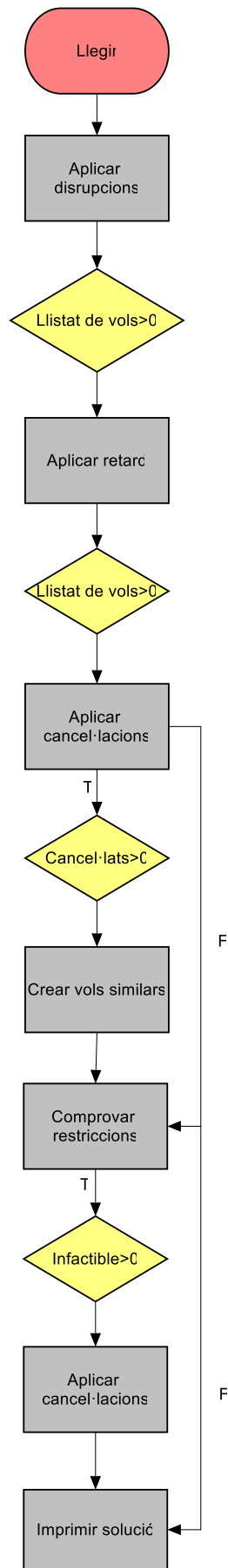
El pseudocodi d'aquesta fase de construcció es pot observar en l'article de *Bisailon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010*.

## 5. Implementació i explicació de l'algorisme

Una vegada presentada i explicada la proposta per a aquest projecte, relacionada amb la resolució del problema descrit anteriorment i amb els diferents elements que intervenen en ell, en aquesta secció, s'explica de forma detallada en què consisteix l'algorisme i com s'ha constituït. Per dur-ho a terme, es presenten el diagrama de flux, el pseudocodi i part del codi de l'algorisme amb les seves explicacions corresponents per facilitar la seva comprensió.

### 5.1 Diagrama de flux

En aquest apartat s'explicarà el fil principal del programa: indicant les parts del mateix algorisme i les parts necessàries per poder executar-lo.





## 5.2 Inputs

Per poder realitzar la metodologia proposada, s'han agafat les dades del programa ROADEF Challenge. Aquesta associació de recerca operativa i de suport a les decisions francesa organitza un repte dedicat a les aplicacions industrials cada dos anys en col·laboració amb un soci industrial. El de l'any 2009 va ser un repte proposat per Amadeus i s'ocupava de la gestió de les interrupcions en l'aviació comercial.

ROADEF proporciona uns arxius .csv on es poden trobar totes les dades necessàries per implementar l'algorisme, els quals es descriuen a continuació amb les dades necessàries i s'aporten exemples per a una major claredat i detall del problema:

**1. Arxiu Configuration:** Aquest arxiu proporciona els següents paràmetres per a la implementació de l'algorisme:

- Període de recuperació: data i hora d'inici, data i hora de finalització.
- Cost per minut associat al retard depenent del tipus de cabina del passatger i depenent del tipus d'itinerari del vol.
- Costos associats a la cancel·lació d'un vol per a passatgers que no estiguin en trànsit. És a dir, que sigui el seu únic vol depenent del tipus de cabina del passatger i depenent del tipus d'itinerari de vol.
- Costos associats a la cancel·lació d'un vol per a passatgers en trànsit. És a dir, que tinguin connexió depenent del tipus de cabina del passatger i depenent del tipus d'itinerari de vol.
- Costos associats a la degradació de cabina de classe depenent del tipus de cabina del passatger i depenent del tipus d'itinerari del vol.
- Costos de penalització associat a la violació de la restricció sobre la ubicació d'una aeronau al final del període de recuperació.
- Pes dels diferents costos de la funció objectiu.

Tots els costos esmentats en aquest arxiu són costos unitaris (per passatger o per avió).

Per aclarir el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Data Inici	Hora Inici	Data Fi	Hora Fi
01/03/2008	16:00	03/03/2008	4:00
<b>Llistat de Cost/min</b>			
Tipus de Cabina	Tipus d'Itinerari	Cost	
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	
<b>Llistat de Cost Cancel·lació Sense Connexió</b>			
Tipus de Cabina	Tipus d'Itinerari	Cost	
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	
<b>Llistat de Cost Cancel·lació Sense Connexió</b>			
Tipus de Cabina	Tipus d'Itinerari	Cost	
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	
<b>Llistat de Cost de Degradació de Cabina</b>			
Tipus de Cabina	Tipus de Cabina	Tipus d'Itinerari	Cost
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
<b>Penalitzacions</b>			
P1	P2	P3	
20000	5000	1000	
<b>Pes dels costos</b>			
A	B	Γ	
1	1	1	

Taula 1 Fitxer Configuration

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

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

**2. Arxiu Airport:** Aquest arxiu proporciona les capacitats dels aeroports, tant de sortides com d'arribades, corresponent a un nombre màxim d'operacions permeses per intervals d'una hora. Aquests límits depenen de l'hora del dia –hores pico, hores normals, hores de la nit.

S'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Aeroport	Llistat de capacitats per intervals			
	Sortides	Arribades	Hora Inici	Hora Fi
LCY	0	0	00:00	07:00
	0	2	07:00	08:00
	2	2	08:00	09:00
	2	1	09:00	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	00:00

Taula 2 Fitxer Airport

Aquesta taula descriu el moviment que hi ha en un dia normal en l'aeroport de LCY:

- Entre les 00:00 fins les 07:00 no hi ha ni arribades ni sortides.
- A partir de les 07:00 fins les 08:00 no hi ha sortides, però sí que hi ha dos arribades.
- I així per franges horàries (en UTC) fins les 20:00 on ja no tornen a haver ni arribades ni sortides.

**3. Arxiu Distance:** Aquest arxiu proporciona els temps de vols que hi ha entre cada parell d'aeroports, així com el tipus de vol.

Per aclarir el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Aeroport Origen	Aeroport Destinació	Distància	Tipus d'Itinerari
MAD	AMS	140	C
AMS	MAD	140	C
CDG	NCE	95	D
NCE	CDG	95	D
BCN	IST	197	I
IST	BCN	197	I

Taula 3 Fitxer *Distance*

En l'exemple es poden observar els temps de vol entre els aeroports de Madrid-Adolfo Suárez i Amsterdam-Schiphol (140 min. en ambdues direccions) i especifica que el vol és continental, també entre els aeroports de París-Charles de Gaulle i Nice (95 min. en ambdues direccions) i especifica que el vol domèstic, i per últim entre els aeroports de Barcelona-El Prat i Estambul-Atatürk (197 min. en ambdues direccions) i especifica que el vol és intercontinental.

**4. Arxiu *Flight*:** Aquest arxiu proporciona informació sobre els vols operats per l'aerolínia durant el període de recuperació. Per a cada vol es proporciona la següent informació:

- Nombre d'identificació. Aquest nombre és únic per a cada vol.
- Aeroport d'origen i aeroport de destinació.
- Horari de sortida i horari d'arribada.
- Nombre d'identificació del vol del salt anterior. En el cas que no hi hagi connexions amb aquest vol, la informació rebuda serà un 0.

Per aclarir el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Nº de Vol	Aeroport d'Origen	Aeroport de Destinació	Hora de Sortida	Hora d'Arribada	Nº de Vol 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

Taula 4 Fitxer *Flight*

En l'exemple anterior, es pot observar com el vol amb número 1, surt des de l'aeroport París-Charles de Gaulle a les 00:00 UTC i arriba a París-Orly a les 00:30 UTC. En un altre cas, no hi ha connexions anteriors a aquest vol.

5. **Arxiu Aircraft:** Aquest arxiu proporciona les característiques de les aeronaus. Per a cada aeronau es proporciona la següent informació:

- Identificador de l'aeronau.
- Model, família i configuració de l'aeronau.
- Hores de vol de l'aeronau.
- Cost de l'operació per hora.
- Temps de *turn-around* i temps de trànsit.
- Aeroport d'origen, és a dir, aeroport on es troba l'aeronau a l'inici del període de recuperació.
- Manteniment, en el cas que l'aeronau tingui.

Per clarificar el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Aeronau	Model	Família	Configuració	Hores de vol	Cost de l'operació
A319#5	A319	<i>AirbusSmall</i>	0/12/124	510	1850
A320#7	A320	<i>AirbusSmall</i>	0/0/172	420	2000
A330#15	A330	<i>AirbusBig</i>	0/40/179	1100	5800
A318#35	A318	<i>AirbusSmall</i>	0/10/108	450	1800

Temps <i>turn-around</i>	Temps de trànsit	Aeroport d'origen	Manteniment
35	35	AMS	NULL
40	40	BCN	NULL
60	90	BEY	NULL
30	30	CDG	NULL

Taula 5 Fitxer *Aircraft*

En la taula es descriu, per exemple, que l'aeronau A319#5 pertany al model dels A319, a la família dels *AirbusSmall* i amb una configuració de 0 seients en primera classe, 12 seients en classe *Business* i 124 en classe econòmica. A més, aquesta aeronau pot realitzar 510 hores de vol, amb un cost d'operació de 1850 euros, un temps d'escala i de trànsit de 35 minuts, i on el seu aeroport d'origen és Amsterdam-Schiphol a l'inici del temps de recuperació. En la columna de manteniment hi ha NULL, significat que aquest avió no necessita manteniment.

6. **Arxiu Rotation:** Aquest arxiu descriu les rotacions per a totes les aeronaus al llarg del període de recuperació. Es proporciona la informació següent:

- Nombre de vol.
- Data de sortida.
- Aeronau que opera el vol.

Per clarificar el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Nº de vol	Data de sortida	Aeronau
4081	01/03/2008	A320#1
4080	01/03/2008	A320#1
4085	01/03/2008	A320#1
5812	01/03/2008	A320#1

Taula 6 Fitxer *Rotation*

En aquest exemple, s'observa com el nombre de vol 4081, 4080, 4085 i 5812 estan operats per l'aeronau A320#1.

**7. Arxiu *Itinerary*:** Aquest arxiu proporciona informació sobre els itineraris dels passatgers. Per a cada itinerari s'inclouen les següents dades:

- Nombre d'identificació (únic).
- Naturalesa de l'itinerari, és a dir, si és entrant o sortint.
- Preu unitari en euros.
- Nombre de passatgers amb reserva en aquest itinerari. Un llistat dels vols d'aquest itinerari, amb el nombre de vol, la data de sortida i el tipus de cabina que utilitza cada passatger.

Per clarificar el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Nº d'Identificació	Naturalesa de l'itinerari	Preu unitari	Nº de passatgers	Vols en connexió		
				Nº de vol	Data de sortida	Tipus de Cabina
0	A	2525,3	1	145	01/03/2008	B
				586	01/03/2008	E

Taula 7 Fitxer *Itinerary*

En aquest quadre es descriu com l'itinerari 0, que té una naturalesa de Sortida, amb un preu unitari de 2525,3 euros i on el passatger 1 fa una connexió des del vol 145 el dia 01/03/2008 en classe *Business* fins el vol 586 el dia 01/03/2008 en classe econòmica.

**8. Arxiu *Aircraft positioning*:** Aquest arxiu proporciona el nombre d'aeronaus de cada tipus requerida en qualsevol aeroport al final del període de recuperació.

Per clarificar el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Aeroport	Aeronaus		
	Model	Configuració	Nº d'aeronaus
BCN	F100	0/0/100	1
	A319	0/28/51	1
	A320	0/10/150	1
	ERJ135	0/0/37	1

Taula 8 **Fitxer *Aircraft positioning***

L'exemple descriu que en l'aeroport de Barcelona – El Prat ha d'haver 1 aeronau F100 amb una configuració de 0 seients en primera classe, 0 seients en classe *Business* i 100 seients en classe econòmica, 1 aeronau A319 amb una configuració de 0 seients en primera classe, 28 seients en classe *Business* i 51 seients en classe econòmica, 1 aeronau A320 amb una configuració de 0 seients en primera classe, 10 seients en classe *Business* i 150 seients en classe econòmica, i per últim, 1 aeronau ERJ135 amb una configuració de 0 seients en primera classe, 0 seients en classe *Business* i 37 seients en classe econòmica.

**9. Arxiu *Flight disruption*:** Aquest arxiu proporciona les interrupcions que els succeeixen als vols operats per la línia aèria considerada, és a dir, retards i cancel·lacions. Cada vol afectat consta amb la següent informació:

- Identificador de vol (únic).
- Data de sortida.
- Informació sobre la interrupció. En cas de retard la informació donada és el temps de demora. En cas de cancel·lació, la informació que es proporciona és un -1.

Per clarificar el contingut d'aquest arxiu, s'afegeix una taula amb un exemple explicat, a continuació.

Nº de Vol	Data de Sortida	Temps de retard
146	01/03/2008	60
920	01/03/2008	20
980	01/03/2008	10
1319	01/03/2008	61

Taula 9 **Fitxer *Flight disruption***

En l'exemple, es pot observar com el vol 146, el dia 01/03/2008 té un retard de 60 minuts, el vol 920 del dia 01/03/2008 té un retard de 20 minuts, el 980 de 10 minuts i el 1319, 61 minuts de retard.

**10. Arxiu Aircraft disruption:** Aquest arxiu proporciona els períodes de falta de disponibilitat d'aeronaus. Es mostra la informació següent:

- Identificador de l'aeronau que no està disponible.
- Data i horari de l'inici del període de indisponibilitat.
- Data i horari del final del període de indisponibilitat.

Aeronau	Data d'Inici	Hora d'Inici	Data de Fi	Hora de Fi
A320#72	01/03/2008	11:00	02/03/2008	15:00

Taula 10 Fitxer *Aircraft disruption*

En l'exemple es pot observar com l'aeronau A320#72 no estarà disponible entre les 11:00 hores del dia 01/03/2008 fins les 15:00 hores del dia 02/03/2008.

**11. Arxiu Airport disruption:** Aquest arxiu proporciona els períodes de reducció temporal de la capacitat dels aeroports. Es mostra la informació següent:

- Codi de l'aeroport on es produeix la reducció.
- Data i hora de l'inici del període de reducció.
- Data i hora del final del període de reducció.
- Capacitat de sortides aplicables en el període de reducció.
- Capacitat d'arribades aplicables en el període de reducció.

Aeroport	Data d'Inici	Hora d'Inici	Data de Fi	Hora de Fi	Sortides	Arribades
ORY	01/03/2008	18:00	01/03/2008	20:00	7	7

Taula 11 Fitxer *Airport disruption*

En aquest exemple es pot veure com l'aeroport París-Orly tindrà una reducció de la seva capacitat des de les 18:00 hores del dia 01/03/2008 fins les 20:00 hores del dia 01/03/2008 permetent 7 sortides i 7 arribades.



### 5.3 Disseny de l'algorisme - Pseudocodi

A continuació té lloc la versió en pseudocodi en el qual es basa aquest programa per poder obtenir un coneixement més profund sobre la seva resolució. El pseudocodi ha estat creat a partir de la fase de construcció de ROADEF.

#### Algorisme

---

```

1:randomly sort all aircraft in the set F
2:for all aircraft f ∈ F do
3:  for all flight j that have become infeasible because of
   delays on previous flights do
4:    set t = 60
5:    while delaying flight j by t minutes does not resolve
   infeasibility and t ≤ 960 do
6:      set t = t + 60 and try delaying flight j by t minutes
7:    end while
8:  end for
9:  for all flight j that have been cancelled do
10:   if creating a flight similar to j is feasible then
11:     create flight
12:   else
13:     cancel flights from j to the end of the rotation
14:   end if
15: end for*
16: for all flight j causing a violation of the maintenance
   constraints do
17:   cancel flights from j to the end of the rotation
18: end if
19: end for
20: end for
21: for all flight j that have been cancelled do
22:  if creating a flight similar to j is feasible then
23:   create flight
24:  else
25:   cancel flights from j to the end of the rotation
26:  end if
27: end for

```

---

En primer lloc, s'apliquen totes les interrupcions conegudes, s'intenta construir una rotació factible per aquells vols que pateixen perturbacions, i es comprova que aquesta sigui factible. En el cas que no continuï essent-ho, s'agafen els vols que no poden dur-se a terme en el seu horari previst i es retarden de 60 minuts en 60 minuts, fins a un màxim de 960 minuts, fins que les limitacions de capacitat dels aeroports i la resta de restriccions són satisfetes correctament.

Si la rotació resultant és factible, es manté sense canvis. En cas contrari, es cancel·len els vols. Allò pot esdevenir degut a una falta de capacitat en l'aeroport, o bé, perquè l'avió no pot satisfer la restricció de manteniment, o perquè un vol de la rotació s'ha cancel·lat i aquesta no es pot realitzar.

Per a tots aquells vols cancel·lats s'intenta crear un vol similar per comprovar si el resultat seria factible. En cas negatiu, aquests es mantenen a cancel·lats i no se'n crea cap de nou.

El tercer pas de la fase, és veure aquells vols que no compleixen amb la restricció de manteniment, és a dir, que l'aeronau no finalitza en l'estació on ha de realitzar el manteniment. Aquests que no són viables degut a la restricció esmentada, es cancel·len.

Finalment, es tornen a agafar tots els vols cancel·lats, per darrer cop, i es segueix el mateix procés, bucle, d'intent de creació d'un vol similar que s'ajusti a totes les restriccions. S'intenta substituir aquest vol per un altre, si no és possible es cancel·la, i si sí ho és, se'n crea un de nou.

## 5.4 Implementació de l'algorisme

En aquest apartat es descriuen les parts principals de l'algorisme junt amb el codi corresponent. Degut a l'extensió d'aquest, es presenta en la seva totalitat en els annexos.

### 5.4.1 Importació dels fitxers i cas a estudiar

Aquest mòdul té com a objectiu llegir les dades dels fitxers corresponents i transformar-los en el format necessari per poder aplicar l'algorisme.

Les classes aplicades en el projecte es basen en el disseny dels fitxers, però a més s'han inclòs camps auxiliars per facilitar els càlculs computacionals. A continuació es descriuen de forma resumida aquestes classes.

```
import java.util.Collections;
import java.util.HashMap;
import java.util.HashSet;
import java.util.LinkedList;
import java.util.List;
import java.util.Random;

import algorithm.Constraint;
import disruptions.Disruption;
import graph.Graph;
import inputstructs.Aircraft;
import inputstructs.BaseAirport;
import inputstructs.Flight;
import inputstructs.Itinerary;
import inputstructs.Maintenance;
import inputstructs.Rotation;
import solution.ACRotation;
import solution.Airport;
import solution.Leg;
import solution.Passenger;
import solution.PossibleCreation;
import solution.Solution;
```

Aquesta part crida el Test (cas) a resoldre. Aquest conté el test a estudiar, el temps per ser resolt i la *seed* escollida.

```

public class Algorithm {
    private final Test test;
    private final Input input;
    private final Random rng;

    private Algorithm(Test test, Input input) {
        this.test = test;
        this.input = input;
        this.rng = new Random(test.getSeed());
    }
}

```

#### 5.4.2 Aplicació de les interrupcions

Aquest segon mòdul s'encarrega d'aplicar les interrupcions a resoldre. Es dedica exclusivament a obtenir els temps de retard que ens indica el fitxer i aplicar-ho en la llista de les rotacions – *ACRotation*– de les diferents aeronaus. La quantitat de retards aplicables ve definida segons els *inputs* de ROADEF.

Cada iteració de l'algorisme s'obté a l'atzar. Això permet, poder obtenir diferents resultats de costos depenent de l'aplicació inicial d'aquestes alteracions produint així un resultat fiable.

A més es calcula el cost associat als minuts de retard indicats segons l'arxiu de *Configuration*. També és possible que alguns retards impliquin la cancel·lació directa del vol.

```

private void applyDisruptions() {
    for (Disruption d : input.getFlightDisruption()) {
        d.applyDisruption();
    }
    for (Disruption d : input.getAirportDisruption()) {
        d.applyDisruption();
    }
    for (Disruption d : input.getAircraftDisruption()) {
        d.applyDisruption();
    }
}

```

S'aplica la interrupció als vols, als aeroports i a les aeronaus. Aquestes classes són cridades per aplicar les interrupcions.

#### 5.4.3 Comprovar rotacions i aplicar retard

En aquest punt es comprova la fiabilitat de les rotacions un cop aplicades les interrupcions. Tota aquella que no és viable, s'estudia *leg per leg*. En cas de no ser factible, es retarda de 60 en 60 minuts fins a un màxim de 960 minuts, total de 16 hores.

```

public boolean checkRotation(List<Leg> legs, Aircraft a) {
    Leg previous = null;
    for (Leg current : legs) { // check all flights for this //
aircraft
        if (previous != null) { // first flight is always
feasible
            if
                (!Constraint.isFlightFeasibleWithPreviousMovingDeparture(previous,
current, a, 0)) {
                    if (!estimateSuccessiveDelay(previous,
current, a, 60, 960, 60)) {
                        return false;
                    }
                }
            }
            previous = current; // update previous
        }
    }
    return true;
}

```

Aquest mòdul s'encarrega de comprovar que després d'aplicar els retards oportuns no s'hagi vist afectat el temps mínim que necessita l'aeronau entre un vol i un altre –netejar, re-postar combustible, comprovar seguretat, etc.–. Aquest temps és el que es denomina temps de *turn-around*.

En el cas que no es compleixi, s'aplicarà un retard de 60 minuts sobre el vol posterior. Aquest valor de retard es basa en l'utilitzat per *Bisaillon, Cordeau, Laporte i Pasin (2010)* en el seu algorisme, perquè els resultats d'aquest projecte i els d'ells puguin comparar-se amb la major realitat possible. Encara que amb certesa no s'indiqui perquè s'utilitza aquest nombre i no el mínim de *turn-around*, es creu que és perquè d'aquesta manera no s'han de crear més retards posteriors.

#### 5.4.4 Cancel·lar *legs* no viables

Seguidament, es remouen de la rotació de les aeronaus aquelles no viables i s'afegeixen al llistat de *legs* cancel·lades. A partir de la llista de vols, es localitzen tots aquells vols que superen el límit de 960 minuts de retard acumulat.

```

public void removeFrom(ACRotation rotation, List<Leg> legsToDel)
{
    rotation.getLegs().removeAll(legsToDel);
    rotation.getCanceledLegs().addAll(legsToDel);
}

```

S'actualitza també la informació dins de la classe *AirportCapacity*.

```
public void resetAirportCapacitys(Solution sol) {
    for (BaseAirport ba : input.getAirports().getList()) {
        String code = ba.getCode();
        Airport ap = sol.getAirport(code);
        ap.reset();
    }
}
```

#### 5.4.5 Possible creació de nous vols

En aquest punt s'intenten crear vols similars als cancel·lats i resoldre l'operativa inicial. Sempre complint les restriccions establertes.

```
public Leg similarCreated(Graph g, Leg cancelled, Solution initSol) {
    int durationGo =
input.getDistMatrix().getCost(cancelled.getSource().getCode(),
cancelled.getEnd().getCode());
    int durationBack =
input.getDistMatrix().getCost(cancelled.getEnd().getCode(),
cancelled.getSource().getCode());

    Airport srcAirport = cancelled.getSource();
    Airport dst = cancelled.getEnd();
    int estimatedDeparture = cancelled.getDepartureTime();
    List<PossibleCreation> possibles =
initSol.getAircraftsAtTime(srcAirport, estimatedDeparture);
    Collections.sort(possibles, PossibleCreation.BY_MARGIN);
    // its possible to create artificial leg always if:
    // go+back+tr is lesser than waiting time to next flight
    PossibleCreation best = null;
    PossibleCreation biggest = null;
    int people = 0;
    for (Passenger p : cancelled.getPassengers()) {
        people += p.getQuantity();
    }
    for (PossibleCreation pc : possibles) {
        if (pc.getToNext() > durationGo + durationBack +
pc.getAc().getTransitTime()) {
            if (best == null || pc.getDist() <
best.getDist()) {
                if (pc.getAc().getCapacity() >= people) {
                    best = pc;
                    biggest = best;
                } else if (biggest == null ||
pc.getAc().getCapacity() > biggest.getAc().getCapacity()) {
                    biggest = pc;
                }
            }
        }
    }
}
```

```

        if (best != null) {
            int startTime = (estimatedDeparture + best.getDist())
% 1440;
            List<Passenger> pass = new
LinkedList<>(cancelled.getPassengers());

            int estimatedArriving = startTime + durationGo;
            int carry = 0;
            if (estimatedArriving > 1440) {
                carry = 1;
                estimatedArriving = estimatedArriving % 1440;
            }
            Leg leg = new Leg(best.getAc(),
cancelled.getDepartureDate(), startTime, estimatedArriving, carry,
pass,
                cancelled.getDate());
            leg.setSource(cancelled.getSource());
            leg.setEnd(cancelled.getEnd());
            carry = 0;
            int ee = startTime + durationGo +
best.getAc().getTurnRound() + durationBack;
            if (ee > 1440) {
                carry = 1;
                ee = ee % 1440;
            }
            Leg comeBack = new Leg(best.getAc(),
cancelled.getDepartureDate(),
                (estimatedArriving +
best.getAc().getTurnRound()) % 1440, ee, carry, new
LinkedList<Passenger>(),
                cancelled.getDate());
            comeBack.setSource(cancelled.getEnd());
            comeBack.setEnd(cancelled.getSource());
            leg.attachBack(comeBack);
            return leg;
        }
    }
}
return null;
}
}

```

#### 5.4.6 Creació de nous vols

Es creen i s'afegeixen els nous vols, tots aquells que han sortit factibles dins la creació de possibles *legs*. Es substitueixen els cancel·lats inicialment pels que s'ha trobat una solució. S'actualitzen tots els fitxers involucrats.

```

public void createNewFlight(Graph g, List<Leg> legsToReplace, Solution
initSol) {

    for (Leg cancelled : legsToReplace) {

        int durationGo =
input.getDistMatrix().getCost(cancelled.getSource().getCode(),
                                cancelled.getEnd().getCode());
        int durationBack =
input.getDistMatrix().getCost(cancelled.getEnd().getCode(),
                                cancelled.getSource().getCode());

        Airport srcAirport = cancelled.getSource();
        Airport dst = cancelled.getEnd();
        int estimatedDeparture =
cancelled.getDepartureTime();
        List<PossibleCreation> possibles =
initSol.getAircraftsAtTime(srcAirport, estimatedDeparture);
        Collections.sort(possibles,
PossibleCreation.BY_MARGIN);
        // its possible to create artificial leg always if:
        // go+back+tr is lesser than waiting time to next
flight

        PossibleCreation best = null;
        PossibleCreation biggest = null;
        int people = 0;
        for (Passenger p : cancelled.getPassengers()) {
            people += p.getQuantity();
        }
        for (PossibleCreation pc : possibles) {
            if (pc.getToNext() > durationGo + durationBack
+ pc.getAc().getTransitTime()) {
                if (best == null || pc.getDist() <
best.getDist()) {
                    if (pc.getAc().getCapacity() >=
people) {
                        best = pc;
                        biggest = best;
                    } else if (biggest == null ||
pc.getAc().getCapacity() > biggest.getAc().getCapacity()) {
                        biggest = pc;
                    }
                }
            }
        }
        // if is possible to create new flight...
        if (biggest != null) {
            best = biggest;
        }
    }
}

```

#### 5.4.7 Actualització de nous vols

S'actualitzen totes les dades: primerament la classe de passatgers, en segon lloc les hores de *departure*, *turn-around* i *arrivals*. Finalment es modifica el *ACRotation*.



```

public void swapFlight(Leg cancelled, Leg leg, Solution initSol) {
    List<Passenger> pass = cancelled.getPassengers();
    pass.clear();
    List<Passenger> news = leg.getPassengers();
    int capacity = leg.getAircraft().getCapacity();

    int estimatedArriving = leg.getArrivalTime();

    for (Passenger p : pass) {
        if (capacity - p.getQuantity() >= 0) {
            int pos =
p.getImplicationLegs().indexOf(cancelled);
            if (pos == p.getImplicationLegs().size() - 1) {

                p.getImplicationLegs().remove(cancelled);
                p.getImplicationLegs().add(leg);

                capacity -= p.getQuantity();
            } else {
                if (pos != -1) {
                    Leg c =
p.getImplicationLegs().get(pos);
                    Leg next =
p.getImplicationLegs().get(pos + 1);
                    int t = 0;
                    if (next.getDayAfter(c) > 0) {
                        t = 1440;
                    }
                    int dist = t +
next.getDepartureTime() - estimatedArriving + 1440;
                    if (dist >
next.getAircraft().getTurnRound()) {

                        p.getImplicationLegs().remove(cancelled);

                        p.getImplicationLegs().add(leg);
                        capacity -= p.getQuantity();
                    } else {

cancelled.getPassengers().add(p);
                    }
                }
            }
        } else {
            cancelled.getPassengers().add(p);
        }
    }
    leg.getAircraft().getRotation().removeSch(cancelled);
    initSol.addCreatedLeg(leg);
    initSol.addCreatedLeg(leg.getAttached());
}

```

#### 5.4.8 Impressió de la solució

En aquest darrer apartat s'imprimeixen els costos de les solucions factibles obtingudes en la instància del test desitjat. En últim lloc s'imprimeix la millor de les possibles solucions.

```

public static Solution solve(Test test, Input input) {
    Algorithm ag = new Algorithm(test, input);
    System.out.println("**STARTING**");
    Solution bestSol = ag.solveProblem();
    double startTime = System.currentTimeMillis();
    double elapsed = 0;

    // for (int i = 0; i < 100; i++) {
    while (elapsed < test.getMaxTime()) {
        Solution sol = ag.solveProblem();
        if (sol.getCost() < bestSol.getCost()) {
            // System.out.printf("IMPROV %8.2f
%n",bestSol.getCost());
            bestSol = sol;
        }
        elapsed = (System.currentTimeMillis() - startTime) / 1000;
    }
    plotSummary(bestSol, input);

    System.out.println("**FINISHED**");
    return bestSol;
}

public static void plotSummary(Solution sol, Input input) {
    int alteracionesVuelos = input.getFlightDisruption().size();
    int alteracionesAeropuertos =
input.getAirportDisruption().size();
    int alteracionesAeronaves = input.getAircraftDisruption().size();
    int itinerarios = input.getItineraries().size();
    int numVuelosCancelados = 0;
    int numVuelosCreados = 0;
    int numVuelos = 0;
    HashSet<Aircraft> aeronaves = new HashSet<Aircraft>();
    for (ACRotation acr : sol.getRotations()) {
        numVuelosCancelados += acr.getCanceledLegs().size();
        numVuelosCreados += acr.getCreatedLegs().size();
        numVuelos += acr.getLegs().size();
        for (Leg leg : acr.getLegs()) {
            aeronaves.add(leg.getAircraft());
        }
        for (Leg leg : acr.getCreatedLegs()) {
            aeronaves.add(leg.getAircraft());
        }
    }
    int numVuelosTotales = 0;
    for (Rotation r : input.getRotations()) {
        numVuelosTotales ++;
    }
    int naeronaves = aeronaves.size();

    System.out.printf("%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%d\t%8.2f%n",
alteracionesVuelos, alteracionesAeropuertos,
        alteracionesAeronaves, itinerarios,
numVuelosCancelados, numVuelosCreados, numVuelos, naeronaves,
        numVuelosTotales, sol.getCost());
    // System.out.printf("BEST FOUND %8.2f %n ",sol.getCost());
}
}

```

## 6. Anàlisi de resultats

Una vegada descrit el mètode de resolució proposat i explicada l'estructura de tot l'algorisme, tal i com s'esmenta en la secció d'objectius plantejats per a aquest projecte, resulta essencial realitzar una sèrie d'execucions del programa que permetin avaluar el rendiment de l'algorisme plantejat, així com quantificar el potencial de la metodologia desenvolupada i analitzar la qualitat de les solucions generades.

Abans de mostrar els resultats de l'algorisme plantejat, s'exposen les característiques dels *inputs* respecte el projecte de *Bisaillon, Cordeau, Laporte i Pasin (2010)*, que s'agafen com a referència per dur a terme les execucions del programa.

	<b>B02</b>	<b>B06</b>	<b>B07</b>	<b>B08</b>	<b>B09</b>
<b>Rec. Per (h)</b>	36	36	36	36	36
<b>Nb. Aircraft</b>	256	256	256	256	256
<b>Nb. Airports</b>	45	45	45	45	45
<b>Nb. Flights</b>	1423	1423	1423	1423	1423
<b>Nb. Itin</b>	11214	11565	11565	11565	11565
<b>Flight disr.</b>	255	230	229	229	230
<b>Aircraft disr.</b>	0	0	0	1	0
<b>Airport disr.</b>	0	0	0	0	1

Fig. 5 Característiques de les instàncies B (*Bisaillon, Cordeau, Laporte y Pasin, 2010*)

Les instàncies aplicades en aquesta execució són les presentades en el ROADEFF com B02, B06, B07, B08 i B09; només apareixent en la B08 interrupcions en el manteniment d'aeronaus i en la B09 interrupcions en la capacitat d'aeroports, i en tota la resta només apareixent alteracions en vols.

Una vegada obtinguts els resultats de les execucions, s'agafarà el millor resultat per poder realitzar una comparació entre *Bisaillon, Cordeau, Laporte i Pasin (2010)* i la resta de concursants en el ROADEF *Challenge 2009*, i el projecte desenvolupat en l'apartat d'Anàlisi i comparativa.

## 6.1 Resultats

Seguidament, es mostren els diferents resultats de part de les instàncies computades.

Es presenta la instància, el temps d'execució i la *seed* escollida. Després, el nombre de vols, aeroports, aeronaus alterats; els itineraris; els vols cancel·lats i creats; el nombre de vols totals inicial; el nombre d'aeronaus; nombre de vols totals final; i el cost total.

```
altvuelos  altairports  altaircraft  itinerarios  cancelados  creados
numvuelos  aeronaves  numvuelostotales  costetotal
```

```
B_02 300      23536364
```

```
**STARTING**
```

```
254  0  0      11214  289  582  2557  253  2844  9108723,60
```

```
**FINISHED**
```

```
B_06 300      23536364
```

```
**STARTING**
```

```
229  0  0      11565  239  432  2605  255  2844  13400332,50
```

```
**FINISHED**
```

```
B_07 300      23536364
```

```
**STARTING**
```

```
254  0  0      11565  294  594  2556  253  2844  14185863,10
```

```
**FINISHED**
```

```
B_08 300      23536364
```

```
**STARTING**
```

```
228  0  1      11565  255  458  2590  255  2844  13440565,20
```

```
**FINISHED**
```

```
B_09 300      23536364
```

```
**STARTING**
```

```
229  1  0      11565  227  406  2617  255  2844  13760501,50
```

```
**FINISHED**
```

```
B_02 300      65658412
```

```
**STARTING**
```

```
254  0  0      11214  321  666  2525  253  2844  8848961,20
```

```
**FINISHED**
```

```
B_06 300      34645813
```

```

**STARTING**
229  0  0  11565 230  416  2615  255  2844  12739081,80
**FINISHED**

```

B\_07 300 84851524

```

**STARTING**
254  0  0  11565 297  600  2551  253  2844  14759731,00
**FINISHED**

```

B\_08 300 41585202

```

**STARTING**
228  0  1  11565 242  434  2602  255  2844  13034148,00
**FINISHED**

```

B\_09 300 58452048

```

**STARTING**
229  1  0  11565 250  448  2595  255  2844  13598352,80
**FINISHED**

```

Aquestes dades pertanyen a cinc instàncies diferents. Primerament, s'ha executat una mateixa *seed* per a cada una de les instàncies, i en segon lloc, després de diverses execucions una de les *seeds* més òptimes per aquestes instàncies.

Les execucions han estat realitzades amb un temps de duració de 300 segons (5 min.).

Si es passa a estudiar la instància amb el cost més baix, cal recordar que cada instància és un cas diferents, tenint més o menys interrupcions.

B\_02 300 65658412

```

**STARTING**
254  0  0  11214 321  666  2525  253  2844  8848961,20
**FINISHED**

```

En quant a aquest resultat òptim, s'observen un total de 2525 vols inicials, dels quals 321 es van cancel·lar i es van crear 666 per poder garantir l'operativa. Cal tenir en compte que els costos indirectes també són importants com per exemple: la repercussió al pax o la imatge de la marca. Grau de insatisfacció.

## 6.2 Anàlisi i comparativa

Per tal de validar els resultats obtinguts, es comparen els valors de la resta de concursants. Cal afegir que els concursants van tenir només 48 hores per a realitzar l'algorisme.

Per tant, el cas inicial és el mateix per tots. S'ha estudiat el cas del guanyador del concurs i intentat adaptar al cas d'una companyia *low cost*.

A continuació, es presenten els costos totals resultants de l'execució de quatre instàncies.

	B02	B06	B07	B08
<b>Bisaillon et al.</b>	1522452,75	3789254,05	5488693,00	4069557,35
<b>Hanafi et al.</b>	9950888,70	9095248,10	19144460,30	10099607,00
<b>Acuna-Agost et al.</b>	2656393,25	4926204,05	8381142,30	509252,60
<b>Eggermont et al.</b>	4461933,95	8551295,95	13986055,45	8497737,40
<b>Darlay et al.</b>	6606995,30	9464384,25	15325407,75	9116067,25
<b>Peekstok and Kuipers</b>	2482349,85	5993131,95	8580429,20	6234247,00
<b>Jozefowicz et al.</b>	1220708,30	3218000,10	5039744,20	35093318,00
<b>Dickson et al.</b>	15710470,60	19611307,00	28392630,90	17341482,60
<b>Eggenberg and Salami</b>	INF	19611307,00	INF	62391786,00
<b>Lidia i Mar</b>	8848961,20	12739081,80	14185863,10	13034148,00

Fig. 6 Comparativa dels costos de les instàncies B

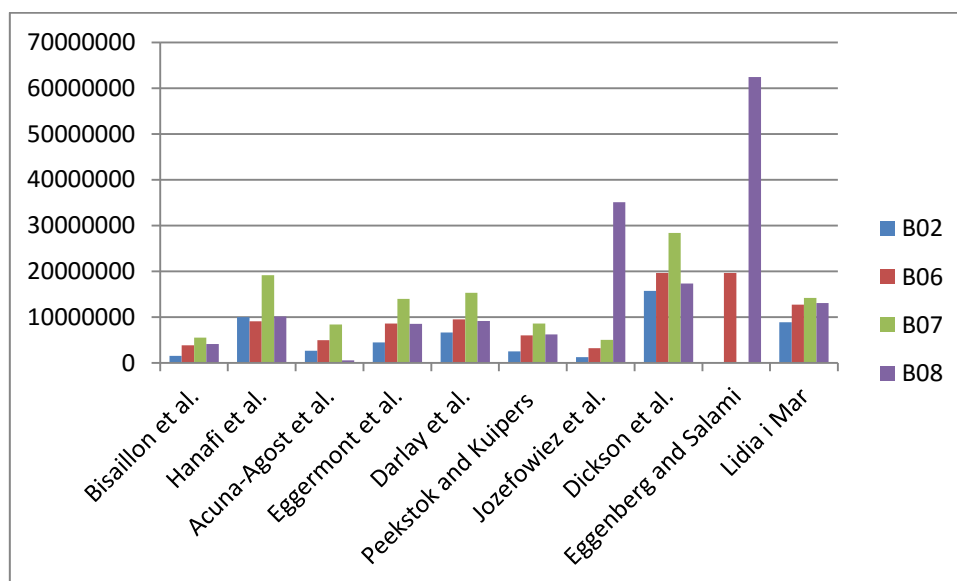


Fig. 7 Comparativa dels costos de les instàncies B

Es poden observar oscil·lacions importants entre aquests valors. Els resultats obtinguts a través de l'algorisme programat no són molts diferents a la resta, en molts casos, es troben valors mitjans. Cal destacar, la primera posició de Bisailon i la correlació existent entre Hanafi, Eggermont, Peekstok, Darlay i el propi. Es veu clarament un patró molt similar.

A través d'aquests resultats es pot preveure que si mitjançant un algorisme hi ha valors tant diferenciats, sense l'ús d'un algorisme aquesta diferència pot ser més notable.

Per tant, aquesta comparativa permet validar el programa, tot i que el càlcul de costos no s'hagi realitzat de la mateixa manera, i s'hagi modificat part del guió del concurs amb dades o càlculs més pròxims als d'una aerolínia *low cost*.

## 7. Cas d'estudi – Vaga ATC França 21-03-16

### 7.1 Introducció del cas

L'atur del control aeri en França el 22 de març, va provocar la cancel·lació de més de 1.000 vols i 500.000 minuts de retard, el qual va afectar a més d'un milió de passatgers, segons les dades de la patronal comunitària Aerolínies per Europa –associació que agrupa als grups tradicionals i low cost més destacats: Grup IAG, Lufthansa, Ryanair, EasyJet i Air France-KLM, Norwegian i Finnair.

Els vols més afectats van ser els que tenien com a destinació França o que havien de sobrevolar per l'espai aeri francès; obligant a les diferents companyies a cancel·lar-los o a redirigir la ruta en el cas que sigui possible.

En el cas de la companyia Vueling, més del 40% de vols sobrevolen l'espai aeri francès, fet que provocà cancel·lacions, retards, reprogramacions de vols, pèrdues de connexió. Es contemplà l'opció de redirigir moltes de les rutes pel voltant del país, però era una acció que realitzaven totes les altres companyies que també sobrevolaven aquest espai, fet que obligà a l'autoritat reguladora Eurcontrol regular també aquell sector.



Fig. 8 L'aeroport del Prat afectat per la vaga de controladors francesos



## 7.2 Implementació

Primerament esmentar que degut a la confidencialitat de les dades no es poden mostrar els *inputs* reals.

Prosseguir amb la implementació del cas: s'escullen aleatòriament disset aeronaus –de les quals dotze són A320, tres A319 i dos A321– d'una companyia *low cost* que opera tant a Europa, com a l'Orient Mitjà i el Nord-Oest africà.

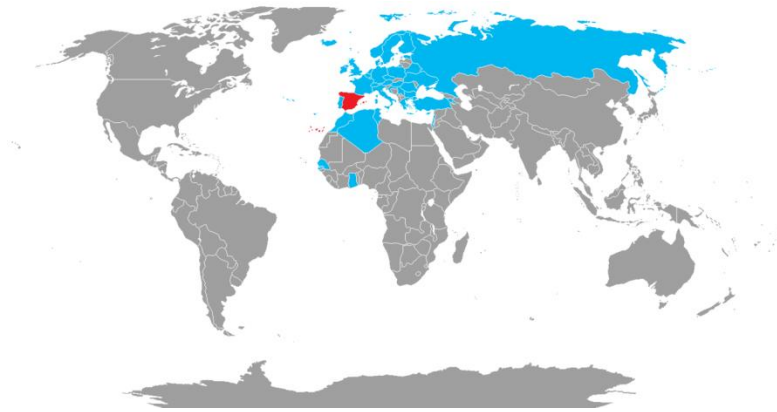


Fig. 9 Destinacions

Aquestes aeronaus realitzen un itinerari d'entre quatre i set *legs*; es troben basades en diferents bases de la companyia, principalment a Barcelona, tenint totes elles programat un *Daily* –programació inicial prevista del dia– i algunes d'elles tenint programada una tasca més extensa.

En relació als *inputs*, aquests es completen en el mateix format que a l'apartat *Inputs* i són introduïts en el programa –algorisme creat en la part prèvia d'aquest projecte– per ésser executats. És a dir, es completen els fitxers amb les dades del *Daily* –programació inicial prevista del dia estudiat.

Un cop obtingudes les dades inicials del dia, són comparades amb el resultat final de l'operativa per tal de poder calcular el cost real segons la funció objectiu del programa.

Els canvis que han tingut lloc s'extreuen de l'eina de programació de la companyia aèria –retards, cancel·lacions, pèrdues de connexions, creació de nous vols, reassignació de passatgers (*upgrade, same* o *downgrade*).

### 7.3 Anàlisi de resultats

Els costos s'han calculat en el moment de ROADEFF (2009), no en el moment actual.

Instància	Temps (seg)	Cost Aerolínia	Cost Algorisme	GAP
21	10	7142000,0	4863200,0	31,91%

Fig. 10 Càlcul del GAP

Un cop calculats els costos, s'aprecia la gran diferència entre els valors. El gap resultant és d'un 31,91%.

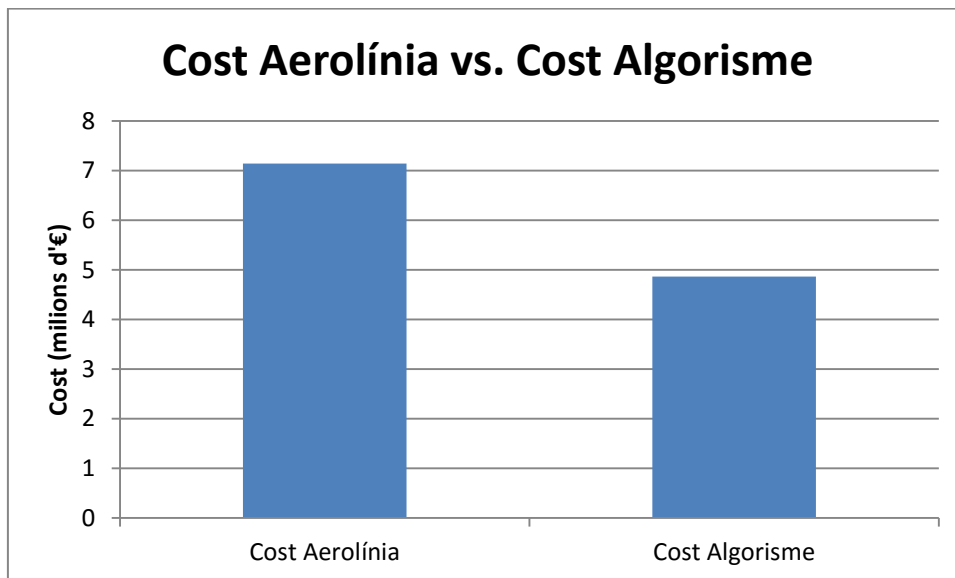


Fig. 11 Diferència de costos segons el mètode

Amb aquesta comparativa, es pot observar el marge de competitivitat existent. Aquest marge, que és aproximadament d'un 30%, és una quantia de diners molt significant.

Cal esmentar que pot haver un marge d'error d'un 5%; tot i aquest, el resultat són molt rellevants.

D'aquí la importància de fer servir recursos d'investigació operativa, ja que, es tracta d'una gran pèrdua o un no guany monetari.

Agafant dades reals, s'ha observat que l'aerolínia s'estalviaria un 25% o 30% dels costos de l'operativa del dia a dia, evitant que els problemes de curt termini tingui una repercussió important a mig termini.

En aquest cas, nomé tenint en compte un dia de l'operativa d'una *low cost*, el marge ja és molt significatiu.

Les companyies tradicionals, solen disposar d'eines de recolzament a la presa de decisions, en canvi les companyies "*low cost*", no destinen recursos monetaris en aquestes. Com a conseqüència, les pèrdues són molt grans en dies amb un nivell elevat d'interrupcions, o simplement en temporada alta.

## 8. Conclusions i treball futur

### 8.1 Conclusions

Durant la fase inicial d'aquest projecte, es va considerar com a objectiu principal estudiar a fons la gestió de les disrupcions en el departament de control operacional d'una companyia aèria *low cost*, degut a les mancances observades en el Departament: insuficiència de recursos tant a nivell de personal com a nivell material. De totes maneres, a mesura que es va anar revisant i analitzant la documentació i estudis existents fins a dia d'avui, es va creure prioritari pel treball el fet d'analitzar dos dels problemes existents en el cas d'interrupcions a petita escala: *Aircraft Recovery* i *Passenger Recovery*.

Això va significar centrar l'atenció tant en els processos de gestió de les disrupcions que es duen a terme en el OCC –*Operations Control Center*–, com en els elements que hi intervenen, i treballar el tema tractant de modelar un sistema que permetés augmentar l'eficiència del procés de la presa de decisions en el Departament.

Aquest nou rumb del projecte ha esdevingut a discutir la importància de l'existència d'eines de recuperació que tinguin en compte tant la part comercial com l'operativa alhora, facilitant la gestió de: decidir quina acció –retards, cancel·lacions, etc.– és la que millor s'adapta a l'objectiu de reprendre l'operativa el més ràpid possible amb el menor cost possible, tenint en compte l'impacte sobre els passatgers; procés realment complicat. En la mateixa línia de treball, s'ha analitzat l'estat de l'art del problema mitjançant un anàlisi detallat de la documentació científica més rellevant sobre aquest tema. Això ha permès veure que, en l'àmbit de problemes de recuperació encara hi ha molt per recórrer, ja que, a més de les interrupcions –internes o externes–, existeixen moltes restriccions les quals han de ser complertes; fet que indica el canvi cap a l'automatització de processos i no dependre únicament d'una persona, sinó disposar d'eines de recolzament per a aquesta. Per tal de plasmar de forma clara el problema, s'ha descrit al detall el procés que implica re-assignar aeronaus i passatgers simultàniament en el cas de disrupcions a petita escala, és a dir, reprendre l'operativa normal tan aviat com sigui possible en el cas d'interrupcions en la programació de vols inicial. També esdevé necessari, plasmar el context general en què s'emmarca tota la problemàtica, sempre amb la inspiració en una companyia aèria real: Vueling.

Com a part pràctica del projecte, s'ha dut a terme el desenvolupament d'un algorisme per automatitzar el procés de re-assignació d'aeronaus i passatgers de forma simultània, validant així la implementació del Java, el qual ha estat comparat directament amb diferents casos com és el de *Bisaillon, Cordeau, Laporte i Pasin (2010)*, entre d'altres.

El mètode de resolució ha estat basat en l'heurística *Simple Large Neighbourhood*: tenint com a objectiu aconseguir que l'algorisme sigui viable el més ràpid possible executant un número molt gran de moviments simples i ràpids. El resultat és un algorisme altament fiable, eficient i robust.

Aquests experiments han permès observar una millora considerable especialment en quant a temps necessari que es requereix per realitzar aquest procés respecte al temps utilitzat habitualment per les companyies aèries.

Aquesta eina va enfocada a les grans companyies aèries o a aquelles que preveuen un gran creixement, com és el cas de Vueling: la companyia ha augmentat la seva flota considerablement intentant respondre a les necessitats de mercat, però aquest augment ha d'anar a concorde amb els recursos disponibles. Si anteriorment era possible que una sola persona gestionés el procés de la presa de decisions, actualment es requereixen d'altres eines de recolzament per poder adaptar-se plenament a tot tipus de situacions. És important ser proactiu i saber gestionar el canvi per poder mantenir-se en el mercat.

Per concloure, destacar que el problema estudiat, és ara per ara, el problema crític de la companyia aèria Vueling. En el moment de la selecció de la temàtica, es preveia que aquest problema tindria repercussió, però no fins a aquest punt. Després d'obtenir un marge de competitivitat d'un 30% aproximadament d'un estudi d'un dia real, es confirma el gran ajut que poden proporcionar aquest tipus d'eines d'investigació operativa.

Agafant dades reals, s'ha observat que l'aerolínia s'estalviaria un 25% o 30% dels costos de l'operativa del dia a dia, evitant que els problemes de curt termini tingui una repercussió important a mig termini.

Finalment i per acabar, fer referència a la orientació de les línies aèries cap a l'automatització dels processos, no significat una substitució de l'home per la màquina sinó una ajuda. Les eines de recuperació són un mitjà que agilitza el procés de la presa de decisions, oferint diferents solucions factibles, però qui acaba realment prenent la decisió són les persones.

## 8.2 Àmbits futurs de treball

El problema de recuperació d'aeronaus i passatgers és molt complex; podria ser seguit el seu estudi de cara a la seva millora i obtenció de millors resultats en el futur.

Fent una revisió dels resultats obtinguts i considerant algunes de les conclusions extretes, s'enumeren a continuació les que es consideren com a possibles línies futures de treball que poden donar continuïtat al projecte presentat:

### 1. Ampliar l'algorisme i analitzar diferents escenaris:

- Dur a terme un cas d'estudi el més real possible, és a dir, simular un dia d'operativa complicat amb totes les aeronaus, vols, restriccions, alteracions, etc. del dia a estudiar.
- Re-assignar aeronaus i passatgers simultàniament en el cas de disrupcions a gran escala.
- Crear o incloure un algorisme que afegís el problema de *Crew Recovery* per aconseguir una solució molt més òptima, i sobretot, molt més realista que l'obtinguda en aquest projecte.
- Adaptar l'algorisme perquè vagi resolent els problemes a la vegada que van sorgint, és a dir, en el projecte es poden observar totes les alteracions que ocorren el dia que s'estudia podent decidir com s'han de resoldre, però a la realitat s'ha de prendre una decisió en temps real.

### 2. Considerar noves característiques per millorar el *Software*:

- Les restriccions en relació a la capacitat d'aeroports haurien de deixar-se de tenir en compte, ja que, existeix una autoritat reguladora –Eurocontrol– que s'encarrega de controlar-les assignant retards.
- Contemplar la possibilitat d'avions en posicional, en el cas de complir la restricció de manteniment o altres.
- Retardar de minut en minut, evitant retardar 60 minuts directament.
- Considerar el *surface* –transport per terra– i acords FIM –vols amb altres companyies aèries– en el cas de desviaments o pèrdues de connexió.

	CASOS D'ESTUDI	CASOS REALS
<b>Restricció de la capacitat</b>	La companyia les controla.	Controlades per les autoritats reguladores. Eurocontrol, cas Europeu.
<b>Vols posicionals</b>	No es considera.	En cas de necessitat s'envia un <b>avió en posicional</b> .
<b>Retard de 60 minuts</b>	No es considera un temps variable	Es va retardant de minut en minut segons convingui
<b>Retard màxim</b>	16 hores	No hi ha un màxim ni un mínim establert.
<b>Surface</b>	No es contempla.	En cas d'aeroport propers es contempla transportar els pax a través d'un altre medi de transport.
<b>Vols amb altres companyies</b>	No es contempla la possibilitat.	Acords FIM.

Fig. 12 Comparació Casos d'Estudi i Casos Reals

3. Afegir un *local search* en l'algorisme, per millorar les solucions.

## 9. Referències bibliogràfiques

### Articles

**A. Morata** (2012), *Sistemas de recuperación de pasajeros tras interrupciones de pequeña escala*.

**S. Rubio** (2014), *Flight disruptions: Passenger recovery*.

**K. Sinclair, JF. Cordeau, G. Laporte** (2013), *Improvements to a large neighborhood search heuristic for an integrated aircraft and passenger recovery problem*.

**N. Jafari, S. Hessameddin** (2011), *Simultaneous recovery model for aircraft and passengers*, Journal of the Franklin Institute 384 1638-1655.

**C. Barnhart, C. Barry, Smith** (2012), *Quantitative Problem Solving Methods in the Airline Industry*, International Series in Operations Research & Management Science, Volume 169.

**S. Bratu, C. Barnhart** (2005), *An analysis of passenger delays using flight operations and passenger booking data*, Air Traffic Control Quarterly.

**S. Bisailon, JF. Cordeau, G. Laporte, F.Pasin** (2010), *A large neighbourhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem*.

**ROADEF Challenge** (2009).

### Pàgines Web

**LA VANGUARDIA**

<http://www.lavanguardia.com/local/barcelona/20160321/40590688708/cancelado-vuelos-aeropuerto-el-prat-huelga-controladores-franceses.html>